

# Dynamische Modellierung geschlossener kinematischer Ketten anhand von URDF-Beschreibungen

## Dynamic modeling of closed loop mechanism based on URDF description

Fabian Finkbeiner, Hochschule Heilbronn, 74081 Heilbronn, Deutschland, [fabian.finkbeiner@hs-heilbronn.de](mailto:fabian.finkbeiner@hs-heilbronn.de)  
 Prof. Dr. Ing. Timo Hufnagel, Hochschule Heilbronn, 74081 Heilbronn, Deutschland, [timo.hufnagel@hs-heilbronn.de](mailto:timo.hufnagel@hs-heilbronn.de)  
 Prof. Dr. Ing. Tobias Bruckmann, Universität Duisburg Essen, Lehrstuhl für Mechatronik, 47057 Duisburg, Deutschland, [tobias.bruckmann@uni-due.de](mailto:tobias.bruckmann@uni-due.de)

### Kurzfassung

#### Motivation

Für die Simulation und Antriebsdimensionierung parallelkinematischer Manipulatoren werden dynamische Modelle in Form von Bewegungsdifferentialgleichungen verwendet. Mithilfe einer einheitlichen Beschreibung des geometrischen Aufbaus eines Manipulators können diese Bewegungsdifferentialgleichungen automatisiert generiert werden. Für die Beschreibung kinematischer Ketten haben sich mit dem Simulation Description Format (SDF) [1] und dem Unified Robot Description Format (URDF) [2] zwei Dateiformate auf XML-Basis etabliert. SDF unterstützt hierbei bereits die Beschreibung geschlossener kinematischer Ketten, während das URDF ausschließlich für offene kinematische Ketten (Baumstrukturen) vorgesehen ist. An dieser Stelle könnte man URDF für die Modellierung geschlossener kinematischer Ketten generell verwerfen, jedoch hat dieses Format gegenüber SDF einen wesentlichen Vorteil. Die Beschreibung im SDF erfordert nämlich die Kenntnis der Positionen und Winkel aller Körper des Mechanismus in einer initialen Konfiguration. In diesem Beitrag soll eine Erweiterung des URDF zur Beschreibung geschlossener kinematischer Ketten in Bezug auf die dynamische Modellierung vorgestellt werden.

#### Auswahl des grundlegenden Datenformates

Beide Formate basieren auf der Definition von Gelenk- und Körperkoordinatensystemen. Der maßgebliche Unterschied zeigt sich bei der Definition der Transformationen. Während beim URDF alle Transformationen explizit angegeben werden, werden im SDF die Transformationen zwischen einem Körper und dem Gelenkkoordinatensystem immer anhand der angegebenen Posen berechnet. Daher muss der Mechanismus immer in einer gültigen Konfiguration dargestellt werden. Der Vergleich ist in Abbildung 1 an einem Fünfgelenk dargestellt. Dabei repräsentieren schwarze Pfeile die Transformationen vom Körperkoordinatensystem zum Gelenkkoordinatensystem und die orangenen Pfeile die Transformationen vom Gelenkkoordinatensystem zum Körperkoordinatensystem dar. Die gestrichelte orangene Linie stellt das aufgetrennte Gelenk des Fünfgelenks dar und wird durch die URDF-Datei nicht abgebildet.

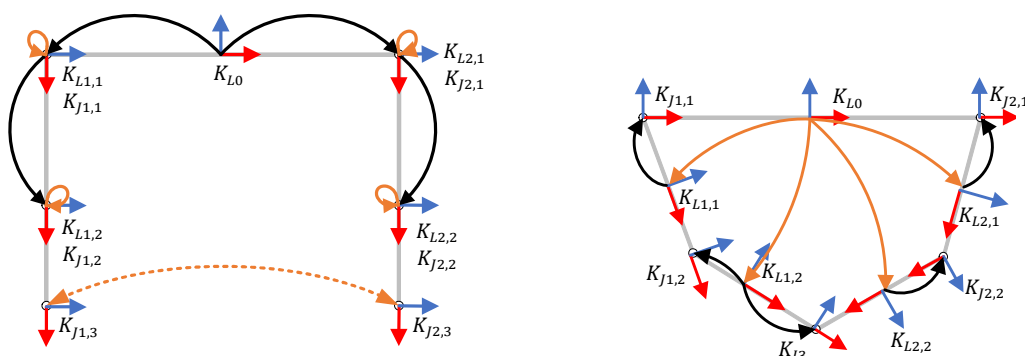


Abbildung 1: Definition der Koordinatensysteme und Transformationen eines Fünfgelenks: links: URDF; rechts: SDF

Für die kinematische und dynamische Analyse geschlossener kinematischer Ketten wird in den Beiträgen [3–7] die geschlossene Kette aufgetrennt, um eine Baumstruktur mit Zwangsbedingungen zu erhalten. Die Arbeiten [4, 6, 7] zeigen, dass alle geometrischen Eigenschaften der geschlossenen Kette in den formulierten Zwangsbedingungen enthalten sind. Der Beitrag [8] nutzt für das Auftrennen die Definition der Schnitte in einer separaten Datei und das SDF. Auf diese Weise entsteht eine Baumstruktur mit Zwangsbedingungen. Allerdings wird für die Definition des SDF eine gültige Konfiguration des Mechanismus benötigt. Die URDF dagegen stellt eine Baumstruktur ohne gültige Konfiguration dar. Eine Erweiterung um die Zwangsbedingungen ermöglicht somit die Beschreibung geschlossener kinematischer Ketten, ohne eine gültige Konfiguration des Mechanismus.

## Erweiterung des URDF-Formats bei parallelkinematischen Systemen

Die Erweiterung der URDF soll die Zwangsbedingungen beschreiben, damit die Baumstruktur auf definierte Art geschlossen werden kann. Weiterhin soll die Kompatibilität zum nicht erweiterten Format erhalten bleiben, damit möglichst viele bereits entwickelte Tools verwendet werden können und ausschließlich um die Zwangsbedingungen erweitert werden müssen, um geschlossene kinematische Ketten zu unterstützen.

Um die Kompatibilität der Erweiterung mit dem gängigen Format zu ermöglichen, wird ein neues Element für den Schnitt eingeführt. Die Definition erfolgt mithilfe zweier Koordinatensysteme. Diese Koordinatensysteme liegen im aufgetrennten Körper bzw. Gelenk. Die Formulierung der Zwangsbedingungen ergibt sich durch den Typ der Trennung.

Die resultierende Datei kann mit einem XML-Parser eingelesen und für die anschließende Modellerstellung verwendet werden.

## Praktische Umsetzung

Die Baumstruktur sowie die Zwangsbedingungen werden genutzt, um das inverse dynamische Modell der geschlossenen Kette zu ermitteln. Hierfür wird in einem ersten Schritt das inverse dynamische Modell der Baumstruktur gebildet. Um dieses Modell zu schließen, müssen noch zusätzliche Zwangskräfte unbekannter Größe eingepreßt werden. Die Zwangskräfte werden durch eine Projektion auf die Minimalkoordinaten eliminiert. Die Projektion wird aus den Zwangsbedingungen extrahiert.

Für die praktische Umsetzung wird die Antriebsauslegung eines industriellen Deltakinematik beschrieben. Dafür werden die notwendigen Antriebsmomente durch die Vorgabe einer Trajektorie mithilfe des inversen dynamischen Modells berechnet. Durch die URDF-Datei erfolgt die Erstellung des inversen dynamischen Modells automatisiert. Das Modell wird mit einem Matlab-Simscape-Modell und Messdaten eines realen Parallelmanipulators verglichen. Als Trajektorie wird eine Pick-and-Place-Trajektorie in kartesischen Koordinaten vorgegeben. Die Messdaten werden direkt dem Motorregler entnommen. Die Modelldaten werden mithilfe der Getriebeübersetzung ohne Getriebemodell auf die Getriebeantriebsseite übertragen. Die Ergebnisse in Abbildung 2 zeigen, dass die Modellierung durch die Projektionsmethode anhand der URDF-Datei mit dem Matlab-Simscape-Modell sehr gut übereinstimmt.

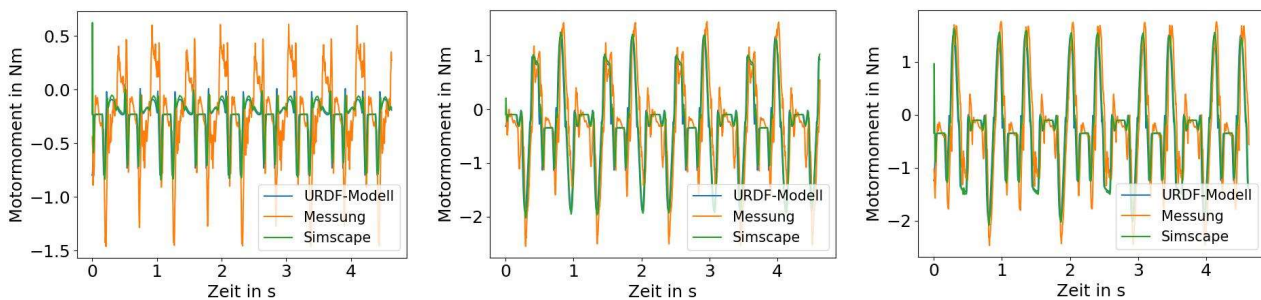


Abbildung 2: Vergleich URDF-Modell, Simscape-Modell und Messdaten: links: Achse 1; mitte: Achse 2; rechts: Achse 3

Die Ergebnisse der Modelle und der Messung zeigen erkennbare Abweichungen. Dies liegt an nichtmodellierten Effekten, wie beispielsweise Reibung oder Getriebesteifigkeit.

## Literatur

- [1] Open Source Robotics Foundation. "SDFormat." Zugriff am: 13. November 2023. [Online.] Verfügbar: <http://sdformat.org/>
- [2] ROS. "ROS Wiki -URDF." Zugriff am: 13. November 2023. [Online.] Verfügbar: <http://wiki.ros.org/urdf>
- [3] Andreas Müller, "Dynamics of parallel manipulators with hybrid complex limbs: Modular modeling and parallel computing," *Mechanism and Machine Theory*, Nr. 167, 2022.
- [4] S. Briot und W. Khalil, *Dynamics of parallel robots: From rigid bodies to flexible elements* (Mechanisms and machine science 35). Cham: Springer, 2015.
- [5] T. Hufnagel, "Theoretische und praktische Entwicklung von Regelungskonzepten für redundant angetriebene parallelkinematische Maschinen," Duisburg, Essen, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2013, Universitätsbibliothek Duisburg-Essen, Duisburg, Essen, 2014.
- [6] A. Müller, "On the terminology and geometric aspects of redundant parallel manipulators," *Robotica*, Jg. 31, Nr. 1, S. 137–147, 2013, doi: 10.1017/S0263574712000173.
- [7] J.-P. Merlet, *Parallel Robots* (Springer eBook Collection 74). Dordrecht: Springer, 2000.
- [8] J. Wiartalla, M. Schmitz, M. Mierzwa, B. Corves und M. Hüsing, "Multidirektionale Additive Fertigung: Herausforderungen bei der Umsetzung eines restriktionsfreien Prozesses," 2023, doi: 10.17185/DUEPUBLICO/77394.

# DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

ub

universitäts  
bibliothek

In: Zehnte IFToMM D-A-CH Konferenz 2024

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

**DOI:** 10.17185/duepublico/81610

**URN:** urn:nbn:de:hbz:465-20240304-102455-5

Alle Rechte vorbehalten.