

„Ulrich Jumar, Christian Diedrich (Hrsg.):
EKA 2024 - Entwurf komplexer Automatisierungssysteme, 18. Fachtagung“

Analyse und Konzeption von Informationsmodellen für Soft Robotics

Unified Soft Robotics Description Format

Linus Witucki¹, Mike Barth²

Abstract: Moderne flexible Fertigungs- und Montagelinien werden zunehmend durch Anwendungen aus dem Bereich der Mensch-Maschine-Kooperation und -Kollaboration ergänzt. Dabei spielen Cobots unterschiedlichster Hersteller eine wesentliche Rolle und bilden den Stand der Technik. In der Forschung werden neue Roboterklassen untersucht, welche das Zusammenspiel von Mensch und Maschine inhärent sicher ermöglichen. Hierzu zählt das Konzept von Soft Robots. In diesem Beitrag stellen die Autoren ein Konzept für deren Integration in modell-basierte Engineering-Methoden vor. Hierzu werden Informationsmodelle für Rigid Body Robotik, welche aktuell die Basis für die Robotik-Modellierung bilden, auf ihre Adaptierbarkeit auf „Piece-Wise Constant Curvature“ (PCC) Modelle der Soft Robotik analysiert. Diese mathematische Modellierung soll in bekannte Informationsmodelle integriert werden. Als Grundlage dient dabei das als neutraler Standard klassifizierte Unified Robotics Description Format (URDF). Zum Abschluss werden die kritischen Elemente der Erweiterung des Informationsmodells URDF identifiziert.

Keywords: Robotik, Soft Robotik, Informationsmodelle, URDF

1 Einleitung und Motivation

1.1 Notwendigkeit von Soft Robotics für moderne Fertigung

Im Kontext moderner flexibler und wandlungsfähiger Produktions- bzw. Montagekonzepte ist ein Fokusbereich der Forschung die Mensch-Roboter Kollaboration [Vz18]. Hierbei führen Mensch und Roboter parallel und physisch gekoppelt gemeinsam eine Aufgabe aus. Dabei werden die Vorteile des Roboters, Bewegungen schnell, präzise und häufig auszuführen, mit der Flexibilität, Kognition und Kreativität des Menschen verbunden [Vz18]. Den Stand der Technik für die Kollaboration bilden sogenannte Cobots, welche die Sicherheit durch eine umfangreiche Sensorik (z.B. Kraft-Moment-Sensoren in den Gelenken) sicherstellen [Vz18]. Als neuartige Roboterklasse, welche die

¹ Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme, Fritz-Haber-Weg 1,
76131 Karlsruhe, linus.witucki@kit.edu,  <https://orcid.org/0009-0003-4973-9471>

² Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme, Fritz-Haber-Weg 1,
76131 Karlsruhe, Mike.Barth@kit.edu,  <https://orcid.org/0000-0003-2337-063X>

Mensch-Maschine-Kollaboration inhärent konstruktiv sicherstellt, können dabei zukünftig auch sogenannte Soft Robots zur Anwendung kommen [Lz17]. Diese sind aus weichen flexiblen Materialien, wie (Kunst-)Stoff oder Silikon, gefertigt und werden zum Beispiel über Pneumatik angesteuert [Lz17]. Ein solcher Roboter ist in Abb. 1 dargestellt.

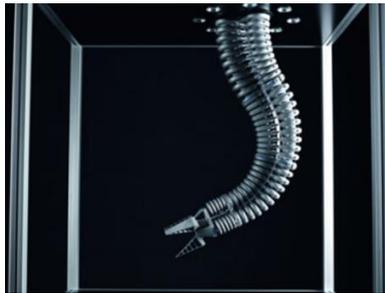


Abb. 1: Festo's Bionic Handling Assistant Quelle: Festo AG.

Durch den Aufbau des Roboters führen äußere Kräfte zu einer Verformung des Roboters, welcher ein Feder-Dämpfer-Verhalten annähert. Somit sind Soft-Robots inhärent sicher für die physische Kopplung von Mensch und Roboter [Lz17].

1.2 Notwendigkeit von Informationsmodelle für Engineering von Robotik Systemen

Im Kontext der Fertigungs- und Prozessindustrie kommen zahlreiche Roboter zum Einsatz. Dabei kann der Hersteller und Typ der Roboter innerhalb einer Fertigung stark variieren. Um die Heterogenität und Komplexität der Robotersysteme im Engineering und Betrieb beherrschbar und handhabbar zu halten, müssen verwendete Software- und Administrationstools mit den unterschiedlichen Systemen umgehen können [Cz16]. Für die Handhabung solcher komplexen Systeme werden bereits Strukturen wie die Verwaltungsschale entwickelt [Yz21]. Bei einer hierdurch entstehenden domänen- und systemübergreifenden Struktur steigt jedoch auch die Bedeutung des Informationsaustausches [Sz21, Yz21]. Hierzu können Informationsmodelle eingesetzt werden, um den Austausch von Engineering-Artefakten oder Betriebsdaten zu strukturieren und mittels einer definierten Semantik Fehlinterpretationen vorzubeugen [Sz21, Yz21]. Somit kann zum Beispiel der Einsatz von Heterogenen Roboterteams vereinfacht werden [Lz17b]. Anhand der eingesetzten Informationsmodelle können die Eigenschaften eines Roboters strukturiert und maschinenlesbar modelliert werden. Für herkömmliche Knickarmroboter, existiert unter anderem das Unified Robotics Description Format (URDF) zur Modellierung relevanter Merkmale, wie beispielsweise Armlängen, Gelenkarten und Belastungsgrenzen. Für den Einsatz von Soft Robots im industriellen Kontext existieren bislang keine eigenständigen Informationsmodelle. Gleichzeitig sind, wie im Folgenden erläutert wird, die bestehenden Modelle nicht geeignet um die Eigenschaften von Soft Robots abzubilden.

2 Bestehende Informationsmodelle der Robotik

Im Umgang mit herkömmlichen Knickarmrobotern wird maßgeblich das Unified Robotics Description Format (URDF) als Informationsmodell eingesetzt [TD24]. Mit diesem auf XML basierendem Informationsmodell werden Roboter als Kette von starren Verbindungen (sogenannte Links) und punktförmigen Gelenken (sogenannte Joints) beschrieben [TD24]. An dieser Stelle sollen weitere Vertreter der Informationsmodelle für Rigid Body Roboterarme genannt werden. Hierzu zählen das Simulation Description Format (SDF) und das Universal Scene Description (USD) Format [TD24]. Diese sind in der Lage, neben dem Knickarmroboter, weitere Aspekte, wie die direkte Umgebung des Roboters zu beschreiben. Für die Definition eines Roboters werden jedoch grundsätzlich die gleichen Elemente und Attribute verwendet. Da in dieser Ausarbeitung nur auf die Modellierung der Roboterarme an sich eingegangen wird, werden die erweiterten Aspekte der Informationsmodelle USD und SDF nicht betrachtet. Im Folgenden wird in dieser Ausarbeitung eine Analyse des URDF durchgeführt. Zunächst folgt eine konzeptionelle Analyse der Modellierungsmethode des URDF-Informationsmodells. Auf Basis dieser und der mathematischen Auseinandersetzung kann anschließend der Handlungsbedarf in Bezug auf die Modellierung von Soft Robots abgeleitet werden.

2.1 Analyse und Bewertung des Stands der Technik

Ein im URDF modellierter Roboter setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Dem steuerbaren Joint und der starren Verbindung zwischen zwei Joints: dem Link. Ein Joint beschreibt dabei ein Gelenk als punktförmig, d.h. ohne räumliche Ausdehnung. Die Definition von diskreten Gelenken unterscheidet einen Knickarmroboter wesentlich von einem kontinuierlichen Soft Robot. Dem Joint werden im URDF die Elemente „origin“, „parent“, „child“ und weitere optionale Elemente zugeordnet. Auf Basis dieser drei erforderlichen Elemente, sowie der Rotationsachse definiert im Element „axis“, lässt sich die kinematische Kette des Roboters ableiten. Über ein weiteres Attribut „type“ kann definiert werden, um welche Gelenkart es sich handelt. Für die Definition von Knickarmrobotern kommt maßgeblich der Typ „revolute“, über den ein Drehgelenk mit Achsbegrenzungen definiert ist, zum Einsatz. Zusätzlich sind beispielsweise prismatische Gelenke definiert. Neben dem Joint ist ein Link als starre Verbindung zwischen Joints im URDF enthalten. Dabei weist der Link im Gegensatz zum Joint eine räumliche Ausdehnung auf, welche durch die Elemente „visual“ und „collision“ repräsentiert wird. Des Weiteren können über das Element „inertial“ die dynamischen Eigenschaften des Links abgebildet werden. Dieses beinhaltet die Definition einer punktförmigen Masse und des dadurch entstehenden Trägheitsmoments. Mittels einer Abfolge von Links und Joints kann somit ein beliebiger Knickarmroboter beschrieben werden. Die erfolgte Aufzählung betrachtet nur Elemente und Attribute mit direkter Relevanz für die Steuerung und Regelung von Knickarmrobotern sind. Dementsprechend ist die Aufzählung nicht vollständig.

2.2 Zusammenhang mit mathematischen Grundlagen von Knickarmrobotern

Für die Regelung eines Roboterarms in kartesischen Koordinaten werden die Vorwärts- und Inverse-Kinematik verwendet. Hierbei handelt es sich um die mathematischen Transformationen vom Gelenkwinkel- in den Arbeitsraum, der in kartesischen Koordinaten die Pose eines definierten Punkts entlang des Roboters beschreibt. Als Definitionspunkt der Roboterbewegung im Arbeitsraum wird der Endeffektor bzw. der „Tool Center Point“ (TCP) als charakteristischer Punkt des Endeffektor gewählt. Die Berechnungen basieren auf der kinematischen Kette des Roboterarms, welche die mechanischen Zusammenhänge der einzelnen Abschnitte eines Roboters beschreibt [DP04]. Somit kann der Zusammenhang zwischen dem kartesischen Arbeitsraum und dem Gelenkwinkelraum des Roboters hergestellt werden. Die kinematische Kette kann für einen Knickarmroboter anhand der in Abschnitt 1.2 benannten „parent“ und „child“ Elemente der Joints kann ein hierarchischer Zusammenhang der Gelenke bestimmt werden. Darauf aufbauend können mittels der Elemente „origin“ und „axis“ die Rotation definiert werden.

Mittels der Bewegungsgleichung (1) können die für eine Bewegungen des Roboters benötigten Drehmomente τ der Gelenke bestimmt werden.

$$J(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (1)$$

Die Matrix des Trägheitsmoments $J(q)$ ist im Gelenkwinkelraum q definiert. Die Matrix $C(q, \dot{q})$ vereint Zentrifugal- und Coriolis-Effekte und ist abhängig von der partiellen Ableitung der Einträge der Masse $M(q)$. Der Vektor $g(q)$ beschreibt den Einfluss der Gravitation auf die starren Abschnitte und ist dementsprechend abhängig von der Masse eines jeden Abschnitts [H80]. Für die Drehmomentregelung eines Knickarmroboters müssen demnach diese Parameter für alle Gelenke im Informationsmodell abgebildet sein. Aus der URDF Datei eines Roboters können diese Parameter anhand des „inertial“ Element der Links entnommen werden. In den zusätzlich genannten Informationsmodellen liegen die beschriebenen Parameter in gleicher Weise vor. Somit ist das erläuterte Vorgehen äquivalent.

Auf Basis dieser Grundlagen kann in den folgenden Abschnitten analysiert werden, in wie weit bestehende Informationsmodelle geeignet sind um Soft Robots darstellen zu können. Dafür wird als nächstes der Handlungsbedarf erörtert.

3 Modellierung von Soft Robot Kontinuummanipulatoren

Ein Soft Robot wie in Abb. 1 dargestellt weist eine kontinuierliche Krümmung auf. Somit bildet der Soft Robot ein unendlich dimensionales kontinuierliches System [Sz23]. Ein solcher Roboter wird in dieser Arbeit daher als Soft Robot Kontinuummanipulator (SRKM) bezeichnet. Des Weiteren wird ein SRKM in dieser Arbeit in einige

grundlegende Komponenten unterteilt. Die Pose des SRKM kann über die in Abb. 2 eingezeichnete theoretische infinitesimal dünne Krümmungslinie, die im inneren des Roboters verläuft, definiert werden. Der reale SRKM weist jedoch eine räumliche Ausdehnung auf, die durch ein zusätzliches Volumen um die Krümmungslinie herum definiert werden kann. Da ein SRKM in der Anwendung voraussichtlich aus mehreren aktuierten Segmenten bestehen wird, existieren diskrete Segmentlinien, die den Übergang zweier Segmente definiert.

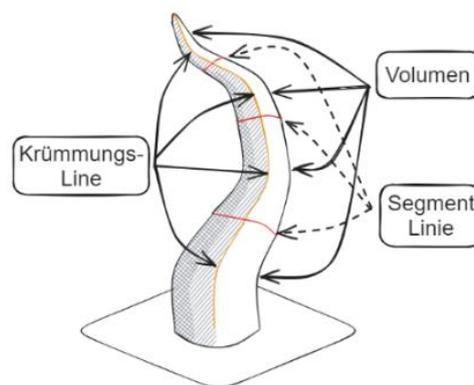


Abb. 2: Abstrahierte Darstellung eines Soft Robot Kontinuummanipulators

Für die mathematische Beschreibung der Krümmungslinie gibt es in der Literatur eine Vielzahl an Möglichkeiten. Neben Ansätzen zur exakten Beschreibung, wie beispielsweise die „Cosserat Rod“ Theorie [Rz10] werden hierbei auch Methoden mit reduzierter Modellordnung [Sz23b] verwendet. Unter den Ansätzen reduzierter Modellordnung ist auch die sogenannte „Pseudo Rigid-Body“ Methode [S09]. Hierbei handelt es sich um die Modellierung eines kontinuierlichen Roboterarmes durch eine finite Anzahl an starren Verbindungen und Gelenken. Durch diese Annahme werden systematische Fehler in die Berechnung der Vorwärts- und Rückwärts-Kinematik eingebracht. Diese äußern neben einem Fehler in der Position des Endeffektors insbesondere durch eine abweichende Form des Roboters [S09]. Durch die Annäherung des SRKM als Knickarmroboter kann ein so modellierter Roboterarm theoretisch im URDF abgebildet werden. Diese Methode wird nicht weiter erläutert, da dieser Beitrag Modellierungsmethoden mit kontinuierlicher Krümmung betrachtet.

In dieser ersten Betrachtung von Informationsmodellen für SRKM soll die sogenannten „Piece-Wise Constant Curvature“ (PCC) Approximation verwendet werden. Hierbei handelt es sich um die Approximation der Krümmung entlang des SRKM durch Segmente mit konstanter Krümmung. Diese Approximation vereinfacht die Berechnung der Pose des Roboters erheblich [Cz20] und die Beschreibung der Krümmung im Informationsmodell. Auf diese Eigenschaft wird in Abschnitt 4 noch einmal aufgegriffen und erläutert. Die beschriebene PCC Methode wird bereits erfolgreich zur Steuerung von bestehenden SRKM eingesetzt [WJ10].

3.1 Berechnung der Pose eines PCC modellierten Kontinuumsmanipulators

Wie bei der Beschreibung von Knickarm Robotern ist auch für SRKM die Definition einer Vorwärts-Kinematik möglich. Diese basiert auf einem Tupel aus charakteristischen Variablen $\mathbf{k}_i = [\phi_i \ \kappa_i \ l_i]^T$, mit dem der geometrische Zusammenhang von Referenzkoordinatensystemen entlang des Roboterarms beschrieben wird. Dabei handelt es sich um die Krümmung κ_i , die Segmentlänge l_i und die Verdrehung der Krümmungsebene ϕ_i eines Segmentes des SRKM. In Abb. 3a ist der Konfigurationsraum eines schematischen SRKM abgebildet. Die gesamte Pose des Roboters lässt sich dann durch die Tupel \mathbf{k}_1 bis \mathbf{k}_4 , also den Parametern jedes Segmentes beschreiben. [Lz23, Sz23]

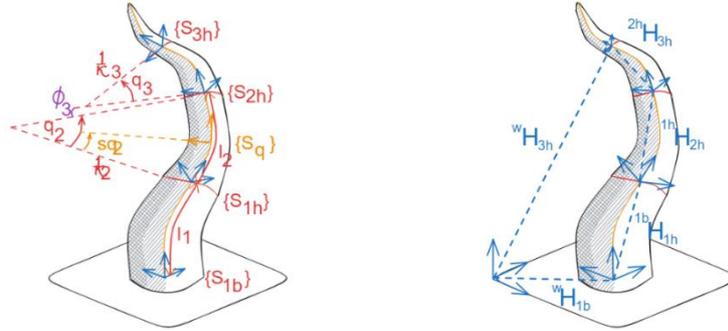


Abb. 3: a) Konfigurationszustände und b) Koordinatentransformation eines PCC SRKM [Fz15a]

Anhand der der Konfigurationsvariablen kann, wie in Abb. 3b dargestellt, für jedes Segment des SRKM eine Transformationsmatrix jH_i gebildet werden, die den geometrischen Zusammenhang von Segment S_j zum folgenden Segment S_{i+1} bildet. [Lz23]

$${}^jH_i = \begin{bmatrix} {}^jR_i & {}^j\sigma_i \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{4 \times 4} \quad (3)$$

Wobei mit $q_i = \frac{1}{\kappa_i}$ gilt:

$${}^jR_i = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi_i (\cos q_i - 1) + 1 & \sin \phi_i \cos \phi_i (\cos q_i - 1) & \cos \phi_i \sin q_i \\ \sin \phi_i \cos \phi_i (1 - \cos q_i) & \sin^2 \phi_i (\cos q_i - 1) + 1 & \sin \phi_i \sin q_i \\ -\cos \phi_i \sin q_i & -\sin \phi_i \sin q_i & \cos q_i \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$${}^j\sigma_i = \frac{l_i}{q_i} \begin{bmatrix} \cos \phi_i (1 - \cos q_i) \\ \sin \phi_i (1 - \cos q_i) \\ \sin q_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

Mit dieser Definition der Vorwärts-Kinematik kann die Koordinatentransformation der unterschiedlichen Abschnitte eines PCC SRKM zueinander und zur globalen Referenz, der Basis, wie in Abb. 3 b) dargestellt, stattfinden. Die Berechnungen basieren dabei auf dem oben definierten Tupel \mathbf{k}_i . Um die Bestimmung einer Pose des SRKM mittels eines Informationsmodells zu ermöglichen, müssen diese Variablen entweder als zeitunabhängig oder zeitabhängige Komponente definiert werden. [Lz23]

3.2 Berechnung der Dynamik eines PCC modellierten Kontinuummanipulators

Neben der statischen Pose kann auch die Dynamik des SRKM berechnet werden. Hierzu wird über die Ableitung der Vorwärts-Kinematik die Jacobi-Matrix $J_i = \frac{\delta H}{\delta q}$ gebildet, welche benötigt wird, um das Trägheitsmoment $M(q)$ des Systems zu bestimmen. Die Berechnung kann in [Wz17], [Fz15a] und [Fz15b] nachvollzogen werden. Ebenso wird für die Berechnung der Coriolis-Effekte $C(q, \dot{q})$ auf [Wz17], [Fz15a] und [Fz15b] verwiesen. Ein Soft Robot kann durch seine Bauweise als Masse-Feder-Dämpfer System approximiert werden. Daher existieren, zusätzlich zu den in Abschnitt 3.1 dargestellten Matrizen, Feder $K(q)$ und Dämpfer $D(q)$ Einflüsse auf die Bewegungsgleichung.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + D(q)\dot{q} + K(q) = A(q)\tau$$

Die Matrix $A(q)$ beschreibt die Aktuiertheit des Systems. Ist jedes Segment separat ansteuerbar, dann ist die Matrix $A(q)$ quadratisch und weist einen vollen Rang auf [Wz17]. Insbesondere die Feder- und Dämpfer-Beschreibung stellt bei dieser Berechnung, aufgrund der Nichtlinearitäten, eine bedeutende Herausforderung dar. Für die Modellierung der Eigenschaft existieren einige Ansätze. Darunter Ansätze der Linearisierung [Kz19] und Identifikation nichtlinearer Parameter [Fz15a].

Damit die mathematischen Berechnungen von Pose und Dynamik möglich sind, müssen die notwendigen Parameter in einem Informationsmodell explizit enthalten oder daraus implizit ableitbar sein.

3.3 Abgeleiteter Handlungsbedarf für Informationsmodelle

In Abschnitt 2.2 wurde gezeigt, dass es mit dem URDF Informationsmodell möglich ist einen Knickarmroboter abzubilden. Die Analyse aus Abschnitt 3.1 und 3.2 zeigt jedoch grundlegende Unterschiede zu SRKM. Diese führen dazu, dass ein SRKM nicht ausreichend mit dem URDF abgebildet werden kann.

Eine konzeptionelle Basis des bestehenden Informationsmodells ist die grundlegende Unterteilung in Joint und Link mit jeweils exklusiven Elementen und Attributen. Stattdessen weist ein SRKM eine kontinuierliche Krümmung auf. Im Hinblick auf das URDF liegt dementsprechend in jedem Segment eine Kombination aus Joint und Link vor. Dies kann so im bestehenden URDF nicht abgebildet werden. Des Weiteren ist die

Definition des Joints auf ein diskretes Set an Gelenken beschränkt. Darunter ist kein Gelenktyp mit dem eine mathematische Beschreibung der ausgedehnten Krümmung eines Soft Robot möglich ist. Darüber hinaus wird bislang die Masseverteilung stets punktförmig approximiert. Für die Berechnung exakte Berechnung der Krümmung eines Soft Robots im Einfluss von Gravitation ist jedoch die Masseverteilung entlang eines Segmentes zu berücksichtigen [Sz23]. Somit muss für SRKM auch diese Beschränkung konzeptionell überwunden werden. Als weiter wichtiger Punkt kann die Feder-Dämpfer Eigenschaft des SRKM aufgeführt werden. Es findet sich im URDF kein korrespondierendes Element zu den in Abschnitt 3.2 beschriebenen Parameter Parametern wieder. Aus diesen Umständen heraus entsteht der Bedarf nach einen Informationsmodell, welches in der Lage ist SRKM abzubilden.

4 Konzeptionelle Erweiterung zur PCC Informationsmodellierung

Aus Abschnitt 3.3 geht hervor, dass eine Modellierung von SRKM mit dem URDF nicht ausreichend möglich ist. Hier folgt nun eine Analyse der relevanten Parameter für die Anpassung der bestehenden Informationsmodell. Hierbei werden im ersten Entwicklungsschritt nur PCC modellierte SRKM betrachtet.

4.1 Notwendige Parameter der „Piece-Wise Constant Curvature“ Modellierung

Die in Abschnitt 3 dargelegten mathematischen Zusammenhänge ermöglichen die Definition von charakteristischen Parametern. Diese müssen in einem Informationsmodell vorhanden sein, um den SRKM vollständig beschreiben zu können. Darunter die Masseverteilung $M(q)$ und das Trägheitsmoment $J(q)$ eines Segmentes, sowie die beiden Parameter zur Beschreibung der Steifigkeit $K(q)$ und Dämpfung $D(q)$. Des Weiteren muss eindeutig definiert werden, welche zeitlich variablen Stellgrößen vorliegen. Bei einem herkömmlichen Knickarmroboter mit „revolute“ Joints sind das z.B. die Gelenkwinkel. Dies wird durch das „type“ Attribut des Joints im URDF gekennzeichnet. Um zu definieren, dass bei einem SRKM die Krümmung eine Stellgröße darstellt muss eine entsprechende Definition möglich sein. Ebenso kann bei einem SRKM die Länge eines Segments und die Verschiebung der Krümmungsebenen gestellt werden. Eine Definition der jeweiligen physikalischen Grenzen muss wie beim „revolute“ Joint ebenfalls möglich sein. Da ein SRKM aus mehreren Segmenten bestehen kann muss die Angabe der Reihenfolge möglich sein. Neben den Parametern zur mathematischen Berechnung existieren noch weitere, die für ein Informationsmodell wichtig sind. Dazu gehört die räumliche Ausdehnung des Soft Robots, z.B. definiert durch ein Mesh. Für die Anwendung in physikalischen Simulationen kann es wichtig sein, eine separate Beschreibung der Kollisionsform des Roboterarmes zu definieren. Da die Berechnung von Kollisionen mit komplexen Geometrien z.B. über die Approximation von konvexen Hüllen eine Komplexität von $\mathcal{O}(n \log(n))$ [Bz96].

Diese beschriebenen Aspekte und Parameter müssen bei der Erweiterung eines Informationsmodells für SRKM berücksichtigt werden. Da das URDF einige Elemente, wie Volumen-Meshes und Elemente zur Beschreibung der Reihenfolge von Roboterkomponenten, bereits aufweist, kann das URDF als Basis zur Erweiterung verwendet werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde auf Basis der Analyse von herkömmlichen Informationsmodellen der Robotik und den mathematischen Grundlagen von Knickarmrobotern und SRKM der Handlungsbedarf für die Erweiterung der bestehenden Informationsmodelle hergeleitet. Anschließend wurden die für die Erweiterung des URDF relevanten Aspekte der SRKM herausgearbeitet. Für die Umsetzung müssen die Eigenschaften in Elementen und anschließend Attributen formalisiert werden. Damit möglichst viele unterschiedliche Modellierungsmethoden von SRKM mit dem Informationsmodell abgedeckt werden können, bedarf es einer entsprechend strukturierten Übersicht dieser Modellierungsmethoden. Zur Validierung können Tools entwickelt werden, die das neue Informationsmodell anwenden. Darunter z.B. ein Tool für die automatisierte Parametrierung einer Simulationsumgebung für Soft Robots.

6 Literaturverzeichnis

- [Bz96] Barber, C. B., Dobkin, D. P., Huhdanpaa, H.: The quickhull algorithm for convex hulls. In *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)* 22.4: 469–483, 1996.
- [Cz16] Cai, Y.; Tang, Z.; Ding, Y.; Qian, B.: Theory and application of multi-robot service-oriented architecture. In *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 3(1), 15–25, 2016.
- [DP04] Géradin, M.; Duysinx, P.: *An introduction to robotics: mechanical aspects*, 2004.
- [Fz15a] Falkenhahn, V.; Mahl, T.; Hildebrandt, A.; Neumann, R.; Sawodny, O.: Dynamic Modeling of Bellows-Actuated Continuum Robots Using the Euler–Lagrange Formalism. In *IEEE Transactions on Robotics*, Bd. 31, Nr. 6, S. 1483–96, 2015.
- [Fz15b] Falkenhahn, V.; Hildebrandt, A.; Neumann, R.; Sawodny, O.: Model-based feedforward position control of constant curvature continuum robots using feedback linearization. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, S. 762–67, 2015.
- [Kz19] Katzschmann, R. K.; Santina, C. D.; Toshimitsu, Y.; Bicchi, A.; Rus, D.: Dynamic Motion Control of Multi-Segment Soft Robots Using Piecewise Constant Curvature Matched with an Augmented Rigid Body Model. In *2nd IEEE International Conference on Soft Robotics*, S. 454–461, 2019.
- [Lz23] Li, Y.; Myszka, D. H.; Murray, A.: The Kinematics of Constant Curvature Continuum Robots Through Three Segments. In *IEEE Robotics and Automation Letters*, Bd. 8, Nr. 11, S. 7631–38. 2023

-
- [Sz21] Schmied, S.; Mathias, S. G.; Großmann, D.; Müller, R. K.; Jumar, U.: Information modelling with focus on existing manufacturing systems. In *Annual Reviews in Control*, 51, 392-400, 2021.
- [Sz23] Della Santina, C.; Duriez, C.; Rus, D.: Model-Based Control of Soft Robots: A Survey of the State of the Art and Open Challenges. In *IEEE Control Systems Magazine*, Bd. 43, Nr. 3, S. 30–65, 2023.
- [Wz17] Wang, H.; Wang, C.; Chen, W., Liang, X., Liu, Y.: Three-Dimensional Dynamics for Cable-Driven Soft Manipulator. In *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Bd. 22, Nr. 1, S. 18–28, 2017.
- [Lz17] Lee, C.; Kim, M.; Kim, Y. J.; Hong, N.; Ryu, S.; Kim, H. J.; Kim, S.: Soft robot review. In *International Journal of Control, Automation and Systems*, 15(1), 3–15, 2017.
- [TD24] Tola, D.; Corke, P.: Understanding URDF: A Dataset and Analysis. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9(5), 4479–4486, 2024.
- [Vz18] Villani, V.; Pini, F.; Leali, F.; Secchi, C.: Survey on human–robot collaboration, In industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 55, 248–266, 2018.
- [S09] Su, H.-J.: A Pseudorigid-Body 3R Model for Determining Large Deflection of Cantilever Beams Subject to Tip Loads. In *Journal of Mechanisms and Robotics*, 1(021008), 2009.
- [Cz20] Cheng, H.; Liu, H.; Wang, X.; Liang, B.: Approximate Piecewise Constant Curvature Equivalent Model and Their Application to Continuum Robot Configuration Estimation. In *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 1929–1936, 2020.
- [WJ10] Webster, R. J.; Jones, B. A.: Design and Kinematic Modeling of Constant Curvature Continuum Robots: A Review. *The International Journal of Robotics Research*, 29(13), 1661–1683, 2010.
- [Lz17b] Li, X.; Bilbao, S.; Martín-Wanton, T.; Bastos, J.; Rodriguez, J.: SWARMS Ontology: A Common Information Model for the Cooperation of Underwater Robots. In *Sensors*, 17(3), Article 3, 2017.
- [Rz10] Rucker, D. C.; Jones, B. A.; Webster III, R. J.: A Geometrically Exact Model for Externally Loaded Concentric-Tube Continuum Robots. In *IEEE Transactions on Robotics*, 26(5), 769–780, 2010.
- [Sz23b] Sadati, S. M. H.; Naghibi, S. E.; da Cruz, L.; Bergeles, C.: Reduced order modeling and model order reduction for continuum manipulators: An overview. In *Frontiers in Robotics and AI*, 10, 1094114, 2023.
- [Yz21] Ye, X.; Hong, S. H.; Song, W. S.; Kim, Y. C.; Zhang, X.: An Industry 4.0 Asset Administration Shell-Enabled Digital Solution for Robot-Based Manufacturing Systems. *IEEE Access*, 9, 154448–154459, 2021.
- [H80] Hollerbach, J. M.: A Recursive Lagrangian Formulation of Manipulator Dynamics and a Comparative Study of Dynamics Formulation Complexity. In *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 10(11), 730–736, 1980.