

Adaptive Regelung von Robotersystemen in Kontaktaufgaben

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

von M.Sc. Vadym Rusin
geboren am 10.08.1976 in Vladikavkaz/Russland

genehmigt durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis
Prof. Dr.-Ing. Jozef Suchý
Dr. Sc.techn. Ulrich Schmucker

Promotionskolloquium am 12.10.2007

Abstrakt

Robotersysteme finden immer häufiger den Einsatz in der Automatisierung von Kontaktaufgaben. Hierbei wird von den Robotersystemen ein mechanischer Kontakt mit der Umgebung und eine Gewährleistung der gewünschten mechanischen Interaktion gefordert. Typische Beispiele von Robotersystemen in Kontaktaufgaben sind industrielle Manipulationsroboter (Aufgaben der mechanischen Montage: Einfügen, Schrauben; Aufgaben der mechanischen Verformung: Prägen, Bohren, Biegen; Aufgaben der mechanischen Oberflächenbearbeitung: Entgraten, Fräsen, Schleifen, Polieren, Reinigen etc), Serviceroboter (Interaktion mit der Umgebung während der Serviceoperationen), mobile Schreitroboter sowie aktive Exoskellete (Interaktion mit dem Untergrund während der Lokomotion), kooperative Roboter und künstliche Hände (Handhabung eines gemeinsamen Objektes) usw. Hierbei sind neben den traditionellen Anforderungen an den Positions- und Orientierungsverlauf zusätzliche Bedingungen hinsichtlich der Qualität der Kontaktnahme und des Kontaktverlaufs zu erfüllen.

Gemeinsam für alle Kontaktaufgaben ist die erzwungene bzw. gebundene Roboterbewegung infolge der Umgebungseinflüsse. Der mechanische Energieaustausch zwischen dem Robotersystem und der Umgebung kann im Kontakt erheblich variieren und das Verhalten des Robotersystems enorm beeinflussen. Die Kontaktkraft gilt als Kennwert dieses Energieaustausches und soll für eine erfolgreiche Durchführung der Kontaktaufgaben gemessen und in den Steuerungs- und Regelungsalgorithmen berücksichtigt werden.

Die vorliegende Dissertation widmet sich dem Entwurf von Methoden zur Steuerung und Regelung der Roboterbewegungen in Kontaktaufgaben und zur Optimierung des Verhaltens des Robotersystems beim mechanischen Kontakt mit der Umgebung. Ein besonderer Wert ist auf die Kontaktstabilität und auf die Minimierung der mechanischen Strukturbelastungen gelegt. Zum Zweck der Untersuchung sind folgende charakteristische Robotersysteme (Abb.0.1) ausgewählt bzw. entwickelt:

- ein stationärer industrieller Manipulationsroboter „Mitsubishi RV-E3J“.
- zwei mobile sechsbeinige Schreitroboter „Slair2“ und „Katharina“.



Abb.0.1: Manipulationsroboter "Mitsubishi RV-E3J", Schreitroboter "Slair2" und Schreitroboter "Katharina".

Ein hochdynamischer industrieller Manipulationsroboter wird im Regelfall fest in der Umgebung eingesetzt und bildet im Kontakt mit der Umgebung eine geschlossene kinematische Kette. Infolgedessen können die Kontaktkräfte, was die Belastung der Roboterstruktur entspricht, die bezogene Grenze der maximalen Antriebsleistung statisch erreichen und diese Grenze, je nach Geschwindigkeit der Kontaktnahme dynamisch stark überschreiten. Demzufolge steht im Mittelpunkt der Untersuchungen auf dem Manipulationsroboter die Regelung der Kontaktkräfte bzw. seiner mechanischen Nachgiebigkeit. Infolge der Nichtlinearitäten im Robotersystem (Elastizität in Gliedern und Gelenken, Begrenzungen im Stellglied, Spiel, trockene und viskose Reibung in Gelenken, variierbare geometrische Konfiguration) sowie in der Umgebung (variierbare mechanische und geometrische Eigenschaften des Kontaktes, variable Last) sind die Regelungsalgorithmen anpassungsfähig auszulegen.

Ein mobiler Schreitroboter kombiniert dank seiner Konstruktion die Eigenschaften einer hoch beweglichen, manövrierfähigen und adaptionsfähigen Schreitplattform (Transport von Personen, Last und technologische Ausrüstung) mit den Eigenschaften eines Mehrzweckmanipulators mit paralleler Kinematik (Objektmanipulation, Handhabung von Gegenständen und Werkzeuge).

-Während der Lokomotion agiert ein mobiler Schreitroboter frei und bildet im Kontakt mit der Umgebung eine offene kinematische Kette. Im stationären Betrieb ist die Summe vertikaler Komponenten der Kontaktkräfte unter den Roboterfüßen dem Robotergewicht gleich. Die explizite Einstellung anderer Kontaktkräfte ist nicht möglich. Im dynamischen Betrieb hängen die Kontaktkräfte von der Roboterdynamik und von den mechanischen Eigenschaften des Untergrundes ab. Eine quantitative Identifikation von letzteren ist nicht möglich. Es ist ausschließlich machbar, diese Eigenschaften in den Kategorien „steifer als“ bzw. „nachgiebiger als“ einzuschätzen. Darüber hinaus ist ein Schreitroboter unterdeterminiert, wenn er mehr als drei Stützbeine besitzt. Demzufolge steht im Mittelpunkt der Untersuchungen auf dem mobilen Schreitroboter die koordinierten Nachgiebigkeitsregelung von Roboterbeinen abhängig von den mechanischen Untergrundeigenschaften sowie die Organisation und Steuerung der Roboterlokomotion über ein komplexes Gelände anhand der Information über die Auflagereaktionen.

-Während der Durchführung von Serviceoperationen kann ein Schreitroboter als ein stationärer Manipulationsroboter mit paralleler Kinematik betrachtet werden, solange die Roboterfüße sich in den Reibungskegeln befinden. Im Mittelpunkt der Untersuchungen auf dem stationären Schreitroboter steht hierbei die Regelung der mechanischen Nachgiebigkeit des Roboterkörpers und der Kontaktkräfte im Endeffektor.

Infolge der gleichen Nichtlinearitäten im Robotersystem und in der Umgebung sind die Regelungsalgorithmen ebenso anpassungsfähig auszulegen.

In vorliegender Dissertation werden die Algorithmen zur Steuerung und Regelung der Roboterbewegung im Kontakt ausgewählt bzw. neu entwickelt und am Beispiel der genannten Robotersysteme untersucht. Diese Algorithmen sind allgemeingültig und können zur Lösung einer Vielzahl von Aufgaben der mechanischen Interaktion zwischen dem Robotersystem und der Umgebung verwendet werden.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand am Institut für Elektrische Energiesysteme der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis für die großzügige Unterstützung und das stete Interesse sowie für die intensive Betreuung dieser Arbeit. Prof. Palis hat sich ferner sehr stark für die persönlichen Interessen der Doktoranden eingesetzt.

Einen großen Meilenstein dieser Arbeit legten die Projekte „Multisensorielle Verfahren zur Bewegungssteuerung sechsbeiniges Schreitroboters“ und „Kontaktbehandlung in der Simulation von Mehrkörpersysteme“ zugrunde. Die Projekte liefen am Fraunhofer Instituts für Fabrikbetrieb und -automatisierung Magdeburg als ein Teil des von der DFG initiierten interdisziplinären Schwerpunktprogramms „Autonomes Laufen“ und als ein Landesprojekt. Dem Projektleiter, Herrn Dr. Sc. techn. Ulrich Schmucker, möchte ich für die allseitige Unterstützung bei der Durchführung der Projekte und bei der Entwicklung der Versuchstände besten Dank aussprechen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. habil. Anatoli Schneider, M.Sc. Yuriy Zavgorodniy und M.Sc. Mykhaylo Konyev für die langjährige und fruchtbare Zusammenarbeit, für die zahlreichen Diskussionen und in erster Linie, für das freundliche Arbeitsklima.

Schließlich möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Familie für die langjährige Unterstützung während der Promotionszeit bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG IN DIE REGELUNG DER ROBOTERSYSTEME BEI MECHANISCHER INTERAKTION MIT DER UMGEBUNG	1
1.1	EINLEITUNG IN DIE PROBLEMATIK	1
1.1.1	RELEVANTE DARSTELLUNG DER ROBOTERSYSTEME	1
1.1.2	RELEVANTE DARSTELLUNG DER KONTAKTAUFGABEN	2
1.1.3	KENNWERTE DER KONTAKTREGELUNG	4
1.1.3.1	<i>KRAFT / DREHMOMENT IM KONTAKT</i>	5
1.1.3.2	<i>IMPEDANZ / ADMITTANZ DES ROBOTERSYSTEMS</i>	6
1.2	BIOLOGISCHER HINTERGRUND ZUR REGELUNG MECHANISCHER INTERAKTION	8
1.2.1	ORGANISATION DES BEWEGUNGSSYSTEMS	9
1.2.2	MODELL DER MOTORIK	11
1.3	STAND DER TECHNIK	11
1.3.1	KONZEPTE ZUR REGELUNG DER ROBOTERBEWEGUNG IM KONTAKT	12
1.3.1.1	<i>PASSIVE STEUERUNG DER ROBOTERNACHGIEBIGKEIT</i>	13
1.3.1.2	<i>AKTIVE REGELUNG DER ROBOTERNACHGIEBIGKEIT</i>	14
1.3.1.3	<i>AKTIVE REGELUNG DER KONTAKTKRAFT</i>	15
1.3.1.4	<i>ZUSAMMENFASSUNG UND TRENDS</i>	17
1.3.2	PROBLEMATIK DER KONTAKTNAHME UND KONTAKTSTABILITÄT	18
1.3.2.1	<i>STABILISIERUNG DER KONTAKTNAHME IM KRAFTREGLERMODUS</i>	19
1.3.2.2	<i>STABILISIERUNG DER KONTAKTNAHME IM POSITIONSREGLERMODUS</i>	19
1.3.2.3	<i>STABILISIERUNG DER BEWEGUNG IM KONTAKT</i>	20
1.3.3	ADAPTIVE REGELUNGSMETHODE	20
1.3.3.1	<i>ANZUPASSENDE EINHEITEN</i>	21
1.3.3.2	<i>ART DER ADAPTATION</i>	22
1.3.3.3	<i>METHODEN ZUR SYNTHESE ADAPTIVER REGELUNGSSYSTEME</i>	24
1.3.4	SYSTEMMODELLIERUNG UND IDENTIFIKATION	25
1.4	ZIELSETZUNG UND AUFGABENSTELLUNG	28
2	MODELLIERUNG UND SIMULATION DES ROBOTERSYSTEMS IM KONTAKT	29
2.1	MODELLIERUNG DES ROBOTERSYSTEMS IM KONTAKT MIT AKTIVER UMGEBUNG	31
2.1.1	MODELLIERUNG DER GLIEDERN	32
2.1.1.1	<i>STARRE GLIEDER</i>	32
2.1.1.2	<i>ELASTISCHE GLIEDER</i>	34
2.1.2	MODELLIERUNG DER GELENKE	35
2.1.2.1	<i>BEGRENZUNGEN IM STELLGLIED</i>	36
2.1.2.2	<i>SPIEL UND ELASTIZITÄT IM GETRIEBE</i>	36
2.1.2.3	<i>REIBUNGSEFFEKTE</i>	37
2.1.3	MODELLIERUNG EINES ROBOTERACHSANTRIEBES	39
2.2	MODELLIERUNG DES ROBOTERSYSTEMS IM KONTAKT MIT PASSIVER UMGEBUNG	40
2.2.1	STARRER KONTAKT MIT PASSIVER UMGEBUNG	43
2.2.2	NACHGIEBIGER KONTAKT MIT PASSIVER UMGEBUNG	44
2.2.2.1	<i>ELASTISCHER KONTAKT</i>	45
2.2.2.2	<i>ELASTISCH-PLASTISCHER KONTAKT</i>	47
2.3	EIGENSCHAFTEN DES ROBOTERSYSTEMS IM KONTAKT UND MODELLAUSWAHL	49
2.4	SIMULATION DES ROBOTERSYSTEMS IM KONTAKT	53
2.4.1	DETEKTIERUNG DER KOLLISIONEN	54
2.4.2	BERECHNUNG DER KONTAKTPARAMETER	57
2.4.3	BERECHNUNG DER KONTAKTANTWORT	57
2.4.3.1	<i>IMPULSBASIERTE METHODE</i>	57
2.4.3.2	<i>KRAFTBASIERTE METHODE</i>	58

2.4.4	UPDATE DER SYSTEMDYNAMIK	62
2.5	EXPERIMENTELLER AUFBAU EINER MKS-UMGEBUNG MIT DER FÄHIGKEIT ZUR KONTAKTBEHANDLUNG	62
3	BASISOPERATIONEN ZUR LÖSUNG DER KONTAKTAUFGABEN	66
3.1	KONTAKTRAUMDARSTELLUNG	67
3.2	ERMITTLUNG DER KONTAKTINFORMATION	69
3.2.1	DETEKTIERUNG DER KONTAKTEREIGNISSE	71
3.2.2	ERMITTLUNG DER KONTAKTGEOMETRIE	71
3.2.3	ERMITTLUNG DER KONTAKTMECHANIK	71
3.3	IDENTIFIKATION DES UNTERLAGERTEN REGELKREISES	73
3.4	THEORETISCHER HINTERGRUND DER RELEVANTEN ADAPTIVEN REGELUNGSLGORITHMEN	74
3.4.1	ADAPTIVE REGELUNGSLGORITHMEN MIT DEM REFERENZMODELL	78
3.4.1.1	LYAPUNOV-FUNKTIONEN-BASIERTES VERFAHREN	79
3.4.1.2	GRADIENTENBASIERTES VERFAHREN	80
3.4.1.3	VERFAHREN OHNE MESSUNG DES VOLLEN REGELSTRECKENZUSTANDES	84
3.4.1.4	GRUNDREGLER IN DEN STRUKTUREN MIT DEM REFERENZMODELL	86
3.4.2	ADAPTIVE REGELUNGSLGORITHMEN MIT DEM IDENTIFIKATOR	87
3.4.2.1	IDENTIFIKATION DER REGELSTRECKE IN FORM DER ÜBERTRAGUNGSFUNKTION	88
3.4.2.2	IDENTIFIKATION DER REGELSTRECKE IN FORM DES ZUSTANDSRAUMMODELLS	92
3.4.2.3	GRUNDREGLER IN DEN STRUKTUREN MIT DEM IDENTIFIKATOR	93
3.5	REGELUNG DER NACHGIEBIGKEIT	94
3.5.1	SYNTHESE DER ZIELIMPEDANZ	97
3.5.2	ADAPTIVE REGELUNG DER NACHGIEBIGKEIT DES „ROBOTER“ SYSTEMS	99
3.5.3	ADAPTIVE REGELUNG DER NACHGIEBIGKEIT DES GEBUNDENEN „MANIPULATOR-UMGEBUNG“ SYSTEMS	102
3.5.4	ADAPTIVE REGELUNG DER NACHGIEBIGKEIT DES GEBUNDENEN „SCHREITROBOTER-UNTERGRUND“ SYSTEMS	104
3.6	REGELUNG DER KONTAKTKRAFT	107
3.6.1	ADAPTIVE REGELUNG DER KONTAKTKRAFT	107
4	EXPERIMENTELLE UND SIMULATIONSERGEBNISSE VON KONTAKTAUFGABEN MIT STATIONÄREN ROBOTERN	109
4.1	BESCHREIBUNG DER TESTPLATTFORM	110
4.2	ERMITTLUNG DER KONTAKTINFORMATION	112
4.2.1	ERMITTLUNG DER KONTAKTGEOMETRIE	112
4.2.2	ERMITTLUNG DER KONTAKTMECHANIK	113
4.3	ADAPTIVE NACHGIEBIGKEITSREGELUNG DES „ROBOTER“ SYSTEMS	114
4.3.1	ADAPTIVE REGELUNG DER NACHGIEBIGKEIT DES „ROBOTER“ SYSTEMS UNTER DEM EINGRIFF EXTERNER KRAFT	115
4.3.2	ADAPTIVE REGELUNG DER NACHGIEBIGKEIT DES „ROBOTER“ SYSTEMS IM KONTAKT MIT DER UMGEBUNG	118
4.4	ADAPTIVE NACHGIEBIGKEITSREGELUNG DES GEBUNDENEN „MANIPULATIONSROBOTER-UMGEBUNG“ SYSTEMS	121
4.5	ADAPTIVE REGELUNG DER KONTAKTKRAFT	123
4.6	MECHANISCHE MONTAGE	125
4.7	MECHANISCHE VERFORMUNG UND OBERFLÄCHENBEARBEITUNG	129
4.7.1	DURCHFahren VON BAHNKURVEN MIT HOHER GENAUIGKEIT	129
4.7.2	DURCHFahren VON BAHNKURVEN UNTER EINHALTUNG GEWÜNSCHTER KONTAKTKRAFT	129
4.7.3	DURCHFahren VON UNGENÜGEND BEKANNTEN BAHNKURVEN	131
5	EXPERIMENTELLE UND SIMULATIONSERGEBNISSE DER KONTAKTAUFGABEN MIT MOBILEN ROBOTERN	133
5.1	BESCHREIBUNG DER TESTPLATTFORM	134

5.2	GENERIERUNG REAKTIVER GANGARTEN	136
5.3	ORGANISATION EINES ADAPTIVEN SCHRITTZYKLUS	140
5.4	STABILISIERUNG DES MASSENMITTELPUNKTES EINES SCHREITROBOTERS INNERHALB DES STÜTZPOLYGONS	142
5.5	BEWEGUNG ÜBER DAS GELÄNDE MIT VARIIERBAREN MECHANISCHEN UNTERGRUNDEIGENSCHAFTEN	144
5.5.1	AKTIVE VERTEILUNG DER REAKTIONSKRÄFTE	144
5.5.2	ADAPTIVE NACHGIEBIGKEITSREGELUNG DES „SCHREITROBOTER-UNTERGRUND“ SYSTEMS	148
5.6	KLETTERN	152
5.6.1	ERMITTLUNG DER REIBUNGSKEGELN	152
5.6.2	HINDERNISSE MIT MÄSSIGER STEIGUNG	153
5.6.3	HINDERNISSE MIT VERTIKALER STEIGUNG	153
6	ZUSAMMENFASSUNG	155
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	157
	SYMBOLVERZEICHNIS	158
	LITERATURVERZEICHNIS	159

Kapitel 1

Einführung in die Regelung von Robotersystemen in Kontaktaufgaben

In diesem Kapitel wird in die Problematik der kontaktbehafteten Aufgaben von Robotersystemen eingeleitet, werden die biologische Hintergründe zur Regelung eines mechanischen Systems im Kontakt gegeben, wird Stand der Technik im Bereich Steuerung und Regelung von Robotersystemen in Kontaktaufgaben sowie im Bereich adaptive Regelung gegeben. Zum Schluss wird die Zielsetzung der Arbeit abgeleitet und der Übersicht der weiteren Kapitel gegeben.

1.1 Einleitung in die Problematik

Anfang der 60er-Jahre wurden die ersten Roboter in den Ford-Werken in den USA in der Produktion eingesetzt. Derzeit sind nach Angaben des Weltroboterverbandes IFR über 1 Million Industrieroboter weltweit im Einsatz. Dabei werden die zu lösenden Aufgaben immer komplexer und die Roboter drängen in immer neue Bereiche der Arbeitswelt vor. Ihr Anwendungsgebiet beschränkt sich nicht mehr nur auf die Fabrikhallen sondern sie werden vermehrt in den Bereichen Service, Medizin, Gefahreinsätze, Weltraum usw. eingesetzt

1.1.1 Relevante Darstellung der Robotersysteme

Der Einsatz von Robotersystemen ist immer dann sinnvoll, wenn die Aufgaben nicht bzw. nicht effektiv von Menschen bearbeitet werden können. Je nach Einstieg des Intelligenzgrades, was auch ganz stark mit der Informationsmenge über die Umgebung korreliert, lassen sich die meist bekannten Einsatzgebiete der Roboter grob in die Klassen *Industrielle Fertigung*, *Teleoperation* und *Autonome Anwendungen* untergliedern.

Roboter, die in der **industriellen Fertigung** eingesetzt werden, zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Bewegungsabläufe explizit programmiert und im voraus optimiert werden, um sich häufig wiederholende Aufgaben auszuführen. Diese Abläufe können dann sehr schnell und zuverlässig ausgeführt werden, erlauben aber begrenzte Reaktionen auf die Umgebungseinflüsse. Für neue Aufgaben oder bei Änderung der Arbeitsumgebung muss folglich immer ein neues Programm entwickelt werden. Damit liegt der Einsatzbereich dieser Systeme vornehmlich in der Stückzahlfertigung. Typische Aufgaben der industriellen Robotersysteme sind:

- *Materialtransport:* Palettieren, Lagerladen/-entleeren, Verpacken, Schwererteiltransport.

- *Handhabung*: Schweißen/ Schneiden – Bogen-/Punktschweißen, Laser-/Wasserstrahlschneiden; Beschichten – Farbspritzen, Kleben, Stoffbeschichten, Versiegeln; mechanische Verformung – Prägen, Bohren, Biegen; mechanische Oberflächenbearbeitung – Fräsen, Entgraten, Schleifen, Polieren; mechanische Montage – Fügen, Schrauben, Verdrahten.
- *Vermessung*: Gegenstandskontrolle, Formermittlung, Detektierung der Herstellungsfehler.

Teleoperationssysteme werden häufig zur Bearbeitung komplexer Aufgaben in für die Menschen schwer- oder unzugänglichen Umgebungen eingesetzt. Die Bewegungsabläufe werden hier von einem Bediener vorgegeben und über interaktive Schnittstelle in Befehle umgewandelt, die von einem als Werkzeug arbeitenden Robotersystem ausgeführt werden. Die Information über die Umgebung dient zur in Echtzeit möglichen Prozessoptimierung, unterstützt die Ausführung der Operationen und liefert dem Bediener Informationen zur Bewertung seiner Aktion. Die wichtigste Rolle spielt hierbei die Vermessung und die Regelung der Interaktionskraft. Die Einsatzbereiche der Teleoperationssysteme sind Weltraumexperimente, Unterwasserarbeiten, explosionsfähige Umgebung, Chirurgie usw.

Autonome Systeme sind die meist fortgeschrittenen Robotersysteme, die zur selbstständigen Durchführung komplexer Aufgaben verwendet werden. Ein wesentliches Merkmal autonomer Systeme ist ein Wissen-/Expertensystem „Gehirn“ sowie auch Sensorsystemen „Sinne“, die eine autonome Durchführung erforderlicher Einzeloperationen von komplexen Aufgaben erlaubt.

Es lässt sich zusammenfassen, dass die steigenden Anforderungen an Roboterintelligenz und Roboterautonomie die Ermittlung der Umgebungsinformation und die Ausregelung der Umgebungseinflüsse, insbesondere bei mechanischer Interaktion zwischen dem Robotersystem und der Umgebung, erfordern.

1.1.2 Relevante Darstellung der Kontaktaufgaben

Viele traditionelle Anwendungen von Robotersystemen umfassten die **kontaktfreien Aufgaben**, die nicht von der Umgebung beeinflusst werden. Materialtransport und zum Teil Handhabung aus dem Bereich industrieller Fertigung stellen die typische Beispiele dar. Die Besonderheit dieser Aufgaben ist die natürliche ungezwungene Raumbewegung des Roboters. Die eigene Dynamik spielt dabei die entscheidende Rolle für die Leistungsfähigkeit des Systems. Im Mittelpunkt stehen die Gewährleistung einer gewünschten Position, Geschwindigkeit sowie Orientierung des Robotersystems im Arbeitsraum.

Eine Vielzahl von gegenwärtigen Anwendungen von Robotersystemen umfasst die **kontaktbehafteten Aufgaben**, die weitaus komplizierter sind und einen mechanischen Kontakt des Robotersystems mit der Umgebung sowie eine Gewährleistung der gewünschten mechanischen Interaktion fordert. Abhängig von der Art und Weise, wie ein Roboter und seine Umgebung in Wechselwirkung zueinander treten, unterscheidet man, ob ein Roboter seine Umgebung beeinflusst oder auf die Umgebungseinflüsse reagiert (s. Abb. 1.1). Aufgrund dessen können alle Kontaktaufgaben in zwei Gruppen unterteilt werden [Surd02]: *Aufgaben mit ausgeprägtem Kontakt* (Beeinflussung der Umgebung) und *Aufgaben mit potentielltem Kontakt* (Reaktion auf die Umgebungseinflüsse).

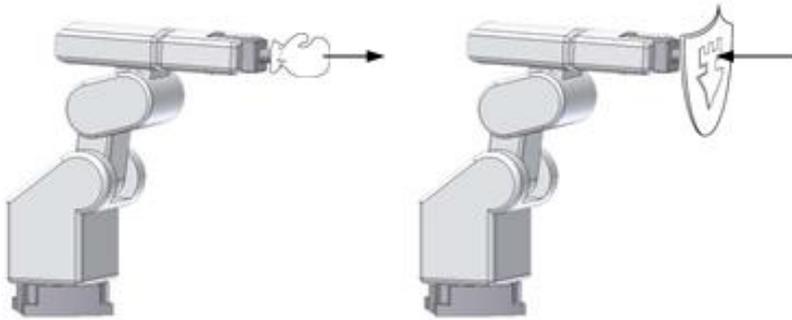


Abb.1.1. Beeinflussung der Umgebung und Reaktion auf die Umgebungseinflüsse.

Aufgaben **mit ausgeprägtem Kontakt** fordern eine mechanische Bindung des Robotersystems mit seiner Umgebung und die Gewährleistung einer determinierten mechanischen Interaktion. Typische Beispiele von Kontaktaufgaben mit ausgeprägtem Kontakt sind mechanische Verformung (Prägen, Bohren, Biegen), mechanische Oberflächenbearbeitung (Entgraten, Fräsen, Schleifen, Polieren, Reinigen), Handhabung eines gemeinsamen Objektes (kooperative Roboter bzw. künstliche Hände) und Vermessung bzw. Identifikation der Umgebung durch Betastung. In diesen Aufgaben ist die Kontaktkraft ein Bestandteil des Prozesses und spielt die entscheidende Rolle für seine Durchführung. Hierbei sollte der Verlauf der *Kontaktkraft* gleichzeitig mit dem Verlauf der Geschwindigkeit, Position und Orientierung geregelt werden.

Aufgaben **mit potentielltem Kontakt** setzen eine mechanische Bindung des Robotersystems mit seiner Umgebung ohne explizite Betonung auf dem Kontakt voraus. Typische Beispiele von Kontaktaufgaben mit potentielltem Kontakt sind Montage-/Demontageoperationen (Schrauben, Einfügen, Befestigen), Kollisionsabweichung usw. In diesen Aufgaben spielt die genaue Positionierung des Robotersystems eine entscheidende Rolle für die Prozessdurchführung. Wegen der Ungenauigkeiten des Prozesses, des Sensorsystems bzw. der Regelung entsteht ein Kontakt mit der Umgebung und demzufolge eine Reaktionskraft. Hierbei sollte die *Nachgiebigkeit* des Robotersystems gleichzeitig mit dem Verlauf der Geschwindigkeit, Position und Orientierung geregelt werden. Die Nachgiebigkeit wird in der Fachliteratur als „Maß der Roboterfähigkeit, den Kontaktkräften entgegenzuwirken“ definiert [Maso81].

Bemerkung: Während der mehrdimensionalen Bewegung in einer nicht genau determinierten Umgebung lassen sich die beschriebenen Aufgaben kombinieren und je nach Bewegungsrichtung entweder einen Kraftangriff oder eine nachgiebigen Bewegung ausüben.

Es lässt sich zusammenfassen, dass die „**Regelung der Kontaktkraft**“ (s.Abb.1.2.a) und die „**Regelung der Roboternachgiebigkeit**“ (s.Abb.1.2.b) zwei kennzeichnende eindimensionale Basisoperationen aus der Sicht der Regelungstechnik darstellen [Elfv91, Scia02], deren mehrdimensionale Kombination beliebiger Kontaktaufgaben durchführen lässt.

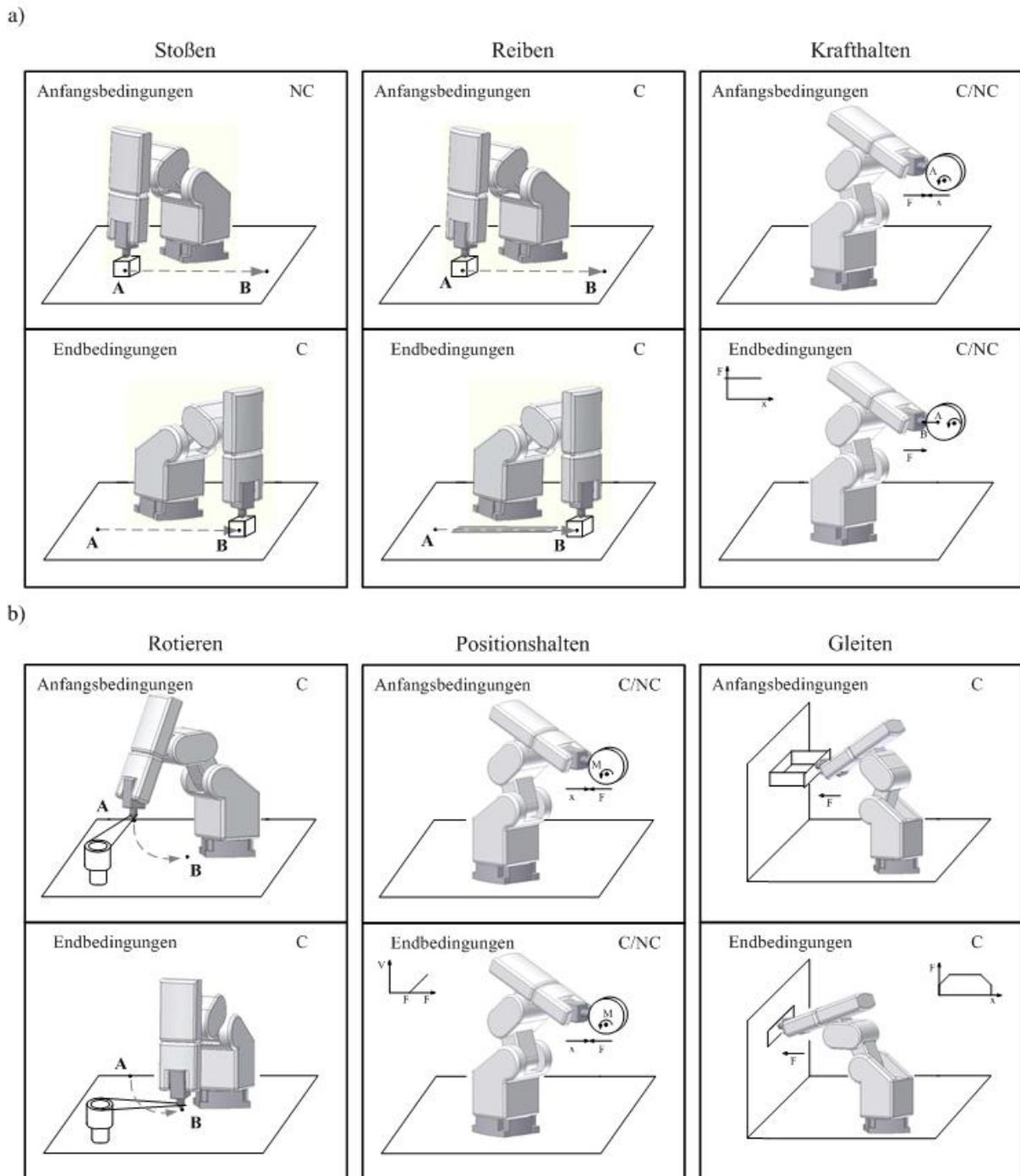


Abb.1.2. a) Operationen mit ausgeprägtem Kontakt, b) Operationen mit potentiellm Kontakt

1.1.3 Kennwerte der Kontaktregelung

- Ein quantitatives Maß der Kontaktkraftregelung stellen gemessene **Kraft-/Drehmomentkomponenten** der generalisierten Kontaktkraft dar.
- Ein quantitatives Maß der Nachgiebigkeitsregelung stellt **die Impedanz bzw. Admittanz des Robotersystems** dar.

1.1.3.1 Kraft / Drehmoment im Kontakt

Kraft-/Drehmomentkomponenten der generalisierten Kontaktkraft werden von Kraft-/Drehmomentsensoren gemessen. Deren Entwicklung ist bereits sehr weit fortgeschritten. Die auf die Sensoren wirkenden Kräfte äußern sich in Verformungen und können

- über *Dehnungsmessstreifen (DMS)*,
- über *piezoempfindliche (kapazitive) Materialien*,
- über *induktive Systeme* oder
- über *optische Systeme*

aufgenommen werden. Für die Auswahl eines geeigneten Kraftsensors hinsichtlich des zu verwendenden Messprinzips ist die Anordnung am Handhabungsgerät wichtig. Abb.1.3. präsentiert die kinematische Kette eines Handhabungsgerätes, das im Kontakt mit der Umgebung steht. Hier wird unterschieden, ob der Sensor

- *im Antriebssystem* (direkt über Drehmomentsensoren, indirekt über Strommessung),
- *vor dem Endeffektor* (in der Handwurzel),
- *im Endeffektor* (an den Greiferfingern, im Roboterfuß) oder
- *in der Umgebung* (im Arbeitstisch)

angeordnet ist [Coif83, Baum76, Bray90, Gree68,

Gori86, Gori00, Maso83, Shim77, Wats75, Warn79]. Zur detaillierten Beschreibung der Kraft-/Drehmomentsensoren wird auf die genannten Quellen hingewiesen. Zusammenfassend ist in der Tabelle 1.1 dargestellt, inwieweit die verschiedenen Anbringungsarten und Messprinzipien den Anforderungen an Kraft-/Drehmomentsensoren genügen.

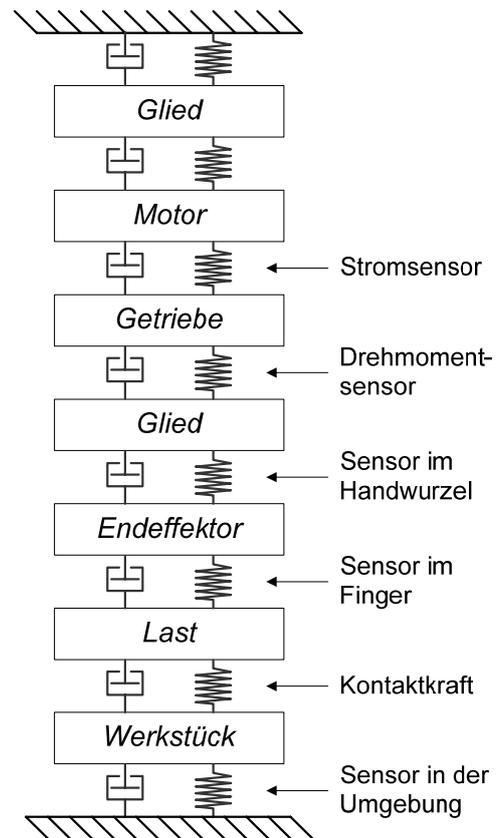


Abb.1.3. Kinematische Kette eines Handhabungsgerätes im Kontakt mit der Umgebung.

Tabelle 1.1. Eigenschaften der verschiedenen Gruppen von Kraft-/Drehmomentsensoren.

	Im Antrieb		In der Handwurzel	
	<i>Strommessung</i>	<i>DMS</i>	<i>DMS</i>	<i>optisch</i>
Steifigkeit	<i>groß</i>	<i>groß</i>	<i>gering</i>	<i>gering</i>
Dynamik	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>gering</i>	<i>gering</i>
Reproduzierbarkeit der Kontaktkräfte	<i>sehr schlecht</i>	<i>schlecht</i>	<i>gut</i>	<i>gut</i>
Linearität	<i>gut</i>	<i>gut</i>	<i>gut</i>	<i>mäßig</i>
Genauigkeit	<i>mäßig</i>	<i>gut</i>	<i>gut</i>	<i>gut</i>
Überlastschutz	<i>vorhanden</i>		<i>meist vorhanden</i>	<i>meist vorhanden</i>
Preis/Aufwand	<i>sehr gering</i>	<i>gering</i>	<i>gering</i>	<i>hoch</i>

Fortsetzung der Tabelle 1.1.

	In der Handwurzel		an den Fingern	in der Umgebung
	<i>induktive</i>	<i>piezo</i>	<i>DMS</i>	<i>DMS</i>
Steifigkeit	<i>gering</i>	<i>groß</i>	<i>gering</i>	<i>groß</i>

Dynamik	<i>gering</i>	<i>gering</i>	<i>gering</i>	<i>gering</i>
Reproduzierbarkeit der Kontaktkräfte	<i>gut</i>	<i>gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>
Linearität	<i>schlecht</i>	<i>schlecht</i>		<i>gut</i>
Genauigkeit	<i>gut</i>	<i>gut</i>	<i>gut</i>	<i>gut</i>
Überlastschutz	<i>meist vorhanden</i>	<i>meist vorhanden</i>	<i>möglich</i>	
Preis/Aufwand	<i>hoch</i>	<i>hoch</i>	<i>gering</i>	<i>gering</i>

Von unserer Arbeitsgruppe [Schn04, Schn05] sind die DMS-basierte, im Endeffektor platzierte, 3-Komponenten-Kraftsensoren für folgenden Schreitroboter entwickelt und umgesetzt (s. Abb.1.4): KATHARINA (Fraunhofer IFF Magdeburg), SLAIR (Universität Magdeburg), ALDURO (Universität Duisburg), und LAURON II (FZI Karlsruhe). Diese Arbeiten liefen im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Autonomes Laufen“ der Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und im Rahmen des Kompetenzzentrums „Robotik“ (Kooperation zwischen dem Fraunhofer IFF Magdeburg und dem IESY Universität Magdeburg).



Abb.1.4. Die von unserer Arbeitsgruppe entwickelte DMS-basierte 3-Komponenten-Kraftsensoren: (v.l.n.r.) für KATHARINA, für Manipulator in KATHARINA, für SLAIR I, für SLAIR II, für ALDURO, für LAURON II.

1.1.3.2 Impedanz / Admittanz des Robotersystems im Kontakt

Darstellung der Impedanz bzw. Admittanz ist mittlerweile in mehreren wissenschaftlich-

technischen Bereichen etabliert (Mechanik, Elektrotechnik, Hochfrequenztechnik, Nachrichtentechnik, Akustik). In der physikalischen Beschreibung jeder dieser Bereiche existieren Flüsse und Felder, die diese Flüsse hervorrufen. Das Verhältnis zwischen dem anregenden Feld und dem daraus entstehendem Fluss wird als Impedanz bezeichnet. Zum Beispiel stellt eine elektrische Impedanz der Quotient $Z = u/i$ zwischen der Spannung u und dem fließendem Strom i dar. Dementsprechend ist die mechanische Impedanz der Quotient $Z = f/v$ zwischen der anregenden Kraft f und der erzeugten Geschwindigkeit v . Die Anwendung dieser Größen ist hervorragend als Basis zur ganzheitlichen Formulierung der komplexen Robotersysteme geeignet und lässt relativ komplizierte Struktursysteme als Elemente in einem mechanischen und/oder elektrischen Schaltbild betrachten.

Bei punktförmiger Anregung ist sie als Punktimpedanz in komplexen Zahlen definiert:

$$\mathbf{Z} = \underbrace{\operatorname{Re}(\mathbf{Z})}_{\text{Resistanz}} + j \cdot \underbrace{\operatorname{Im}(\mathbf{Z})}_{\text{Reaktanz}} = Z \cdot e^{j\varphi} \quad (1.1)$$

Der Kehrwert der oben aufgeführten Impedanz ist die dazugehörige Admittanz:

$$\mathbf{Y} = 1/\mathbf{Z} = \underbrace{\operatorname{Re}(\mathbf{Y})}_{\text{Kontuktanz}} + j \cdot \underbrace{\operatorname{Im}(\mathbf{Y})}_{\text{Suszeptanz}} = Y \cdot e^{-j\varphi} \quad (1.2)$$

Alternativ wird das erwünschte Verhalten des Robotersystems im Kontakt zum Zweck der Regelung der Roboternachgiebigkeit meistens als System 2. Ordnung (ein gut verständliches virtuelles Feder-Dämpfer-Masse-System) in jeder der 6 Freiheitsgrade (translatorische und rotatorische Bewegung) wie folgt modelliert:

$$\mathbf{f}_{\text{CONTACT}} = \mathbf{S}_{\text{REF}} \cdot (\mathbf{x}_{\text{ACT}} - \mathbf{x}_{\text{REF}}) + \mathbf{D}_{\text{REF}} \cdot (\dot{\mathbf{x}}_{\text{ACT}} - \dot{\mathbf{x}}_{\text{REF}}) + \mathbf{M}_{\text{REF}} \cdot (\ddot{\mathbf{x}}_{\text{ACT}} - \ddot{\mathbf{x}}_{\text{REF}}) \quad (1.3)$$

wobei

- $\mathbf{S}_{\text{REF}} \in R^{6 \times 6}$ – die gewünschte Steifigkeits-, Dämpfungs- und Trägheitsmatrizen mit jeweils besetzen positiven Elementen auf den Hauptachsen (diagonale Matrizen) sind, wobei auch Kopplungen zwischen den Achsen denkbar sind;
- $\mathbf{D}_{\text{REF}} \in R^{6 \times 6}$
- $\mathbf{M}_{\text{REF}} \in R^{6 \times 6}$
- $\mathbf{f}_{\text{CONTACT}}$ – generalisierte Kontaktkraft;
- $\mathbf{x}_{\text{ACT}}, \mathbf{x}_{\text{REF}}$ – Vektoren der „aktuellen“ und „gewünschten“ (dort wo die virtuelle Feder-Dämpfer-Masse anzubringen ist) Bewegungen;
- $(\mathbf{x}_{\text{ACT}} - \mathbf{x}_{\text{REF}})$ – die durch $\mathbf{f}_{\text{CONTACT}}$ hervorgerufene Störungen.

Mit Laplace – Transformation $\dot{x} = s \cdot x(s)$ bekommt man:

$$\mathbf{Z}_{\text{REF}} = \mathbf{S}_{\text{REF}} + \mathbf{D}_{\text{REF}} \cdot s + \mathbf{M}_{\text{REF}} \cdot s^2 \text{ und } \mathbf{f}_{\text{CONTACT}} = \mathbf{Z}_{\text{REF}} \cdot (\mathbf{x}_{\text{ACT}} - \mathbf{x}_{\text{REF}}) \quad (1.4)$$

Bei der Parameterwahl für die Zielimpedanz ist auf die mechanischen Eigenschaften der Umgebung zu achten, um die Kontaktstabilität zu gewährleisten. In die Richtung, wo die Umgebung nachgiebig ist, wird in der Regel eine hohe Zielsteifigkeit S_{REF} eingestellt; in die Richtung, wo die Bewegung durch eine Oberfläche mit hoher Steifigkeit gehemmt wird, stellt man niedrige Zielsteifigkeiten S_{REF} ein. Große Zieldämpfungen D_{REF} werden gewählt, wenn große Energien zerstreut werden sollten. Geeignete Werte für die Zielmasse M_{REF} bewirken ein weiches Ansprechen beim Aufschlag auf eine Oberfläche.

Die Nachgiebigkeitsregelung verändert die ganze Dynamik des Robotersystems, d.h. dessen Ausgangsimpedanz. Die Kraft und die Position können gleichzeitig und unabhängig voneinander nicht geregelt werden, aber wohl ihr Verhältnis zueinander. So ist es dem Robotersystem möglich ein Hindernis zu berühren, während er dabei eine nachgebende Bewegung ausübt.

Zum Beispiel kann ein Manipulator allgemein als ein System mit trägen Massen beschrieben werden, die durch regelbare Momente in Bewegung gesetzt werden. Reduziert man dieses System auf den vereinfachten eindimensionalen Fall, so erhält man eine Masse M auf die im Fall des Kontaktes zwei gegenseitige Kräfte wirken und eine Beschleunigung ausüben (s.Abb.1.5).

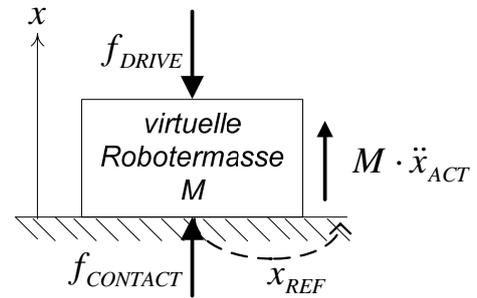


Abb.1.5. Robotersystem aus der Sicht von Impedanzregelung.

Demzufolge wird die Bewegungsgleichung der virtuellen Robotermitte wie folgt beschrieben:

$$M \cdot \ddot{x}_{ACT} = (f_{CONTACT} - f_{DRIVE}) \quad (1.5)$$

Ohne die Rückkopplung der Reaktionskraft, d.h. mit $f_{DRIVE} = 0$, würde ein Beobachter auf der Oberfläche das System als die Masse M wahrnehmen, die sich wegen der Einflüsse der Kontaktkraft bewegt:

$$M \cdot \ddot{x}_{ACT} = f_{CONTACT} \cdot \quad (1.6)$$

Mit einer einfachen Rückkopplung, wobei der Regler proportional zur Differenz zwischen der Referenz- und Reaktionskraft eine Antriebskraft erzeugt, erhält man:

$$f_{DRIVE} = G_{CONTROL} \cdot (f_{REF} - f_{CONTACT}) \cdot \quad (1.7)$$

Unter Annahme $f_{REF} = 0$ erhält man aus den Gleichungen (1.7) und (1.5):

$$\frac{M}{(G_{CONTROL} + 1)} \cdot \ddot{x}_{ACT} = M_{NEW} \cdot \ddot{x}_{ACT} = f_{CONTACT} \cdot \quad (1.8)$$

Gleichung (1.8) besitzt offensichtlich die gleiche Struktur wie Gleichung (1.6). Es ist leicht zu erkennen, dass die scheinbare Trägheit des Systems vom Sichtpunkt des Beobachters sich verändert hat: die Masse ist kleiner geworden $M_{NEW} = M / (1 + G_{CONTROL})$. Die Rückkopplung der Reaktionskraft bewirkt demnach eine stärkere Verzögerung der Masse als es allein durch $f_{CONTACT}$ der Fall wäre.

1.2 Biologischer Hintergrund zur Regelung mechanischer Interaktion

Menschen und andere Säugetiere üben die mannigfaltigste, hoch organisierte und anpassungsfähige Interaktion mit der Umgebung aus. Für die vorliegende Arbeit sind demzufolge der Bewegungsapparat von Menschen und anderen Säugetiere bzw. sein Sensorsystem vom besonderen Interesse.

1.2.1 Organisation des Bewegungssystems

Das Bewegungssteuersystem ist in einer Hierarchie geordnet und besteht aus folgenden Haupteinheiten: die Muskeln, die Sensor- bzw. Motorneuronen, das Rückenmark, der Gehirnstamm, das Kleinhirn und die Bewegungsrinde [Guyt72, Adel87, Kand91, Smit98]. Die obere Hierarchieebene produziert die modularen Befehle für die untere Ebene, und die untere Hierarchieebene liefert die verarbeiteten Sensor- und Zustandinformationen zurück. Eine prinzipielle Regelungsstruktur des Bewegungssystems stellt Abb.1.6 dar.

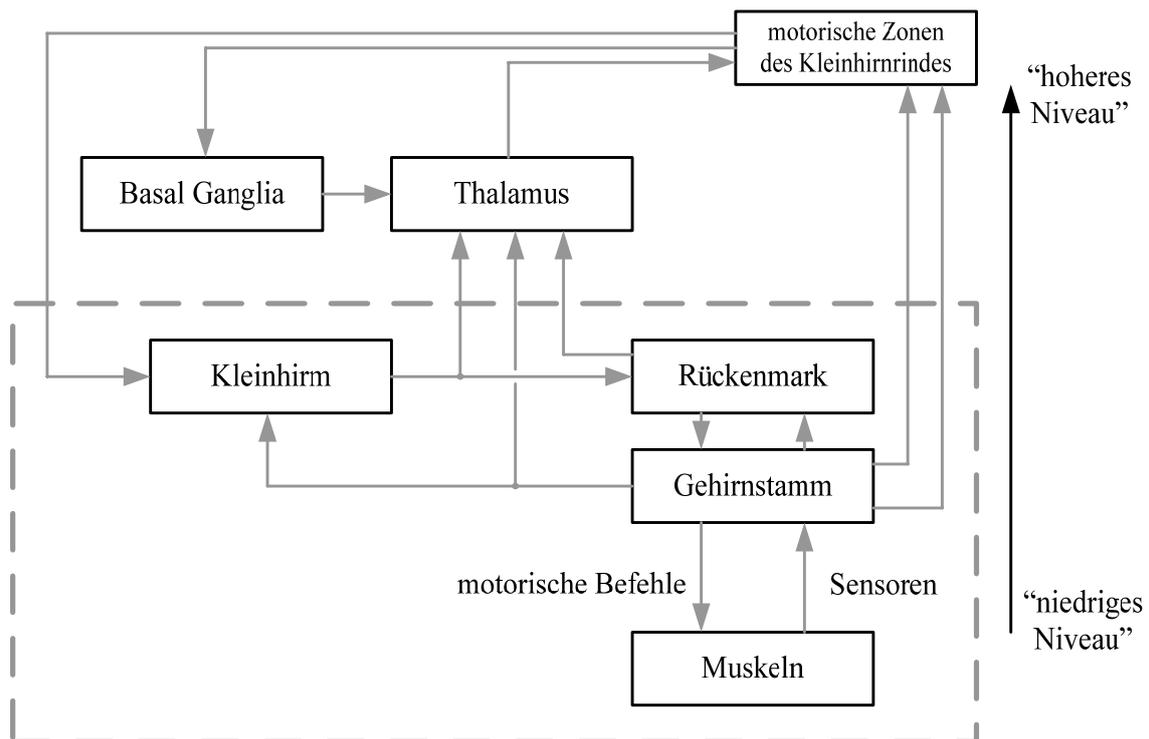


Abb.1.6. Prinzipielle Regelungsstruktur des Bewegungssystems.

Aktoren des Bewegungsapparates. Die Aktoren des Bewegungssystems sind die Skelettmuskeln (s.Abb.1.7). Ein einfaches Muskelmodell ist eine Feder, die die Federkonstante durch externe Signale ändern kann. Die Muskeln bestehen grundsätzlich aus kleinen zylinderförmigen Fasern aus zwei Hauptarten: *große Muskelfasern*, die als Aktoren große Druckkraft liefern; *kleine Muskelfasern*, die als sensorische Organe dienen. Die großen Muskelfasern sind durch die Axone der großen *Alpha-Bewegungsneuronen* innerviert. Die Kontraktionskraft eines Muskels wird durch die Anpassung der Zündungsrate des Bewegungssaxons und durch die selektive Aktivierung mehrerer Antriebseinheiten gesteuert. Je mehr Muskelkraft von den höheren Gehirnbereichen gefordert wird, desto mehr Bewegungseinheiten sowohl die schwächsten (aber meistens energieeffizienten) als auch die stärksten (aber weniger energieeffizienten) werden erregt. Das erlaubt eine präzise Muskelkrafteinstellung mit geringeren metabolischen Kosten.

Sensoren des Bewegungsapparates. Die kleinen Muskelfasern werden mit den kleinen *Gamma-Bewegungsneuronen* verbunden. Sie liefern wenig Muskelkraft und arbeiten in erster Linie als sensorische Organe. Der zentrale Bereich der Faser enthält zwei Sensorentypen: Primärrezeptoren und Sekundärrezeptoren. Primärrezeptoren messen die Länge und die

Veränderung der Länge des zentralen Bereiches (*biologische dynamische Positions- und Geschwindigkeitssensoren*). Sekundärrezeptoren messen ausschließlich die Länge (*biologische statische Positionssensoren*). Der Primärrezeptor reagiert schnell [Kand91] (unter 1ms) auf die Einführung von jeder möglicher Ausdehnung mit einer erhöhten Zündungsrate. Danach ist sein Signal zur Länge des zentralen Bereichs ungefähr proportional plus die Ableitung dieser Länge. Dynamische Gamma-Aktivität wird für schnellere Bewegungen, wie das Gehen, das Laufen oder schwierige ausgleichende Aufgaben angefordert. Der Sekundärrezeptor reagiert langsamer. Statische Gamma-Aktivität wird für unveränderliche Lagen wie das Sitzen oder Stehen angefordert. Die *Golgi-Sehnenorgane* treten an der Schnittstelle der Sehne und des Körpers des Muskels auf. Jedes dieser Organe ist in Reihe mit ungefähr 10-15 Muskelfasern verbunden. Sie messen die Anspannung im Muskel (*biologische Kraftsensoren*).

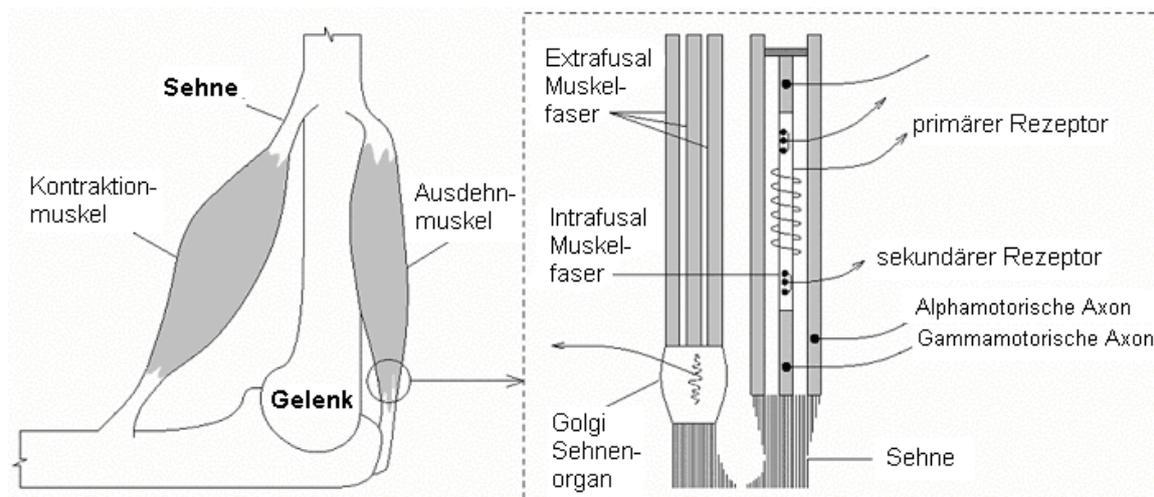


Abb.1.7. Anatomie des Muskels und innere Anordnung der Fasern.

Steuerung und Regelung. Die obere Ebene besteht aus folgenden Hauptteilen: die *zerebrale Rinde* (Wahrnehmungs-, kognitiven und höheren Bewegungsfunktionen, sowie Gefühle und Gedächtnis, d.h. hier entstehen komplexe Verhaltensantworten [Ito84]), das *Basal Ganglias* (Bewegungskoordination [Conn93]), der *Thalamus* (Verarbeitung und Verteilung fast aller Sensor- und Bewegungsinformationen), das *Kleinhirn* (Koordination des instinktiven und gelernten Bewegungsverhaltens), das *Rückenmark* (enthält viele Bündel von sensorischen und motorischen Nerven und auch viele neuronale Kreise, die Reflexverhalten organisieren), der *Gehirnstamm* (Posehaltung, Ausgleichsteuerung und Bearbeitung der Sensorinformationen). Bewegungsplanung, Bewegungserzeugung und Bewegungskoordination sind die Grundfunktionen des „zerebralen Rinde + Basal Ganglias + Thalamus + Kleinhirns“. Bewegungssteuerung bzw. Bewegungsregelung sind die Grundfunktionen des „Rückenmark + Gehirnstammes“. Die komplexe Bewegungsorganisation unterer Ebene wird in Form von Reflexen ausgelegt. „Reflexe“ sind in diesem Kontext die schnellen stereotypischen anpassungsfähigen Antworten, die von dem Umgebungseinfluss ausgelöst werden. Die wichtigsten Reflexe sind folgende:

- *Streckreflex* (Überlänge-Schutzreflex),
- *gegenseitiger Hemmungsreflex* (Regelung der Gelenksteifigkeit),
- *Sehnenreflex* (aktive Steifigkeits- bzw. Dämpfungsregelung ab einer bestimmten Muskelanstrengungsgrenze und aktive Kraftregelung bis einer bestimmten Muskelanstrengungsgrenze),
- *komplexe Reflexe* (Generatoren rhythmischer Bewegungen),
- *Körperhaltungsreflexe und Lokomotionsreflexe* (Stützreaktionsreflex).

1.2.2 Modell der Motorik

Auf der niedrigen Ebene können die Aktivierungen der Alpha-Motoneuronen, die das Gelenkmoment direkt herstellen, als die Variable für die Muskelsteuerung bezeichnet werden. Laut [Lata93] ist der Ansatzpunkt des Streckenreflexes ebenfalls eine geeignete Steuervariable. Diese Schlussfolgerung wird als *Merton's Servohypothese* bezeichnet: die Hauptfunktion des Streckenreflexes ist der Ausgleich des Lasteinflusses durch die Muskellänge, d.h. eine Regelungseinheit der Muskelnachgiebigkeit. Daraus entsteht das Modell des Gelenkreglers niedrigster Ebene (s. Abb. 1.8). Dieses Modell ist ein einfacher PD-Regler, der versucht, den Gelenkwinkel θ gleich dem Sollwert θ_{ref} durch das Anlegen eines passenden Drehmomentes auszuregeln. Die Konstante k_s und k_D stellen die Steifigkeit und Dämpfung der Feder ein und sind mit den Aktivierungen der statischen und dynamischen Gamma-Bewegungsneuronen gleichwertig. Der Filter des Ausgangsmomentes übernimmt die Rolle der Renshaw-Zellen indem es die Änderungsgeschwindigkeit des Drehmomentes begrenzt. Der Parameter τ justiert die Zeitkonstante des Filters. Das Spezifizieren von θ_{REF} anstelle des Gelenkmomentes vereinfacht die Bewegungssteuerung, da diese eine gute dynamische Gelenkbewegung leisten kann. Dabei ist es möglich komplizierte Bewegungen in θ Koordinaten der hohen Ebene effektiv zu reproduzieren.

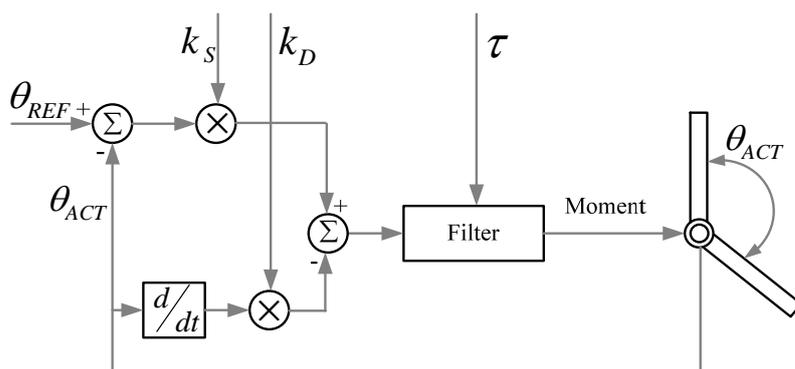


Abb.1.8. Schematische Darstellung des Gelenkreglers.

Es lässt sich zusammenfassen, dass ein System technischer Herkunft analog zu biologischen Prototypen ein vielseitiges *Sensorsystem* (bestehend aus Positions-, Geschwindigkeits-, Druck- bzw. Kraftsensoren) und ein fortgeschrittenes anpassungsfähiges bzw. intelligentes *Experten-/Regelungssystem* benötigt, um die Kontaktaufgaben durchzuführen. Auch viele vorhandene Robotersysteme sind biologisch realistisch nachgebildet (Manipulationsroboter – anthropomorphe Arme, acht-/sechsbeinige Roboter – Insekten, vierbeinige Roboter – Säugetiere, zweibeinige Roboter – Menschen). Verwendung biologischer Prototypen hat zur Folge, dass entweder neue Ideen technisch verwirklicht werden oder biologische Gegebenheiten besser verstanden werden.

1.3 Stand der Technik

Im Laufe der letzten zwanzig Jahre führten das wachsende Bedürfnis an den fortgeschrittenen

Robotern und damit verbundene Interesse zur Entwicklung verschiedener Konzepte und Algorithmen zur Regelung der Roboterbewegung im Kontakt [Whit87, Damm96, Vuko97]. Für die Klassifizierung entwickelter Regelungsmethoden werden mehrere verschiedene Kriterien angebracht. Allerdings hängt die Kontaktkraft generell von:

- den *mechanischen Materialeigenschaften* (Elastizität, Plastizität, Reibung etc) und
- der *Geometrie des Kontaktes* (Eindringungstiefe, Kontaktfläche etc)

ab. Offensichtlich kann das Robotersystem die mechanischen Materialeigenschaften im Kontakt nicht beeinflussen. Demzufolge können die Kontaktkräfte ausschließlich durch die gezielte Regelung der Kontaktgeometrie, d.h. indirekt über die relative Änderung der generalisierten Position der Kontaktobjekte (Lage/Geschw./Beschleunigung) kontrolliert werden:

- die *relative Änderung der Beschleunigung* wird in der Fachliteratur als die detaillierte oder drehmomentbasierte Methode bezeichnet;
- die *relative Änderung der Geschwindigkeit* wird in der Fachliteratur als die dämpfungsbasierte Methode bezeichnet;
- die *relative Änderung der Lage* wird in der Fachliteratur als die volle oder positionsbasierte Methode genannt.

Die gleiche Aufteilung gilt auch für die Methoden zur Regelung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems bzw. des gebundenen „Roboter-Umgebung“ Systems. Die genannten Möglichkeiten zur Regelung der Kontaktkräfte bzw. der Roboternachgiebigkeit stoßen auf eine breite Akzeptanz und haben viele Regelungskonzepte ins Leben gerufen.

Es ist zu beachten, dass im „Roboter-Umgebung“ System folgende Nichtlinearitäten (Elastizität in Gliedern und Gelenken, Begrenzungen im Stellglied, Spiel, trockene und viskose Reibung in Gelenken, variierbare geometrische Konfiguration, variierbare mechanische und geometrische Eigenschaften des Kontaktes, variable Last) herrschen und, dass die Regelungskonzepte demzufolge anpassungsfähig auszulegen sind.

Des Weiteren werden die Konzepte zur Steuerung/Regelung der Roboterbewegung im Kontakt, Problematik der Kontaktnahme und Kontaktstabilität sowie adaptive Regelungsmethoden vorgestellt.

1.3.1 Konzepte zur Steuerung/Regelung der Roboterbewegung im Kontakt

Methoden zur Regelung der Roboterbewegung im Kontakt werden anhand verschiedener Kriterien klassifiziert. Betrachtet man die Art und Weise, wie die Interaktionskräfte ins Steuerungs-/Regelungskonzept einbezogen werden, unterscheidet man zwischen:

- den *passiven Steuerungsmethoden*. Die Position des Roboters (des Endeffektors, des Fußes) wird an die Kontaktkraft infolge der Nachgiebigkeit der Struktur oder infolge der statischen Abweichung des Positionsreglers angepasst.
- den *aktiven Regelungsmethoden*. Die Krafrückkopplung wird mit der Absicht verwendet, die gewünschte Kontaktkraft oder die aufgabenspezifische Roboternachgiebigkeit zu erzeugen.

Betrachtet man die Aufgabenstellung des Robotersystems, können die Konzepte zur Steuerung/Regelung der Roboterbewegung im Kontakt wie folgt aufgeteilt werden (hierbei

für die bessere Darstellung auf einen eindimensionalen Fall reduziert):

- bei Aufgaben mit potentielltem Kontakt, wobei neben den Anforderungen an den Verlauf der Geschwindigkeit, Position und Orientierung zusätzliche Bedingungen hinsichtlich des Wertes der Nachgiebigkeit des Robotersystems zu erfüllen sind, handelt es sich um die **Regelung der Roboternachgiebigkeit (Impedanz- bzw. Admittanzregelung)**;
- bei Aufgaben mit ausgeprägtem Kontakt, wobei neben den Anforderungen an den Verlauf der Geschwindigkeit, Position und Orientierung zusätzliche Bedingungen hinsichtlich der prozessdefinierten Interaktionskraft zu erfüllen sind, handelt es sich um die **Regelung der Kontaktkraft**.

Bemerkung: Laut Anforderungen an die Kontaktkraftregelung sollten die Kontaktkräfte gemessen und geregelt werden. Dies impliziert ausschließlich die aktive Regelung. Im Gegensatz dazu kann die Roboternachgiebigkeit sowohl aktiv als auch passiv ausgelegt werden (s. Tabelle 1.2).

Tabelle 1.2. Konzepte der Steuerung/Regelung der Roboterbewegung im Kontakt.

Steuerung/Regelung der Roboternachgiebigkeit		Regelung der Kontaktkraft
<i>Passive Steuerung:</i>	<i>Aktive Regelung:</i>	<i>Aktive Regelung:</i>
Nachgiebigkeit als Antwort auf die entstehende Kontaktkraft.	Modifikation der Sollposition als Antwort auf die gemessenen Kontaktkraft.	Direkte Regelung der Kontaktkraft.

1.3.1.1 Passiver Steuerung der Roboternachgiebigkeit

Dies ist ein allgemeines Steuerungskonzept von Manipulationsrobotern, das in der Praxis häufig dafür verwendet wird, um die Probleme der ungenauen Positionierung zu überwinden. Je nach Anforderungen des Prozesses an das Steuerungssystem können die Methoden der passiven Steuerung in die adaptive und stationäre (nicht adaptive) unterteilt werden, die ihrerseits innerhalb der Gruppe je nach der Quelle der Nachgiebigkeit wie folgt sich unterscheiden:

- Methoden, den die *strukturellen Elastizität des Robotersystem* (s.Abb.1.9) zugrunde liegt. Dazu zählen elastische Glieder [Pfei90], elastische Gelenke [Cher94], elastischer Endeffektor usw.
- Methoden, die auf der *speziellen nachgiebigen RCC* (remote centre compliance) *Vorrichtungen* (s.Abb.1.10) basieren. Dazu zählen passive RCC [Whit86], sensorbasierte RCC [DeFa85] und anpassungsfähige RCC [Cutk86].
- Methoden, die auf der *Anpassung der Koeffizienten des Positionsreglers* (s.Abb.1.11) basieren und versuchen, eine programmierbare, sechsdimensionale Nachgiebigkeit des Roboters im kartesischen Raum durch die Koeffizienteneinstellung des FIR-basierten Positionsreglers zu realisieren [DeLu91].

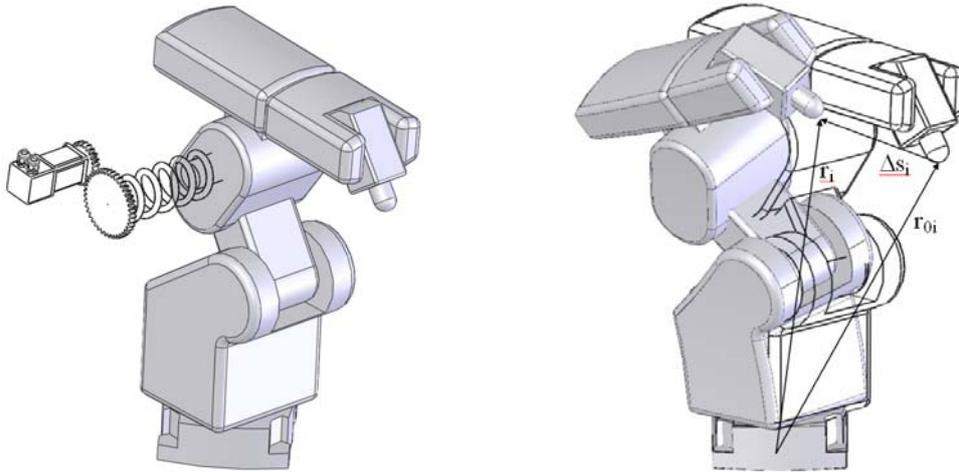


Abb.1.9. Strukturelle Elastizität des Robotersystems.

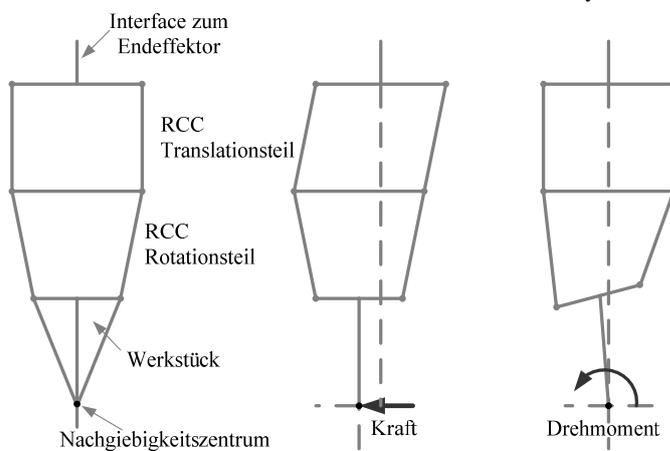


Abb.1.10. Remote Centre Compliance (RCC) Element.

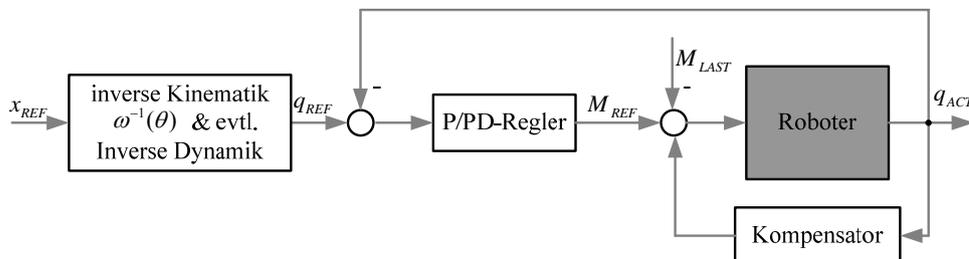


Abb.1.11. Schema der passiven Einstellung des FIR-basierten (P/PD) Positionsreglers.

1.3.1.2 Aktive Regelung der Roboternachgiebigkeit

Die Methoden der aktiven Regelung der Roboternachgiebigkeit nutzen verschiedene Zusammenhänge zwischen einer wirkenden Kontaktkraft und der Roboterposition, um die mechanische Nachgiebigkeit des Robotersystems zu den Kontaktbedingungen anzupassen. Das Ziel der Nachgiebigkeitsregelung liegt in der Gewährleistung eines spezifischen Zusammenhanges zwischen der Kontaktkraft und der Roboterbewegung. Beide Regelkreise werden während des Kontaktes über einen logischen Operator „AND“ verbunden.

Betrachtet man die Anordnung der Positions- und Kraftsensoren und der Steuerungssignalen innerhalb der Regelkreise, stellt man fest, dass der aufgabenspezifische Zusammenhang „Kontaktkraft/Roboterbewegung“ sich entweder über die Positionsregelung unter der

Berücksichtigung der Kontaktkraftänderung oder über die Kontaktkraftregelung unter der Berücksichtigung der Positionsänderung realisieren lässt:

- *positionsbasierte Nachgiebigkeitsregelung* (s.Abb.1.12), bei der ein äquivalenter Wert der Positionsänderung (Lage/Geschw./Beschleunigung) anhand der wirkenden Kraft berechnet wird. Hierbei hat der innere Regelkreis eine Positionsrückkopplung und der äußere Regelkreis eine Krafrückkopplung [Kaze90].
- *kraftbasierte Nachgiebigkeitsregelung* (s.Abb.1.13), bei der ein äquivalenter Wert der Kraftänderung für die gewünschte Impedanzeinstellung aufgrund der aktuellen Positionsabweichung berechnet wird. Hierbei hat der innere Regelkreis eine Krafrückkopplung und der äußere Regelkreis eine Positionsrückkopplung [Lawr88].

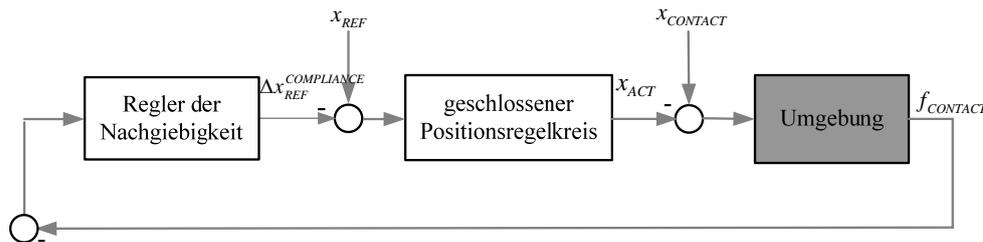


Abb.1.12. Positionsbasierte Nachgiebigkeitsregelung.

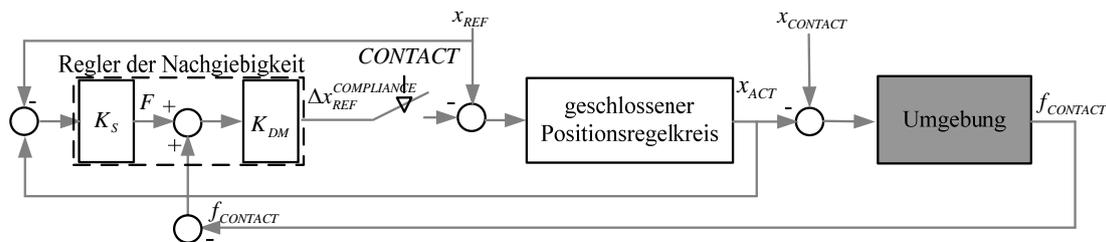


Abb.1.13. Kraftbasierte Nachgiebigkeitsregelung.

Bemerkung: Für dargestellte Methoden der Nachgiebigkeitsregelung wird kein Sollwert der Kontaktkraft festgelegt, d.h. $F_{REF} = 0$. Der Fall $F_{REF} > 0$ entspricht einer Vorspannung der virtuellen Feder, welche die Robotersteifigkeit widerspiegelt. Wird $F_{REF} > 0$ ausgewählt, ist der Sollwert der Kontaktkraft erst mit einem Kontakt ereignis in die Regelungsstruktur einzuführen. Ansonsten bekommt das Robotersystem eine unerwünschte Bahnabweichung.

Man unterscheidet Impedanzmodelle der Null-, ersten und zweiten Ordnung, die dementsprechend als Steifigkeitsregelung [Sali80], Dämpfungsregelung [Whit77] und allgemeine Impedanzregelung [Hoga85] bezeichnet werden:

$$\begin{aligned} Z_{REF}(s) &= S_{REF}, \\ Z_{REF}(s) &= D_{REF} \cdot s, \\ Z_{REF}(s) &= S_{REF} + D_{REF} \cdot s + M_{REF} \cdot s^2. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Je nach Auswahl der gewünschten Roboterimpedanz wird anhand der wirkenden Kontaktkraft die entsprechende Korrektur für den Lage-, Geschwindigkeits- bzw. Beschleunigungsregelkreis berechnet.

1.3.1.3 Aktive Regelung der Kontaktkraft

Wie oben bereits beschrieben wurde, ist die Regelung der Kontaktkraft über die Änderung der

mechanischen Materialeigenschaften nicht möglich. Die Kontaktkraft wird ausschließlich durch die gezielte indirekte Regelung der Kontaktgeometrie mittels der relativen Positionsänderung (Lage/Geschw./Beschleunigung) kontaktierender Objekte kontrolliert. In diesem Fall ist es nicht möglich die Roboterposition und die Kontaktkraft gleichzeitig zu regeln. Jede Änderung der Position im Kontakt bedeutet eine Änderung der Kontaktgeometrie und dementsprechend der Kontaktkraft und umgekehrt. Beide Regelkreise werden während des Kontaktes über einen logischen Operator „XOR“ verbunden.

In dem Zusammenhang unterscheidet man die Methoden der Kontaktkraftregelung nach dem Weg der Krafteinführung (s. Abb.1.14) in den Regelkreis:

- *beschleunigungsbasierte Regelung der Kontaktkraft* wird in der Literatur als die detaillierte oder drehmomentbasierte Methode [Raib81, Wede88] bezeichnet, wobei die Soll/Ist-Kraftdifferenz direkt für die Generierung der Gelenkmomente benutzt wird.
- *geschwindigkeitsbasierte Regelung der Kontaktkraft* wird in der Literatur als die dämpfungsbasierte Methode [Gori00] bezeichnet. Im Sonderfall der Nachgiebigkeitsregelung, nämlich der Dämpfungsregelung, existiert die Möglichkeit der Kontaktkraft einzustellen. Deswegen wurde diese Methode eher irrtümlich von [Gold87] als die hybride Kraft-/Impedanzregelung bezeichnet.
- *lagebasierte Regelung der Kontaktkraft* wird in der Literatur als die volle oder positionsbasierte Methode [Ande88, DeSc88] bezeichnet, wobei die Kraftdifferenz in eine äquivalente Änderung der Soll-Position in der kraftgeregelten Richtung konvertiert und in den Positionsregelkreis hinzugefügt wird.

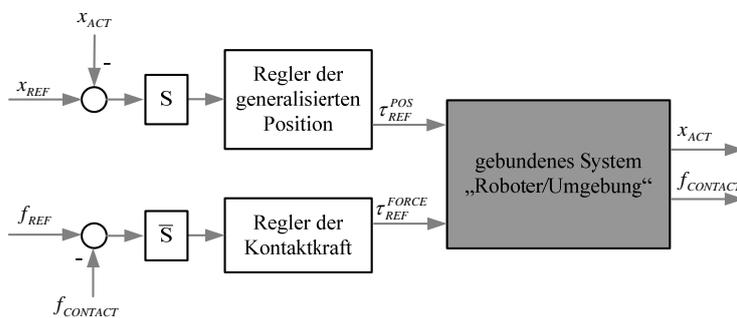


Abb.1.14. Allgemeines Schema der beschleunigungsbasierten / geschwindigkeitsbasierten / lagebasierte Kraftregelung.

Die diagonale logische Selektionsmatrix S ist für die Auswahl der kartesischen Bewegungsrichtung entweder zwischen der puren Kraftregelung oder der puren Positionsregelung verantwortlich. Die Aufgabe der Gestaltung von Selektionsmatrix S gehört allerdings nicht zur Regelungsebene, sondern zur Planungsebene einer Kontaktaufgabe. Die Anwendung der Selektionsmatrix S lässt die Realisierung von mehrdimensionalen hybriden Regelungen, wie die *hybride Kontaktkraft-/Positionsregelung* [Maso81, Raib81] zu.

Bemerkung: Die beschleunigungsbasierte Regelung der Kontaktkraft wird in der Fachliteratur wegen direkter Proportionalität zwischen den Drehmoment und der Beschleunigung auch *explizite Kraftregelung* [Raib81] bezeichnet. Die geschwindigkeits- und lagebasierte Regelung der Kontaktkraft wird in der Fachliteratur auch als *implizite Kraftregelung* [Sera87] bezeichnet.

Bemerkung: Physikalisch gesehen existiert keine so genannte „parallele Kraft-

/Nachgiebigkeitsregelung“ in einer Raumrichtung zur gleichen Zeit. In Sonderfällen handelt es sich entweder um eine spezielle Einstellung der gewünschten Roboternachgiebigkeit (dabei ergibt sich die gewünschte Kontaktkraft) oder um eine spezielle Einstellung des Kontaktkraftreglers (dabei ergibt sich die gezielte Kontaktdynamik).

1.3.1.4 Zusammenfassung und Trends

Viele weitere Klassifikationskriterien existieren zur aktiven Regelung der Roboterbewegung im Kontakt. Die Methode können unter anderem nach der Art der *Kraftinformationsermittlung* (direkte Messung oder indirekte Berechnung), nach der *Platzierung des Kraftsensors* (Kraftsensor im Greifer, Gelenkmomentsensor, Kraftsensorin der Stützplatte, Kraftsensor auf der Kontaktoberfläche, Finger-/Fußkraftsensoren etc) unterteilt werden. Betrachtet man den Raum der aktiven Kraftregelung, so unterscheidet man zwischen der:

- Regelung im *orthogonalen Koordinatensystem*, d.h. im Koordinatensystem der Aufgabenspezifikation [Khat87]. Diese Methode fordert den Entwurf des Roboterdynamikmodells im Arbeitspunkt im orthogonalen Koordinatensystem. Traditionelle Methoden verwenden das kartesische Koordinatensystem mit der orthogonalen Dekomposition des Arbeitsraums. Neue Methoden [Lipk88, DeSc92a, Feat99] basieren auf dem Topologiemodell für jede Kontaktkonfiguration und verwenden die Projektionsgeometrie für die Determinierung des hybriden Kontaktes.
- Regelung im *Gelenkkoordinatensystem*. Gemäß dieser Methode existiert die Transformation der Eigenschaften, der Nachgiebigkeit und der Kontaktkraft aus dem Aufgabenraum in den Raum der Zustandskoordinaten [Wink06].

Die dargestellte Klassifikation kann alle zurzeit vorgeschlagenen Konzepte nicht darstellen. Wichtig ist, dass diese Klassifikation, zusammengefasst in der Tabelle 1.3, die Hauptkonzepte zur Regelung der Kontaktkraft und der Roboternachgiebigkeit während der Durchführung der Kontaktaufgaben widerspiegelt und der Strukturierung des Arbeitsinhaltes zugrunde liegt.

Tabelle 1.3. Gesamte Klassifikation der Konzepte zur Interaktionsregelung von Robotersystemen

Konzepte der Steuerung/Regelung der Roboterbewegung im Kontakt		
<i>Regelung der Kontaktkraft</i>	<i>Regelung/Steuerung der Roboternachgiebigkeit</i>	
Aktive Regelung: Direkte Regelung der Kontaktkraft: - <i>beschleunigungsbasierte Regelung,</i> - <i>geschwindigkeitsbasierte Regelung,</i> - <i>lagebasierte Regelung,</i>	Aktive Regelung: Sollpositionsmodifikation als Antwort auf die gemessene Kontaktkraft: - <i>positionsbasierte Impedanzregelung,</i> - <i>kraftbasierte Impedanzregelung,</i> - <i>parallele Impedanzregelung.</i>	Passive Steuerung: Nachgiebigkeit als Antwort auf die entstehende Kontaktkraft: - <i>Elastizität in der Roboterkonstruktion = elastische Glieder und/oder Gelenken,</i> - <i>RCC – Element = spezielle nachgiebige Vorrichtungen,</i> - <i>Reglerparameteranpassung = Anpassung der Koeffizienten des FIR-basierten Positionsreglers.</i>

Die gegenwärtigen Erfolge im Gebiet der Soft-Computing, sowie auch die Erweiterung der

potenziellen Anwendungen auf Medizin, Edutainment, Service etc, haben die neuen Trends in der Entwicklung der Konzepte zur Regelung der Roboterbewegung im Kontakt ins Leben gerufen. Die stochastischen Regelungsmethoden [Hirz00] werden für das Design der hybriden Kraft-/Positionsregelung angewandt, um das Rauschen des realen Steuerungssystems des Roboters zu unterdrücken. Die Soft-Computing Methoden (Fuzzy-Logik, künstliche neuronale Netze, genetische Algorithmen) nutzen mehrere Autoren [Vuco97, Hasi00, Surd02, Pali02]

- zur Abbildung der nichtlinearen dynamischen Eigenschaften von Robotersystemen,
- zur Erkennung der mechanische Eigenschaften des Bodens und der Umgebung,
- zur Verbesserung robuster Regelung der Robotersysteme in komplexer Umgebung,
- zur Generierung der räumlichen Solllaufbahnen,
- zur vereinfachten Berechnung der inversen Kinematik usw.

Die Entwicklung spezifischer Algorithmen zur Kontaktregelung für neue Robotersysteme, wie parallele Roboter [Fass99] oder kooperative Roboterarme [Surd01] ist auch vom Forschungsinteresse. Das Design von leichten Manipulationsrobotern mit integrierten Drehmomentsensoren in Roboterjelenken [Hirz01] scheint ein viel versprechendes Konzept für die Zukunft der Interaktionsrobotik zu sein. Spezifische Algorithmen zur Kontaktregelung, die für die Anwendung in Chirurgie- und Rehabilitationsrobotik geeignet sind, ziehen auch das gegenwärtige Forschungsinteresse [Rebo92] an. Die Impedanzregelung ist auch eine viel versprechende Methode zur dynamischen Regelung des menschlichen Ganges [Chun99]. Schließlich sollte die Integration der Nachgiebigkeitsregelung und Videosensoren [Yosh00, Adam99] ein sehr attraktives und zukunftsorientiertes Forschungsthema sein. Die Nachgiebigkeitsregelung repräsentiert die grundlegende Regelungsmethode in den neuen schnell entstehenden Roboteranwendungen, wie die virtuelle physikalische Interaktion zwischen dem Roboter und dem Bediener, Telemanipulatoren [Arca02], Haptic Systeme [Hann01], menschliche Assistenten und Leistungsverstärker, Rehabilitationsroboter [Rein02] usw. Die integrierte Kraftregelung wird in handbetriebenen, intelligenten Hilfsgeräten grundsätzlich angewandt. Spezifische Regelungsalgorithmen, wie die verteilte Impedanzregelung oder die prädiktive Impedanzregelung werden entwickelt, um die Probleme der großen Zeitverzögerung in Telemanipulatoren zu bewältigen.

1.3.2 Problematik der Kontaktnahme und Kontaktstabilität

Zusätzlich zur gegebenen Klassifikation sollte die wichtige Frage der Kontaktregelung bezüglich der *Kontaktnahme* geklärt werden. Der Typ der Kontaktregelung variiert abhängig von der Kontaktaufgabe. Jedoch wird die Realisierung der Kontaktaufgabe immer in drei Bewegungsphasen dargestellt: (1) Phase der großen kontaktfreien Bewegung, (2) Phase der Kontaktnahme, (3) Phase der Bewegung im Kontakt. In der Fachliteratur wird die Kontaktnahme auch als *Impact* bezeichnet.

- Wird vom Regelungssystem eine Nachgiebigkeitsregelung gefordert, bleibt die gleiche positionsbasierte Regelungsstruktur in allen drei Bewegungsphasen vorhanden.
- Wird vom Regelungssystem eine Regelung der Kontaktkraft gefordert, muss man die Regelungsstruktur während des Überganges von der kontaktfreien in die kontaktbehaftete Phase, anders gesagt, von der Positionsregelung in die Kontaktkraftregelung umschalten. Die Phase der Kontaktnahme wird entweder gleich im Kraftreglermodus oder zunächst im Positionsreglermodus durchgeführt. Die Regelungsstruktur wird dabei erst nach der Kontaktnahme in den Kraftreglermodus

umgeschaltet.

Problematik der Kontaktnahme kennzeichnet sich: durch die großen Kontaktkräfte wegen der höheren Kontaktgeschwindigkeiten, was zu Schäden im Robotersystem, im Endeffektor oder im kontaktierenden Objekt führen kann und durch den Verlust der Regelungsstabilität beim Umschalten in den Kraftreglermodus wegen der Verzögerungen im steifen Positionsregelkreis und der starren Umgebung, was zum Verlust des Kontaktes bzw. zu Oszillationen in der Kontaktkraft führen kann.

Die Gewährleistung der Kontaktnahmestabilität gilt als Voraussetzung für die Durchführung der Kontaktaufgaben. Als stabile Kontaktnahme bezeichnet man den Übergang von der kontaktfreien Bewegung in die kontaktbehaftete Bewegung mit einem Dauerkontakt, wobei der Kontakt nach der ersten Kontaktnahme nicht verloren geht, keine Nullkraft eingestellt wird und keine dauerhaften Schwingungen in der Kontaktkraft entstehen. Mit anderen Worten, wird die ganze Kontaktnahmeenergie mit einem Schritt absorbiert, ohne dass die Zurückprallungen und die Schwingungen hervorgerufen werden. Es gibt zahlreiche Literaturveröffentlichungen, die sich den Problemen der stabilen Kontaktnahme und der stabilen Bewegung im Kontakt (beide sind schwer zu trennen) widmen. Des Weiteren erfolgt der Überblick zu den vorgeschlagenen Stabilisierungsmaßnahmen.

1.3.2.1 Stabilisierung der Kontaktnahme im Kraftreglermodus

Die zugrunde liegende Idee der meisten Methoden bezieht sich auf die Erhöhung der Dämpfung [DeSc92b] in der Interaktionsrichtung. Bei steifer Umgebung kann dies beispielsweise entweder durch die Kraftableitungen oder die Geschwindigkeitsrückkopplung erzielt werden. Beide Methoden haben praktische Begrenzungen: die Kraftsignale sind normalerweise verrauscht, die Ableitung ist ungenau und die Geschwindigkeitsmessung bei langsamer Bewegungen vor dem Kontakt ist nicht zuverlässig. Außerdem können schnelle Oszillationen der Kraft-/ Geschwindigkeit bei steifer Umgebung wegen der Zeitverzögerung in der Rückkopplung die Instabilität verursachen. Diese Schwierigkeiten haben Arbeiten zur Kraftregelung ohne Geschwindigkeitsmessung [Sici96] und ohne Kontaktkraftmessung [DeQu96, Dapp03] unter Annahme bekannter Systemdynamik ins Leben gerufen. Jedoch sind diese Techniken verhältnismäßig kompliziert und erfordern weitere experimentelle Tests. Unabhängig von aktiven Dämpfungsmethoden erfordert die Kontaktnahmeregulierung im Kraftregelungsmodus einige Änderungen der Regelungsstrategie oder der Parameter des Positionsreglers. Die integrale explizite Kraftregelung verursacht die Roboterbeschleunigung in der Krafttrichtung nach dem Kontaktverlust. Die implizite integrale Kraftregelung verursacht sehr langsame Bewegungen beim Übergang von dem verkoppelten in den freien Raum wegen der Parameteränderungen des Positionsreglers (kleine Werte bei Kraftregelung wegen der Kontaktstabilität, große Werte bei Positionsregelung wegen der Positionierungsqualität).

1.3.2.2 Stabilisierung der Kontaktnahme im Positionsreglermodus

Andere Methoden verwirklichen die Kontaktnahmeregulierung im Positionsreglermodus und schalten danach den Kraftregelungsmodus ein. Mills und Lokhorst [Mill93] haben eine Methode vorgeschlagen, die globale asymptotische Stabilität des Regelungssystems, asymptotische Positions-/Kraftbahnfolge verwirklicht. Wu [Wu96] hat vorgeschlagen, ein

positives Beschleunigungsrückkopplung in der kraftgeregelten Richtung hinzuzufügen. Ähnliche Regelungsstrategie für das Kontaktnahmeproblem bei Kraft- und Impedanzregelung wurde von Volpe und Khosla [Volp93b] entwickelt. Die Autoren haben eine positive Krafrückkopplung während der Kontaktnahme und integrale Kraftregelung danach empfohlen. Gegründet auf der Äquivalenz zwischen der Kraft- und Impedanzregelung haben die Autoren die Stabilitätsbedingung der Kontaktnahme für Impedanzregelung auf das Verhältnis der Roboterträge hergestellt.

1.3.2.3 Stabilisierung der Bewegung im Kontakt

Untersuchungen zur stabilen Bewegung im Kontakt befassen sich mit den Einflüssen sowohl der eigenen Systemdynamik als auch der Umgebungsdynamik. Mehrere von denen werden einem oder anderem Aspekt gewidmet. Colgate und Hogan [Gol88] betrachten die Umgebung als ein lineares, zeitinvariantes, dynamisches System und zeigen die Entstehung der Instabilität durch die Umgebungsdynamik [Holl87]. Kapelle und Su [Chap92] verbreiten dieses Ergebnis auf "fast passive" Systeme. An und Hollerbach [Holl89] identifizieren eine neue Form der Instabilität in der Kraftregelung des Manipulationsroboters, die bei der Multiverbindung der Gelenke durch die inverse Kinematik (nicht nur an den Punkten der Singularität) verursacht wird. Lawrence [Lawr88] analysiert den destabilisierenden Einfluss der Zeitverzögerung auf die Regelungsqualität. Vossoughi and Donath [Voss85] analysieren den Einfluss der nichtlinearen Reibungseffekte auf die Qualität der Impedanzregelung. Man stellte fest, dass eine hohe Verstärkung im Positionsregelkreis zu limitierter Abtastzeit wegen der Reibungs-/Klemmeneffekte führt. Eppinger und Seering [Eppi87] untersuchen den Einfluss der Ungenauigkeiten in der Dynamikmodellierung auf die Kontaktstabilität und führen einen zusätzlichen (elastischen) Freiheitsgrad des Roboters und der Umgebung ein. Dennoch wurde festgestellt, dass keine Instabilität allein durch die Umgebungsdynamik verursacht wird.

1.3.3 Adaptive Regelungsmethoden

Traditionelle Methoden der stationären Regelung erlauben den optimalen Reglerentwurf mit konstanter Struktur und konstanten Parametern anhand der Information über die Zustandsvariablen für die stationären Regelstrecken nach verschiedenen Optimierungskriterien [Lutz02]. Für die nicht stationären oder apriori unbekanntem Regelstrecken soll das Regelungssystem anpassungsfähig sein. Im Laufe des Betriebes eines Robotersystems, insbesondere in Kontaktaufgaben, werden oft die wesentlichen Veränderungen im Roboterverhalten beobachtet. Grundsätzlich heben sich die *koordinatenbasierte* (schnelle) und *parameterbasierte* (langsame) Änderungen hervor. Diese sind mit variabler Raumlage, dynamischen Wechselwirkungen zwischen Robotachsen, variabler Last, Reibungseffekten, Änderung der mechanischen Umgebungseigenschaften sowie nichtdeterministischer Umwelteinflüsse verbunden. Dabei können die bedeutenden Parameter- bzw. Signalvariationen innerhalb eines relativ kurzen Zeitraums (weniger Millisekunden) stattfinden. Für die qualitative Regelung solcher Robotersysteme in verschiedenen Betrieben ist die Anwendung zweier Prinzipien anzuwenden: die *Optimierung* und die *Adaptation*.

Optimierung ist das Ziel der Funktionalität des Regelungssystems, das die Einstellung des effektivsten bzw. optimalen Arbeitsbetriebes gewährleistet. Man

unterscheidet folgende Optimierungskriterien: *Extremwertkriterien* (Maximum der Schnelligkeit, Minimum des dynamischen Fehlers, Minimum der Energieverbrauch, vorgegebener Phasenrand, Maximum der Stabilität etc), *Festwert- und Invarianzkriterien* (Überschwingweite, Einstellzeit, Amplitude und Frequenz der Selbstschwingung, Einhaltung vorgegebener Pol-Null-Verteilung etc) und *Strukturoptimalkriterien* (Reglerstruktur bzw. Reglerordnung).

Adaptation ist **der Vorgang** der Veränderung des Algorithmus (Struktur, Parameter, Signale) eines Regelungssystems anhand der aktuellen Information mit dem Ziel, den angeforderten Systemzustand (Haltung der Funktionsfähigkeit, Gewährleistung ausgewählter Optimierungskriterien) zu erreichen.

Das adaptive Regelungssystem besteht dementsprechend aus zwei obligatorischen Regelkreisen, nämlich aus einem *Grundregelkreis* und einem *Adaptationsregelkreis*. Der Grundregelkreis übernimmt die Regelung der schnellen koordinatenbasierten Vorgänge und der Adaptationsregelkreis übernimmt die Regelung der langsamen parameterbasierten Vorgänge (s.Abb.1.15). D.h. im adaptiven Regelungssystem wird die aktuelle Information nicht nur für die Berechnung des Steuerungssignals, sondern auch für die Änderung des Regelungsalgorithmus verwendet.

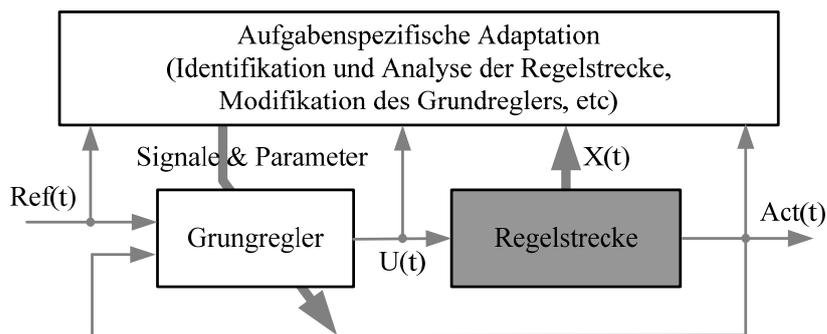


Abb.1.15. Allgemeines Schema des adaptiven Regelungssystems

Im Laufe der Evolution der adaptiven Regelungstheorie wurde eine Vielfalt von Regelungsalgorithmen entwickelt, zur deren Klassifikation eine Reihe von Kriterien existiert. Die wichtigsten Kriterien geben Antwort auf die Fragen: „Was wird angepasst?“ und „Wie wird angepasst?“.

1.3.3.1 Anzunpassende Einheiten

Das wichtigste Klassifikationskriterium gibt Auskunft darüber, welches Teil des Grundreglers anzupassen ist. Man unterscheidet:

Selbstorganisierende Regelungssysteme, deren **Algorithmus (Struktur, Parameter und Signale)** während der Änderung der Regelstreckenparameter oder der äußeren Bedingungen sich verbessern. Das Gesetz der Struktureinstellung in selbstorganisierenden Regelungssystemen ist im Voraus unbekannt. Es werden nur einige Qualitätskriterien angegeben. Die Suche läuft automatisch und das System bestimmt selbst, welche korrigierenden Glieder, welche logische und arithmetische Operationen und in welcher Reihenfolge hinzugefügt werden sollten. Es ist

offensichtlich, dass die selbstorganisierenden Regelungssysteme über größere Regelungsmöglichkeiten verfügen, jedoch sehr kompliziert sind. In der Regel nutzt man diese wirksam zur Regelung der fast stationären Regelstrecken.

Selbstanpassende Regelungssysteme, deren **Parameter und Signale bei konstanter Struktur** während der Änderung der Regelstreckeparameter oder der äußeren Bedingungen modifiziert werden.

Bemerkung: Die Anwendung von adaptiven selbstorganisierenden Regelungssysteme ist in der Praxis problematisch. Deshalb werden diese Regelungssysteme bei der vorliegenden Arbeit nicht in Betracht gezogen. Die adaptiven selbstanpassenden Regelungsmethoden werden hingegen oft angewendet und sind ein wichtiger Gegenstand der Untersuchungen der vorliegenden Arbeit. Es wird ebenfalls angenommen, dass die ausgewählten Strukturen der Künstlichen Neuronalen Netze konstant bleiben und ausschließlich die Neuronengewichte und die Parameter der Aktivierungsfunktionen sich ändern. Dementsprechend werden die genannten Methoden zu den selbstanpassenden Regelungssystemen zugeordnet.

Die Frage „Was wird angepasst?“ lässt sich zusammengefasst wie folgt beantworten: es werden sowohl die Signale (so genannte „*passive Anpassung*“) als auch die Parameter (so genannte „*aktive Anpassung*“) im Regelungssystem mit konstanter Struktur angepasst.

1.3.3.2 Art der Adaptation

Das weitere Klassifikationskriterium von selbstanpassenden Regelungssystemen betrachtet die Möglichkeit, die aktuelle Information über die Regelstrecke zu ermitteln. Man unterscheidet zwischen den *suchalgorithmischen* und *reguläralgorithmischen* adaptiven Regelungssystemen.

Besonderheit der *suchalgorithmischen adaptiven Regelungssystemen* liegt darin, dass ein formelmäßiger Zusammenhang zwischen den ermittelten Regelungssignalen und den Regelstreckeparametern nicht abgebar bzw. sehr kompliziert ist, und daher keine direkte Berechnung der Reglerparameter/-signalen möglich ist. Deswegen werden spezielle Probesignale verwendet, mit deren Hilfe die Abweichung des gewählten Gütekriteriums in Abhängigkeit von der Änderung der Reglerparameter/-signalen bestimmt wird. Aufgrund der Analyse der entstehenden Abweichung, die den Mangel der aktuellen Information über die Regelstrecke kompensiert, wird der Extremwert des gewählten Gütekriteriums berechnet (s. Abb. 1.16). Auf diese Weise wird die Regleranpassung in zwei Schritten durchgeführt: die Bestimmung des Gradienten des gewählten Gütekriteriums mit Hilfe der Probesignale und die Gewährleistung der Bewegung des Systems zum Extremwert. Das entscheidende Klassifikationskriterium liegt dabei im Aufbau der Suchverfahren. Man unterscheidet *systematische Suchverfahren*, *zufällige Suchverfahren* und *zufällige Suchverfahren mit Analyse von Zwischenergebnissen*.

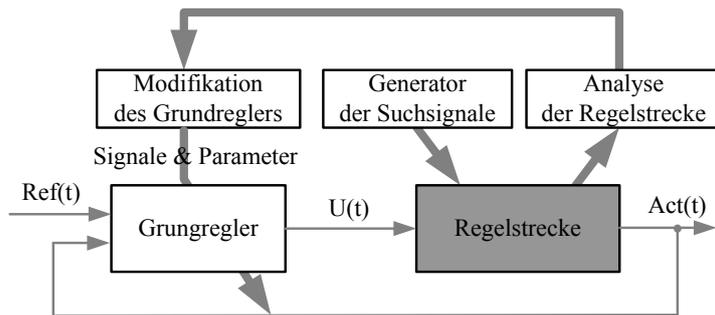


Abb.1.16. Suchalgorithmische Adaptation

In vielen Robotersystemen existiert ein formelmäßiger Zusammenhang zwischen den ermittelten Regelungssignalen und Regelstreckeparametern. Notwendige Information über die aktuellen Parameter der Regelstrecke ist auch oft einfach zu ermitteln. Als Ergebnis entsteht die Möglichkeit der einfacheren **reguläralgorithmischen adaptiven Regelungssystemen** zu entwerfen. Diese Systeme kennzeichnen sich dadurch, dass ein Referenzmodell in einer entweder expliziten (reales dynamisches Glied) oder impliziten (Referenzverhältnis zwischen Reglerparametern und regulierenden Größen) Form zur Verfügung steht. Abhängig davon, ob der Adaptionsregelkreis geöffnet oder geschlossen ausgelegt wird, unterscheidet man **direkte und indirekte** reguläralgorithmische adaptive Regelungssystemen [Zypk68, Solo85, Egup02]:

- **direkte adaptive Regelungssysteme (geschlossener Adaptionsregelkreis):** hierbei besteht die Aufgabe des Adaptionsregelkreises in der Minimierung der Abweichung zwischen dem Grundregelkreis und dem Referenzmodell. Der geschlossene Adaptionsregelkreis kompensiert die Parameterabweichungen der Regelstrecke und des Grundreglers. Die Identifikationsphase der Regelstrecke wird ausgeschlossen. Generell geht man davon aus, dass der Zusammenhang zwischen den Reglerkoeffizienten und den Regelstreckenparametern existiert und durch den ausgewählten Regelungsalgorithmus gesteuert wird. Andererseits wird die Systemordnung größer und die gesamte Systemdynamik wird beeinflusst. Diese Regelungsmethode wird in Fachliteratur als „Model Reference Adaptive Control“ bezeichnet (s.Abb.1.17);
- **indirekte adaptive Regelungssysteme (offener Adaptionsregelkreis):** hierbei wird zuerst die Identifikation der Regelstrecke durchgeführt und anhand dieser Identifikation werden die entsprechenden Parameter des Grundreglers eingestellt. Der Adaptionsregelkreis bleibt offen und die Systemdynamik wird dabei nicht beeinflusst. Allerdings wirken der Identifikationsfehler bzw. die Parameterdrift auf die Regelungsgenauigkeit aus. Diese Regelungsmethode wird in Fachliteratur als „Self-Tuning Control“ bezeichnet (s.Abb.1.17);

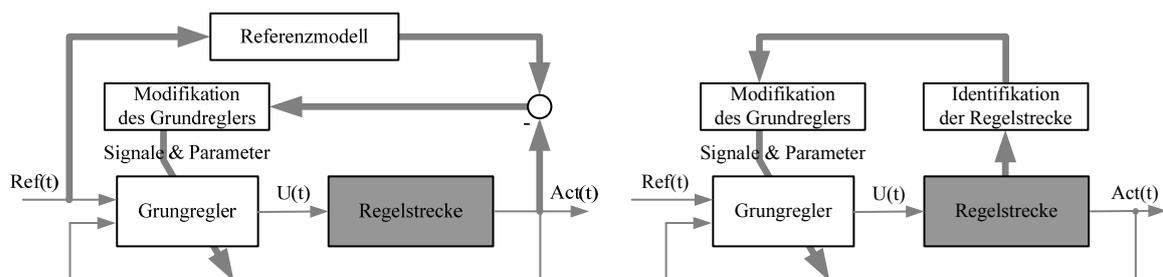


Abb.1.17. Reguläralgorithmische Adaptation:
(links) direkte adaptive Regelung, (rechts) indirekte adaptive Regelung.

1.3.3.3 Methoden zur Synthese adaptiver Regelungssysteme

Ein hochwertiges Regelungssystem wird ausschließlich anhand eines genauen mathematischen Modells der Regelstrecke zu entwickeln. Die Wahl oder die Erarbeitung dieser mathematischer Modelle anhand der apriori bzw. aposteriori Informationen über der Regelstrecke ist das Hauptproblem bei der Entwicklung von Regelungssystemen. Laut dem Ashby' Prinzip [Ashb74] soll der Komplexitätsgrad des Regelungssystems nicht niedriger als der Komplexitätsgrad der Regelstrecke sein.

Bei der Synthese adaptiver Regelungssysteme unterscheidet man generell *heuristische* und *theoretische* Methoden. Bei den heuristischen Methoden, die früher verwendet wurden, fehlt die strenge Begründung der Stabilität und folglich die Bedingungen zur Methodenanwendung. Theoretische Methoden sind hingegen streng begründet und lassen sich in *genaue* und *annähernde* Methoden unterteilen. Diese sollen im Weiteren betrachtet werden.

Zur **Synthese des Grundregelkreises** fanden sowohl genaue als auch annähernde Methoden ihre Anwendung:

- ***theoretische genaue Methoden:***
 - *Invarianzmethode*, die der Auswahl der "idealen" Steuerungssignale aus der Gleichheit der rechten Teile des Referenzmodells und des Regelungsstreckemodells implementiert;
 - *modale Regelung*, in der die "idealen" Steuerungssignale aus den erwünschten Kennwerten des Übergangsprozesses, d.h. der Wurzelverteilung im charakteristischen Polynom ausrechnen lassen;
 - *optimale Synthese*, in der die Aufgabe der Optimierung des asymptotischen (bei $t \rightarrow \infty$) Qualitätskriteriums nach der Führungsgröße gelöst wird.
- ***theoretische annähernde Methoden:*** ihnen liegen die Methoden der Dekomposition zugrunde. Diese beruhen auf der Vereinfachung des Modells und auf der Synthese nach dem vereinfachten Modell. Für die Vereinfachung und die Dekomposition werden *-Methoden der Störungstheorie*, *-der Lyapunov-Skalarfunktionen bzw. Lyapunov-Vektorfunktionen*, *-harmonische Linearisierung*, *-Missachten der Störungen* verwendet. Das Verfahren, bei dem die Systembewegungen in schnelle und langsame geteilt werden, ist besonders beliebt. Dabei wird die Synthese nach dem Modell langsamer Bewegungen realisiert:
 - *Mittelwertmethode*,
 - *Methode singulärer Störungen*.

Zur **Synthese des Adaptationsregelkreises** fanden folgende Methoden ihre Anwendung.

- *Gradientenmethode*. Der Algorithmus der Veränderung der anzupassenden Parameter wird in der Richtung des Antigradients der Zielfunktion vom Abweichungsfehler gebaut. Die Algorithmen fordern die Berechnung der Sensibilitätsfunktion, die von Objektparametern abhängt. Das widerspricht der Aufgabenstellung der adaptiven Regelung. Das Problem wird durch die genäherte Berechnung der Sensibilitätsfunktion mit Hilfe des Referenzmodells überwunden.
- *Lyapunov-Funktion Methode* [Nare74]. Die meisten Algorithmen dieser Gruppe können im Rahmen der Schnellgradientenmethoden ermittelt werden. Diese Methoden basieren auf der Tatsache, dass der Gradient der Zielfunktion mit der Richtung des

Gradienten übereinstimmt. Der Anpassungsalgorithmus wird in die Richtung des Antigradienten von der Geschwindigkeit der Zielfunktionsänderung aufgebaut. Die Methode garantiert die Existenz der Lyapunov-Funktion als die Summe der Quadratabweichungen zwischen den angepassten und idealen Parametern.

- *Hyperstabilitätsmethode* [Nare80]. Die Synthese des Adaptationsregelkreises folgt aus der Bedingung der Hyperstabilität des Regelungssystems mit dem adaptiven Regler.
- *Sliding Mode Methode* [Fila00]. Bei der Entstehung des Sliding-Modes wird das System invariant zu parametrischen Störungen. Die Systeme mit der Signalanpassung, die aufgrund der Schnellgradientenmethoden abgeleitet werden, schließen sich dieser Gruppe an.
- *Methode des „unendlichen“ Verstärkungsfaktors*. Bei der Methode verwendet man einen unendlich großen Verstärkungsfaktor, dank welchen die Übertragungsfunktion des Systems der Übertragungsfunktion des Referenzmodells äquivalent ist. Zu den Nachteilen dieser Methode zählen der mögliche Stabilitätsverlust beim großen Verstärkungsfaktor und die starke Störanfälligkeit.

Die adaptiven Regelungssysteme, die auf den letzten zwei Methoden basieren, werden aufgrund des Fehlens des Adaptationsregelkreises als Regelungssysteme mit adaptiven Eigenschaften bezeichnet.

Die dargestellte Klassifikation, zusammengefasst in der Tabelle 1.4, spiegelt die Basisklassifikation der adaptiven Regelungsmethoden wider.

Tabelle 1.4. Klassifikation der adaptiven selbstanpassenden Regelungsmethoden.

Adaptive selbstanpassende Regelungssysteme		
<i>mit suchalgorithmischen Optimierungsprozessen:</i>	<i>mit reguläralgorithmischen Optimierungsprozessen:</i>	
Suche des Extremwertes eines gegebenen Gütekriteriums anhand der speziell organisierten Probesignale.	Stabilisierung dynamischer Eigenschaften eines willkürlichen nichtstationären Systems bezüglich eines gegebenen Referenzmodells.	
	Direkte Adaptation <i>/Model Reference Control/</i> Minimierung der Abweichung zwischen dem Grundregelkreis und dem Referenzmodell.	Indirekte Adaptation <i>/Self-Tuning Control/</i> Kontinuierliche Identifikation der Regelstrecke mit weiterer Optimierung des Grundreglers.
- Extremwertsuche mit systematischen Suchverfahren: Gauss-Seidel, Gradientenbasierte. - Extremwertsuche mit zufälligen Suchverfahren.	- <u>Anpassung der Signale:</u> Gradientenmethoden, Sliding Mode, „unendlicher“ Verstärkungsfaktor. - <u>Anpassung der Parametern:</u> Gradientenmethoden, Lyapunov-Methoden, Hyperstabilitätsmethoden.	- <u>Anpassung der Signale:</u> adaptive Kompensation der Systemdynamik. - <u>Anpassung der Parametern:</u> adaptive Zustandsbeobachter.

1.3.4 Systemmodellierung und -identifikation

In vielen Fällen muss die Aufgabe „Systemmodellierung und -identifikation“ beim Aufbau eines stationären bzw. adaptiven Regelungssystems gelöst werden.

Das **Systemmodell** ist ein Berechnungswerkzeug, welches die Fragen über das Systemverhalten ohne Durchführung experimenteller Untersuchungen beantwortet.

Beispielsweise wird das Systemmodell zur Berechnung und Analyse der Systemantwort auf einen bestimmten Eingang oder zur Vorhersage der künftigen, in hypothetischen Situationen sogar gefährlichen Systemzustände angewandt. Bei der Entwicklung eines Systemmodells wird davon ausgegangen, dass physikalische Systeme komplex und nichtlinear sind, und dass Modelle verschiedener Komplexität zu verschiedenen Zwecken aufzubauen sind. Beispielsweise wird das nominale Modell zum Entwurf des Regelungssystem und das Referenzmodell zur Prüfung des entworfenen Regelungssystems verwendet. Das Systemmodell beschreibt die Zusammenhänge zwischen den gemessenen Systemsignalen (Eingangs-/Ausgangssignalen, Zustandsvariablen). Diese Zusammenhänge können anhand physikalischer Gesetze, wie Energie-/Impuls-/Masseerhaltungsgesetz etc, oder anhand der so genannten Blackbox ermittelt werden. Die Blackbox verfügt über eine flexible Struktur zur Beschreibung verschiedener Systeme. Die Parameter dieser Struktur sind nicht physikalisch interpretierbar. Die Klassifikation der Systemmodelle erfolgt entsprechend der Eigenschaften des ermittelten Gleichungssystem, womit diese Modelle beschrieben werden (s. Tabelle 1.5).

Tabelle 1.5. Klassifikation der Systemmodelle.

Modelleigenschaften	gegensätzliche Eigenschaften	Bedeutung
Ein Eingang und ein Ausgang	mehrere Eingänge und mehrere Ausgänge	... Modellgleichungen haben nur ein Eingang und ein Ausgang (mehrere Eingänge und/oder mehrere Ausgänge)
linear	nichtlinear	... Modellgleichungen sind im Bezug auf Systemsignale linear (nichtlinear)
zeitabhängig	zeitinvariant	... Modellparameter sind variable (konstant)
kontinuierlich	diskret	... Modellgleichungen beschreiben das Systemverhalten zu jedem beliebigen Zeitpunkt (nur in diskreten Zeitpunkten)
Eingang-Ausgang	Zustandsvariable	... Modellgleichungen beinhalten nur Eingänge und Ausgänge (auch Zustandsvariablen)
konzentrierte Parameter	verteilte Parameter	... Modellgleichungen sind gewöhnliche Differentialgleichungen (verteilte Differentialgleichungen)

Die typischen Systemmodelle anhand der physikalischen Gesetze, die so genannten Whitebox, sind *Übertragungsfunktionen in der Zeitdomäne, Zustandsraummodelle mit einer freien/kanonischen/strukturellen Parametrierung, nicht parameterbasierte Korrelationsanalyse und Spektralanalyse Modelle* etc.

Die typischen Systemmodelle anhand der Blackbox sind *lineare polynomiale ARX/ARMAX/Box-Jenkins/Output-Error Modelle, nichtlineare ARX, Voltera-Reihen, Hammerstein-Wiener Modelle* sowie auch *Künstliche Neuronale Netze (KNN)* etc.

KNN stellen ein universelles mathematisches Werkzeug dar und beschreiben ineinander geschaltete, mathematische Funktionen, deren Parameter durch Lernvorgänge eingestellt werden. Topologisch gesehen, lassen sich KNN wie folgt unterteilen:

- *Vorwärtsgerichtete Netze* (Feedforward Nets) haben ihre Vorteile in der einfachen Realisierung und Gewährleistung des Antwortverhaltens nach der sequenziellen Datenverarbeitung in den Netzschichten.

- *Rückwärtsgekoppelte Netze* (Feedback Nets) haben ihre Vorteile in der Minimierung der Netzgröße, da die Neuronen an der Datenverarbeitung vielfach teilnehmen und in die daraus folgende Vereinfachung des Lernprozesses.

Obwohl es theoretisch eine unübersehbare Menge von denkbaren Netzstrukturen gibt, haben sich nur einige als funktionsfähig erwiesen. In der Tabelle 1.6 sind die bekanntesten Netztopologien mit ihren Einsatzbereichen zusammengefasst [Zell00].

Tabelle 1.6. Einsatzbereiche bekannter Netztopologien.

Einsatzbereich	Netztopologie	Kurzbeschreibung
Klassifikation	Counterpropagation, LVQs, SOM mit Klassifikationsausgang,	Zuordnen zu Klassen / Klassenbildung
Prognose	MLP, RBF	Beschreibung analytisch unbekannter Zusammenhänge
Zeitreihen	Recurrente Netze, Time Delay Netze	Vorhersage zeitlicher Zusammenhänge
Visualisierung	SOM, ART	Visualisierung unbekannter Zusammenhänge und Eigenschaften
Assoziation	Hopfield-Netze, Hemming-Netze, BAM	Zuordnung gestörter Muster (Referenzmuster)
Filterung	Forwärtsgerichtete Netze	Filterung der Daten
Optimierung	Rückwärtsgekoppelte Netze	Stark von der Aufgabe abhängig

Von besonderem Interesse sind die modernen KNN Topologien mit aufeinander folgenden Strukturflüssen [Jako01], wobei jeder folgender Strukturfluss den Fehler des vorhergehenden Strukturflusses minimiert. Beispielsweise ist die Struktur mit einem linearen Fluss, einem nichtlinearen Fluss und einem stochastischen Fluss praktisch in der Lage ein beliebiges System darzustellen.

Systemidentifikation bedeutet das Auffinden des Systemmodells aufgrund von vorhandenen a priori Wissen über das System und von messbaren Ein- und Ausgängen.

Die Systemidentifikation ist ein typisches „Versuch–Fehler“ Verfahren, wobei verschiedene Modelltypen geschätzt und validiert werden, solange das einfachste und adäquate Modell der Systemdynamik gefunden wird. Ein unentbehrlicher Teil der Identifikation bildet das Lernalgorithmus. Alle bekannten Lernalgorithmen unterteilen sich in drei Gruppen [Norg00, Nauc98]:

- *Das Lernverfahren mit dem Lehrer* erfolgt anhand der quantitativen Information über den quantitativen Fehler (wie gut oder schlecht), wird in Bereichen Approximation, Zeitreihen, Filterung, Optimierung etc verwendet. Die bekanntesten Algorithmen sind die Methode der Pseudoinverse Matrix, Wiener-Hopfman Methode, LSE–Methode, gradientbasierte Backpropagation erster Ordnung (Momentum-Term, SuperSAB, Quickprop, konjugierte Gradienten etc) und zweiter Ordnung (Newton, Quasi-Newton, Newton-Gauß, Levenberg-Marquardt etc).
- *Das Lernverfahren ohne den Lehrer* erfolgt ohne jegliche Information über den Fehler, es wird in den Bereichen Klassifikation und Assoziation verwenden und dient der Ermittlung der Gleichmäßigkeiten im Datenmassiv, zum Herausfinden der erzeugenden Datenverteilungsfunktion, zum Finden der kompakteren Beschreibung von Datensätzen.
- *Das Lernverfahren mit der Verstärkung* (engl. reinforcement learning) erfolgt anhand der qualitativen Information über den Fehler (nur gut oder schlecht) und dient dem

Erlernen des „zugewiesenen“ Verhaltens.

1.4 Zielsetzung und Inhaltsübersicht

Das wissenschaftliche Ziel- und Aufgabenstellung der Arbeit ist die Entwicklung von Methoden zur adaptiven Regelung der Kontaktkraft bzw. der Nachgiebigkeit eines Robotersystems in Kontaktaufgaben und zur Optimierung des Verhaltens des gebundenen Gesamtsystems „Roboter-Umgebung“. Der besondere Wert dabei liegt auf der Kontaktstabilität und Minimierung der mechanischen Strukturbelastungen.

Das technische Ziel der Arbeit ist:

- die Entwicklung der echtzeitfähigen und interaktionsfähigen Simulationsumgebung auf der Basis gängiger Software zur Simulation der physikalischen Eigenschaften vom industriellen Manipulationsroboter, mehrbeinigen Schreitroboter, dynamischer Umgebung sowie auch des Roboterantriebes und des Regelungssystems sowie auch
- die Entwicklung und Realisierung eines modularen mehrbeinigen Schreitroboters „Slair2“,
- ein experimenteller bzw. simulativer Nachweis der vorgeschlagenen Modelle, Regelungstechniken und Regelungsalgorithmen an dem entwickelten Simulator und dem Schreitroboter ist ebenso durchzuführen.

Die Arbeit wird folgendermaßen gegliedert. Im Kapitel 1 wird zunächst die Problematik der Regelung der Roboterbewegung im Kontakt mit seiner Umgebung erläutert. Im Nachfolgenden werden die biologischen Hintergründe zur Problemlösung vorgestellt. Das Kapitel gibt den Überblick der existierenden Konzepte zur Regelung der Roboterbewegung im Kontakt sowie auch den Überblick bekannter adaptiver Regelungstechniken. Im Kapitel 2 werden einige dynamischen Modelle des gebundenen Systems „Robot/Umgebung“ präsentiert. Diese Modelle besitzen einen unterschiedlichen Komplexitätsgrad und beschreiben verschiedene Effekte. Die für die Ziel- und Aufgabenstellung relevanten Modelle werden ausgewählt und diskutiert. Das Kapitel 3 gibt den Überblick der Basisoperationen der Kontaktregelung, wie die Detektierung des Kontaktes, Kontaktraumdekomposition und Auswahl der Selektierungsmatrix, Identifizierung mechanischer Eigenschaften der Umgebung, Regelung der Kontaktkraft, Regelung der Roboternachgiebigkeit, Analyse der Kontaktstabilität. Die Kapitel 4 und 5 sind dem experimentellen Nachweis der Richtigkeit der theoretischen Ansätze und der vorgestellten Verfahren gewidmet und stellen die Lösungen der Kontaktaufgaben entsprechend für die stationären und mobilen Roboter dar. Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Arbeit erfolgt im Kapitel 6.

Kapitel 2

Modellierung und Simulation des Robotersystems im Kontakt

Dieses Kapitel behandelt die Fragen der Modellierung von Robotersystemen, Modellierung des mechanischen Kontaktes, Modellierung von Robotersystemen im Kontakt sowie die Auswahl von geeigneten Modellen des Roboters und der Umgebung zur Entwicklung der Steuerungs- und Regelungsalgorithmen. Außerdem wird die Problematik der Simulation gebundener Mehrkörpersystemen dargestellt.

Modellierung und Simulation des Robotersystems im Kontakt sind unabdingbare Teile eines Verfahrens, bei dem ein Steuerungs-/Regelungssystem für die Durchführung der Kontaktaufgaben entworfen wird. Die Aufgabe der Modellierung ist die Erstellung eines möglichst einfachen, aber kennzeichnenden Modells des Robotersystems im Kontakt, das alle relevanten Eigenschaften des Roboterhaltens im Kontakt abbildet. Das Modell könnte verschiedene Formen, wie die Übertragungsfunktion im Laplace- bzw. Z-Bereich, Modell mit Zustandvariablen, Gray/Black-Box-Modell etc, annehmen und dient der Entwicklung eines geeigneten Reglers. Die Aufgabe der Simulation ist eine möglichst genaue rechnergestützte Nachbildung physikalischer Prozesse, die im Robotersystem und im Kontaktbereich verlaufen und dient außerdem der Überprüfung und der Validierung des entworfenen Steuerungs-/Regelungssystems. Des Weiteren werden die theoretischen Ansätze dargestellt, die für die Modellierung und Simulation des Robotersystems im Kontakt relevant sind.

Beim Robotersystem handelt es sich um ein Mehrkörpersystem, das aus starren bzw. nachgiebigen Einzelkörpern mit dazwischen eingebauten mechanischen Bindungen besteht. Diese werden als *mechanische Gelenke* bezeichnet und beschreiben die permanenten Einschränkungen in der Roboterbewegung. Generell stellt die Roboterumgebung auch ein Mehrkörpersystem dar. Während des Kontaktes entstehen zusätzliche mechanische Bindungen zwischen dem Robotersystem und der Roboterumgebung. Diese werden als *mechanische Kontakte* bezeichnet. Sie beschreiben die meistens unerwarteten und kurzzeitigen mechanischen Interaktionen, schränken die weitere Bewegung des Robotersystems ein, ändern die kinematische Struktur des Robotersystems und kennzeichnen sich vor allem durch die Kontaktkräfte. Diese entstehen, wenn die Körperoberflächen einander berühren, und wirken der weiteren Körpereindringung entgegen.

Die mechanischen Bindungen kennzeichnen sich aus kinematischer Sicht durch die Anzahl der Freiheitsgrade, aus physikalischer Sicht hingegen durch die Reaktions- und Reibungskräfte aus, sie können konstruktiv als Gelenke, Auflager, Leitbahnen, Stäbe, Fäden, Oberflächen etc. realisiert werden und können genauso wie die Körper *starr* oder *nachgiebig* sein.

- Bei den *starrten Bindungen* werden vernachlässigbare Formänderungen unter Belastung beobachtet. Die Körperbewegungen sind nicht frei, weil die Einschränkungen (so genannten *Zwangsbedingungen*) auf die Koordinate bzw. die Geschwindigkeit der einzelnen Körperpunkte auferlegt werden. Damit geht der physikalische Charakter starrer Bindungen verloren und die durch diese Bindungen bedingte mechanische Wechselwirkung der Körper wird durch die *Zwangskräfte* repräsentiert. Diese Zwangskräfte verrichten am System keine Arbeit, da keine resultierende Bewegung stattfindet. Beispielsweise können die Normalkräfte, Lagerkräfte oder Haftkräfte als Zwangskräfte repräsentiert werden.
- Bei den *nachgiebigen Bindungen* werden die nicht vernachlässigbaren Formänderungen unter Belastung beobachtet. Davon gibt es zwei Arten: (1) *die Elastizität* – die Eigenschaft eines Körpers zur reversiblen Speicherung von Formänderungsenergie und zur Wiederherstellung seiner ursprünglichen Form und Abmessungen nach Rücknahme einer deformierenden Belastung [Kall91]; (2) *die Plastizität* – das Vermögen eines Werkstoffes seine Gestalt beizubehalten, die durch eine deformierende Belastung entstanden ist. Die durch die Bindung bedingte mechanische Wechselwirkung der Körper wird durch die so genannten *eingepprägten Kräfte* repräsentiert, die ihre Ursache in den physikalischen Gesetzen haben. Als Beispiele für die eingepprägten Kräfte können die Seilkraft, Federkraft, Dämpferkraft, Gleitreibungskraft, Gewichtskraft etc genannt werden. Es soll darauf hingewiesen werden, dass die Verformung eines Körpers genau genommen nicht durch eine einzelne Kraft, sondern durch an verschiedenen Angriffspunkten wirkende Kräfte, genannt Spannungen zustande kommt. Je nachdem, wie die Spannungen gerichtet sind, wird der Körper gedehnt, komprimiert oder verzerrt.

Für die Modellierung des Robotersystems und demzufolge für die Entwicklung des Steuerungs-/Regelungssystems ist es von großer Bedeutung festzustellen, ob das Robotersystem in Kontakt mit der aktiven oder passiven Umgebung tritt.

- Im Fall, wenn die Umgebungsfreiheitsgrade durch zusätzliche Aktoren angetrieben werden (*aktive Umgebung*), führt es zu einem spezifischen redundanten Kontrollproblem. Das Modell des Robotersystems im Kontakt wird in Form einer geöffneten Roboterstruktur beschrieben, wobei das letzte Glied einer generalisierten externen Kontaktkraft unterworfen wird. Ein Beispiel dafür sind die kooperativen Manipulationsroboter, die ein gemeinsames Objekt behandeln [Naka91, Vuko89].
- Im Fall, wenn keine Umgebungsfreiheitsgrade durch zusätzliche Aktoren angetrieben werden (*passive Umgebung*) wird es weiter in bewegliche und stationäre Form unterteilt.
 - Bei den Kontaktaufgaben mit der passiven *beweglichen Umgebung* (Anzahl der Umgebungsfreiheitsgrade > 0) ist die eigene Umgebungsdynamik relevant und ist gleichberechtigt mit der Roboterdynamik zu betrachten. Der Bewegungsraum des Robotersystems, entkoppelt in zulässige und unzulässige Bewegungsteilräume, hängt von der Umgebungskonfiguration ab, die während der Kontaktdauer nicht konstant bleibt. Als Beispiele können Montageoperationen genannt werden bei denen der Roboter eine Kurbel dreht oder eine Schublade schiebt.
 - Bei den Kontaktaufgaben mit der passiven *stationären Umgebung* (Anzahl der Umgebungsfreiheitsgrade $= 0$) ist die eigene Umgebungsdynamik irrelevant, da die Umgebungskonfiguration während der Kontaktdauer konstant bleibt. Typische Beispiele dafür sind die mechanische Verformung bzw. die Oberflächenbearbeitung eines stationären Objektes.

In den beiden Fällen bestehen die Kontaktkräfte aus den Reaktionen und Reibungen im Kontakt. Betrachtet man hierbei die starren Kontaktbindungen, so wird das Robotersystem mit den zusätzlichen Zwangsbedingungen anstelle der Kontaktkräfte beschrieben. Die mechanischen Materialeigenschaften im Kontaktbereich spielen dabei keine Rolle. Betrachtet man hingegen die nachgiebigen Kontaktbindungen, so wird das Robotersystem mit den eingprägten auf das letzte Glied wirkenden Kontaktkräften beschrieben. Dabei spielen die mechanischen Materialeigenschaften im Kontaktbereich eine entscheidende Rolle.

Die skizzierten Ansätze zur Modellierung des Robotersystems im Kontakt mit der Umgebung werden in der Tabelle 2.1 zusammengefasst und weiterhin detailliert untersucht. Des Weiteren wird auf die relevante Theorie der Kontaktmechanik eingegangen und die Problematik der Kontaktsimulation soll ebenfalls nher beleuchtet werden.

Tabelle 2.1. Modellierung eines Robotersystems im Kontakt.

Aktive Umgebung <i>(apriori bewegliche)</i>	passive Umgebung <i>(bewegliche/stationäre)</i>	
	mit starrem Kontakt	mit nachgiebigem Kontakt
Modellierung des gebundenen Robotersystems im Kontakt in Form:		
einer geöffneter Roboterstruktur mit dem letzten Glied unterworfen einer generalisierten externen Kraft	einer geschlossenen Roboterstruktur mit zusätzlichen Zwangsbedingungen im Kontakt (Kontaktkraft = Zwangskraft in der Kontaktbindung)	einer geschlossenen Roboterstruktur mit dem letzten Glied unterworfen eingprägten Kontaktkräften

Des Weiteren werden physikalische Probleme bei der Herleitung des mathematischen Modells idealisiert und folgende übliche Vereinfachungen getroffen, die zur Fehleranalyse oder bei einer Beurteilung der Ergebnisse immer in Betracht gezogen werden müssen:

- Vernachlässigung der atomaren oder molekularen Struktur durch Annahme eines Kontinuums;
- Annäherung der physikalischen Parameter (Massendichte, Steifigkeit, Erdbeschleunigung, Vernachlässigung des Einflusses von Temperatur, Strahlung, Abnutzung, Alterung, chemische Prozesse etc);
- Annäherung der geometrischen Parameter (Abmessungen, Vernachlässigung der Oberflächenrauigkeit, Vereinfachung der Geometrie etc);
- Annäherung der Randbedingungen (Idealisierung der Lagerung, Annahme starrer Einspannungen etc);
- Annäherung der Belastungen (Annäherung der Verteilung der Belastung, Vernachlässigung von äußeren Einflüssen wie Wind, etc).

2.1 Modellierung des Robotersystems im Kontakt mit aktiver Umgebung

Unter Einnahme der o.g. Vereinfachungen wird eine offene kinematische Roboterstruktur von einem herkömmlichen industriellen Manipulationsroboter „Mitsubishi RVE3J“ mit 6 Freiheitsgraden und von einem Bein des Schreitroboters „Katharina“ mit 3 Freiheitsgraden betrachtet. Die letzte Verbindung (Endeffektor, Roboterfuß) wird einer generalisierten externen Kraft unterworfen (s.Abb.2.1).

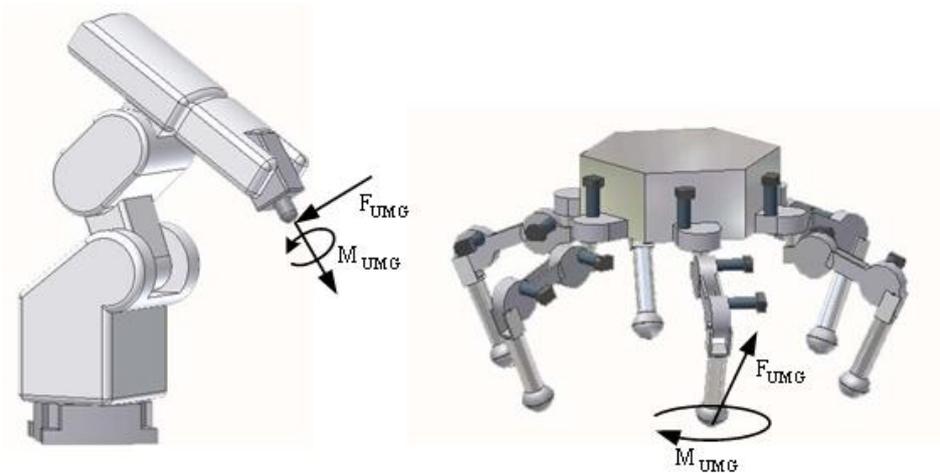


Abb.2.1. Eine offene kinematische Roboterkonfiguration mit generalisierten externen Kräften und Drehmomenten.

2.1.1 Modellierung der Gliedern

Laut Untersuchungen [Deme94] übertrifft der Beitrag der Nachgiebigkeit der Roboterstruktur nicht 20% der Gesamtnachgiebigkeit eines mechanischen Robotersystems im zulässigen Lastbereich. Des Weiteren wird allerdings die Modellierung starrer sowie elastischer Glieder betrachtet.

2.1.1.1 Starre Glieder

Betrachtet man den Roboter idealisiert als kinematische Kette von n starren Körpern, kann das dynamische Modell nach dem Verfahren von Lagrange in Form von n Differentialgleichungen zweiter Ordnung beschrieben werden [Schi90]. Letztendlich kann das vereinfachte Robotermodell in folgender Form geschrieben werden:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}_{DRIVE} + \mathbf{J}^T(\mathbf{q}) \cdot \mathbf{f}_{CONTACT} \quad (2.1)$$

mit

- $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ – $n \times 1$ Vektoren der generalisierten Lagen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Gelenke,
- $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ – $n \times n$ Matrix der Massenträgheitsmomente,
- $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – $n \times 1$ Vektor der Geschwindigkeitskopplungen (Zentrifugal- & Corioliskräfte),
- $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ – $n \times 1$ Vektor der durch Gravitation verursachten Kräfte,
- $\boldsymbol{\tau}_{DRIVE}$ – $n \times 1$ Vektor der generalisierten Momenten in den Gelenken,
- $\mathbf{f}_{CONTACT}$ – 6×1 Vektor der kartesischen Kontaktkräfte (3 Kraft- und 3 Momentkomponente),
- $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ – $n \times n$ Jacobi-Matrix des Roboters.

Die Bewegungsgleichungen nach Lagrange haben den Vorteil, dass die entstehenden Terme physikalisch interpretierbar sind. So fasst die Massenträgheitsmatrix $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ die Matrix

\mathbf{M}_{MOTOR} der motorseitigen Trägheiten umgerechnet auf die Lastseite und die Matrix $\mathbf{M}_{LOAD}(\mathbf{q})$ der aktuellen Gelenkkörperträgheiten (Trägheitstensor) zusammen:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \mathbf{M}_{MOTOR} + \mathbf{M}_{LOAD}(\mathbf{q}), \quad (2.2)$$

Die beiden Anteile des Vektors $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ spiegeln zwei verschiedene Typen von Kopplungen zwischen den Bewegungsachsen wieder. Der erste Anteil (mit $C_{ij}(\mathbf{q})\dot{q}_i^2$ Elementen) wird durch den Zentrifugal-Effekt und der zweite (mit $C_{ij}(\mathbf{q})\dot{q}_i\dot{q}_j$ Elementen) durch den Coriolis-Effekt hervorgerufen. Der Trägheitstensor $\mathbf{M}(\mathbf{q})$, die Kopplungsmomente $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ sowie auch die Gravitationsmomente $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ sind Funktionen der Zustandsvariablen $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ und verursachen dynamische Nichtlinearitäten der Roboterdynamik.

Die Transformation zwischen den Kontaktkräften und den Gelenkkraften wird mit Hilfe der Jacobi-Matrix des Roboters realisiert:

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \partial \mathbf{T}(\mathbf{q}) / \partial \mathbf{q} \quad (2.3)$$

wobei

$\mathbf{T}(\mathbf{q})$ – Matrix der kinematischen Beziehungen zwischen Gelenkkoordinaten und kartesischen Koordinaten des Roboters.

Durch einfaches Umformen der Bewegungsgleichungen (2.1) in ein System von $2n$ Differentialgleichungen erster Ordnung ist das explizite dynamische Robotermodell im Zustandsraum ableitbar:

$$\begin{aligned} v &= \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{v} &= \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}) \cdot (\boldsymbol{\tau}_{DRIVE} - \mathbf{J}^T(\mathbf{q}) \cdot \mathbf{f}_{CONTACT} - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{G}(\mathbf{q})) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dies lässt sich in Form eines Blockschaltbildes repräsentieren (Abb.2.2). Die abgeleitete parameterbasierte Form ist für die dynamischen Parameter des Roboters linear und deswegen für deren Abschätzung empfohlen [Khos88, Surd93].

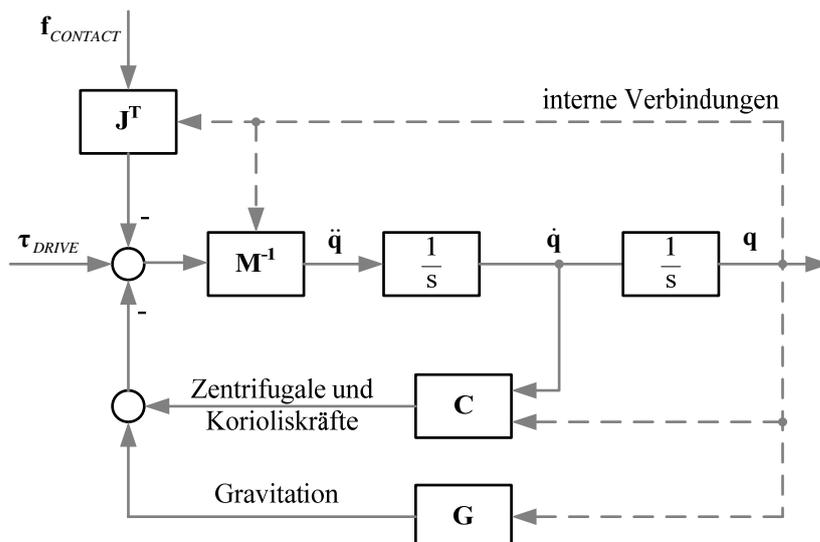


Abb.2.2. Zustandsraummodell des idealisierten Roboters

2.1.1.2 Elastische Glieder

Die strukturelle Elastizität ist eine der wichtigsten Nichtlinearitäten der Roboterglieder. Es wird angenommen, dass die Gelenke des Roboters ideal starr sind und die ganze mechanische Strukturnachgiebigkeit in der Elastizität der Glieder konzentriert ist. Während der Deformation verschieben sich alle Punkte eines Gliedes relativ zu ihren undeformierten Positionen, was die relativen Positionen bzw. Winkel ändert. In der Abb.2.3 werden die elastischen Versetzungen eines Gliedes L_i bestehend aus den Deformationen des vorherigen Gliedes und der eigenen elastischen Versetzungen im Vergleich zum „starrten Skelett“ L_{0i} dargestellt.

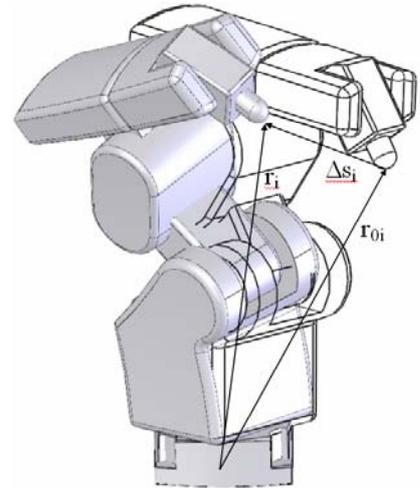


Abb.2.3. Elastizität der Glieder.

Die Positionsvektoren r_i , r_i (im globalen bzw. lokalen Koordinatensystem) hängen jetzt nicht nur von der Zeit, sondern auch von der Position des betrachteten Punktes M auf dem Glied im angenommenen lokalen Koordinatensystem

$$r_i = r_{0i} + \Delta s_i, \quad (2.5)$$

mit

- $r_{0i} = [x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}]^T$ – Position bevor Deformation im lokalen Koordinatensystem,
- $s_i = s_i(r_{0i}, t)$ – elastische Versetzung als Funktion der Koordinaten und Zeit.

Folglich besitzt das System eine unendliche Anzahl der Freiheitsgrade. Jedoch werden die elastischen Deformationen der komplizierten mechanischen Systeme aus praktischen Gründen durch Approximationsmethoden der strukturellen Dynamik betrachtet. Diese Methoden bringen die dynamische Modellierung ins Gebiet der diskreten Analyse unter Annahme von kleinen Deformationen.

Der Deformationsvektor wird in einer Potenzreihe erweitert:

$$s_i(r_{0i}, t) = \sum_{\alpha=1}^{N_i} \tilde{f}_i^\alpha s_i(r_{0i}) \cdot \tilde{\theta}_i^\alpha(t) + \frac{1}{2} \sum_{\alpha=1}^{N_i} \sum_{\beta=1}^{N_i} \tilde{f}_i^{\alpha\beta} s_i(r_{0i}) \cdot \tilde{\theta}_i^\alpha(t) \cdot \tilde{\theta}_i^\beta(t), \quad (2.6)$$

mit

- $\tilde{\theta}_i(t) = [\tilde{\theta}_i^0 \dots \tilde{\theta}_i^\alpha \dots \tilde{\theta}_i^{N_i}]^T$ – $N_i \times 1$ zeitabhängiger Vektor von generalisierten Koordinaten der elastischen Bewegung des Gliedes.

Im mathematischen Sinne können viele existierenden Approximationsmethoden der elastisch-dynamischen Analyse (wie z.B. die Methode konzentrierter Massen, die Methode der Finiten Elemente etc) in Form (2.6) dargestellt werden. Dementsprechend repräsentieren die Elemente des Vektors $\tilde{\theta}_i(t)$ die elastische Verschiebung von konzentrierten Massen und die Bewegung der finiten Knoten [Crai81].

Die Diskretisierung (2.6) definiert ein äquivalentes mechanisches System mit einer begrenzten Zahl elastischer Freiheitsgraden $N = \sum_{i=1}^n N_i$ und einen entsprechenden

Koordinatenvektor $\tilde{\theta}_i(t) = [\tilde{\theta}_i^0 \dots \tilde{\theta}_i^\alpha \dots \tilde{\theta}_i^{N_i}]^T$. Folglich kann das nichtlineare dynamische Modell des Roboters mit elastischen Gliedern in einer allgemeinen Form geschrieben werden [Surd96a, Surd96b]:

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{\mathbf{q}\mathbf{q}}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta}) \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{M}_{\mathbf{q}\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta}) \cdot \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{C}_{\mathbf{q}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{G}_{\mathbf{q}}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta}) + \boldsymbol{\theta}^T \cdot \mathbf{S}_{\mathbf{q}\boldsymbol{\theta}} \cdot \boldsymbol{\theta} = \\ = \mathbf{f}_{DRIVE} - \mathbf{J}_{\mathbf{q}}^T(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta}) \cdot \mathbf{f}_{CONTACT}, \\ \mathbf{M}_{\mathbf{q}\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta})^T \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{M}_{\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta}) \cdot \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{C}_{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{G}_{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta}) + \mathbf{S}_{\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{\theta}} \cdot \boldsymbol{\theta} = \mathbf{J}_{\boldsymbol{\theta}}^T(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta}) \cdot \mathbf{f}_{CONTACT}. \end{cases} \quad (2.7)$$

mit

- $\mathbf{M}_{\mathbf{q}\mathbf{q}}, \mathbf{M}_{\mathbf{q}\boldsymbol{\theta}}, \mathbf{M}_{\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{\theta}}$ – Submatrizen von Trägheitstensor des Roboters,
- $\mathbf{C}_{\mathbf{q}}, \mathbf{C}_{\boldsymbol{\theta}}, \mathbf{G}_{\mathbf{q}}, \mathbf{G}_{\boldsymbol{\theta}}$ – Vektoren mit Coriolis-, Zentrifugal- & Gravitationseffekt,
- $\mathbf{S}_{\mathbf{q}\boldsymbol{\theta}}$ – Steifigkeitsmatrix mit nichtlinearen Deformationseffekt (z.B. während der Änderung von Gliedlänge durch Gleitgelenk),
- $\mathbf{S}_{\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{\theta}}$ – Diagonalmatrix der strukturellen Steifigkeit der Gliedern,
- $\mathbf{J}_{\mathbf{q}}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta}), \mathbf{J}_{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\theta})$ – Jacobian der generalisierten Gelenk- bzw. Gliedergeschwindigkeiten relativ zu Kontaktpunktgeschwindigkeiten.

Der erste Satz der Gleichungen (2.7) beschreibt die kontrollierte Bewegung eines Roboters, welcher der externen Kraft und den dynamischen Effekten von elastischen Deformationen der Glieder unterworfen wird. Der zweite Satz beschreibt die Oszillationen der Glieder, die durch die Roboterbewegung und die externe Kraft verursacht werden. Die Ordnung dieses dynamischen Modells ist normalerweise sehr hoch. Es ist erforderlich, eine relativ große Anzahl der generalisierten elastischen Koordinaten einzuführen, um die elastischen Deformationen der elastischen Roboterkonstruktion zu beschreiben. Infolgedessen sind die Berechnungen mit diesem Modell äußerst kompliziert. Allerdings sind mehrere rechnerorientierte Verfahren zum Lösen von dynamischen Aufgaben elastischer Strukturen entwickelt worden und in kommerziellen Programme umgesetzt (ABAQUS, Ansys, Cosmos, COMSOL Multiphysics, MARC, Nastran, PAM-CRASH, LS-DYNA etc).

2.1.2 Modellierung der Gelenke

Das physikalische Modell eines Gelenks (einer Roboterachse) beinhaltet die Modelle des Stellgliedes, des Motors und des Getriebes (s.Abb.2.4). Es wird angenommen, dass die Glieder des Roboters ideal starr sind und die wesentlichen Nichtlinearitäten, wie z.B. die Begrenzungen im Stellglied, Spiel und Elastizität im Getriebe, trockene/viskose Reibungsmomente etc sich in den Gelenken konzentrieren.

Zur Vereinfachung der Schreibweise wird in den Betrachtungen auf die Kennzeichnung der Achse (Index i) verzichtet. Im Weiteren werden folgende Bezeichnungen für die Beschreibung des nichtlinearen Verhaltens des Antriebes einer Roboterachse benutzt:

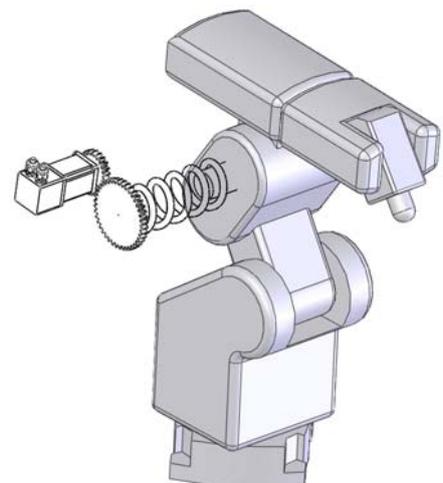


Abb.2.4. Modell einer Roboterachse.

- s – Laplace-Operator;

K_{MECH}, K_{CEMF}	– Maschinenkonstante, gEMK-Konstante;
L_{ROTOR}, R_{ROTOR}	– induktiver und aktiver Widerstand der Motoranker;
i_{REF}, i_{ACT}	– Soll- und Istwert des Motorstromes;
$K_{CURRENT}, T_{CURRENT}$	– Verstärkungsfaktor und Ersatzzeitkonstante der Stromregelung;
$\omega_{MOTOR}, \varphi_{MOTOR}$	– Drehzahl und Drehwinkel der Motorwelle;
$\omega_{LOAD}, \varphi_{LOAD}$	– Drehzahl und Drehwinkel der Roboterachse;
$\tau_{MOTOR}, \tau_{TRANS}, \tau_{LOAD}$	– Drehmoment der Motorwelle, der Übertragungswelle/Transmission, der Roboterachse/Lastseite;
$\tau_{FRICTION}$	– Reibungsmomente;
J_{MOTOR}, J_{LOAD}	– motorseitige und lastseitige Trägheitsmomente;
σ_{GEAR}, N_{GEAR}	– Getriebespiel und -übersetzung.

2.1.2.1 Begrenzungen im Stellglied

Die Bereitstellung des Drehmomentes der Motorwelle τ_{MOTOR} wird von einem Achsantriebsmotor durch die Maschinengleichung beschrieben.

$$\tau_{MOTOR} = K_{MECH} \cdot i_{ACT} \quad (2.8)$$

Wird der Achsantrieb nach dem Strom/Drehmoment geregelt, so lässt sich der elektrische Teil des Achsantriebes, unabhängig von der Bauart des Antriebsmotors und des Stellgliedes als Verzögerungsglied erster Ordnung wiedergeben.

$$i_{ACT}(s) = i_{REF}(s) \cdot \frac{K_{CURRENT}}{T_{CURRENT}s + 1} \quad (2.9)$$

Wenn den Achsantrieb nach Position/Geschwindigkeit geregelt wird, dann lässt sich der elektrische Teil des Achsantriebes als Verzögerungsglied erster Ordnung wiedergeben.

$$i_{ACT}(s) = \frac{u_{REF}(s) - K_{CEMF} \cdot \omega_{MOTOR}(s)}{L_{ROTOR}s + R_{ROTOR}} \quad (2.10)$$

Hierbei sind Strom- bzw. Spannungsbegrenzungen im Stellglied zu berücksichtigen:

$$-u_{MIN} < u_{MOTOR} < u_{MAX} \quad \text{und} \quad -i_{MIN} < i_{MOTOR} < i_{MAX} \quad (2.11)$$

2.1.2.2 Spiel und Elastizität im Getriebe

Das Getriebe kann näherungsweise als reines Proportionalglied mit der Übersetzung $N_{GEAR} \geq 1$ betrachtet werden. Wird die wirklichkeitsnahe Modellierung gefordert, muss das *Spiel* und die *Elastizität* in den Übertragungsgliedern berücksichtigt werden. Für Beschreibung der Nachgiebigkeit dieses Teiles wird das Modell mit konzentrierten Parametern verwendet. Vereinfacht lassen sich elastische Übertragungselemente durch Dreh- bzw. Linearfeder S_{GEAR} nachbilden, die das Auftreten von zusätzlichen Freiheitsgraden (als Übertragungsmomente) in den Bewegungsgleichungen zur Folge haben. Die Beschleunigung der lastseitigen Komponenten bewirkt das Übertragungsmoment τ_{TRANS} . Mit dem Spiel σ_{GEAR} ergeben sich drei Kopplungszustände:

$$\begin{cases} \tau_{TRANS} = S_{GEAR} \cdot (\varphi_{MOTOR} \cdot N_{GEAR} - \varphi_{LOAD} - \frac{1}{2} \sigma_{GEAR}) \\ \tau_{TRANS} = 0 \\ \tau_{TRANS} = S_{GEAR} \cdot (\varphi_{MOTOR} \cdot N_{GEAR} - \varphi_{LOAD} + \frac{1}{2} \sigma_{GEAR}) \end{cases}, \quad (2.12)$$

$$\varphi_{MOTOR} \cdot N_{GEAR} > \varphi_{LOAD} + \frac{1}{2} \sigma_{GEAR}$$

entsprechend für $\varphi_{LOAD} - \frac{1}{2} \sigma_{GEAR} < \varphi_{MOTOR} \cdot N_{GEAR} < \varphi_{LOAD} + \frac{1}{2} \sigma_{GEAR}$,

$$\varphi_{MOTOR} \cdot N_{GEAR} < \varphi_{LOAD} - \frac{1}{2} \sigma_{GEAR}$$

mit

S_{GEAR} – als Federsteifigkeit im Gelenk,

$\varphi_{MOTOR} \cdot N_{GEAR}$ – Drehwinkel der Motorwelle umgerechnet auf die Lastseite.

Die φ_{MOTOR} und φ_{LOAD} werden hierbei als unabhängige Variablen betrachtet.

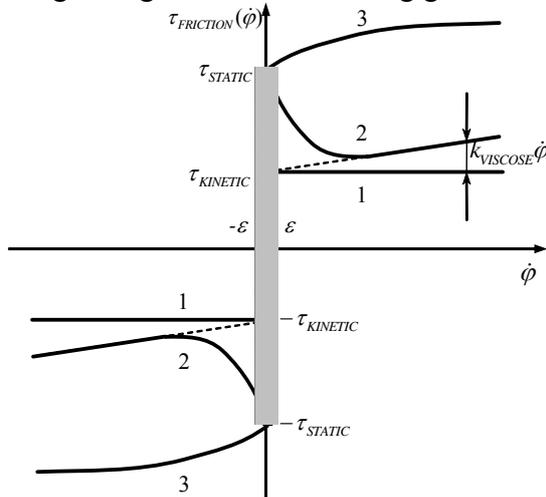
2.1.2.3 Reibungseffekte

Reibungseffekte beeinflussen stark das Verhalten des Robotersystems. Die Gelenke des Roboters werden üblich mit Übersetzungsgetrieben ausgerüstet, die eine Reibung verursachen. Um den durch Versetzungen und Getriebeispiel verursachten Verlust von Positionierungsgenauigkeit zu vermeiden, werden die Robotergetriebe/-lager üblich überlastet, was einen hohen Druck auf die Kontaktfläche zwischen beweglichen kinematischen Teilen verursacht und dementsprechend eine *trockene Reibungskraft* verstärkt. Die trockene Reibung spielt eine bedeutende Rolle bei niedrigen Geschwindigkeiten, die typisch für die Roboterbewegung im Kontakt sind und verursacht außerdem Oszillationen und Ungenauigkeiten im System wie Kontaktverlust oder Zurückprallen. Die im Kontakt relativ zueinander bewegenden Antriebselemente (Motoren, Getriebe und Lager) verursachen die so genannte *viskose Reibung* (Dämpfung). Als *Dämpfung* bezeichnet man jeden Einfluss, der in einem System zur irreversiblen Streuung von Energie führt [Kall91]. Im Durchschnitt werden ca. 25% des Drehmoments von den nicht direkt angetriebenen industriellen Manipulatoren für die Überwindung der Reibung ausgegeben [Crai86].

Modellierung und Simulation von Reibungseffekten sind wesentliche Bestandteile der Untersuchungen der Roboterbewegung. Seit der Arbeit von Euler wurden verschiedene Reibungsmodelle untersucht und in der Literatur diskutiert. Mehrere interessante Reibungsphänomene wurden beobachtet und praktisch getestet: *statische und kinetische Reibung* [Mart90], *Haftreibung*, *Gleitreibung*, *Haft-Gleitbewegung* (Stick-Slip-Effekt), *Stribeck's Effekt* (Reduzierung der Reibung bei Anstieg der Geschwindigkeit), *Dahl's Effekt* (Hysterese und Federverhalten von Haftreibung während Bruchbewegung) usw. Viele Standardmodelle wie Coulomb's, Tustin's, Dahl's Modell für die mathematische Beschreibung der o.g. Effekte wurden vorgeschlagen. Die Untersuchungen der Reibungseffekte in den industriellen Manipulatoren [Gogo88] bewiesen eine sehr komplizierte Natur der Coulomb's Reibungsdrehmoment/-kraft eine Funktion der Gelenklage/-geschwindigkeit sowie auch der generalisierten Kräfte ist. Aufgrund dieser Nichtlinearitäten kann die Coulomb's Reibung in den Robotergelenken in einer geschlossenen analytischen Form nicht dargestellt werden. Eine Approximation soll jedem Gelenk ein äquivalentes Reibungsdrehmoment oder eine Reibungskraft als eine Funktion der generalisierten Geschwindigkeiten zuteilen. Ein passendes Reibungsmodell für den industriellen Manipulator soll folgende Effekte berücksichtigen:

- Haftreibung,
- kinetische Reibung (Coulomb'sche) und viskose Reibung (Newton'sche),
- Stribeck'sche Reibung (Reduzierung kinetischer Reibung mit Anstieg der Geschwindigkeit aufgrund der Schmierung).

Mögliche grafische Darstellung genannter Reibungseffekten wird in Abb.2.5 dargestellt.



Kurve 1 – Modell für die Reibung zwischen trockenen Flächen;

Kurve 2 – Reibungskennlinie im Falle hydrodynamischer Schmierung z.B. zwischen Zahnrädern;

Kurve 3 – Reibungskennlinie beim Rollvorgang.

Abb.2.5. Reibungsmomentenkennlinien.

Der Getriebetyp und die Zwangskräfte im Robotergelenk bestimmen die tatsächlich vorherrschenden Reibungsmomente. Genaues analytisches Modellieren dieser Nichtlinearität der Roboterdynamik gilt als sehr problematisch. Die wichtigsten Anteile der Reibungskennlinie 2 können jedoch in einem Gelenk mathematisch und in Exponentialform nachgebildet werden:

$$\tau_{FRICITION}(\dot{\phi}) = K_{VISCOSE} \cdot \dot{\phi} + sign(\dot{\phi}) \cdot \left(\tau_{KINETIC} + (\tau_{STATIC} - \tau_{KINETIC}) \cdot \exp\left(-\frac{|\dot{\phi}|}{\varepsilon}\right)^\delta \right), \quad (2.13)$$

mit

- $\tau_{FRICITION}(\dot{\phi})$ – Reibungsmoment im Gelenk;
- $K_{VISCOSE}$ – Koeffizient der viskosen Reibung (Newton'sche);
- τ_{STATIC} – statische Reibung (Losbrechmoment);
- $\tau_{KINETIC}$ – kinetische Reibung (Colomb'sche);
- ε – konstante Geschwindigkeit des Überganges zur kinetischen Reibung;
- δ – empirischer Exponent: $\delta = 1$ Tustin's Modell, $\delta = 2$ Gaussian's Modell.

Dieses Modell bildet das Verhalten von Haft-Gleitbewegung im Robotergelenk bei niedrigen Geschwindigkeiten ab. Die Haftreibung [Arms91] oder Dahl's Reibung [Canu93a] kann auch ins Modell (2.13) hinzugefügt werden. Jedoch macht es das Modell noch komplizierter und ist für die Verwendung in der experimentellen Parameterdifferenzierung nicht geeignet. Das unten dargestellte Approximationsmodell in linearer Form für die Parameter [Canu93b] erscheint an dieser Stelle besser geeignet:

$$\tau_{FRICITION}(\dot{\phi}) = sign(\dot{\phi}) \cdot [\alpha_0 - \alpha_1 \dot{\phi}^{0.5} + \alpha_2 |\dot{\phi}|], \quad (2.14)$$

Ein praktisches Problem bei der Anwendung des Reibungsmodells in dynamischer Simulation entsteht bei der Berechnung von Haftreibung bei einer Null-Geschwindigkeit. Experimentelle

Untersuchungen des Abrisseffektes erfordern besondere Datenermittlungsgeräte und eine Teststrategie [Arms91]. Die Null-Geschwindigkeit in wirklichen Systemen kann aufgrund der Sensorgrenzen nicht eindeutig festgestellt werden. Zur Überwindung dieses Problems schlug man [Karn85] einen Bereich der kleinen Geschwindigkeiten vor. Innerhalb dieses Bereiches wird die Geschwindigkeit gleich Null gesetzt. Im Bezug auf dieses Modell wird das Reibungsdrehmoment gemäß der folgenden Regel berechnet:

$$\tau_{\text{FRICTION}}(\dot{\varphi}) = \begin{cases} \tau_{\text{MOTOR}} + f_{\text{CONTACT}} - f_{\text{GRAVITATION}} \\ \tau_{\text{STATIC}} \cdot \text{sgn}(\tau_{\text{MOTOR}} + f_{\text{CONTACT}} - f_{\text{GRAVITATION}}) \\ \left(\tau_{\text{STATIC}} + K_{\text{VISCOSE}} \cdot |\dot{\varphi}| + (\tau_{\text{STATIC}} - \tau_{\text{KINETIC}}) \cdot \exp\left(-\frac{|\dot{\varphi}|}{\varepsilon}\right) \right) \cdot \text{sgn}(\dot{\varphi}) \end{cases}, \quad (2.15)$$

wenn $|\tau_{\text{MOTOR}} + f_{\text{CONTACT}} - f_{\text{GRAVITATION}}| \leq \tau_{\text{STATIC}}$ und $|\dot{\varphi}| \leq |\varepsilon|$,
ansonsten $|\dot{\varphi}| > |\varepsilon|$

mit

$f_{\text{CONTACT}}, f_{\text{GRAVITATION}}$ – Teil der externen Kraft und der Gravitationskraft.

2.1.3 Modellierung eines Roboterachsantriebes

Aus den oben dargestellten Auslegungen ergibt sich der Signalflussplan des Antriebsmodells einer Roboterachse (s. Abb.2.6).

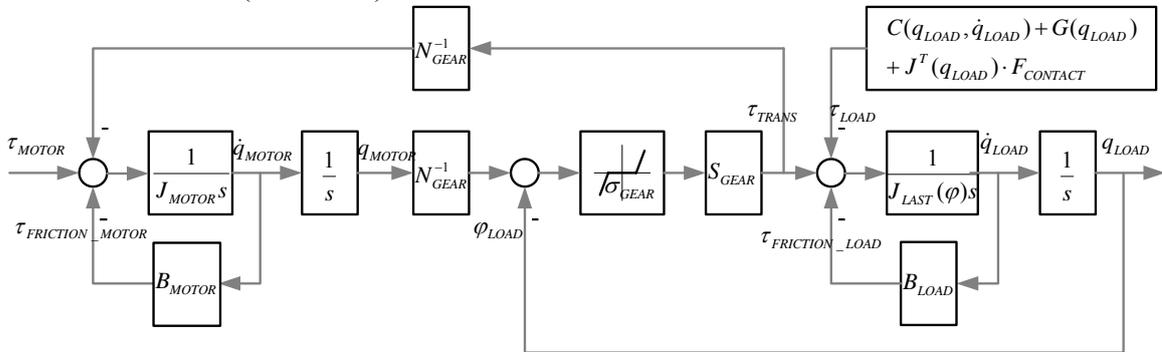


Abb.2.6. Modell des Roboterachsantriebes.

Unter Berücksichtigung der gesamten Nichtlinearitäten im dynamischen Modell eines Roboters mit starren Gliedern (2.1) bekommt man:

$$\begin{cases} \mathbf{M}(\mathbf{q}_{\text{LOAD}}) \cdot \ddot{\mathbf{q}}_{\text{LOAD}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}_{\text{LOAD}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{LOAD}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}_{\text{LOAD}}) = \boldsymbol{\tau}_{\text{DRIVE}} + \mathbf{J}^T(\mathbf{q}_{\text{LOAD}}) \cdot \mathbf{f}_{\text{CONTACT}}, \\ \boldsymbol{\tau}_{\text{DRIVE}} = \boldsymbol{\tau}_{\text{TRANS}} - \boldsymbol{\tau}_{\text{FRICTION}}(\dot{\mathbf{q}}_{\text{LOAD}}), \\ \boldsymbol{\tau}_{\text{TRANS}} = \mathbf{S}_{\text{GEAR}} \cdot (\mathbf{q}_{\text{MOTOR}} \cdot \mathbf{N}_{\text{GEAR}} - \mathbf{q}_{\text{LOAD}} - \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}_{\text{GEAR}}), \mathbf{q}_{\text{MOTOR}} \cdot \mathbf{N}_{\text{GEAR}} > \mathbf{q}_{\text{LOAD}} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}_{\text{GEAR}} \\ \boldsymbol{\tau}_{\text{TRANS}} = 0, \mathbf{q}_{\text{LOAD}} - \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}_{\text{GEAR}} < \mathbf{q}_{\text{MOTOR}} \cdot \mathbf{N}_{\text{GEAR}} < \mathbf{q}_{\text{LOAD}} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}_{\text{GEAR}} \\ \boldsymbol{\tau}_{\text{TRANS}} = \mathbf{S}_{\text{GEAR}} \cdot (\mathbf{q}_{\text{MOTOR}} \cdot \mathbf{N}_{\text{GEAR}} - \mathbf{q}_{\text{LOAD}} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}_{\text{GEAR}}), \mathbf{q}_{\text{MOTOR}} \cdot \mathbf{N}_{\text{GEAR}} < \mathbf{q}_{\text{LOAD}} - \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}_{\text{GEAR}} \\ \mathbf{J}_{\text{MOTOR}} \cdot \ddot{\mathbf{q}}_{\text{MOTOR}} = \boldsymbol{\tau}_{\text{MOTOR}} - \boldsymbol{\tau}_{\text{FRICTION}}(\dot{\mathbf{q}}_{\text{MOTOR}}), \\ \mathbf{J}_{\text{LOAD}} \cdot \ddot{\mathbf{q}}_{\text{LOAD}} = \boldsymbol{\tau}_{\text{DRIVE}} - \boldsymbol{\tau}_{\text{FRICTION}}(\dot{\mathbf{q}}_{\text{LOAD}}). \end{cases}, \quad (2.16)$$

Letztendlich kann das vereinfachte Robotermodell in folgender Form geschrieben werden:

$$\begin{aligned}
& \mathbf{M}(\mathbf{q}_{LOAD}) \cdot \ddot{\mathbf{q}}_{LOAD} + \mathbf{C}(\mathbf{q}_{LOAD}, \dot{\mathbf{q}}_{LOAD}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}_{LOAD}) + \mathbf{B}(\mathbf{q}_{LOAD}) \cdot \dot{\mathbf{q}}_{LOAD} \\
& = \boldsymbol{\tau}_{DRIVE} + \mathbf{J}^T(\mathbf{q}_{LOAD}) \cdot \mathbf{f}_{CONTACT} \\
& \quad \text{oder in kartesischen Koordinaten als} \\
& \mathbf{M}_{CARTES}(\mathbf{x}) \cdot \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_{CARTES}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{G}_{CARTES}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}_{CARTES}(\mathbf{x}) \cdot \dot{\mathbf{x}} \\
& = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \cdot \boldsymbol{\tau}_{DRIVE} + \mathbf{f}_{CONTACT}
\end{aligned} \tag{2.17}$$

2.2 Modellierung des Robotersystems im Kontakt mit passiver Umgebung

Unabhängig vom Typ der Umgebung bleibt die Kontaktkraft der wichtigste Kennwert während der Durchführung der Kontaktaufgabe. Im Kontakt mit einer passiven Umgebung besteht die Kontaktkraft aus den Reaktionen in Kontaktbindungen und hängt von der Roboterdynamik, von der Umgebungsdynamik und von den mechanischen Materialeigenschaften im Kontaktbereich ab. Zur Entwicklung des Regelungssystems und zur Simulationszwecken ist die Kontaktkraft als eine Funktion der genannten Faktoren zu modellieren. Die Funktion ist allerdings stark nichtlinear und sollte kinematische Parameter des Kontaktes (Kontakttiefe/-fläche/-volumen), dynamische Parameter des Kontaktes (Kontaktgeschwindigkeit/-beschleunigung) und die mechanischen Parameter des Kontaktes (Elastizitäts-/Kompressions-/Schubmodul, Poissonzahl bzw. Spannung-Verformungs-Beziehung) berücksichtigen:

$$\mathbf{f}_{CONTACT} = \text{function}(\mathbf{Param}_{KIN}, \mathbf{Param}_{DYN}, \mathbf{Param}_{MECH}). \tag{2.18}$$

Die Beziehung zwischen den Kontaktkoordinaten \mathbf{p} und den kartesischen Koordinaten des Robotersystems \mathbf{x} wird mit der Jacobi-Matrix des Kontaktes $\mathbf{J}_{CONTACT}(\mathbf{p})$ beschrieben:

$$\begin{aligned}
\mathbf{x} &= \mathbf{T}_{CONTACT}(\mathbf{p}), \quad \dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial \mathbf{T}_{CONTACT}}{\partial \mathbf{p}^T} \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}_{CONTACT}(\mathbf{p}) \cdot \dot{\mathbf{p}}, \\
\mathbf{p} &= \mathbf{T}_{CONTACT}^T(\mathbf{x}), \quad \dot{\mathbf{p}} = \frac{\partial \mathbf{T}_{CONTACT}^T}{\partial \mathbf{x}^T} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_{CONTACT}^T(\mathbf{x}) \cdot \dot{\mathbf{x}}.
\end{aligned} \tag{2.19}$$

mit

- $\mathbf{p} = \mathbf{q} - \mathbf{q}_{ENV}$ – *Penetration* (Eindringung) des Endeffektors/des Fußes in die Umgebung,
- $\mathbf{T}_{CONTACT} \in R^{6 \times 1}$ – nicht lineare Matrix der kinematischen Beziehungen zwischen Penetrationskoordinaten und kartesischen Koordinaten des Roboters.

Wenn ein Kontakt mit passiver (beweglicher/stationärer) Umgebung auftritt und die Formänderungen der mechanischen Bindungen unter Belastung vernachlässigbar sind, d.h. die Kontaktkräfte verrichten an der Umgebung keine Arbeit, dann geht der physikalische Charakter der mechanischen Bindungen im Kontakt verloren und der Kontakt wird durch die Zwangskräfte repräsentiert:

$$\mathbf{f}_{CONTACT} = \mathbf{T}_{ROBOT}^T(\mathbf{x}) \cdot \boldsymbol{\lambda} \tag{2.20}$$

mit

- $\boldsymbol{\lambda} \in R^m$ – Vektor der generalisierten auf die mechanische Bindung bezogenen Lagrange-Multiplikatoren,

$\mathbf{T}_{ROBOT}(\mathbf{x})$ – allgemeine nicht lineare Funktion der Position vom Endeffektor.

Zusammen mit (2.17) ergibt sich das Modell des Robotersystems im starren Kontakt als System von differential-algebraischen Gleichungen:

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{CARTES}(\mathbf{x}) \cdot \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_{CARTES}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{G}_{CARTES}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}_{CARTES}(\mathbf{x}) \cdot \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \cdot \boldsymbol{\tau}_{DRIVE} + \mathbf{f}_{CONTACT}, \\ \mathbf{f}_{CONTACT} = \mathbf{T}_{ROBOT}^T(\mathbf{x}) \cdot \boldsymbol{\lambda}. \end{cases} \quad (2.21)$$

Wenn ein Kontakt mit passiver (beweglicher/stationärer) Umgebung auftritt und die Formänderungen der mechanischen Bindungen unter Belastung nicht vernachlässigbar sind, d.h. die Kontaktkräfte verrichten eine Arbeit an der Umgebung, dann repräsentiert die eingepprägten Kontaktkräfte die mechanische Wechselwirkung im Kontakt und sind mit (2.18) zu modellieren. Zusammen mit (2.17) ergibt sich das folgende Modell des Robotersystems im nachgiebigen Kontakt:

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{CARTES}(\mathbf{x}) \cdot \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_{CARTES}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{G}_{CARTES}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}_{CARTES}(\mathbf{x}) \cdot \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \cdot \boldsymbol{\tau}_{DRIVE} + \mathbf{f}_{CONTACT}, \\ \mathbf{f}_{CONTACT} = \text{function}(\mathbf{Param}_{KIN}, \mathbf{Param}_{DYN}, \mathbf{Param}_{MECH}). \end{cases} \quad (2.22)$$

Aus der Sicht der Regelungstechnik ist es wünschenswert, die Kontaktdynamik in der Gleichungsform mit konzentrierten Parametern darzustellen. Innerhalb der Kontaktmechanik wird die Kontaktdynamik generell durch nicht lineare Differentialgleichungen zweiter Ordnung beschrieben:

$$\mathbf{M}_{CONTACT}(\mathbf{p}) \cdot \ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{n}_{CONTACT}(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}) = \mathbf{J}_{CONTACT}^T(\mathbf{p}) \cdot \mathbf{f}_{CONTACT} \quad (2.23)$$

mit

- $\mathbf{M}_{CONTACT}(\mathbf{p}) \in R^{d \times d}$ – nicht singuläre Trägheitsmatrix des Kontaktes,
- $\mathbf{n}_{CONTACT}(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}) \in R^{d \times 1}$ – nicht lineare dynamische Funktion des Kontaktes,
- $\mathbf{f}_{CONTACT}$ – 6-dimensionaler Vektor der generalisierten Kontaktkräfte,
- d – Anzahl der gekoppelten Koordinaten.

Bei der Auswahl der nichtlinearen dynamischen Funktion $\mathbf{n}_{CONTACT}(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}})$ für die Kontaktdynamik spielen die mechanischen Materialeigenschaften im Kontaktbereich eine zentrale Rolle. Zur Beschreibung mechanischer Wechselwirkung im Kontaktbereich wird ein *Stoffgesetz* (auch *Materialgesetz*) gebraucht, das eine Kraftgröße (Spannung) mit einer Verschiebungsgröße (Verformung) verknüpft. Das Stoffgesetz ist generell unabhängig von der Form eines Körpers und kann ausschließlich mit Hilfe von Versuchen ermittelt werden. Einen Überblick über häufig verwendete Materialgesetze in der Kontaktmechanik im Zusammenhang mit verwendeten Materialien liefert die Tabelle 2.2 [Bath02].

Tabelle 2.2. Typische Materialgesetze in der Kontaktmechanik.

Materialgesetz	Eigenschaften des Materials	Beispiele
Linear oder nichtlinear elastisches Material	Spannungen sind nur Funktionen der Verformungen; gleicher Spannungspfad bei Be- und Entlastung.	Fast alle Materialien sofern die Spannungen hinreichend klein sind: Stahl, Gusseisen, Glas, Felsen, Holz etc vor Erreichen der Fließ- oder Bruchgrenze.
Hyperelastisches	Die Spannungen werden vom Funktional	Gummi, beispielsweise

Material	der Verformungsenergie abgeleitet.	Mooney- Rivlin-Modell
Hypoelastisches Material	Die Spannungsinkremente werden aus den Verformungsincrementen berechnet. Die Materialkenngrößen werden als Funktionen von Spannungen, Verformungen, Bruchkriterien, Be- und Entlastungsparameter, Maximalspannungen etc definiert.	Beton-Modelle; Beschreibungsmodell für nichtlineare Kennlinie
Elastisch-plastisches Material	Linear elastisches Verhalten bis zur Fließgrenze; Verwendung von Fließbedingungen, Fließgesetz und Verfestigungsgesetz zur Berechnung von Spannungen und plastischen Verformungsincrementen; plastische Verformungsincremente sind momentan.	Metalle, Boden, Felsen unter hoher Spannung.
Viskoplastisches Material	Zeitabhängige nichtelastische Verformungen; Geschwindigkeitseffekte werden mitberücksichtigt	Polymere, Metalle.

Zur Darstellung des Stoffgesetzes wird eine *Spannung-Verformungs-Diagramm* verwendet. Folgende Begriffe werden zur Beschreibung einer typischen Spannung-Verformungs-Diagramm (s.Abb.2.7) gebraucht, welche die beobachtbaren phänomenologischen Materialeigenschaften [Frey97] beschreiben:

- Elastizität = Beschreibung des reversiblen Spannungs-/Dehnungsverhaltens.
- Plastizität = Beschreibung des irreversiblen Spannungs-/Dehnungsverhaltens.
- Fließ-(Streck-) grenze („yield stress“) = Übergang vom elastischen zum plastischen Verhalten.
- Bruch-/Biegefestigkeit = mechanische (Biege-)Spannung bei der Bruch erfolgt = Zähigkeit beim Schlagversuch.
- Zugfestigkeit = größte tolerable (mech.) Spannung.
- Duktilität = Verformbarkeit ohne Bruch.
- Kriechen = zeit- und temperaturabhängige Verformung eines Werkstoffes unter Last.
- Härte = Widerstand gegen plastische Deformation.
- Viskoelastizität = Temperatur- und Zeiteffekte beim elastisch/plastischen Verhalten von Polymeren.
- Haftung und Reibung betreffen oberflächen-grenzflächenspezifische atomare Vorgänge.
- Bruch ist auch ein oberflächendominierter Vorgang, da bei diesem Vorgang neue Oberfläche geschaffen wird.

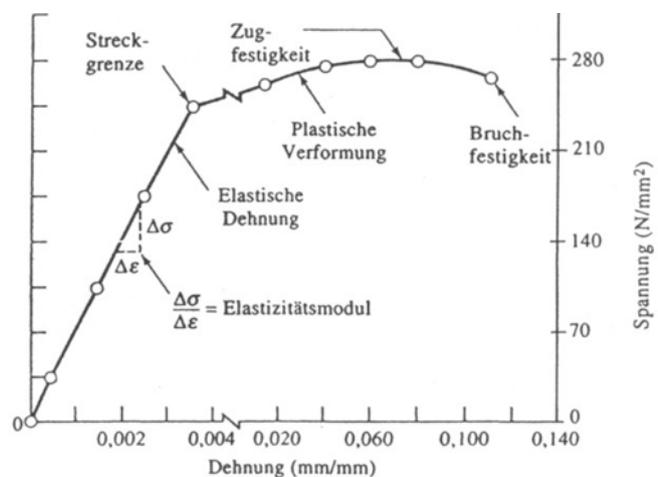


Abb.2.7. Spannung – Verformung Diagramm einer Aluminium Legierung

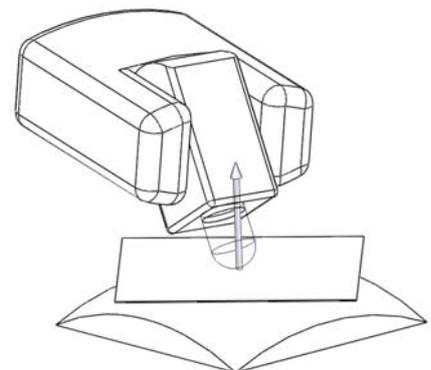
Es ist sichtbar, dass eine große Anzahl von Kennwerten zur Beschreibung der Funktion $\mathbf{n}_{CONTACT}(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}})$ in (2.23) zu betrachten ist. Allerdings wird festgestellt, dass die Kontaktdynamik

fast aller Materialien mit einem linearen bzw. nichtlinearen elastischen Materialgesetz beschrieben wird, sofern die Spannungen hinreichend klein bleiben. Diese Tatsache reduziert die Anzahl der wichtigsten Kennwerte auf eine akzeptable Größe. Zu den wichtigsten Kennwerten, welche die dynamischen Materialeigenschaften im Bereich linearer Elastizität beschreiben, gehören in der Werkstofftechnik *Elastizitätsmodul*, *Kompressionsmodul*, *Schubmodul*. Diese drei Module sind über die *Poissonzahl* miteinander verknüpft.

- **Elastizitätsmodul E** [$N/m^2 = Pascal$] (auch *Zugmodul* oder *Youngscher Modul*) beschreibt den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der Verformung eines festen Körpers bei linear elastischem Verhalten. Der Elastizitätsmodul ist als Steigung des Graphen im Spannung-Dehnungs-Diagramm bei einachsiger Belastung innerhalb des linearen Elastizitätsbereichs definiert $E = d\sigma/d\varepsilon = const$. Dabei bezeichnet σ die mechanische Normalspannung und $\varepsilon = (L - L_0)/L_0$ die relative Dehnung.
- **Kompressionsmodul K** [N/m^2] beschreibt welche allseitige Druckänderung nötig ist, um eine bestimmte Volumenänderung hervorzurufen. Der Kompressionsmodul ist definiert als $K = -\frac{dp}{dV/V}$.
- **Schubmodul G** [N/m^2] (auch *Gleitmodul*, *Schermodul* oder *Torsionsmodul*) gibt die Auskunft über die lineare elastische Verformung eines Bauteils infolge einer Querkraft oder Schubspannung. Mit G lässt sich der Verschiebungswinkel (Schubverzerrung, Scherwinkel, Schubwinkel, Gleitung) γ aus der Schubspannung τ bestimmen. Er beträgt $\gamma = \tau/G$.
- **Poissonzahl μ** (auch *Querkontraktionszahl*, *Querdehnungszahl* oder *Querdehnzahl*) dient der Berechnung der Querkontraktion und ist definiert als Verhältnis aus relativer Dickenänderung $\Delta d/d$ zur relativen Längenänderung $\Delta l/l$ bei Einwirkung einer äußeren Kraft oder Spannung $\mu = -\frac{\Delta d/d}{\Delta l/l}$.

2.2.1 Starrer Kontakt mit passiver Umgebung

Beim Kontakt mit absolut starrer Umgebung wird die Roboterbewegung in orthogonale Richtung zur Umgebung verhindert (s.Abb.2.8). Trotz wirkender Kontaktkräfte entsteht keine Eindringung in die Umgebung, d.h. die Kontaktkräfte verrichten am System keine Arbeit. Damit geht der physikalische Charakter des Kontaktes verloren und der Kontakt wird durch die Zwangskräfte repräsentiert. Zum Beibehalten des Kontaktes ist ausschließlich die Bewegung in tangentialer Richtung zur Kontaktfläche erlaubt.



Starre holonomische Bindung auf der Roboterbewegung (Lage /Geschwindigkeit /Beschleunigung) [Su94] erfüllt folgende Gleichungen:

Abb.2.8. Absolut starre Kontaktfläche

$$\begin{aligned}
\mathbf{p} &= \mathbf{T}_{CONTACT}^T(\mathbf{x}) = 0, \\
\dot{\mathbf{p}} &= \mathbf{J}_{CONTACT}^T(\mathbf{x}) \cdot \dot{\mathbf{x}} = 0, \\
\ddot{\mathbf{p}} &= \mathbf{J}_{CONTACT}^T(\mathbf{x}) \cdot \ddot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{J}}_{CONTACT}^T(\mathbf{x}) \cdot \dot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{x}}^T \circ \dot{\mathbf{J}}_{CONTACT}^T(\mathbf{x}) \cdot \dot{\mathbf{x}} = \\
&= \mathbf{J}_{CONTACT}^T(\mathbf{x}) \cdot \ddot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{x}}^T \circ \dot{\mathbf{J}}_{CONTACT}^T(\mathbf{x}) \cdot \dot{\mathbf{x}} = 0.
\end{aligned} \tag{2.24}$$

Die Gleichungen (2.24) stellen einen *gebundenen Teilraum* dar. Eine reale Kontaktfläche stellt eine starre Bindung fest, die nur auf einer Seite des gebundenen Teilraums zerstört werden kann. Dieser Typ der Kopplung wird durch die gleiche Polarität der Kontaktkraft $\mathbf{f}_{CONTACT} > 0$ gekennzeichnet ($\mathbf{f}_{CONTACT} = 0$, wenn diese zerstört wird). Seitdem die Jacobi-Matrix des Kontaktes $\mathbf{J}_{CONTACT}$ den Kontakt-Teilraum der Roboterbewegung definiert, definiert ihr Null-Raum die Tangentehyperebene der Kontaktfläche. Die Gleichung (2.24) stellt fest, dass der Geschwindigkeitsvektor $\dot{\mathbf{x}}$ dem Null-Raum der Jacobi-Matrix gehört.

Schließt man den gebundenen Teilraum (2.24) in dem dynamischen Robotermodell (2.17) ein, bekommt man ein Satz von nicht linearen differentialen und algebraischen Gleichungen, die ein gebundenes mechanisches Robotersystem beschreiben:

$$\begin{cases}
\mathbf{M}_{CARTES}(\mathbf{x}) \cdot \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_{CARTES}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{G}_{CARTES}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}_{CARTES}(\mathbf{x}) \cdot \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \cdot \boldsymbol{\tau}_{DRIVE} + \mathbf{f}_{CONTACT}, \\
\mathbf{f}_{CONTACT} = \mathbf{T}_{ROBOT}^T(\mathbf{x}) \cdot \boldsymbol{\lambda}, \\
\mathbf{T}_{CONTACT}^T(\mathbf{x}) = 0.
\end{cases} \tag{2.25}$$

In einer Deskriptorform ergibt sich die (2.25) als:

$$\begin{aligned}
&\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{CARTES}(\mathbf{x}) & -\mathbf{T}_{CONTACT}^T(\mathbf{x}) \\ \mathbf{J}_{CONTACT}^T(\mathbf{x}) & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{Bmatrix} = \\
&= \begin{Bmatrix} \mathbf{J}(\mathbf{q}) \cdot \boldsymbol{\tau}_{DRIVE} - \mathbf{C}_{CARTES}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) - \mathbf{G}_{CARTES}(\mathbf{x}) - \mathbf{B}_{CARTES}(\mathbf{x}) \cdot \dot{\mathbf{x}} \\ -\dot{\mathbf{x}}^T \circ \dot{\mathbf{J}}_{CONTACT}^T(\mathbf{x}) \cdot \dot{\mathbf{x}} \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.26}$$

Für das Beibehalten der Bindung sind zwei Regelungsverfahren vorhanden:

- man legt das Regelungssystem so aus, dass die Bewegung im gebundenen Teilraum bleibt. Es gibt Algorithmen zur Dekomposition des dynamischen Modells in unabhängigen Koordinaten der Position, d.h. die Gleichungen werden in Teilräume der zulässigen Bewegung und der Kontaktkräfte zerlegt, wie LU Faktorisierung, singuläre Wertdekomposition oder Gram-Schmidt Orthogonalisierung der Jacobian von Kopplungsmatrix [Lian87].
- man steuert indirekt die Kontaktkräfte $\boldsymbol{\lambda}$, um die Bindung beizubehalten.

2.2.2 Nachgiebiger Kontakt mit passiver Umgebung

Beim nachgiebigen Kontakt mit einer passiven stationären Umgebung spielen mechanische Materialeigenschaften im Kontaktbereich gleichberechtigt mit der Roboterdynamik die entscheidende Rolle. Eine ideale reibungslose stationäre Umgebung mit starren Einschränkungen auf dem Endeffektor wird durch einen statischen Kraftausgleich im Kontakt gekennzeichnet. Andererseits werden die Kontaktkräfte in einer stationären Umgebung mit nachgiebigen Einschränkungen nicht vollständig durch Zwangskräfte ausgeglichen. Die

Kontaktkräfte produzieren aktive Arbeit auf die Umgebung und verursachen dadurch ihre Bewegung.

Modellierung der Kontaktkräfte scheint, eine ziemlich problematische Aufgabe zu sein, weil hierbei viele Berechnungen entstehen, welche unterschiedliche Eingangsinformation fordern und ziemlich unterschiedliche numerische Ergebnisse ergeben können.

Einerseits, existieren mehrere genaue Methoden zur Modellierung der Kontaktkräfte, die auf der Verteilung kollidierender Körper in kleinen Segmenten beruhen. Die relevanten Kontaktkräfte für jedes Segment des Kontaktraumes werden anhand der physikalischen Materialeigenschaften (E-Modul, Kompressionsmodul etc) und der Kontaktdynamik (Penetrationstiefe, /-geschwindigkeit etc) berechnet und anschließend für den ganzen Kontaktraum integriert. Diese Methoden sind physikalisch plausibel und finden ihre Anwendung beispielsweise in der FEM-Analyse von Mehrkörpersystemen (Software wie ANSYS, Nastran, Abaqus etc), fordern aber eine enorme Rechenleistung, sind demzufolge sehr langsam und deshalb irrelevant für die Zwecke der Robotersystemregelung.

Andererseits, wird die Modellierung der Kontaktkräfte in Kontaktaufgaben nur zum Teil durch die Physik motiviert. Die Bequemlichkeit der Anwendung gegebener Modelle zum Entwurf des Regelungssystems stellt einen entscheidenden Faktor dar. Diese Modelle sind allerdings so auszuwählen, dass die gesamten Ergebnisse des Kontaktes mit physikalischen Gesetzen (Impulserhaltungsgesetz, Energieerhaltungsgesetz) übereinstimmen. Es ist wichtig, dass die Kontaktkraft differenzierbar ist, dass das weitere Eindringen zweier Körper verhindert wird, dass die kontaktierenden Körper sich trennen, und dass die gesamte mechanische Energie des Systems während des Kontaktes verbraucht (nicht produziert) wird.

Eine detaillierte Diskussion zur Modellierung und Simulation von Kräften bei den mechanischen Bindungen findet im Kapitel 2.4.3 statt. Im weiteren Teil der Arbeit werden ausschließlich die aus der Regelungssicht relevanten Modelle zum elastischen bzw. elastisch-plastischen Kontakt exemplarisch dargestellt.

2.2.2.1 Elastischer Kontakt

Es gibt viele verschiedene Modelle zur Beschreibung des elastischen Kontaktes ohne plastischer Verformung (Hertz' Hypothese, Winkler' Modell, Hookesche Gesetz, Impedanzmodell etc). Alle Methoden verbindet die Tatsache, dass die Kontaktkraft eine Funktion der Penetrationstiefe und der Materialkonstanten ist und erst dann vorhanden ist, wenn die Körper ineinander eindringen. Materialkonstanten werden abhängig von Kontaktgeometrie und mechanischen Materialeigenschaften aber unterschiedlich berechnet.

$$\mathbf{f}_{CONTACT} = \mathbf{S}(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}) \cdot \mathbf{p}, \quad \mathbf{p} \geq 0 \quad (2.27)$$

mit

- \mathbf{p} – Penetrationstiefe,
- $\mathbf{S}(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}})$ – Materialkonstante (bezogene Steifigkeit im Kontakt).

Eindimensionales Kontaktmodell nach Hertz' Hypothese

Das Kontaktmodell kann als Hertz' Kontakt zwischen zwei Körpern mit unterschiedlichen Radien betrachtet werden. Formeln von Hertz [Timo70] bieten die Möglichkeit an, die Reaktionskraft abhängig von bekannter Geometrie der Kontaktgegenstände, tatsächlicher Penetration und Elastizitätskoeffizienten auszudrücken:

$$\|f_{CONTACT}\| = \eta \cdot p^{3/2}, \quad p \geq 0 \quad (2.28)$$

mit

- $p = (x_{CONTACT} - x_{ROBOT})$ – Interpenetration von zwei Körpern,
 η – Funktion der Objektelastizität und seiner deformierten Kontaktgeometrie.

Unter Annahme eines reibungslosen Kontaktes zwischen einem zylinderförmigen Werkzeug und einer elastischen Oberfläche kann η folgendermaßen approximiert werden:

$$\eta = \frac{2\sqrt{R_{CONTACT}}}{\pi} (k_1 + k_2), \quad \text{wobei } k_i = \frac{1 - \mu_i^2}{\pi} E_i \quad (2.29)$$

mit

- $\mu_i (i = 1, 2)$ – Poisson-Koeffizient für den Endeffektor und Umgebung,
 $E_i (i = 1, 2)$ – Young-Modul für den Endeffektor und Umgebung,
 $R_{CONTACT}$ – Kontaktradius.

Entsprechend dem Erhaltungsgesetz der Anstoßenergie werden die maximale Penetration und die maximale Kontaktkraft folgendermaßen ausgedrückt:

$$p_{MAX} = \left(\frac{m \cdot \dot{p}_0^2}{2\eta} \right)^{\frac{2}{5}}, \quad f_{MAX} = \left(\frac{m \cdot \dot{p}_0^2}{2\eta^3} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (2.30)$$

mit

- \dot{p}_0 – Anstoßgeschwindigkeit.

Dieses Modell wird benutzt, um die maximale Annäherungsgeschwindigkeit und die Abtastzeit zur Detektierung der Anstoßkraft und zur Entwicklung der passenden Regelungsstrategie vorauszusagen.

Nichtlineares Kontaktmodell nach [Enge02]

Die folgende Gleichung beschreibt eine sehr robuste Form zur Berechnung der Reaktionskraft anhand der Kontakt Daten (Penetrationstiefe/-geschwindigkeit, Anstoßgeschwindigkeit) und der bezogenen Materialeigenschaften (Steifigkeit, Restitution):

$$f_{CONTACT} = \left[1 + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon \cdot |v_{COLLISION}|} \cdot \dot{p} \right] \cdot S_{CONTACT} \cdot p, \quad p \geq 0 \quad (2.31)$$

mit

- ε – Restitution im Kontakt,
 $S_{CONTACT}$ – lineare bezogene Steifigkeit im Kontakt,
 $v_{CONTACT}$ – relative Geschwindigkeit von Körpern im Zeitpunkt der Kollision.

Diese Methode berücksichtigt das Energieerhaltungsgesetz, arbeitet stabil in großem Bereich der Integrationszeiten und erfüllt alle genannten Anforderungen zur Berechnung der Kontaktkräfte.

Nichtlineares Kontaktmodell mit Reibung nach [Golu03]

Das vorgeschlagene Kontaktmodell ist von geometrischen Kontaktparametern, von elastischen Kontakteigenschaften und von Kontaktdynamik abhängig und liefert die Grundlage zur gleichzeitigen Berechnung der Reaktions- und der Reibungskraft:

$$\mathbf{f}_{CONTACT} = \begin{cases} \mathbf{f}_N = \mathbf{S}_{CONTACT} \cdot \mathbf{p} + \mathbf{D}_{CONTACT} \cdot \dot{\mathbf{p}} \cdot \mathbf{p} \\ \frac{\mu_{FRICTION} \cdot |\mathbf{f}_N \cdot \mathbf{n}| (\mathbf{f}_N - (\mathbf{f}_N \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n})}{\mathbf{f}_N - (\mathbf{f}_N \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}} + (\mathbf{f}_N \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} \end{cases} \quad (2.32)$$

wenn $\begin{cases} |\mathbf{f}_N - (\mathbf{f}_N \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}| \leq \mu_{FRICTION} \cdot |\mathbf{f}_N \cdot \mathbf{n}| \\ |\mathbf{f}_N - (\mathbf{f}_N \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}| > \mu_{FRICTION} \cdot |\mathbf{f}_N \cdot \mathbf{n}| \end{cases}$ und $\mathbf{p} \geq 0$

wobei

- $\mathbf{p} = (\mathbf{x}_{CONTACT} - \mathbf{x}_{ROBOT}) \cdot \mathbf{n}$ – Penetration des Endeffektors / Fußes in die Kontaktfläche,
- \mathbf{n} – innerer normaler Einheitsvektor zur Kontaktfläche,
- $\mathbf{S}_{ENV}, \mathbf{D}_{ENV}$ – Elastizitätskoeffizienten und Koeffizienten viskoser Reibung (Steifigkeit und Dämpfung),
- $\mu_{FRICTION}$ – Coulomb'scher Reibungskoeffizient.

Lineares Impedanzmodell

Das Modell stellt eine passive elastische Umgebung in einer linearisierten Form (genannt lineares Impedanzmodell) dar und beruht auf Annahme der kleinen Bewegungen in der Nachbarschaft von Gleichgewichtspunkt des Kontaktes $\mathbf{x}_{CONTACT} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$. Damit kann die mechanische Wechselwirkung durch das gut untersuchte lineare Systemmodell mit mehreren Freiheitsgraden beschrieben werden (eine Impedanzkausalität)

$$\mathbf{f}_{CONTACT} = \mathbf{S}_{CONTACT} \cdot \mathbf{p} + \mathbf{D}_{CONTACT} \cdot \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{M}_{CONTACT} \cdot \ddot{\mathbf{p}} \quad (2.33)$$

mit

- $\mathbf{M}_{CONTACT}, \mathbf{D}_{CONTACT}, \mathbf{S}_{CONTACT}$ – eine positiv definierte Umgebungsmasse/-trägheit und eine halb definierte Umgebungsdämpfung /-steifigkeit.

Es sollte erwähnt werden, dass die Berechnung der Koeffizienten des Penetrationsvektors, die mit rotierenden Freiheitsgraden vereinigt sind, von der Form der Orientierungsdarstellung abhängt. Zum Zweck der Einfachheit ist es nützlich, eine *apriori diagonale Matrizen* $\mathbf{M}_{ENV}, \mathbf{D}_{ENV}, \mathbf{S}_{ENV}$ anzunehmen, d.h. das entkoppelte 6-dimensionale mechanische Masse-Dämpfer-Feder-Modell der Umgebung in Roboterkoordinaten. Dieses Modell stellt ein idealisiertes dynamisches Umgebungsmodell dar, das für Analyse und Design des Regelungssystems sehr nützlich ist. In der Praxis kommt häufiger vor, dass die vereinfachten Versionen des linearen Impedanzmodells verwendet werden, welche die dominierenden Effekte, wie Steifigkeit oder Dämpfung berücksichtigen:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{CONTACT} \cdot \mathbf{p} = \mathbf{f}_{CONTACT}, \\ \mathbf{D}_{CONTACT} \cdot \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{f}_{CONTACT}, \\ \mathbf{D}_{CONTACT} \cdot \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{S}_{CONTACT} \cdot \mathbf{p} = \mathbf{f}_{CONTACT}. \end{cases} \quad (2.34)$$

2.2.2.2 Elastisch-plastischer Kontakt

Die elastische Umgebung mit plastischer Verformung kommt oft bei der Beschreibung der realen typischen Untergründe und spielt eine entscheidende Rolle bei den Untersuchungen der Gangbarkeit eines Schreitroboters. Der wichtigste Kennwert dabei ist die Bodentragfähigkeit, die als Bodenwiderstand zum Druck und zum Schub gekennzeichnet wird. Den Boden bilden die nicht gekoppelte (rieselfähig) oder gekoppelte (Kopplungsstärke ist wesentlich kleiner als

die Härte der Mineralpartikel) Erdstoffe [Zytk83]. Für die Analyse der mechanischen Interaktion des Schreitroboters mit dem Boden sind die oberen Bodenschichten von Bedeutung. Die mechanischen Bodeneigenschaften werden normalerweise durch relativ einfache empirische Zusammenhänge beschrieben. Auf dieser Weise wird der Zusammenhang zwischen der Bodeneindringung \mathbf{p} und der somit verursachten Druckspannung σ mit folgender Gleichung beschrieben:

$$\sigma = k \cdot (\mathbf{p}/\mathbf{p}_0)^\delta \quad (2.35)$$

mit

- k, δ – empirische Konstante,
- p_0 – Basiseindringung, normalerweise $p_0 = 1\text{cm}$.

Die Bedeutungen des Kennwertes $\delta > 1$ entsprechen der Bodenverdichtung bei Belastung. Die Bedeutungen des Kennwertes $\delta < 1$ entsprechen der plastischen Bodendeformation und dem Auspressen von Stempel (z.B. Roboterfuß). Für die überwiegende Anzahl der Bodenarten sind die Versetzungen irreversibel und die restlichen Deformationen wesentlich größer als die elastischen Deformationen.

Der Zusammenhang zwischen dem Koeffizienten k und den Stempelausmaßen unterscheidet sich nach Angaben verschiedener Autoren. Öfter wird folgender empirischer Zusammenhang verwendet:

$$k = k_\Omega / R_{CONTACT} + k_\Psi \quad (2.36)$$

mit

- $R_{CONTACT}$ – Stempelausmaß (Radius des Fußes),
- k_Ω, k_Ψ – empirische Konstante, welche die Haftung und innere Reibung im Grund beschreiben.

Daraus ergibt sich die bezogene Druckspannung:

$$\sigma = \left(\frac{k_\Omega}{R_{CONTACT}} + k_\Psi \right) \cdot \left(\frac{\mathbf{p}}{\mathbf{p}_0} \right)^\delta \quad (2.37)$$

In der Tabelle 2.3 werden die Koeffizienten für die einzelnen Bodenarten mit nicht gekoppelten Erdstoffen entsprechend der Gleichungen (2.36) und (2.37) dargestellt [Zytk83].

Tabelle 2.3. Empirische Koeffizienten für nicht gekoppelten Erdstoffe.

Bodenart	δ	k_Ω [kPa*m]	k_Ψ [kPa]
trockener Sand	1,1	0,006	9,7
Schnee	1,08	0,24	2,0
Ackerboden	0,8	0,12	4,0
Bindeton	0,11	0,45	25,0
nasser Lehm	0,9	1,7	12,0

Mit proportionaler Zunahme des charakteristischen Maßes l des Schreitroboters steigt seine Masse wie l^3 und die Fußfläche wie l^2 . Infolgedessen steigt die bezogene Druckspannung auf dem Boden proportional zu l , wodurch auch die Bodenversetzung steigt. Wesentlich ist dabei das Verhältnis der Versetzung zum Maß des unteren Beingliedes. Zum Beispiel wird die Bodenversetzung, die dem Maß des unteren Gliedes gleich ist, offensichtlich nicht erlaubt und

die wesentlich kleinere Versetzung spielt keine Rolle für die Gangfähigkeit des Schreitroboters.

2.3 Eigenschaften des Robotersystems im Kontakt und Modellauswahl

Infolge von der komplexen und variablen Struktur einer Kontaktaufgabe wird ein Modell des Robotersystems im Kontakt, das alle dynamischen Effekte wie strukturelle Roboter- und Umgebungsnachgiebigkeit, nichtlineare Antriebseffekte, Reibungseffekte und Sensornachgiebigkeit berücksichtigt, ziemlich kompliziert. In der Praxis ist es passend, Modelle verschiedener Komplexität entsprechend der potenziellen Anwendung auszuwählen:

- Für die Aufgabe „Mehrkörpersimulation“ wird ein präzises Modell des Kontaktes bevorzugt, das möglichst viele physikalische Effekte (Elastizität, Plastizität, viskose/trockene Reibung, Materialeigenschaften im Kontakt etc) berücksichtigt.
- Für die Aufgabe „Detektierung mechanischer Umgebungseigenschaften“ ist ein einfaches aber charakteristisches Umgebungsmodell ohne bzw. mit plastischer Verformung vom Interesse, das auch später zum Reglerentwurf verwendet wird.
- Für die Regelungsanalyse und Reglerdesign sind die vereinfachten aber zuverlässigeren Modelle des Robotersystems und der Umgebung mit wesentlichen Phänomenen vom Interesse. Diese Modelle sollten sich ebenfalls für die experimentelle Parameterabschätzung eignen.

Die Dynamik eines Robotermodells erweist sich als ein nichtlineares, zeitvariantes und gekoppeltes Mehrgrößensystem. Die dynamischen Nichtlinearitäten zeigen einen sichtlichen Einfluss und müssen bei der Positionsregelung berücksichtigt werden, wenn [Jans95]:

- lageabhängige Trägheiten durch die Roboterkonstruktion verursacht werden (Gravitationseffekte),
- hochdynamische Bewegungen ausgeführt werden (Zentrifugal- und Corioliseffekte),
- kleine Getriebeübersetzungen zu den dominierenden Gelenkkörperträgheiten im Vergleich zu den motorseitigen Trägheiten führen.

Allerdings ist es zu berücksichtigen, dass die kontaktbehafteten Anwendungen zu den langsameren und präzisen Aufgaben gehören. Diese zeichnen sich durch kleine präzise Bewegungen aus, bei denen die Lage und die Geschwindigkeit des Robotersystems von seinem Regelungssystem gut überwacht und kontrolliert werden. Demzufolge lassen sich die Robotermodelle in vielen praktischen Fällen während der Durchführung von Kontaktaufgaben linearisieren, einerseits wegen der verhältnismäßig langsamen Geschwindigkeiten [Goll81] und dementsprechend wegen des langsam verändernden Jacobians $\dot{\mathbf{J}} \approx 0$, andererseits wegen des Ausgleichs der Coriolis-/Zentrifugalkräfte sowie die nichtlinearen Gravitationseffekte durch die adaptive Regelung [Fila00, Khos89, Leah89].

Weitere Nichtlinearitäten, wie Elastizitätsquellen in der Roboterkonstruktion und in den Kraftsensoren, platziert im Endeffektor/Fuß, sind zwar zu berücksichtigen, können aber aus folgenden Gründen vernachlässigt werden:

- Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen [Deme94] zeigen, dass die Nachgiebigkeit der mechanischen Struktur der aktuellen industriellen Manipulationsroboter im zulässigen Lastbereich verhältnismäßig schwach ist. Der

dominierende Einfluss spielt Verdichtung des hydraulischen Stellantriebs, Elastizität im „Harmonic Drive“ Getriebe oder Positionsverschiebung der weit eingestellten Antrieben usw. Allerdings übertrifft der Beitrag der Roboternachgiebigkeit hier nicht 20% der Gesamtnachgiebigkeit der mechanischen Struktur. Aus diesem folgt, dass das Robotermodell mit starren Gliedern gerechtfertigte und genügende Approximation der herkömmlichen Robotersysteme darstellt.

- Die Resonanzfrequenz der kommerziellen Kraftsensoren, die sich durch hohe Steifigkeit und niedrige Masse kennzeichnen, liegt erheblich über der Bandbreite des Robotersystems und des Positionsreglers.
- Die strukturellen Eigenfrequenzen des Roboters hängen von der Bandbreite des Regelungssystems ab und sind verhältnismäßig hoch.

Gegründet auf oben genannten Annahmen, nimmt ein lineares Robotermodell folgende Form

$$\mathbf{M}_{\text{CARTES}}(\mathbf{x}) \cdot \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{B}_{\text{CARTES}}(\mathbf{x}) \cdot \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \cdot \boldsymbol{\tau}_{\text{DRIVE}} + \mathbf{f}_{\text{CONTACT}} \quad (2.38)$$

bzw. eine Differenzform in einer nahen Region um die Nominalposition:

$$\mathbf{M}_{\text{CARTES}} \cdot \delta \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{B}_{\text{CARTES}} \cdot \delta \dot{\mathbf{x}} = \delta \mathbf{f}_{\text{DRIVE}} + \delta \mathbf{f}_{\text{CONTACT}} \quad (2.39)$$

Wenn das Robotersystem nach gewünschter Nachgiebigkeit geregelt wird, dann wird das Verhalten des Robotersystems in folgender Form geschrieben:

$$\frac{\mathbf{f}_{\text{CONTACT}}}{\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{REF}}} = \mathbf{Z}_{\text{REF}}(s) = \mathbf{S}_{\text{REF}} \left(1 + \frac{2 \cdot \xi_{\text{REF}}}{\omega_{0\text{REF}}} s + \frac{1}{\omega_{0\text{REF}}^2} s^2 \right) \quad (2.40)$$

Bei der Auswahl des Umgebungsmodells sind mehrere Tatsachen zu berücksichtigen. Die Zuverlässigkeit des Hertz' Kontaktmodells für Robotik ist noch zweifelhaft. Nämlich das Druckspannungsmodell setzt einen sehr hohen Druck voraus. Außerdem kann es ausschließlich für spezifische Probleme, wie die mechanische Interaktion zwischen den Roboterfingern und den gefassten Gegenständen [Ramo94] mit Punktkontakten oder zur Abschätzung der Objektbiegung mit einem elastischen Taktilensor [Nich95] angewandt werden. Generell machen die dominierenden Elastizitätsquellen in der Roboterkonstruktion, im Kraftsensor, in der Roboterregelung und in der Umgebung die Kontaktmodelle in Form linearer Impedanz praxistauglicher und zuverlässiger. Diese einfachen Modelle repräsentieren eher viele praktische Kontaktsituationen anstatt einer allgemeinen Struktur der Kontaktdynamik. Zum Zweck der Regelungsanalyse und -synthese ist es bequem, das Modell der Umgebung als *elastische und linear entkoppelte nachgiebige Platte* darzustellen. In diesem Modell wird die Kontaktkraft mit diagonalen Matrizen $\mathbf{S}_{\text{CONTACT}}$ und $\mathbf{D}_{\text{CONTACT}}$ in Bezugskoordinaten ausgedrückt. Die Steifigkeitsmatrix präsentiert die äquivalente Steifigkeit der mechanischen Strukturen der Umgebung und des Roboters (Glieder, Gelenke, Endeffektor, Kraftsensor). Dieses idealisierte Modell der realen Kontaktsituationen ist für den Entwurf robuster Kontaktregler einfach anzuwenden. Moderne Theorie des robusten bzw. adaptiven Reglerdesigns basiert auf vereinfachten Modellen und kann trotz der Einführung verschiedener Ungenauigkeiten die Regelungsziele erreichen. Das Linearisierungsverfahren kann in einigen Fällen konservativ sein, aber der Profit davon liegt im einfachen und dennoch praktischen Reglerentwurf. Außerdem nach [Colg88] repräsentiert allein das reine Steifigkeitsmodell die am größten destabilisierende Umgebung von beiden Seiten (Stabilität der Kontaktnahme oder Bewegungsstabilität im Kontakt), da es keine Dämpfung zur Energieabsorbierung während der mechanischen Interaktion gibt.

Die oben genannten Annahmen hinsichtlich des Robotersystems und der Umgebung lassen folgende Kontaktmodelle für einen Manipulator (s.Abb.2.9a, Abb.2.9b) und einen Schreitroboter (s.Abb.2.10) ableiten. Der Schreitroboter wird dabei auf ein zweibeiniges Modell reduziert (je ein Bein pro Roboterseite), das für die Untersuchungen von meisten Kontaktaufgaben genügt.

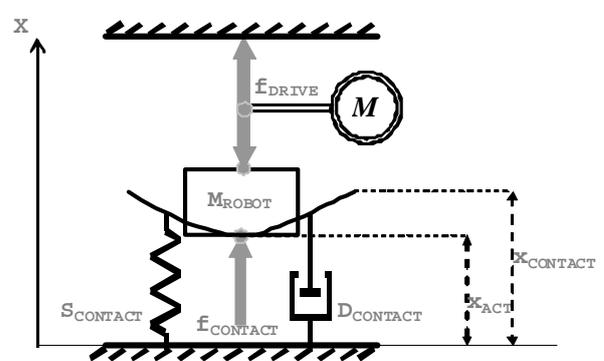
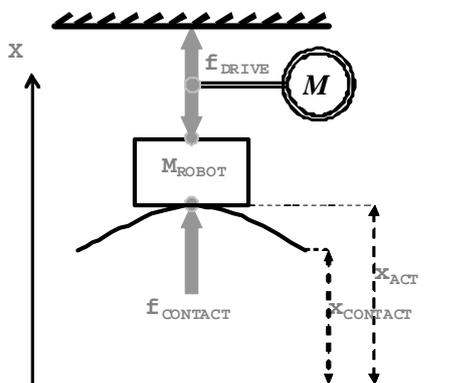
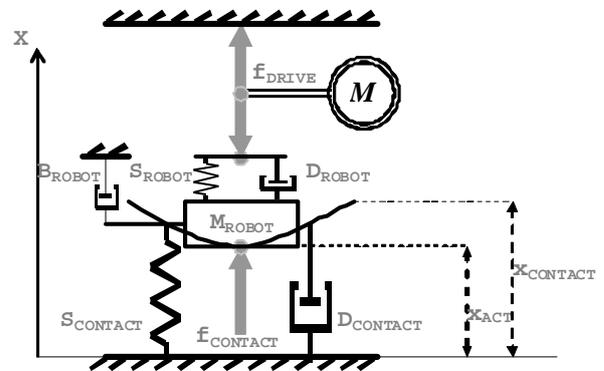
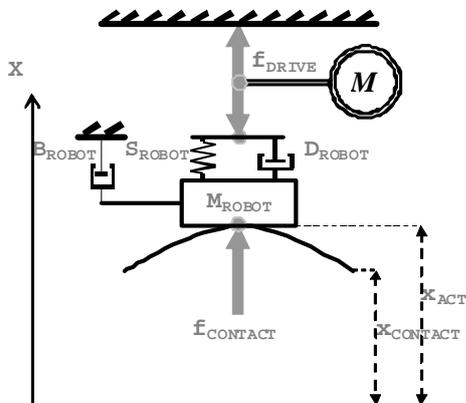
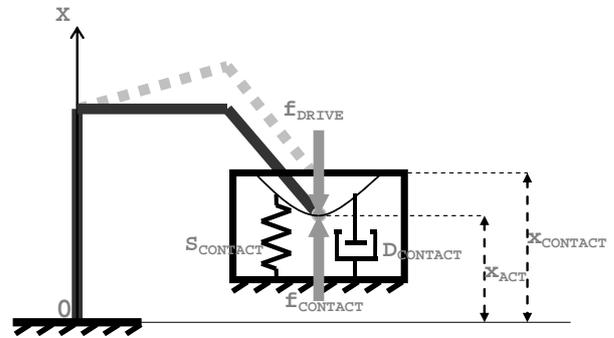
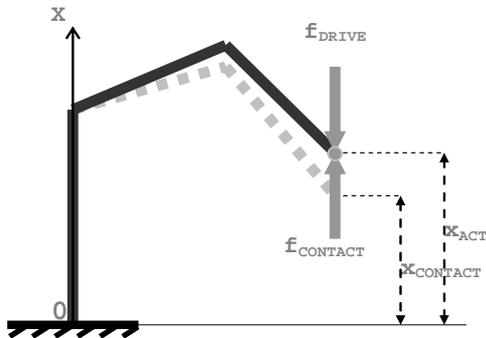


Abb.2.9a. (oben) schematische Darstellung und (mittig und unten) lineare Modelle des Manipulationsroboters mit bzw. ohne Berücksichtigung der strukturellen Elastizität unter Angriff externer Kraft.

Abb.2.9b. (oben) schematische Darstellung und lineare Modelle des Manipulationsroboters mit bzw. ohne Berücksichtigung der strukturellen Elastizität im Kontakt mit der Umgebung.

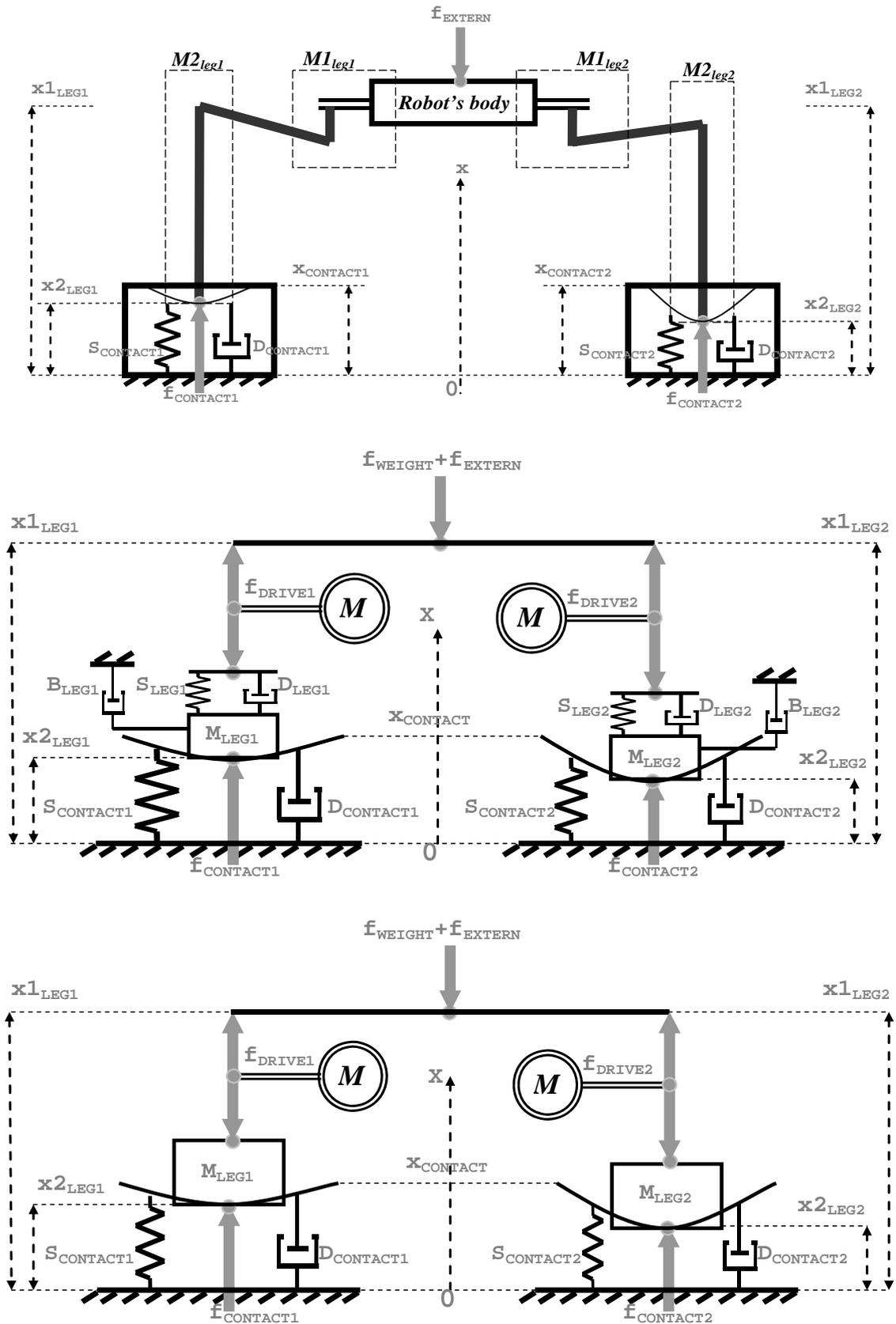


Abb.2.10. (oben) schematische Darstellung und (mittig und unten) lineare Modelle des Schreitroboters mit bzw. ohne Berücksichtigung der strukturellen Elastizität/Viskosität im Kontakt mit dem Untergrund.

2.4 Simulation des Robotersystems im Kontakt

Das Robotersystem stellt ein Mehrkörpersystem mit mechanischen Bindungen dar (s. Abb. 2.11). Sowohl die Körper als auch die Bindungen können starr oder nachgiebig sein. Die mechanischen Bindungen zwischen den Einzelkörpern eines Mehrkörpersystem repräsentieren entweder mechanische Gelenke oder mechanische Kontakte und kennzeichnen sich durch zwei physikalische Phänomene: Reaktionskräfte und Reibung. Betrachtet man starre Kontaktbindungen, so wird das Mehrkörpersystem mit den zusätzlichen Zwangsbedingungen anstelle der Reaktionskräfte beschrieben, wobei die mechanischen Materialeigenschaften im Kontaktbereich gar keine Rolle spielen. Betrachtet man hingegen die nachgiebigen Kontaktbindungen, so wird das Mehrkörpersystem mit den eingprägten Reaktionskräften beschrieben, wobei die mechanischen Materialeigenschaften im Kontaktbereich eine entscheidende Rolle spielen.

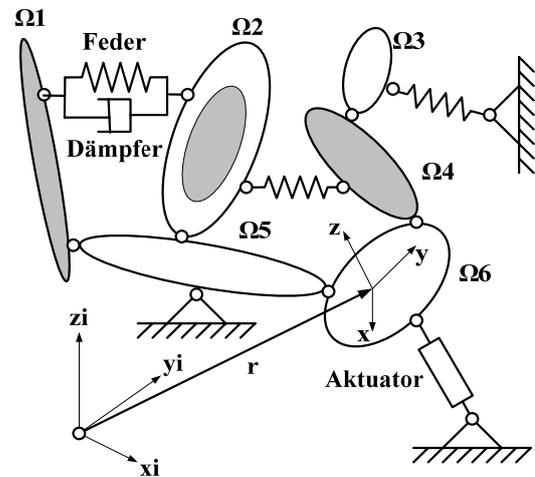


Abb. 2.11. Beispiel von einem Mehrkörpersystem.

Eine raffinierte und genaue Modellierung sowie Simulation eines komplizierten Mehrkörpersystems im Kontakt mit der Umgebung ist eine wichtige, aber auch herausfordernde Aufgabe. Ein Mehrkörpersystem mit starren mechanischen Gelenken könnte zwar linearisiert werden und so wie übliche lineare Probleme mit Eigenwert Analyse berechnet werden, jedoch entspricht diese Vorstellung nicht der Realität. Ein kompliziertes Mehrkörpersystem bzw. ein Mehrkörpersystem mit zusätzlichen mechanischen Kontakten kann überhaupt nicht linearisiert werden, weil das System nicht differenzierbar am Kontaktrand ist. Nichtlineare Probleme dieser Art müssen in einer Zeitdomäne mittels Simulatoren gelöst werden.

Die numerische Simulation starrer mechanischer Gelenke ist gut untersucht und in mehreren Mehrkörpersimulatoren längst implementiert. Weiterhin wird die Betonung auf die Modellierung und Simulation starrer/nachgiebiger mechanischer Kontakte und nachgiebiger mechanischer Gelenke gesetzt. Die nachgiebigen mechanischen Gelenke können auch als mechanische Kontakte, die die relative Positions-/Orientierungsänderung mit eingprägten Kräften hindern, dargestellt werden. Generell kennzeichnet sich die numerische Simulation durch die stetige Notwendigkeit aus, die Rechengenauigkeit gegen Rechengeschwindigkeit zu optimieren.

Es gibt mehrere *genaue Methoden* zur Berechnung der Kontaktkräfte, die sich auf den FE-Methoden oder auf der Körperverteilung in kleinen Segmenten beruhen. Diese fordern die Darstellung der kollidierenden Oberflächen von zwei Körpern in Form eines Gitters. Die relevanten Kontaktkräfte werden für jeden Gitterpunkt berechnet und die resultierenden Kontaktkräfte werden durch die Integration aller Kräfte auf der Kontaktoberfläche gefunden. Diese Methoden sind sehr genau, erfordern jedoch eine enorme Rechenleistung und sind demzufolge sehr langsam.

Allerdings stellen die meisten Simulationsanwendungen keinen extrem hohen Anspruch an die Genauigkeit. In vielen Fällen werden die zusätzlichen Annahmen getroffen, welche die *Genauigkeit reduzieren* aber die *Simulationsgeschwindigkeit erhöhen*. Oft führen verschiedene Annahmen zu verschiedenen Rechenmethoden, jedoch zu den ähnlichen Ergebnissen. In diesem Fall spielt es keine große Rolle, welche Annahme oder Methode ausgewählt wurde.

Die Implementierung eines Mechanismus zur Modellierung und Simulation von Mehrkörpersystemen mit mechanischen Gelenken und Kontakten ist immer damit verbunden, dass die mechanischen körperbeschreibenden Modelle mit entsprechenden Kontaktvariablen (wie Kontaktkraft, Kontaktgeschwindigkeit, Penetrationstiefe etc) erweitert werden und die folgenden Routinen eingesetzt werden (s.Abb.2.12):

- *Detektierung der Kollisionen*: Feststellung der Kollisionsereignisse;
- *Berechnung der Kontaktparametern*: Ermittlung der geometrischen Kontaktparameter (Kontaktpunkt, Penetrationstiefe, Penetrationsgeschwindigkeit etc);
- *Berechnung der Kontaktantwort*: Verhinderung der Körpereindringung durch die Kontaktkräfte bzw. Körperimpulse;
- *Update der Systemdynamik*: Berechnung neuen Zustandes vom Mehrkörpersystem.

Damit die numerische Simulation von nichtlinearen Kontaktaufgaben noch mehr der Realität entspricht, werden oft die o.g. Berechnungen innerhalb eines Integrationschrittes unter Verwendung des Energieerhaltungssatzes bzw. des Impulserhaltungssatzes in einer zusätzlichen Schleife optimiert.

Wie die Analyse existierender Multikörpersimulatoren bereits gezeigt hat, verfügen wenige Softwarepakete über alle angeforderten Routinen. Weiterhin werden die wichtigsten Bestandteile eines Mehrkörpersimulators mit der Kontaktbehandlung näher erläutert.

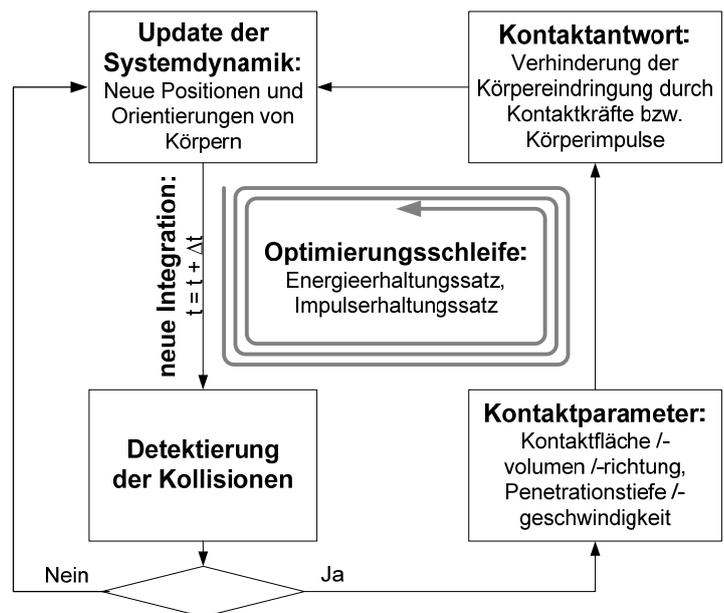


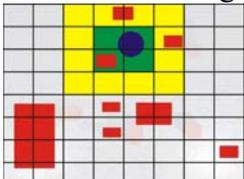
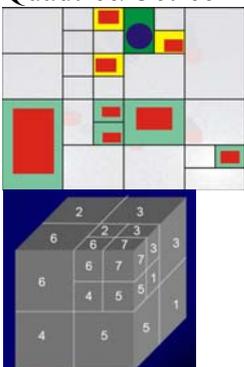
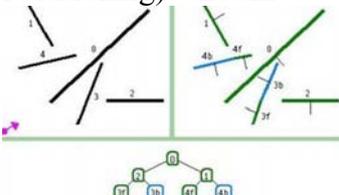
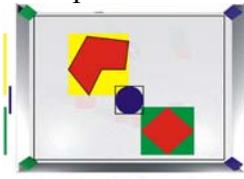
Abb.2.12. Ablauf einer kontaktbehandlungsfähigen Multikörpersimulation.

2.4.1 Detektierung der Kollisionen

Die Kollisionserkennung ist ein unabdingbarer Bestandteil mehrerer Aufgaben in der Computergraphik, mechanischer Simulation, Wegplanung etc. Bei der Kollisionserkennung zwischen impliziten Oberflächen geht es darum, Schnittpunkte/-kurven zwischen zwei Oberflächen zu bestimmen, die nur indirekt, beispielsweise durch eine Punktwolke (eine Menge von Punkten im Raum), gegeben sind.

In der ersten Phase (*collision culling*) wird versucht, alle Paare von Objekten auszuschließen, die nicht kollidieren können. Mittels Raumunterteilungsmethoden (Tabelle 2.3), wie die uniforme Raumunterteilung, Quadtree/Octree, BSP-Baum, Sweep-and-Prune wird der ganze Szenenraum unterteilt und die nicht benachbarten Körperpaare werden aus der Liste potentiell kollidierender Körperpaaren ausgeschlossen.

Tabelle 2.3. Methoden der Raumunterteilung.

Methode	Beschreibung
uniforme Raumunterteilung 	Uniforme Raumunterteilung unterscheidet sich dadurch, dass ein gleichmäßiges Gitter über Szene gelegt wird und jedes Objekt mindestens einer Zelle zugeordnet wird. Das Verfahren ist sehr einfach, jedoch muss bei den bewegten Objekten das Gitter ständig aktualisiert werden und bei den Objekten mit verschiedenen Größen ist die Gitterweite schwer zu bestimmen.
Quadtree/Octree 	Quadtree/Octree Methode wird in einer Baumstruktur abgebildet, wobei der Wurzel die komplette Szene repräsentiert. Die Zerlegung der Szene erfolgt rekursiv in jeweils vier Quadranten (Knoten), bis die gewünschte Auflösung erreicht wird. Für dreidimensionale Szenen werden Octrees verwendet. Bei diesem Verfahren werden weniger Daten gespeichert und die Zellengröße kann leichter gewählt werden. Die Aktualisierung der Struktur der dynamischen Objekte kostet allerdings mehr Aufwand.
BSP (Binary Space Partitioning) – Baum 	BSP teilt den gesamten Raum mit Hilfe von Linien in die Teilräume. Die Kollision der Objekte, die komplett in verschiedenen Teilräumen liegen, wird ausgeschlossen. Das Verfahren wird solange iterativ durchgeführt, bis alle potentiellen Kollisionen detektiert sind.
Sweep-and-Prune 	Bei Sweep-and-Prune werden die achsengerichtete Hüllkörper (AABB) auf Überschneidung untersucht. Dafür werden ihre Achseprojektionen betrachtet. Sollten sich die zwei beliebigen Hüllkörper in allen 3 Achsen überschneiden, so besteht die Wahrscheinlichkeit, dass die dazugehörigen Objekte kollidieren. Die Methode eignet sich ebenfalls für dynamische Objekte.

In der zweiten Phase (*broad collision detection*) wird unter Zuhilfenahme so genannter Bounding Volumes wie AABB, Kugeln, OBB, k-DOP grundlegend festgestellt, ob eine Kollision zweier Objekte möglich ist (s. Tabelle 2.4). Die Hüllkörper vereinfachen komplexe geometrische Körper und machen dadurch die Kollisionserkennung einfacher und schneller.

Tabelle 2.4. Vergleich von „Bounding Volumes“.

Methode	Effizienz	Speicherbedarf	Aufwand	Komplexität	Rotation
AABB	Beim AABB Algorithmus werden um den geometrischen Körper achsenparallele Quader gelegt. Diese Quader sind nach den Achsen des Koordinatensystems ausgerichtet.				

	Sehr schlecht	Gering	Sehr Einfache Erzeugung	Geringere Komplexität	Nicht möglich
Kugel 	Um den geometrischen Körper wird eine Kugel aufgespannt. Der Radius ist gleich der Entfernung vom Mittelpunkt zu dessen meist entfernten Punkt. Dadurch kann der Körper in der Kugel beliebig gewendet, gedreht und bewegt werden.				
	Sehr schlecht	Gering	schwierig zu erstellen	Geringere Komplexität	ohne Neuberechnung möglich
OBB 	Der OBB Algorithmus funktioniert ähnlich wie der AABB. Jedoch werden die Quader nicht am nach den Achsen des Koordinatensystems ausgerichtet, sondern an dem geometrischen Körper. Dadurch bekommt man eine höhere Hülffizienz als bei AABB.				
	Gute Hülffizienz	Hoch	Rechenintensive Erzeugung	Aufwendige Kollisionserkennung	unproblematisch
k-DOP 	Der wesentliche Unterschied zum OBB Algorithmus liegt darin, dass es mehrere Beschränkungsflächen gibt. Somit hat ein k-DOP eine wesentlich höhere Hülffizienz.				
	Sehr gut	groß	Einfache Erzeugung	Geringste Komplexität	mit Neuberechnungen

In der dritten Phase (*exact collision detection*) werden die Kollisionen zwischen den in Frage kommenden Objektpaaren (wenn sich die groben Hüllkörper überschneiden) exakt bestimmt. Räumliche, hierarchische Datenstrukturen aus feinen Hüllkörpern, wie beispielsweise AABB-Bäume, OBB-Bäume, Kugel-Bäume oder k-DOP-Bäume werden genutzt, um möglichst schnell in die Bereiche zu leiten, in denen Kollisionen auftreten (s.Abb.2.13). Es existieren folgende Methoden zur Erstellung von Hierarchie-Bäumen:

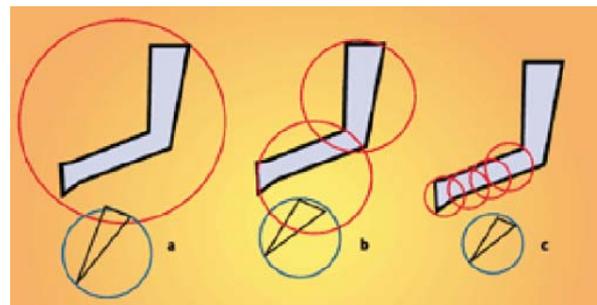


Abb.2.13. Erstellung der Hierarchie-Bäume.

- *Top-Down*: Man erzeugt einen Hüllkörper für den gesamten geometrischen Körper. Nun teilt man diesen Körper in zwei Teile und erzeugt wieder einen Hüllkörper. Dieses Verfahren wiederholt man bis man nur noch einen Hüllkörper um ein Polygon hat.
- *Bottom-Up*: Man erzeugt einen Hüllkörper um ein Polygon. Nun fügt man zwei Hüllkörper zu einem neuen Hüllkörper hinzu. Dieses Verfahren wiederholt man bis man nur noch einen Hüllkörper um den kompletten geometrischen Körper hat.

Für die deformierbaren Objekte und die Erkennung von Selbstkollisionen scheinen bisher nicht-hierarchische Datenstrukturen viel versprechender zu sein. Da die Kollisionserkennung in vielen VR-Anwendungen einen zentralen Flaschenhals darstellt, gibt es auch approximative Algorithmen zur zeitkritischen Kollisionserkennung, um eine physikalisch plausible, aber nicht absolut physikalisch korrekte Erkennung durchzuführen. Am Ende der zur Verfügung stehenden Zeit soll eine möglichst gute und genaue Aussage zur Kollision gemacht werden, die aber in wenigen Fällen auch falsch sein darf.

2.4.2 Berechnung der Kontaktparameter

Finden die drei Phasen der Kollisionserkennung statt, so wird auf den entsprechenden (kleineren) Teilmengen von geometrischen Figuren ein exakter Schnitttest mit einer der nachfolgenden Methoden:

- Schnittpunkt(e) von Strahl und Kugel/Ebene/Dreieck,
- Schnittlinie zweier Ebenen,
- Schnittlinie zweier Dreiecke

durchgeführt und die *geometrischen Parameter*, wie beispielsweise die *Eindringungstiefe*, *Kontaktfläche*, *Kontaktvolumen*, *Kontaktnormal* usw. berechnet.

Algorithmen zur Berechnung der Kontaktparameter sind eng mit der Kollisionserkennung verbunden. Im Laufe letzter Jahrzehnt wurde eine Reihe von Algorithmen zur Kollisionserkennung sowie auch zum Teil zur Berechnung der Kontaktparameter entwickelt. Dazu gehören:

- *Lin-Canny Closest Features Algorithm* (Kollisionserkennung und Berechnung der Kontaktparameter) [Lin91], [Lin92].
- *Q-COLLIDE* (nur Kollisionserkennung) [Chun96a], [Chun96b], [Chun96c].
- *V-Clip* (nur Kollisionserkennung) [Mirt96], [Mirt98].
- *OBB-Tree* (nur Kollisionserkennung) [Lin96], [Eber02],[Eber99],[Schm99].
- *QuickCD* (nur Kollisionserkennung) [Klos95], [Klos97], [Klos98].
- *KDS* (nur Kollisionserkennung) [Eric99a], [Eric99b].
- *GJK* (Kollisionserkennung und Berechnung der Kontaktparameter) [Berg03].
- *GJK-based EPA* (Kollisionserkennung und Berechnung der Kontaktparameter) [Berg03].

Diese Algorithmen wurden in den Softwarepaketen zur Kollisionsdetektierung und Berechnung von Kollisionsparametern, wie Deep/Swift++/I-Collide/Q-Collide von UNC-Chapel Hill, Solid von Dtecta, Bullet von Ageia implementiert.

2.4.3 Berechnung der Kontaktantwort

Die Kontaktantwort scheint, das problematischste und umstrittenste Teil der Kontaktbehandlung zu sein, weil hier viele Berechnungen entstehen, die unterschiedliche Eingangsinformation erfordern und ziemlich unterschiedliche numerische Ergebnisse ergeben können. Man verwendet hauptsächlich zwei Hauptmethoden bei der Kontaktbehandlung: die *impulsbasierte* und *kraftbasierte* Methode. Bei den beiden Methoden wird angenommen, dass die kontaktierenden Einzelkörper steif sind und beide das Update der Systemdynamik auf eigene Art beeinflussen. Demzufolge hängt das Update der Systemdynamik stark von der Methodenauswahl zur Berechnung der Kontaktantwort ab.

2.4.3.1 Impulsbasierende Methode

Die Impulsbasierende Methode (s.Abb.2.14) verwendet Kollisionsimpulse zwischen den Körpern und ändert die Geschwindigkeit der Körper während des Kontaktes anhand des Impulsgesetzes wie Poisson's Hypothese. Diese Methode legt das Impulserhaltungsgesetz

zugrunde und operiert mit den Körperimpulsen vor und nach der Kollision sowie mit der Restitution des Kontaktes.

Einige Annahmen werden in Betracht gezogen, wenn das Impulserhaltungsgesetz für die physikbasierte Simulation verwendet wird:

- Kollisionsdauer ist vernachlässigbar klein.
- Es gibt gerade ein Kollisionspunkt.
- Die kollidierenden Körper bewegen sich während der Kollision nicht.
- Keine anderen Kräfte außer Kontaktkräfte wirken auf die Körper.
- Der Impuls gibt momentane Änderung an den translatorischen und rotatorischen Geschwindigkeiten der kollidierenden Körper.

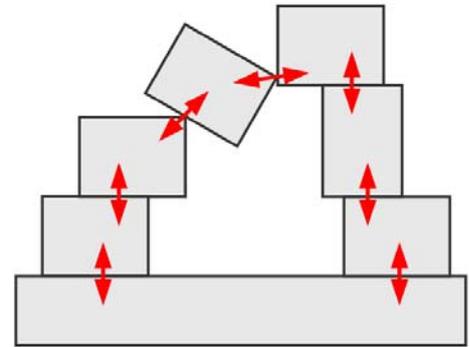


Abb.2.14. Schematische Darstellung des Kontaktes bei der Impulsbasierenden Methode.

Falls die Geschwindigkeiten der Körper vor den Kollisionen, die Punkte der Kollisionen und die Restitution des Kontaktes bekannt sind, ist es möglich, die Geschwindigkeiten nach den Kollisionen zu berechnen.

Die Hauptvorteile dieser Methoden liegen darin, dass ausschließlich wenige Konstanten zur Beschreibung des Impulsgesetzes erforderlich sind und die Integrationszeit durch die Berechnung der Kontaktantwort nicht beeinflusst wird, da diese als Ereignis momentan stattfindet.

Jedoch, da die Geschwindigkeit in der impulsbasierten Methode nicht kontinuierlich ist, ist diese nicht von Gebrauch mit traditionellen Rechnern der Differenzialgleichungen (Ordinary Differential Equation Solver). Das kontinuierliche Integrationsverfahren im Rechner sollte am Moment der Kollision angehalten werden und mit der neu berechneten Geschwindigkeit weiter laufen. Außerdem kann die impulsbasierte Methode nur dann für einzelne Körper angewendet werden, wenn die Auswirkung der Kollision auf andere Körper unwesentlich ist (z.B. frei fliegende Körper). Diese Methode ist für den Fall eines konventionellen Mehrkörpersystems mit statischen Objekten, frei beweglichen Objekten und den Objekten, die aus mehreren durch Gelenke verbundene Körper bestehen, erweitert, jedoch übt sie einen großen Einfluss auf das Update der Systemdynamik aus. Die idealisierten Impulsgesetze sind außerdem ausschließlich für absolut starre Körper gültig. Dies alles beschränkt die Anwendung der impulsbasierten Methode in der Analyse der Mehrkörperdynamik.

2.4.3.2 Kraftbasierende Methoden

Eine alternative Methode zur Kontaktbehandlung im mechanischen Mehrkörpersystem basiert auf dem Kraft- und Drehmomentmodell der Kollision. Es wird angenommen, dass in Kontakt tretende Körper ineinander eindringen und dass dieses Eindringen die Reaktionskräfte im Kontakt verursacht. Diese Kontaktkräfte versuchen das weitere Eindringen zweier Körper zu verhindern und die kontaktierenden Körper zu trennen.

Für die Praxis ist es von großer Bedeutung, dass die Kontaktkraft differenzierbar ist und die gesamte mechanische Energie des Systems während des Kontaktes verbraucht (nicht produziert) wird. Ein Teil der Energie wird dabei in die thermische Energie umgewandelt. Um

die geforderte Genauigkeit und die vorhandene Rechenleistung auszugleichen, wurden die folgenden Regeln für die Berechnung der Amplitude und der Richtung der Kontaktkraft abgeleitet:

- Die Kontaktkraft, die auf den Körper wirkt, ist null, wenn keine Penetration vorhanden ist.
- Wenn ein idealer Kontakt modelliert wird, werden die resultierenden Geschwindigkeiten nach dem Kontakt dem Impulserhaltungsgesetz entsprechen.
- Zwischen dem Anfang und dem Ende des Kontaktes wird eine Kraft aktiviert, die weiteres Eindringen verhindert. Diese Kraft wirkt auf beide kontaktierende Körper, ist im jeweiligen Kontaktpunkt angelegt und so gerichtet, dass sie die kontaktierenden Körper voneinander zieht. Die Richtung dieser Kraft entspricht der kürzesten Versetzung, die die kontaktierenden Körper trennen kann. Die Amplitude der Kraft ist zur Eindringungstiefe proportional. Diese Eindringungstiefe ist die Länge der kürzesten Versetzung, die die Körper trennen kann.

Die Schwierigkeit der Aufgabe besteht darin, die Kontaktkräfte korrekt zu modellieren. Wie bereits erwähnt wurde, sind die genauen Berechnungen der Kontaktkräfte mit der Diskretisierung des Kontaktraumes bzw. der Kontaktfläche verbunden und sollten sich auf den physikalischen Materialeigenschaften (E-Modul, Kompressionsmodul etc) und Kontaktdynamik (Penetrationstiefe, Penetrationsgeschwindigkeit etc) beruhen. Allerdings wird die Berechnung der Amplitude der Kontaktkraft manchmal nicht durch Physik motiviert, aber eher durch numerische Analyse [Barr89]. Diese Berechnungsmethode ist so auszuwählen, dass die gesamten Ergebnisse des Kontaktes mit physikalischen Gesetzen (Impulserhaltungsgesetz, Energieerhaltungsgesetz) übereinstimmen und dass die numerische Simulation in der Lage ist, diese zu handhaben.

Die mehreren ins Leben gerufenen Berechnungsmethoden zur Simulation von starren bzw. nachgiebigen Bindungen (Gelenke/Kontakte) lassen sich in zwei Gruppen unterteilen (s.Abb.2.15):

- Kraftbasierende Methode mit *Lagrange Multiplikatoren* Formulierung ,
- Kraftbasierende Methode mit *Penalty* Formulierung.

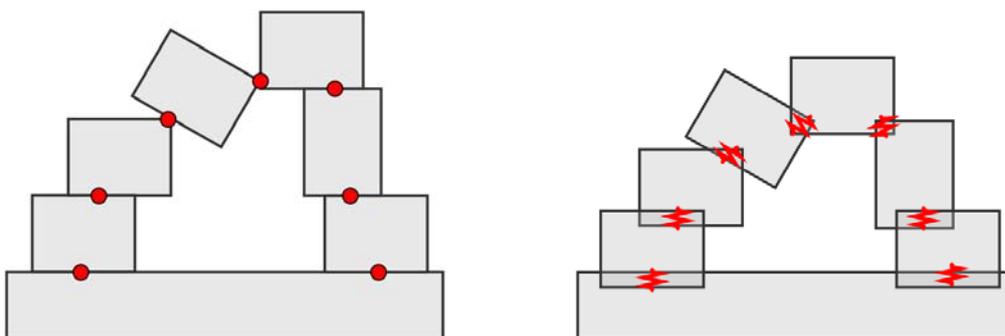


Abb.2.15. Schematische Darstellung des Kontaktes bei der Kraftbasierenden Methode mit (links) Lagrange Multiplikatoren Formulierung und (rechts) Penalty Formulierung.

→ Die Berechnungsmethode mit *Lagrange Multiplikator* Formulierung modelliert eine mechanische Bindung (Gelenk/Kontakt) mit einer Zwangskraft λ

$$\mathbf{f}_{CONTACT} = \frac{\partial \mathbf{C}_{ACTIVE}^T}{\partial \mathbf{p}} \cdot \lambda, \quad \mathbf{C}_{ACTIVE}(\mathbf{p}) \leq 0, \quad (2.41)$$

mit

- λ – Lagrange Multiplikator,
- \mathbf{C}_{ACTIVE} – Vektor der aktiven Kontakte \mathbf{C}_{ACTIVE} , welche im Wesentlichen die Abstände (z.B. Knotenabstände) enthält.

Die Kontaktkräfte verrichten an die Umgebung keine Arbeit und der physikalische Charakter der mechanischen Bindungen geht dabei verloren. Die durch diese Bindungen bedingte mechanische Wechselwirkung der Körper wird durch die Zwangskräfte repräsentiert. Diese Zwangskräfte der mechanischen Bindungen des Mehrkörpersystems werden oft in einem Optimierungsverfahren unter Berücksichtigung der Plausibilität von Ergebnissen berechnet. Das Optimierungsverfahren sollte dabei als Teil des ODE-Solvers ausgelegt werden.

→ Die Berechnungsmethode mit *Penalty Formulierung* modelliert eine mechanische Bindung (Gelenk/Kontakt) mit einer starken evtl. nichtlinearen Feder. Die durch die Bindung bedingte mechanische Wechselwirkung der Körper wird durch die eingepprägten Kräfte repräsentiert.

$$\mathbf{f}_{CONTACT} = \mathbf{S}(\mathbf{p}) \cdot \mathbf{p} \quad (2.42)$$

mit

- \mathbf{p} – Penetrationstiefe,
- $\mathbf{S}(\mathbf{p})$ – Materialkonstante (bezogene Steifigkeit im Kontakt).

Die Kontaktkräfte verrichten an der Umgebung eine Arbeit und der physikalische Charakter der mechanischen Bindungen geht dabei nicht verloren. Diese Kräfte werden anhand der Kontaktdaten (Penetrationstiefe, -geschwindigkeit) und der bezogenen Material- bzw. Kontakteigenschaften (Elastizitäts-, Kompressions-, Schubmodul, Poissonzahl, Steifigkeit, Dämpfung, Restitution etc) berechnet. Die Umgebung wird als die nichtlineare Feder für die Berechnung sowohl der Normalkräfte als auch der Reibungskräfte (s.Abb.2.16) dargestellt.

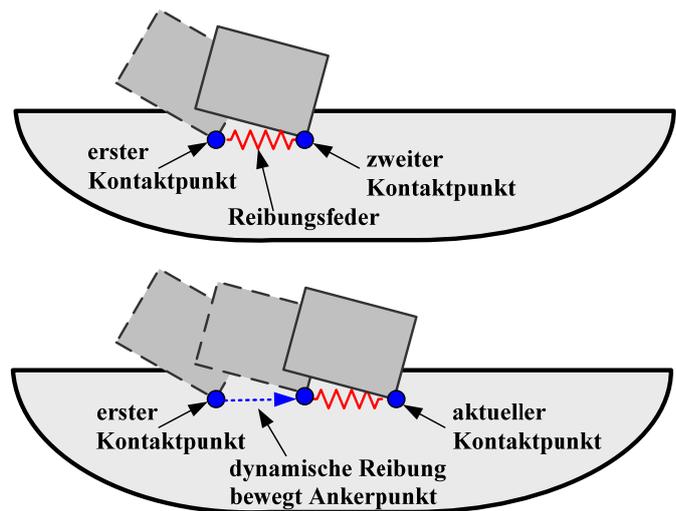


Abb.2.16. Reibungskräfte bei der Penalty Formulierung.

→ In mehreren Zwischenfällen geht man davon aus, dass der physikalische Charakter der mechanischen Bindungen nicht verloren geht und die Kontaktkräfte an der Umgebung die Arbeit verrichten. Allerdings wird der zusätzliche Term, der die zusätzlichen Zwangskräfte ins Spiel bringt, in einem Optimierungsverfahren unter Berücksichtigung der Plausibilität von Ergebnissen berechnet.

$$\mathbf{f}_{CONTACT} = \mathbf{S}(\mathbf{p}) \cdot \mathbf{p} + \lambda \cdot \frac{\partial \mathbf{C}_{ACTIVE}^T}{\partial \mathbf{p}}, \quad \mathbf{C}_{ACTIVE}(\mathbf{p}) \leq 0, \quad (2.43)$$

In dieser Arbeit wird die *kraftbasierte Methode mit Penalty Formulierung* zwecks Modellierung und Simulation verwendet. Die expliziten Kontaktkräfte werden unter Berücksichtigung des Energie- bzw. Impulserhaltungsgesetzes anhand der Gleichung (2.44) berechnet, welche eine sehr robuste Form zur Berechnung der Kontaktkraft ohne einer weiteren Optimierung bildet, in großem Bereich der Integrationszeiten stabil arbeitet und die

oben eingeführten Anforderungen für die Berechnung der Amplitude und der Richtung der Kontaktkraft erfüllt [Enge00]. Die Reibungskraft wird als Coulombsche Reibung betrachtet. Wenn $|f_{TANGENTIAL}| \leq \mu_{FRICTION} \cdot |f_{NORMAL}|$ ist, handelt es sich um die statische Reibung, ansonsten um die dynamische Reibung. Bei statischer Reibung ist die Haftbedingung erfüllt und somit wird die relative Verschiebung von Punkten zueinander als Randbedingung gesperrt ("stick"). Bei dynamischer Reibung wird die Randbedingung aufgebrochen ("slip"). Dabei soll der Ankerpunkt sich so bewegen, damit die Gleichung $|f_{TANGENTIAL}| = \mu_{FRICTION} \cdot |f_{NORMAL}|$ permanent erfüllt wird.

$$f_{CONTACT} = \begin{cases} 0, & p < 0, \\ \left[1 + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon \cdot |v_{COLLISION}|} \cdot \dot{p} \right] \cdot S_{CONTACT} \cdot p, & \end{cases} \quad (2.44)$$

$$f_{FRICTION} = \begin{cases} 0, & p < 0, \\ S_{CONTACT} \cdot l, & p \geq 0 \text{ und } S_{CONTACT} \cdot l \leq \mu_{FRICTION} \cdot f_{CONTACT}, \\ \mu_{FRICTION} \cdot f_{CONTACT}, & p \geq 0 \text{ und } S_{CONTACT} \cdot l > \mu_{FRICTION} \cdot f_{CONTACT}. \end{cases}$$

mit

- $S_{CONTACT}$ – lineare bezogene Steifigkeit im Kontakt,
- $v_{COLLISION}$ – relative Geschwindigkeit von Körpern im Zeitpunkt der Kollision,
- ε – Restitution im Kontakt,
- $\mu_{FRICTION}$ – Coulomb'scher Reibungskoeffizient im Kontakt,
- p – normale Penetration,
- l – tangentialer Abstand zwischen Ankerpunkten in nacheinander folgenden Zeitpunkten.

Bemerkung: Restitution ist keine Materialeigenschaft. Es gibt einige Hypothesen bezüglich der Restitution bei der Kollision von starren Körpern. Bei der einen Hypothese werden Aussagen bezüglich der Geschwindigkeit vor und nach der Kollision gemacht, und zwar: $|v_{NORMAL}^{AFTER_IMPACT}| = \varepsilon \cdot |v_{NORMAL}^{BEFORE_IMPACT}|$. Die andere unterteilt die Kollision in zwei Phasen - Kompression und Dekompression $|p_{NORMAL}^{DECOMPRESSION_PHASE}| = \varepsilon \cdot |p_{NORMAL}^{COMPRESSION_PHASE}|$. Koeffizient ε wird als Restitution genannt und hängt immer von den Kontaktbedingungen ab. Aus diesem Grund sind keine Tabellen von Restitution zu finden.

Die Hauptvorteile der kraftbasierten Methode sind zum einen die Einfachheit und zum anderen die Möglichkeit, sowohl die steifen als auch die weichen Kontakte zu modellieren. Diese Methode ist besonders zu empfehlen, wenn mehrere Kontakte gleichzeitig vorhanden sind.

Der Nachteil der kraftbasierten Methode ist, dass die Integrationszeiten in der Kontaktphase relativ klein eingehalten werden, um die schnell ändernden Kontaktkräfte und -drehmomente korrekt zu bearbeiten. Und ähnlich der impulsbasierten Methode gibt es die Notwendigkeit, die physikalisch plausiblen Materialparameter im Kontakt zu wählen (Steifigkeit, Dämpfung, Restitution).

2.4.4 Update der Systemdynamik

Update der Systemdynamik bei impulsbasierter Methode hängt von der unterliegenden Methode ab und erfolgt nach zwei folgenden Arten: *Propagation* und *Simultaneous Update*.

- *Propagation Modell* besagt, dass der Impuls nur für einen Kontakt pro Zeitpunkt berechnet und angewandt wird. Die Kollisionsereignisse werden hierbei einzeln behandelt.
- *Simultaneous Modell* besagt, dass die Impulse für alle Kontakte gleichzeitig berechnet und angewandt werden. Die Kollisionsereignisse werden hierbei nach einem Integrationsschritt zusammen behandelt.

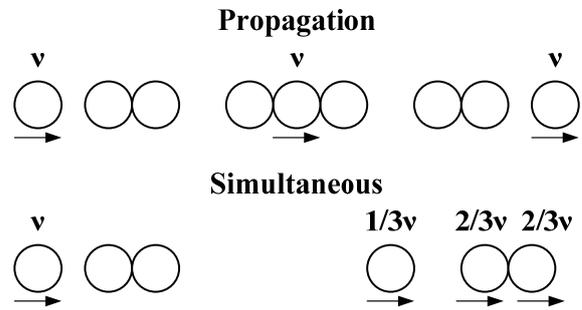


Abb.2.17. „Propagation“ vs. „Simultaneous“ Update der Systemdynamik .

Diese zwei Modelle sind für Kontaktsituationen mit einem Kontaktpunkt gleich, liefern allerdings verschiedene Ergebnisse für Kontaktsituationen mit mehreren Kontaktpunkten. Abb.2.17 zeigt die Ergebnisse für Simulation von drei gleich schweren Billardkugeln ohne Verlust kinetischer Energie.

Das Update der Systemdynamik bei kraftbasierter Methode findet in jedem Integrationsschritt abhängig von den wirkenden Kontaktkräften statt. Oft wird die Berechnung der Kontaktkräfte einem Optimierungsalgorithmus unterliegen. Dabei wird angestrebt, die Funktion

$$function(\mathbf{f}_{CONTACT}) = \sum_{i=1}^N f_{iCONTACT} \quad (2.45)$$

unter den Kontaktbedingungen

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{f}_{CONTACT} \geq \mathbf{B} \quad \text{und} \quad \mathbf{f}_{CONTACT} \geq 0 \quad (2.46)$$

zu minimieren. Diese klassische Optimierungsaufgabe aus dem Bereich der linearen Programmierung wird als lineares Komplementaritätsproblem (LCP, engl. Linear Complementarity Problem) bezeichnet und anhand verschiedener Algorithmen, wie *Lemke's Algorithmus* oder *Unique Sink Orientations* gelöst. Falls diese Optimierungsaufgabe in einem Mehrkörpersimulator zu lösen ist, werden zwischen zwei Integrationsschritten die entsprechenden Optimierungsmethoden mehrmals aufgerufen (s.Abb.2.11).

2.5 Experimenteller Aufbau einer Mehrkörpersimulationsumgebung mit der Fähigkeit zur Kontaktbehandlung

Aufbauend auf den Spezifikationen vom Kapitel 2.4 wurde ein Konzept zum Aufbau eines domäneübergreifenden kontaktbehandlungsfähigen Entwicklungs- und Simulationssystems bzw. wurde ein echtzeitfähiger Datenaustausch zwischen den beteiligten Komponenten entwickelt. Die Abb.2.18 präsentiert die ausgesonderten Schnittstellen des vorgeschlagenen Simulationssystems anhand des Entwicklungs- und Simulationssystems Matlab/Simulink

bzw. Modelica/Dymola in Kombination mit den Softwarepaketen zur Kollisionsdetektierung wie Solid, Bullet, Swift++.

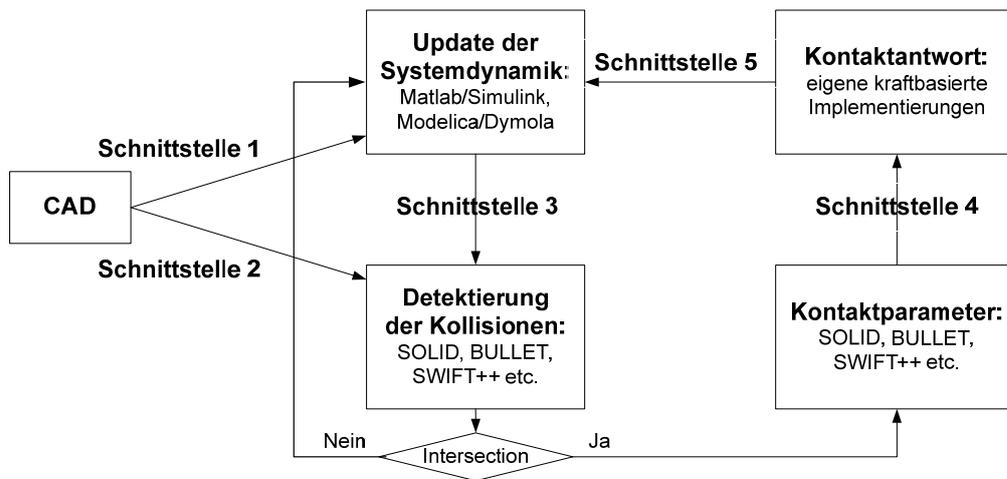


Abb.2.18. Schnittstellen einer Entwicklungs- und Simulationssysteme.

Schnittstelle 1 behandelt den einmaligen Transfer von kinematischen und dynamischen Daten von CAD zum Mehrkörpersimulator, wie die Struktur des Mehrkörpersystems, Platzierung und Freiheitsgrade der Gelenke, rotatorische und translatorische Trägheiten der Einzelkörpern, kontaktrelevante Eigenschaften von beteiligten Materialpaaren etc.

Schnittstelle 2 behandelt den einmaligen Transfer von CAD zu Kollisionsdetektierung der geometrischen Einzelkörperdaten in Form von Punkwolken bzw. geometrischen Primitiven.

Schnittstelle 3 behandelt den zyklischen Transfer vom Mehrkörpersimulator zur Kollisionsdetektierung der Positionen und Orientierungen von Einzelkörpern.

Schnittstelle 4 behandelt den zyklischen Transfer von Kollisionsdetektierung zur Kontaktantwort der logischen bzw. kontinuierlichen Daten über die Kontaktgeometrie, wie Kontaktereignis, Kontaktstelle, Kontakttrichtung, Kontaktfläche, Kontaktvolumen, Anstoßgeschwindigkeit, Penetrationstiefe, Penetrationsgeschwindigkeit etc.

Schnittstelle 5a (bei einer kraftbasierten Kontaktantwort) behandelt den zyklischen Transfer der kontinuierlichen Kräfte und Drehmomente von der Kontaktantwort zum Mehrkörpersimulator. Die Kräfte und Drehmomente entstehen durch die Einzelkörperkontakte und wirken auf den kontaktierenden Körper zusätzlich zu den weiteren physikalischen Kräften und Drehmomenten.

Schnittstelle 5b (bei einer impulsbasierten Kontaktantwort) behandelt den ereignisbasierten Transfer von der Kontaktantwort zum Mehrkörpersimulator der neu berechneten Einzelkörperimpulse, falls das Kontaktereignis detektiert wurde.

Experimentelle Umsetzung des Konzeptes wurde laut Schema in Abb.2.18 durchgeführt. Der Teil zum Update der Systemdynamik wurde vom domäneübergreifenden Entwicklungs- und Simulationssystem „Matlab/Simulink“ übernommen. Die Teile zur Detektierung der Kollisionen und zur Berechnung der Kontaktparameter wurden vom Softwarepaket „Solid“ übernommen. Der fehlende Teil zur Berechnung der Kontaktantwort (inklusive Normalkräfte, Tangentialkräfte, und Reibungseffekte) wurde selbst anhand der im Kapitel 2.4 dargestellten kraftbasierten Methoden entwickelt.

Die erarbeitende kontaktbehandlungsfähige Umgebung wird zur Modellierung und Simulation der Kontaktaufgaben für den konventionellen industriellen Manipulationsroboter „Mitsubishi RVE3J“ (s.Abb.2.19) und für den mobilen Laborschreitroboter „Slair2“ (s.Abb.2.20) verwendet.

Analytischer Vergleich der erarbeitenden Umgebung mit etablierten kontaktbehandlungsfähigen Softwarepaketen ODE (frei) und Vortex (kommerziell) hat folgende Ergebnisse gezeigt. Das genannte Paket arbeitet wegen der Verwendung eines Integrationsverfahrens erster Ordnung sehr schnell. Allerdings waren die Entwickler der genannten Pakete dazu gezwungen, eine zusätzliche Optimierungsschleife hinzuzufügen, um die Berechnung komplexer kontaktbehafteter Systeme robust auszuliegen. Nach der Optimierung des Verhältnisses zwischen der Rechengeschwindigkeit und -robustheit wurde die Zahl der Optimierungsschritte innerhalb eines Integrationsschrittes auf fünfunddreißig begrenzt. Aus diesen Gründen werden die komplexen kontaktbehafteten Systeme sehr schnell, robust und realitätsnah berechnet. Allerdings werden die einzelnen Kontaktkräfte aus gleichen Gründen nicht exakt berechnet, wodurch die simulativen Untersuchungen der Kontaktaufgaben insbesondere der Reglerqualität wesentlich erschwert werden.

Die erarbeitende kontaktbehandlungsfähige Umgebung ist frei von genannten Nachteilen, sie kann die Integrationsverfahren höherer Ordnungen verwenden, kann durch die im Kapitel 2.4 beschriebene Auslegung des Teiles zur Berechnung der Kontaktantwort als exakt genug bezeichnet werden, erscheint unter der Berücksichtigung von Energieerhaltungs- bzw. Impulserhaltungsgesetz robust und realitätsnah und ist wegen des Ausfalls der Optimierungsschleife vergleichsweise schnell.

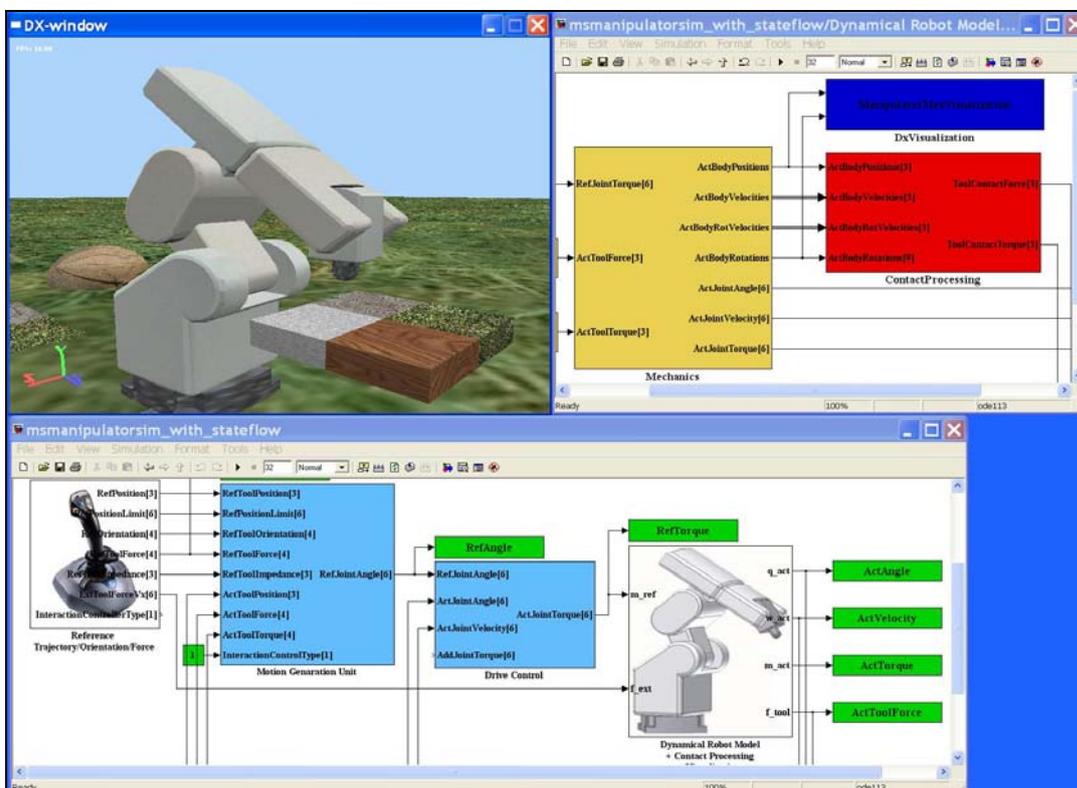


Abb.2.19. Ein domäneübergreifendes Entwicklungs- und Simulationssystem mit der Fähigkeit zur Kontaktbehandlung für den industriellen Manipulationsroboter „Mitsubishi RVE3J“.

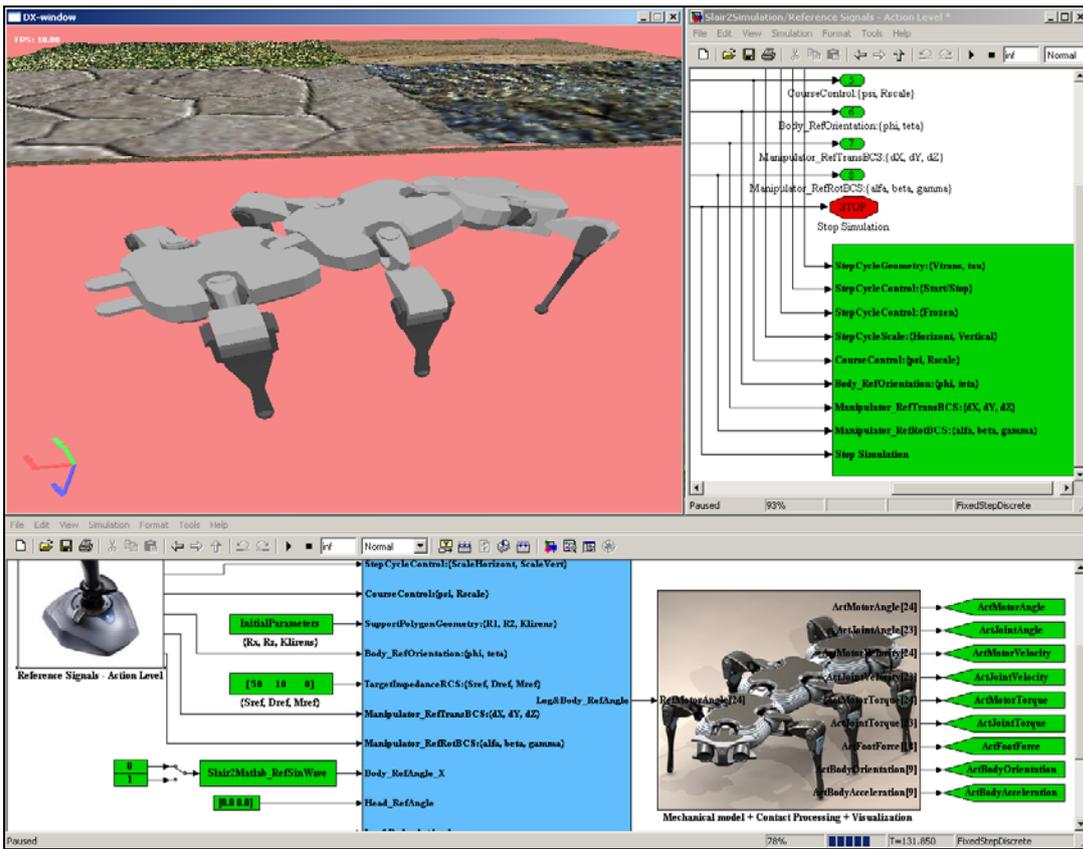


Abb.2.20. Ein domäneübergreifendes Entwicklungs- und Simulationssystem mit der Fähigkeit zur Kontaktbehandlung für mobilen Laborschreitroboter „Slair2“.

Kapitel 3

Basisoperationen zur Lösung der Kontaktaufgaben

Dieses Kapitel gibt den Überblick über die einzelnen Basisoperationen, die zum Aufbau einer komplexen Kontaktaufgabe gebraucht werden, beschreibt die damit verbundenen Probleme und erarbeiteten Lösungen, und stellt den theoretischen Hintergrund der relevanten adaptiven Regelungsalgorithmen dar.

Die Planung und Kontrolle sind zwei unentbehrliche Bestandteile einer erfolgreichen Durchführung der Kontaktaufgabe. Die Planung beinhaltet nicht nur die Referenzbahn (Lage, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Orientierung) des Roboters, sondern auch Kraftvektoren und Nachgiebigkeitsvektoren, die einzustellen bzw. einzuhalten sind. Der Kraftvektor beinhaltet die Amplitude und die Richtung der einzustellenden Kontaktkraft. Der Nachgiebigkeitsvektor beinhaltet hingegen die einzuhaltende Impedanz des Endeffektors des Roboters in die entsprechende Bewegungsrichtung.

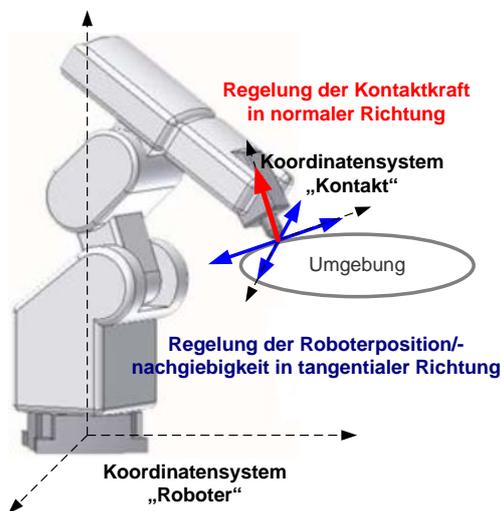


Abb.3.1. Koordinatensystem „des gewünschten Kontaktes“ und Dekomposition des Kontaktraums.

gewünschten Kontaktes“ transformiert, so erfolgt Dekomposition des Kontaktraums automatisch. In weiteren regelungsbezogenen Abschnitten dieses Kapitels wird davon ausgegangen, dass die entsprechenden Schritte der Kontaktraumdekomposition bereits durchgegangen worden sind. Deswegen wird die Regelungen der Kontaktkraft und der

Ist der gewünschte Kraftvektor bzw. Nachgiebigkeitsvektor zu einem Zeitpunkt im Koordinatensystem des Roboters bzw. des Endeffektors ausgelegt, kann er unabhängig vom Bewegungsvektor geregelt werden. In vielen Kontaktaufgaben, insbesondere bei hybriden Kontaktkraft-/Nachgiebigkeitsregelungen ist es allerdings wesentlich bequemer die beiden Vektoren in einem neuen Koordinatensystem „des gewünschten Kontaktes“ (s.Abb.3.1) darzustellen.

Dieses Koordinatensystem ist auf dem Arbeitspunkt des Endeffektors platziert und orientiert sich entsprechend der vorgegebenen Vektoren der gewünschten Kontaktkraft bzw. der Nachgiebigkeit. Werden die vorgegebenen und gemessenen Werte ins Koordinatensystem „des

Nachgiebigkeit ausschließlich für den eindimensionalen Fall im Koordinatensystem „des gewünschten Kontaktes“ repräsentiert.

Der Kontakt schränkt die Bewegung des Robotersystems ein und generiert die Kontaktkräfte. Während der Durchführung der Kontaktaufgabe werden die Unbestimmtheiten und Zeitvarianz im Modell des Kontaktes erwartet. Sie wirken sich in die *geometrische* (Änderungen in lokaler Geometrie des Kontaktes) und *topologische* (Änderungen in der Art oder in der Zahl des Kontaktes) Form aus. Das Kontaktmodell liefert die nützlichen Informationen zur Durchführung der Kontaktaufgabe und soll ständig anhand der Sensordaten aktualisiert werden. Die wichtigste Rolle spielt dabei die Feststellung der *Kontakt ereignisse* sowie die Ermittlung der *Kontakt geometrie*, *Kontakt topologie* und *Kontakt mechanik*.

Die drei folgenden Anforderungen sollten zur kompletten Beschreibung der Kontaktaufgabe erfüllt werden [DeSc96]:

- **geometrische Kompatibilität:** die Bewegungseinschränkungen werden im Aufgabenframe durch sechs translatorische und rotatorische Achsen im orthogonalen Koordinatensystem vollständig modelliert.
- **kausale Kompatibilität:** Die Aufgabenspezifizierung im Aufgabenframe (Bewegungsvektor, Kraftvektor, Nachgiebigkeitsvektor) ist mit dem Aufgabenframe des Modells kompatibel.
- **Zeitinvarianz:** Soweit die restlichen Anforderungen erfüllt sind, bewegt sich das Aufgabenframe als virtueller starrer Körper.

Die dargestellten Erkenntnisse lassen sich in eine Reihe von Basisoperationen zerlegen, deren Kombination zur erfolgreichen Durchführung der komplexen Kontaktaufgaben angewandt wird. Dazu gehören *Dekomposition des Kontaktraums*, *Feststellung der Kontakt ereignisse*, *Ermittlung der Kontakt geometrie*, *Kontakt topologie und Kontakt mechanik*, *Identifikation der Regelstrecke*, *eindimensionale Regelung der Roboternachgiebigkeit* und *eindimensionale Regelung der Kontaktkraft*. Des Weiteren werden die genannten Basisoperationen ausführlich dargestellt.

Infolge der Nichtlinearitäten im Robotersystem (Elastizität in Gliedern und Gelenken, Begrenzungen im Stellglied, Spiel, trockene und viskose Reibung in Gelenken, variierbare geometrische Konfiguration) sowie in der Umgebung (variierbare mechanische und geometrische Eigenschaften des Kontaktes, variable Last) sollten die Regelungsalgorithmen anpassungsfähig ausgelegt werden. Deswegen wird im Unterkapitel 3.4 die relevante Theorie der adaptiven Regelungssysteme gegeben und erst anschließend die darauf basierten Einsätze zur Regelung der Roboternachgiebigkeit im Unterkapitel 3.5 und der Kontaktkraft im Unterkapitel 3.6.

3.1 Kontaktraumdarstellung

Ein unentbehrlicher Teil der Prozessplanung ist die Gestaltung des gewünschten Kontaktraums, d.h. Lage, Orientierung und Parameter der gewünschten Kontaktkraft bzw. der Roboternachgiebigkeit, was gleichzeitig die Definition des Koordinatensystems „des gewünschten Kontaktes“ bedeutet. Offensichtlich hängt der gewünschte Kontaktraum vom aktuellen Kontaktraum ab, den entsprechend zu beschreiben ist.

Zwecks der einfachen Durchführung der Kontaktaufgaben ist es vom Nutzen, die Umgebungsgeometrie in Form der unabhängigen Koordinaten darzustellen und in Teilräume der zulässigen Bewegung und Kraft zu zerlegen. Mit der Definition eines orthogonalen *Einschränkungsraums* (*Constraints-Raum* oder *C-Raum*) zwischen dem Endeffektor des Roboters und der Umgebung [Paul72] lässt sich die Roboterbewegung in 6 Freiheitsgrade (3 translatorische und 3 rotatorische) einteilen. Die Lage und Orientierung des C-Raums kann sich während der Kontaktaufgabe ändern. Damit an jeder Stelle eine eindeutige Definition der Freiheitsgrade gewährleistet ist, muss neben der Bahnkurve des Endeffektors auch die Bahnkurve des C-Raums angegeben werden. Man unterscheidet vier verschiedene Positionen eines C-Raumes:

- Der C-Raum liegt im Basiskoordinatensystem fest;
- Der C-Raum bewegt sich im Koordinatensystem des Endeffektors;
- Der C-Raum bewegt sich im Koordinatensystem des Werkstücks;
- Der C-Raum verläuft völlig frei im Raum.

Anhand einiger Beispiele werden diese Möglichkeiten der Bewegung des C- Raums näher erläutert.

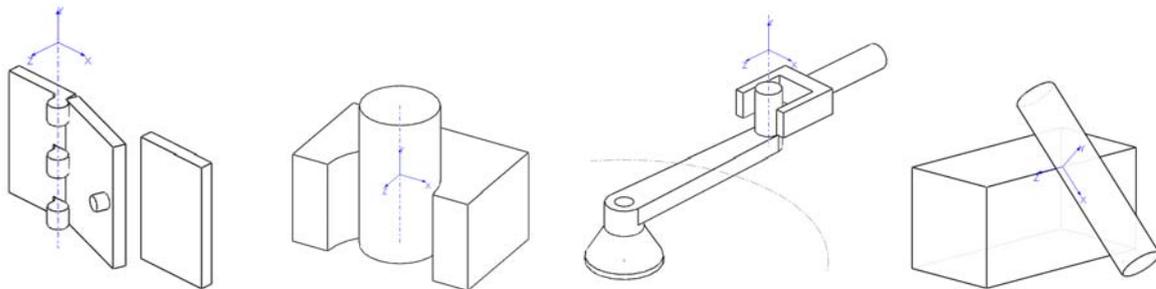


Abb.3.2. a) C-Raum beim Türschließen, b) C-Raum bei der Montage, c) C-Raum beim Kurbeldrehen, d) C-Raum bei Kontaktkante.

→Das Schließen einer Tür (s.Abb.3.2a) ist ein Beispiel für einen in der Umgebung festliegenden C-Raum. Der Ursprung wird üblicherweise in den Drehpunkt der Tür gelegt, so dass die Drehung um die z-Achse in diesem Fall lagegeregelt wird, in allen anderen Richtungen werden die Kräfte geregelt [Maso83].

→Für den einfachen Montagevorgang, bei dem beispielsweise ein Bolzen in eine Bohrung positioniert wird, bewegt sich der C-Raum im Koordinatensystem des Objektes/Endeffektors (s.Abb.3.2b). Entlang der z- Richtung des Endeffektors wird die Lage geregelt, während in x- und y-Richtung sowie in den 3 rotatorischen Achsen die Kraft geregelt wird [Maso83].

→Der C-Raum bei der Montageaufgabe, bei der z.B. eine Kurbel gedreht wird (s.Abb.3.2c), dreht sich der C-Raum mit der Kurbelbewegung [Maso83]. Die z-Achse ist entlang des Kurbelgriffes gerichtet und die x-Achse weist auf den Drehpunkt hin. Die Drehung um die z-Achse und die Bewegung entlang der y-Achse im Koordinatensystem der Kurbel werden lagegeregelt, während die übrigen Achsen kraftgeregelt werden.

→Beim Kontakt eines Gegenstandes mit der Umgebung liegt der C-Raum immer im Kontaktpunkt (s.Abb.3.2d). In diesem Fall wird ausschließlich die Bewegung in z-Richtung kraftgeregelt. Wird der Stab um die x-Achse gedreht, so bleibt die Lage vom C-Raum relativ zum Stab konstant. Bei der Bewegung des Stabes entlang der y-Achse bleibt das Koordinatensystem vom C-Raum ortsfest. Generell kann daher keine feste Lage vom C-Raum angegeben werden.

Die genannten Beispiele sollten verdeutlichen, dass die Bahnkurven für den Endeffektor und für den C-Raum meist unabhängig voneinander definiert werden müssen. In den ersten beiden

Fällen kann die Bahnkurve für den C-Raum relativ einfach vorgegeben werden, zur Bearbeitung anspruchsvollerer Aufgaben, die durch die beiden letzteren Fälle charakterisiert werden, kann diese Definition jedoch schwieriger werden [Maso83]. Es wird ein mathematisches Modell der Kontaktaufgabe benötigt, das anhand der berechneten theoretischen Bahnkurve des Endeffektors die Sollgrößen für die generalisierte Position P_{REF} und die auszuübende generalisierte Kraft F_{REF} in 6 Richtungen des orthogonalen ortsfesten Koordinatensystems des Roboters liefert. Die zeitlich aufeinander folgenden Sollpositionen des Endeffektors bilden den theoretischen C-Raum.

Als Beispiel wird ein einfacher Montagevorgang (s.Abb.3.2b) betrachtet. Im Lagerraum ist eine Bewegung in Y-Richtung möglich, im Orientierungsraum ist eine Drehung um die Y-Achse möglich. Das kartesische Produkt dieser beiden Geraden ergibt den theoretischen C-Raum, in dem die Bewegung erlaubt ist. Ist diese Fläche 6-dimensional, so ist die Bewegung in jede Richtung möglich. Ist der Endeffektor im Kontakt mit der Umgebung, wird die Bewegung durch die Geometrie und Mechanik der Körper in einigen Richtungen eingeschränkt. Der theoretische C-Raum ist folglich auf der C-Fläche (s.Abb.3.3) mit $n < 6$ neu definiert. Die theoretische Geschwindigkeit des Endeffektors muss in diesem Fall in einer zur C-Fläche tangentialen Richtung liegen, während die auf die Umgebung auszuübenden Kräfte im reibungsfreien Fall nur in einer zur C-Fläche orthogonalen Richtung auftreten können.

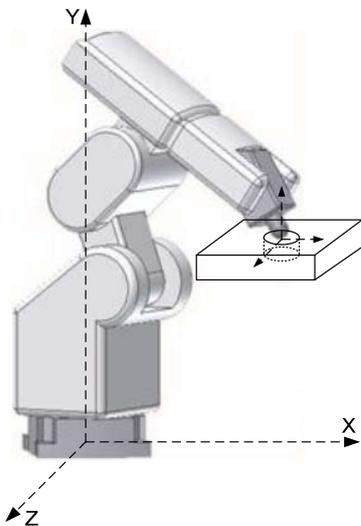


Abb.3.3. Darstellung der C-Fläche.

Für das dargestellte Montagebeispiel ergeben sich die natürlichen Einschränkungen für die Lage des Endeffektors zu $Position(X,Z)=0$ und für die Kraft des Endeffektors zu $Kraft(Y)=0$. Die künstlichen Einschränkungen werden

in Richtungen definiert, die orthogonal zu den natürlichen Beschränkungen sind. Diese sind die Richtungen in die Kräfte bzw. Bewegungen auftreten können, aber nicht müssen. Eine Kraft lässt sich zwar in eine bestimmte Richtung übertragen, sollte jedoch aufgrund der Aufgabe Null sein. Die künstlichen Beschränkungen definieren somit die Ausführung der Bahnkurve.

Zur Dekomposition der Roboterposition bzw. des Geschwindigkeitsvektors in Teilmengen der abhängigen (gebundenen) und unabhängigen Variablen existieren Algorithmen, wie z.B. *LU Faktorisierung*, *singuläre Wertdekomposition* oder *Gram-Schmidt Orthogonalisierung der Jacobian von Kontaktmatrix* [Lian87]. Die entstehenden dynamischen Modelle sind kompliziert und die Berechnung wird mit mehreren Schwierigkeiten verbunden. Allerdings ist die Modellparametrierung in mehreren Fällen des Kontaktes offensichtlich.

3.2 Ermittlung der Kontaktinformation

Die mechanische Interaktion mit der Umgebung schränkt die Bewegungsfreiheitsgrade des Robotersystems und erzeugt Kontaktkräfte. Der entstehende Kontakt kennzeichnet sich durch die meistens unbekannte und mit der Zeit variierende Parameter, die Kontaktgeometrie

(Kontaktposition, Kontaktrichtung, Freiheitsgrade im Kontakt), Kontakttopologie (Anzahl der Kontaktpunkten, Kontaktart) und Kontaktmechanik (Materialelastizität/-restitution etc) beschreiben. Für die erfolgreiche Durchführung der Kontaktaufgaben soll das Steuerungssystem des Roboters in der Lage sein, anhand der Sensordaten die **Kontaktereignisse** festzustellen und die **Kontaktgeometrie**, **Kontakttopologie** und **Kontaktmechanik** zu ermitteln.

Bemerkung: Die Ermittlung der Kontaktgeometrie anhand der gemessenen Sensordaten wird in der Fachliteratur als „*Kontaktidentifikation*“ bezeichnet. Die Gültigkeitsüberprüfung der Kontakttopologie anhand der gemessenen Sensordaten wird in der Fachliteratur als „*Kontaktmonitoring*“ bezeichnet.

Zur Kontaktidentifikation und Kontaktmonitoring existieren mehrere Verfahren verschiedener Komplexität, die sich nach Anwendung der gemessenen bzw. bezogenen Signale unterscheiden.

- [Kontaktposition/-richtung] = Funktion (von gemessenen Roboterposition \mathbf{q}_{ROBOT} und Kontaktkraft $\mathbf{f}_{CONTACT}$): die am meisten verwendete Methode beschränkt die Kontaktidentifikation auf die Ermittlung der Kontaktlage und der Kontaktorientierung anhand der gemessenen Kontaktkraft [DeSh96].
- [Kontaktposition/-richtung/-topologie] = Funktion (von gemessenen Robotergeschwindigkeit $\dot{\mathbf{q}}_{ROBOT}$, Kontaktkraft $\mathbf{f}_{CONTACT}$): [Bruy96] verwendet gemessene Robotergeschwindigkeit und Kontaktkraft zur Ableitung der Gleichung für jede mögliche Kontaktsituation, die auf den physikalischen Konzepten der Reziprozität (reciprocity) und der Folgerichtigkeit (consistency) beruhen. {Folgerichtigkeit fordert die Kompatibilität der modellierten Roboterbewegung $\mathbf{q}_{ROBOT}^{MODEL}$ und der Kontaktkraft $\mathbf{f}_{CONTACT}^{MODEL}$ mit den Messungen \mathbf{q}_{ROBOT} und $\mathbf{f}_{CONTACT}$ }. {Reziprozität fordert, dass die gemessene Robotergeschwindigkeit $\dot{\mathbf{q}}_{ROBOT}$ keine Kraft gegen die modellierte Kontaktkraft $\mathbf{f}_{CONTACT}^{MODEL}$ erzeugt und die gemessene Kontaktkraft $\mathbf{f}_{CONTACT}$ keine Kraft gegen der modellierten Freiheitsgrade des Endeffektors erzeugt}. Allerdings resultiert diese Methode in eine Sammlung von Identifikationsgleichungen mit variierbaren physikalischen Dimensionen.
- [Kontaktposition/-richtung/-topologie] = Funktion (von gemessener Roboterenergie \mathbf{E}_{ROBOT}); [Roboterenergie] = Funktion (von gemessenen Robotergeschwindigkeit $\dot{\mathbf{q}}_{ROBOT}$ und Kontaktkraft $\mathbf{f}_{CONTACT}$): um das Problem der Dimensionsänderung umzugehen, verwendet man [Bruy96] eine besondere Methode zur Beobachtung und Analyse der bezogenen Roboterenergie.

Bemerkung: Alle Methoden der Kontaktmonitoring beruhen auf die Detektierung plötzlicher Änderungen („Sprünge“) im ermittelten und meist verrauschten Signal der Kontaktkraft, der Roboterenergie usw. Zur Detektierung und Lokalisierung dieser starken Signalsprünge werden Methoden wie x2-Test, Student-Test, Maximum-Likelihood-Test verwendet.

Im Nachfolgenden werden Methoden zur Detektierung der Kontaktereignisse und zur Ermittlung der Kontaktgeometrie bzw. Kontaktmechanik diskutiert. Die Ermittlung der Kontakttopologie ist erst auf der Planungsebene relevant und wird deshalb im nachfolgenden Teil der Arbeit nicht näher beleuchtet. Für Interessierende wird allerdings folgende Quelle [Meeu06] empfohlen.

3.2.1 Detektierung der Kontaktereignisse

Die einfachste aber dennoch aussagekräftige Methode zur Detektierung des Kontaktereignisses beruht auf der Information über die gemessene Kontaktkraft und trifft die Entscheidung über das Kontaktereignis, wenn die Amplitude der Kontaktkraft/-drehmoment in die untersuchte Richtung einen gewissen Pegel überschreitet. Um die Schwankungen im Detektierungsverfahren auszuschließen, wird die ermittelte Information oft zusätzlich gefiltert. In dieser Arbeit findet der Medianfilter mit einer minimalen Pufferlänge seinen Einsatz. Dies eliminiert die nicht plausiblen Signalschwankungen bei minimaler Zeitverzögerung. Die Anwendung des auf der Statistik basierten Filters, wie beispielsweise Kalman Filter ist nicht zweckgebunden, da diese einen gewissen Zeitintervall zur Ermittlung der Signalstatistik verbrauchen.

3.2.2 Ermittlung der Kontaktgeometrie

In einer unbekanntem Umgebung sollten die Freiheitsgrade im Kontaktraum sowie auch die Richtung des Kontaktes determiniert werden. Die Information über die Normale und die Tangente zur Kontaktfläche ist meistens die ausreichende Bedingung für die erfolgreiche Steuerung der Kontaktaufgabe. In der apriori bekannten und nicht beweglichen Umgebung wird die Information über die Normale und Tangente zur Kontaktfläche aufgrund der Kontaktlage ermittelt. In der apriori unbekanntem oder beweglichen Umgebung wird diese Information aufgrund der gemessenen Kontaktkraft und der Roboterkonfiguration berechnet.

Der formelmäßige Zusammenhang für die Berechnung der normalen und tangentialen Richtungen des Kontaktes hängt vom Koordinatensystem des Endeffektors. Ist der Endeffektor beispielsweise entlang der y-Achse im Roboterkoordinatensystem ausgerichtet, werden die normalen und tangentialen Einheitsvektoren im Roboterkoordinatensystem nach folgenden Formeln berechnet:

$$\mathbf{n}_{CONTACT} = \begin{bmatrix} \frac{f_{CONTACT_X}}{|f_{CONTACT}|} \\ \frac{f_{CONTACT_Y}}{|f_{CONTACT}|} \\ \frac{f_{CONTACT_Z}}{|f_{CONTACT}|} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\tau}_{CONTACT} = \begin{bmatrix} \frac{f_{CONTACT_Y}}{|f_{CONTACT}|} \cdot \frac{f_{CONTACT_X}}{|f_{CONTACT_XZ}|} \\ \frac{|f_{CONTACT_XZ}|}{|f_{CONTACT}|} \\ \frac{f_{CONTACT_Y}}{|f_{CONTACT}|} \cdot \frac{f_{CONTACT_Z}}{|f_{CONTACT_XZ}|} \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

$$\text{mit } \begin{cases} |f_{CONTACT}| = \sqrt{f_{CONTACT_X}^2 + f_{CONTACT_Y}^2 + f_{CONTACT_Z}^2}, \\ |f_{CONTACT_XZ}| = \sqrt{f_{CONTACT_X}^2 + f_{CONTACT_Z}^2}. \end{cases}$$

3.2.3 Ermittlung der Kontaktmechanik

Die Auswahl des Umgebungsmodells im Kontakt spielt eine entscheidende Rolle beim Entwurf des Kontaktreglers. Einerseits sollte das Modell physikalisch korrekt sein, um die

wichtigsten Phänomene des Kontaktes darzustellen. Andererseits sollte das Modell möglichst einfach sein, um die Identifikation der mechanischen Kontaktparameter im Echtzeitbetrieb zu ermöglichen. Demzufolge werden die Umgebungsmodelle anhand der Gleichungen aus dem Kapitel 2 in Betracht gezogen, die zur Berechnung der Kontaktkraft $\mathbf{f}_{CONTACT}$ die Zusammenhänge zwischen dieser und der Penetrationstiefe/-geschwindigkeit $\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}$ im Fall des nicht absolut starren Kontaktes beschreiben.

Direktes Modell der Kontaktdynamik. Das meist bekannte einfache, dennoch aussagekräftige Umgebungsmodell im Kontakt wird in Form eines linearen Feder-Dämpfer Modells dargestellt. Im Laplace-Bereich wird die Transferfunktion der Umgebungsnachgiebigkeit wie folgt definiert:

$$\mathbf{Z}_{ENV}(s) = \frac{\mathbf{f}_{CONTACT}(s)}{\mathbf{p}} = \frac{\mathbf{S}_{ENV} \cdot \mathbf{p} + \mathbf{D}_{ENV} \cdot \dot{\mathbf{p}}}{\mathbf{p}} = \mathbf{S}_{ENV} + \mathbf{D}_{ENV} \cdot s, \text{ wobei } \mathbf{p} \geq 0 \quad (3.2)$$

Zu Zwecken der Transformation des entwickelten Umgebungsmodells aus dem Laplace-Bereich ins Z-Bereich wird einer der folgenden Verfahren verwendet: „Forward Euler“, „Backward Euler“, „Impulse-invariant discretization“, „Tustin Bilinear Approximation“, „Tustin Approximation with Frequency Prewarping“ usw. Bei der Anwendung der Euler Rückwärtsapproximation $s = \frac{1-z^{-1}}{T_{SAMPLE}}$ bekommt man das einfachste Kontaktmodell im Z-Bereich:

Bereich:

$$\mathbf{Z}_{ENV}(z) = \mathbf{S}_{ENV} + \mathbf{D}_{ENV} \cdot \left(\frac{1-z^{-1}}{T_{SAMPLE}} \right) = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 z^{-1}, \quad (3.3)$$

mit

$$\mathbf{b}_0 = \mathbf{S}_{ENV} + \frac{\mathbf{D}_{ENV}}{T_{SAMPLE}}, \quad \mathbf{b}_1 = -\frac{\mathbf{D}_{ENV}}{T_{SAMPLE}}.$$

In weiteren Schritten dieses Kapitels wird das Problem der Identifikation näher betrachtet. Generell erlaubt dieses Modell die Steifigkeit \mathbf{S}_{ENV} und Dämpfung \mathbf{D}_{ENV} sowohl offline als auch online oder nach Verfahren des bewegten Fensters zu ermittelt. Wird ein lineares oder im Arbeitspunkt linearisiertes Umgebungsmodell angenommen, erfolgt das Identifikationsverfahren im Z-Bereich gemäß der Abb.3.4. Zur Parameteridentifikation werden verschiedene Lernalgorithmen [Jako01, Nauc98, Norg00, Zell00] wie *Pseudoinverse Matrix*, *Wiener-Hopfman Methode*, *Least-Square-Estimation*, *gradientenbasierte Backpropagation* erster und zweiter Ordnung (Momentum-Term, SuperSAB, Quickprop, konjugierte Gradienten, Levenberg-Marquardt, Newton, Quasi-Newton, Newton-Gauß etc), eingesetzt.

Werden die gesuchten Steifigkeit und die Dämpfung in einer expliziten Form gebraucht, erfolgt die Rückwärtsberechnung mit Hilfe des ermittelten Kontaktmodells im Z-Bereich gemäß dem Gleichungssystem:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{CONTACT} = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1, \\ \mathbf{D}_{CONTACT} = -\mathbf{b}_1 \cdot T_{SAMPLE}. \end{cases} \quad (3.4)$$

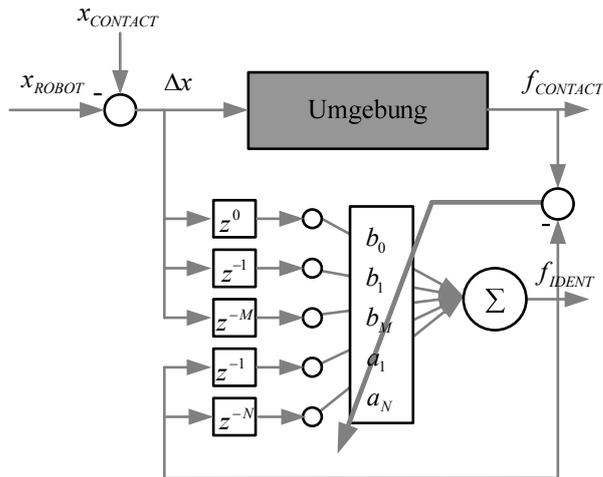


Abb.3.4. Identifikation mechanischer Eigenschaften des Kontaktes.

Indirektes Modell der Kontaktdynamik. Die Ermittlung exakter Werte der Umgebungssteifigkeit/-dämpfung ist oft wegen starker Nichtlinearitäten nicht möglich bzw. wird auch nicht angefordert. Insbesondere im Fall der adaptiven Regelung ist meistens die Klasse der Umgebungsdynamik (steif/mittelsteif/nachgiebig, große/mittlere/kleine Dämpfung etc) vom Interesse. So wird die Umgebungsdynamik beispielsweise in der Arbeit von [Vuko98] in den typischen kennzeichnenden Materialien (Styrofoam, Silikon, Gummi, Plastik, Stahl) unterteilt, weiter mit Hilfe eines KNNs offline angelernt, dann während der Kontaktaufgabe online erkannt und zur Parameterauswahl für einen Lage-/Kraft-/Nachgiebigkeitsregler weitergeleitet (s.Abb.3.5). Die LVQ/COM/Counterpropagation KNN sind bei dieser klassenbildenden Aufgabe einzusetzen.

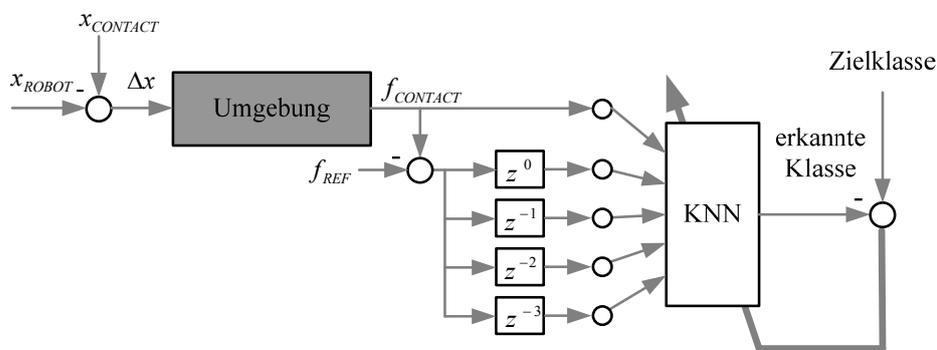


Abb.3.5. KNN-basierte Klassifikation der Kontaktdynamik.

3.3 Identifikation des unterlagerten Regelkreises

Die Information über das Verhalten des geschlossenen Regelkreises der generalisierten Position ist eine notwendige Bedingung zum Aufbau der überlagerten Regelung der Roboternachgiebigkeit bzw. der Kontaktkraft. Es gibt mehrere Methoden zur Identifikation des unterlagerten Regelkreises. Bevorzugt werden die Verfahren, welche die Ergebnisse in einer verständlichen konventionellen Form, wie Übertragungsfunktion oder Zustandsraummodell in einer kanonischen Form liefern. Diese Methoden werden besser im nächsten Unterkapitel beleuchtet. Dabei werden die vorhandenen Probleme diskutiert.

Wird ein geschlossener Positionsregelkreis im Laplace oder Z-Bereich in Form einer Übertragungsfunktion erster Ordnung

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{ACT}(s) = \frac{K_{PLANT}}{(1 + T_{PLANT} \cdot s)} \cdot \mathbf{x}_{REF}(s), \\ \mathbf{x}_{ACT}(z) = \frac{b_0}{1 - a_1 \cdot z^{-1}} \cdot \mathbf{x}_{REF}(z). \end{cases} \quad (3.5)$$

bzw. zweiter Ordnung dargestellt,

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{ACT}(s) = \frac{K_{PLANT}}{(1 + 2 \cdot \xi_{REF} \cdot T_{PLANT} \cdot s + T_{PLANT}^2 \cdot s^2)} \cdot \mathbf{x}_{REF}(s), \\ \mathbf{x}_{ACT}(z) = \frac{b_0}{1 - a_1 \cdot z^{-1} - a_2 \cdot z^{-2}} \cdot \mathbf{x}_{REF}(z). \end{cases} \quad (3.6)$$

so lassen sich die Regelstreckenparameter mit Hilfe einer Standardstruktur, wie beispielsweise einen FIR/IIR Filter mit den oben erwähnten Lernmethoden ermitteln.

Die im Z-Bereich gefundene Übertragungsfunktion erster Ordnung lässt sich leicht und eindeutig ins Laplace-Bereich transformieren.

$$\begin{cases} b_0 = \frac{K_{PLANT} \cdot T_{SAMPLE}}{T_{PLANT} + T_{SAMPLE}} \\ a_1 = \frac{T_{PLANT}}{T_{PLANT} + T_{SAMPLE}} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} K_{PLANT} = \frac{b_0}{1 - a_1} \\ T_{PLANT} = \frac{a_1}{1 - a_1} \cdot T_{SAMPLE} \end{cases} \quad (3.7)$$

Bei der Übertragungsfunktion zweiter oder höherer Ordnung sind hingegen die Zusammenhänge zwischen den Parametern wesentlich komplizierter

$$\begin{cases} b_0 = \frac{K_{PLANT} T_{SAMPLE}^2}{T_{SAMPLE}^2 + 2\xi_{PLANT} T_{PLANT} T_{SAMPLE} + T_{PLANT}^2} \\ a_1 = \frac{-2\xi_{PLANT} T_{PLANT} T_{SAMPLE} - 2T_{PLANT}^2}{T_{SAMPLE}^2 + 2\xi_{PLANT} T_{PLANT} T_{SAMPLE} + T_{PLANT}^2} \\ a_2 = \frac{T_{PLANT}^2}{T_{SAMPLE}^2 + 2\xi_{PLANT} T_{PLANT} T_{SAMPLE} + T_{PLANT}^2} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} K_{PLANT} = f(b_0, a_1, a_2, T_{SAMPLE}) \\ \xi_{PLANT} = f(b_0, a_1, a_2, T_{SAMPLE}) \\ T_{PLANT} = f(b_0, a_1, a_2, T_{SAMPLE}) \end{cases} \quad (3.8)$$

und fordern den Entwurf des überlagerten Regelkreises primär im Z-Bereich.

3.4 Theoretischer Hintergrund der relevanten adaptiven Regelungsalgorithmen

Im Kapitel 1 wurde ein Überblick über die entwickelten adaptiven Regelungsalgorithmen sowie ihre Klassifikation gegeben. Die adaptiven Regelungssysteme werden angewendet, wenn die stationären Regelungssysteme ihre Aufgaben nicht erfüllen. Dies ist der Fall, wenn ungenügend Information über die Regelstrecke vorhanden ist bzw. wenn die Eigenschaften der Regelstrecke während des Betriebes sich stark und unvorhergesehen ändern. Meistens verfolgt die adaptive Regelung das Ziel, die parametrische Ungewissheit bzw. Parameteränderung in der Regelstrecke zu neutralisieren. Allerdings wird die adaptive Regelung, insbesondere bei der Regelung technologischer Verfahren mit mehreren

Regelkreisen auch dazu verwendet, um die Anzahl der einzustellenden Parameter zu minimieren und damit die Zuverlässigkeit des Regelungssystems zu erhöhen. Die Anwendung adaptiver Regelung demzufolge:

- garantiert optimalen Betrieb des Regelungssystems unter Bedingungen von nicht ausreichender apriori Information,
- gewährleistet die Arbeitsfähigkeit des Regelungssystems bei variierenden mechanischen Eigenschaften der Regelstrecke,
- erlaubt die Anwendung von vereinheitlichten Reglern für eine breite Klasse von Regelstrecken,
- reduziert die technologischen Anforderungen zur Fertigung einzelner Elemente und Baugruppen,
- minimiert die Zeiten für die Entwicklung und Inbetriebnahme des Systems.

Des Weiteren werden die relevanten adaptiven Regelungsalgorithmen aus der Klasse von selbstanpassenden Algorithmen (Anpassung der Parameter und Signale bei konstanter Struktur) mit reguläralgorithmischer Ermittlung der Information über die Regelstrecke (formelmäßiger Zusammenhang zwischen ermittelten Regelungssignalen und Regelstreckeparametern) detaillierter betrachtet und ihrer Funktionalität theoretisch untermauert. Die Klassifikation wird anhand der Methoden zur Einstellung des Grundreglers dargestellt: adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell (geschlossener Adaptationsregelkreis) und mit dem Identifikator (geöffneter Adaptationsregelkreis).

Allgemein findet die Entwicklung der beiden adaptiven Regelungsalgorithmen in drei Phasen statt:

- (1) *Synthese des Grundregelkreises*: Festlegung des Algorithmus mit einzustellenden Parametern/Signale zur Berechnung des Steuerungssignals;
- (2) *Synthese des Adaptationsregelkreises*: Festlegung des Algorithmus zur Anpassung der einzustellenden Parametern/Signale;
- (3) *Analyse*: Untersuchung des entworfenen adaptiven Regelungssystems.

Die Methoden zur Durchführung der drei genannten Phasen sind für beide Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell und mit dem Identifikator gleich. Aufgrund dessen werden diese Methoden am Beispiel der Regelungssysteme mit dem Referenzmodell (Unterkapitel 3.4.1) dargestellt. Und am Beispiel der Regelungssysteme mit dem Identifikator (Unterkapitel 3.4.2) werden die dabei spezifischen Methoden zur Identifikation der Regelstrecke erläutert.

Da die adaptiven Regelungssysteme nichtlinear sind, gilt die Methode der Lyapunov Funktionen als die wichtigste Methode zur Untersuchung des entworfenen adaptiven Regelungssystems. Außerdem wird diese Methode in einigen Fällen schon während der Synthese verwendet. Man muss betonen, dass die Funktionsfähigkeit und Konvergenz für viele speziellen Klassen der adaptiven Regelungsalgorithmen mit Hilfe der Lyapunov Funktionen schon bewiesen ist. Dabei werden ausschließlich die vordefinierten Zielfunktionen verwenden und die Eigenschaften der Regelstrecke berücksichtigt. Die gradientenbasierten Algorithmen gehören zu der am meisten bekannten Klasse. Ihre Zielfunktion bildet eine verallgemeinerte Arbeit ab [Kras76].

Bemerkung: zum Zweck der Untersuchungen mit Lyapunov Funktionen sollten die Systemgleichungen in Form der Abweichungen dargestellt werden. Die Beschreibung mit diesen Variablen setzt den Gleichgewichtspunkt in den Ursprung des Koordinatensystems. Andere Darstellungen sollten demzufolge zuerst transformiert werden.

Allgemein für alle adaptiven Regelungsalgorithmen wird die Aufgabe wie folgt dargestellt. Für eine Regelstrecke mit unbekanntem Parametern

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\xi}, t), \\ \mathbf{y} = h(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t). \end{cases} \quad (3.9)$$

sollte einer Zielfunktion (Qualitätskriterium bzw. Regelgüte) entweder in Form einer Ungleichung, wie beispielsweise im Fall der Extremwertregelung

$$q(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\Theta}, t) \leq \Delta \quad (3.10)$$

oder in Form einer Grenzgleichung

$$q(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\Theta}, t) \rightarrow 0 \quad \text{bei } t \rightarrow \infty \quad (3.11)$$

mit

- \mathbf{x} – Zustandsvektor,
- \mathbf{u} – Steuerungsvektor,
- \mathbf{y} – Ausgangsvektor.
- $\boldsymbol{\xi}$ – Vektor der unbekanntem Parametern,
- $\boldsymbol{\Theta}$ – Vektor der einzustellenden Parameter der Regelstrecke.
- q – Qualitätskriterium,

erfüllt werden. Die Zielfunktion in Form der Ungleichung sollte innerhalb eines gewissen Zeitabstandes t_{ADAPT} erfüllt werden. Der kleinste Wert dieses Zeitabstandes für jede $t \geq t_{ADAPT}$ wird als Adaptationszeit bezeichnet.

Je nachdem, welche Variablen während der Adaptation gemessen werden, unterscheidet man adaptive Regelungssysteme mit der Messung des Zustandes oder mit der Messung des Ausgangs:

$$\begin{cases} \mathbf{u} = f_1(\mathbf{x}, \boldsymbol{\Theta}, t) \\ \boldsymbol{\Theta} = f_2(\mathbf{x}, \boldsymbol{\Theta}, t) \end{cases} \quad \text{oder} \quad \begin{cases} \mathbf{u} = f_1(\mathbf{y}, \boldsymbol{\Theta}, t) \\ \boldsymbol{\Theta} = f_2(\mathbf{y}, \boldsymbol{\Theta}, t) \end{cases}. \quad (3.12)$$

Dabei wird die erste Gleichung als Regelungsalgorithmus und die zweite Gleichung als Adaptationsalgorithmus bezeichnet.

Es lässt sich eine Menge von Kriterien zur Klassifikation der adaptiven Regelungssysteme feststellen:

$$\begin{aligned} & \text{suchalgorithmische} \leftrightarrow \text{reguläralgorithmische,} \\ & \text{mit Referenzmodell} \leftrightarrow \text{mit Identifikator,} \\ & \text{heuristische} \leftrightarrow \text{theoretische,} \\ & \text{genaue} \leftrightarrow \text{annähernde,} \\ & \text{Invarianzregelung} \leftrightarrow \text{modale Regelung} \leftrightarrow \text{optimale Regelung,} \\ & \text{Messung des Zustandes} \leftrightarrow \text{Messung des Ausgangs,} \\ & \text{Anpassung der Parametern} \leftrightarrow \text{Anpassung der Signale.} \end{aligned}$$

Demzufolge wird eine Menge von Entwurfsmethoden hervorgerufen. Um die relevante Methoden auszusortieren, werden in der Abb.3.6 zunächst ohne entsprechende Begründung die im nächsten Kapitelteil ausgewählten Strukturen zur adaptiven Regelung der Roboternachgiebigkeit und der Kontaktkraft schematisch dargestellt.

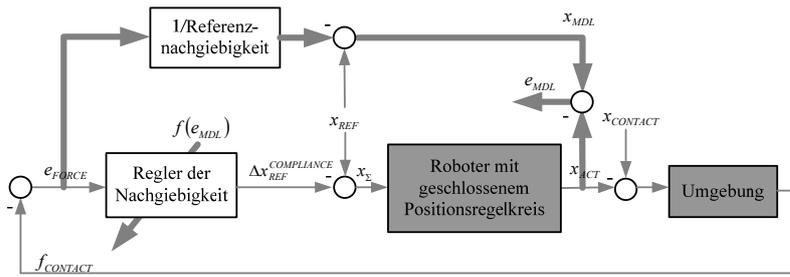


Abb.3.6.(a) Adaptive Nachgiebigkeitsregelung des „Roboter“ Systems mit dem Referenzmodell.

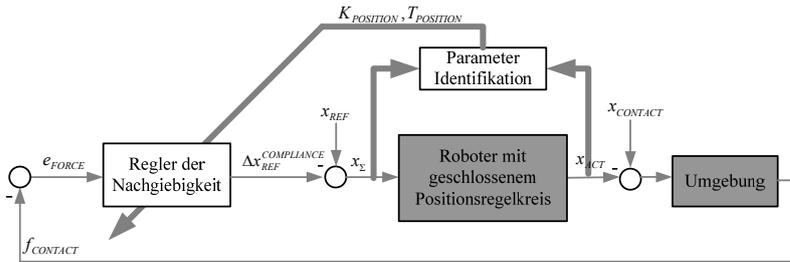


Abb.3.6.(b) Adaptive Nachgiebigkeitsregelung des „Roboter“ Systems mit dem Identifikator.

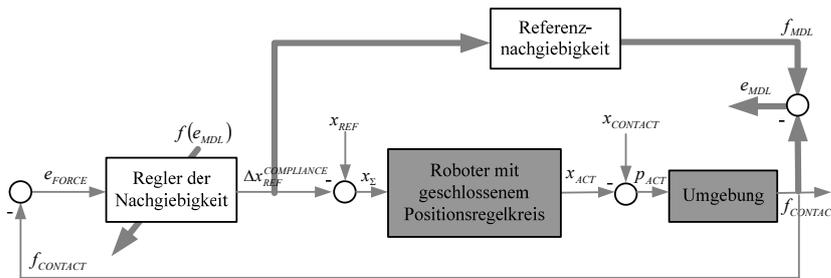


Abb.3.6.(c) Adaptive Nachgiebigkeitsregelung des gebundenen „Manipulator-Umgebung“ Systems mit dem Referenzmodell.

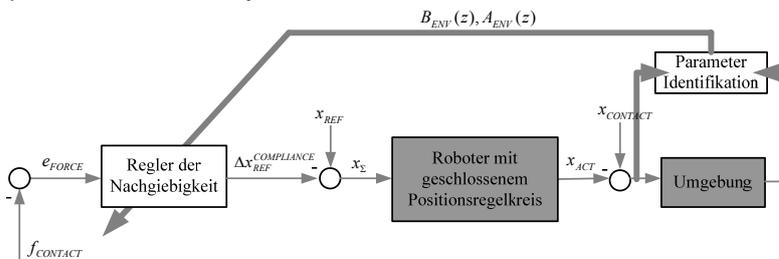


Abb.3.6.(d) Adaptive Nachgiebigkeitsregelung des gebundenen „Manipulator-Umgebung“ Systems mit dem Identifikator.

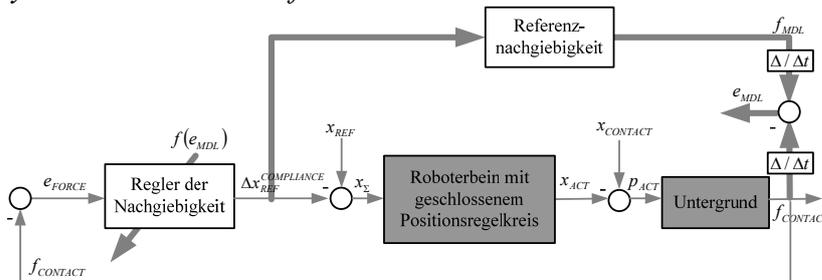


Abb.3.6.(e) Adaptive Nachgiebigkeitsregelung des gebundenen „Schreitroboter-Untergrund“ Systems mit dem Referenzmodell.

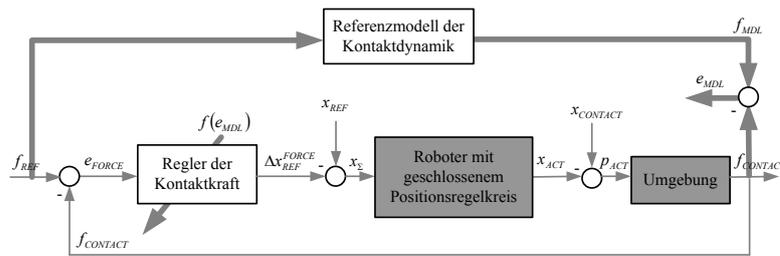


Abb.3.6.(f) Adaptive Kontaktkraftregelung mit dem Referenzmodell.

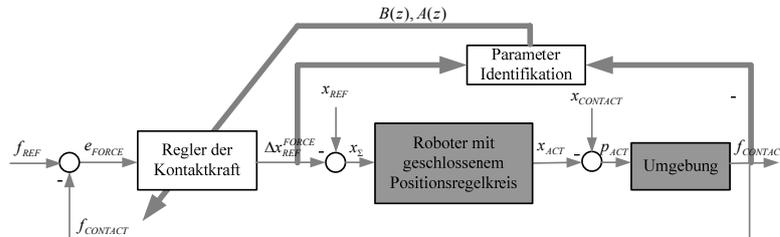


Abb.3.6.(g) Adaptive Kontaktkraftregelung mit dem Identifikator.

Die ausgewählten Methoden lassen zusammenfassen, dass die adaptiven Regelungsalgorithmen sowohl mit dem Referenzmodell als auch mit dem Identifikator und in beiden Fällen sowohl mit der Messung des vollen Regelstreckenzustandes als auch mit der Messung des Regelstreckeneinganges/-ausganges relevant sind und infolgedessen im folgenden Teil des Kapitels betrachtet werden.

3.4.1 Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell

Die adaptive selbstanpassende reguläralgorithmische Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell bilden sogenannte direkte adaptive Regelungssysteme oder Regelungs-systeme mit geschlossenem Adaptationsregelkreis (s.Abb.3.7), deren Aufgabe in der Minimierung der Abweichung zwischen dem Grundregelkreis und dem Referenzmodell besteht. Die

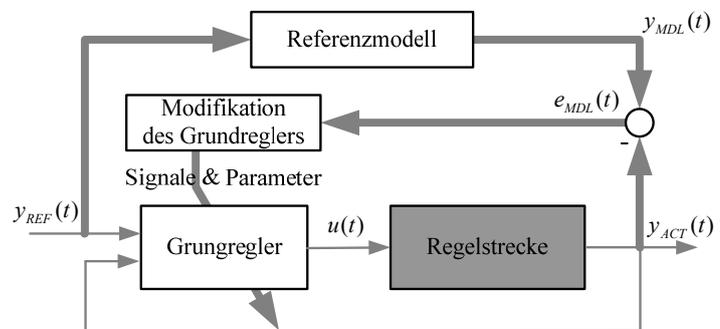


Abb.3.7. Direkte adaptive Regelung mit dem Referenzmodell.

Auswahl des Referenzmodells ist ein Teil der Adaptation. Erstens, sollte das Referenzmodell allen Anforderungen an die Regelungsqualität entsprechen. Zweitens, sollte die Reaktion des Referenzmodells für den Grundregelkreis erreichbar sein. Dies legt die Begrenzungen auf die Struktur des Referenzmodells abhängig von der Struktur des Grundregelkreises fest. Der Grundregler sollte die ideale Folgefähigkeit des geschlossenen Grundregelkreises gewährleisten. Mit anderen Worten, sollte der Adaptationsregler die betroffenen Parameter des Grundreglers so einstellen, dass die Übertragungsfunktionen des Grundregelkreises

$$\frac{y_{ACT}(t)}{y_{REF}(t)} \text{ und des Referenzmodells } \frac{y_{MDL}(t)}{y_{REF}(t)} \text{ gleich werden.}$$

Vorteile adaptiver Regelung mit dem Referenzmodell:

- der Adaptationsregelkreis bleibt geschlossen und kompensiert dadurch die Parameterabweichungen der Regelstrecke und des Grundreglers;
- die Identifikation der Regelstrecke ist ausgeschlossen.

Nachteile adaptiver Regelung mit dem Referenzmodell:

- die Systemordnung ist dank des Referenzmodells größer und die gesamte Systemdynamik ist dadurch beeinflusst.

Des Weiteren werden zwei Verfahren zur Entwicklung eines adaptiven Regelungssystems mit der Messung des vollen Regelstreckenzustandes und ein Verfahren zur Entwicklung eines adaptiven Regelungssystems mit der Messung ausschließlich des Regelstreckeneinganges/-ausganges dargestellt.

3.4.1.1 Lyapunov-Funktionen-basiertes Verfahren zur Entwicklung eines adaptiven Regelungssystems mit der Messung des vollen Regelstreckenzustandes

Es handelt sich um ein Basisverfahren zur Entwicklung eines adaptiven Regelungssystems mit der Messung des Regelstreckenzustandes. Das Verfahren verfügt über mehrere Variationen und wurde in den zahlreichen Veröffentlichungen beleuchtet. Da die theoretischen Grundlagen des Verfahrens sehr umfangreich sind, werden hierbei ausschließlich seine Aufgabestellung und die Ergebnisse dargestellt.

Misst man den Zustandsvektor der Regelstrecke, lassen sich die adaptiven Regelungsalgorithmen mit der Theorie der Lyapunov Funktionen wie folgt ableiten. Gegeben sind die Regelstrecke mit unbekanntem Parametervektor (\mathbf{A}, \mathbf{B}) , das Referenzmodell und das Regelungsziel

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t), \\ \dot{\mathbf{x}}_{MDL}(t) = \mathbf{A}_{MDL} \cdot \mathbf{x}_{MDL}(t) + \mathbf{B}_{MDL} \cdot \mathbf{y}_{REF}(t), \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}(t) = 0, \quad \mathbf{e}(t) = \mathbf{x}_{MDL}(t) - \mathbf{x}(t). \end{cases} \quad (3.13)$$

Werden der Grundregler und der Adaptationsregler in folgenden Formen festgelegt,

$$\begin{cases} \mathbf{u}(t) = \mathbf{C}_X \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{C}_Y \cdot \mathbf{y}_{REF}(t), \\ \dot{\Delta}_{\Theta}(t) = -\mathbf{\Gamma} \cdot \mathbf{B}_{MDL}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{w}^T(t). \end{cases} \quad (3.14)$$

mit

$\Delta_{\Theta} = (\Theta^{IDEAL} - \Theta)$ – Matrix der Abweichungen,

$\mathbf{w}(t)$ – Vektor der gemessenen Signale,

$\mathbf{H} = \mathbf{H}^T > 0$ – Lösung der Lyapunov Gleichung $\mathbf{A}^T \mathbf{H} + \mathbf{H} \mathbf{A} = -\mathbf{Q}, \mathbf{Q} > 0$,

$\mathbf{\Gamma}$ – Verstärkungsfaktor,

dann werden die Konvergenzbedingungen der ausgewählten Lyapunov Funktion erfüllt und damit die Stabilität sowie die identifizierenden Eigenschaften (die asymptotische Stabilität) des Regelungssystems bewiesen. Die Ergebnisse werden in folgender Form repräsentiert:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{C}_X = \mathbf{C}_X^{IDEAL}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{C}_Y = \mathbf{C}_Y^{IDEAL}. \quad (3.15)$$

Das Verfahren bildet die theoretische Grundlage für die gradientenbasierte Verfahren, welche eine breite Akzeptanz in der adaptiven Regelungstechnik bekommen haben und auch in dieser Arbeit zur Auslegung des Adaptationsregelkreises angewandt werden.

3.4.1.2 Gradientenbasiertes Verfahren zur Entwicklung eines adaptiven Regelungssystems mit der Messung des vollen Regelstreckenzustandes

Die Vielfalt der Regelstreckenstrukturen und der Regelungsziele sowie die zahlreichen Möglichkeiten zur Auswahl der Grundreglerstrukturen selbst bei den Lyapunov Funktionen mit quadratischer Form ruft eine Menge Adaptationsalgorithmen hervor. Für jede Kombination des Grundreglers und des Adaptationsreglers, d.h. für jeden neuen adaptiven Regelungsalgorithmus, sollten die Bedingungen der Funktionsfähigkeit und der Stabilität des geschlossenen Systems formuliert und begründet werden. Allerdings gibt es spezielle vordefinierte Klassen der adaptiven Regelungsalgorithmen, die ihren Ursprung in Methoden der Lyapunov Funktionen haben aber dennoch benutzerfreundlicher ausgelegt sind. Ihre Funktionsfähigkeit und Stabilität sind für die speziellen vordefinierten Qualitätskriterien schon bewiesen. Hierbei müssen ausschließlich die Eigenschaften der Regelstrecke berücksichtigt werden. Dazu zählen die so genannten gradientenbasierten Methoden [Kras76], welche die Parametereinstellung in die Richtung des Antigradienten des Qualitätskriteriums ausführen. Dieses Qualitätskriterium bildet in der Regel eine verallgemeinerte Arbeit ab.

Der optimale gradientenbasierte Adaptationsalgorithmus wird mit einer Funktionsreihe beschrieben und ist in dieser Form nicht realisierbar. Die erste Annäherung dieses Algorithmus stimmt mit den allgemein bekannten reguläralgorithmischen gradientenbasierten Algorithmen überein. Die zweite Annäherung dieses Algorithmus unter Annahme des hochfrequenten Eingangssignals und der quasistationären Eigenschaften der Regelstrecke bildet die Gruppe der schnellgradientenbasierten Algorithmen.

Wird der geschlossene Grundregelkreis

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = f(\mathbf{x}, \Theta(\xi), t) \quad (3.16)$$

und entweder ein lokales Qualitätskriterium in Form einer Ungleichung

$$q(\mathbf{x}, \Theta, t) \leq \varepsilon \text{ bei } t \geq t_{ADAPT} \text{ und } \varepsilon \geq 0 \quad (3.17)$$

oder ein integrales Qualitätskriterium in Form einer Ungleichung

$$\int_0^t \bar{q}(\mathbf{x}(s), \Theta(s), s) ds \leq \varepsilon \text{ bei } t \geq t_{ADAPT} \text{ und } \varepsilon \geq 0 \quad (3.18)$$

festgelegt, dann wird der gradientenbasierte Adaptationsregelkreis mit entsprechenden lokalen und integralen Ableitungen des Qualitätskriteriums wie folgt abgebildet:

$$\frac{d(\Theta + \delta_\Theta(\mathbf{x}, \Theta, t))}{dt} = -\Gamma \cdot \nabla_\Theta \omega(\mathbf{x}, \Theta, t),$$

$$\text{wobei } \begin{cases} \delta_\Theta(\mathbf{x}, \Theta, t) = \frac{\partial q}{\partial t} + \nabla_{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{q}^T \cdot f(\mathbf{x}, \Theta, t), \\ \delta_\Theta(\mathbf{x}, \Theta, t) = \bar{q}(\mathbf{x}, \Theta, t). \end{cases} \quad (3.19)$$

Dabei repräsentiert die Funktion $\delta_\Theta(\mathbf{x}, \Theta, t)$ eine Vektorfunktion und erfüllt die Bedingungen des Pseudogradienten $\delta_\Theta(\mathbf{x}, \Theta, t)^T \cdot \nabla_\Theta \omega(\mathbf{x}, \Theta, t) \geq 0$ wenn

$$\delta_\Theta(\mathbf{x}, \Theta, t) = \Gamma \cdot \nabla_\Theta \omega(\mathbf{x}, \Theta, t) \text{ bzw. } \delta_\Theta(\mathbf{x}, \Theta, t) = \Gamma \cdot \text{sign}(\nabla_\Theta \omega(\mathbf{x}, \Theta, t)). \quad (3.20)$$

Die Gleichung (3.19) beschreibt die allgemeine finite-differentielle Form des Adaptationsregelkreises. Die besonderen Fälle bilden die differentielle und finite Form:

$$\begin{cases} \frac{d\Theta}{dt} = -\Gamma \cdot \nabla_{\Theta} \omega(\mathbf{x}, \Theta, t), \\ \Theta = \Theta_0 - \Gamma \cdot \delta_{\Theta}(\mathbf{x}, \Theta, t). \end{cases} \quad (3.21)$$

Die theoretische Begründung der Konvergenzbedingungen des gradientenbasierten Adaptationsalgorithmus wird anhand der Lyapunov Funktion in Standardform bewiesen.

$$V(\mathbf{x}, \Theta, t) = q(\mathbf{x}, t) + \frac{1}{2} \|\Theta - \Theta^{IDEAL}\|^2 = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \mathbf{H} \mathbf{e} + \frac{1}{2} \|\Theta - \Theta^{IDEAL}\|^2 \quad (3.22)$$

Der Algorithmus ist asymptotisch stabil $q(\mathbf{x}, t) \rightarrow 0$ bei $t \rightarrow \infty$. Allerdings verfügt er über die identifizierenden Eigenschaften $\Delta_{\Theta}(t) \rightarrow 0$ bei $t \rightarrow \infty$ ausschließlich dann, wenn die Signale im Regelungssystem die kontinuierliche Erregung aufweisen [Frad92].

Beispiel 1 - gradientenbasierte Parameteranpassung. Angenommen, dass die Regelstrecke und das Regelungsziel mit der (3.14) und das Grundregelkreis

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{C}_X \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{C}_Y \cdot \mathbf{y}_{REF}(t) \quad (3.23)$$

sich beschreiben lassen. Angenommen, dass die einzustellende Parameter ausschließlich die Koeffizienten des Grundreglers beinhalten $\Theta = col\{\mathbf{C}_X, \mathbf{C}_Y\}$.

Wird das Qualitätskriterium als Quadratabweichung dargestellt,

$$q = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{e}^T(t) \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t), \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}^T > 0 \quad (3.24)$$

so werden die Gradienten,

$$\begin{aligned} \nabla_{\mathbf{C}_X} \omega(\mathbf{x}, \Theta, t) &= \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{x}^T(t) \\ \nabla_{\mathbf{C}_Y} \omega(\mathbf{x}, \Theta, t) &= \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{y}_{REF}^T(t) \end{aligned} \quad (3.25)$$

das Adaptationsgesetz in differenzieller Form (P-Teil)

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{C}}_X \\ \dot{\mathbf{C}}_Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\Gamma_{XP} \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{x}^T(t) \\ -\Gamma_{YP} \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{y}_{REF}^T(t) \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

und das Adaptationsgesetz in finite-differentieller Form (PD-Teil)

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{C}}_X \\ \dot{\mathbf{C}}_Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\Gamma_{XP} \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{x}^T(t) - \Gamma_{XD} \cdot \frac{d}{dt} [\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{x}^T(t)] \\ -\Gamma_{YP} \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{y}_{REF}^T(t) - \Gamma_{YD} \cdot \frac{d}{dt} [\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{y}_{REF}^T(t)] \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

berechnet.

Vom Vorteil ist das Beibehalten der Funktionsfähigkeit des Algorithmus bei großen Parameter- und Koordinatenstörungen. Der Nachteil des Algorithmus liegt in der Verschlechterung der Regelungsqualität bei den schnellen Parameteränderungen.

Beispiel 2a - gradientenbasierte Signalanpassung. Wird bei der gleichen Aufgabe wie oben das Adaptationsgesetz in einer finiten Form

$$\begin{pmatrix} \mathbf{C}_X \\ \mathbf{C}_Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\Gamma_X \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{x}^T(t) \\ -\Gamma_Y \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{y}_{REF}^T(t) \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

bzw.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{C}_X \\ \mathbf{C}_Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\Gamma_X \cdot \text{sign}(\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{x}^T(t)) \\ -\Gamma_Y \cdot \text{sign}(\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{y}_{REF}^T(t)) \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

ausgewählt, nimmt der Grundregler (3.23) die folgende Form an

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(t) &= -\Gamma \cdot \left(\|\mathbf{x}(t)\|^2 + \|\mathbf{y}_{REF}(t)\|^2 \right) \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t), \\ \mathbf{u}(t) &= -\Gamma \cdot \left(\sum_{i=1}^n |x_i(t)| + \sum_{i=1}^m |y_i(t)| \right) \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t). \end{aligned} \quad (3.30)$$

Beispiel 2b - gradientenbasierte Signalanpassung. Wird bei der gleichen Aufgabe wie oben der Vektor der einzustellenden Parameter ausschließlich aus den Eingängen der Regelstrecke bestehen $\Theta = \{\mathbf{u}_S\}$, wird der Gradient

$$\nabla_{\mathbf{u}_S} \omega(\mathbf{x}, \Theta, t) = \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \quad (3.31)$$

und der Grundregler in einer finiten Form

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_S(t) = -\Gamma \cdot \text{sign}(\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t)) \quad (3.32)$$

berechnet.

Wie man sehen kann, fehlt der Adaptationsregelkreis in beiden Beispielen der Signalanpassung. Empfehlenswert ist die Anwendung der Adaptationsalgorithmen (3.30) und (3.32) zur Signalanpassung bei den schnellen aber dennoch geringen Parameteränderungen. Dabei könnte der Sliding-Mode auf der Fläche $q(\mathbf{e}) = 0$ entstehen.

Beispiel 3 – gradientenbasierte Parameter- und Signalanpassung. Wird bei der gleichen Aufgabe wie oben der Vektor der einzustellenden Parameter aus den Koeffizienten und Signalen des Grundreglers $\Theta = \text{col}\{\mathbf{C}_X, \mathbf{C}_Y, \mathbf{u}_S\}$ bestehen, so werden die Gradienten

$$\begin{aligned} \nabla_{\mathbf{C}_X} \omega(\mathbf{x}, \Theta, t) &= \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{x}^T(t) \\ \nabla_{\mathbf{C}_Y} \omega(\mathbf{x}, \Theta, t) &= \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{y}_{REF}^T(t) \\ \nabla_{\mathbf{u}_S} \omega(\mathbf{x}, \Theta, t) &= \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \end{aligned} \quad (3.33)$$

und die Parameter des Grundreglers nach differenzieller Form bzw. die Signale des Grundreglers nach finiter Form.

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{C}}_X \\ \dot{\mathbf{C}}_Y \\ \mathbf{u}_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\Gamma_X \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{x}^T(t) \\ -\Gamma_Y \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{y}_{REF}^T(t) \\ -\Gamma_U \cdot |\mathbf{e}(t)| \cdot \text{sign}(\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t)) \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

angepasst.

Die Anwendung der dargestellten Regelungsalgorithmen mit der gleichzeitigen Parameter- und Signalanpassung bei den Aufgaben mit den großen und schnellen Parameteränderungen ist sehr vorteilhaft.

Bemerkung: Der Adaptationsregler bei den adaptiven Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell, das in einer expliziten Form dargestellt ist, beinhalten Matrix \mathbf{B} , die meistens unbekannt ist. Allerdings kann man diese Matrix mit jeder beliebigen Matrix

gleicher Größe $\bar{\mathbf{B}} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{B}$, $\mathbf{T} = \mathbf{T}^T > 0$, wie beispielsweise $\mathbf{B} = \mathbf{B}_{MDL}$ ersetzen.

Analyse der Robustheit. Damit die praktische Bedeutung beibehalten wird, sollte die gradientenbasierten Adaptionsalgorithmen robust ausgelegt werden. Hierbei wird angefordert, dass die befriedigenden Ergebnisse bei der Änderung der Regelstreckenparameter, der Störungen und dem Signalrauschen geliefert werden. Ihre Robustheit hängt von der Reihe der Faktoren ab. Zu den wichtigsten gehören:

- der Wert der Signalerregung im Regelungssystem;
- die Geschwindigkeit der Parameterränderung sowie der Wert der parametrischen Ungewissheit;
- der Wert des Verstärkungsfaktors im Adaptionsgesetz.

Für den Adaptionsregelkreis mit begrenzten Störungen $\|\mathbf{n}(t)\| \leq \varepsilon < \infty$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = f(\mathbf{x}, \Theta, t) + \mathbf{n}(t) \quad \text{oder} \quad \dot{\mathbf{x}}(t) = f(\mathbf{x}, \Theta + \mathbf{n}(t), t) \quad (3.35)$$

ist es bewiesen, dass der Adaptionsalgorithmus in seiner finiten Form selbst bei der Abhängigkeit von Störungen von den Zustandsvariablen $\mathbf{n} = \mathbf{n}(\mathbf{x}, \Theta, t)$ robust ist. Der Adaptionsalgorithmus in seiner finiten-differentialen oder differentialen Form ist hingegen ausschließlich unter zusätzlichen Bedingungen robust.

Beobachtet man eine Störung im System $\mathbf{n}(t)$, dann wird beispielsweise der Adaptionsalgorithmus in differentialer Form

$$\frac{d\Theta}{dt} = -\Gamma \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{x}^T(t) \quad (3.36)$$

in die folgende Form umgewandelt:

$$\begin{aligned} \frac{d\Theta}{dt} &= -\Gamma \cdot (\mathbf{x}_{MDL}(t) - \mathbf{x}(t) + \mathbf{n}(t)) \cdot (\mathbf{x}(t) + \mathbf{n}(t))^T \\ \frac{d\Theta}{dt} &= -\Gamma \cdot \left[\mathbf{x}(t) \cdot (\mathbf{x}_{MDL}(t) - \mathbf{x}(t)) + \mathbf{n}(t) \cdot (\mathbf{x}_{MDL}(t) - \mathbf{x}(t)) + \mathbf{n}^2(t) \right] \end{aligned} \quad (3.37)$$

Der erste Summand beinhaltet die Information über die nützlichen Signale, der zweite Summand definiert den gemittelten Wert des nützlichen Signals und des Rauschens, der dritte Summand beinhaltet ausschließlich das Rauschen. Und er verursacht Parameterdrift und demzufolge Instabilität des adaptiven Regelungssystems.

Die Analyse der Systemstabilität lässt sich mit anderen Worten wie folgt beschreiben: das Regelungssystem befindet sich an der Stabilitätsgrenze und ist hinsichtlich der geregelten Zustandsvariablen $\mathbf{x}(t)$ asymptotisch stabil, da $(\mathbf{x}(t), \Theta(t))$ begrenzt sind. Werden die Signale nicht kontinuierlich erregt, so konvergiert die Zielfunktion $q(\mathbf{x}, t) \rightarrow 0$ und hiermit der Fehler $\mathbf{e}(t) \rightarrow 0$ gegen Null. Werden die Signale kontinuierlich mit Störungen $\mathbf{n}(t)$ erregt, so verursachen die letzten die Parameteränderung in einer zufälligen Weise. Im Laufe dieser Änderung können die Parameter die Werte annehmen, die das geschlossene System zur Instabilität $\Delta_{\Theta}(t) = (\Theta^{IDEAL} - \Theta) \rightarrow \infty$ bei $t \rightarrow \infty$ führen. Die Amplitude dieser Änderung hängt direkt von der Verstärkung Γ ab. Die Auswahl von Γ bildet ein Kompromiss zwischen der Geschwindigkeit und der Genauigkeit des Adaptionsalgorithmus.

Folgende Verfahren werden in der Praxis zur Erhöhung der Robustheit verwendet:

- begrenzen den Parametervektor $\Theta(t)$ bei ziemlich großen Werten der Parameter durch die Einführung der Parameteramplitude in die Zielfunktion

$$q(\mathbf{x}, \Theta, t) = 0.5 \cdot \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e} + \gamma \cdot \|\Theta\|, \quad \gamma > 0 \quad (3.38)$$

- anhalten die Änderung des Parametervektors $\Theta(t)$ bei ziemlich kleinen Werten der Zielfunktion

$$\frac{d\Theta}{dt} = \begin{cases} -\Gamma \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{x}^T(t), & q(\mathbf{x}, \Theta, t) \geq \varepsilon_1 \\ 0, & q(\mathbf{x}, \Theta, t) < \varepsilon_1 \end{cases} \quad (3.39)$$

- ersetzen den Signalvektor durch den gewünschten bei ziemlich kleinen Werten der Zielfunktion bei kleinen Werten der Zielfunktion

$$\frac{d\Theta}{dt} = \begin{cases} -\Gamma \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{x}^T(t), & q(\mathbf{x}, \Theta, t) \geq \varepsilon_2 \\ -\Gamma \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{x}_{MDL}^T(t), & q(\mathbf{x}, \Theta, t) < \varepsilon_2 \end{cases} \quad (3.40)$$

- verringern die Verstärkung Γ mit der Zeit

$$\Gamma(t) = \Gamma_1 + \frac{\Gamma_0}{\mu + t}, \quad \mu > 0 \quad (3.41)$$

- verringern die Verstärkung Γ reziprok zur Ableitung der Zielfunktion

$$\Gamma(t) = \Gamma_1 + \frac{\Gamma_0}{\mu + \|\nabla_{\Theta} \omega(\mathbf{X}, \Theta, t)\|^2}, \quad \mu > 0 \quad (3.42)$$

- verringern die Verstärkung Γ abhängig von der Änderung des Ableitungszeichens (so genannte Resilient Propagation Methode [Ried92])

$$\Gamma(t+1) = \begin{cases} \Gamma(t) \cdot k_+, & k_+ > 1, \Gamma(t+1) \cdot \Gamma(t) > 0 \\ \Gamma(t) \cdot k_-, & 1 > k_- > 0, \Gamma(t+1) \cdot \Gamma(t) < 0 \end{cases} \quad (3.43)$$

3.4.1.3 Verfahren zur Entwicklung eines adaptiven Regelungssystems ohne Messung des vollen Regelstreckenzustandes

Wird ausschließlich der Eingang und Ausgang der Regelstrecke gemessen, dann können die Regelstrecke und das Referenzmodell im Zustandsraum

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot u(t), & y(t) = \mathbf{C}^T \cdot \mathbf{x}(t), \\ \dot{\mathbf{x}}_{MDL}(t) = \mathbf{A}_{MDL} \cdot \mathbf{x}_{MDL}(t) + \mathbf{B}_{MDL} \cdot y_{REF}(t), & y_{MDL}(t) = \mathbf{C}_{MDL}^T \cdot \mathbf{x}_{MDL}(t). \end{cases} \quad (3.44)$$

sowie auch als Übertragungsfunktion

$$\begin{cases} y(t) = W(s) \cdot u(t) = k \cdot \frac{s^m + b_{m-1} \cdot s^{m-1} + \dots + b_0}{s^n + a_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + a_0} \cdot u(t), \\ y_{MDL}(t) = W_{MDL}(s) \cdot y_{REF}(t) = k_{MDL} \cdot \frac{s^m + b_{m-1}^{MDL} \cdot s^{m-1} + \dots + b_0^{MDL}}{s^n + a_{n-1}^{MDL} \cdot s^{n-1} + \dots + a_0^{MDL}} \cdot y_{REF}(t). \end{cases} \quad (3.45)$$

mit

$$\begin{cases} W(s) = \mathbf{C}^T \cdot (s\mathbf{I} - \mathbf{A}) \cdot \mathbf{B}, \\ W_{MDL}(s) = \mathbf{C}_{MDL}^T \cdot (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_{MDL}) \cdot \mathbf{B}_{MDL}. \end{cases}$$

dargestellt werden. Es wird angenommen, dass es sich um eine Minimalphasen-Regelstrecken handelt, die Polynomordnungen m, n sowie auch das Zeichen des Koeffizienten k bekannt sind.

Das Entwurfsziel besteht in der Synthese eines Regelungsgesetzes $u(t)$, welches ausschließlich die gemessenen Signale $y_{REF}(t)$, $y_{MDL}(t)$, $y(t)$ und keine ihren Ableitung beinhaltet und die Zielfunktion $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$, $e(t) = (y_{MDL}(t) - y(t))$ bei den unbekanntem Parametern der Regelstrecke erfüllt.

Zugrunde der Aufgabenlösung liegt die Kalman-Yakubovich Lemma, Lifshits Lemma, Anderson Lemma und die Voraussetzungen hinsichtlich der positiven reellen Übertragungsfunktion:

- für jede komplexe Variable $s = \sigma + j\omega$ ist die Übertragungsfunktion $W(s)$ auch reell,
- $\operatorname{Re}W(s) > 0$ für $\sigma > 0$ und $\operatorname{Re}W(s) \geq 0$ für $\sigma = 0$.

Die genannten Lemma stellen fest, dass die Existenz der positiven reellen Übertragungsfunktion eine notwendige und hinreichende Bedingung für die Existenz einer Matrix $\mathbf{H} = \mathbf{H}^T > 0$ ist. Die Existenz dieser Matrix beweist ihrerseits das Theorem über die Stabilität nach Lyapunov $e(t) \rightarrow 0$, $\Delta_{\Theta}(t) \rightarrow 0$ bei $t \rightarrow \infty$ des Gleichgewichtspunktes $(\mathbf{e}, \Delta_{\Theta}) = (0, 0)$ für ein System:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{e}(t)}{dt} = \mathbf{A}_e \cdot \mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_e \cdot \Delta_{\Theta}^T(t) \cdot \mathbf{w}(t), & e(t) = \mathbf{C}^T \cdot \mathbf{e}(t), \\ \frac{d\Delta_{\Theta}}{dt} = -\mathbf{\Gamma} \cdot e(t) \cdot \mathbf{w}(t). \end{cases} \quad (3.46)$$

wenn $W(s) = \mathbf{C}^T \cdot (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_e) \cdot \mathbf{B}_e$ eine positive reelle Übertragungsfunktion ist. Außerdem wird die asymptotische Stabilität des Systems (3.47) gewährleistet, falls der Vektor $\mathbf{w}(t)$ die harmonischen Signale mit verschiedenen Frequenzen beinhaltet. Die Anzahl der Frequenzen sollte größer als die Hälfte der einzustellenden Parameter sein. Das Theorem bleibt in Kraft selbst, wenn der Vektor $\mathbf{w}(t)$ mit dem Vektor der stabilen Übertragungsfunktionen $\mathbf{T}(s)$ in Form $\mathbf{w}(t) = \mathbf{T}(s) \cdot z(t)$ transformiert wird.

Für die praktische Anwendung der dargestellten Theorie müssen die Matrizen $\mathbf{A}_e, \mathbf{B}_e$ ausgewählt werden und der Vektors $\mathbf{w}(t)$ unter den Bedingungen der nicht messbaren Signale $\mathbf{e}(t)$, $\Delta_{\Theta}(t)$ und messbaren Signale $u(t)$, $e(t)$, $\dot{\Delta}_{\Theta}(t) = \dot{\Theta}(t)$ zusammengesetzt werden. Außerdem muss das praxisnahe Modell des Fehlers:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{e}(t)}{dt} = \mathbf{A}_e \cdot \mathbf{e}(t) + \Delta_{\Theta}(t) \cdot z(t), \\ e(t) = \mathbf{C}^T \cdot \mathbf{e}(t). \end{cases} \quad (3.47)$$

in die Form (3.46) transformiert werden, wobei $z(t)$ einig messbare Signal ist. Zu diesem Zweck wird ein Vektor der zusätzlichen Signale $\mathbf{v}(t)$ hinzugefügt

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\mathbf{e}}(t)}{dt} = \mathbf{A}_e \cdot \hat{\mathbf{e}}(t) + \Delta_{\Theta}(t) \cdot z(t) + \mathbf{v}(t), \\ \hat{e}(t) = \mathbf{C}^T \cdot \hat{\mathbf{e}}(t). \end{cases} \quad (3.48)$$

und das System (3.48) wird als System des erweiterten Fehlers bezeichnet [Mono74].

Zur erfolgreichen Lösung des Entwurfsziels wird die folgende Form des Grundreglers

$$u(t) = \Theta^T(t) \cdot \mathbf{w}(t) \quad (3.49)$$

sowie die Einschätzung des Verstärkungsfaktor der Regelstrecke $\hat{K}(t)$ gefordert. Außerdem sollten die zusätzlichen Hilfssignale $\eta(t)$ und $\psi(t)$ zur Berechnung von $\mathbf{w}(t)$ vorbereitet werden. Die meist bekanntesten, so genannten Erweiterungsschemen zur Einschätzung der Faktoren und zur Vorbereitung der Hilfssignale sind von Feuer und Morse [Mors78], von Narendra und Valavani [Nare80a], von Narendra und Lin [Nare80b]. Auch hier existiert eine Menge von Algorithmen zur Anpassung der Parameter des Grundreglers. Die asymptotische Stabilität $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ wurde lediglich für die folgende Adaptationsalgorithmen bewiesen:

- ein Standardalgorithmus für die Parameter $\Theta(t)$, $\hat{k}(t)$ und das Hilfssignal $\eta(t)$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Theta}{dt} = -\Gamma_{\Theta} \cdot \psi(t) \cdot \hat{e}(t), \quad \Gamma_{\Theta} = \Gamma_{\Theta}^T > 0 \\ \frac{d\hat{K}}{dt} = -\Gamma_K \cdot z(t) \cdot \hat{e}(t), \quad \Gamma_K > 0 \\ \hat{e}(t) = e(t) + \eta(t), \\ \eta(t) = W(s) \cdot H(s) \cdot \left[\frac{d\hat{K}(t)}{dt} \cdot z(t) - \hat{e}(t) \cdot \psi^T(t) \cdot \psi(t) \right] \end{array} \right. \quad (3.50)$$

- ein modifizierter Algorithmus für die Parameter $\Theta(t)$, $\hat{k}(t)$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Theta}{dt} = -\Gamma_{\Theta} \cdot \frac{\psi(t) \cdot \hat{e}(t)}{1 + \psi^T(t) \cdot \psi(t)}, \quad \Gamma_{\Theta} = \Gamma_{\Theta}^T > 0 \\ \frac{d\hat{K}(t)}{dt} = -\Gamma_K \cdot \frac{z(t) \cdot \hat{e}(t)}{1 + \psi^T(t) \cdot \psi(t)}, \quad \Gamma_K > 0 \end{array} \right. \quad (3.51)$$

Man kann leicht zeigen, dass die Adaptationsalgorithmen (3.50-3.51) zu den gradientenbasierten Adaptationsalgorithmen gehören, wenn das Qualitätskriterium als Quadratabweichung $q(\mathbf{e}) = 0.5 \cdot \mathbf{e}^T(t) \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{e}(t)$, $\mathbf{H} = \mathbf{H}^T > 0$ dargestellt wird. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass die hier dargestellten Adaptationsalgorithmen in Gegensatz zu den gradientenbasierten Adaptationsalgorithmen auf dem Vektor $\mathbf{w}(t)$ beruhen, d.h. ausschließlich auf der gemessenen und davon umgerechneten Werten des Einganges und Ausgangs.

Ein gemeinsamer Nachteil für alle adaptiven Regelungssysteme mit erweitertem Fehler ist ihre Strukturkomplexität und damit verbundene schwache Robustheit. Dennoch können die robusten Eigenschaften mit Hilfe der oben beschriebenen Maßnahmen (3.38–3.43) verbessert werden.

3.4.1.4 Grundregler in den Strukturen mit dem Referenzmodell

Es ist offensichtlich, dass der Grundregler in adaptiven Regelungsstrukturen mit dem Referenzmodell verschiedene Formen annehmen kann, wie beispielsweise ein FIR bzw. IIR Filter, PID Regler, Regler mit Fuzzy-Logik oder mit Künstlichen Neuronalen Netzen. In dieser Arbeit wird für die Struktur des Grundreglers in Form vom zweischichtigen Perzeptron mit einer RBF Schicht und einer linearen Schicht (s.Abb.3.8) entschieden. Dies wird des Weiteren überall in den Regelungsstrukturen mit dem Referenzmodell, dargestellt in den Abbildungen 3.6(a/c/e/f), eingesetzt.

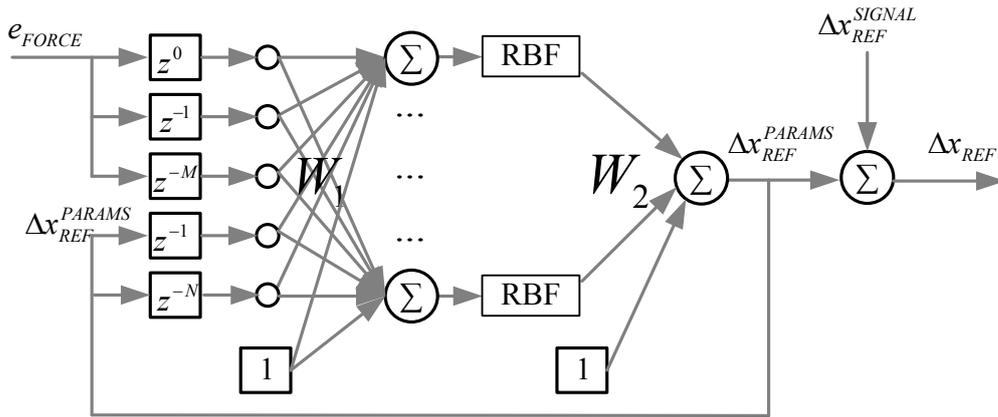


Abb.3.8. Grundregler zur Parameter- und Signalanpassung basiert auf zweischichtigem Perzeptron.

Diese Struktur bietet folgende Vorteile:

- die inneren KNN Signale sind durch die Anwendung der RBF Aktivierungsfunktionen begrenzt und konvergieren außerhalb des zugelassenen Bereiches gegen Null;
- die vorwärtsgerichtete Struktur zulässt die Anwendung verschiedenen Lernalgorithmen zur Einstellung der Netzkoeffizienten bzw. zur Einstellung der RBF Aktivierungsfunktionen selbst;
- die Dynamik beliebiger Ordnung kann bei der entsprechenden Auswahl der Regressionsvektoren des Einganges und des Ausganges implementiert werden;
- außerdem verfügt diese Struktur über ein zusätzliches einstellbares Signal Δx_{REF}^{SIGNAL} , das die Anpassung an die schnell ändernden Regelstreckenparametern übernimmt.

Parameter und Signale des Grundreglers $\Theta = \{\mathbf{W}_{KNN}, \Delta x_{REF}^{SIGNAL}\}$ werden anhand der gradientenbasierten Algorithmen abhängig von dem ausgewählten Qualitätskriterium $q(\mathbf{x}, \Theta, t)$ angepasst. Allgemeine Form der Anpassung wird wie folgt durchgeführt:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{W}}{dt} = -\Gamma_{\mathbf{w}} \cdot \nabla_{(\mathbf{w})} = -\Gamma_{\mathbf{w}} \cdot \frac{dq(\mathbf{x}, \Theta, t)}{d\mathbf{W}}, \\ \frac{d(\Delta x_{REF}^{SIGNAL})}{dt} = -\Gamma_{\Delta x_{REF}^{SIGNAL}} \cdot \nabla_{(\Delta x_{REF}^{SIGNAL})} = -\Gamma_{\Delta x_{REF}^{SIGNAL}} \cdot \frac{dq(\mathbf{x}, \Theta, t)}{d\Delta x_{REF}^{SIGNAL}}. \end{cases} \quad (3.52)$$

Die genaue formelmäßige Implementierung hängt stark von der Regelungsstruktur sowie Regelstrecke ab und wird für die Fälle der Nachgiebigkeitsregelung sowie der Kontaktkraftregelung im Weiteren separat dargestellt.

3.4.2 Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Identifikator

Die adaptive selbstanpassende reguläralgorithmische Regelungsalgorithmen mit dem Identifikator bilden so genannte indirekte adaptive Regelungssysteme oder Regelungssysteme mit offenem Adaptationsregelkreis (s.Abb.3.9), deren Aufgabe ist, die Regelstrecke zu identifizieren und anhand dieser Identifikation die entsprechende Parameter des Grundreglers einzustellen. Es gibt zwei Formen der adaptiven Regelung mit dem Identifikator: indirekte und direkte Form.

- Bei der *indirekten Form* werden zuerst die Parameter der Regelstrecke eingeschätzt und dann die Parameter des Grundreglers anhand dieser Einschätzungen eingestellt.
- Bei der *direkten Form* wird die Identifikation der Regelstreckenparameter ausgeschlossen. Es wird davon ausgegangen, dass es ein Zusammenhang zwischen den Reglerkoeffizienten und den Regelstreckenparametern existiert, der durch den ausgewählten Regelungsalgorithmus definiert wird. Aufgrund dessen werden die Parameter des Grundreglers unmittelbar eingeschätzt und eingestellt.

Vorteile der adaptiven Regelung mit dem Identifikator liegen darin, dass der Adaptationsregelkreis offen bleibt und die Systemdynamik nicht beeinflusst wird. Nachteile adaptiver Regelung mit dem Identifikator sind mit der Identifikationsphase der Regelstrecke verbunden und äußern sich in dem damit verbundenen Aufwand und in der Beeinflussung der Regelungsgenauigkeit vom Identifikationsfehler bzw. Parameterdrift.

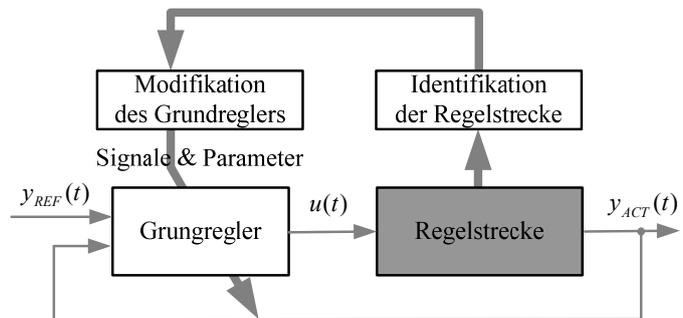


Abb.3.9. Indirekte adaptive Regelung mit dem Identifikator.

Bei der Synthese der adaptiven Regelungsalgorithmen mit dem Identifikator wird der Grundregelkreis nach dem Verfahren entwickelt, als ob die Parameter der Regelstrecke bekannt sind. Da der Grundregler sowie seine einzustellenden Parameter von den unbekanntem Parametern der Regelstrecke abhängen, übernimmt ein adaptiver Identifikator die Aufgabe der Regelstreckenidentifikation. Die Systemidentifikation bedeutet das Auffinden des mathematischen Systemmodells als Ergebnis der Bearbeitung der Eingangs- und Ausgangssignale im Laufe des Experimentes. Das Experiment könnte aktiv oder passiv gestaltet werden. Ein aktives Experiment wird ausgerechnet zum Zweck der Systemidentifikation durchgeführt. Ein passives Experiment wird während des Systembetriebes durchgeführt.

Ist die Struktur der Regelstrecke bereits definiert, wird die Aufgabe des Identifikators auf die Ermittlung ihrer Parameter im Echtzeitbetrieb zurückgeführt. Die Komplexität der adaptiven Identifikation besteht darin, dass diese parallel mit der Anpassung der Grundreglerparameter abläuft. Unter diesen Bedingungen sollte die Funktionsfähigkeit und vor allem die Stabilität des geschlossenen Systems gewährleistet werden.

Des Weiteren werden verschiedene Methoden zur Identifikation der Regelstrecke repräsentiert. Für jede Methode wird ein entsprechendes parameterbasiertes Modell der Regelstrecke eingeführt und die Algorithmen zur Parameterabschätzung sowie die Stabilitätsuntersuchung dieser Algorithmen gegeben.

3.4.2.1 Identifikation der Regelstrecke in Form der Übertragungsfunktion

Bei den Aufgaben der Identifikation des Ausgangs wird ein lineares parameterbasiertes Identifikationsmodell verwendet:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{\Theta}^T(t) \cdot \mathbf{w}(t) \quad (3.53)$$

mit

- \mathbf{y} – Vektor des Ausganges,
- Θ – Vektor der unbekannt Parameter der Regelstrecke,
- \mathbf{w} – Vektor der gemessenen Signale.

Der Ausgangs- und Signalvektor sind aus den gemessenen Daten bekannt. In jedem Zeitpunkt bildet das Identifikationsmodell ein lineares Gleichungssystem bezüglich der unbekannt Parameter. Sind die Messdaten innerhalb eines Zeitabstandes gegeben, so ist eine unendliche Anzahl der Gleichungen in Form (3.49) vorhanden. Sind hingegen die Messdaten in N diskreten Punkten gegeben, so ist ein Gleichungssystem mit N Gleichungen in Form (3.53) vorhanden. Die Ermittlung der unbekannt Parameter wird auf die Lösung des redundanten Gleichungssystems zurückgeführt. Um eine zuverlässige Parametereinschätzung durchzuführen und das Rauschen bzw. die Modellungenauigkeiten zu eliminieren, wird die Anzahl der Gleichungen größer als Anzahl der unbekannt Parameter gefordert. Im Echtzeitbetrieb wird das Gleichungssystem iterativ in einem beweglichen Zeitfenster gelöst, wo die Messdaten immer erneut werden. Die Kalkulationszeit und die Genauigkeit hängen von zwei Faktoren ab: vom Identifikationsmodell und von der Rechnungsmethode.

Ein allgemeines Verfahren zur Transformation einer linearen Regelstrecke mit relativer Ordnung $n - m \geq 0$

$$A(s) \cdot y = B(s) \cdot u \quad (3.54)$$

mit

$$A(s) = s^n + a_1 \cdot s^{n-1} + a_2 \cdot s^{n-2} + \dots + a_n,$$

$$B(s) = s^m + b_1 \cdot s^{m-1} + b_2 \cdot s^{m-2} + \dots + b_m.$$

zur Form (3.53) wird wie folgt durchgeführt.

Dividiert man diese Gleichung (3.54) durch das Polynom $A_0(s) = s^n + \lambda_1 \cdot s^{n-1} + \lambda_2 \cdot s^{n-2} + \dots + \lambda_n$, bekommt man

$$y = \frac{A_0(s) - A(s)}{A_0(s)} \cdot y + \frac{B(s)}{A_0(s)} \cdot u \quad (3.55)$$

Nach der Transformation

$$A_0(s) - A(s) = s^n + (\lambda_1 - a_1) \cdot s^{n-1} + (\lambda_2 - a_2) \cdot s^{n-2} + \dots + (\lambda_n - a_n) \alpha_n \quad (3.56)$$

und mit der Einführung neuer Variablen

$$\tilde{y}_i = \frac{s^{n-i}}{A_0(s)} \cdot y \quad \text{und} \quad \tilde{u}_j = \frac{s^{m-j}}{A_0(s)} \cdot u, \quad (3.57)$$

bekommt die Gleichung (3.55) die Form (3.53), falls der Vektor der unbekannt Parameter und die Signalmatrix dementsprechend $\Theta = (\lambda_1 - a_1, \lambda_2 - a_2, \dots, \lambda_n - a_n, b_1, b_2, \dots, b_m)^T$ $\mathbf{w}(t) = (\tilde{y}_1(t), \tilde{y}_2(t), \dots, \tilde{y}_n(t), \tilde{u}_1(t), \tilde{u}_2(t), \dots, \tilde{u}_m(t))^T$ festgelegt werden.

Das begründet die potentielle Möglichkeit, die Parameter einer linearen Regelstrecke ausschließlich anhand der gemessenen und durch den Regressionsfilter (3.57) geführten Werte des Einganges und Ausganges zu ermitteln. Man braucht keine Messung ihrer Ableitungen.

Gradientenbasierte Identifikation. Angenommen, dass $\hat{\Theta}(t)$ eine Einschätzung des unbekanntem Parameters im Zeitpunkt t ist, dann wird die Einschätzung des Ausgangs als ein prognostizierender Ausgang

$$\hat{y}(t) = \hat{\Theta}^T(t) \cdot \mathbf{w}(t) \quad (3.58)$$

und die Differenz

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{y}(t) - \hat{y}(t) = (\Theta(t) - \hat{\Theta}(t))^T \cdot \mathbf{w}(t) \quad (3.59)$$

als ein prognostizierender Fehler bezeichnet.

Der Algorithmus zur Minimierung der Koeffizientenabweichung ist ein gradientenbasierter Adaptationsalgorithmus mit dem Qualitätskriterium $q(t) = 0.5 \cdot \mathbf{e}^T(t) \cdot \mathbf{e}(t)$

$$\frac{d\hat{\Theta}}{dt} = -\Gamma_{\Theta} \cdot \frac{dq}{d\hat{\Theta}} = \Gamma_{\Theta} \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{w}(t), \quad \Gamma_{\Theta} > 0 \quad (3.60)$$

Um den gradientenbasierten Adaptationsalgorithmus auf die Stabilität zu untersuchen, wird ein parameterbasierter Fehler $\Delta_{\Theta}(t) = \Theta(t) - \hat{\Theta}(t)$ eingeführt. Der prognostizierende Fehler kann man jetzt als

$$\mathbf{e}(t) = \Delta_{\Theta}^T(t) \cdot \mathbf{w}(t) \quad (3.61)$$

darstellen. Nach dem Einsetzen (3.61) in (3.60) und unter der Berücksichtigung $\dot{\Delta}_{\Theta} = -\dot{\hat{\Theta}}$ und bekommt man

$$\dot{\Delta}_{\Theta} = -\Gamma_{\Theta} \cdot \mathbf{w}^T \cdot \Delta_{\Theta}^T \cdot \mathbf{w} \quad (3.62)$$

Wird als Lyapunov Funktion das Quadrat der Fehleramplitude gewählt,

$$V(\Delta_{\Theta}) = |\Delta_{\Theta}|^2 = \Delta_{\Theta}^T \cdot \Delta_{\Theta} \quad (3.63)$$

nimmt ihre erste Zeitableitung folgende Form an

$$\dot{V}(\Delta_{\Theta}) = 2 \cdot \Delta_{\Theta}^T \cdot \dot{\Delta}_{\Theta} = -2\Gamma_{\Theta} \cdot \Delta_{\Theta}^T \cdot \mathbf{w} \cdot \mathbf{w}^T \cdot \Delta_{\Theta} = -2\Gamma_{\Theta} \cdot |\Delta_{\Theta}^T \cdot \mathbf{w}|^2 \leq 0 \quad (3.64)$$

und beweist hiermit die Stabilität des gradientenbasierten Adaptationsalgorithmus nach Lyapunov.

Wie es bereits im Unterkapitel 3.4.1.2 beschrieben ist, hängt die Fehlerkonvergenz sowie die Robustheit des Regelungssystems von der Signalmatrix \mathbf{w} ab. Die robusten Eigenschaften können hierbei mit Hilfe der oben beschriebenen Maßnahmen (3.38–3.43) verbessert werden.

Identifikation mit der Methode der kleinsten Quadrate. Die Methode der kleinsten Quadrate (englisch: Least Squares Method) ist das mathematische Standardverfahren zur Systemidentifikation. Die Einschätzung der unbekanntem Parameter $\hat{\Theta}(t)$ erhält man durch die Minimierung der Zielfunktion des integralen Fehlers:

$$q = \frac{1}{2} \int_0^t |\mathbf{y}(\tau) - \hat{\Theta}^T(\tau) \cdot \mathbf{w}(\tau)|^2 d\tau. \quad (3.65)$$

Der Adaptationsalgorithmus nimmt folgende Form an:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\Theta}(t)}{dt} = -\Gamma(t) \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{w}(t), \\ \frac{d\Gamma(t)}{dt} = -\Gamma(t) \cdot \mathbf{w}(t) \cdot \mathbf{w}^T(t) \cdot \Gamma(t). \end{cases} \quad (3.66)$$

und gewährleistet hiermit die Konvergenz der einzuschätzenden Parameter $\hat{\Theta} \rightarrow 0$ bei $t \rightarrow \infty$ unter Bedingung der kontinuierlichen Signalerregung.

Eine weitere Modifikation der Methode der kleinsten Quadrate wurde für den Fall entwickelt, wenn die einzuschätzenden Parameter während der Identifikation sich ändern. Die alten Werte verlieren mit der Zeit seinen Wert und sollten auch die Parameteridentifikation weniger beeinflussen. Es wurde eine Methode mit exponentiellem Wertverlust der alten Information entwickelt. Dies wird mit Hilfe der speziellen Zusammensetzung der Zielfunktion implementiert:

$$q = \frac{1}{2} \int_0^t \exp\left(-\int_s^t \lambda(\tau) d\tau\right) \cdot \left| \mathbf{y}(s) - \hat{\Theta}^T(s) \cdot \mathbf{w}(s) \right|^2 ds \quad (3.67)$$

mit

$\lambda(\tau) \geq 0$ – Koeffizient des Informationswertverlustes.

Der Adaptationsalgorithmus nimmt dabei folgende Form an:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\Theta}(t)}{dt} = -\Gamma(t) \cdot \mathbf{e}(t) \cdot \mathbf{w}(t), \\ \frac{d\Gamma(t)}{dt} = -\Gamma(t) \cdot \mathbf{w}(t) \cdot \mathbf{w}^T(t) \cdot \Gamma(t) + \lambda(t) \cdot \Gamma(t). \end{cases} \quad (3.68)$$

und ebenso gewährleistet die Konvergenz der einzuschätzenden Parameter $\hat{\Theta} \rightarrow 0$ bei $t \rightarrow \infty$ unter Bedingung der kontinuierlichen Signalerregung.

Wird der Koeffizient des Informationswertverlustes auf Null gesetzt, dann konvergiert die Verstärkung gegen Null $\Gamma \rightarrow 0$ und der Regelungsalgorithmus kann den Parameteränderungen nicht folgen. Wird der Koeffizient des Informationswertverlustes konstant gesetzt, kann dies zum starken Anstieg der Verstärkung und selbst zu starken Schwankungen der einzuschätzenden Parameter führen, wenn keine kontinuierliche Signalerregung vorhanden ist. Es ist demzufolge wünschenswert, den Koeffizienten des Informationswertverlustes mit der Verstärkung zu verbinden:

$$\lambda(t) = \lambda_{MAX} \left(1 - \frac{\|\Gamma(t)\|}{k_{MAX}} \right). \quad (3.69)$$

mit

λ_{MAX} – maximaler Koeffizient des Informationswertverlustes,

k_{MAX} – maximale Norm der Verstärkungsmatrix $\Gamma(t)$, so dass $k_{MAX} \geq \|\Gamma(0)\|$.

In diesem Fall wird der Parameterfehler $\Delta_{\Theta}(t)$ immer von oben begrenzt. Wird die Bedingung der kontinuierlichen Signalerregung erfüllt, dann läuft die Parametereinschätzung exponentiell und die Verstärkungsmatrix $\Gamma(t)$ ist von oben und von unten mit positiven Matrizen begrenzt.

Bemerkung: Bei der Auswahl der Regressionsfilter sollte ihre Bandbreite größer sein als die Bandbreite der Regelstrecke, dennoch kleiner als die Bandbreite des Rauschens.

3.4.2.2 Identifikation der Regelstrecke in Form des Zustandsraummodells

Angenommen, dass die Regelstrecke mit der Gleichung

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot u(t), \\ y(t) = \mathbf{C}^T \cdot \mathbf{x}(t). \end{cases} \quad (3.70)$$

dargestellt wird und das Entwurfsziel in der Synthese eines Identifikationsgesetzes besteht, der ausschließlich die gemessene Signale $u(t)$, $y(t)$, $\hat{y}(t)$ beinhaltet und die Zielfunktion $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ mit $e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ erfüllt. Der Fehler beschreibt $e(t)$ die Abweichung des Identifikatorausganges vom Regelstreckenausgang.

Zur Lösung dieser Aufgabe gelten die gleichen theoretischen Grundlagen wie zum Entwurf eines adaptiven Regelungssystems mit dem Referenzmodell im Unterkapitel 3.4.1.3. Allerdings beschreibt hierbei der Fehler $e(t)$ die Abweichung des Identifikatorausganges vom Regelstreckenausgang. Ansonsten werden alle Schritte des Systementwurfs genau wie oben verfolgt.

Zuerst wird die Regelstrecke

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_* \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot u, \\ y = \mathbf{C}^T \cdot \mathbf{x} = x_1, \end{cases} \quad \text{mit} \quad \begin{cases} \mathbf{A}_* = \begin{pmatrix} -\bar{\mathbf{A}} & \mathbf{I} \\ & 0 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{C}^T = (1, 0, \dots, 0), \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_* \cdot \mathbf{x} + (\bar{\mathbf{A}}_* - \bar{\mathbf{A}}) \cdot x_1 + \mathbf{B} \cdot u, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (3.71)$$

und der Identifikator

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}_* \cdot \hat{\mathbf{x}} + (\bar{\mathbf{A}}_* - \hat{\mathbf{A}}) \cdot x_1 + \hat{\mathbf{B}} \cdot u + \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2, \\ \hat{y} = \hat{x}_1. \end{cases} \quad (3.72)$$

in einer kanonischen Form im Zustandsraum dargestellt.

Danach wird das ermittelte System in Form des Systems mit erweitertem Fehler (3.48) transformiert:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{e}}}(t) = \mathbf{A}_e \cdot \hat{\mathbf{e}}(t) + \Delta_{\theta}(t) \cdot z(t) + \mathbf{v}(t), \\ e(t) = \mathbf{C}^T \cdot \hat{\mathbf{e}}(t). \end{cases} \quad (3.73)$$

Anschließend werden die Adaptationsalgorithmen und die Rückkopplungssignale $\mathbf{v}(t)$ ausgewählt, die die Stabilität des adaptiven Identifikators nach Lyapunov gewährleisten.

An dieser Stelle wird ein Beispiel der Struktur eines adaptiven Identifikators eingeführt (s. Abb. 3.10). Diese Struktur verfügt über ein Regressionsfilter und ein Integrator. Die Rolle des Regressionsfilters liegt in der Vorbereitung eines Regressionsvektors, der eine Analogie zum Regelstreckenzustand darstellt. Die Rolle des Integrators liegt in der Einstellung der asymptotischen Identifikationseigenschaften vom Identifikator. Die Ähnlichkeit dieser Struktur mit den rekurrenten neuronalen Netzen ist offensichtlich.

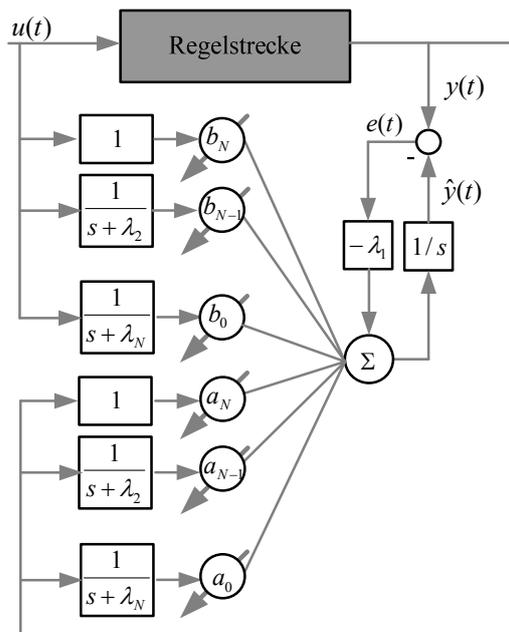


Abb.3.10. Struktur eines adaptiven Identifikators.

3.4.2.3 Grundregler in den Strukturen mit dem Identifikator

Zur Synthese des Grundreglers in den Strukturen mit dem Identifikator können verschiedene Methoden, wie Invarianzregelung, modale oder optimale Regelung, verwendet werden. Aufgrund eines einfachen Verfahrens zur Berechnung des Reglers und dennoch sehr robuster Eigenschaften wird in dieser Arbeit für eine modale Regelung mit affiner Parametrisierung des Grundreglers [Greb01] entschieden. Dies wird des Weiteren überall in den Regelungsstrukturen mit dem Identifikator, dargestellt in den Abbildungen 3.6.(b/d/g), eingesetzt.

Der Grundregler wird in folgender Form ausgelegt:

$$C(s) = \frac{Q(s)}{1 - Q(s) \cdot G_{PLANT}(s)}, \text{ wobei } Q(s) = F_Q(s) \cdot [G_{PLANT}(s)]^{-1} \quad (3.74)$$

mit

- $C(s)$ – Grundregler,
- $G_{PLANT}(s)$ – Übertragungsfunktion der Regelstrecke,
- $F_Q(s)$ – gewünschte Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises.

Ist $G_{PLANT}(s)$ stabil und verfügt über keine instabilen oder ungewünschten Nullstellen, ist die Invertierung $[G_{PLANT}(s)]^{-1}$ ohne weiteren Einschränkungen und Transformationen zugelassen und der Kraftregler folgende Form annimmt:

$$C(s) = \frac{F_Q(s)}{1 - F_Q(s)} \cdot [G_{PLANT}(s)]^{-1}. \quad (3.75)$$

Damit gilt für den geschlossenen Regelkreis:

$$\frac{C(s) \cdot G_{PLANT}(s)}{1 + C(s) \cdot G_{PLANT}(s)} = Q(s) \cdot G_{PLANT}(s) = F_Q(s). \quad (3.76)$$

Ist $G_{PLANT}(s) = \frac{B_{PLANT}(s)}{A_{PLANT}(s)}$ instabil oder verfügt über die instabilen oder ungewünschten

Nullstellen, ist die Invertierung $[G_{PLANT}(s)]^{-1}$ ausschließlich mit weiteren Einschränkungen und Transformationen zugelassen. Dennoch nimmt die affine Parametrierung eine einfach Form an und der Grundregler wird wie folgt festgelegt:

$$C(s) = \frac{\frac{P(s)}{E(s)} + Q_{DISIRED}(s) \cdot \frac{A_{PLANT}(s)}{E(s)}}{\frac{L(s)}{E(s)} + Q_{DISIRED}(s) \cdot \frac{B_{PLANT}(s)}{E(s)}}, \quad (3.77)$$

$$A_{PLANT}(s) \cdot L(s) + B_{PLANT}(s) \cdot P(s) = E(s) \cdot F(s),$$

mit

- | | | |
|------------------|---|--|
| $Q_{DISIRED}(s)$ | – | eine stabile Übertragungsfunktion mit erwünschten Polen, |
| $E(s), F(s)$ | – | Polynomen entsprechender Ordnung mit der erwünschten aber beliebigen Nullstellenverteilung im komplexen Bereich. Diese Polynome haben die Bedeutung der Regressionsvektoren des Einganges und Ausganges. |

Zusammengefasst liegen die Vorteile der dargestellten Methode zur Synthese des Grundreglers:

- in sehr einfacher Parametrierung des Grundreglers anhand der ermittelten Parametern der Regelstrecke sowohl für stabile als auch instabile bzw. ungewünschte Übertragungsfunktionen der Regelstrecke;
- in der Kombination dieses Reglers mit dem Identifikationsverfahren ohne Messung voller Regelstreckenzustandes;
- in robusten Eigenschaften bzw. in der Möglichkeit, die gewünschte Robustheit einzustellen.

3.5 Regelung der Nachgiebigkeit

Die allgemeine Einführung in die Nachgiebigkeitsregelung wurde im Kapitel 1 gegeben. Die Ersatzschemen vom Manipulationsroboter unter dem Eingriff externer Kraft bzw. im Kontakt mit der Umgebung sowie vom Schreitroboter im Kontakt mit dem Untergrund und unter dem Eingriff externer Kraft (z.B. Gravitationskraft oder Ladungsgewicht) sind jeweils in Abb.3.11 und Abb.3.12 gegeben. Dabei wird auf die strukturelle Elastizität des Roboters und auf die Reibungseffekte aufgrund der Untersuchungen aus dem Kapitel 2 verzichtet.

Abhängig von der Kontaktaufgabe und den Kontaktbedingungen müssen zwei Fälle der Nachgiebigkeitsregelung mit verschiedenen Zielen hervorgehoben werden:

- Regelung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems,
- Regelung der Nachgiebigkeit des gebundenen „Roboter-Umgebung“ Systems.

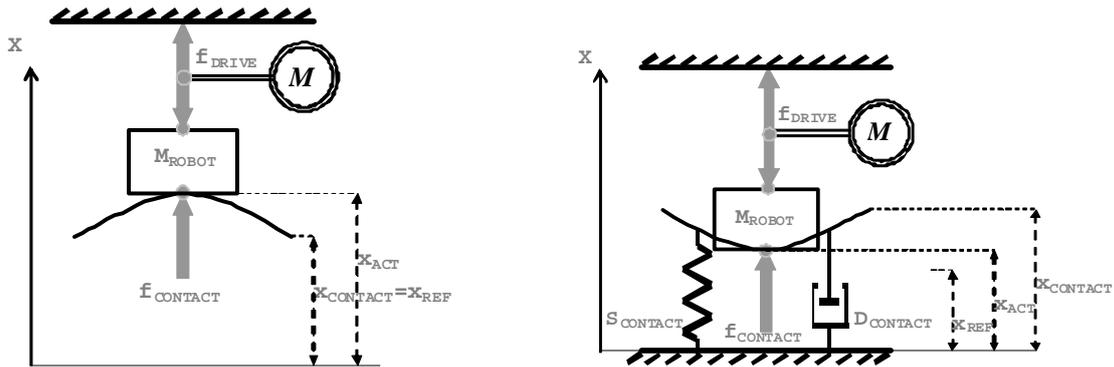


Abb.3.11. Ersatzschema vom Manipulationsroboter (links) unter dem Eingriff externer Kraft und (rechts) im Kontakt mit der Umgebung.

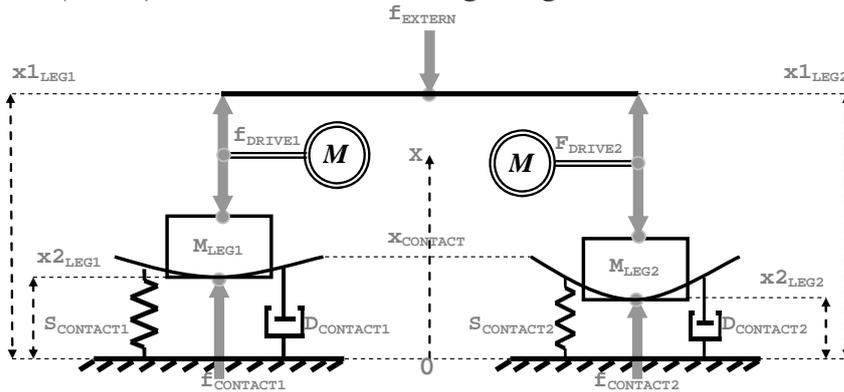


Abb.3.12. Ersatzschema vom Schreitroboter im Kontakt mit dem Untergrund unter dem Eingriff externer Kraft.

Die Regelung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems tritt auf, wenn vom Roboter eine gewünschte Nachgiebigkeit ohne Berücksichtigung mechanischer Umgebungseigenschaften gefordert wird. Die charakteristischen Beispiele sind der Manipulationsroboter unter dem Eingriff externer Kraft oder der Manipulationsroboter beim Auffahren auf ein Hindernis während der Bewegung entlang der gewünschten Bahn. Das Regelungsziel ist dabei, das gewünschte Verhältnis

$$Z_{REF}(s) = Z_{ROBOT}(s) = \frac{f_{CONTACT}(s)}{x_{ACT}(s) - x_{REF}(s)} \quad (3.78)$$

zwischen der wirkenden Kontaktkraft $F_{CONTACT}$ und der Positionsabweichung des Roboters $(x_{ACT} - x_{REF})$ einzustellen.

Unter Berücksichtigung der Gleichung zur Berechnung der Kontaktkraft

$$f_{CONTACT}(s) = Z_{ENV}(s) \cdot (x_{CONTACT} - x_{ACT}(s)) \quad (3.79)$$

ergeben sich im stationären Betrieb nach Ablauf aller Übergangsprozesse die folgenden Roboterposition und Kontaktkraft:

$$\begin{cases} x_{ACT} = \left(\frac{S_{ROBOT}}{S_{ROBOT} + S_{ENV}} \right) \cdot x_{REF} + \left(\frac{S_{ENV}}{S_{ROBOT} + S_{ENV}} \right) \cdot x_{CONTACT}, \\ f_{CONTACT} = \left(\frac{S_{ROBOT} \cdot S_{ENV}}{S_{ROBOT} + S_{ENV}} \right) \cdot (x_{CONTACT} - x_{REF}). \end{cases} \quad (3.80)$$

Die Regelung der Nachgiebigkeit des gebundenen „Roboter-Umgebung“ Systems tritt hingegen auf, wenn eine gewünschte Nachgiebigkeit vom gebundenen System gefordert wird.

Die variierenden mechanischen Umgebungseigenschaften sollten dabei das Verhalten und insbesondere die Stabilität des gebundenen Systems nicht beeinträchtigen. Die charakteristischen Beispiele sind der Manipulationsroboter beim Auffahren auf ein Hindernis mit unbekanntem mechanischen Eigenschaften, die Einstellung der gewünschten Körperrückgabe eines Schreitroboters unabhängig von mechanischen Untergrundeigenschaften unter den Roboterfüßen, oder die Einstellung der gewünschten Griffnachgiebigkeit einer Hand unabhängig von mechanischen Gegenstandseigenschaften unter den Fingern. Das Regelungsziel dabei ist, die Nachgiebigkeit des Roboters

$$Z_{ROBOT}(s) = \frac{f_{CONTACT}(s)}{x_{ACT}(s) - x_{REF}(s)} \quad (3.81)$$

so einzustellen, dass die gewünschte gebundene Nachgiebigkeit

$$Z_{REF}(s) = Z_{COUPLED}(s) = \frac{Z_{ROBOT}(s) \cdot Z_{ENV}(s)}{Z_{ROBOT}(s) + Z_{ENV}(s)} \quad (3.82)$$

unabhängig von Umgebungseigenschaften Z_{ENV} wird.

Umgerechnet ist die Roboternachgiebigkeit im folgenden Zusammenhang zur Umgebungsnachgiebigkeiten und zur gewünschten gebundenen Nachgiebigkeit einzustellen:

$$Z_{ROBOT}(s) = \frac{Z_{ENV}(s) \cdot Z_{COUPLED}(s)}{Z_{ENV}(s) - Z_{COUPLED}(s)} \quad (3.83)$$

Unter Berücksichtigung der Gleichung zur Berechnung der Kontaktkraft

$$f_{CONTACT}(s) = Z_{ENV}(s) \cdot (x_{CONTACT} - x_{ACT}(s)) \quad (3.84)$$

ergeben sich im stationären Betrieb nach dem Ablauf aller Übergangsprozesse folgende Roboterposition und Kontaktkraft:

$$\begin{cases} x_{ACT} = \frac{S_{COUPLED}}{S_{ENV}} \cdot x_{REF} + \frac{S_{ENV} - S_{COUPLED}}{S_{ENV}} \cdot x_{CONTACT}, \\ f_{CONTACT} = S_{COUPLED} \cdot (x_{CONTACT} - x_{REF}). \end{cases} \quad (3.85)$$

In beiden Fällen wird letztendlich die Einstellung der Roboternachgiebigkeit jeweils ohne oder mit Berücksichtigung der mechanischen Umgebungseigenschaften angefordert. Es ist offensichtlich, dass die ausgewählte und geregelte Nachgiebigkeit des Roboters die Stabilität des ganzen gebundenen „Roboter-Umgebung“ Systems beeinflusst. Diese Stabilität hängt auch von der Regelgüte, von der Reglerabstastzeit und von den mechanischen Umgebungseigenschaften ab. Folglich ist die gewünschte Nachgiebigkeit des Roboters in beiden Fällen entweder indirekt über die Stabilitätsbedingungen oder direkt abhängig von der tatsächlichen Nachgiebigkeit der Umgebung auszuwählen. Die Umgebungsnachgiebigkeit ist allerdings meistens im Voraus unbekannt und sollte demzufolge im laufenden Betrieb abgeschätzt bzw. ermittelt werden. Die zusätzliche Schwierigkeit der Aufgabe besteht darin, dass die tatsächlichen Eigenschaften der geschlossenen Positionsregelkreise des Roboters lage- bzw. richtungsabhängig sind und demzufolge auch im Nachgiebigkeitsregler zu berücksichtigen sind.

Des Weiteren werden die Methoden zur Berechnung und Regelung der gewünschten Nachgiebigkeit der „Roboter“/„Roboter-Umgebung“/„Schreitroboter-Untergrund“ Systeme repräsentiert. Die adaptiven Regelungsmethoden werden für einen eindimensionalen Fall entsprechend der oben gegebenen Klassifikation dargestellt.

3.5.1 Synthese der Zielimpedanz

Fast alle vorgeschlagenen Konzepte der Impedanzregelung nutzen das lineare Modell der Zielimpedanz höchstens zweiter Ordnung. Der Grund dafür liegt darin, dass die Systemdynamik zweiter Ordnung bekannt und leicht zu verstehen ist. Das gewünschte Verhalten des Robotersystems im Kontakt legt die Beziehung zwischen der Kontaktkraft und der Änderung der Roboterposition:

$$f_{CONTACT} = S_{REF} \cdot (x_{ACT} - x_{REF}) + D_{REF} \cdot (\dot{x}_{ACT} - \dot{x}_{REF}) + M_{REF} \cdot (\ddot{x}_{ACT} - \ddot{x}_{REF}) \quad (3.86)$$

oder im Laplace-Bereich:

$$Z_{REF}(s) = \frac{f_{CONTACT}(s)}{(x_{ACT} - x_{REF})} = S_{REF} + D_{REF} \cdot s + M_{REF} \cdot s^2. \quad (3.87)$$

Das Modell (3.87) lässt sich in die zu Regelungszwecken mehr geeignete Form umschreiben:

$$Z_{REF}(s) = K_{REF} \cdot \left(1 + 2 \cdot \xi_{REF} \cdot \frac{1}{\omega_{0REF}} \cdot s + \frac{1}{\omega_{0REF}^2} \cdot s^2 \right) \quad (3.88)$$

bzw. $Z_{REF}(s) = K_{REF} \cdot (1 + 2 \cdot \xi_{REF} \cdot T_{0REF} \cdot s + T_{0REF}^2 \cdot s^2)$

mit

$$K_{REF} = S_{REF} \quad - \text{Verstärkungsfaktor des Modells zweiter Ordnung,}$$

$$\xi_{REF} = \frac{D_{REF}}{2\sqrt{M_{REF} \cdot S_{REF}}} \quad - \text{Dämpfungsfaktor des Modells zweiter Ordnung,}$$

$$\omega_{0REF} = \sqrt{\frac{S_{REF}}{M_{REF}}} \quad - \text{Eigenfrequenz des Modells zweiter Ordnung,}$$

$$T_{0REF} = \sqrt{\frac{M_{REF}}{S_{REF}}} \quad - \text{Eigene Zeitkonstante des Modells zweiter Ordnung.}$$

Zwecks Transformation des Modells vom Laplace Bereich ins Z-Bereich existiert eine Reihe von Verfahren wie „Forward Euler“, „Backward Euler“, „Tustin Bilinear Approximation“, „Tustin Approximation with Frequency Prewarping“ usw.

Bei dem Dämpfungsfaktor $0 \leq \xi_{REF} \leq 1$ lässt sich die bekannte Tabellenfunktion anwenden:

$$Z_{REF}(z) = K_{REF} \cdot \frac{\left[1 - \frac{a_1 \sin(\omega_E T_{SAMPLE} + \phi)}{\sqrt{1 - \xi_{REF}^2}} \right] z + a_1 \left[a_1 + \frac{a_1 \sin(\omega_E T_{SAMPLE} - \phi)}{\sqrt{1 - \xi_{REF}^2}} \right]}{z^2 - 2 \cdot a_1 \cos(\omega_E T_{SAMPLE}) \cdot z + a_1^2} \quad (3.89)$$

mit

$$\omega_E = \omega_{0REF} \sqrt{1 - \xi_{REF}^2}, \quad \phi = \cos^{-1} \xi_{REF}, \quad a_1 = \exp^{-\xi_{REF} \cdot \omega_{0REF} \cdot T_{SAMPLE}} \quad \text{für } 0 \leq \xi_{REF} \leq 1$$

Beim Dämpfungsfaktor $\xi_{REF} > 1$ handelt es sich um zwei seriell geschaltete Glieder erster Ordnung. Eine von oben erwähnten Approximationsmethoden kann verwendet werden. Bei geringen Abtastzeiten $T_{SAMPLE} \ll 1/\omega_{0REF}$ sind positive Ergebnisse zu erwarten. Bei der

Anwendung der Euler Rückwärtsapproximation $s = \frac{1 - z^{-1}}{T_{SAMPLE}}$ erhält man die Zielimpedanz im

Z-Bereich:

$$Z_{REF}(z) = K_{REF} \cdot \left(1 + 2 \cdot \xi_{REF} \cdot \frac{1}{\omega_{0REF}} \cdot \left(\frac{1-z^{-1}}{T_{SAMPLE}} \right) + \frac{1}{\omega_{0REF}^2} \cdot \left(\frac{1-z^{-1}}{T_{SAMPLE}} \right)^2 \right) \quad (3.90)$$

für $\xi_{REF} \geq 0$.

Nach wenigen Vereinfachungen und Sortieren ergibt sich daraus:

$$Z_{REF}(z) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} \quad (3.91)$$

mit

$$\begin{cases} b_0 = K_{REF} \cdot \left(1 + \frac{2\xi_{REF}}{\omega_{0REF} T_{SAMPLE}} + \frac{1}{\omega_{0REF}^2 T_{SAMPLE}^2} \right), \\ b_1 = K_{REF} \cdot \left(-\frac{2\xi_{REF}}{\omega_{0REF} T_{SAMPLE}} - \frac{2}{\omega_{0REF}^2 T_{SAMPLE}^2} \right), \\ b_2 = K_{REF} \cdot \left(\frac{1}{\omega_{0REF}^2 T_{SAMPLE}^2} \right). \end{cases}$$

Falls eine gewünschte Nachgiebigkeit des gebundenen „Roboter-Umgebung“ Systems einzustellen ist, wird diese erstmal in die Nachgiebigkeit des Roboters entsprechend der Formel

$$Z_{ROBOT}(z) = \frac{Z_{ENV}(z) \cdot Z_{COUPLED}(z)}{Z_{ENV}(z) - Z_{COUPLED}(z)} \quad (3.92)$$

transformiert. Laut den Untersuchungen des Kapitels 2 wird die Umgebung als ein Feder-Dämpfer-System dargestellt. Dann erhält man die folgende Nachgiebigkeit des Roboters im Z-Bereich:

$$\begin{cases} Z_{REF}(z) = Z_{COUPLED}(z) = b_{0COUPLED} + b_{1COUPLED} z^{-1} + b_{2COUPLED} z^{-2} \\ Z_{ENV}(z) = b_{0ENV} + b_{1ENV} z^{-1} \end{cases}, \quad (3.93)$$

$$\Rightarrow Z_{ROBOT}(z) = \frac{b_{0ROBOT} + b_{1ROBOT} z^{-1} + b_{2ROBOT} z^{-2} + b_{3ROBOT} z^{-3}}{a_{0ROBOT} + a_{1ROBOT} z^{-1} + a_{2ROBOT} z^{-2}}$$

wobei

$$\begin{cases} b_{0ENV} = S_{ENV} + \frac{D_{ENV}}{T_{SAMPLE}}, \\ b_{1ENV} = -\frac{D_{ENV}}{T_{SAMPLE}}. \end{cases} \quad \text{und} \quad \begin{cases} b_{0ROBOT} = (b_{0ENV} b_{0COUPLED}), \\ b_{1ROBOT} = (b_{0ENV} b_{1COUPLED} + b_{1ENV} b_{0COUPLED}), \\ b_{2ROBOT} = (b_{1ENV} b_{1COUPLED} + b_{0ENV} b_{2COUPLED}), \\ b_{3ROBOT} = (b_{1ENV} b_{2COUPLED}), \\ a_{0ROBOT} = (b_{0ENV} - b_{0COUPLED}), \\ a_{1ROBOT} = (b_{1ENV} - b_{1COUPLED}), \\ a_{2ROBOT} = (0 - b_{2COUPLED}). \end{cases}$$

Bei der Parameterauswahl der gewünschten Roboternachgiebigkeit sind die Stabilitätsbedingungen zu beachten, die aus dem „small gain“ Theorems vorkommen. Das „small gain“ Theorem stellt fest, dass eine Rückkopplungsschleife, die aus stabilen Operatoren besteht, auch stabil bleibt, wenn das Produkt aller Operatoren kleiner als Eins ist (Stabilitätskriterium von Nyquist):

$$\|Z_{ENV}(j\omega) \cdot Z_{ROBOT}^{-1}(j\omega)\| < 1 \quad (3.94)$$

Das „small gain“ Theorem liefert die ziemlich allgemeinen ausreichenden Bedingungen, die für kontinuierliche und diskrete, SISO und MIMO, lineare und nicht lineare Systeme geeignet sind und in vielen Fällen zu konservativ sind, um in den praktischen Kontaktaufgaben Anwendung zu finden. Auf einem einfachsten Beispiel der zeitdiskreten Kraftregelung im Z-Bereich hat Whitney die notwendige Bedingung für die Stabilität des gebundenen Systems während des Kontaktes definiert:

$$0 < T_{SAMPLE} \cdot \frac{S_{ENV}}{S_{REF}} < 1 \quad (3.95)$$

mit

- T_{SAMPLE} – Abtastzeit des Regelungssystems,
- S_{REF} – gewünschte Steifigkeit des Robotersystems,
- S_{ENV} – Umgebungssteifigkeit.

3.5.2 Adaptive Regelung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems

Man unterscheidet zwei Fälle: (1) man übt auf den Roboter eine externe Kraft aus und (2) der Roboter tritt die Umgebung während der Bewegung entlang der gewünschten Bahn. Für beide Fälle besteht das Ziel in der Einstellung der gewünschten Roboternachgiebigkeit. Auf die mechanischen Umgebungseigenschaften wird nicht geachtet. Oben wurde gezeigt, dass die Nachgiebigkeitsregelung des „Roboter“ Systems über die Änderung der generalisierten Roboterposition (Beschleunigung/Geschwindigkeit/Lage) kontrolliert wird. Es wurde eine Reihe von adaptiven Nachgiebigkeitsregelungen des „Roboter“ Systems vorgeschlagen, wie beispielsweise eine modellbasierte adaptive Dämpfungsregelung [Dane90], eine adaptive Minimierung der Kontaktkraft [AlJa95] etc. Des Weiteren werden sowohl die bekannten als auch die neu vorgeschlagenen adaptiven Regelungsalgorithmen entsprechend der eingeführten Klassifikation dargestellt. Die experimentellen Ergebnisse werden im Kapitel 4 gezeigt.

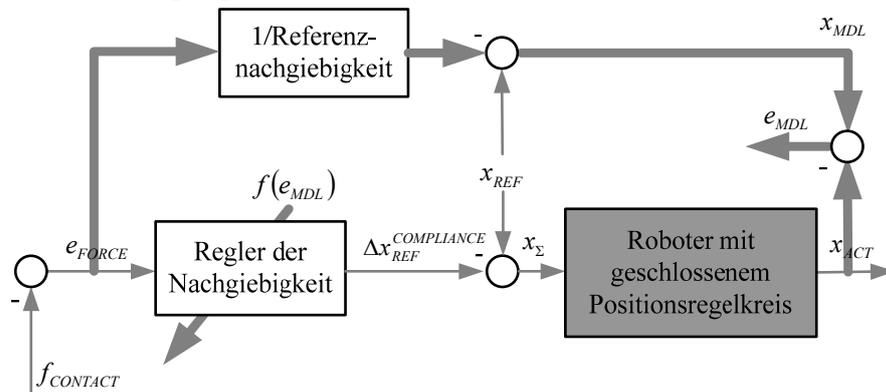
Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell [Palis/Rusin02]

Das Schema zur adaptiven Regelung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems mit dem Referenzmodell ist in der Abb.3.13 dargestellt. Es handelt sich um die Roboteradmittanz

$$Z_{REF}^{-1}(s) = \frac{\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE}(s)}{f_{CONTACT}(s)},$$

da die externe Kraft bzw. Reaktionskraft des Kontaktes die

Roboterbewegung beeinflusst.



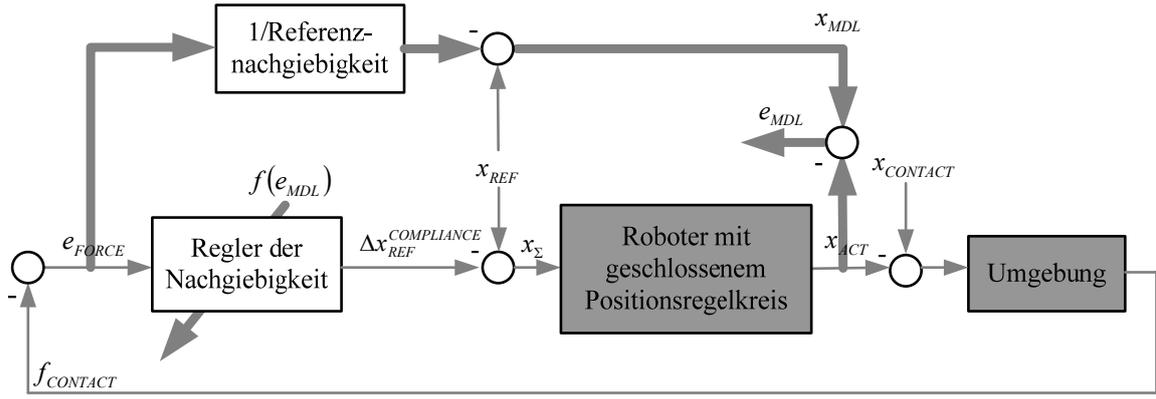


Abb.3.13. Adaptive Nachgiebigkeitsregelung des „Roboter“ Systems mit Referenzmodell (oben) unter dem Eingriff externer Kraft und (unten) im Kontakt mit der Umgebung.

Der Grundregler wird hierbei entsprechen der Beschreibung im Unterkapitel 3.4.1.4 ausgelegt (s.Abb.3.8). Die Anpassung der Parameter des Grundreglers erfolgt nach gradientenbasierten Verfahren. Das Adaptationsgesetz (3.52) wird für die ausgewählten Regelungsstrukturen unter Berücksichtigung von Gradienten

$$\begin{cases} \nabla_{(\mathbf{w})} = e_{MDL} \cdot \frac{dx_{ACT}}{dx_{\Sigma}} \cdot \frac{d\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE}}{d\mathbf{W}}, \\ \nabla_{(\Delta x_{REF}^{SIGNAL})} = e_{MDL} \cdot \frac{dx_{ACT}}{dx_{\Sigma}}; \end{cases} \quad (3.96)$$

folgende Form annehmen:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{W}}{dt} = -\Gamma_{\mathbf{w}} \cdot e_{MDL} \cdot \frac{dx_{ACT}}{dx_{\Sigma}} \cdot \frac{d\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE}}{d\mathbf{W}} = -\Gamma_{\mathbf{w}}^{ADAPT} \cdot e_{MDL} \cdot \frac{d(\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE})}{d\mathbf{W}}, \\ \frac{d(\Delta x_{REF}^{SIGNAL})}{dt} = -\Gamma_{\Delta x_{REF}^{SIGNAL}} \cdot e_{MDL} \cdot \frac{dx_{ACT}}{dx_{\Sigma}} = -\Gamma_{\Delta x_{REF}^{SIGNAL}}^{ADAPT} \cdot e_{MDL}. \end{cases} \quad (3.97)$$

Wie man sehen kann, beinhaltet die Gradientenberechnung die Empfindlichkeit des geschlossenen Positionsregelkreises dx_{ACT}/dx_{Σ} , die generell richtungs- und lageabhängig ist. Um die explizite Berechnung dieses Empfindlichkeitswertes zu vermeiden, wird er zur Berechnung des adaptiven Lernschrittes $\Gamma_{\mathbf{w}}^{ADAPT}$ bzw. $\Gamma_{\Delta x_{REF}^{SIGNAL}}^{ADAPT}$ nach [Zell00] zugeordnet.

Bei einer zweischichtigen Netzstruktur mit einer RBF Schicht und einer linearen Schicht nimmt der Parameteranpassungsteil des Grundreglers folgende Form an:

$$\begin{cases} \frac{d(\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE})}{d\mathbf{W2}} = \mathbf{in2}, \\ \frac{d(\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE})}{d\mathbf{W1}} = \mathbf{W2}^T \cdot \frac{d\mathbf{RBF}}{d\mathbf{out1}} \cdot \mathbf{in1}, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{d\mathbf{W2}}{dt} = -\Gamma_{\mathbf{w2}}^{ADAPT} \cdot e_{MDL} \cdot \mathbf{in2}, \\ \frac{d\mathbf{W1}}{dt} = -\Gamma_{\mathbf{w1}}^{ADAPT} \cdot e_{MDL} \cdot \mathbf{W2}^T \cdot \frac{d\mathbf{RBF}}{d\mathbf{out1}} \cdot \mathbf{in1}, \end{cases} \quad (3.98)$$

mit

$\mathbf{in1}, \mathbf{out1}, \mathbf{in2}$ – entsprechende Ein- und Ausgänge der ersten bzw. zweiten Schicht.

Der dargestellte Algorithmus bietet mehrere Vorteile. Es erfolgt hierbei eine automatische Anpassung an die Nichtlinearitäten des Positionsregelkreises. Die Stabilität des

Grundregelkreises und Adaptationsregelkreises ist durch die entsprechende Auslegung des Grundreglers und durch die Auswahl des gradientenbasierten Adaptationsverfahrens mit quadratischem Gütekriterium bewiesen. Im Fall der nicht kontinuierlichen Erregung der Systemsignale kann die asymptotische Stabilität des adaptiven Regelungsalgorithmus zwar nicht bewiesen werden, kann die Robustheit allerdings durch die Maßnahmen (3.38 – 3.43) erhöht werden. Prinzipiell sind auch die andere Strukturen des Grundreglers sowie mehrere andere Lernmethoden denkbar.

Die Notwendigkeit der Parametereinstellung des KNN Grundreglers in der Startphase lässt sich in der kleinen vorläufigen offline Phase umgehen.

Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Identifikator

Die allgemeinen Schemas zur adaptiven Regelung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems mit dem Identifikator sind in der Abb.3.14 dargestellt.

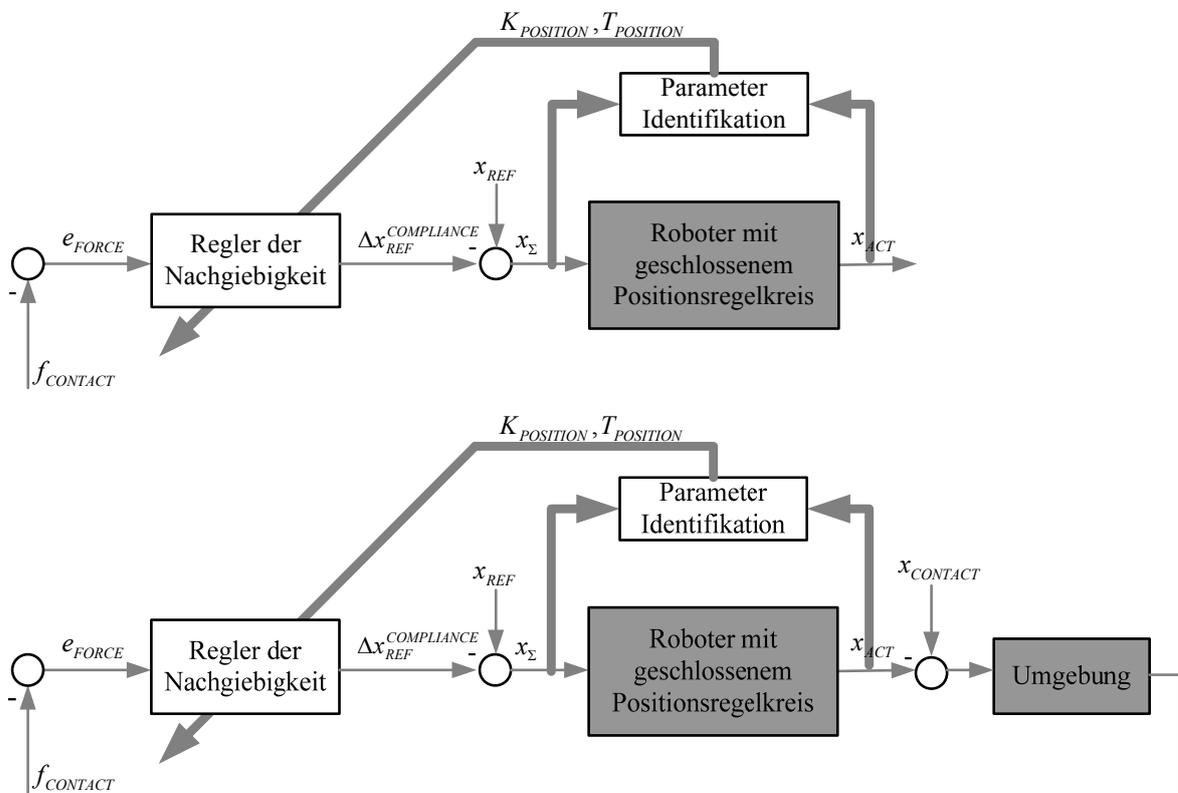


Abb.3.14. Adaptive Nachgiebigkeitsregelung des „Roboter“ Systems mit dem Identifikator (oben) unter dem Eingriff externer Kraft und (unten) im Kontakt mit der Umgebung.

Zur Synthese des Grundreglers wird in diesem Fall keine modale Regelung mit affiner Parametrierung trotz den Aussagen im Unterkapitel 3.4.2.3 verwendet, weil es sich um ein offenen Regelkreis handelt und die Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems gesteuert sondern nicht geregelt wird.

Die am meisten bekannte Methode zur Synthese des Grundreglers wurde von [Lawr87] vorgeschlagen und von [Surd96] modifiziert. Es wurde gezeigt, dass der Grundregler in Form

$$C_{COMPLIANCE}(s) = G_{POSITION}^{-1}(s) \cdot Z_{REF}^{-1}(s) \quad (3.99)$$

eine gewünschte Nachgiebigkeit des Robotersystems gewährleistet.

Allerdings ist die Übertragungsfunktion des geschlossenen Positionsregelkreises $G_{POSITION}(s)$ richtungs- und lageabhängig und wird durch eine Annäherung $\tilde{G}_{POSITION}(s)$ ersetzt:

$$C_{COMPLIANCE}(s) = \tilde{G}_{POSITION}^{-1}(s) \cdot Z_{REF}^{-1}(s). \quad (3.100)$$

Wird Positionsregelkreis $\tilde{G}_{POSITION}(s)$ als Modell erster Ordnung $\frac{K_{POS}}{(1+T_{POS} \cdot s)}$ dargestellt, dann ist der Grundregler im Laplace Bereich:

$$G_{COMPLIANCE}(s) = \frac{(1+T_{POS} \cdot s)}{K_{POS} \cdot K_{REF} \cdot (1+2\xi_{REF}T_{0REF} \cdot s + T_{0REF}^2 \cdot s^2)} \quad (3.101)$$

und im Z-Bereich :

$$G_{COMPLIANCE}(z) = \frac{1 - a_{1POS} \cdot z^{-1}}{(b_{0POS} \cdot b_{0REF}) + (b_{0POS} \cdot b_{1REF}) \cdot z^{-1} + (b_{0POS} \cdot b_{2REF}) \cdot z^{-2}}. \quad (3.102)$$

Die Identifikation der Regelstreckenparameter erfolgt in Form eines adaptiven Identifikators mit oder ohne Messung des Regelstreckenzustandes. Es handelt sich dabei um den Zustand des Robotersystems (Lage, Geschwindigkeit, Drehmoment), der in meisten Fällen verfügbar ist.

Vom Vorteil beider vorgestellten Algorithmen zur Regelung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems ist die Tatsache, dass bei der Einstellung einer gewünschten Federvorspannung des Roboters auf Null $F_{REF} = 0$ keine Umschaltstruktur und keine Detektierung des Kontaktes gebraucht werden. Es wird demzufolge an die Einschränkungen der Bewegung automatisch angepasst.

3.5.3 Adaptive Regelung der Nachgiebigkeit des gebundenen „Manipulator-Umgebung“ Systems

Wird eine gewünschte Nachgiebigkeit des gebundenen „Manipulator-Umgebung“ System angefordert, dann spielen die mechanischen Umgebungseigenschaften eine gleichberechtigte Rolle. Das Regelungsziel besteht in solcher Einstellung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems, welche trotz den variierenden mechanischen Umgebungseigenschaften dem gebundenen „Roboter-Umgebung“ System eine gewünschte Nachgiebigkeit verleiht. Damit sollte der Einfluss von meistens unbekanntem und variierenden Umgebungseigenschaften eliminiert werden. Des Weiteren werden die vorgeschlagenen adaptiven Regelungsalgorithmen entsprechend der eingeführten Klassifikation dargestellt. Die experimentellen Ergebnisse werden im Kapitel 4 gegeben.

Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell [Palis/Rusin04]

Das Schema zur adaptiven Regelung der Nachgiebigkeit des gebundenen „Roboter-Umgebung“ Systems mit dem Referenzmodell ist in der Abb.3.15 dargestellt. Es handelt sich um die Impedanz des gebundenen Systems $Z_{REF}(s) = \frac{f_{CONTACT}(s)}{\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE}(s)}$, da der

Regelungsalgorithmus eine solche Roboterbewegung erzeugen sollte, welche die Kontaktkraft entsprechend dem gewünschten Verhältnis einstellt.

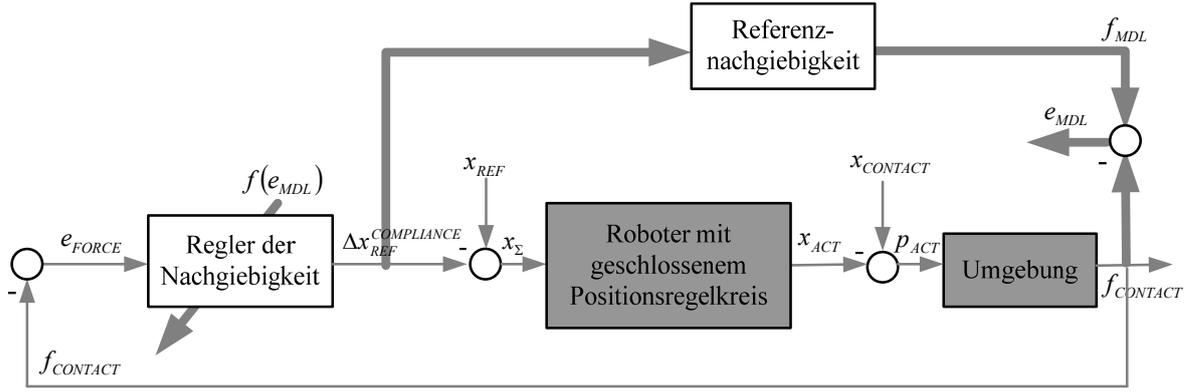


Abb.3.15. Adaptive Nachgiebigkeitsregelung des gebundenen „Manipulator-Umgebung“ Systems mit dem Referenzmodell.

Es wird vorgeschlagen, das Referenzmodell als eine modifizierte Impedanz zu betrachten, was aus der regelungstechnischen Sicht mehr Sinn ergibt:

$$Z_{REF}(s) = \frac{f_{CONTACT}(s)}{\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE}(s)} = \frac{1/K_{REF}}{1 + 2 \cdot \xi_{REF} \cdot T_{0REF} \cdot s + T_{0REF}^2 \cdot s^2} \quad (3.103)$$

Der Grundregler wird hierbei entsprechen der Beschreibung im Unterkapitel 3.4.1.4 ausgelegt (s.Abb.3.8). Die Anpassung der Parameter des Grundreglers erfolgt nach gradientenbasierten Verfahren. Das Adaptationsgesetz (3.52) wird für die ausgewählte Regelungsstruktur unter Berücksichtigung von Gradienten

$$\begin{cases} \nabla_{(w)} = -e_{MDL} \cdot S_{ENV} \cdot \frac{dx_{ACT}}{dx_{\Sigma}} \cdot \frac{d\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE}}{dW}, \\ \nabla_{(\Delta x_{REF}^{ADD})} = -e_{MDL} \cdot S_{ENV} \cdot \frac{dx_{ACT}}{dx_{\Sigma}}. \end{cases} \quad (3.104)$$

folgende Form annehmen:

$$\begin{cases} \frac{dW}{dt} = \Gamma_w \cdot S_{ENV} \cdot e_{MDL} \cdot \frac{dx_{ACT}}{dx_{\Sigma}} \cdot \frac{d\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE}}{dW} = \Gamma_w^{ADAPT} \cdot e_{MDL} \cdot \frac{d(\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE})}{dW}, \\ \frac{d(\Delta x_{REF}^{SIGNAL})}{dt} = \Gamma_{\Delta x_{REF}^{SIGNAL}} \cdot e_{MDL} \cdot S_{ENV} \cdot \frac{dx_{ACT}}{dx_{\Sigma}} = \Gamma_{\Delta x_{REF}^{SIGNAL}}^{ADAPT} \cdot e_{MDL}. \end{cases} \quad (3.105)$$

Wie man sehen kann, beinhaltet auch hier die Gradientenberechnung die richtungs- und lageabhängige Empfindlichkeit des geschlossenen Positionsregelkreises $\partial x_{ACT} / \partial x_{\Sigma}$ sowie die variierende Empfindlichkeit der Umgebung S_{ENV} . Diese werden hierbei ebenfalls zur Berechnung des adaptiven Lernschrittes Γ_w^{ADAPT} bzw. $\Gamma_{\Delta x_{REF}^{SIGNAL}}^{ADAPT}$ zugeordnet.

Bei einer zweischichtigen Netzstruktur mit einer RBF Schicht und einer linearen Schicht nimmt dann der Parameteranpassungsteil des Grundreglers folgende Form an:

$$\begin{cases} \frac{d(\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE})}{dW2} = \mathbf{in2}, \\ \frac{d(\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE})}{dW1} = W2^T \cdot \frac{dRBF}{dout1} \cdot \mathbf{in1}, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{dW2}{dt} = \Gamma_{W2}^{ADAPT} \cdot e_{MDL} \cdot \mathbf{in2}, \\ \frac{dW1}{dt} = \Gamma_{W1}^{ADAPT} \cdot e_{MDL} \cdot W2^T \cdot \frac{dRBF}{dout1} \cdot \mathbf{in1}, \end{cases} \quad (3.106)$$

mit

- in1 , out1 , in2** – entsprechende Ein- und Ausgänge der ersten bzw. zweiten Schicht.

Von Vorteil ist die Tatsache, dass die Notwendigkeit der expliziten Identifikation der mechanischen Umgebungseigenschaften entfällt.

Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Identifikator

Das Schema zur adaptiven Regelung der Nachgiebigkeit des „Manipulator-Umgebung“ Systems mit dem Identifikator ist in der Abb.3.16 dargestellt.

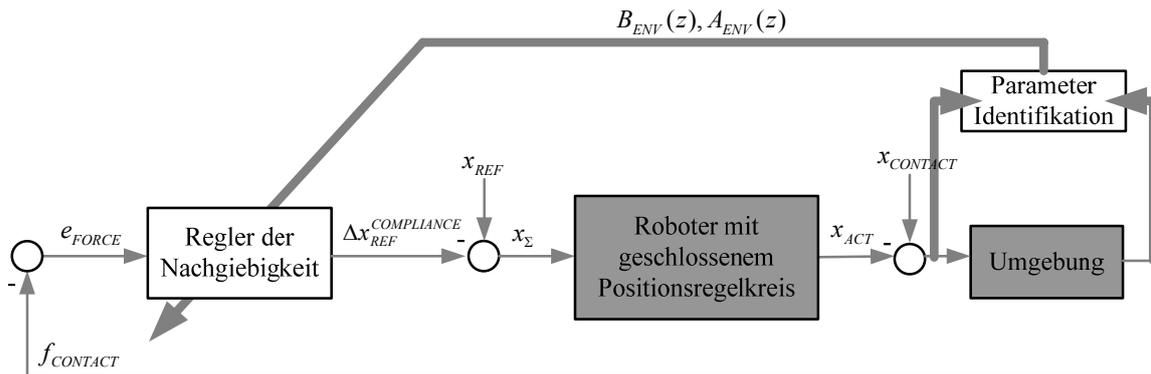


Abb.3.16. Adaptive Regelung der gesamten Nachgiebigkeit des gebundenen „Roboter-Umgebung“ Systems mit dem Identifikator.

Der Regelungsalgorithmus wird dabei in drei Schritten dargestellt. Im ersten Schritt wird die laufende Umgebungsidentifikation $Z_{ENV}(s) = \frac{B_{ENV}(s)}{A_{ENV}(s)}$ durchgeführt, im zweiten Schritt wird die gewünschte Nachgiebigkeit des Roboters anhand der Formel $Z_{ROBOT}(s) = \frac{Z_{ENV}(s) \cdot Z_{COUPLED}(s)}{Z_{ENV}(s) - Z_{COUPLED}(s)}$ ausgerechnet und im dritten Schritt wird die berechnete Roboternachgiebigkeit ausgegelt.

Damit reduziert sich die Regelung der Nachgiebigkeit des „Manipulator-Umgebung“ Systems auf die Regelung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems, was im Unterkapitel 3.5.2 ausführlich beschrieben wurde. Wie es oben bereits erwähnt wurde, beeinflusst die Genauigkeit der Identifikation stark die Regelungsgenauigkeit. Allerdings wird die Dynamik des Grundregelkreises von dem Adaptionsalgorithmus nicht beeinflusst.

3.5.4 Adaptive Nachgiebigkeitsregelung des gebundenen „Schreitroboter-Untergrund“ Systems

Wird eine gewünschte Körpernachgiebigkeit eines mehrbeinigen Schreitroboters angefordert, transformiert sich die Aufgabe in die Einstellung der gewünschten Nachgiebigkeit des gebundenen „Schreitroboterbein-Untergrund“ Systems. Diese Einstellung sollte unabhängig von den tatsächlichen mechanischen Eigenschaften des Untergrundes in den Stützpunkten für jedes gebundene Roboterbein gleich sein. Es handelt sich um die Impedanz des gebundenen

Systems $Z_{REF}(s) = \frac{f_{CONTACT}(s)}{\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE}(s)}$, da der Regelungsalgorithmus eine solche

Roboterbewegung erzeugen sollte, die die Kontaktkraft entsprechend dem gewünschten Verhältnis einstellt. Hierbei muss man berücksichtigen, dass ein mobiler Schreitroboter während der Lokomotion frei agiert und im Kontakt mit dem Untergrund eine offene kinematische Kette bildet. Dadurch ist eine explizite Identifikation mechanischer Untergrundeigenschaften nicht möglich. Es ist ausschließlich machbar, diese Eigenschaften in den Kategorien „steifer als“ bzw. „nachgiebiger als“ einzuschätzen. Außerdem muss man berücksichtigen, dass die Summe vertikaler Komponenten der Kontaktkräfte unter den Roboterfüßen im stationären Betrieb dem Robotergewicht gleich ist. Im dynamischen Betrieb hängen die Kontaktkräfte von der Roboterdynamik und von den mechanischen Eigenschaften des Untergrundes ab. Deshalb sollte eine besondere Beachtung der koordinierten Nachgiebigkeitsregelung von Roboterbeinen abhängig von den mechanischen Untergrundeigenschaften geschenkt werden. Des Weiteren wird ein adaptiver Algorithmus zur Regelung der Nachgiebigkeit des gebundenen „Schreitroboterbein-Untergrund“ Systems dargestellt. Die experimentellen Ergebnisse werden im Kapitel 5 gegeben.

Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell [Palis/Rusin04]

Das Schema zur adaptiven Regelung der Nachgiebigkeit des gebundenen „Schreitroboter-Untergrund“ Systems mit dem Referenzmodell ist in der Abb.3.17 dargestellt.

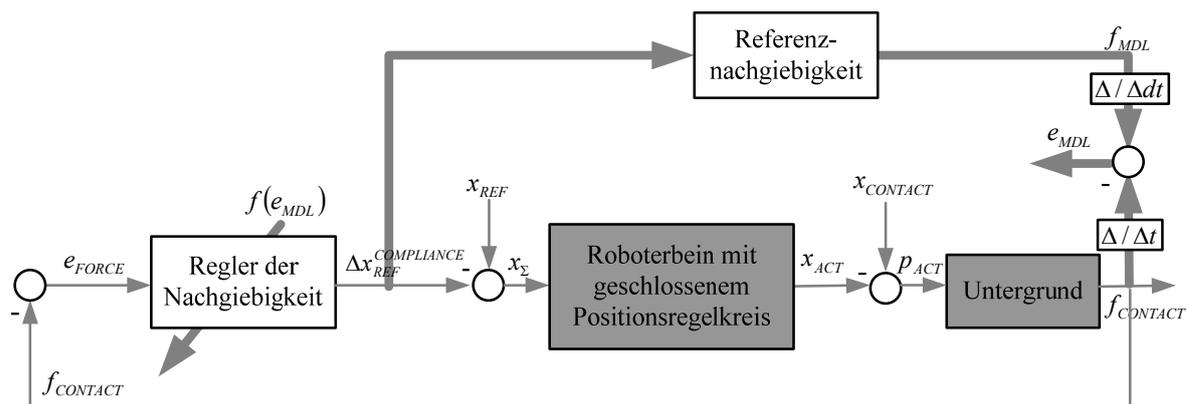


Abb.3.17. Adaptive Regelung der gesamten Nachgiebigkeit des gebundenen „Schreitroboter-Untergrund“ Systems mit Referenzmodell.

Da die expliziten Umgebungseigenschaften $Z_{ENV}(s)$ unbekannt bleiben, ist die direkte Einstellung der gewünschten Nachgiebigkeit des gebundenen Systems

$Z_{COUPLED}(s) = \frac{Z_{LEG}(s) \cdot Z_{GROUND}(s)}{Z_{LEG}(s) + Z_{GROUND}(s)}$ auch nicht möglich. Die Idee des Verfahrens besteht im

Vergleich der Kraftdynamik zwischen dem Referenzmodell und der Kontaktkraft und in der Einstellung des Grundreglers, welche die beobachteten Kraftverläufe identisch macht. Mit anderen Worten, sollte die Änderung der Position die gleiche Änderung der Kontaktkraft im Referenzmodell und im „Schreitroboter-Untergrund“ System hervorrufen. Der Grundregler wird anhand der Differenz $\frac{(\Delta f_{MDL} - \Delta f_{CONTACT})}{\Delta t}$ angepasst.

Die Verfahren zum Entwurf des Grundreglers und Adaptationsreglers sind wie im Unterkapitel 3.5.3. Der einzige Unterschied besteht in der Propagierung des Fehlers über den

Glied zur Ableitungsbildung. Da die Ableitung in diskreter Form durch $((1 - z^{-1})/T_{SAMPLE})$ ersetzt wird, bekommt man in die Berechnung der Gradienten einen zusätzlichen Multiplikator $(1/T_{SAMPLE})$. Wird dieser Multiplikator zur Berechnung des adaptiven Lernschrittes zugeordnet, dann bleibt der Adaptationsregler so wie in den Gleichungen (3.105 – 3.106).

Vorteilhaft ist die Einfachheit der Lösung und Abwesenheit expliziter Identifikation der mechanischen Umgebungseigenschaften. Allerdings ist das Verfahren sehr empfindlich zur Änderung mechanischer Umgebungseigenschaften und braucht als Folge die zusätzlichen Maßnahmen zur Erhöhung der Robustheit.

Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Identifikator

Ein direktes Verfahren zur Einstellung der gewünschten Nachgiebigkeit des gebundenen „Schreitroboter-Untergrund“ Systems ist auch denkbar. Dabei sollten zuerst die mechanischen Untergrundeigenschaften identifiziert werden. Der restliche Systementwurf wird wie im Unterkapitel 3.5.3 für das gebundene „Manipulator-Umgebung“ System durchgeführt. Anders gesagt, wird die gewünschte Nachgiebigkeit des gebundenen „Schreitroboter-Untergrund“ Systems in die gewünschte Nachgiebigkeit des Roboterbeines

$Z_{LEG}(s) = \frac{Z_{GROUND}(s) \cdot Z_{COUPLED}(s)}{Z_{GROUND}(s) - Z_{COUPLED}(s)}$ umgerechnet. Damit wird die Nachgiebigkeitsregelung

des gebundenen „Schreitroboter-Untergrund“ Systems auf die Nachgiebigkeitsregelung des Schreitroboterbeines zurückgeführt.

Für den Fall eines mobilen Schreitroboters ist die Untergrundidentifikation allerdings erst dann möglich, wenn der restliche Teil des Schreitroboters unbeweglich bleibt, d.h. die anderen Beine und der Roboterkörper sollten unbeweglich bleiben. Zur Folge hat es folgende Nachteile:

- Identifikation der Untergrundeigenschaften ist ausschließlich im Belastungsbereich des Robotergewichtes möglich.
- Wird die Identifikation des Untergrundes im laufenden Betrieb angefordert, so wie beispielsweise bei der Bewegung auf dem Untergrund mit variierenden mechanischen Eigenschaften, reduziert das dargestellte Regelungsverfahren stark die Fortbewegungsgeschwindigkeit und ist demzufolge ohne große praktische Bedeutung.

3.6 Regelung der Kontaktkraft

Allgemeine Einführung in die Kontaktkraftregelung wurde im Kapitel 1 gegeben. Das Ersatzschema vom Manipulationsroboter im Kontakt mit der Umgebung ist in der Abb.3.18 gegeben. Dabei wird auf die strukturelle Elastizität des Roboters und auf die Reibungseffekte aufgrund der Untersuchungen aus Kapitel 2 verzichtet. Im Kapitel 1 wurde ebenfalls gezeigt, dass die Kontaktkraftregelung über die Änderung der generalisierten Roboterposition (Beschleunigung/Geschwindigkeit/Lage) kontrolliert wird. Des Weiteren werden die adaptiven Regelungsalgorithmen entsprechend der eingeführten Klassifikation dargestellt.

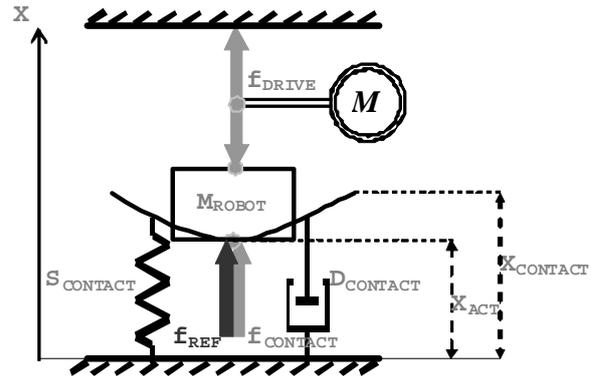


Abb.3.18. Ersatzschema vom Manipulationsroboter im Kontakt mit der Umgebung bei der Kontaktkraftregelung.

3.6.1 Adaptive Kontaktkraftregelung

Oben sind bereits die Probleme angedeutet, welche sich durch die Anpassungsfähigkeit der Regelungsalgorithmen ergeben. Dazu gehören die Nichtlinearitäten und die zeitliche und räumliche Varianz sowohl in der Umgebung als auch im Robotersystem selbst. Das Ziel der Kontaktkraftregelung besteht darin, die gewünschte Kontaktkraft mit der vorgegebenen Qualität der Regelungsdynamik einzustellen. Des Weiteren werden die vorgeschlagenen adaptiven Regelungsalgorithmen entsprechend der eingeführten Klassifikation dargestellt. Die experimentellen Ergebnisse werden im Kapitel 4 gezeigt.

Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell

Das allgemeine Schema zur adaptiven Regelung der Kontaktkraft mit dem Referenzmodell ist in der Abb. 3.19 dargestellt.

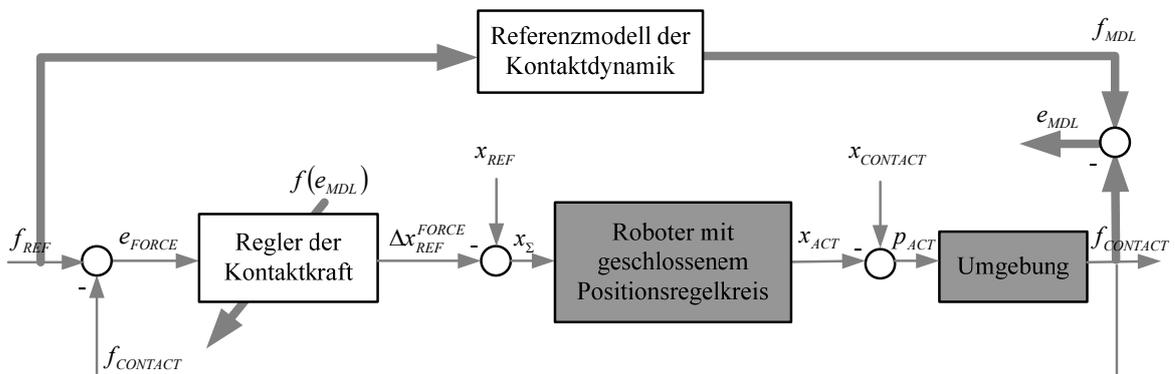


Abb.3.19. Adaptive Kontaktkraftregelung mit Referenzmodell.

Das Verfahren zur Synthese des Grundreglers und des Adaptationsreglers ist wie bei der Nachgiebigkeitsregelung des gebundenen „Manipulator-Umgebung“ Systems. Der einzige Unterschied liegt in der Berechnung des Referenzmodells:

$$\frac{f_{CONTACT}(s)}{f_{REF}(s)} = \frac{1}{1 + 2 \cdot \xi_{REF} \cdot T_{0REF} \cdot s + T_{0REF}^2 \cdot s^2} \quad (3.107)$$

Demzufolge wird auf die Darstellung des Verfahrens nicht expliziter eingegangen. Dieses verfügt auch über die gleichen Vorteile und Nachteile.

Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Identifikator

Das allgemeine Schema zur adaptiven Regelung der Kontaktkraft mit dem Identifikator ist in der Abb.3.20 dargestellt.

Der Regelungsalgorithmus besteht aus zwei Schritten. Im ersten Schritt werden die Parameter des gebundenen „Roboter-Umgebung“ Systems $G_{PLANT}(s)$ bzw. $G_{PLANT}(z)$ ermittelt. Und im zweiten Schritt werden die Koeffizienten eines modalen Reglers mit affiner Parametrierung (3.74 – 3.77) eingestellt.

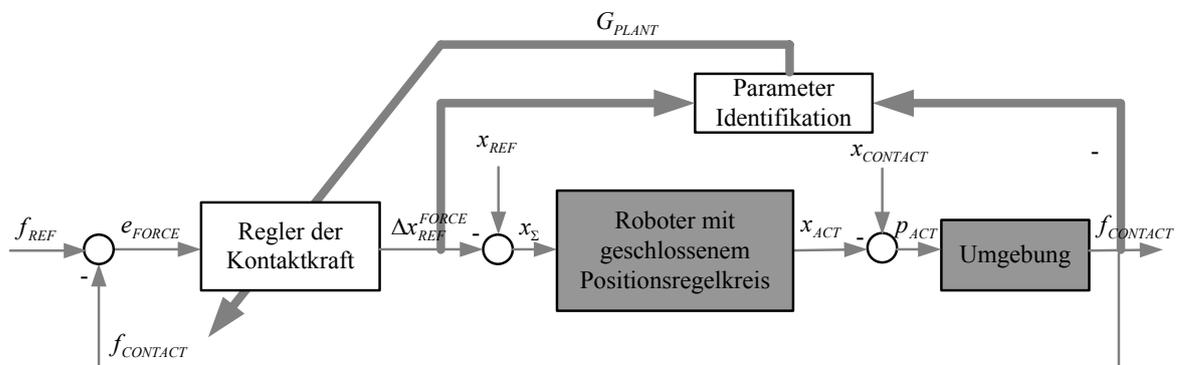


Abb.3.20. Adaptive Kontaktkraftregelung mit dem Identifikator.

Die Identifikation der Regelstreckenparameter erfolgt in Form eines adaptiven Identifikators ohne Messung des Zustandes, da es sich dabei um den Zustand nicht nur des Robotersystems (Lage, Geschwindigkeit, Drehmoment), sondern auch der Umgebung (Kontaktkraft und ihre Ableitungen, Penetration und ihre Ableitungen) handelt. Und dieser Zustand ist meistens nur zum Teil messbar.

Das Verfahren bietet die Vorteile der lagebasierten Regelung und lässt bei bekannten bzw. ermittelten mechanischen Eigenschaften der Umgebung im Kontakt die gewünschte Dynamik des geschlossenen Kraftregelkreises vorgegebenen robusten Eigenschaften implementieren.

Kapitel 4

Experiment- und Simulationsergebnisse der Kontaktaufgaben mit stationären Robotern

Dieses Kapitel beschreibt typische Kontaktaufgaben aus dem industriellen Umfeld bzw. aus dem Servicebereich, präsentiert die zu diesen Zwecken entwickelte Testplattform und stellt die Experiment- und Simulationsergebnisse der ausgewählten Kontaktaufgaben mit stationären Robotern vor.

Zu den stationären Robotern gehören industrielle Manipulationsroboter, die üblich über eine serielle Kinematik verfügen und fest mit der Umgebung verbunden werden. Dazu gehören aber auch die Schreitroboter mit meistens paralleler Kinematik, die mit der Umgebung solange fest verbunden sind, bis die Roboterfüße sich aus den Reibungskegeln lösen. Demzufolge kennzeichnen sich die stationären Roboter dadurch, dass ihr Koordinatensystem relativ zur Weltkoordinaten unbeweglich bleibt und dass diese im Kontakt mit der Umgebung eine geschlossene kinematische Kette bilden. Infolgedessen können die Kontaktkräfte im statischen Betrieb die bezogene Grenze der maximalen Antriebsleistung (für die Manipulationsroboter) bzw. der umgerechneten Reibungskraft (für die Schreitroboter) erreichen und dynamisch diese Grenze je nach Geschwindigkeit der Kontaktnahme stark überschreiten. Ihrerseits bedeuten die Kontaktkräfte die Belastung der Roboterstruktur.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen sowohl die Basiskontaktoperationen, wie die Ermittlung der Kontaktinformation, die Regelung der mechanischen Nachgiebigkeit des Robotersystems bzw. der Kontaktkräfte, als auch die mehr komplizierten industriellen Kontaktaufgaben, die sich in drei folgenden Gruppen mit entsprechenden Anforderungen unterteilen lassen:

Mechanische Montage: die Montageoperationen erfordern die hohe Positionierungsgenauigkeit des Robotersystems in allen Richtungen und sollten mit relativ kleinen Geschwindigkeiten ausgeführt werden. Bei der entsprechenden Genauigkeit der Positionsregelung werden keine Kräfte auf den Endeffektor ausgeübt, ansonsten sollten die entstehenden Kontaktkräfte ausgeregelt werden (Fügevorgänge, Schrauben).

Mechanische Verformung und Oberflächenbearbeitung: die Bearbeitungsaufgaben sind durch die Bahnkurven gekennzeichnet, bei denen die Kontaktkräfte auf dem Endeffektor wirken. Diese Kräfte treten in bestimmten, von der Aufgabe abhängigen Richtungen auf. Die Bewegung des Endeffektors wird in den Richtungen mit hoher Geschwindigkeit und in den Richtungen mit hoher Positionierungsgenauigkeit unterteilt. Je nach Anforderungen könnte diese Gruppe weiter geteilt werden:

- Das Durchfahren von Bahnkurven mit hoher Bahngenauigkeit (Profilfräsen, Schleifen);
- Das Durchfahren von Bahnkurven unter Einhaltung der gewünschten Kontaktkräfte (Polieren, Bohren, Biegen);
- Das Durchfahren von ungenügend bekannten Bahnkurven (Konturverfolgung beim Schweißen, Entgraten, Gußputzen).

Kraftsensorgeführte Objektmanipulation: unter Objekthandhabung werden die Bewegungen des Roboters verstanden, die geringere Anforderungen an die Positioniergenauigkeit stellen, aber hohe Arbeitsgeschwindigkeiten erfordern. Bei stark variierenden Belastungen und nicht anpassungsfähiger Positionsregelung können die Roboterbewegungen nicht optimal ausgeführt werden. Die Kraftsensoren werden zur Ermittlung der Information über die Trägheits- und Gravitationskräfte der Lastmasse verwendet. Es handelt sich um keine Kontaktkräfte und deshalb wird diese Aufgabe im nachfolgenden Teil der Arbeit nicht näher beleuchtet.

Des Weiteren werden die Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen von Basiskontaktoperationen dargestellt, die mit einem industriellen Manipulationsroboter „Mitsubishi RVE3J“ durchgeführt werden. Anschließend werden die Ergebnisse der Experimentuntersuchungen von mehr komplexeren Kontaktaufgaben, die mit einem sechsbeinigen Schreitroboter „Katharina“ durchgeführt werden, wobei die Roboterfüße während der Untersuchungen in den Reibungskegeln bleiben.

4.1 Beschreibung der Testplattform

Die zu den Testzwecken verwendeten Roboter werden in der Abb.4.1 dargestellt.

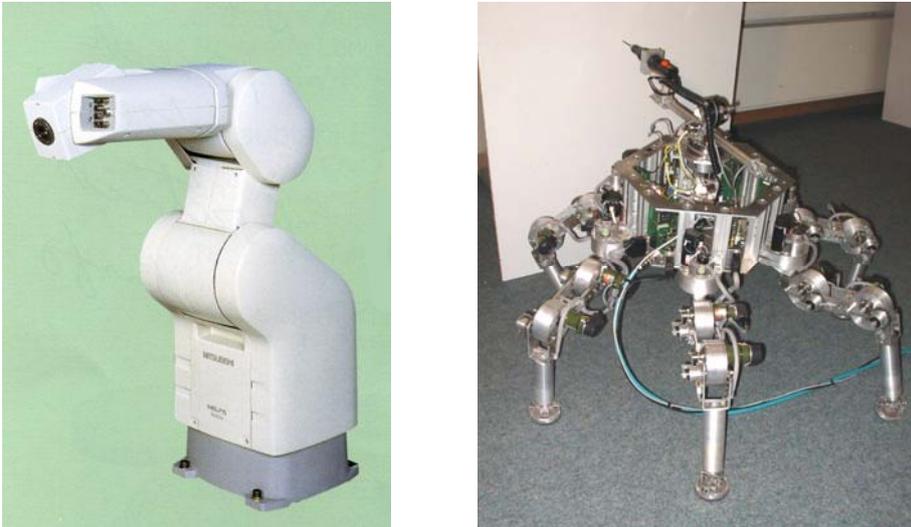


Abb.4.1:(links) ein konventioneller industrieller Manipulationsroboter „Mitsubishi RVE-3J“, (rechts) sechsbeiniger Schreitroboter „Katharina“.

„Mitsubishi RVE3J“ besitzt eine serielle Kinematik mit sechs aktiven rotatorischen Freiheitsgraden, die von AC-Motoren mit Nennleistung 40W und 80W und mit der Getriebeübersetzung 66.7 und 100 angetrieben werden. Das Sensorsystem besteht aus den Strom- und Drehzahlsensoren in jedem Gelenk sowie aus einem 6-Komponenten-Kraftsensor vor dem Endeffektor. Das Steuerungssystem funktioniert mit einer Abtastrate von 1kHz. Das

Gesamtgewicht beträgt 35kg.

„Katharina“ ist einen Schreitroboter mit sechs am prismatischen Körper parallel gekoppelten Beinen. Jedes Bein besitzt eine serielle Kinematik mit 3 aktiven rotatorischen Freiheitsgraden, die von DC-Motoren mit Nennleistung 20W mit der Getriebeübersetzung 1000 angetrieben werden. Zu jedem Bein ist ein Fuß über ein Kardangelenk mit zwei passiven Freiheitsgraden angekoppelt. Das Sensorsystem besteht aus den Drehwinkelsensoren in jedem Gelenk sowie aus den 3-Komponenten-Kraftsensoren in jedem Bein. Das Steuerungssystem funktioniert mit einer Abtastrate von 1kHz. Das Gesamtgewicht beträgt 25kg. „Katharina“ ist im Rahmen einer Kooperation zwischen dem IESY Universität Magdeburg und dem Fraunhofer IFF Magdeburg entwickelt.

Die unten dargestellten Untersuchungen werden in zwei Gruppen geteilt. Die erste Gruppe umfasst die einfachen Basisoperationen, die anhand des Modells des industriellen Manipulationsroboters „Mitsubishi RVE3J“ in einer domäneübergreifenden Umgebung mit der Fähigkeit zur Kontaktbehandlung (s.Abb.4.2) untersucht sind.

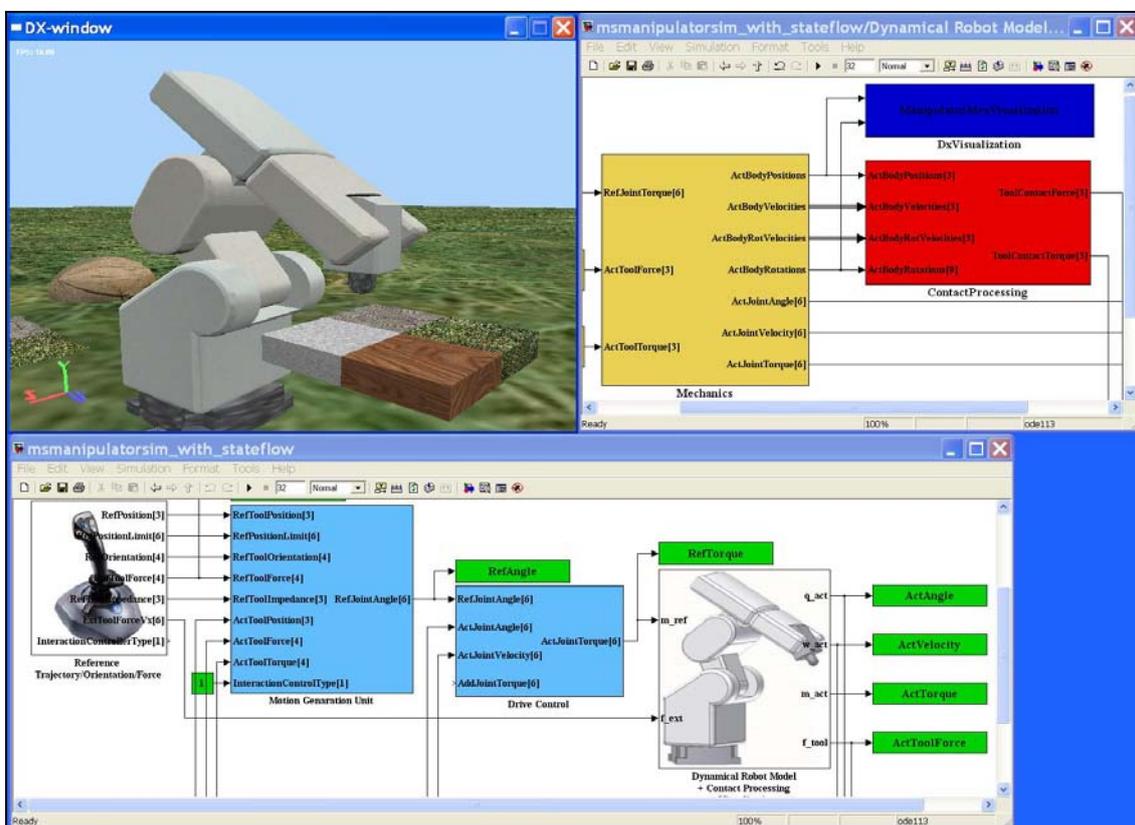


Abb.4.2: Testumgebung zur Untersuchung der Basiskontaktoperationen.

Speziell zu Zwecken der Untersuchungen von Basiskontaktoperationen wurde eine Teststrecke für den Manipulationsroboter entwickelt (s.Abb.4.3). Diese besteht entsprechend den Anforderungen aus drei Teilen: die Ermittlung der Kontaktinformation, die Regelung der mechanischen Nachgiebigkeit des Robotersystems und die Regelung der Kontaktkraft. Zuerst werden die dynamischen Eigenschaften des geschlossenen Positionsregelkreises im kartesischen Koordinatensystem ermittelt (P0-P2). Dann wird die Regelung mechanischer Nachgiebigkeit des Robotersystems bei konstanter und vorgegebener Sollposition des Roboters untersucht (P3-P9). Anschließend werden die mechanischen Eigenschaften der Umgebung identifiziert (P10-P20). Zum Schluss wird die Regelung der Kontaktkraft

untersucht (P10-P27). Die Abbildung spiegelt die Sollwerte zur Positionierung des Endeffektors im kartesischen rechtshändigen Koordinatensystem XYZ.

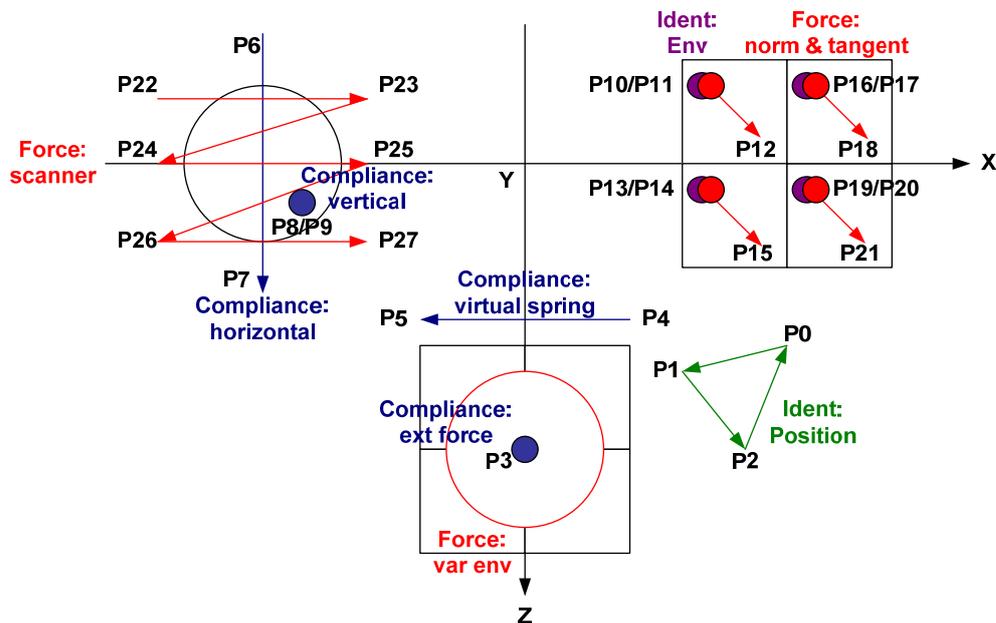


Abb.4.3. Teststrecke zur Untersuchung der Basiskontaktoperationen.

Die zweite Gruppe umfasst die komplexeren Kontaktaufgaben aus dem Servicebereich, die mit dem sechsbeinigen Schreitroboter „Katharina“ untersucht sind.

4.2 Ermittlung der Kontaktinformation

Entsprechend der Untersuchungen aus dem Kapitel 3 kennzeichnet sich das Kontakt durch die meistens unbekannte und mit der Zeit variierende Parameter, wie Kontaktgeometrie (Kontaktposition, Kontakttrichtung, Freiheitsgrade im Kontakt), Kontakttopologie (Anzahl der Kontaktpunkten, Kontaktart) und Kontaktmechanik (Materialelastizität/-restitution etc) beschreiben. Für die erfolgreiche Durchführung der Kontaktaufgaben soll das Steuerungssystem des Roboters in der Lage sein, anhand der Sensordaten diese Parameter zu detektieren bzw. zu ermitteln.

4.2.1 Ermittlung der Kontaktgeometrie

Entsprechend der Einführung aus dem Kapitel 3 werden die unbekanntes Freiheitsgrade des Kontaktraums sowie die Richtung des Kontaktes anhand der gemessenen Information über die Kontaktkräfte ermittelt. Die Normale und Tangente zur Kontaktfläche hängt vom Koordinatensystem des Endeffektors. Ist der Endeffektor beispielsweise entlang der y-Achse im Roboterkoordinatensystem ausgerichtet, werden die normalen und tangentialen Einheitsvektoren im Roboterkoordinatensystem entsprechend der Gleichung (3.1) berechnet. Die Untersuchungen auf einer elliptischen Oberfläche (s.Abb.4.4) nachweisen die zusätzliche Abhängigkeit der Kontaktnormale von der Penetrationstiefe. Von der Penetrationsgeschwindigkeit wurde allerdings keine Abhängigkeit festgestellt.

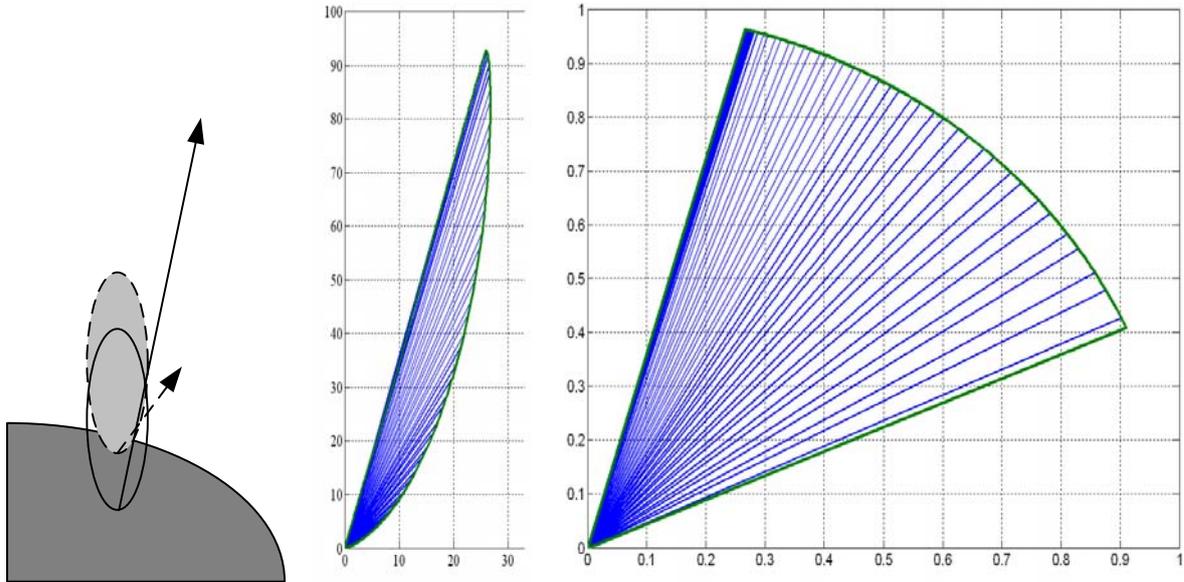


Abb.4.4. (links) Modell und (rechts) Vektoren der Kontaktkraft und der umgerechneten Kontaktnormale während des vertikalen Kontaktes mit einer elliptischen Oberfläche.

4.2.2 Ermittlung der Kontaktmechanik

Entsprechend der Einführung im Kapitel 3 wird die Kontaktmechanik in Form der Übertragungsfunktion erster Ordnung direkt im Z-Bereich ermittelt. Zur Übergang vom Laplace- ins Z-Bereich wird Euler Rückwärtsapproximation $s = \frac{1 - z^{-1}}{T_{SAMPLE}}$ verwendet:

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_{ENV}(s) = \mathbf{S}_{ENV} + \mathbf{D}_{ENV} \cdot s \\ \mathbf{Z}_{ENV}(z) = \mathbf{S}_{ENV} + \mathbf{D}_{ENV} \cdot \left(\frac{1 - z^{-1}}{T_{SAMPLE}} \right) = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 z^{-1}, \end{cases} \quad (4.1)$$

mit

$$\begin{cases} \mathbf{b}_0 = \mathbf{S}_{ENV} + \frac{\mathbf{D}_{ENV}}{T_{SAMPLE}}, \\ \mathbf{b}_1 = -\frac{\mathbf{D}_{ENV}}{T_{SAMPLE}}. \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \mathbf{S}_{CONTACT} = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1, \\ \mathbf{D}_{CONTACT} = -\mathbf{b}_1 \cdot T_{SAMPLE}. \end{cases}$$

Die Untersuchungen zur Identifikation der Kontaktmechanik wurden auf vier Oberflächen mit verschiedenen mechanischen Eigenschaften durchgeführt. Laut der Untersuchungen aus dem Kapitel 2 hängt der Koeffizient der irreversiblen Energiezerstreuung (entweder Dämpfer oder Restitution) von den Kontaktbedingungen, wie Anstoßgeschwindigkeit, Kontaktfläche, Kontaktvolumen, etc ab. Deshalb wurden die Kontaktbedingungen für alle vier Oberflächen konstant gehalten. Zur Anpassung der Koeffizienten wurde die gradientenbasierte Methode mit adaptiver Schrittlänge verwendet. Die experimentellen Ergebnisse sind in der Abb.4.5 dargestellt und beweisen die praktische Tauglichkeit der ausgewählten einfachen Identifikationsstruktur im Zusammenhang mit dem adaptiven Lernalgorithmus.

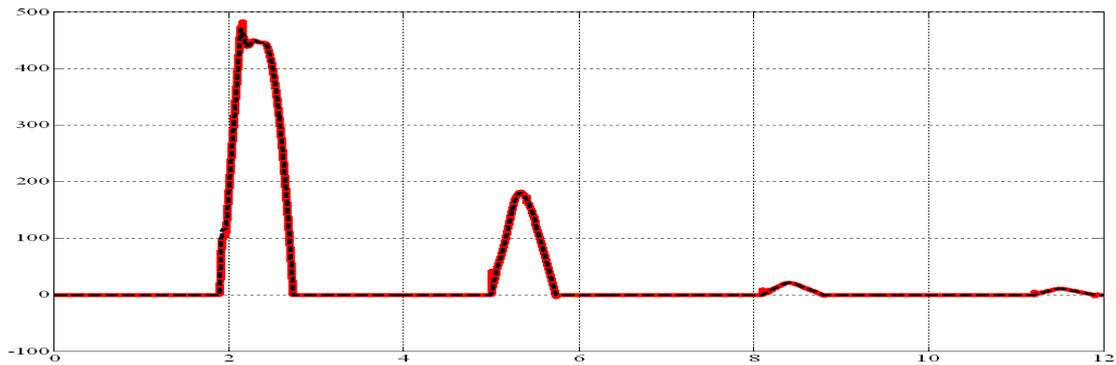


Abb.4.5.(a) Die (rot) gemessene und (schwarz) beobachtete Kontaktkraft.

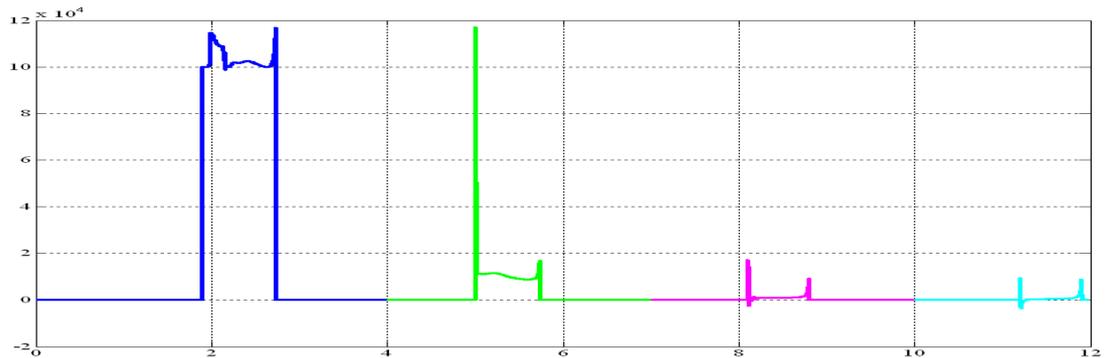


Abb.4.5.(b) Die ermittelten Werte der Steifigkeit bei vier verschiedenen Oberflächen: (von links nach rechts) $S_{ENV1} = 10^5 [N/m]$, $S_{ENV2} = 10^4 [N/m]$, $S_{ENV3} = 10^3 [N/m]$, $S_{ENV4} = 10^2 [N/m]$.

4.3 Adaptive Regelung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems

Bei der Nachgiebigkeitsregelung des „Roboter“ Systems unterscheidet man zwei kennzeichnenden Fälle: (1) man übt auf den Roboter eine externe Kraft aus und (2) der Manipulationsroboter tritt die Umgebung während der Bewegung entlang gewünschter Bahn. In beiden Fälle besteht das Regelungsziel in der Einstellung der gewünschten

Roboternachgiebigkeit $Z_{REF}(s) = Z_{ROBOT}(s) = \frac{f_{CONTACT}(s)}{x_{ACT}(s) - x_{REF}(s)}$. Die Auswahl der

gewünschten Nachgiebigkeit $Z_{REF}(s)$ erfolgt anhand der apriori Information über die Kontaktaufgabe und auf die Änderung mechanischer Umgebungseigenschaften wird verzichtet.

Bei der Aufbau und der Durchführung der Untersuchungen sind die theoretischen Grundlagen aus dem Kapitel 3 verwendet. Dabei wird die gewünschte Nachgiebigkeit $Z_{REF}(s)$ in Form (3.88) als Übertragungsmodell zweiter Ordnung verwendet.

4.3.1 Adaptive Regelung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems unter dem Eingriff externer Kraft

Zur Regelung der Roboternachgiebigkeit im Fall des Eingriffes externer Kraft werden sowohl die Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell als auch die Regelungsalgorithmen mit dem Identifikator verwendet.

Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell

Die Implementierung der adaptiven Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell zur Regelung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems unter dem Eingriff externer Kraft wird entsprechend der Abb.4.6 durchgeführt. Hierbei handelt es sich um die Regelung der

Roboteradmittanz $Z_{REF}^{-1}(s) = \frac{\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE}(s)}{f_{CONTACT}(s)}$, da die externe Kraft die Roboterbewegung beeinflusst.

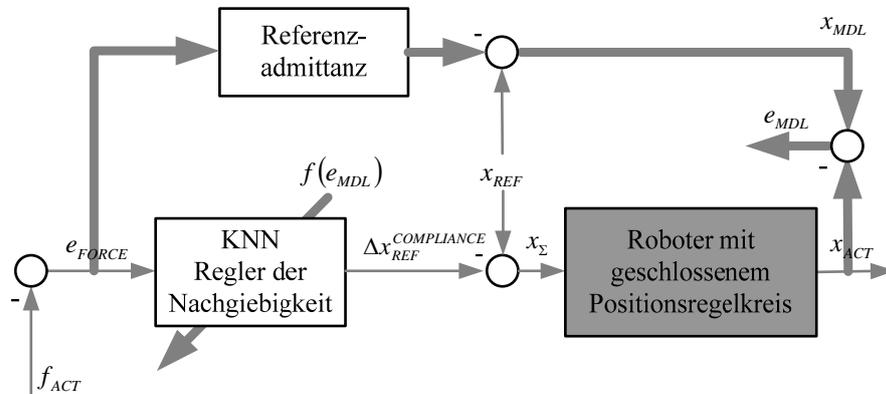


Abb.4.6. Adaptive Nachgiebigkeitsregelung des „Roboter“ Systems mit dem Referenzmodell unter dem Eingriff externer Kraft.

Der Grundregler ist entsprechen der Beschreibung im Unterkapitel 3.4.1.4 als zweischichtiger Perzeptron mit einer RBF Schicht und einer linearen Schicht (s.Abb.3.8) ausgelegt. Auf die Signalanpassung ist in diesem Fall verzichtet. Die Anpassung der Parameter des Grundreglers erfolgt nach dem gradientenbasierten Verfahren entsprechend (3.97 – 3.98). Die Funktionsfähigkeit des Regelungsalgorithmus ist in zwei folgenden Experimenten nachgewiesen.

Das erste Experiment (s.Abb.4.7) beschreibt die Änderung der Roboterposition in drei kartesischen Richtungen als Reaktion auf das sprungartige Anlegen der externen Kraft $f_{ACT} = 50[N]$. Diese Kraft wird durch den Algorithmus der Nachgiebigkeitsregelung mit der Federvorspannung $f_{REF} = 0[N]$ geleitet. Die Referenzposition des Roboters bleibt während des Experimentes konstant $x_{REF} = const$. Die Positionsänderung erfolgt entsprechend der ausgewählten gewünschten Nachgiebigkeitsparameter $K_{REF} = 500[N/m]$, $\xi_{REF} = 1.0$, $\omega_{0REF} = 10[Hz]$. Die Analyse der Ergebnisse zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen gewünschtem und tatsächlichem Positionsverlauf des Roboters. Die unbedeutenden Abweichungen sind mit der laufenden Anpassung der Grundreglerparameter verbunden. Bedingt durch die Anpassungsgeschwindigkeit steigen die genannten Abweichungen mit dem Anstieg der gewünschten Bandbreite der Nachgiebigkeitsregelung. Die tatsächliche Bandbreite ist zusätzlich durch die Bandbreite des inneren Positionsregelkreises begrenzt.

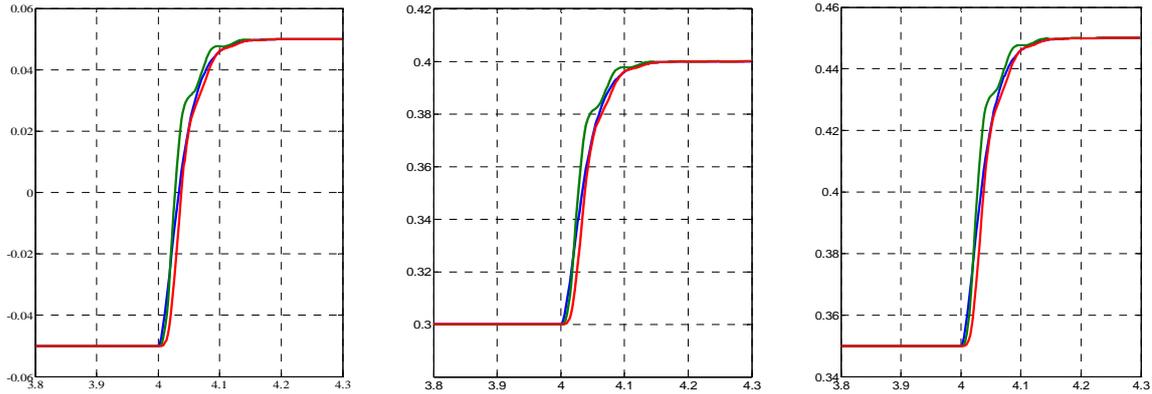


Abb.4.7. (blau) – idealer Positionsverlauf in [m], (grün) – Sollwert für den Positionsregelkreis in [m], (rot) – Antwort des Positionsregelkreises in [m].

Das zweite Experiment (s.Abb.4.8) beschreibt die Änderung der Roboterposition in einer kartesischen Richtung als Reaktion auf das sprungartige Anlegen der externen Kraft $f_{ACT} = \pm 50[N]$. Dabei bewegt sich die Referenzposition des Roboters nach dem Gesetz $x_{REF} = \sin(2\pi \cdot t)$. Die restlichen Bedingungen sowie die Ergebnisanalyse gelten wie im ersten Experiment.

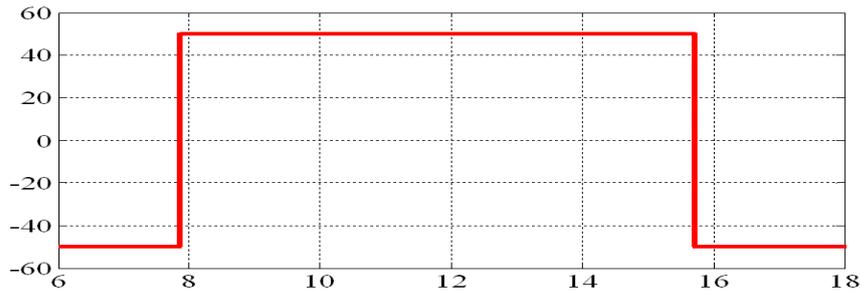


Abb.4.8.(a) Die wirkende externe Kraft.

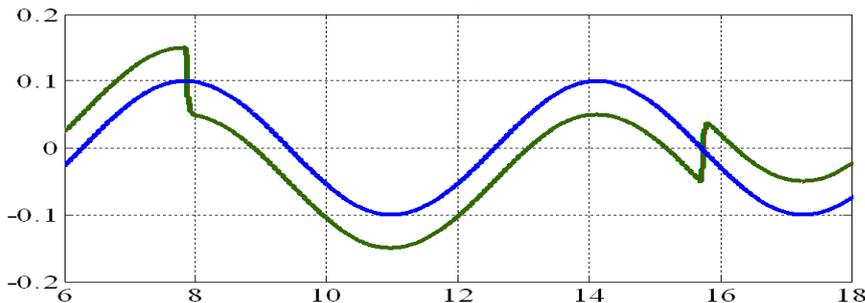


Abb.4.8.(b) (blau) – gewünschter Positionsverlauf in [m], (grün) – Sollwert für den Positionsregelkreis in [m], (rot) – Antwort des Positionsregelkreises in [m].

Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Identifikator

Die Implementierung der adaptiven Regelungsalgorithmen mit dem Identifikator zur Regelung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems unter dem Eingriff externer Kraft wird entsprechend der Abb.4.9 durchgeführt. Hierbei handelt es sich um die Regelung der

Roboteradmittanz $Z_{REF}^{-1}(s) = \frac{\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE}(s)}{f_{CONTACT}(s)}$, da die externe Kraft die Roboterbewegung beeinflusst.

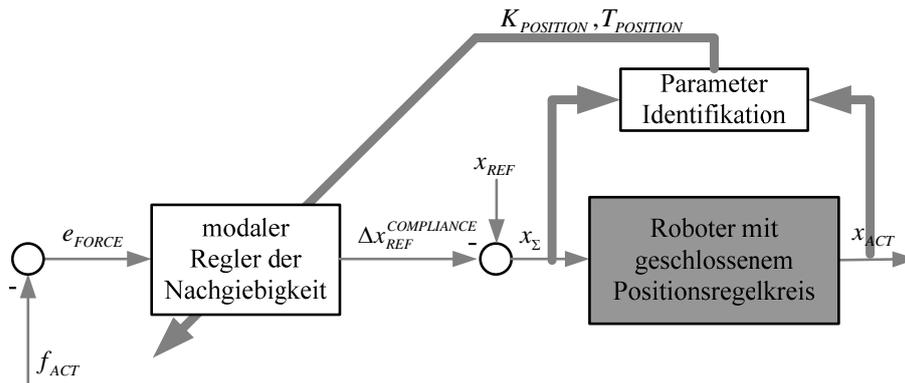


Abb.4.9. Adaptive Nachgiebigkeitsregelung des „Roboter“ Systems mit dem Identifikator unter dem Eingriff externer Kraft.

Der Grundregler ist entsprechen der Beschreibung im Unterkapitel 3.5.2 als modaler Regler (3.99) ausgelegt. Die Anpassung der Parameter des Grundreglers erfolgt gleichzeitig mit der laufenden Identifikation des geschlossenen Positionsregelkreises entsprechend (3.100 – 3.102).

Die Änderung der Roboterposition in drei kartesischen Richtungen (s.Abb.4.10) erfolgt als Reaktion auf das sprungartige Anlegen der externen Kraft $f_{ACT} = 50[N]$. Die Federvorspannung $f_{REF} = 0[N]$ liegt auch in diesem Experiment bei Null. Die Referenzposition des Roboters bleibt während des Experimentes konstant $x_{REF} = const$. Die Positionsänderung erfolgt entsprechend der ausgewählten gewünschten Nachgiebigkeitsparameter $K_{REF} = 500[N/m]$, $\xi_{REF} = 1.0$, $\omega_{OREF} = 10[Hz]$. Die Analyse der Ergebnisse zeigt eine akzeptable Übereinstimmung zwischen idealem und tatsächlichem Positionsverlauf des Roboters. Die Abweichungen sind durch die Geschwindigkeit der laufenden Identifikation des inneren geschlossenen Positionsregelkreises beeinflusst. Infolgedessen steigen die genannten Abweichungen mit dem Anstieg der gewünschten Bandbreite der Nachgiebigkeitsregelung. Die tatsächliche Bandbreite ist zusätzlich durch die Bandbreite des inneren Positionsregelkreises sowie durch die Konvergenzgeschwindigkeit des Identifikationsalgorithmus begrenzt.

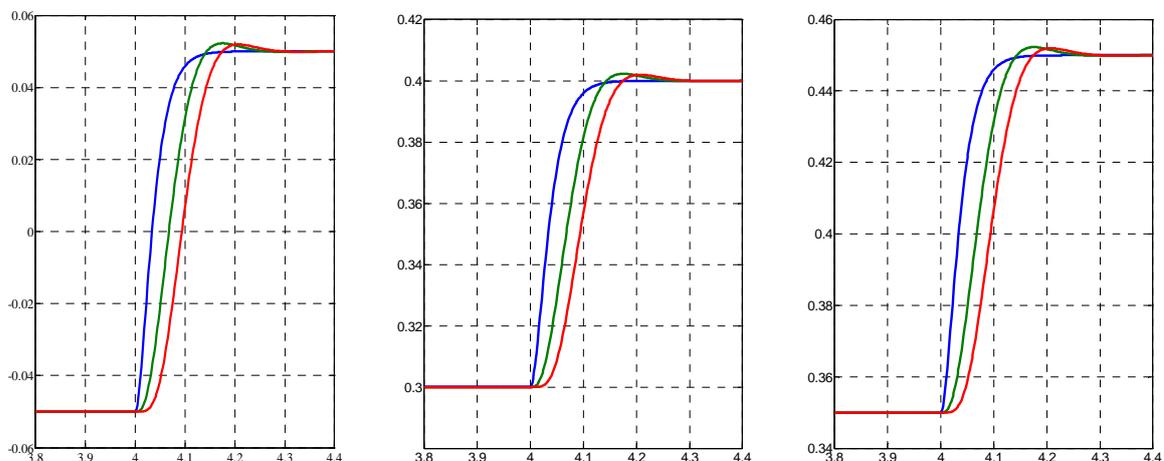


Abb.4.10. (blau) – idealer Positionsverlauf in [m], (grün) – Sollwert für den Positionsregelkreis in [m], (rot) – Antwort des Positionsregelkreises in [m].

4.3.2 Adaptive Regelung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems im Kontakt mit der Umgebung

Tritt das Robotersystem während der Bewegung entlang der gewünschten Bahn mit einem Hindernis in Kontakt, so entsteht die Kontaktkraft. Zur Regelung der Roboternachgiebigkeit als Reaktion auf der entstehenden Kontaktkraft werden sowohl die Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell als auch die Regelungsalgorithmen mit dem Identifikator verwendet.

Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell

Die Implementierung der adaptiven Nachgiebigkeitsregelung des „Roboter“ Systems mit dem Referenzmodell im Kontakt mit der Umgebung wird entsprechend der Abb.4.11 durchgeführt.

Hierbei handelt es sich um die Regelung der Roboteradmittanz $Z_{REF}^{-1}(s) = \frac{\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE}(s)}{f_{CONTACT}(s)}$, da die Reaktionskraft des Kontaktes die Roboterbewegung beeinflusst.

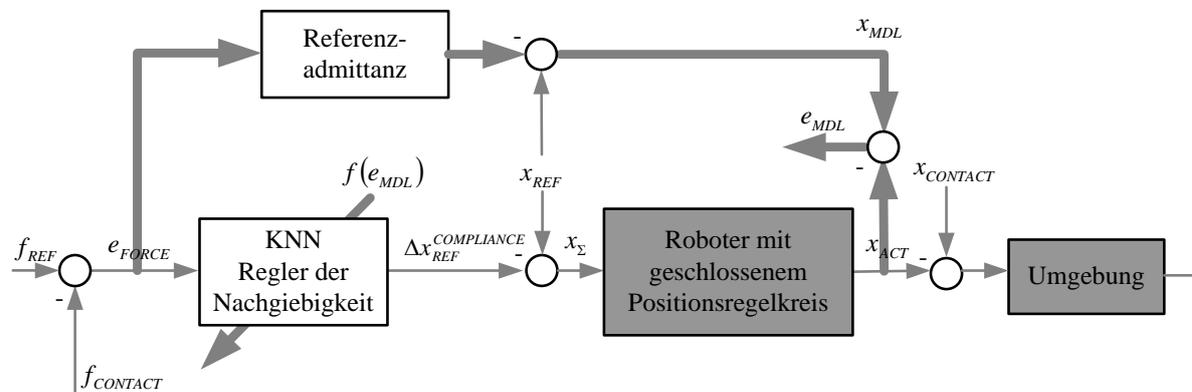


Abb.4.11. Adaptive Nachgiebigkeitsregelung des „Roboter“ Systems mit dem Referenzmodell im Kontakt mit der Umgebung.

Der Grundregler ist entsprechen der Beschreibung im Unterkapitel 3.4.1.4 als zweischichtiger Perzeptron mit einer RBF Schicht und einer linearen Schicht (s.Abb.3.8) ausgelegt. Die Anpassung der Parameter des Grundreglers erfolgt nach dem gradientenbasierten Verfahren entsprechend (3.97 – 3.98).

Die Funktionsfähigkeit des Regelungsalgorithmus ist in folgendem Experiment nachgewiesen. Die gewünschte Roboterposition ändert sich sprunghaft auf $x_{REF} = -0.1[m]$ und führt zum Anstoßen mit einem Hindernis in der Position $x_{CONTACT} = 0[m]$. Die Positions- und Kontaktkraftänderung erfolgen entsprechend der ausgewählten gewünschten Nachgiebigkeitsparameter $K_{REF} = 1000[N/m]$, $\xi_{REF} = 1.0$, $\omega_{0REF} = 50[Hz]$. Die Kontaktkraft wird durch den Algorithmus der Nachgiebigkeitsregelung mit $f_{REF} = 50[N]$ geleitet und führt nach den Übergangvorgänge zu einem stationären Zustand:

$$\begin{cases} x_{ACT} = \left(\frac{S_{ROBOT} \cdot x_{REF}}{S_{ROBOT} + S_{ENV}} \right) + \left(\frac{S_{ENV} \cdot x_{CONTACT}}{S_{ROBOT} + S_{ENV}} \right) - \left(\frac{f_{REF}}{S_{ROBOT} + S_{ENV}} \right), \\ f_{CONTACT} = \left(\frac{S_{ROBOT} \cdot S_{ENV}}{S_{ROBOT} + S_{ENV}} \right) \cdot \left(x_{CONTACT} - x_{REF} + \frac{f_{REF}}{S_{ROBOT}} \right). \end{cases} \quad (4.2)$$

Da es sich während der Nachgiebigkeitsregelung um die Änderung der Position handelt, sollte der zweite Summand bei der Berechnung x_{ACT} und $x_{CONTACT} = 0[m]$ nicht eliminiert werden. Die Gleichung (4.2) bleibt gültig, wenn die beiden Werte x_{REF} und $x_{CONTACT}$ imaginär mit einer konstanten Position von Null verschoben werden.

Die Analyse der Untersuchung an zwei verschiedenen Umgebungen (s.Abb.4.12) zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen idealem und tatsächlichem Positionsverlauf des Roboters. Die Bandbreite des inneren Positionsregelkreises beeinflusst die dynamischen Abweichungen sowie Spitzen in der Kontaktkraft beim Auftreten steifer Umgebung.

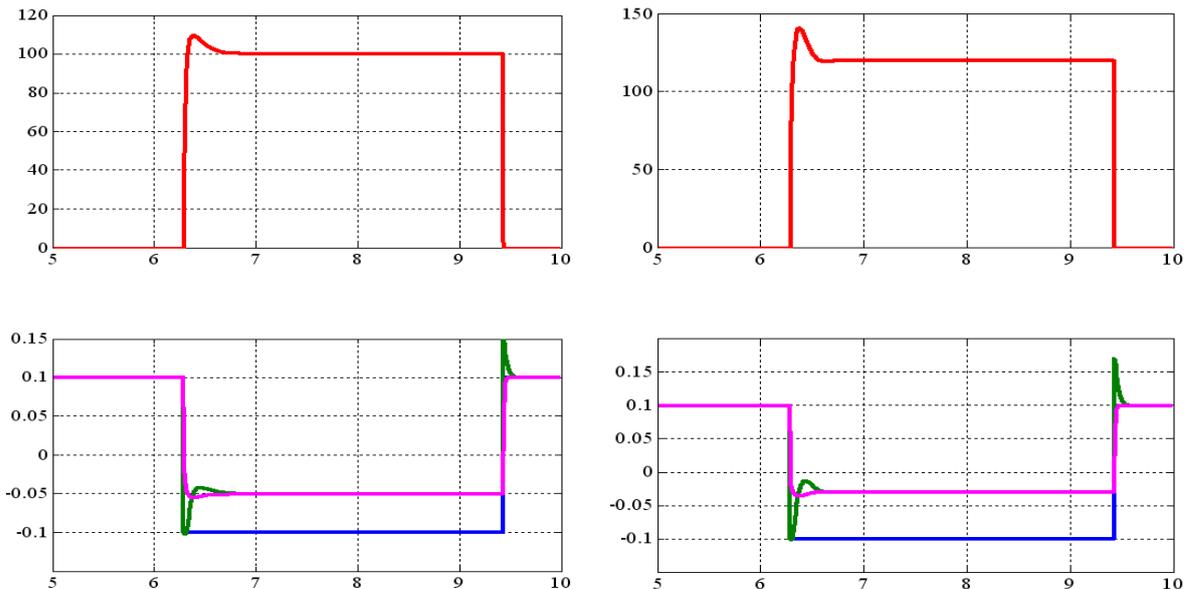


Abb.4.12. (rot oben) –Kontaktkraft in [N], (blau unten) – Referenzposition in [m], (magenta unten) – idealer Positionsverlauf im Kontakt in [m], (grün unten) – Antwort des Positionsregelkreises im Kontakt in [m]. Parameter des Kontaktes: (links) $S_{ENV1} = 2 \cdot 10^3 [N/m]$, (rechts) $S_{ENV2} = 4 \cdot 10^3 [N/m]$.

Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Identifikator

Die Implementierung der adaptiven Regelungsalgorithmen mit dem Identifikator zur Regelung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems im Kontakt mit der Umgebung wird entsprechend der Abb.4.13 durchgeführt. Hierbei handelt es sich um die Regelung der

Roboteradmittanz $Z_{REF}^{-1}(s) = \frac{\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE}(s)}{f_{CONTACT}(s)}$, da die externe Kraft die Roboterbewegung beeinflusst.

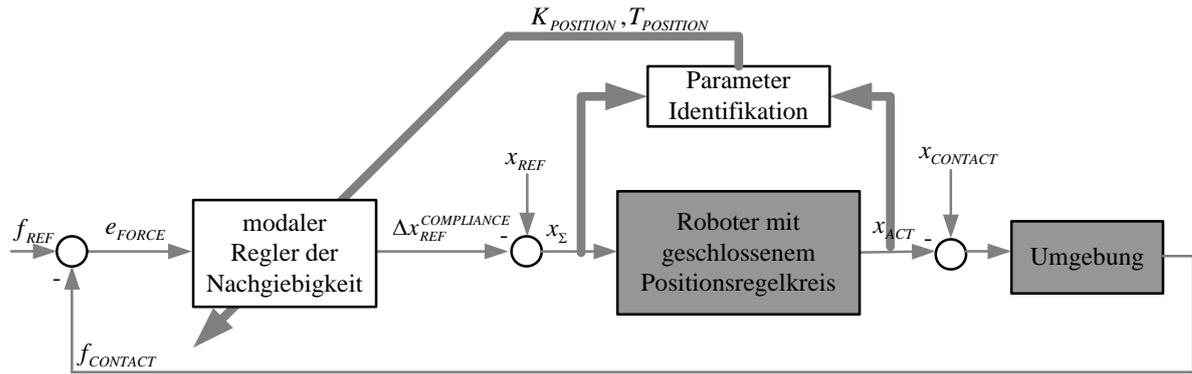


Abb.4.13. Adaptive Nachgiebigkeitsregelung des „Roboter“ Systems mit dem Identifikator im Kontakt mit der Umgebung.

Der Grundregler ist entsprechen der Beschreibung im Unterkapitel 3.5.2 als modaler Regler (3.99) ausgelegt. Die Anpassung der Parameter des Grundreglers erfolgt gleichzeitig mit der laufenden Identifikation des geschlossenen Positionsregelkreises entsprechend (3.100 – 3.102).

Die Funktionsfähigkeit des Regelungsalgorithmus ist in gleichem Experiment wie oben nachgewiesen. Auch hier ändert sich die gewünschte Roboterposition sprungartig auf $x_{REF} = -0.1[m]$ und führt zum Anstoßen mit einem Hindernis in der Position $x_{CONTACT} = 0[m]$. Die gewünschten Nachgiebigkeitsparameter bleiben $K_{REF} = 1000[N/m]$, $\xi_{REF} = 1.0$, $\omega_{0REF} = 50[Hz]$. Die Kontaktkraft wird durch den Algorithmus der Nachgiebigkeitsregelung mit $f_{REF} = 50[N]$ geleitet und führt nach den Übergangvorgänge zu einem stationären Zustand (4.2).

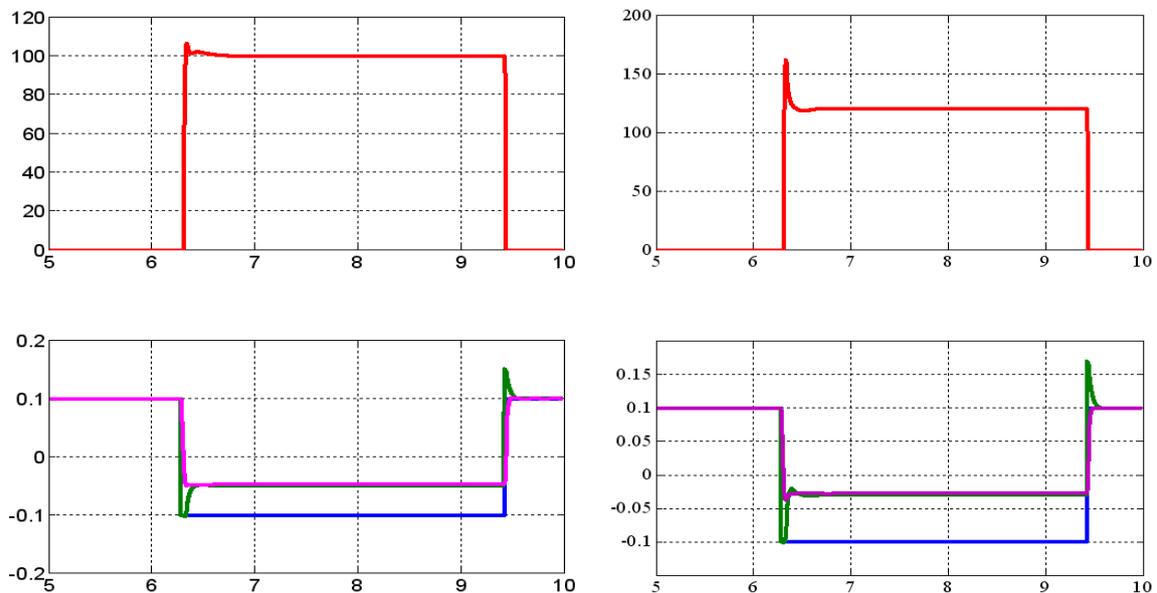


Abb.4.14. (rot oben) –Kontaktkraft in $[N]$, (blau unten) – Referenzposition in $[m]$, (magenta unten) – idealer Positionsverlauf im Kontakt in $[m]$, (grün unten) – Antwort des Positionsregelkreises im Kontakt in $[m]$. Parameter des Kontaktes: (links) $S_{ENV1} = 2 \cdot 10^3[N/m]$, (rechts) $S_{ENV2} = 4 \cdot 10^3[N/m]$.

Die Analyse der Untersuchung an zwei verschiedenen Umgebungen (s.Abb.4.14) zeigt die ähnlich gute Übereinstimmung zwischen idealem und tatsächlichem Positionsverlauf des Roboters. Die notwendige Zeit zur Konvergenz des Identifikationsalgorithmus bewirkt die vergleichbar größeren aber dennoch akzeptablen Spitzen in der Kontaktkraft.

4.4 Adaptive Regelung der Nachgiebigkeit des „Manipulationsroboter-Umgebung“ Systems

Die Regelung der Nachgiebigkeit des gebundenen „Roboter-Umgebung“ Systems tritt hingegen auf, wenn eine gewünschte Nachgiebigkeit nicht allein vom Roboter sondern vom gebundenen System angefordert wird. Die mechanischen Umgebungseigenschaften spielen in der Systemdynamik eine gleichberechtigte Rolle und sollten dennoch das Verhalten und insbesondere die Stabilität des gebundenen Systems nicht beeinträchtigen. Das Regelungsziel besteht in solcher Einstellung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems, welche trotz den variierenden mechanischen Umgebungseigenschaften dem gebundenen „Roboter-Umgebung“ System eine gewünschte Nachgiebigkeit

$$Z_{REF}(s) = Z_{COUPLED}(s) = \frac{Z_{ROBOT}(s) \cdot Z_{ENV}(s)}{Z_{ROBOT}(s) + Z_{ENV}(s)} \quad (4.3)$$

verleiht. Damit sollte der Einfluss von meistens unbekanntem und variierenden Umgebungseigenschaften eliminiert werden.

Bei der Aufbau und der Durchführung der Untersuchungen sind die theoretischen Grundlagen aus dem Kapitel 3 verwendet. Dabei wird die gewünschte Nachgiebigkeit $Z_{REF}(s)$ in Form (3.88) als Übertragungsmodell zweiter Ordnung verwendet.

Des Weiteren wird allerdings der adaptive Regelungsalgorithmus mit dem Referenzmodell repräsentiert. Aufgrund der Auslegungen im Unterkapitel 3.5.3 lässt sich die Nachgiebigkeitsregelung des gebundenen Systems mit dem Identifikator nach dem Identifikationsvorgang der mechanischen Umgebungseigenschaften anhand folgender Umrechnung:

$$Z_{ROBOT}(s) = \frac{Z_{ENV}(s) \cdot Z_{COUPLED}(s)}{Z_{ENV}(s) - Z_{COUPLED}(s)} \quad (4.4)$$

auf die Nachgiebigkeitsregelung des „Roboter“ Systems $Z_{ROBOT}(s)$ zurückführen, deren Ergebnisse bereits im Unterkapitel 4.3 dargestellt sind.

Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell

Die Implementierung der adaptiven Nachgiebigkeitsregelung des gebundenen „Manipulator-Umgebung“ Systems mit dem Referenzmodell wird entsprechend der Abb.4.15 durchgeführt.

Hierbei handelt es sich um die Regelung der Roboterimpedanz $Z_{REF}(s) = \frac{f_{CONTACT}(s)}{\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE}(s)}$, da die Roboterbewegung die externe Kraft beeinflusst.

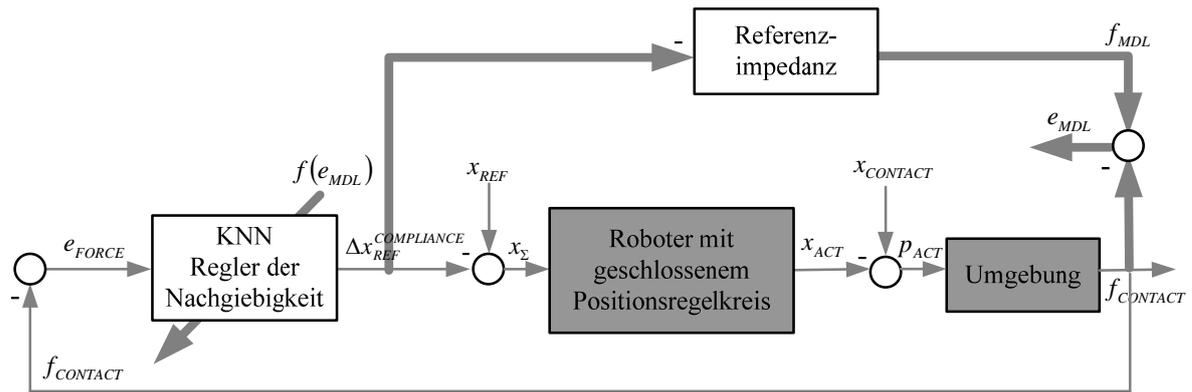


Abb.4.15. Adaptive Nachgiebigkeitsregelung des gebundenen „Manipulator-Umgebung“ Systems mit dem Referenzmodell.

Die Funktionsfähigkeit des Regelungsalgorithmus ist im gleichen Experiment wie oben nachgewiesen. Auch hier ändert sich die gewünschte Roboterposition sprunghaft auf $x_{REF} = -0.1[m]$ und führt zum Anstoßen mit einem Hindernis in der Position $x_{CONTACT} = 0[m]$. Die gewünschten Nachgiebigkeitsparameter bleiben $K_{REF} = S_{COUPLED} = 1000[N/m]$, $\xi_{REF} = 1.0$, $\omega_{0REF} = 50[Hz]$. Die Kontaktkraft wird durch den Algorithmus der Nachgiebigkeitsregelung mit $f_{REF} = 0[N]$ geleitet und führt nach den Übergangvorgänge zu einem stationären Zustand:

$$\begin{cases} x_{ACT} = \frac{S_{COUPLED}}{S_{ENV}} \cdot x_{REF} + \frac{S_{ENV} - S_{COUPLED}}{S_{ENV}} \cdot x_{CONTACT}, \\ f_{CONTACT} = S_{COUPLED} \cdot (x_{CONTACT} - x_{REF}). \end{cases} \quad (4.5)$$

Die Analyse der Untersuchung an zwei verschiedenen Umgebungen (s.Abb.4.16) zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen idealem und tatsächlichem Kontaktkraftverlauf.

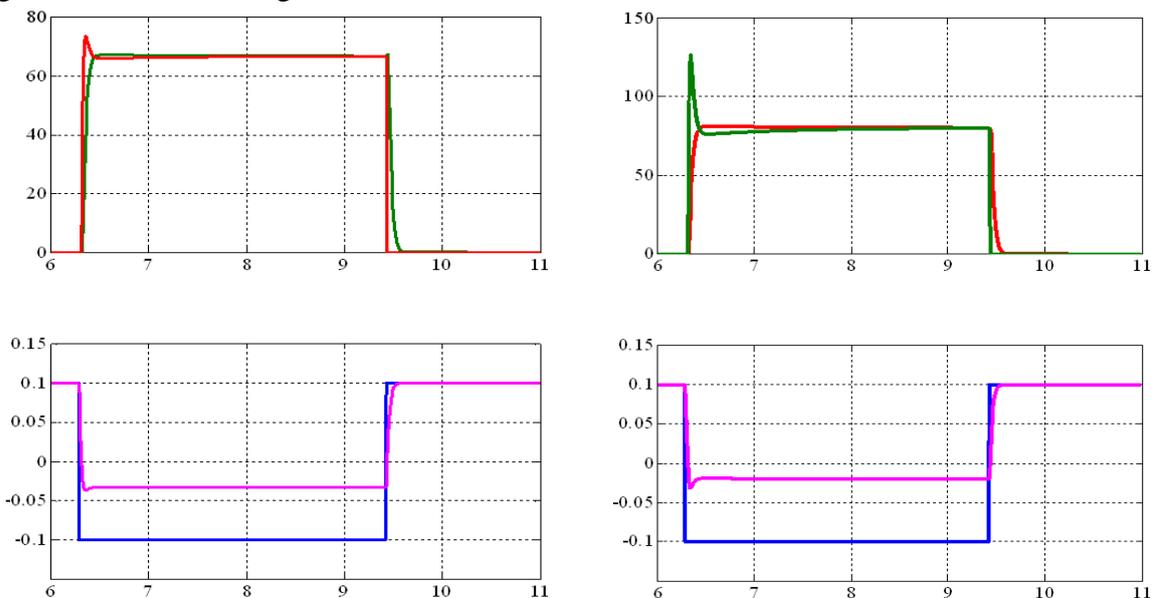


Abb.4.16. (grün oben) – Referenzwert der Kontaktkraft in [N], (rot oben) – tatsächliche Kontaktkraft in [N], (blau unten) – Referenzposition in [m], (magenta unten) – Antwort des Positionsregelkreises im Kontakt in [m]. Parameter des Kontaktes: (links) $S_{ENV1} = 2 \cdot 10^3[N/m]$, (rechts) $S_{ENV2} = 4 \cdot 10^3[N/m]$.

Man kann sehen, dass der stationäre Wert der Kontaktkraft wie erwartet nach (4.5) nicht mehr von den mechanischen Umgebungseigenschaften sondern von der ausgewählten Steifigkeit der Referenzimpedanz abhängt.

4.5 Adaptive Regelung der Kontaktkraft

Die Kontaktkraftregelung entsteht in mehreren Kontaktaufgaben aus dem industriellen Feld, wie Prägen, Bohren, Entgraten, Fräsen, Schleifen, etc. Aufgrund der oben benannten Nichtlinearitäten sowie zeitlichen und räumlichen Varianz sowohl in der Umgebung als auch im Robotersystem selbst werden die Regelungsalgorithmen anpassungsfähig ausgelegt. Zur Regelung der Kontaktkraft sind sowohl die Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell als auch die Regelungsalgorithmen mit dem Identifikator untersucht.

Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Referenzmodell

Die Implementierung der adaptiven Kontaktkraftregelung mit dem Referenzmodell wird entsprechend der Abb.4.17 durchgeführt.

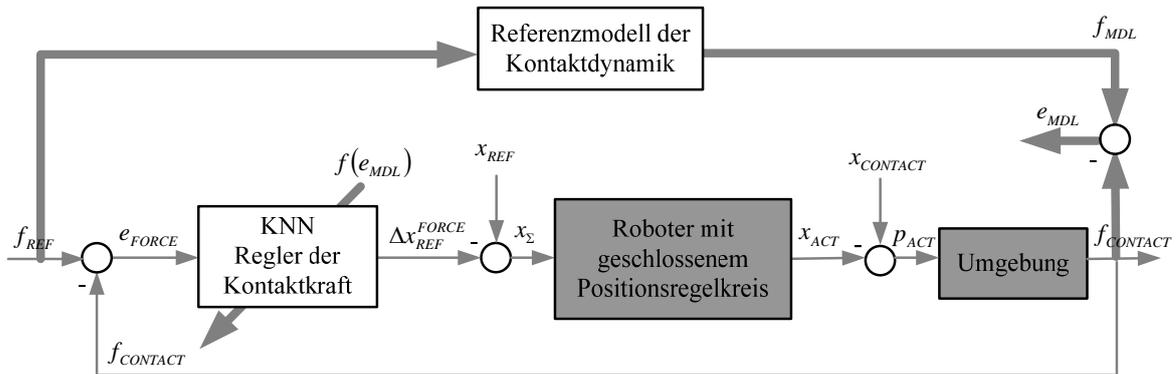


Abb.4.17. Adaptive Kontaktkraftregelung mit Referenzmodell.

Das Verfahren zur Synthese des Grundreglers und des Adaptationsreglers ist wie bei der Nachgiebigkeitsregelung des gebundenen „Manipulator-Umgebung“ Systems. Der einzige Unterschied liegt in der Berechnung des Referenzmodells in Form:

$$\frac{f_{CONTACT}(s)}{f_{REF}(s)} = \frac{1}{1 + 2 \cdot \xi_{REF} \cdot T_{OREF} \cdot s + T_{OREF}^2 \cdot s^2}. \quad (4.6)$$

Demzufolge wird auf die Darstellung des Verfahrens nicht expliziter eingegangen mit dem Hinweis, dass dieses auch über die gleichen Vorteile und Nachteile verfügt.

Die Funktionsfähigkeit des Regelungsalgorithmus ist in folgendem Experiment nachgewiesen. Die gewünschte Roboterposition wurde konstant gehalten und unmittelbar vor der Umgebung platziert $x_{REF} = 0[m]$. Die gewünschte Kontaktkraft wurde in einer sprungartigen Form $f_{REF} = 50[N] \cdot \text{sign}(\sin(2\pi \cdot t))$ vorgegeben. Das Referenzmodell der Kontaktdynamik wurde als Glied erster Ordnung mit der Verstärkung $K_{REF} = 1$ und die Zeitkonstante $T_{REF} = 0.05[s]$ festgelegt. Die Untersuchungen sind auf zwei Oberflächen mit verschiedenen mechanischen Eigenschaften $S_{ENV1} = 2 \cdot 10^3[N/m]$, $S_{ENV2} = 4 \cdot 10^3[N/m]$ durchgeführt. Die resultierende Positionsverschiebung und die daraus folgende Kontaktkraft sind in der Abb.4.18 dargestellt.

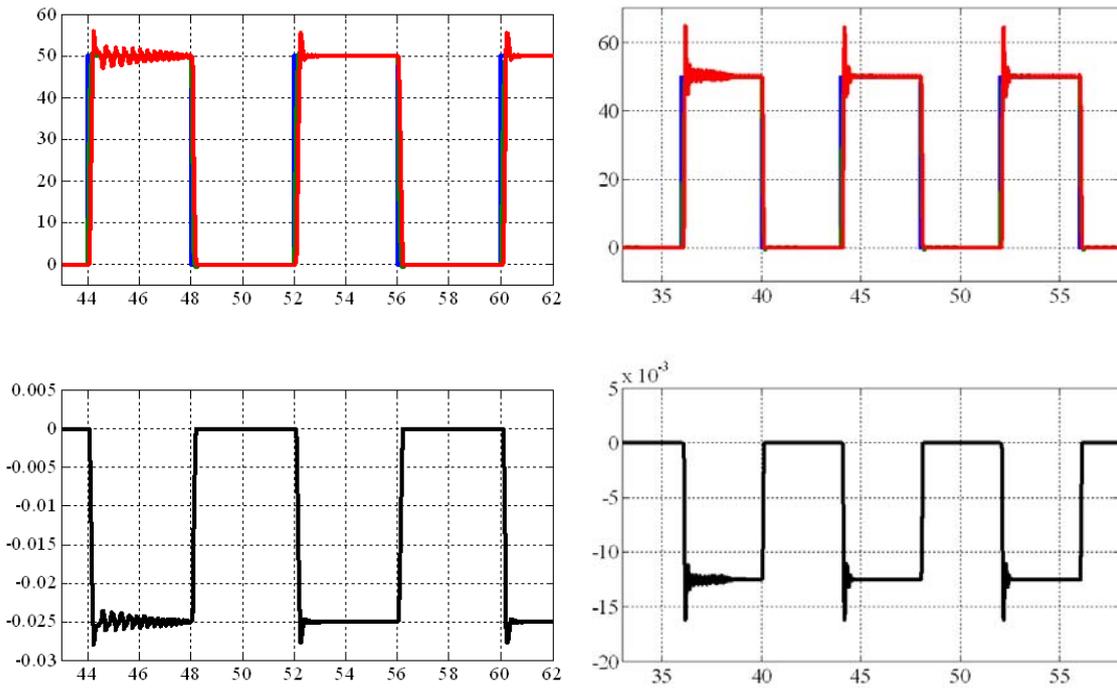


Abb.4.18. (blau oben) – Referenzwert der Kontaktkraft in [N], (rot oben) – tatsächliche Kontaktkraft in [N], (schwarz unten) – Positionsverlauf in [N].

Man kann sehen, dass der Adaptationsregelkreis sich gegen gewünschte Werte konvergiert und danach die gewünschte Kontaktkraftdynamik gewährleistet. Wie erwartet, erfolgt die schnellste Konvergenz während der Übergangsvorgänge, wenn die Signale im Regelungssystem eine kontinuierliche Erregung aufweisen.

Adaptive Regelungsalgorithmen mit dem Identifikator

Die Implementierung der adaptiven Kontaktkraftregelung mit dem Identifikator wird entsprechend der Abb.4.19 durchgeführt.

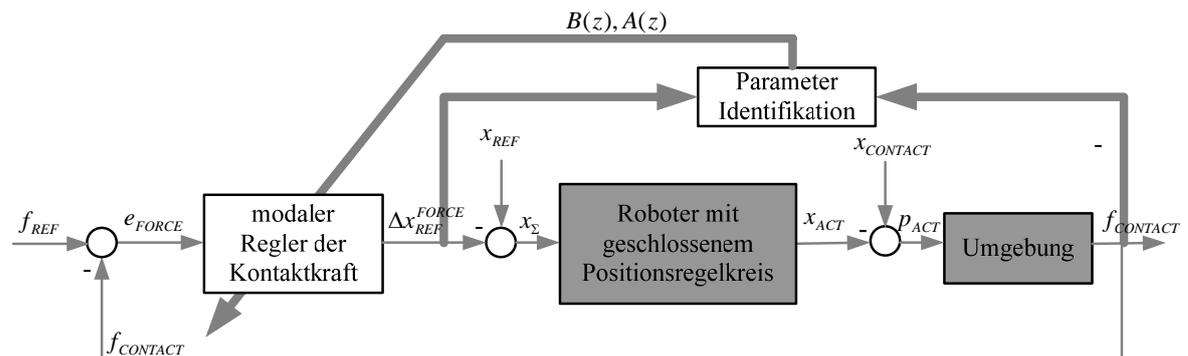


Abb.4.19. Adaptive Kontaktkraftregelung mit dem Identifikator.

Als Grundregler ist ein modaler Regler mit affiner Parametrierung ausgewählt. Die Synthese des Grundreglers erfolgt nach dem bereits im Unterkapitel 3.4.2.3 beschriebenen Verfahren.

Die Funktionsfähigkeit des Regelungsalgorithmus ist in einem Experiment nachgewiesen, das unter gleichen Bedingungen wie oben abläuft. Die Identifikation der Regelstreckenparameter erfolgt in Form eines adaptiven Identifikators ohne Messung des Zustandes, da es sich dabei um den Zustand des Robotersystems und der Umgebung handelt und der Umgebungszustand

lediglich zum Teil messbar ist. Die experimentellen Ergebnisse hinsichtlich der Positionsverschiebung und der daraus folgenden Kontaktkraft werden in der Abb.4.20 dargestellt.

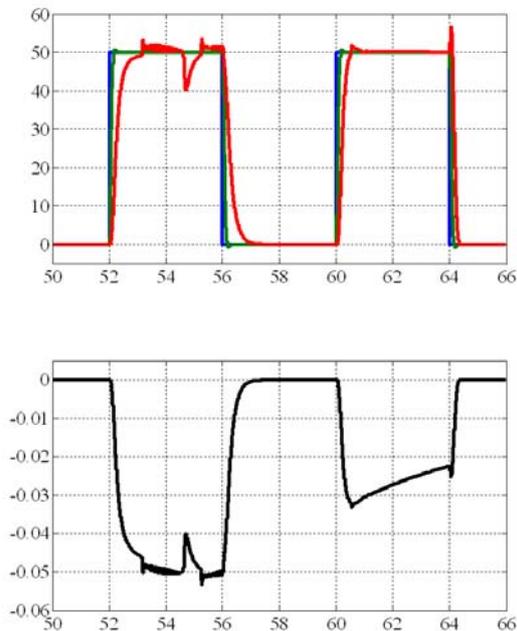


Abb.4.20. (blau oben) – Referenzwert der Kontaktkraft in [N], (rot oben) – tatsächliche Kontaktkraft in [N], (schwarz unten) – Positionsverlauf in [m].

Die mechanischen Eigenschaften des Kontaktes variieren sich im Laufe des Experimentes. Dies beeinflusst die Dynamik des Identifikators, dessen Übergangsvorgänge weiter die Regelungsqualität direkt bewirken. Die Einstellung gewünschter Kontaktkraft bleibt allerdings nicht beeinträchtigt.

4.6 Mechanische Montage

Unter dem Oberbegriff mechanische Montage werden nicht nur die üblichen Fügevorgänge sondern auch die Aufgaben, wie Auf- und Zuschrauben von Ventilen oder Klappen, Drehen eines Handrades / Kurbelns / Griffes, Schubladeschließen, etc verstanden.

Problemstellung. Die Montageoperationen erfordern die hohe Positionierungsgenauigkeit des Robotersystems in allen Richtungen und werden mit relativ kleinen Geschwindigkeiten ausgeführt. Die Positionsabweichungen der zu montierenden Teile werden durch den Positionierungsfehler der Roboterkonstruktion, durch die Lageabweichungen des Werkstückes oder durch die in der Fertigung vorkommenden Formfehler hervorgerufen. Bei den gegenwärtig üblichen Positionsregelungen der Manipulationsroboter werden diese Fehler nicht ausgeglichen. Sind die Positionsfehler größer als das Spiel der zu montierenden Teile, treten die Kontaktkräfte auf, die zu den Lageabweichungen führen können. Diese Lageabweichungen werden als Störungen aufgefasst, die über die Regelung des Roboters zu entsprechend größeren Stellgrößen führen. Die für die Lageregelung ausgelegten Regelkreise werden im diesen Fall häufig instabil. Die hervorgerufenen großen Kontaktkräfte und Drehmomente wirken auf den Roboter ein und können zum Abbruch des Montagevorganges oder zu Beschädigungen des Roboters bzw. des Werkstückes führen.

Lösung. Die erfolgreiche Durchführung der Montageoperationen kann durch die Regelung erfolgt werden, die ein Ausgleich der Kontaktkräfte durch den Korrekturbewegungen ermöglicht. Der Endeffektor muss in der Lage sein, den Widerstand der Umgebung zu erfassen und den Weg mit dem geringsten Widerstand durchzufahren. Zu diesem Zweck wird das Bewegungskommando abhängig von der gemessenen Kontaktkraft verändert.

Beispiel 1 – Einsetzen eines Bolzens in eine Bohrung. Die Montageoperation „Einsetzen eines Bolzens in eine trichterförmige Bohrung“, deren Position nicht genau bekannt ist, ist in der Abb.4.21 dargestellt. Der Bolzen wird steif im Endeffektor befestigt, der über einen 3-komponenten Kraftsensor am Körper des Schreitroboters angekoppelt ist. Die Position und die Richtung des Kraftsensors bzw. des Bolzens relativ zum Körperkoordinatensystem sind bekannt.

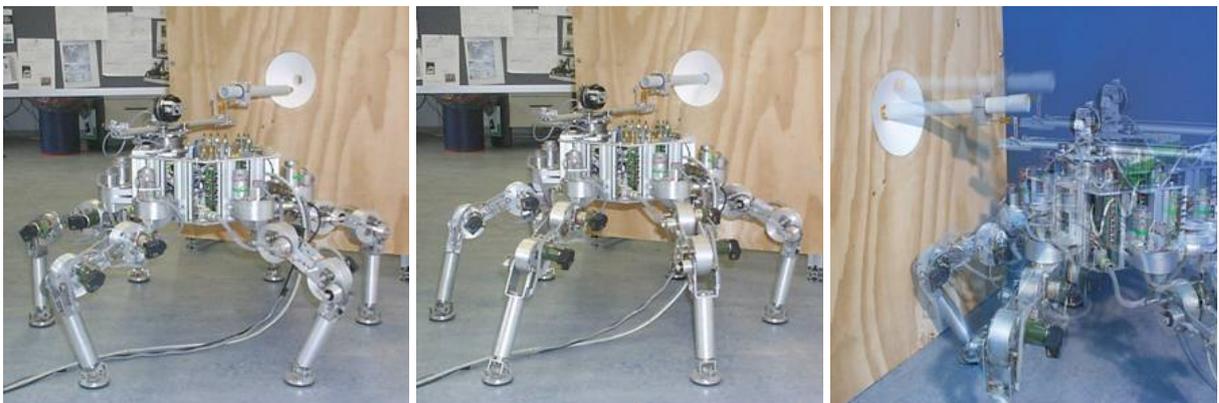


Abb.4.21. Montageoperation „Einsetzen eines Bolzens in eine Bohrung“: (links) Anfangsposition des Roboters vor dem Einsetzen, (in der Mitte) Endposition des Roboters nach dem erfolgreichen Einsetzen, (rechts) überlagerte Darstellung der Roboterbewegung.

Für die Montageoperation bewegt sich der wegen der Positionierungsfehler entstehenden C-Raum im Koordinatensystem des Endeffektors. In die normale Richtung des Endeffektors wird die Lage geregelt, in die tangentialen Richtungen werden die entstehenden Kontaktkräfte mit Hilfe der Nachgiebigkeitsregelung $\Delta \mathbf{x}_{BODY} = \frac{\mathbf{f}_{CONTACT}}{\mathbf{S}_{REF}}$ ausgeregelt. Die Steifigkeitsmatrix

\mathbf{S}_{REF} wird diagonal ausgewählt. Ihre Elemente werden groß in den tangentialen Richtungen (senkrecht zur Bohrung) und klein in der normalen Richtung (entlang der Bohrung) eingestellt.

Die erste Methode steuert die normalen und tangentialen Körperbewegungen unabhängig voneinander (4.7) im körperfesten Koordinatensystem des Kraftsensors. Diese Methode könnte sehr einfach implementiert werden, wird allerdings wegen des ständigen Kontaktverlustes selten verwendet.

$$\Delta \mathbf{x}_{BODY} = \begin{bmatrix} \Delta x_{BODY_NORMAL} \\ \Delta x_{BODY_TANGENZIAL1} \\ \Delta x_{BODY_TANGENZIAL2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{CONTACT_NORMAL} / S_{REF_NORMAL} \\ f_{CONTACT_TANGENZIAL1} / S_{REF_TANGENZIAL1} \\ f_{CONTACT_TANGENZIAL2} / S_{REF_TANGENZIAL2} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

mit

$f_{CONTACT_NORMAL}$ – die normale Kontaktkraftkomponente im Koordinatensystem des Kraftsensors,

$f_{CONTACT_TANGENTIAL}$ – die tangentialen Kontaktkraftkomponenten im Koordinatensystem des Kraftsensors.

Die zweite Methode steuert die normalen und tangentialen Körperbewegungen auch im körperfesten Koordinatensystem nach Prinzip der Superposition. Der Normalvektor und der Tangentialvektor zur Kontaktoberfläche werden entsprechend der folgenden Gleichung berechnet:

$$\Delta \mathbf{x}_{BODY} = \begin{bmatrix} \Delta x_{BODY_NORMAL} \\ \Delta x_{BODY_TANGENZIAL1} \\ \Delta x_{BODY_TANGENZIAL2} \end{bmatrix} = \mathbf{n}_{CONTACT} \cdot \frac{|f_{CONTACT} - f_{REF}|}{S_{REF_NORMAL}} + \boldsymbol{\tau}_{CONTACT} \cdot \frac{|f_{CONTACT}|}{S_{REF_TANGENZIAL}} \quad (4.8)$$

mit

- $\mathbf{n}_{CONTACT}$ – der Normalvektor zur Kontaktoberfläche,
- $\boldsymbol{\tau}_{CONTACT}$ – der Tangentialvektor zur Kontaktoberfläche,
- $|f_{CONTACT}|$ – die Amplitude der Kontaktkraft,
- $|f_{REF}|$ – die Amplitude der zugelassenen Montageoperationskraft.

Außerdem wird einen kleinen Sollwert für die Kontaktkraft f_{REF} (äquivalent zur Federvorspannung) entlang der Bohrung für die Zeit des Kontaktes im Regelungsgesetz addiert und nach dem Einsetzen sofort auf Null gesetzt. Damit wird den Kontaktverlust zwischen dem Bolzen und einer trichterförmigen Bohrung vermieden.

Der formelmäßige Zusammenhang für die Berechnung der normalen und tangentialen Richtungen des Kontaktes wird von der Gleichung (3.1) übernommen. Zur Einstellung der diagonalen Steifigkeitsmatrix \mathbf{S}_{REF} wurden folgende Parameter ausgewählt: $S_{REF_NORMAL} = 50[N/m]$, $S_{REF_TANGENZIAL} = 250[N/m]$. Die experimentellen Ergebnisse (s. Abb.4.22) bestätigen die Stabilität des Kontaktes zwischen dem Bolzen und der trichterförmigen Bohrung sowie die erfolgreiche Durchführung des Vorganges.

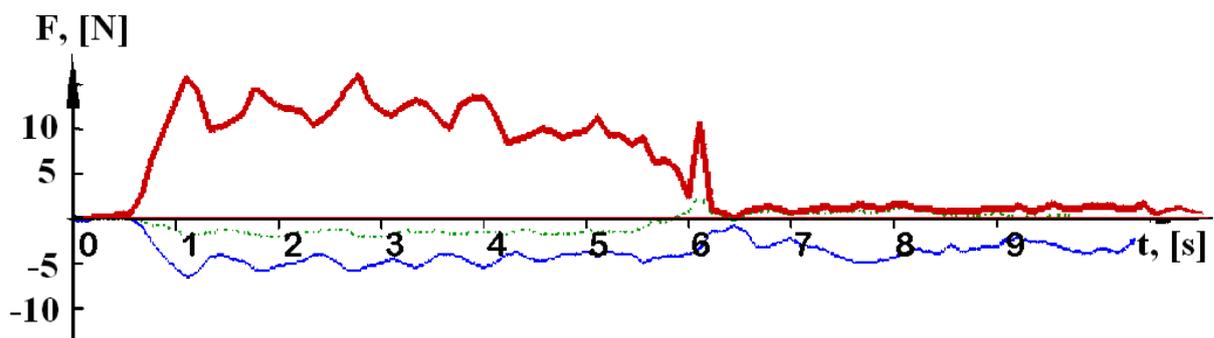


Abb.4.22.(a) Experimentelle Untersuchungen der Montageoperation „Einsetzen eines Bolzens in eine Bohrung“: Verlauf der Kontaktkräfte.

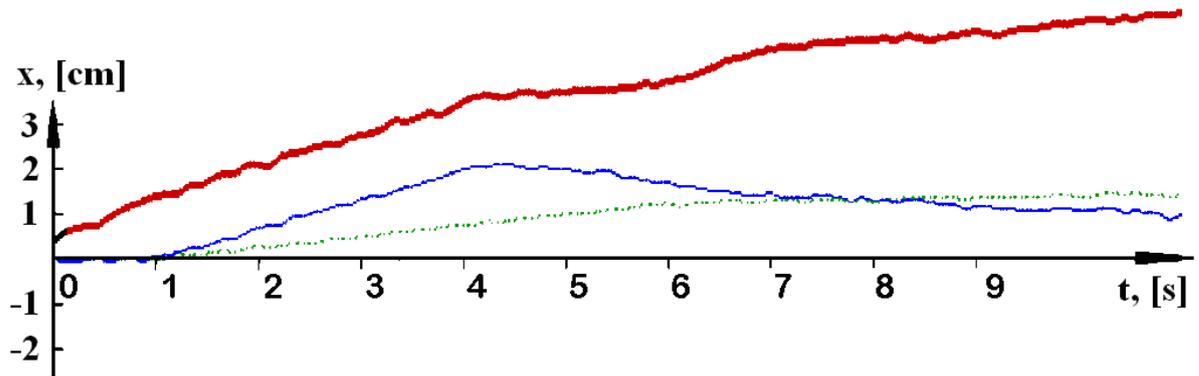


Abb.4.22.(b) Experimentelle Untersuchungen der Montageoperation „Einsetzen eines Bolzens in eine Bohrung“: Änderung der Position des Roboterkörpers.

Beispiel 2 – Drehen eines Handhebels. Die Montageoperation „Drehen eines fest in der Umgebung installierten Handhebels“ wird in der Abb.4.23 dargestellt. Der Handhebel ist steif und angegriffen vom Endeffektor bildet eine starre Kontaktbindung. Der Endeffektor ist wie im vorherigen Beispiel über einen 3-komponenten Kraftsensor am Körper des Schreitroboters angeschlossen. Die Position und die Richtung des Kraftsensors, des Endeffektors und dementsprechend des angegriffenen Handhebels relativ zum Körperkoordinatensystem sind bekannt.

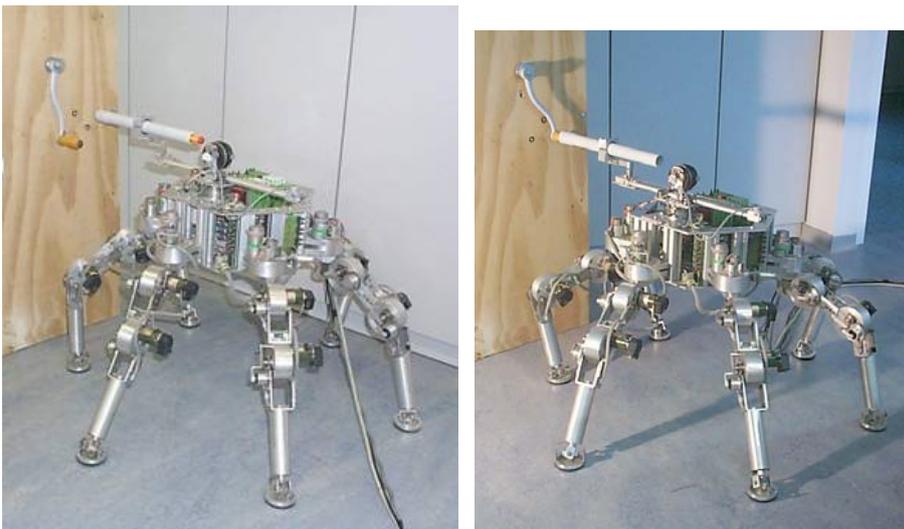


Abb.4.23. Montageoperation „Kurbeldrehen“: (links) vor dem Kontakt mit dem Hebel, (rechts) im Kontakt mit dem Hebel nach der 0.15m Bewegung entlang des Kreises.

Der C-Raum bei dieser Montageaufgabe dreht sich mit der Handhebelbewegung. Es wird angenommen, dass der Radius der Handhebel mit externen Sensorsystemen abgeschätzt ist. Die Bewegung in der Kreisebene um die Achse des Handhebels wird positionsgeregelt. Bei der Positionsabweichung von der tatsächlichen Kreisebene werden die entstehenden Kontaktkräfte durch die Ansteuerung der Körperbewegung mit Hilfe der Nachgiebigkeitsregelung $\Delta \mathbf{x}_{BODY} = \frac{\mathbf{f}_{CONTACT}}{\mathbf{S}_{REF}}$ eliminiert. Die Steifigkeitsmatrix \mathbf{S}_{REF} ist diagonal ausgewählt und ihre Elemente sind gleich für jede Richtung eingestellt.

4.7 Mechanische Verformung und Oberflächenbearbeitung

Die Aufgaben mit Bearbeitungsvorgängen sind durch die Bahnkurven gekennzeichnet, bei denen die Kontaktkräfte auf den Endeffektor ausgeübt werden. Diese Kräfte treten in bestimmten von der Aufgabe abhängigen Richtungen auf. Die Bewegung des Endeffektors wird in die Richtungen mit hoher Geschwindigkeit und in die Richtungen mit hoher Positionierungsgenauigkeit unterteilt.

4.7.1 Durchfahren von Bahnkurven mit hoher Genauigkeit

Problemstellung. Bei den Aufgaben wie Profilfräsen oder Schleifen wird die Bewegung mit der hohen Bahngenauigkeit erfordert. Allerdings entstehen entlang der Bahnkurven die Kontaktkräfte und beeinträchtigen durch die starke Wechselwirkung zwischen dem Endeffektor und der Umgebung die Positionierungsgenauigkeit. Das Verfahren scheitert häufig an der ungenügenden mechanischen Steifigkeit des Roboters. Diese ist durch die strukturelle Elastizität der Glieder und Getriebe sowie durch die Getriebe- und Lagerlose begründet.

Lösung. Zur Versteifung der Roboterkonstruktion existieren mehrere Verfahren ohne bzw. mit der Kontaktkraftrückführung. Das Verfahren mit der Rückführung ändert die Parameter der Positionsregler abhängig von den gemessenen Kontaktkräften. Es handelt sich um keine Kontaktkraft- bzw. Nachgiebigkeitsregelung und deshalb wird diese Aufgabe im Weiteren nicht näher beleuchtet.

4.7.2 Durchfahren von Bahnkurven unter Einhaltung gewünschter Kontaktkraft

Problemstellung. Bei den Aufgaben wie Bohren wird vom Robotersystem die Bewegung entlang der Bahnkurven unter Einhaltung einer hohen Bahngenauigkeit und einer definierten Kontaktkraft gefordert. Die gleichzeitige Regelung der abhängigen Variablen fordert die Entkopplung des Kontaktraums in die lagegeregelten und die kraftgeregelten Richtungen. Beim Endeffektor mit N Freiheitsgraden sollten $2N$ Größen geregelt werden. Beispielsweise ergeben sich für einen Manipulationsroboter mit 6 Freiheitsgraden die 3 Kräfte, 3 Drehmomente sowie 3 translatorische und 3 rotatorische Bewegungen.

Lösung. Mit Hilfe der Selektionsmatrix werden die Richtungen festgelegt, in denen die Kräfte ausgeübt werden sollten. Diese Richtungen werden kraftgeregelt und die übrigen Richtungen werden lagegeregelt.

Beispiel – Bohrvorgang. Die Bearbeitungsoperation „Bohren“ fordert die senkrechte Ausrichtung des Bohrers zur Bearbeitungsoberfläche. Die normale Komponente der Kontaktkraft während des Bohrvorganges sollte konstant bleiben und die tangentialen Komponenten der Kontaktkraft sollten gegen Null geregelt werden. Der Kontaktpunkt darf sich nicht bewegen. Der Bohrer wird steif im Endeffektor befestigt, der über einen 3-komponenten Kraftsensor am Körper des Schreitroboters angekoppelt wird. Die Position und

die Richtung des Kraftsensors bzw. des Bohrers relativ zum Körperkoordinatensystem sind bekannt.

Mit Hilfe der vorläufigen Messungen werden die Normale und Tangente zur Bearbeitungsoberfläche in einem unbeweglichen Koordinatensystem des Roboters ermittelt. Es wird die Längsneigung und der Kurs des Roboterkörpers abhängig von der tatsächlichen Neigung der Bearbeitungsoberfläche berechnet und eingestellt (s.Abb.4.24).

Die zum Bohren erforderliche Schneidkraft wird durch die Druckkraft bestimmt. Die Druckkraft $\mathbf{f}_{CONTACT}$ muss jederzeit konstant in die Richtung der Normale bleiben und der Sollkraft \mathbf{f}_{REF} entsprechen. Durch den Widerstand der Bearbeitungsoberfläche entsteht der C-Raum. Er liegt in der Umgebung fest und wird im unbeweglichen Koordinatensystem des Roboters beschrieben. Entlang der Normale wird die gewünschte Kontaktkraft $\mathbf{f}_{REF_NORMAL} = f_{REF}$ explizit geregelt. Entlang der Tangenten werden die entstehenden Kräfte auf Null geregelt $\mathbf{f}_{REF_TANGENTIAL} = 0$, damit die Verklemmung und Werkzeugbruch vermieden werden. Zur Lösung der Aufgabe wird die adaptive Kontaktkraftregelung entweder mit dem Referenzmodell oder mit dem Identifikator verwendet.



Abb.4.24. Einstellung des Bohrers senkrecht zur Bearbeitungsoberfläche durch die entsprechende Körperorientierung.

In dieser Arbeit ist einer der Sonderfälle der Nachgiebigkeitsregelung, nämlich die Dämpfungsregelung $\mathbf{v}_{BODY} = \frac{(\mathbf{f}_{CONTACT} - \mathbf{f}_{REF})}{\mathbf{D}_{REF}}$ anzuwenden. Die Dämpfungsmatrix \mathbf{D}_{REF} wird

dabei diagonal ausgewählt. Ihre Elemente werden groß in den tangentialen Richtungen und klein in der normalen Richtung eingestellt. Die experimentelle Ergebnisse (s.Abb.4.25) bestätigen die Anhaltung der vorgegebenen Kontaktkraft des Bohrvorganges im Wert von 5[N] in normaler Richtung und Minimierung der tangentialen Komponenten. Die Vertiefung in die Bearbeitungsoberfläche ist auf 1[cm] begrenzt. Die tangentiale Kontaktkraft $f_{TANGENTIAL} = f_y$ ist wegen der vertikalen Positionsabweichung von der Normale nicht komplett eliminiert.

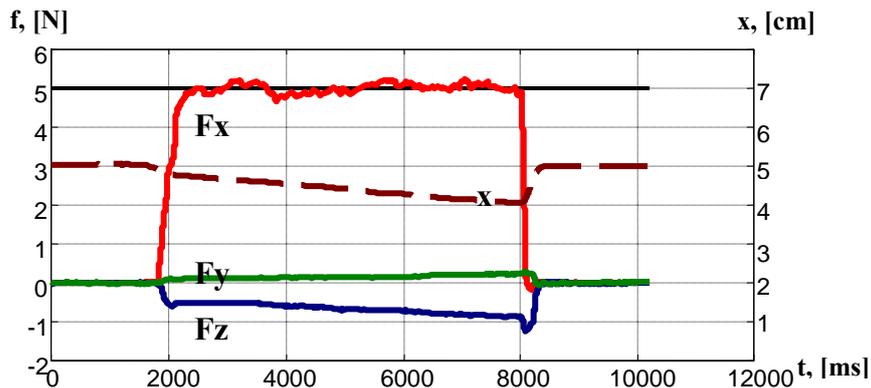


Abb.4.25. Kontaktkräfte und Positionsverschiebung während des Bohrvorganges.

4.7.3 Durchfahren von ungenügend bekannten Bahnkurven

Problemstellung. Bei den Aufgaben wie Objektabtasten wird die Roboterbewegung entlang der ungenügend bekannten Bahn gefordert. Dabei können die Hindernisse entstehen, die die Kontaktkräfte hervorrufen. Diese Kräfte sollten durch die Bahnkorrektur ausgeglichen werden.

Lösung. Zur Lösung der Aufgabe wird das Regelungsverfahren zur Einstellung der künstlichen Roboternachgiebigkeit eingesetzt. Die entstehenden Hindernisse werden durch die Kraftsensoren erkannt und die Roboterbewegung wird entsprechend korrigiert. Der Endeffektor verhält sich wie ein Feder-Dämpfer-Masse System mit einstellbaren Parametern.

Beispiel – künstliche Nachgiebigkeit des Schreitroboterkörpers. Die Erkenntnisse aus der Nachgiebigkeitsregelung des „Roboter“ System sind bei diesen Untersuchungen verwendet. Die Regelung der Roboternachgiebigkeit unter dem Eingriff externer Kraft ist mit dem Referenzmodell der Roboterradmittanz zweiter Ordnung

$$Z_{REF}^{-1}(s) = \frac{\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE}(s)}{f_{CONTACT}(s)} = \frac{1}{K_{REF} \cdot (1 + 2\xi_{REF} T_{0REF} \cdot s + T_{0REF}^2 \cdot s^2)} \quad \text{mit folgenden Parametern}$$

$K_{REF} = 100[N/m]$, $\xi_{REF} = 1$, $T_{0REF} = 0.2[s]$ implementiert und am Beispiel des Schreitroboters „Katharina“ untersucht. Die experimentellen Ergebnisse (s.Abb.4.26) stellen die Körpervachgiebigkeit in drei kartesischen Koordinaten dar. Die externe Kraft wird an den Roboterkörper mit Hilfe der Federwaage angelegt.



Abb.4.26. (a) Körperverschiebung nach unten/oben.

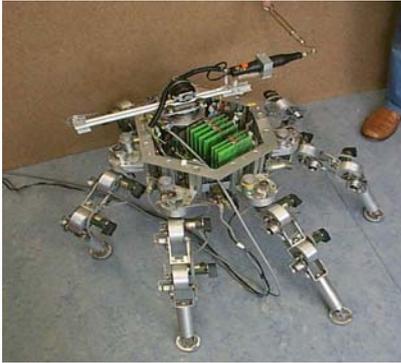


Abb.4.26. (b) Körperverschiebung nach links/rechts.



Abb.4.26. (c) Körperverschiebung nach vorwärts/zurück.

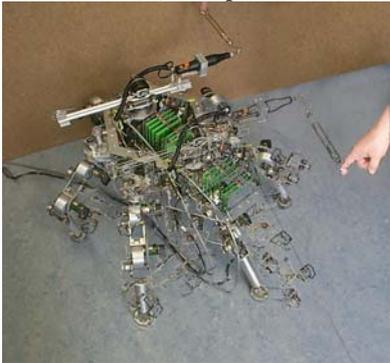


Abb.4.26. (d) Überlagerte Darstellung der Bewegung.

Kapitel 5

Experiment- und Simulationsergebnisse der Kontaktaufgaben mit mobilen Robotern

Dieses Kapitel beantwortet die Fragen zur Organisation der Lokomotion mobiler Schreitroboter über ein komplexes Gelände mit variierenden mechanischen Eigenschaften anhand der Information über die Auflagereaktionen, präsentiert die zu diesen Zwecken entwickelte Testplattform und repräsentiert die Experiment- und Simulationsergebnisse der ausgewählten Kontaktaufgaben mit mobilen Schreitrobotern.

Die mobilen Schreitroboter agieren in der Umgebung während der Lokomotion frei und im Kontakt mit der Umgebung eine offene kinematische Kette bilden. Im stationären Betrieb ist die Summe vertikaler Komponenten der Kontaktkräfte unter den Roboterfüßen dem Robotergergewicht gleich. Die explizite Einstellung anderer Kontaktkräfte ist nicht möglich. Im dynamischen Betrieb hängen die Kontaktkräfte von der Roboterdynamik und von den mechanischen Eigenschaften des Untergrundes ab. Eine quantitative Identifikation von letzterem ist wegen des beweglichen Koordinatensystems nicht möglich. Es ist ausschließlich machbar, diese Eigenschaften in den Kategorien „steifer als“ bzw. „nachgiebiger als“ einzuschätzen. Darüber hinaus ist ein Schreitroboter unterdeterminiert, wenn er mehr als drei Stützbeine besitzt. Demzufolge steht im Mittelpunkt der Untersuchungen auf dem mobilen Schreitroboter die koordinierten Nachgiebigkeitsregelung von Roboterbeinen abhängig von den mechanischen Untergrundeigenschaften sowie die Organisation und Steuerung der Roboterlokomotion über ein komplexes Gelände anhand der Information über die Auflagereaktionen.

Die meisten lokomotorischen Kontaktaufgaben kennzeichnen sich dadurch, dass ihre Lösung die Kenntnisse über den internen Roboterzustand (Konfiguration der Gelenke, Raumorientierung des Körpers, Antriebsstrom etc) sowie auch über die wirkenden Kontaktkräfte erfordert. Zu den typischen lokomotorischen Kontaktaufgaben gehören:

- Generierung reaktiver Gangarten (zeitliche Gestaltung eines Ganges);
- Organisation eines adaptiven Schrittzklus (räumliche Gestaltung eines Ganges);
- Stabilisierung des Roboter Massenmittelpunktes innerhalb des Stützpolygons ohne bzw. unter dem Einfluss von externen Störungen;
- Bewegung über ein komplexes Gelände mit variierenden mechanischen Eigenschaften des Untergrundes: die aktive Verteilung der Reaktionskräfte und die adaptive Nachgiebigkeitsregelung des „Schreitroboterbein-Untergrund“ Systems;
- Klettern: Ermittlung der Reibungskegeln, Besteigung der geneigten und vertikalen Hindernisse.

Im diesen Kapitel werden die experimentelle und Simulationsuntersuchungen der genannten lokomotorischen Kontaktaufgaben dargestellt. Die Untersuchungen sind mit dem sechsbeinigen Schreitroboter „Slair2“ durchgeführt.

5.1 Beschreibung der Testplattform

Der Schreitroboter „Slair“ (s.Abb.5.1) besteht aus drei seriell gekoppelten Schultern. An jeder Schulter sind zwei Beine gekoppelt, die eine Kinematik mit drei aktiven rotatorischen Freiheitsgraden besitzen, die von DC-Motoren mit einer Nennleistung von 4.5W angetrieben werden. Das Getriebe hat die Untersetzung von 251. Das Sensorsystem besteht aus den Lagesensoren in jedem Gelenk, aus 3-Komponenten-Kraftsensoren in jedem Bein und aus dem 2-Komponenten-Neigungssensoren im Körper. Das Gesamtgewicht beträgt ca. 4.5kg. „Slair“ entstand im Rahmen der Zusammenarbeit von der Universität Magdeburg und dem Fraunhofer IFF Magdeburg. Der modulare Aufbau des Roboters macht es möglich, die Anzahl der Schultern beliebig zu erweitern.

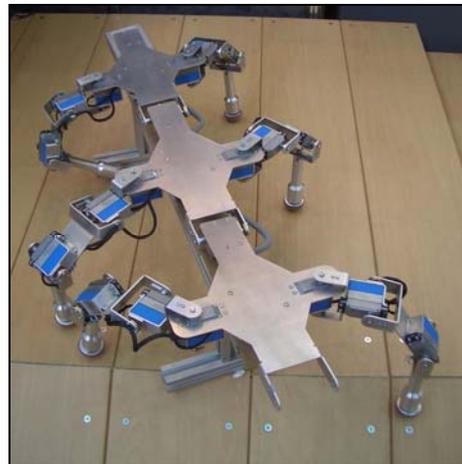
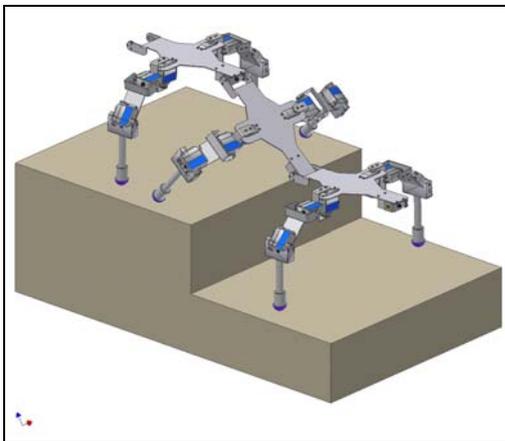


Abb.5.1. Die entwickelten sechsbeinigen Schreitroboter: (links) CAD Modell, (rechts) physikalische Implementierung, (oben) „Slair1“, (unten) „Slair2“.

Das Steuerungssystem des Schreitroboters „Slair“ wurde anhand der Untersuchungen zur biomechanischen Organisation von Menschen und Tieren hierarchisch und modular aufgebaut. Das Steuerungssystem besteht aus drei Ebenen (s.Abb.5.2 a/b/c):

- obere Ebene – *action level* – ist die Operator- und Überwachungsebene und erstellt die Parameter zur Roboterlokomotion (wie lineare und rotatorische

Robotergeschwindigkeit, Gangart, Bodenfreiheit etc) und zu den Manipulationsaufgaben (wie Körperorientierung und Körperlage).

- mittlere Ebene – *primitive level* – berechnet anhand der gegebenen Sollwerte und der aktuellen Sensorinformation die Referenzbahn für jedes Robotergelenk. Diese Ebene sollte folgende Aufgaben erfüllen: Sicherstellung einer zielgerichteten Bewegung der Extremitäten, Einhaltung einer gegebenen Stabilitätsreserve, automatische Anpassung an einen unebenen Untergrund, Ausführung von Bewegungen bei unterschiedlicher Geschwindigkeit in eine vorgegebene Richtung, Auswahl einer geeigneten Gangart.
- untere Ebene – *servo level* – ist für die Regelung der vorgegebenen Referenzbahnen einzelner Gelenke verantwortlich.

Physikalisch gesehen besteht das Steuerungssystem aus zwei Teilen: der PC-Teil und der Roboter-Teil. Der PC-Teil übernimmt die Interaktion mit dem Bediener, berechnet die Steuerungssignale für die Robotergelenke und bildet die Sensorzustände ab. Der Roboter-Teil, der auf den schnellen und flexiblen Signalprozessoren (engl. DSP) beruht, beinhaltet die Hardware-Abstraktionsebene (engl. HAL) für die Antriebe bzw. Sensoren sowie auch die Antriebsregler. Die Echtzeitkommunikation zwischen diesen Teilen findet wahlweise über RS-485 oder Ethernet statt. Das Steuerungssystem funktioniert mit einer Abtastrate von 1 kHz und könnte, wie die mechanische Konstruktion, für weitere Schulter erweitert werden.

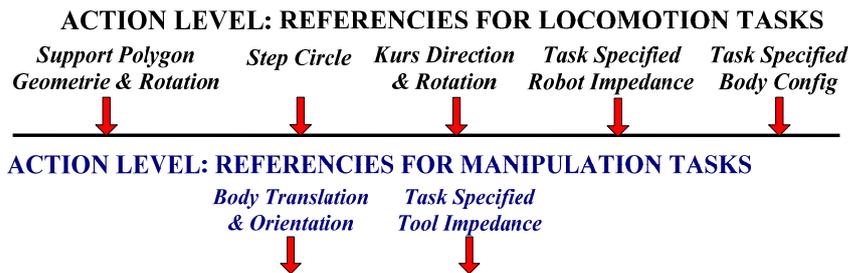


Abb.5.2. (a) Das hierarchische Steuerungssystem des Roboters: action level.

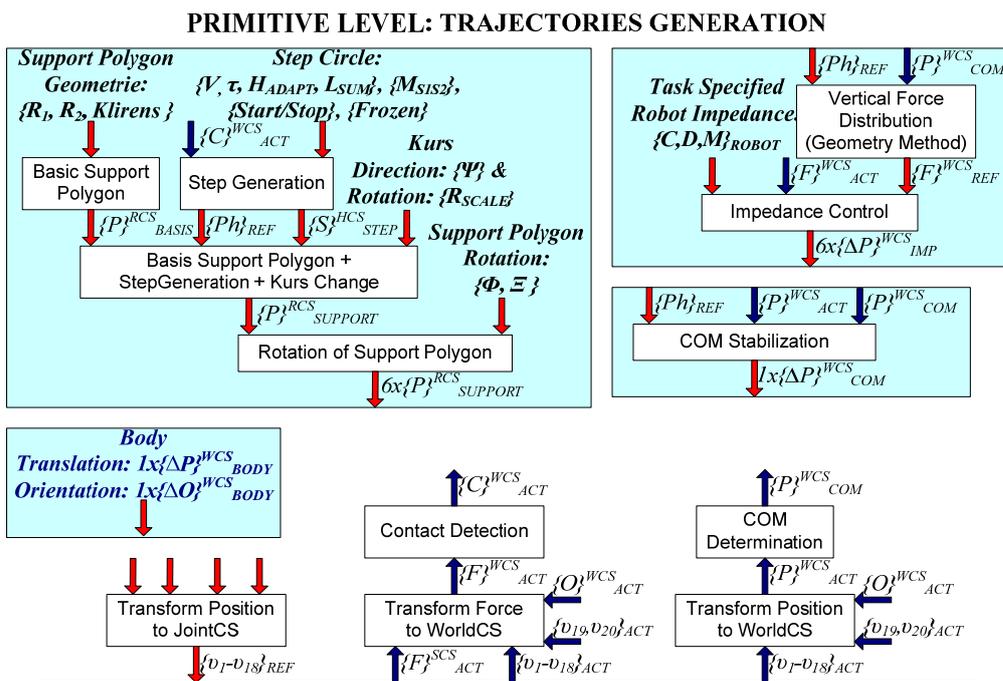


Abb.5.2. (b) Das hierarchische Steuerungssystem des Roboters: primitive level.

SERVO LEVEL: TRAJECTORIES CONTROL & MONITORING

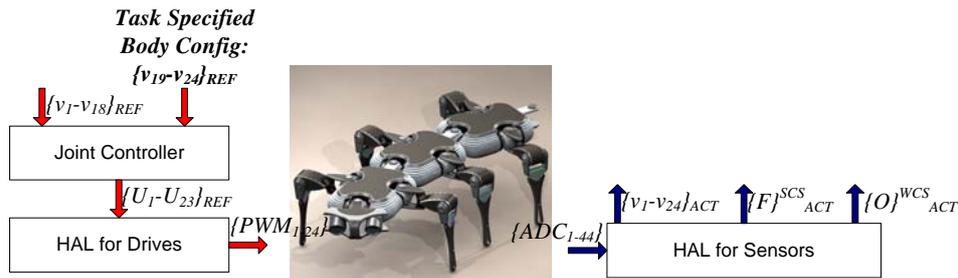


Abb.5.2. (c) Das hierarchische Steuerungssystem des Roboters: servo level.

Für den sechsbeinigen Schreitroboter „Slair2“ wurde ebenso eine im Kapitel 2 beschriebene domäneübergreifende Umgebung mit der Fähigkeit zur Kontaktbehandlung (s. Abb.5.3) entwickelt. Diese Umgebung diente zum Zweck der vorläufigen Überprüfung von Kontaktaufgaben und der Untersuchung von mehr komplexeren Kontaktaufgaben, wie z.B. das Klettern.

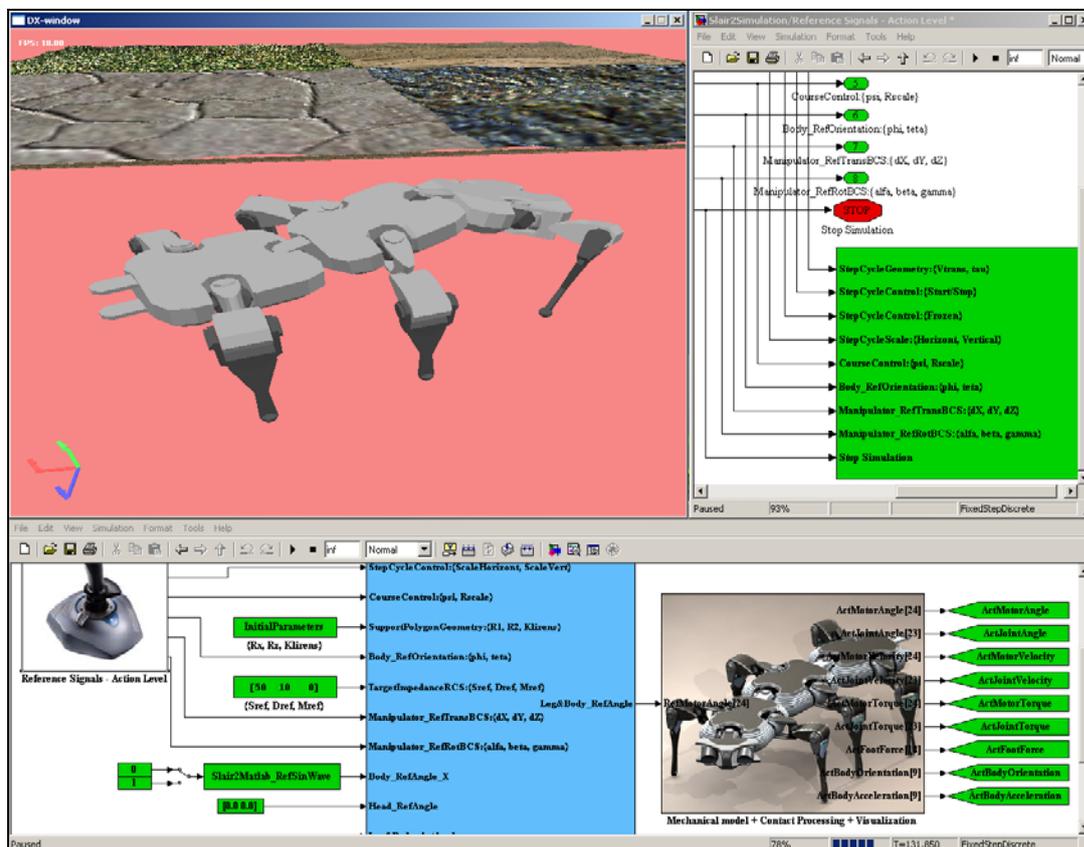


Abb.5.3. Ein domäneübergreifendes Entwicklungs- und Simulationssystem mit der Fähigkeit zur Kontaktbehandlung.

5.2 Generierung reaktiver Gangarten

Die Beine spielen zwei grundsätzliche Rollen für einen Schreitroboter: das Unterstützen des Roboterkörpers und die Fortbewegung des Roboters. Das wird durch die gezielte und koordinierte Beinbewegung erfüllt. Dabei wird die Beinbewegung entlang der gewünschten

Bahnen mit vorgegebenen zeitlichen und räumlichen Parametern für jedes Roboterbein ausgeführt. Die Beinbewegung stellt eine rhythmische Bewegung dar, wobei das Bein zunächst den Kontakt mit dem Untergrund auslöst, sich zum neuen Aufsetzpunkt bewegt (Transferphase), in diesem Punkt den Roboterkörper unterstützt und seiner Fortbewegung dient (Stützphase). Die aufeinander abgestimmten Bewegungen aller Beine, definiert durch den Ort und den Zeitpunkt jedes Abhebens und Aufsetzens eines Beines, bilden eine Gangart. Eine plausible Gangart soll in der Lage sein, die folgenden konkurrierenden Anforderungen an die Roboterfortbewegung zu erfüllen: Stabilität des Gehens, Robustheit zur Störungen, Wahl der Geschwindigkeit, Energieeffizienz, gleichmäßige Strukturbelastung, tolerierbare Abweichungen etc. Idealerweise könnte eine spezielle Gangart für jede mögliche Gangsituation generiert werden, jedoch stellte sich dies beim Rechnen als uneffizient heraus und ist in der Echtzeit kaum möglich. Stattdessen werden die festen Gangarten mit entsprechender Anpassung an die Roboterkonstruktion und die Umgebungsbedingungen verwendet. Die folgenden Definitionen dienen zur Beschreibung und Klassifikation der Gangarten.

Eine Gangart ist *statisch stabil*, wenn der Schwerpunkt zu jedem Zeitpunkt der Bewegung innerhalb des Stützpolygons liegt; gibt es einen Zeitpunkt, zu dem dies nicht der Fall ist, so ist die Gangart nur *dynamisch stabil*.

Eine Gangart ist *periodisch*, wenn für zwei Zeitpunkte A und B (Zeitdifferenz ist gleich der Zykluszeit) alle Beine in B denselben Status haben, den sie in A hatten.

Die folgenden Definitionen sind ausschließlich für die periodischen Gangarten sinnvoll.

Eine Gangart ist *regelmäßig*, wenn alle Beine dasselbe Verhältnis „Transferphase zur Zykluszeit“, auch bezeichnet als Duty-Faktor, aufweisen.

Eine Gangart ist *symmetrisch*, wenn die Beine eines (links/rechts) Paares genau um die halbe Zykluszeit in Phasen verschoben sind. Diese Definition gilt nur für $2N$ -Beiner.

Generierung einer geeigneten Gangart kommt als erste Aufgabe dem Ganggenerator zu. Üblich werden solche regulären periodischen Gangarten wie die Welle, Tetrapod oder Tripod (s. Abb. 5.4) für beide Aufgaben "das Unterstützen des Roboterkörpers" und "das Fortbewegung des Roboters" verwendet. Dabei bedeutet τ den Duty-Faktor der Gangart.

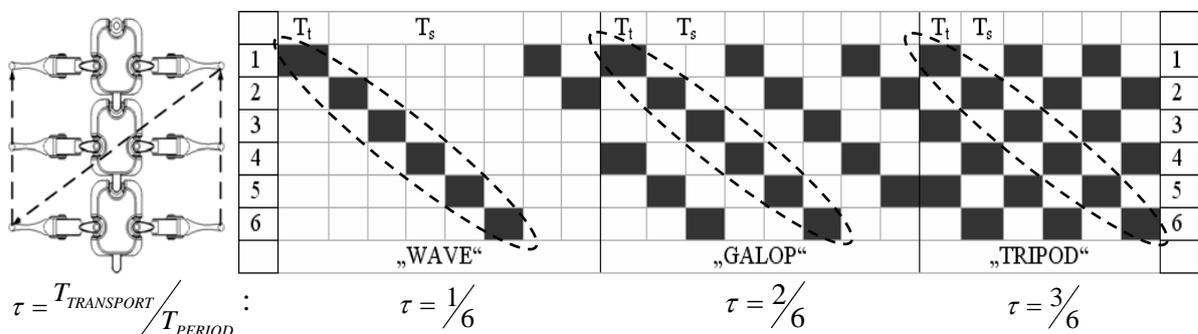


Abb. 5.4. Die regulären periodischen Gangarten.

Der Generator der Gangarten muss in der Lage sein, sich an verschiedene Arten von Störungen im Laufe des Ganges anzupassen. So können die regulären periodischen Gangarten

vom reaktiven Controller unter Verwendung folgender Stabilitäts- und Sequenzregeln modifiziert werden.

Stabilitätsregel: Ein Bein muss in der Stützphase bleiben, wenn ein (oder beide) seiner Nachbarn in der Transferphase sind.

Sequenzregel: Ein Bein muss in der Stützphase bleiben, wenn ein (oder beide) seiner Nachbarn kurz vor dem Erreichen von PEP ist oder schon PEP erreicht hat. AEP und PEP bedeuten die vordere extreme Position (AEP – the anterior extreme position) und hintere extreme Position (PEP – the posterior extreme position) des unterstützenden Beines bezüglich des Roboterkörpers und liefern als die Differenz eine exakte Schrittlänge.

Dabei wird die notwendige Kontaktinformation über den aktuellen Beinzustand (Stützphase oder Transferphase) von Kontaktsensoren geliefert.

Die Kombination der Standardgangarten mit einem reaktiven Controller bietet dem Entwickler eine einfache Möglichkeit zur Implementierung eines Ganges, so dass der Roboter genügend Stabilität des Ganges und Robustheit gegen die Störungen aufweist.

Die experimentellen Ergebnisse zur Fortbewegung mit verschiedenen Gangarten sowie zum Gangartwechsel und zur reaktiven Eigenschaften des Ganggenerators sind in den Abb.5.6 – Abb.5.8 dargestellt. Dabei sollte die Beinnummerierung in der Abb.5.5 beachtet werden.

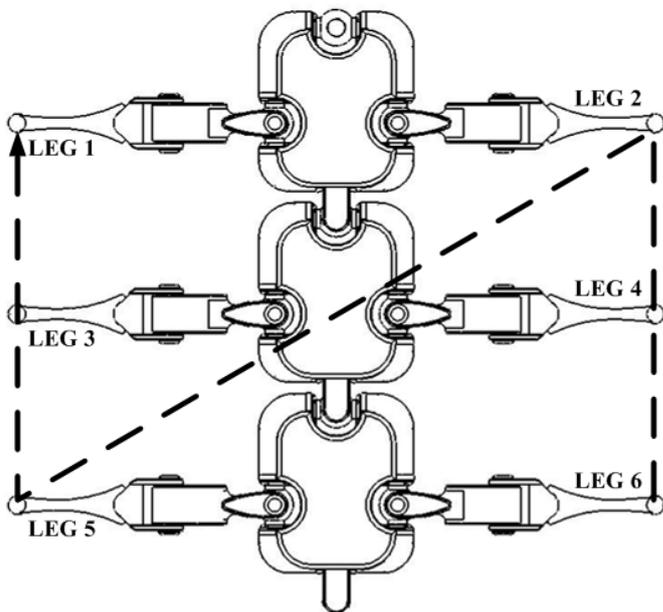


Abb.5.5. Draufsicht des Schreitroboters mit entsprechender Beinnummerierung.

In der Abb.5.6 sind die Start- / Gang- und Stoppphasen beim Gehen mit Wellengang, Tetrapod und Tripod dargestellt. Dabei ist der Schreitroboter von einem Ruhezustand mit dem „Start“-Befehl (ca. nach 2 Sekunden) im Gang und vom Gang mit dem „Stop“-Befehl (ca. nach drei Schritten) wieder in den Ruhezustand gebracht.

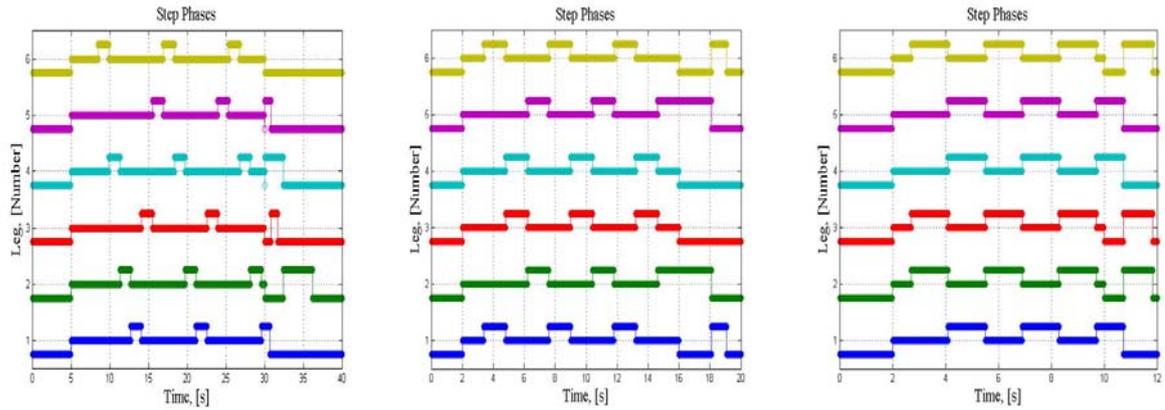


Abb.5.6. Zeitlicher Ablauf der Beinzustände beim Übergang vom Ruhezustand in den Gang und vom Gang in den Ruhezustand für Wellengang, Tetrapod und Tripod dementsprechend.

In der Abb.5.7 ist der Gangartwechsel zwischen den Wellengang und den Tetrapod, zwischen den Wellengang und den Tripod und zwischen den Tetrapod und den Tripod dargestellt.

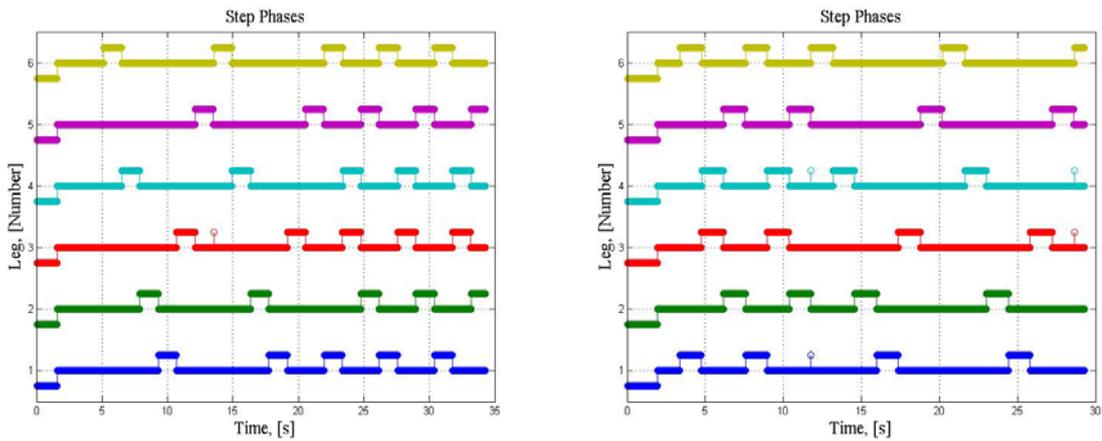


Abb.5.7.(a) Zeitliche Darstellung des Überganges vom Wellengang zum Tetrapod und zurück.

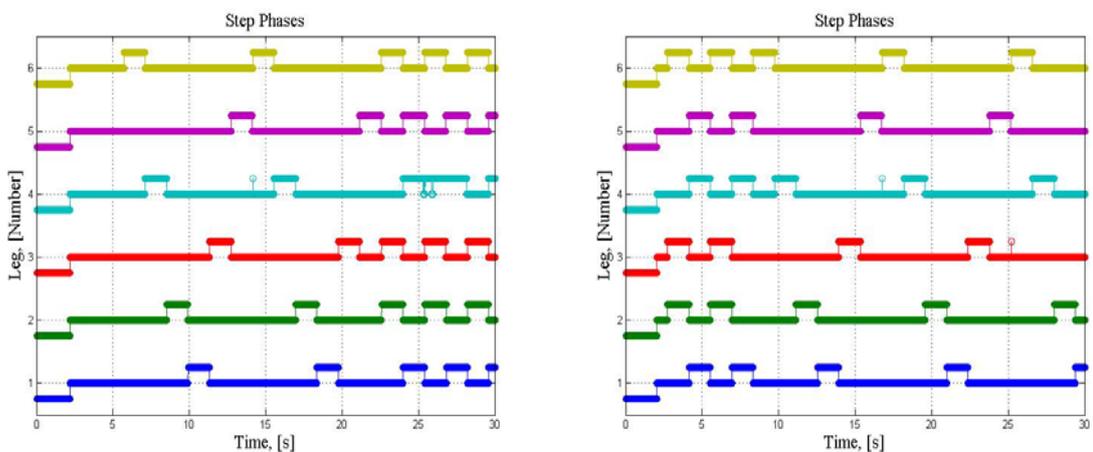


Abb.5.7.(b) Zeitliche Darstellung des Überganges vom Wellengang zum Tripod und zurück.

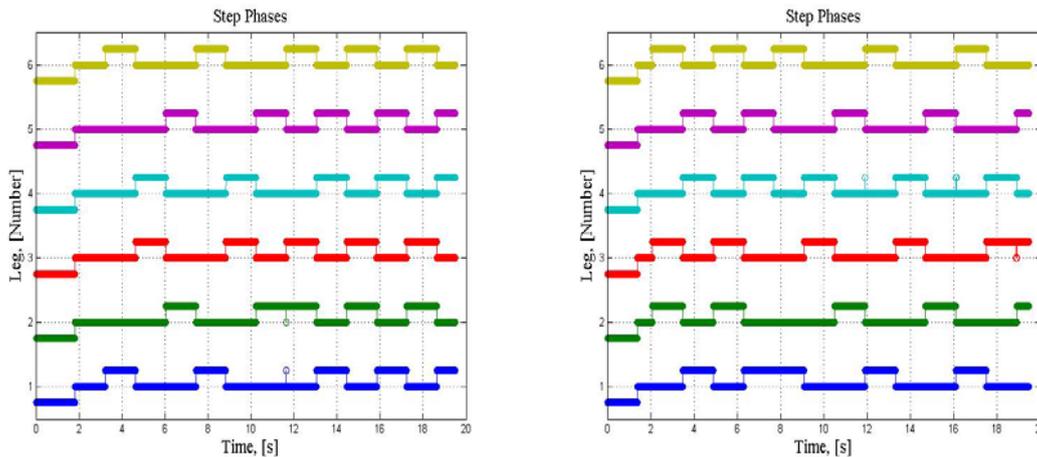


Abb.5.7.(c) Zeitliche Darstellung des Überganges vom Tetrapod zum Tripod und zurück.

In der Abb.5.8 ist der zeitliche Ablauf der Langkoordinate der FüÙe beim Übergang vom Wellengang zum Tripod dargestellt. Es ist offensichtlich, dass die Stabilitätsregel des reaktiven Ganggenerators während des Überganges eingeschaltet wird und hält dadurch einige Beine länger in der Stützphase. Die Schrittlänge ist im Experiment auf 7[cm] eingestellt.

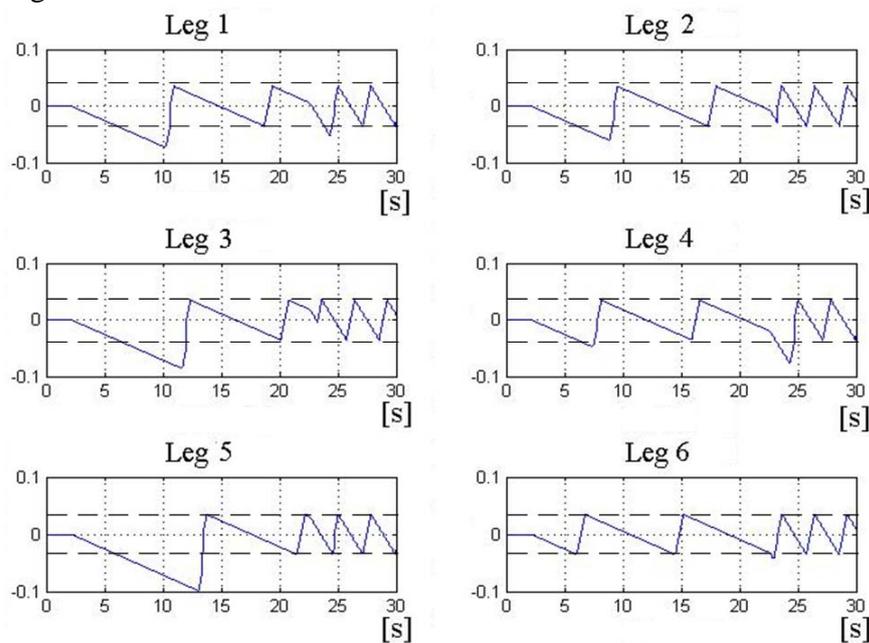


Abb.5.8. Zeitlicher Ablauf der Langskoordinate der FüÙe in [m] beim Übergang vom Wellengang zum Tripod.

5.3 Organisation eines adaptiven Schrittzykluses

Zusätzlich zur zeitlichen Gestaltung eines Ganges (Gangart) kommt zum Ganggenerator auch die geometrische Gestaltung eines Ganges (Schrittzyklus) hinzu. Der vorgeschlagene Schrittzyklus (s.Abb.5.9) besteht aus einer Stützphase 2 und einer Transferphase, die weiterhin in die Bodenablösungsphase 23, Hebephase 13, Absenkphase 14 und Bodenauftrittphase 24 unterteilt ist. Für die Implementierung eine „Start“- bzw. „Stopp“-Logik werden zusätzlich die Hilfsphasen, nämlich Transferphase mit konstanter Höhe 1,

Hebephase mit konstanter Länge 3, Absenkephase mit konstanter Länge 4, verwendet.

Bei dem Aufbau des Schrittzyluses ist davon ausgegangen, dass beim Auftritt und bei der Ablösung eines Fußes möglichst kleine Querkräfte eingebracht werden sollten. Damit wird die Berührung kleiner Unebenheiten vermieden und die Bewegung in den Reibungskegeln gewährleistet. Es wird dadurch erreicht, dass der Fuß sich während dieser Phasen mit der horizontalen Geschwindigkeit in der Gegenrichtung zur Körpertransfer bewegt. Durch die Überlagerung der horizontalen und der vertikalen Geschwindigkeit ergibt sich eine Bahn, die beim Betrachten bezüglich des Roboterkörpers als nicht senkrecht erscheint (Phasen 23 und 24).

Zur Gestaltung des Schrittzyluses werden folgenden Variablen:

- V_{REF} – Sollwert für die Geschwindigkeit der Fortbewegung,
- L_{SUM} – Länge der Beinbewegung bezüglich des Aufhängungspunktes,
- H_{ADAPT} – Höhe der Adaptation zu den Bodenunebenheiten.

verwendet. Die genannten Parameter sind immer im Arbeitsbereich des Roboterbeins auszuwählen und steuern zusammen mit dem Duty-Faktor τ die Geschwindigkeiten in einzelnen Schrittzklusphasen:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1 = V_{REF}, \\ V_3 = V_4 = \frac{(2 \cdot H_{ADAPT} \cdot V_1)}{L_{SUM}}, \\ T_{TRANSFER} = \frac{(4 \cdot H_{ADAPT})}{V_3}, \\ T_{PERIOD} = \frac{T_{TRANSFER}}{\tau}, \\ T_{SUPPORT} = T_{PERIOD} - T_{TRANSFER}, \\ V_2 = \frac{L_{SUM}}{(T_{PERIOD} - L_{SUM}/V_1)}. \end{array} \right. \quad (5.1)$$

Die einfachste Methode zur Anpassung des Ganges an kleine Hindernisse und einen rauen Untergrund wäre, den Schrittzklus durch den Fußkontakt zu modifizieren. Diese Anpassung bewirkt den Schrittzklus, indem er beim Kontaktsignal seine Geometrie entsprechend der Abb.5.9 ändert, und bringt mehrere Vorteile mit.

Das Hauptmerkmal des entwickelten Schrittzklusgenerators ist das Einhalten der konstanten Geschwindigkeiten in der Transfer-, Stütz-, Hebe-, und Senkenphase unabhängig vom Kontaktpunkt. Dadurch verfügt der Schrittzklusgenerator über folgende Vorteile:

- Unveränderlichkeit der vollen Schrittzkluszeit unabhängig vom Kontaktpunkt;
- vertikales Auftreten bzw. Abheben des Beines auf den Untergrundes;
- automatische Anpassung an kleine Untergrundunebenheiten;
- Möglichkeit zur einfachen Modifikation des Schrittzklus (Höhe, Länge, Orientierung im

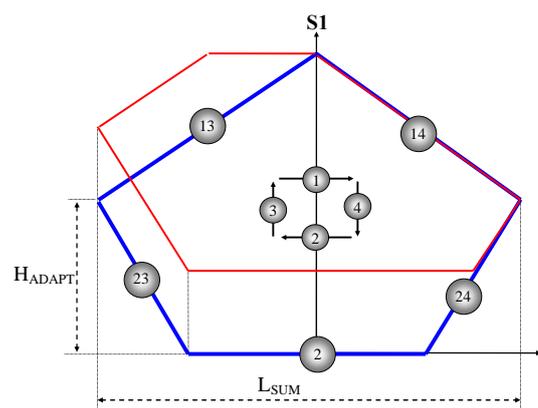


Abb.5.9. Ein adaptives Schrittzklus.

Raum).

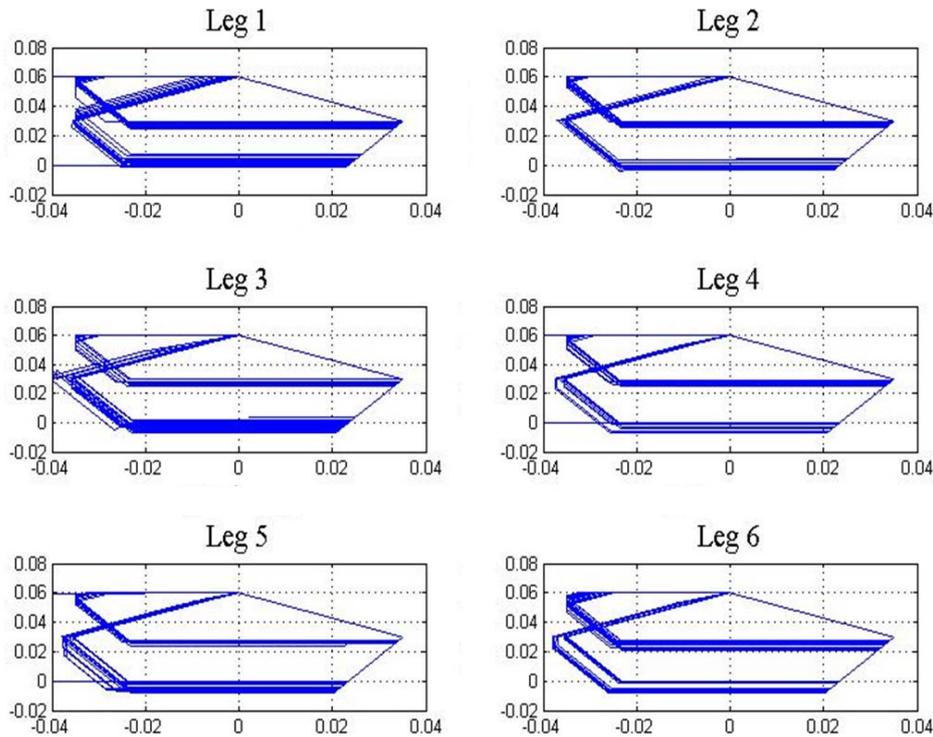


Abb.5.10. Anpassung des Schrittzylklus an Unebenheiten des Untergrundes: Abszisse – Schrittweite in [m], Ordinate - Schritthöhe in [m].

Die Experimentergebnisse zur Anpassung des Schrittzylklus an Unebenheiten des Untergrundes sind in Abb.5.10 wiedergespiegelt. Die maximale Anpassungshöhe ist am 3[cm] eingestellt und die maximale Hinderhöhe beträgt 2.5[cm].

5.4 Stabilisierung des Massenmittelpunktes eines Schreitroboters innerhalb des Stützpolygons

Stabilisierung des Roboter Massenmittelpunktes innerhalb des Stützpolygons spielt die entscheidende Rolle für die Roboterlokomotion. Zur Lösung der Stabilisierungsaufgabe unterscheidet man zwei Fälle:

- Massenverteilung innerhalb des Roboters ist bekannt. Auf den Roboter wirken keine externen Einflüsse ein;
- Das eine bzw. beide der genannten Kriterien sind nicht erfüllt.

In der Strategie zur Stabilisierung des Massenmittelpunktes sind beide Fälle gleich. Die Projektion des Massenmittelpunktes wird anhand der Sensordaten berechnet bzw. anhand der Steuerungssignale vorausgesagt. Der Korrekturvektor Δ_{corr} (s.Abb.5.11) wird entsprechend den gewünschten Kriterien skaliert und zur

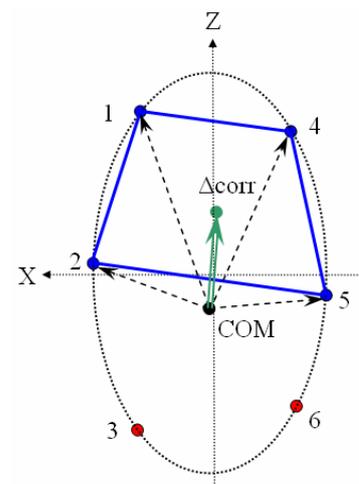


Abb.5.11. Stabilisierung des Massenmittelpunktes innerhalb des Stützpolygons.

Stabilität des Massenmittelpunktes verwendet. Bemerkenswert, dass die meisten kritischen Situationen während der Übergänge zwischen den einzelnen Schreitzyklusphasen entstehen. Ein kennzeichnendes Beispiel bietet der Übergang von der Stützphase zur Transferphase bei einem symmetrischen Tetrapod.

Allerdings unterscheiden sich beide Fälle bei der Berechnung des Massenmittelpunktes. Im ersten Fall, wenn die Massenverteilung im Roboter bekannt ist und keine externen Einflüsse auf den Roboter wirken, kann der Roboter Massenmittelpunkt unter Berücksichtigung aktueller Raumorientierung mit folgenden Formeln berechnet werden:

$$\begin{cases} x_{COM} = rot \left(\frac{\sum x_{BODY} \cdot M_{BODY} \cdot g + \sum x_{LEG} \cdot M_{LEG} \cdot g}{\sum M_{BODY} \cdot g + \sum M_{LEG} \cdot g} \right), \\ z_{COM} = rot \left(\frac{\sum z_{BODY} \cdot M_{BODY} \cdot g + \sum z_{LEG} \cdot M_{LEG} \cdot g}{\sum M_{BODY} \cdot g + \sum M_{LEG} \cdot g} \right). \end{cases} \quad (5.2)$$

Die Information über die Kontaktkraft ist ausschließlich zur Detektierung der Stützbeine verwendet.

Im zweiten Fall, wenn die Massenverteilung im Roboter unbekannt ist oder die externen Einflüsse auf den Roboter wirken, kann der Roboter Massenmittelpunkt unter Berücksichtigung aktueller Raumorientierung ausschließlich anhand der Kontaktkräfte ermittelt werden:

$$\begin{cases} x_{COM} = rot \left(\frac{\sum x_{LEG} \cdot f_{VERTICAL}}{\sum f_{VERTICAL}} \right), \\ z_{COM} = rot \left(\frac{\sum z_{LEG} \cdot f_{VERTICAL}}{\sum f_{VERTICAL}} \right). \end{cases} \quad (5.3)$$

Die Funktionsfähigkeit des Algorithmus ist am Beispiel eines symmetrischen Tetrapods nachgewiesen, wobei sich der Massenmittelpunkt des Roboters beim Übergang von der Stützphase zur Transferphase außerhalb des Stützpolygons befindet. Abhängig davon, ob dieser Übergang für hinteren oder vorderen Beine stattfindet, erzeugt der Algorithmus die positive oder negative Korrektur der Körperlage $\Delta corr$ (s. Abb.5.12).

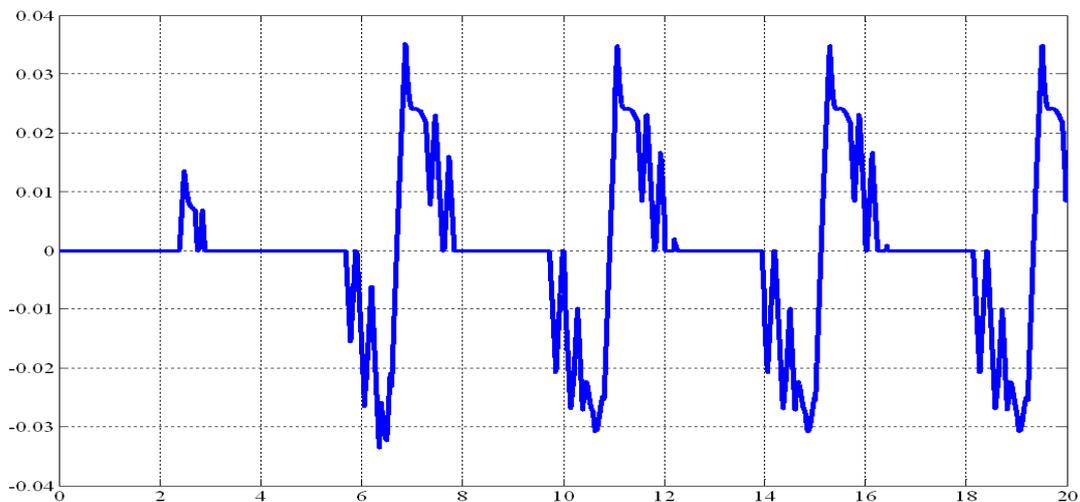


Abb.5.12. Verlauf des Korrekturwertes $\Delta corr$ in [cm] während des symmetrischen Tetrapods.

5.5 Bewegung über das Gelände mit variierbaren mechanischen Untergrundeigenschaften

Bei der Fortbewegung eines Schreitroboters über das komplexe Gelände sind die Kontaktkräfte unter den Roboterfüßen zum großen Teil von variierbaren mechanischen Eigenschaften des Untergrundes abhängig. Es ist daher wichtig, diese Kontaktkräfte, insbesondere ihre Komponenten entlang des Gravitationsvektors, zu ermitteln und gezielt zu beeinflussen.

Ein Schreitroboter verteilt seine Gewichtskraft und seine externe Belastung unter den mehreren Stützbeinen und wirkt über diese Beine auf den Untergrund. Ohne Kontaktkraftregelung können die Ungenauigkeiten in der Roboterkinematik, im Kraftsensor oder im Regelungssystem zur stark unterscheidenden Belastungen in einzelnen Beinen führen. Deshalb müssen die Kontaktkräfte unter den Füßen aktiv verteilt und geregelt werden. Die explizite Regelung der berechneten Kontaktkräfte ist allerdings nicht möglich und kann wegen der Ungenauigkeiten zu unerwünschten Wirkungen, wie z.B. Schwankungen der Bodenfreiheit führen. Deshalb müssen die zusätzlichen Kriterien auf das Verhältnis zwischen den Fußpositionen und den Kontaktkräften, nämlich die Kriterien auf die Nachgiebigkeit der Roboterbeine, erfüllt werden. Die Variationen in den mechanischen Untergrundeigenschaften beeinflussen die Qualität der Nachgiebigkeitsregelung und können die Instabilität und Schwingungen verursachen. Generell beeinträchtigen die folgenden Systemeigenschaften die Nachgiebigkeitsregelung des gebundenen „Roboterbein-Untergrund“ Systems:

- Wechselwirkung zwischen den Beinen,
- nicht kontrollierte Freiheitsgrade in der Bewegung des Schreitroboters (unterdeterminiertes System),
- unbekannte Systemvariablen (unbekannte Untergrundeigenschaften, variable Last).

Deshalb soll die Nachgiebigkeitsregelung anpassungsfähig ausgelegt werden. Ein Weg dieser Anpassung liegt in der Beobachtung mechanischer Eigenschaften des Untergrundes mit weiterer online Modifikation des Grundreglers. Eine andere Methode ist die direkte adaptive Regelung der Nachgiebigkeit des gebundenen "Roboterbein-Untergrund" Systems mit einem Referenzmodell. Im Weiteren sind die genannten Verfahren zur Implementierung der Bewegung über das Gelände mit variierbaren mechanischen Untergrundeigenschaften untersucht.

5.5.1 Aktive Verteilung der Reaktionskräfte

Bezogen auf die Kontaktkräfte ist das Robotersystem statisch unterdeterminiert, wenn die Anzahl der Stützpunkte mehr als drei ist (s.Abb.5.13). In diesem Fall können sich die Kontaktkräfte zufällig ändern. Um die Belastungen auf die Roboterkonstruktion zu optimieren, müssen die vertikalen Komponenten der Kontaktkräfte (entlang des Gravitationsvektors) aktiv verteilt und geregelt werden. Falls die zusätzlichen, nicht vertikalen externen Kräfte auf den Schreitroboter wirken, müssen auch die horizontalen Komponenten einem Optimierungsverfahren unterworfen

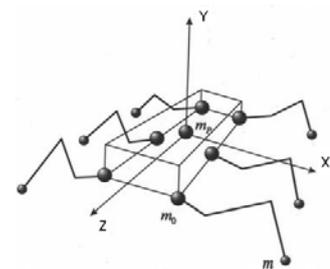


Abb.5.13. Verteilung der vertikalen Komponenten der Kontaktkraft

werden. Weiterhin ist angenommen, dass ausschließlich die Gravitationskraft und die vertikalen Kräfte bzw. Belastungen vorhanden sind.

Bewegen sich die Stützbeine des Schreitroboters relativ langsam im Kontakt mit dem Untergrund, können die statischen Gleichgewichtsbedingungen zur Beschreibung des Kontaktkraftzustandes herangezogen werden. Die Sollwerte der vertikalen Kontaktkraftkomponenten werden unter Berücksichtigung der Körperorientierung im Raum und der aktuellen Beinpositionen berechnet und müssen die folgende Gleichgewichtsbedingungen erfüllen:

$$\begin{bmatrix} \sum_{leg=1}^{SUPPORT_LEGS} f_{leg}^{VERTICAL} \\ \sum_{leg=1}^{SUPPORT_LEGS} f_{leg}^{VERTICAL} \cdot x_{leg} \\ \sum_{leg=1}^{SUPPORT_LEGS} f_{leg}^{VERTICAL} \cdot z_{leg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \\ P \cdot x_{COM} \\ P \cdot z_{COM} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

mit

- P – Gewicht des Schreitroboters,
- $x_{leg} = rot(x_{leg}^{RobotCS})$ – Fußkoordinaten im parallelen zum Gravitationsfeld Koordinatensystem,
- $z_{leg} = rot(z_{leg}^{RobotCS})$ – Koordinaten des Massenmittelpunktes des Schreitroboters im parallelen zum Gravitationsfeld Koordinatensystem, welche entsprechen der Gleichungen (5.2) oder (5.3) berechnet werden.

Mit Hilfe der Matrix $\mathbf{A} \{3 \times N_{SUPPORT_LEGS}\}$, des Vektors $\mathbf{f}^{VERTICAL} \{N_{SUPPORT_LEGS} \times 1\}$ und des Vektors $\mathbf{P} \{3 \times 1\}$ wird die Gleichung (5.4) in der Vektorform umgeschrieben:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{f}^{VERTICAL} = \mathbf{P} \quad (5.5)$$

mit

$$\mathbf{A} \{3 \times N_{SUPPORT_LEGS}\} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_{SUPPORT_LEGS} \\ z_1 & z_2 & \dots & z_{SUPPORT_LEGS} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{f}^{VERTICAL} \{N_{SUPPORT_LEGS} \times 1\} = [f_1^{VERTICAL}, f_2^{VERTICAL}, \dots, f_{SUPPORT_LEGS}^{VERTICAL}]^T,$$

$$\mathbf{P} \{3 \times 1\} = [P, P \cdot x_{COM}, \dots, P \cdot z_{COM}]^T.$$

Die Lösung der Gleichung kann mit der pseudo-inverse Matrix $\mathbf{A}^+ = \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{A}^T)^{-1}$ ermittelt werden:

$$\mathbf{f}^{VERTICAL} = \mathbf{A}^+ \cdot \mathbf{P} = \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{A}^T)^{-1} \cdot \mathbf{P}. \quad (5.6)$$

Allerdings kann die Lösung mehrdeutig ausgesucht werden, wenn die Anzahl der Stützbeine $N_{SUPPORT_LEGS} > 3$. Infolgedessen sollte ein zusätzliches Kriterium hinzugefügt werden. Es gibt verschiedene Wege zur Überwindung der Mehrdeutigkeit. Eins davon ist die Anforderung auf die Summe aller vertikalen Kontaktkräfte:

$$\sum_{leg=1}^{SUPPORT_LEGS} (f_{leg}^{VERTICAL})^2 \rightarrow \min \quad (5.7)$$

Diese Bedingung hat die Bedeutung der Energieoptimierung. So berücksichtigt die aktive Verteilung der Reaktionskräfte die Minimierung der Belastung der Roboterkonstruktion und des Energieverbrauchs in Beinantrieben. Außerdem erfüllen die nach (5.7) optimierten vertikalen Reaktionskräfte das Kriterium

$$\max_{leg} (f_{leg}^{VERTICAL}) \rightarrow \min, \quad (5.8)$$

was die Bewegung auf dem Untergrund mit begrenzter Tragfähigkeit entspricht.

Zur Lösung der Optimierungsverfahren wird die Methode der Lagrange – Multiplikatoren verwendet. Mit der Einführung von Lagrange – Multiplikatoren $\lambda = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3]^T$ und die Umschreibung der Gleichung (5.5) in Form

$$\mathbf{f}^{VERTICAL} = \mathbf{A}^+ \cdot \mathbf{P} = \mathbf{A}^T \cdot (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1} \cdot \mathbf{P} = \mathbf{A}^T \cdot \boldsymbol{\lambda} \quad (5.9)$$

werden die gesuchten vertikalen Kraftkomponenten wie folgt berechnet.

$$\mathbf{f}_{leg}^{VERTICAL} = \mathbf{A}^T \cdot [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3]^T = \lambda_1 + \lambda_2 \cdot \mathbf{x}_{leg} + \lambda_3 \cdot \mathbf{z}_{leg} \quad (5.10)$$

Die Berechnung der Lagrange – Multiplikatoren $\lambda = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3]^T$ liefert die Bedingung

$$\lambda = (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1} \cdot \mathbf{P} \quad \text{oder} \quad (\mathbf{A}\mathbf{A}^T) \cdot \lambda = \mathbf{P}, \quad (5.11)$$

wobei das Gleichungssystem

$$\begin{bmatrix} N_{SUPPORT_LEGS} & S_X & S_Z \\ S_X & S_{XX} & S_{XZ} \\ S_Z & S_{XZ} & S_{ZZ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \\ PX_{COM} \\ PZ_{COM} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

mit

$$S_X = \sum_{leg=1}^{SUPPORT_LEGS} x_{leg}, \quad S_Z = \sum_{leg=1}^{SUPPORT_LEGS} z_{leg}, \quad S_{XZ} = \sum_{leg=1}^{SUPPORT_LEGS} (x_{leg} \cdot z_{leg}),$$

$$S_{XX} = \sum_{leg=1}^{SUPPORT_LEGS} (x_{leg})^2, \quad S_{ZZ} = \sum_{leg=1}^{SUPPORT_LEGS} (z_{leg})^2.$$

mit mehreren bekannten Methoden, wie z.B. Kramer-Methode oder Gauss-Methode gelöst werden kann.

Die vertikalen Kontaktkraftkomponenten, die während des Ganges aktiv verteilt sind, sowie die tatsächlichen vertikalen Kontaktkraftkomponenten, die nicht geregelt werden, sind in der Abb.5.14 dargestellt. Die Experimente sind für alle drei Gangarten (Wellengang, Tertapod und Tripod) ohne externe Belastung sowie für den Tripod mit externer Belastung durchgeführt. Die externe Belastung ist in Form eines Werkzeuges mit der Masse $M_{TOOL} = 1[kg]$ gegeben, der am ersten Segment des Schreitroboters installiert ist.

Die experimentelle Untersuchungen mit Erfassung der tatsächlichen Kontaktkräfte sind auf einem starren Untergrund durchgeführt und verdeutlichen, dass die Verteilung der Belastung zwischen den Beinen ohne aktiver Verteilung der vertikalen Kontaktkraftkomponenten und ohne aktiver Regelung der Nachgiebigkeit der Roboterbeinen zu Schwankungen im Signal der Kontaktkraft führen kann.

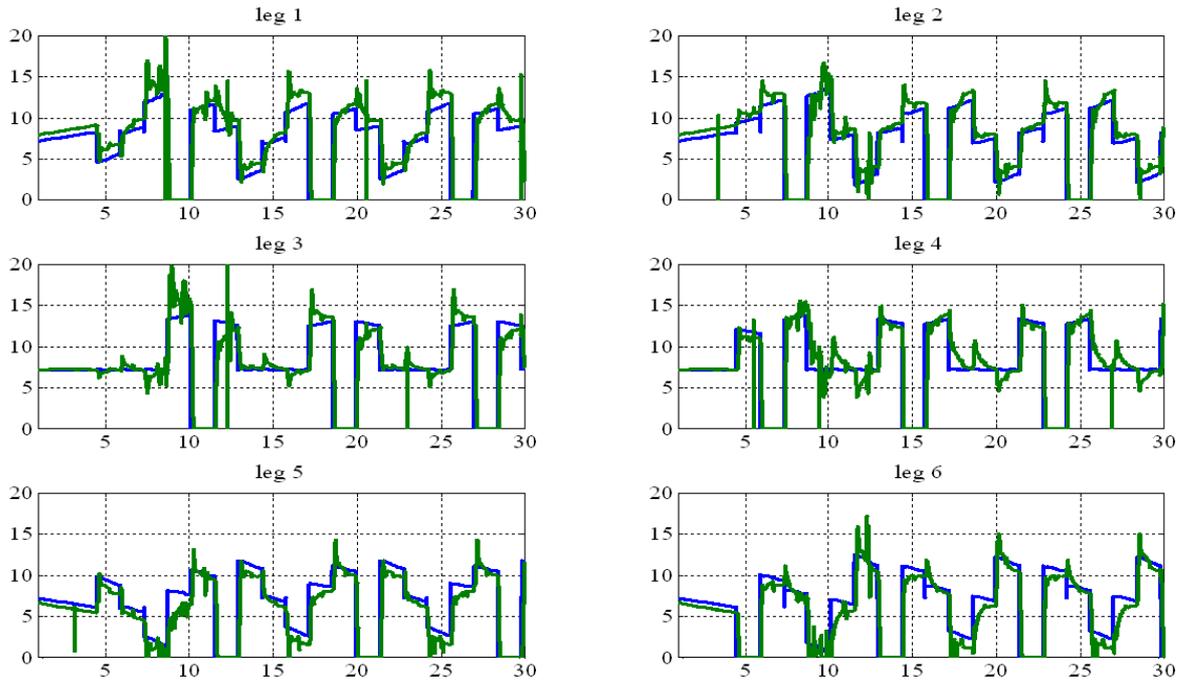


Abb.5.14.(a) Zeitlicher Ablauf der vertikalen (blau) Referenzkomponenten und (grün) tatsächlichen Komponenten der Kontaktkraft in [N] während der Fortbewegung mit dem Wellengang.

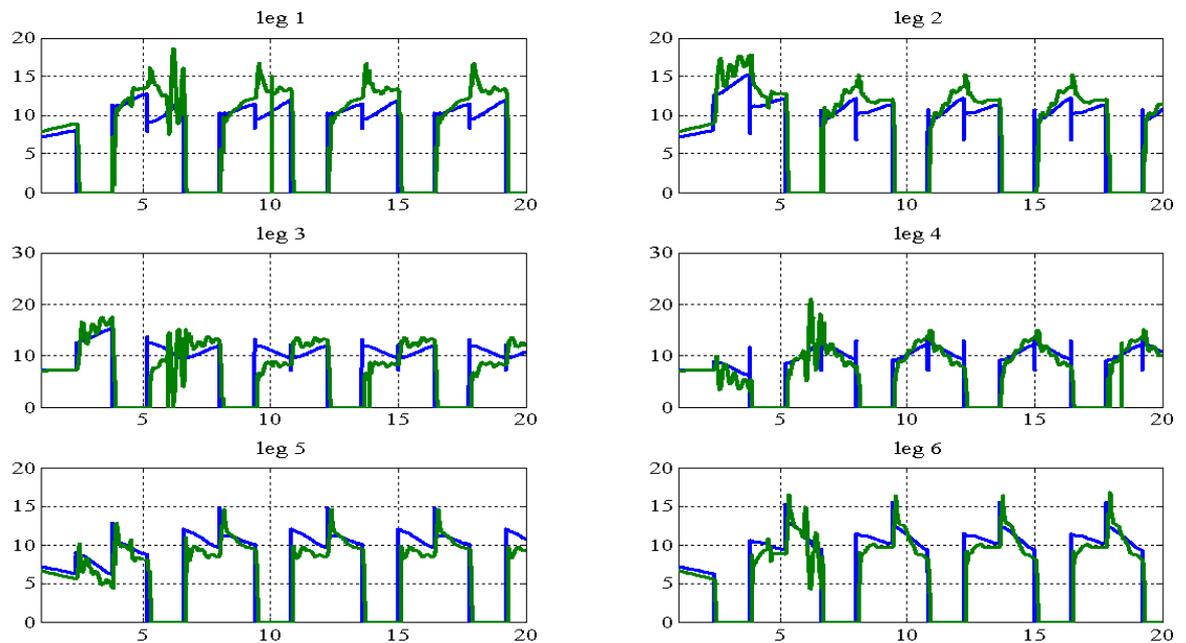


Abb.5.14.(b) Zeitlicher Ablauf der vertikalen (blau) Referenzkomponenten und (grün) tatsächlichen Komponenten der Kontaktkraft in [N] während der Fortbewegung mit dem Tetrapod.

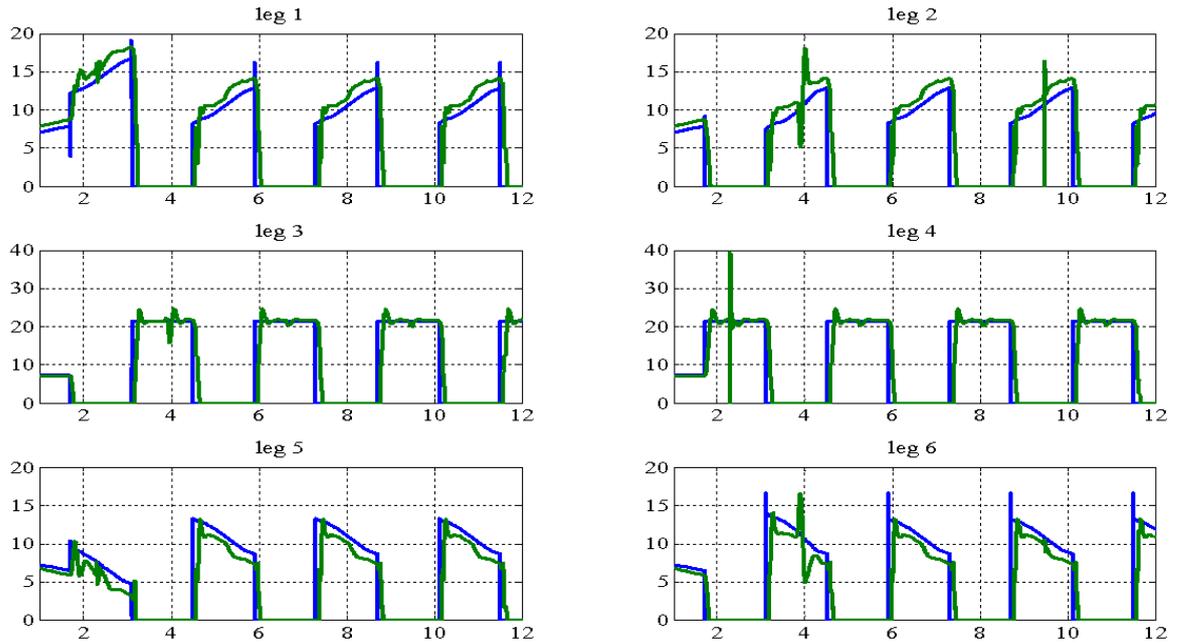


Abb.5.14.(c) Zeitlicher Ablauf der vertikalen (blau) Referenzkomponenten und (grün) tatsächlichen Komponenten der Kontaktkraft in [N] während der Fortbewegung mit dem Tripod.

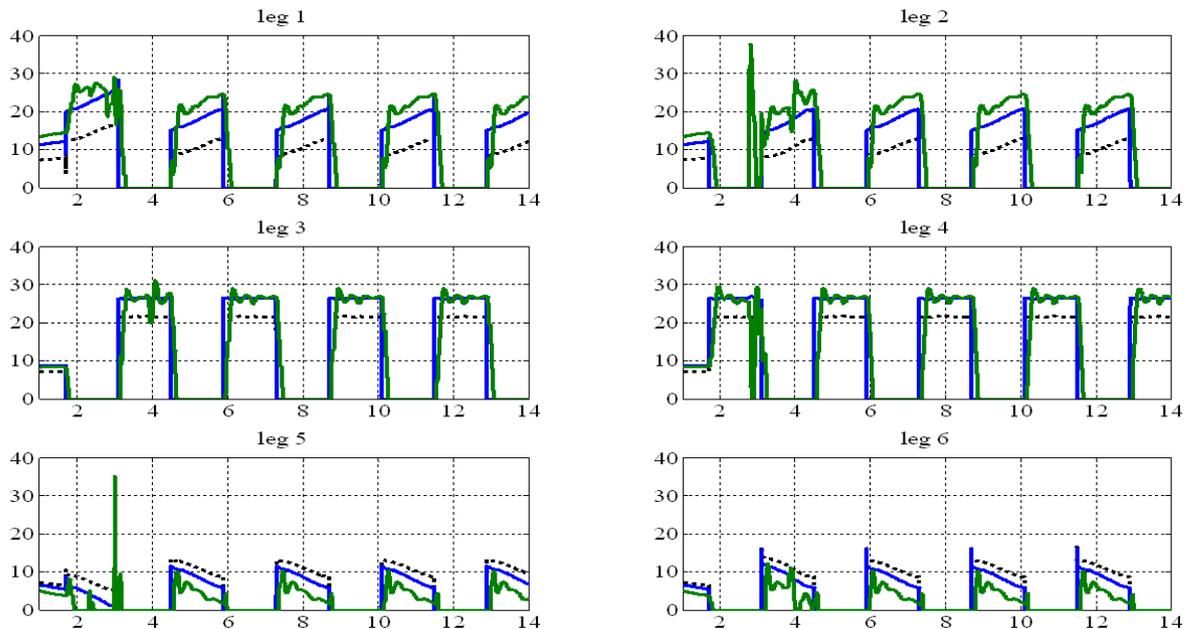


Abb.5.14.(d) Zeitlicher Ablauf der vertikalen (blau – mit Belastung, schwarz – ohne Belastung) Referenzkomponenten und (grün) tatsächlichen Komponenten der Kontaktkraft in [N] während der Fortbewegung mit dem Tripod.

5.5.2 Adaptive Nachgiebigkeitsregelung des „Roboterbein-Untergrund“ Systems

Sind die vertikalen Referenzkomponenten der Kontaktkraft $\mathbf{f}_{REF} = \{0, f_{REF_VERTICAL}, 0\}$ bereits ausgerechnet, dienen sie als Vorspannung der künstlichen Feder, die imaginär am Ende der

entsprechenden Stützbeine angebracht werden. Dabei sollten die Beinbewegungen des Schreitroboters auf dem Untergrund mit verschiedenen mechanischen Eigenschaften (s.Abb.5.15) so angesteuert werden, dass die tatsächliche Nachgiebigkeit des gebundenen Systems $Z_{COUPLED}(s) = \frac{\mathbf{f}_{EXTERNAL}(s)}{\Delta \mathbf{x}_{ACT}(s)}$ unter Berücksichtigung der Vorspannung $\mathbf{f}_{REF}(s)$ immer

der Referenznachgiebigkeit $Z_{REF}(s)$ entspricht:

$$\frac{\mathbf{f}_{EXTERNAL}(s) - \mathbf{f}_{REF}(s)}{\Delta \mathbf{x}_{REF}(s)} = \mathbf{K}_{REF} \cdot \left(1 + 2 \cdot \xi_{REF} \cdot \frac{1}{\omega_{0REF}} \cdot s + \frac{1}{\omega_{0REF}^2} \cdot s^2 \right). \quad (5.13)$$

Dabei sollte die Steuerung des Robotersystems über die absolute Änderung der Beinbefestigungspunkte $\Delta \mathbf{x}_{REF}$ erfolgt werden. Die Bedingung (5.13) sollte dazu führen, dass alle Beinbefestigungspunkte $\mathbf{x}_1(s)$ auf gleicher Höhe unabhängig von mechanischen Untergrundeigenschaften bleiben, falls die erforderliche Nachgiebigkeit des gebundenen Systems eingestellt wird.

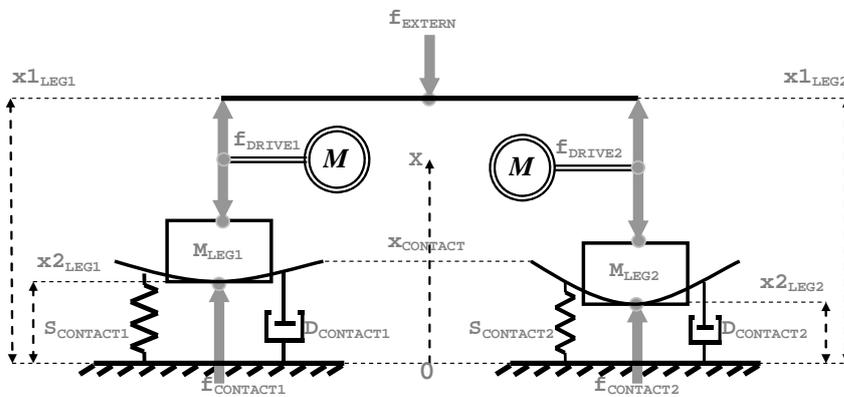


Abb.5.15. Ersatzschema vom Schreitroboter im Kontakt mit dem Untergrund mit verschiedenen Kontakteigenschaften unter den Beinen und unter dem Eingriff externer Kraft.

Allerdings sind die Koordinate $\mathbf{x}_1(s)$ und ihre Verschiebung $\Delta \mathbf{x}_1(s)$ generell nicht messbar und die gewünschte Nachgiebigkeit des gebundenen Systems könnte direkt über $\Delta \mathbf{x}_{REF}$ nicht angesteuert werden. Die indirekten Verfahren sind in nachfolgenden Schritten betrachtet.

→ Falls der Schreitroboter sich auf einem starren Untergrund bewegt, spiegeln sich die externen Kräfte (Gravitation, externe Kraft) direkt in den Kontaktkräften $\mathbf{f}_{CONTACT}(s) = \mathbf{f}_{EXTERNAL}(s)$ wieder. Die Verschiebungen der Beinbefestigungspunkte $\Delta \mathbf{x}_{REF}$ könnte in relativen Änderungen der Beinpositionen $\Delta \mathbf{x}_{REF}(s)$ ausgedrückt werden. Die gewünschte Nachgiebigkeit des gebundenen Systems (5.13) reduziert sich auf die Gleichung:

$$\frac{\mathbf{f}_{CONTACT}(s) - \mathbf{f}_{REF}(s)}{\Delta \mathbf{x}_{REF}(s)} = \mathbf{K}_{REF} \cdot \left(1 + 2 \cdot \xi_{REF} \cdot \frac{1}{\omega_{0REF}} \cdot s + \frac{1}{\omega_{0REF}^2} \cdot s^2 \right) \quad (5.14)$$

und wird über die Änderungen der Beinpositionen $\Delta \mathbf{x}_{REF}(s)$ geregelt. Das Verfahren ist damit auf die pure Nachgiebigkeitsregelung des „Roboter“ Systems reduziert. Seine Funktionsfähigkeit ist untersucht und im Kapitel 4 bereits beschrieben. Allerdings sind die experimentellen Untersuchungen am Beispiel eines Schreitroboters dennoch vom Interesse, da es sich um eine parallele Roboterstruktur handelt und da die Verkopplungen und Wechselwirkungen zwischen den Beinen existieren. Die experimentellen Ergebnisse

(s. Abb. 5.16) sind auf einem starren Untergrund $S_{ENV} = 10^5 [N/m]$ durchgeführt. Die Parameter der gewünschten Roboternachgiebigkeit sind $K_{REF} = 500 [N/m]$, $\xi_{REF} = 1$, und $\omega_{0REF} = 1 [Hz]$. Als adaptiver Regelungsalgorithmus ist den mit einem Referenzmodell verwendet, wird allerdings erst nach ca. 3[s] eingeschaltet, um seine Funktionsfähigkeit zu verdeutlichen.

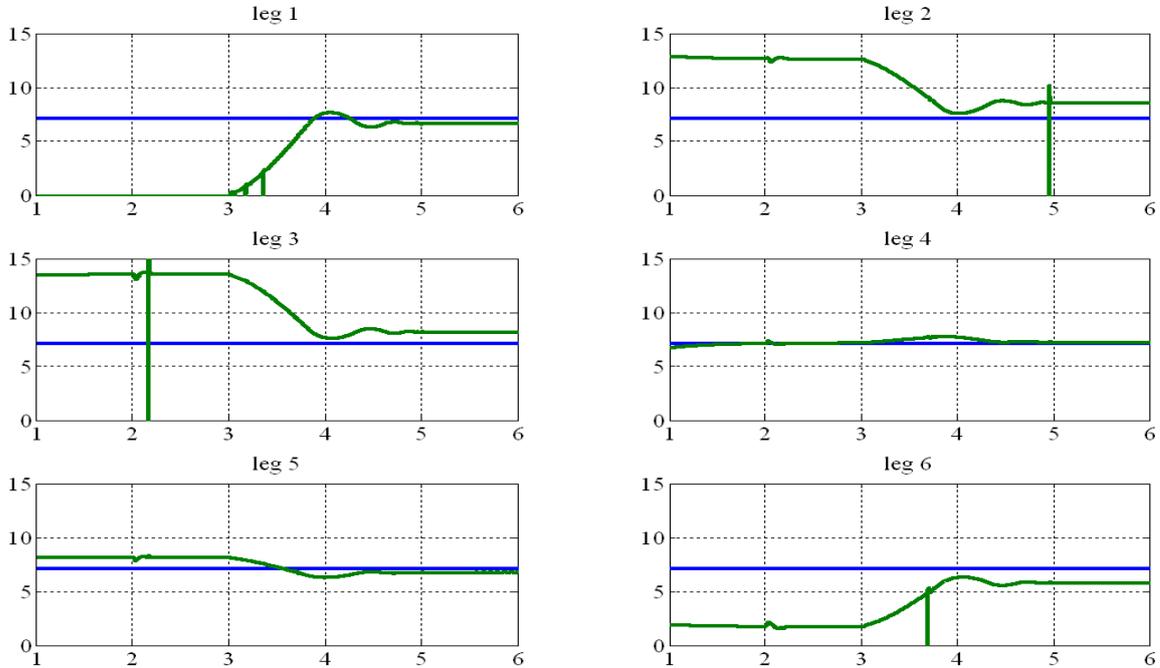


Abb. 5.16. (blau) Referenzverteilung der vertikalen Kontaktkraftkomponenten in [N], (grün) tatsächliche Verteilung der vertikalen Kontaktkraftkomponenten in [N] vor und nach dem Einschalten der Nachgiebigkeitsregelung.

Wie man in der Abb. 5.16 sehen kann, nähert sich die am Anfang ungünstige Verteilung (stark ungleichmäßige Strukturbelastung) der vertikalen Kontaktkraftkomponenten nach dem Einschalten der Nachgiebigkeitsregelung der Referenzverteilung (gleichmäßige Strukturbelastung) $\mathbf{f}_{LEGS} [N] = \{0, 12.9, 14.0, 6.2, 8.2, 2.0\} \rightarrow \{6.7, 8.6, 8.2, 7.2, 6.8, 5.9\}$. Der Roboter gewicht beträgt $4.4 [kg]$.

→ Falls der Schreitroboter sich auf einem elastischen Untergrund bewegt und die mechanischen Untergrundeigenschaften unter den Roboterfüßen $\mathbf{Z}_{ENV}(s)$ bekannt sind bzw. online ermittelt werden, wird die gewünschte Nachgiebigkeit des gebundenen „Roboterbein-Untergrund“ Systems $\mathbf{Z}_{COUPLED}(s)$ in die entsprechenden Nachgiebigkeiten von Roboterbeinen umgerechnet $\mathbf{Z}_{LEG}(s) = \frac{\mathbf{Z}_{ENV}(s) \cdot \mathbf{Z}_{COUPLED}(s)}{\mathbf{Z}_{ENV}(s) - \mathbf{Z}_{COUPLED}(s)}$. Das Verfahren reduziert sich

wieder auf die pure Nachgiebigkeitsregelung des „Roboter“ Systems und wird deshalb nicht näher beleuchtet. Außerdem hat das Verfahren einen offensichtlichen Nachteil, der in der Anforderung an die stetige Ermittlung der mechanischen Untergrundeigenschaften liegt. Im Kapitel 3 ist bereits erläutert, dass die Untergrundidentifikation unter einem Fuß erst dann möglich ist, wenn der restliche Teil des Schreitroboters unbeweglich bleibt, d.h. die anderen Beine bleiben unbeweglich auf dem Untergrund. Wird die Identifikation des Untergrundes online durchgeführt, wird die Fortbewegungsgeschwindigkeit stark reduziert. Daher ist dieses Regelungsverfahren ohne große praktische Bedeutung.

→ Falls der Schreitroboter sich auf einem elastischen Untergrund bewegt und die mechanischen Untergrundeigenschaften unter den Roboterfüßen $Z_{ENV}(s)$ nicht bekannt sind bzw. nicht ermittelt werden, wird die gewünschte Nachgiebigkeit des gebundenen „Roboterbein-Untergrund“ Systems indirekt entsprechend der Abb.5.17. geregelt.

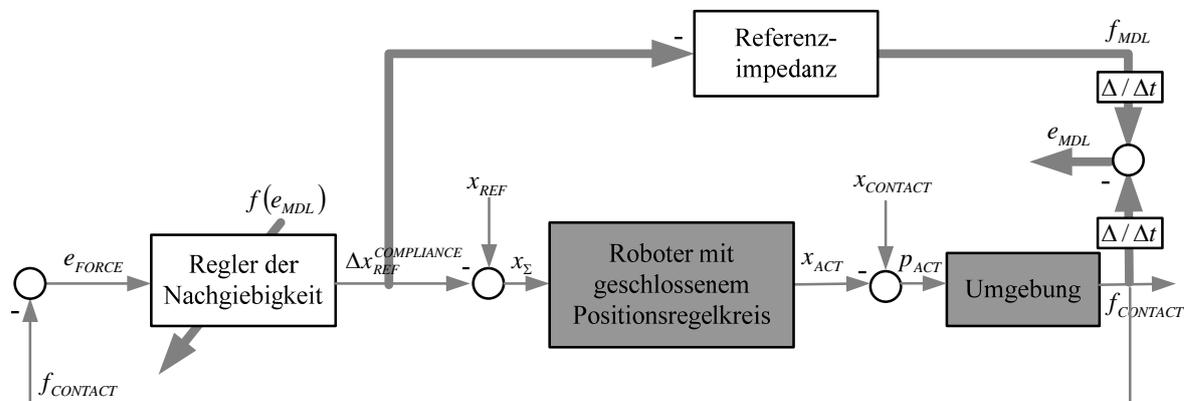


Abb.5.17. Adaptive Nachgiebigkeitsregelung des gebundenen „Schreitroboter/Untergrund“-Systems mit Referenzmodell

Wie man sehen kann, wird diese Struktur ausschließlich während der Kontaktkraftänderung aktiviert und erzeugt Steuerungssignale $\Delta x_{REF}^{COMPLIANCE}$, welche die Kraftdynamik zwischen dem Referenzmodell und der tatsächlichen Kontaktkraft ausgleichen. Mit anderen Worten, ruft die Änderung der Position die gleiche Änderung der Kontaktkraft im Referenzmodell und im gebundenen „Roboterbein-Untergrund“ System hervor. Ergeben sich verschiedene Änderung beim Kontaktaufbau, wie z.B. in der Abb.5.18 zu sehen ist, werden die Parameter des Grundreglers anhand der Differenz $\left(\frac{\Delta f_{MDL}}{\Delta t} - \frac{\Delta f_{CONTACT}}{\Delta t} \right)$ angepasst.

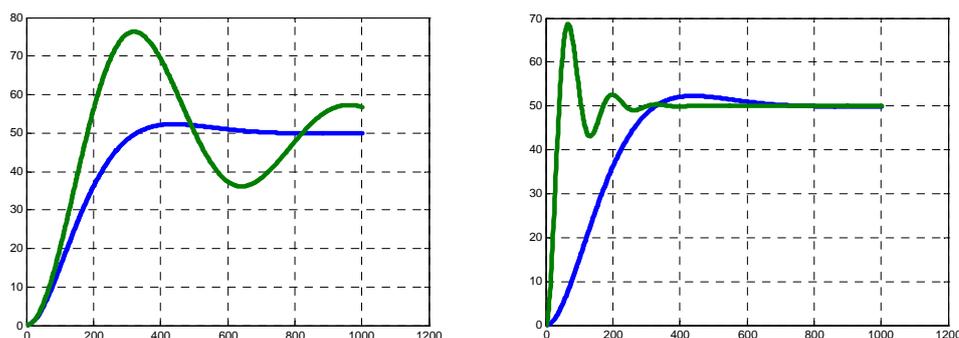


Abb.5.18. (blau) Referenzverteilung der vertikalen Kontaktkraftkomponenten in [N], (grün) tatsächliche Verteilung der vertikalen Kontaktkraftkomponenten in [N] (links) auf einem weichen Untergrund und (rechts) auf einem starren Untergrund.

Die Simulationsuntersuchungen (s.Abb.5.19) sind auf einem Untergrund mit verschiedenen mechanischen Eigenschaften unter den linken und den rechten Roboterfüßen $S_{ENV_LEFT} = 10^4 [N/m]$ und $S_{ENV_RIGHT} = 10^3 [N/m]$ durchgeführt. Damit ist die sechsbeinige Roboterkonstruktion für die bessere Darstellung der Ergebnisse auf die zweibeinige (jeweils ein Bein auf der linken und rechten Roboterseite) zurückgeführt. Die Parameter der

gewünschten Nachgiebigkeit des gebundenen Systems sind $K_{REF} = 500[N/m]$, $\xi_{REF} = 1$, $\omega_{0REF} = 5[Hz]$.

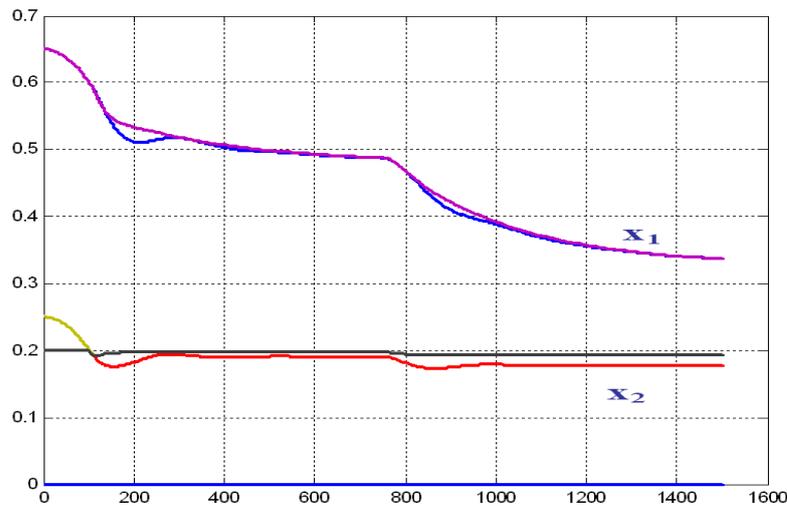


Abb.5.19. (blau und magenta) absolute Koordinaten in [m] der Beinbefestigungspunkte auf der linken und rechten Seite und dementsprechend (schwarz und rot) absolute Koordinaten in [m] der Roboterfüße.

Die Untersuchungen, die sich in der sprungartigen Belastung der Roboterkonstruktion äußern, beweisen die Möglichkeit indirekter Einstellung der Nachgiebigkeit des gebundenen Systems $\frac{\mathbf{f}_{EXTERNAL}(s) - \mathbf{f}_{REF}(s)}{\Delta \mathbf{x}_{1REF}(s)}$ bei variierenden mechanischen Untergrundeigenschaften. Der

Regelalgorithmus bewirkt ausserdem eine hochqualitative Kontaktnahme (minimale Tendenz zu Schwingungen, Kontaktstabilität und Begrenzung der Kontaktkraft).

5.6 Klettern

Die Kletteraufgaben schließen fast alle vorher untersuchten Lokomotionsaufgaben (spezielle Aufmerksamkeit gilt der Vorhersage und Stabilisierung des Massenmittelpunktes innerhalb des Stützpolygons) ein und verlangen zusätzlich:

- Identifizierung der Reibungskegel zwischen den Füßen und der tragenden Oberfläche,
- Umschalten der Gangart in Tetrapod während der Überwindung vertikaler Hindernisse,
- aktive Regelung der zusätzlichen Freiheitsgrade im Roboterkörper.

5.6.1 Ermittlung der Reibungskegeln

Die Lösung dieser Aufgabe ist mit der Identifikation der Koeffizienten der Coulomb'schen Reibung $\mu_{FRICTION}$ der Füße mit dem Untergrund verbunden und kann ähnlich der Identifikation der mechanischen Untergrundeigenschaften ausgeführt werden. Das bedeutet, dass der Roboter die Untergrundbelastung in die normale und tangentielle Richtung ausübt und die maximale Belastung dort determiniert, wo die Bewegung des Fußes ansetzt. Das

ermittelte Verhältnis $\mu_{FRICITION} = \frac{\max(f_{TANGENTIAL})}{f_{NORMAL}}$ entspricht dem gesuchten Wert der Coulomb'schen Reibung, ist nicht linear, und hängt von angewählter Normalbelastung f_{NORMAL} ab.

5.6.2 Hindernisse mit mäßiger Steigung

Der folgende Steuerungsalgorithmus zum Überwinden der Hindernisse mit mäßiger Steigung braucht keine Umschaltung der Gangart und beruht auf dem folgenden Gedanken: *der Roboterkörper muss den großen Unregelmäßigkeiten des Untergrundes folgen* (größer als Standardanpassungszone im Schritzyklusgenerator) (s.Abb.5.20):

- erstens, entdeckt das Sensorsystem für die Nahnavigation (oder ein Roboterbediener) den imaginären Radius der Unregelmäßigkeiten des Untergrundes und berechnet kontinuierlich den Normalvektor zur Oberfläche;
- zweitens, die Segmente des Roboterkörpers sind unter Berücksichtigung der Bodenfreiheit bezüglich des aktuellen Normalvektors zur Oberfläche entsprechend der Formel (5.15) anzusteuern.

$$\varphi_{REF}^{BODY} = \{ \varphi_{NORMAL}^{NEXT_SEGMENT} - \varphi_{NORMAL}^{PREVIOUS_SEGMENT} \}. \quad (5.15)$$

Je kleiner die Körpersegmente sind, desto glatter kann der Schreitroboter die tragende Oberfläche folgen und desto kleiner sind die Abweichungen zwischen der realen Oberfläche und dem berechneten Schritzyklus. Die entstehenden Abweichungen werden durch den anpassungsfähigen Schritzyklus (Anpassungszone) und durch den reaktiver Gangartkontroller (Übergang in die Transferphase wird ausschließlich mit dem Nachbarnkontakt bestätigt) eliminiert.

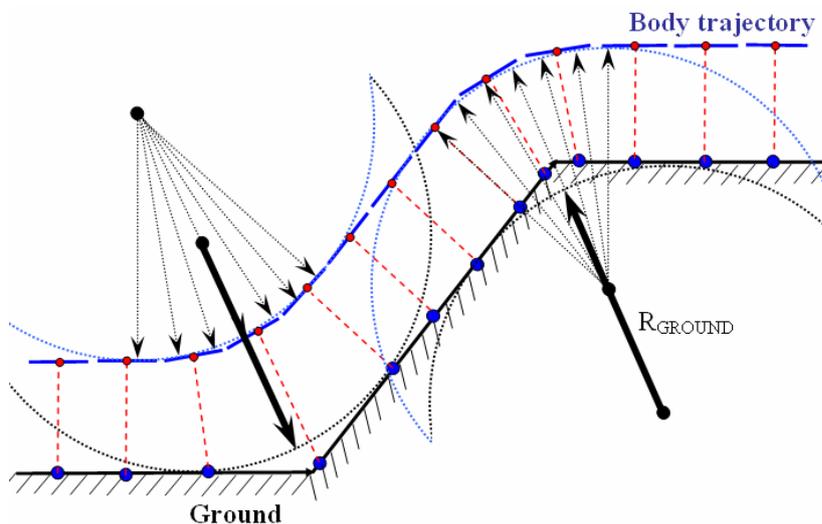


Abb.5.20. Klettern geneigter Hindernisse.

5.6.3 Hindernisse mit vertikaler Steigung

Von Anfang an muss man verdeutlichen, dass mit dem vorgeschlagenen Verfahren solche Hindernisse mit vertikaler Steigung überwunden werden, deren maximale Höhe ungefähr der

Roboterkörperlänge entspricht. Bei Hindernissen mit vertikaler Steigung ist die Umschaltung der Gangart in den symmetrischen Tetrapod erforderlich. Die Startkonfiguration des Roboters muss sicherstellen, dass die Roboterlängsachse in gleicher Ebene zum Normalvektor der zu überwindenden Oberfläche ist. Die Hauptidee des Steuerungsalgorithmus zum Überwinden des Hindernisses bleibt allerdings unverändert.

Die Abb.5.21 stellt ein Vergleich des Klettvorganges vom Schreitroboter mit entsprechend starrem (oben) und flexiblem (unten) Körper. Wie man sehen kann, erlaubt der flexible Körper eine bessere Annäherung des Massenmittelpunktes des Schreitroboters zum Hindernis und macht es möglich, den Winkel α zwischen dem Körpersegment und der Oberfläche besser anzupassen und deshalb auch größere Hindernisse zu überwinden.

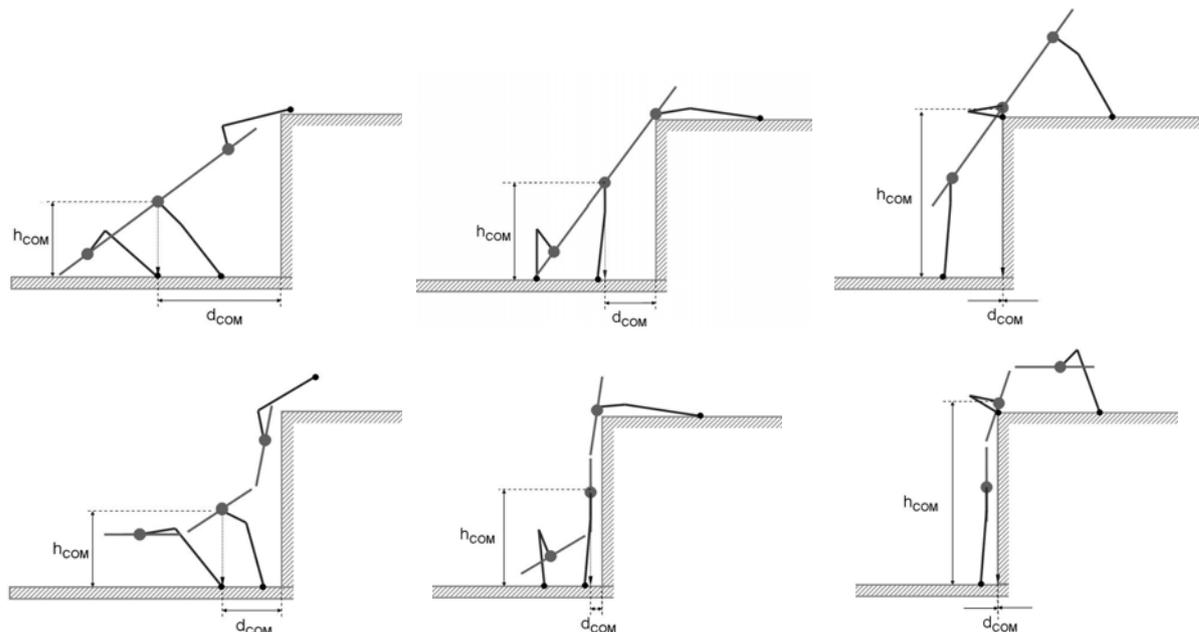


Abb.5.21. Klettern vertikaler Hindernisse mit starrem und flexiblem Roboterkörper

Die maximale Höhe des Hindernisses kann nach der Formel (5.16) abgeschätzt werden.

$$h_{MAX} = l_{LEG} + l_{BODY_SEGMENT} \cdot \sin(\alpha) \quad (5.16)$$

Ist die Körpersegmentlänge vergleichsmäßig kleiner als die Beinlänge, bringt der flexible Körper keine bedeutenden Vorteile bezüglich der Hindernishöhe. Beim Schreitroboter „Slair2“ werden folgende Werte ermittelt:

$$\begin{cases} h_{MAX_RIGID} \approx 314 + 260 \cdot \sin(50^\circ) = 497 \text{ mm}, \\ h_{MAX_FLEXY} \approx 314 + 260 \cdot \sin(80^\circ) = 560 \text{ mm}. \end{cases}$$

Allerdings bringt die Anwendung des flexiblen Körpers bedeutende Vorteile bezüglich des erforderlichen maximalen Drehmomentes des Antriebes mit. Im kritischsten Fall, nämlich während der Unterstützung auf den mittleren und vorderen Beinen und Anheben der hinteren Beine, ist das maximale Antriebsdrehmoment proportional zum Kosinus des Winkels α zwischen dem Körpersegment und der Oberfläche:

$$\tau_{DRIVE_MAX} \sim l_{BODY_SEGMENT} \cdot \cos(\alpha) \quad (5.17)$$

und es ist vielfache kleiner für den Schreitroboter mit flexiblem Körper.

Kapitel 6

Zusammenfassung

Robotersysteme finden immer häufiger Einsatz in der Automatisierung von Kontaktaufgaben. Diese fordern von den Robotersystemen im Gegensatz zu den traditionellen kontaktfreien Aufgaben einen mechanischen Kontakt mit der Umgebung und eine Gewährleistung der gewünschten mechanischen Interaktion. Typische Beispiele von Robotersystemen in Kontaktaufgaben sind industrielle Manipulationsroboter in Aufgaben der mechanischen Montage, der mechanischen Verformung, der mechanischen Oberflächenbearbeitung sowie auch Schreitroboter, aktive Exoskeletts, kooperative Roboter, künstliche Hände usw. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass ein Robotersystem im Kontakt den zusätzlichen Bindungen unterliegt und dass die Einschränkungen auf der Roboterbewegung entstehen. Der mechanische Energieaustausch zwischen dem Robotersystem und der Umgebung im Kontaktbereich kann erheblich variieren und das Verhalten des Robotersystems enorm beeinflussen. Deswegen gilt die Kontaktkraft als Kennwert des Energieaustausches und sollte für eine erfolgreiche Durchführung der Kontaktaufgaben und für die Gewährleistung einer determinierten mechanischen Interaktion gemessen und in den Steuerungs- und Regelungsalgorithmen berücksichtigt werden. Demzufolge gelten als Ziele der Regelung des Robotersystems in Kontaktaufgaben neben der traditionellen Einstellung gewünschter Geschwindigkeits- bzw. Positionsverläufe die zusätzliche Einstellung des Kontaktverlaufs und die Gewährleistung der Kontaktnahme mit gewünschter Qualität.

Die Kontaktkräfte hängen seinerseits von den mechanischen Eigenschaften und der Geometrie des Kontaktes ab. Es ist in vorliegender Arbeit veranschaulicht, dass die Kontaktkräfte ausschließlich durch die gezielte Regelung der Kontaktgeometrie zu kontrollieren sind, da die mechanischen Kontakteigenschaften sich durch das Robotersystem generell nicht beeinflussen lassen. Die Kontaktgeometrie, die sich für einen nicht variierenden Endeffektor ausschließlich in der Penetrationstiefe äußert, lässt sich indirekt über die Regelung der generalisierten Roboterposition (Lage /Geschwindigkeit /Beschleunigung) kontrollieren.

Abhängig von der Art und Weise, wie ein Robotersystem und seine Umgebung in Wechselwirkung zueinander treten, werden die Reaktion des Robotersystems auf die Umgebungseinflüsse und die Beeinflussung der Umgebung vom Robotersystem selbst unterschieden. Aufgrund dessen ist in vorliegender Arbeit entsprechende Klassifikation der Kontaktaufgaben vorgeschlagen, die sich weiterhin in den Regelungsverfahren widerspiegelt. Die Aufgaben mit potentiell Kontakt (Reaktion auf die Umgebungseinflüsse) werden nach Verfahren zur Einstellung gewünschter Roboternachgiebigkeit geregelt. Die Aufgaben mit

ausgeprägtem Kontakt (Beeinflussung der Umgebung) werden nach Verfahren zur Einstellung gewünschter Kontaktkraft geregelt.

In der vorliegenden Arbeit sind die Algorithmen der Nachgiebigkeitsregelung und der Kontaktkraftregelung betrachtet, die auf der Messung der Kontaktkraft basieren. Infolge vieler Nichtlinearitäten sowohl im Robotersystem als auch im Bereich des Kontaktes sind diese Regelungsalgorithmen anpassungsfähig ausgelegt. Die in der Fachliteratur bis jetzt fehlenden Verfahren, wie Nachgiebigkeitsregelung eines gebundenen „Manipulationroboter-Umgebung“ bzw. „Schreitroboter-Untergrund“ Systems sind in dieser Arbeit entwickelt. Es ist nachgewiesen, dass die adaptiven Regelungsalgorithmen sowohl mit einem Referenzmodell als auch mit einem Identifikator zur Regelung der Roboternachgiebigkeit sowie der Kontaktkraft deren Einsatz finden. Die relevanten theoretischen Hintergründe beider Gruppen von Algorithmen sind ausführlich erläutert.

Die Funktionsfähigkeit der ausgewählten und entwickelten adaptiven Regelungsalgorithmen ist in Experiment- bzw. Simulationsuntersuchungen nachgewiesen. Zu diesem Zweck ist ein industrieller Manipulationsroboter „Mitsubishi RVE3J“ und ein Schreitroboter „Katharina“ ausgewählt und außerdem ein sechsbeiniger Schreitroboter „Slair“ entwickelt. Am Beispiel des stationären Manipulationsroboters „Mitsubishi RVE3J“ sind viele Basisoperationen, wie z.B. Ermittlung der Kontaktgeometrie, Ermittlung der Kontaktmechanik, adaptive Regelung der Nachgiebigkeit des „Roboter“ Systems bzw. des gebundenen „Roboter-Umgebung“ Systems untersucht. Am Beispiel des Schreitroboters „Katharina“, der in den Reibungskegel fest steht und deshalb als stationär betrachtet wird, sind einige Operationen der mechanischen Montage und Oberflächenbearbeitung untersucht. Am Beispiel des sechsbeinigen Schreitroboters „Slair“ sind die lokomotorischen Kontaktaufgaben, wie die Generierung reaktiver Gangarten, Organisation eines adaptiven Schrittzklus, Stabilisierung des Massenmittelpunktes des Roboters innerhalb des Stützpolygons, Bewegung über das komplexe Gelände mit variierbaren mechanischen Eigenschaften des Untergrundes sowie Klettern untersucht.

Zusammenfassend lässt sich folgendes formulieren: die Kontaktkraft ist der wichtigste Kennwert der mechanischen Interaktion zwischen einem Robotersystem und seiner Umgebung. Zur Beobachtung und Regelung diese Interaktion müssen die Kontaktkräfte mittels der Kraft-/Drehmomentsensoren gemessen und ins Regelungssystem eingeführt werden. Dies erlaubt die Regelung gewünschter Nachgiebigkeit des Robotersystems sowie die explizite Regelung der Kontaktkraft mit der vorgegebenen Regelgüte zu gestalten. Die ausgewählten bzw. entwickelten adaptiven Regelungsalgorithmen sind für die Lösung vieler Kontaktaufgaben geeignet, sind allgemeingültig und lassen sich auch auf andere Robotersysteme übertragen.

Abkürzungsverzeichnis

SISO	engl. <i>Single Input Single Output</i>
SIMO	engl. <i>Single Input Multiple Output</i>
MISO	engl. <i>Multiple Input Single Output</i>
MIMO	engl. <i>Multiple Input Multiple Output</i>
ARX	engl. <i>Auto Regressive with eXogenous input</i>
ARMAX	engl. <i>Auto Regressive Moving Average with eXogenous input</i>
BJ	engl. <i>Box-Jenkins</i>
KNN	<i>Künstliche Neuronale Netze</i>
MLP	engl. <i>Multi-Layer Perceptron</i>
ANFIS	engl. <i>Artificial Neuro Fuzzy Inference System</i>
RBF	<i>Radiale Basisfunktionen</i>
LSE	<i>Methode kleinster Quadrate</i> (engl. <i>Least Square Estimation</i>)
MKS	<i>Mehrkörpersimulation bzw. Mehrkörpersimulator</i>
RCC	<i>Entferntes Nachgiebigkeitszentrum</i> (engl. <i>Remote Centre Compliance</i>)
AEP	engl. <i>Anterior Extreme Position</i>
PEP	engl. <i>Posterior Extreme Position</i>
DSP	Digitaler Signalprozessor
HAL	Hardwareabstraktionsebene (engl. <i>Hardware Abstraction Layer</i>)

Symbolverzeichnis

Im Allgemein gilt folgende Bezeichnung der Symbole:

x	Skalarsignal,
X	Skalarparameter,
\mathbf{x}	Vektor bzw. Matrix der Signale,
\mathbf{X}	Vektor bzw. Matrix der Parameter.

Die in dieser Arbeit meist angewandten Symbole aus der Kontaktmechanik sind:

$\mathbf{f}_{CONTACT}$	Kontaktkraft,
$\mathbf{p}_{CONTACT}$	Penetration,
$\{\mathbf{S}, \mathbf{D}, \mathbf{M}\}$	Matrizen der Steifigkeit, Dämpfung, Trägheit,
λ	Vektor der Lagrange Multiplikatoren.

Die in dieser Arbeit meist angewandte Symbole aus der Regelungstheorie sind:

\mathbf{u}	Eingangsvektor der Regelstrecke,
\mathbf{y}	Ausgangsvektor der Regelstrecke,
\mathbf{x}	Zustandsvektor der Regelstrecke,
Θ	Vektor der einzustellenden Parameter,
Δ_{Θ}	Vektor der Abweichungen,
\mathbf{e}	Fehlervektor,
$\{\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}\}$	Matrizen zur Beschreibung der Regelstrecke im Zustandsraum,
\mathbf{H}	Lösung der Lyapunov Gleichung $\mathbf{A}^T \mathbf{H} + \mathbf{H} \mathbf{A} = -\mathbf{Q}, \mathbf{Q} > 0$,
λ	Koeffizient des Informationswertverlustes.

Literaturverzeichnis

Literaturquellen zum Kapitel 1

- [Adam99] *Adams R.* Stable Haptic Interaction with Virtual Environments. PhD Thesis, 1999, University of Washington, Department of Electrical Engineering.
- [Adel87] *Adelman G.* Encyclopedia of Neuroscience, 1987, vol. I. Birkhauser.
- [Ande88] *Anderson R., Spong M.* Hybrid impedance control of robotic manipulators. IEEE J. Robotics and Automation, 1988, vol. 4, no.5.
- [Arca02] *Arcara P., Melchiorri C.* Control schemes for teleoperation with time delay: A comparative study. Robotics and Automation Systems, 2002, vol. 38, pp. 49-64.
- [Ashb74] *Ashby W. R.* Einführung in die Kybernetik. Suhrkamp, Frankfurt, 1974.
- [Baum76] *Baumann E.* Elektrische Kraftmesstechnik. VEB Verlag Technik, Berlin, 1976.
- [Bray90] *Bray A., Barbato G., Levi R.* Theory and Practice of Force Measurement. Academic Press, 1990.
- [Chap92] *Chapel J.D., Su R.* Coupled stability characteristics of nearly passive robots. Proc. IEEE ICRA, Nice, 1992.
- [Cher94] *Chernousko F.L., Bolotnik N.N., Gradetsky V.G.* Manipulation Robots: Dynamics, control and Optimization, Boca Raton, Florida: CRC Press, 1994.
- [Chia88] *Chiaverini S., Sciavicco L.* Force/position control of manipulators in task space with dominance in force. Proc. 2nd IFAC Symposium on Robot Control, Karlsruhe, 1988.
- [Chun99] *Chung P.H.* Impedance Control and Modulation for Stable Footing in Locomotion of Biped Robots. Proc. of ICRA, Detroit-Michigan, 1999, pp. 1786-1791.
- [Coif83] *Coiffet P.* Interaction with the Environment (Robot Technology vol.2). Kogan Page, London, 1983.
- [Conn93] *Connolly C.I., Burns J. B.* A state-space striatal model. In J. Houk, editor, Models of information processing in the basal ganglia. MIT Press, October 1993.
- [Cutk86] *Cutkovsky M.R., Wright P.K.* Active control of a compliant wrist in manufacturing tasks. Robot Sensors, vol.2. Tactile and Non-Vision. Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- [Damm96] *Damm M.* Zweiarm-Koordination Kraftgeregelter Manipulatoren mit situationsabhängiger Lastverteilung. VDI Verlag, 1996.
- [DeFa85] *De Fazio T.L., Seltzer D.S., Whitney D.E.* The IRCC instrumented remote centre compliance. International Trends in manufacturing Technology Robotic Assembly. Berlin: Springer-Verlag, 1985.
- [DeLu91] *De Luca A., Manes C.* On the modeling of robots in contact with a dynamic environment. Proc. 5th ICAR, Pisa, 1991.
- [DeSc88] *De Shutter J., Van Brussel H.* Compliant robot motion II: A control based on

- external control loops. The Intern. J. Robotics Research, 1988, vol.7, no.4.
- [DeSc92a] *De Schutter J., Bruyninckx H.* Model-based specification and execution of compliant motion. Tutorial M6, IEEE ICRA, Nice, 1992.
- [Egup02] *Egupov N.D.* Methoden der robusten, neuro-fuzzy und adaptiven Regelung. In Russisch, MGTU Baumann Verlag, 2002, ISBN 5-7038-2030-8.
- [Elf91] *Elfving A., Kirchoff U.* Design Methodology for Space Automation and Robotic Systems. ESA Journal, 1991, vol.15, pp.149 – 164.
- [Eppi87] *Eppinger, S.D., Seering, W.P.* Intriduction to dynamic robot models for robot force control. IEEE Control Systems Magazine, 1987, vol.2, no.2
- [Fass99] *Fasse E., Gosselin C.* Spatial-Geometric Impedance Control of Gough-Stewart Platforms. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, vol.15, pp. 281-288.
- [Feat99] *Featherstone R.* A Dynamic Model of Contact between a Robot and an Environment with Unknown Dynamics. Dept. Of Systems Engineering, Australian National University, Canberra, 2000.
- [Fila00] *Filaretov V.F.* Selbstanpassende Regelungssysteme für Manipulatorantriebe (in Russisch). Vladivostok, Izdatelstvo DVG TU, 2000.
- [Gold87] *Goldenberg A.A.* Force and impedance control of robot manipulators. Proc. ASME Winter Annual Meeting, Boston, 1987.
- [Gol88] *Goldenberg A.A.* Implementation of Force and Impedance Control in Robot Manipulators. IEEE Robotic and Automation, 1988.
- [Gori86] *Gorinevsky D.M., Lensky A.V.; Schneider A.Yu.* Dependence of the natural frequencies of a force-moment sensor on the design parameters. Vestnik of Moscow University, 1986, 41(3), pp.10-16.
- [Gori94] *Gorinevski D.M., Formalski A.M., Sneider A. J.* Control of Manipulation Robots Based on Force Information. Physical-Mathematical Literature, Moscow (in Russian), 1994.
- [Gori00] *Gorinevsky D.M., Formalsky A.M., Schneider A. Yu.* Force Control of Robotics Systems. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2000.
- [Gree68] *Green A.E., Zerna W.* Theoretical Elasticity. Clarendon Press, Oxford, 1968, 457 p.
- [Guyt72] *Guyton A.C.* Structure and Function of the Nervous System. W.B. Saunders Company, 1972.
- [Hann01] *Hannaford B., Ryu J-H.* Time Domain Passivity Control of Haptic Interfaces”, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, 2001, pp. 1863-1869.
- [Hirz00] *Cortésao R., Koeppel R., Nunes U., Hirzinger G.* Explicit Force Control with Active Observers“, Proceedings of 2000 IROS, 2000.
- [Hirz01] *Hirzinger G., Albu-Schäffer A., Hähle M., Schaefer I., Sporer N.* On a New Generation of Torque Controlled Light-Weight Robots. Proceedings of 2001 ICRA, Seoul, Korea, 2001, pp. 3356-3361.
- [Holl89] *An C.H., Hollenbach J.M.* The role of dynamic models in Cartesian force control. The Intern. J. Robotics Research, 1989, vol.8, no.4
- [Ito84] *Ito Masao.* The Cerebellum and Neural Control. Raven Press, 1984.
- [Jako01] *Jakovleva G.N.* Entwicklung der automatisierten Prognosesysteme auf der Basis von Theorie der neuronalen Netze. PhD Thesis, 2001. <http://vlasov.iu4.bmstu.ru/univer/aspitant/jakovl>
- [Kand91] *Kandel E.R., Schwartz J.H., Jessell T.M.* Principles of Neural Science, 3rd edition. Appleton & Lange, 1991.
- [Kaze90] *Kazerooni H., Waibel B.J., Kim S.* On the stability of robot compliant motion control: theory and experiments. ASME J. Dynamic Systems, Measurement,

- and Control, 1990, vol.112.
- [Lata93] *Latash Mark L.* Control of Human Movement. Human Kinetics Publishers, Champaign, Illinois, 1993.
- [Lawr88] *Lawrence D.A.* Impedance Control Stability Properties in Common Implementations. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1988, pp. 1185-1190.
- [Lipk88] *Lipkin H., Duffy J.* Hybrid twist and wrench control for a robotic manipulator. Proc. ASME J. Mechanisms, Transmission, and Automation in Design, 1988, vol.110, no.2.
- [Lutz02] *Lutz, H., Wendt, W.* Taschenbuch der Regelungstechnik. 4., korrigierte Aufl., Frankfurt am Main, 2002.
- [Maso81] *Mason M.T.* Compliance and force control for computer controlled manipulators. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1981, vol. SMC-11, no.4.
- [Maso83] *Mason M.T.* Compliant Motion Robot Motion: Planning and Control, Hrsg: Brady M., Hollerbach J.M., Johnson T.L., Lozano- Perez T., Mason M.T., MIT Press Cambridge 1983, s.305-322.
- [McCl88] *McClamroch H., Wang D.* Feedback stabilization and tracking of constrained robots. IEEE Trans, On Automatic Control, 1988, vol.33, no.75.
- [Mill93] *Mills J., Lokhorst D.* Control of Robotic manipulators During general Task Execution: A Discontinuous Control Approach. The International Journal of Robotic Research, 1993, vol. 12, No. 2, pp. 146-162.
- [Nare74] *Narendra K.S., Kudva P.* Stable adaptive schemes for system identification and control. Part I, II. IEEE Trans., 1974, V.SMC4, no.6, pp.542-560.
- [Nare80] *Narendra K.S., Valavani L.S.* A comparison of Lyapunov's and hypersbility approaches to addaptive control of continues systems. IEEE Trans. Automat. Conference, 1980, AC25, no.2, pp.243-247.
- [Nauc98] *Nauck D., Klawonn F., Kruse R.* Foundation of Neuro-Fuzzy Systems. John Willey & Sons Verlag, 1998.
- [Norg00] *Norgaard M., Ravn O., Poulsen N.K., Hansen L.K.* Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems. Springer-Verlag London, 2000.
- [Pali02] *Palis F., Rusin V.* Self-learning impedance controller. In Proc. of the 5th Int. Conf. On CLAWAR and the Support Technologies for Mobile Machines, Paris (France), 25-27 September 2002, pp. 117-122.
- [Pfei90] *Pfeiffer F., Richter K., Wapenhans H.* Elastic Robot Trajectory Planning with Force Control. Proc. of International Symposium on Theory of Robots. Rome, Italy, 1990.
- [Raib81] *Raibert M.H., Craig J.J.* Hybrid position/force control of manipulators. ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1981, vol.102, no. 2.
- [Rebo92] *Reboulet C., Pigeyre R.* Hybrid Control of a 6-DOF In-Parallel Actuated Micro-Manipulatore Mounted on a Scara Robot. International Journal of Robotics and Automation, 1992, Vol. 7, No.1, pp. 10-14.
- [Rein02] *Reinkensmeyer D.J.* "Rehabilitators" in Biomedical Engineer's Handbook (Ed. M. Kutz), McGraw Hill, 2002.
- [Rief00] *Riefenstahl U.* Elektrische Antriebstechnik. B.G. Teubner Stuttgart – Leipzig, 2000. ISBN 3-519-06429-4.
- [Schn04] *Rusin. V., Schmucker U., Schneider A., Zavgorodniy Y.* Legged Adaptive Platform for Service Operations. 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems IAS8, Amsterdam, 10-13 March, 2004.
- [Schn05] *Palis F., Rusin. V., Schmucker U., Schneider A., Zavgorodniy Y.* Walking

- Robot with Force Controlled Legs and Articulated Body. 15th International Symposium on Measurement and Control in Robotics ISMCR2005, Royal Military Academy, Brussel, 8-10 November 2005.
- [Scia02] *Sciavicco L., Siciliano B.* Modelling and Control of Robot Manipulators. Springer-Verlag, 2000, ISBN 1-85233-221-2.
- [Sera87] *Seraji H., Colbaugh R.* Force Tracking in Impedance Control. IEEE ICRA, 1987.
- [Shim77] *Shimano B., Roth B.* On Force-Sensing Information and Its Use in Controlling Manipulators. Proc. of Conf. on Information and Control Problems in Manufacturing Technology IFAC, 1977.
- [Smit98] *Smith R.L.* Intelligent motion control with an artificial cerebellum. PhD Thesis, University of Auckland, Australia, 1998.
- [Solo85] *Solodovnikov V.V., Semenov V.V.* Synthese analytischer selbstjustierender Systeme. In Russisch. Moskau: Maschinostroenie, 1985.
- [Surd01] *Šurdilović D., De Bartolomeo M., Grassini F.* Synthesis of Impedance Control for Complex Cooperating Robot Assembly Tasks. Proc. AIM'01 Conference, Como, Italy, 2001, pp. 1181-1187.
- [Surd02] *Surdilovic D.* Synthesis of Robust Compliance Control Algorithm for Industrial Robots and Advanced Interaction Systems. Dissertation, Berlin, 2002.
- [Volp93b] *Volpe R., Khosla P.* A Theoretical and Experimental Investigation of Impact Control for Manipulators. The International Journal of Robotics Research, 1993, vol.12, no.4, pp. 351-365.
- [Voss85] *Vossoughi R., Donath M.* Robot Hand Impedance Control in the Presence of Mechanical Nonlinearities. Proceedings of Winter Annual Meeting of ASME, 1985, pp. 67-77.
- [Vuko97] *Vukobratovic M., Surdilovic D.* Control of Robotic System in Kontakt task: an Overview. Izvestia akademii nauk, 1997, vol.5, PP 173-192.
- [Warn79] *Warnecke H.-J., Schweizer M.* Taktile Sensoren für programmierbare Handhabungsgeräte. WT – Zeitschrift für industrielle Fertigung 1979, Vol.69, S.159-136.
- [Wats75] *Watson P.C., Drake S.H.* Pedestal and Wrist Force Sensors for Automatic Assembly. Proc.5th Int.Symp.on Industrial Robots (ISIR), Chicago (USA) 1975 S.501-511.
- [Wede88] *Wedel D.L., Saridis G.N.* An experiment in hybrid position/force control of a six DOF revolute manipulator. Proc. of IEEE ICRA, 1988.
- [Wink06] *Winkler A.* Ein Beitrag zur kraftbasierten Mensch-Roboter-Interaktion. Dissertation an der TU Chemnitz, 2006.
- [Whit86] *Whitney D.E., Nevins J.L.* What is remote centre compliance (RCC) and what it can do. Robot Sensors, vol.2. Tactile and Non-Vision. Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- [Whit87] *Whitney D.E.* Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control. Intern. J. Robotics Research, 1987, vol. 6, no.1.
- [Wu96] *Wu Y., Tarn T.J., Xi N., Isidori A.* On Robust Impact Control via Positive Acceleration Feedback for Robot Manipulators. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, 1996, pp. 1891-1896.
- [Yosh00] *Yoshikawa T.* Force Control of Robot Manipulators. Proceedings of 2000 ICRA, San Francisco, California, pp. 220-225.
- [Zell00] *Zell A.* Simulation neuronaler Netze. R.Oldenbourg Verlag München Wien, 2000.

- [Zypk68] *Zypkin J.Z.* Adaptation und Lernen in automatisierten Systemen. In Russisch. Moskau: Nauka, 1968.

Literaturquellen zum Kapitel 2

- [Arms91] *Armstrong-Helouvry B.* Control of Machines With Friction, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991.
- [Barr89] *Barrat D.* Analytical Methods for Dynamic Simulation of Non-penetrating Rigid Bodies. Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 89) , July 1989, vol.23, nr.3, pp. 223-232.
- [Bath02] *Bathe K.-J.* Finite-Elemente-Methoden. 2.Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002.
- [Berg03] *G. van den Bergen.* Collision Detection in Interaction 3D Environments. 2003.
- [Canu93a] *Canudas de Wit C.* Robust Control for Servo-Mechanisms Under Inexact Friction Compensation. Automatica, 1993, vol.29, no.3, pp.757-761.
- [Canu93b] *Canudas de Wit C., Ollson H., Åström K.J., Lischinsky P.* Dynamic Friction Models and Control design. Proc. the American Control Conference, San-Francisco, California, 1993, pp.1920-1926.
- [Chun96a] *Chung K., Wang W.* Quick Elimination of Non-Interference Polytopes in Virtual Environments. 3rd European Workshop on Virtual Environments, Monte Carlo, Monaco, 19-20 Feb, 1996.
- [Chun96b] *Chung K., Wang W.* Quick Collision Detection of Polytopes in Virtual Environments. ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, University of Hong Kong, Hong Kong, 1-4 July, 1996,
- [Chun96c] *Chung K., Wang W.* Discrete Moving Frames for Sweep Surface Modeling. Pacific Graphics, Hsinchu, Taiwan, 19-22 August, 1996.
- [Colg88] *Colgate J. E., Hogan N.* Robust Control of Dynamically Interacting Systems. International Journal of Control, 1988, Vol. 48, No. 1, pp.65-88.
- [Crai81] *Craig R.* Structural Dynamics: An Introduction to Computer Methods. John Willey & Sons, New York, 1981.
- [Crai86] *Craig J.J.* Introduction to Robotics: Mechanics & Control. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1986.
- [Deme94] *Demeester F., Van Brussel H.* Experimental Compliance Breakdown of Industrial Robots. Journal of Mechanical Design, 1994, vol. 116, pp. 1065-1072.
- [Eber99] *D. Eberly.* Intersection of Objects with Linear and Angular Velocities using Oriented Bounding Boxes. Magic Software, 1999.
- [Eber02] *D. Eberly.* Dynamic Collision Detection using Oriented Bounding Boxes. Magic Software, 2002.
- [Enge00] *V. Engelson.* Integration of Collision Detection with the Multibody System Library in Modelica. PhD Thesis. PELAB, IDA, Linköping University, 2000.
- [Eric99a] *J. Basch, J. Erickson, L.J. Guibas, J. Hershberger, Li Zhang.* Kinetic collision detection between two simple polygons. Proc. of 10th annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms, 1999, pp. 102–111.
- [Eric99b] *J. Erickson, L.J. Guibas, J. Stolfi, Li Zhang.* Separation-sensitive collision detection for convex objects. Proceedings of the tenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms, 1999, Pages 327 – 336.
- [Fila00] *Filaretov V.F.* Selbstanpassende Regelungssysteme für Manipulatorantriebe (in Russisch). Vladivostok, Izdatelstvo DVG TU, 2000.

- [Frey97] *F.Frey*. Vorlesung: Mikroskopische Grundlagen von Materialeigenschaften, Sektion Kristallographie, Department für Geo- und Umweltwissenschaften, LMU München, 1997.
- [Gogo88] *Gogoussis A., Donath M.* Coulomb Friction Effects on the Dynamics of Bearings and Transmissions in Precision Robot Mechanisms. Proc. of IEEE ICRA, Philadelphia, pp.1440-1446. 1988.
- [Goll81] *Golla D.F., Garg S.C., Hughes P.C.* Linear State Feedback of Manipulators. Mechanism Machine Theory, 1981, Vol. 16, pp. 93-103.
- [Golu03] *Golubev Y.F., Korianov V.V.* Motion design for six-legged robot overcoming the vertical column by means of friction forces. In Proc. of the 6th Int. Conference on CLAWAR, Catania, Italy, 2003.
- [Kall91] *Kallenbach E., Bögelsack G.* Gerätetechnische Antriebe. Hanser, 1991. ISBN 3-446-15872-3.
- [Karn85] *Karnopp D.* Computer Simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions ASME, 1985, vol.107, pp.100-103.
- [Khos88] *Khosla P.K.* Estimation of robot dynamic parameters: Theory and Application. International Journal of Robotics and Automation, 1988, vol. 3., no. 1, pp. 35-41.
- [Khos89] *Khosla P.K., Kanade T.* Real-time Implementation and Evaluation of Computed Torque Scheme. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, vol. 5, no. 2, pp. 245-253.
- [Khos92] *Khosla P., Volpe R.* An Experimental Evaluation and Comparison of Explicit Force Control Strategies for Robotic Manipulators. IEEE ICRA, 1992.
- [Klos95] *Held M., Klosowski J.T., Mitchell J.S.B.* Evaluation of Collision Detection Methods for Virtual Reality Fly-Throughs. 7th Canadian Conference on Computational Geometry, Québec, Canada, Aug 10-13, 1995, pp 205-210.
- [Klos97] *Klosowski J.T., Held M., Mitchell J.S.B., Sowizral H., Zikan K.* Efficient Collision Detection Using Bounding Volume Hierarchies of k-DOPs. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, March 1997, Vol. 4.
- [Klos98] *Klosowski J.T.* Efficient Collision Detection for Interactive 3D Graphics and Virtual Environments. Ph.D. Dissertation, State University of New York at Stony Brook, May 1998.
- [Leah89] *Leahy M.B, Valavanis K.P., Saridis G.N.* Evaluation of Dynamic Models for PUMA Robot Control. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, vol. 5, no. 2, pp. 242-245.
- [Lian87] *Liang C.G., Lance G.M.* A Differentiable Null Space Method for Constrained Dynamic Analysis. Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 1987, vol. 109, pp. 405-411.
- [Lin91] *Lin M., Canny J.* A fast algorithm for incremental distance calculation. In IEEE Conference on Robotics and Automation, 1991, pages 1008-1014.
- [Lin92] *Lin M.C.* Efficient Collision Detection for Animation and Robotics. Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, 1992.
- [Lin95] *Cohen J.D., Lin M.C., Manocha D., Ponamgi M.K.* I-COLLIDE: an interactive and exact collision detection system for large-scale environments. Proc. ACM Interactive 3D Graphics Conf., 1995, pages 189-196.
- [Lin96] *S. Gottschalk, M. Lin and D. Manocha.* OBB-Tree: A Hierarchical Structure for Rapid Interference Detection. Appeared in Proc. of ACM Siggraph'96, 1996.
- [Mirt96] *Brian Mirtich.* Impulse-based Dynamic Simulation of Rigid Body Systems. Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, 1996.

- [Mirt98] *Brian Mirtich*. V-Clip: fast and robust polyhedral collision detection. ACM Trans, Jul. 1998, Graph. 17, 3, Pages 177-208.
- [Naka91] *Nakamura Y.* Advanced Robotics: Redundancy and Optimization, Addison-Wesley Publishing Company Inc., Massachusetts, 1991.
- [Nich95] *Nicholson E.J., Fearing R.S.* The Reliability of Curvature Estimates from Linear Elastic Tactile Sensors. IEEE ICRA, Nagoya, Japan, 1995, pp. 1126-1133.
- [Ramo94] *Ramon E., Burdick J.* Mobility of Bodies in Contact-II : How Forces are Generated by Curvature Effects? IEEE ICRA, San Diego, California, 1994, pp. 2336-2341.
- [Schi90] *Schilling R.J.* Fundamentals of robotics. Prentice Hall Inc., 1990, ISBN 0-13-344433-3.
- [Schm99] *Schmalstieg D., Tobler R.F.* Real-time Bounding Box Area Computation. Institute of Computer Graphics, Vienna University of Technology, 1999.
- [Surd93] *Šurdilović D., Lizama E., Lück R.* Identification of Dynamic Parameters of Large Manipulator Arms with Closed Kinematic Loops. In Robot Calibration (Eds. Bernhardt R. and Albright S.), Chapman & Hall, London, 1993, pp. 233-269.
- [Surd96a] *Surdilović D., Vukobratović M.* Deflection Compensation for Large Flexible Manipulators. Mech. Mach. Theory, 1996 a, vol. 31, no.3, pp. 317-329.
- [Surd96b] *Surdilović D., Vukobratović M.* One Method for Efficient Dynamic Modeling of Flexible Manipulators. Mech. Mach. Theory, 1996 b, vol. 31, No.3, pp. 297-315.
- [Timo70] *Timoshenko S.P., Goodier J.N.* Theory of Elasticity, 3-rd Ed. McGraw-Hill, Kogakusha Ltd, 1970.
- [Vuko89] *Vukobratović M.* Applied Dynamics of Manipulation Robots, Monograph, Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- [Zytk83] *Zytkovitsch N.A.* Mechanik der Untergrunde. In Russisch. Moskau, Vyschaja Schkola, 1983.

Literaturquellen zum Kapitel 3

- [AlJa95] *Al Al-Jarrah O.M., Zheng Y.F.* Intelligent Compliant Motion Control. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minnesota, 1995, pp. 2610-2615.
- [Bruy96] *S. Dutre, H. Bruyninckx and J. DeSchutter.* Contact Identification and Monitoring Based on Energy. IEEE ICRA, Minneapolis/Minnesota, April 1996.
- [Dane90] *Daneshmend L., Hayward V., Pelletier M.* Adaptation to Environment Stiffness in the Control of Manipulators. Experimental Robotics I (Ed. Hayward V., Khatib O.), 1990, pp. 150-156, Springer-Verlag.
- [DeSh96] *Bruyninckx H., DeSchutter J.* Specification of the Force-Controlled Action in the „Task Frame Formalism“: A Synthesis. Katholieke Universiteit Leuven, June 1996.
- [Frad92] *Fradkov A.L., Stotsky A.A.* Speed gradient adaptive algorithms for mechanical system. International journal of adaptive control and signal processing, 1992, vol.6, pp.211-220.
- [Greb01] *Gudvin G.C., Grebe S.F., Salgado M.E.* Control systems design. Pearson Education Inc, Prentice Hall, 2001.
- [Jako01] *Jakovleva G.N.* Entwicklung der automatisierten Prognosesysteme auf der

- Basis von Theorie der neuronalen Netze. PhD Thesis, 2001.
<http://vlasov.iu4.bmstu.ru/univer/aspirant/jakovl>
- [Jung00] *Jung S., Hsia T.C.* Robust Neural Force Control Scheme under Uncertainties in Robot Dynamics and Unknown Environment. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000.
- [Kras76] *Krasovskiy A.A.* Optimale Algorithmen in Aufgaben der Identifikation mit adaptiven Modellen. Automatika und Telemekhanika, 1976, Nr.12, s.75-82 (in Russisch).
- [Lian87] *Liang C.G., and Lance G.M.* 1987, "A Differentiable Null Space Method for Constrained Dynamic Analysis", Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, vol. 109, pp. 405-411.
- [Maso83] *Mason M.T.* Compliant Motion Robot Motion: Planning and Control. Hrsg: Brady M., Hollerbach J.M., Johnson T.L., Lozano- Perez T., Mason M.T., MIT Press Cambridge, 1983, s.305-322.
- [Meeu06] *Meeussen W.* Compliant Robot Motion: From Path Planning Or Human Demonstration To Force Controlled Task Execution. Phd Thesis. Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2006.
- [Mono74] *Monopoli R.V.* Model reference adaptive control with an augmented error signal. IEEE Trans. On Automat.Control, 1974, vol.19, nr.5, p.474-484.
- [Mors78] *Feuer A., Morse A.S.* Adaptive control of single-input, single-output linear systems. IEEE Trans.on.Automat.Control, 1978, vol.23, Nr.4, P.557-569.
- [Nare80a] *Narendra K.S., Valavani L.S.* A comparison of Lyapunov's and hyperstability approaches to adaptive control of continuous systems. IEEE Trans.Automat.Conf, 1980, v.25, nr.2, p.243-247.
- [Nare80b] *Narendra K.S., Lin A.H., Valavani L.S.* Stable adaptive controller design. Part II: proof of stability. IEEE Trans.on.Automat.Control, 1980, Vol.25, Nr.3, pp.440-448.
- [Nauc98] *Nauck D., Klawonn F., Kruse R.* Foundation of Neuro-Fuzzy Systems. John Willey & Sons Verlag, 1998.
- [Norg00] *Norgaard M., Ravn O., Poulsen N.K., Hansen L.K.* Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems. Springer-Verlag, London, 2000.
- [Paul72] *Paul R.P.C.* Modelling, Trajectory Calculation and Servoing of a Computer Controlled Arm Stanford AI Lab. Stanford University, AI Memo 177, Stanford (USA), 1972.
- [Raib81] *Raibert M.H., Craig J.J.* Hybrid Position/Force Control of Manipulators. Trans.ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1981, vol.102, pp.126-133.
- [Ried92] *Riedmiller M., Braun H.* Rprop – a fast adaptive learning algorithm. Technical report, University of Karlsruhe, 1992.
- [Sera87] *Seraji H., Colbaugh R.* Force Tracking in Impedance Control. IEEE ICRA, 1987.
- [Volp92] *Volpe R., Khosla P.* An Experimental Evaluation and Comparison of Explicit Force Control Strategies for Robotic Manipulators. IEEE ICRA, 1992.
- [Vuco98] *Katic D., Vukobratovic M.* A Neural Network-Based Classification of Environment Dynamics Models for Compliant Control of Manipulation Robots. IEEE Transactions on Systems, man, and Cybernetics - part B: Cybernetics, Februar 1998, vol. 28, Nr.1.