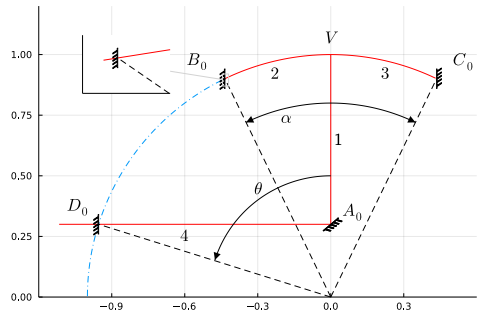
Ein nachgiebiger Mechanismus mit einstellbarer charakteristischer Kennlinie durch Bistabilität
A compliant mechanism with an adjustable characteristic curve through bistability

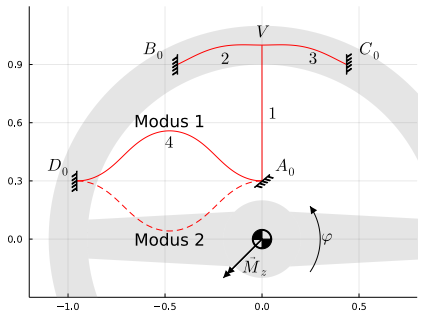
M.Sc. Marten Zirkel[1], marten.zirkel@tu-ilmenau.de
M.Sc. Yinnan Luo[2], yinnan.luo@kit.edu
Dr.-Ing. Ulrich Römer[2], ulrich.roemer@kit.edu
Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Fidlin[2], alexander.fidlin@kit.edu
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Lena Zentner[1], lena.zentner@tu-ilmenau.de
1: Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Nachgiebige Systeme, 98693 Ilmenau, Deutschland
2: Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Mechanik, 76131 Karlsruhe, Deutschland

Kurzfassung

Nachgiebige Mechanismen (NM) speichern durch elastische Formänderung potenzielle Energie und können diese auch wieder freisetzen. Werden sie als Gelenke zwischen den Gliedern zweibeiniger Roboter eingesetzt, können diese möglichst effizient gehen. Nachteil dabei ist eine Spezialisierung auf beispielsweise eine Geschwindigkeit. Um diese Spezialisierung zu verhindern, sind NM mit unterschiedlichen/umschaltbaren charakteristischen Kennlinien (CK) (Kraft - Weg oder Moment - Winkel) vorteilhaft. [4]
In [3] wird der Prozess für den Erhalt der optimalen CK des Gelenks zwischen den Oberschenkeln eines zweibeinigen Roboters beschrieben, vergleiche Bild 2b in blau. Durch geschickte Kombination verschiedener Mechanismen (mono-, bistabile) lassen sich diverse CK abbilden. So können beispielsweise Zero - Stiffness [2] oder multistabile Mechanismen erstellt werden [1, 5]. Daher wird in diesem Beitrag ein verzweigter NM mit einem bistabilen Mechanismus kombiniert, siehe Bild 1, und mit der Euler-Bernoulli Theorie untersucht.
In Bild 1a ist die Anordnung der nachgiebigen Balken mit ihrer natürlichen Krümmung dargestellt. In Bild 1b ist der Mechanismus in Vorspannung dargestellt, wobei Oberschenkel 1 mit dem Koordinatenursprung und Oberschenkel 2 mit dem Starrkörper verbunden ist. Der verzweigte Mechanismus besteht aus den Balken 1, 2 und 3 und der bistabile Teil des Mechanismus ist der Balken 4. Die Knoten B_0, C_0 und D_0 verbinden die Balken 2, 3 und 4 mit dem Starrkörper und rotieren um den Winkel φ mit ihm gemeinsam um den Koordinatenursprung. Der Knoten A_0 ist mit dem Koordinatensystem verbunden und nimmt die Balken 1 und 4 auf. Der Knoten V ist eine Verzweigung und verbindet die Balken 1 bis 3. Durch den vorgespannten Balken 4 und durch die Auslenkung φ resultiert die CK $\vec{M}_z(\varphi)$ um den Nullpunkt des Koordinatensystems. Durch die Bistabilität des Balkens 4 besitzt der Mechanismus zwei Modi und hat dadurch einen Einfluss auf die CK $\vec{M}_z(\varphi)$. Die Balken besitzen die Längen l_i, Höhen h_i, Krümmung κ_i mit $i = 1,2,3,4$ und die Breite b sowie das E-Modul E.



(a) Mechanismus mit entspannten nachgiebigen Balken. Die Lagen von B_0, C_0 und D_0 werden über die Winkel α und θ bestimmt. Die Balken 2 und 3 sind um 1% sowie 4 um 17% länger als von den Einspannungen vorgegeben.



(b) Mechanismus mit vorgespannten Balken. Durch Drehung des grauen Starrkörpers um den Winkel φ resultiert das Moment $\vec{M}_z$. Durch 4 erhält der Mechanismus zwei Modi.

Bild 1 Anordnung der nachgiebigen Balken $1-4$:(a) im entspannten und (b): im vorgespannten Zustand. Die Knoten A_0 bis D_0 stellen Einspannungen dar. Der Knoten V ist eine Verzweigung.

Zur Ermittelung der charakteristischen Kennlinie werden die Balken mit der Euler-Bernoulli-Balkentheorie [6] modelliert

DOI: 10.17185/duepublico/77388

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz.

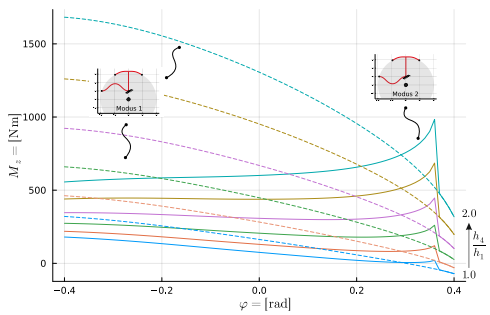
und die geometrischen Parameter, Kräfte und Momente normiert:

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i}{l_i};\ \ \tilde{y}_i = \frac{y_i}{l_i};\ \ \tilde{F}_{D,0,i} = \frac{F_{D,0,i}\, l_i^2}{E\, I_z}\ \text{ mit }\ D = x, y;\ \ \tilde{M}_{z,0,i} = \frac{M_{z,i}\, l_i}{E\, I_z}.$$

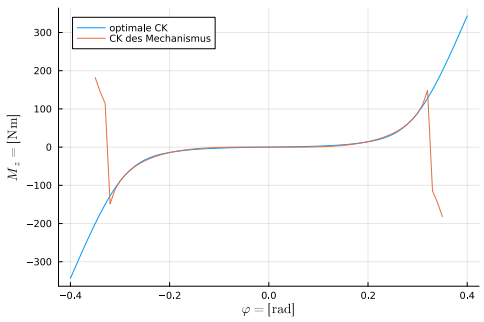
Das Balkenmodell wird mit einem Runge-Kutta-Verfahren integriert. Die geometrische Lage der Balkenenden wird durch die Randbedingungen vorgegeben, welche durch die Knoten repräsentiert werden. Dabei werden die Knoten als Einspannungen bzw. als Verzweigung (Knoten V) betrachtet. Die Kräfte $\tilde{F}_{x,0,i}$, $\tilde{F}_{y,0,i}$ und Momente $\tilde{M}_{z,0,i}$ werden durch eine Trust-Region Methode erhalten und allgemein mit 0 initialisiert. Die Initalisierungskräfte und das -moment des Balkens 4 können durch den vierten Knickfall Eulers angenähert werden:

$$\tilde{F}_{x,0,4} = 4\pi^2;\ \ \tilde{F}_{y,0,4} = 0.;\ \ \tilde{M}_{z,0,4} = \pm 2\pi^2\, \hat{h};\ \ \hat{h} = \left(\sqrt{\frac{1}{4\, l_f} - \frac{1}{4\, l_f^2}} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{4\, l_f^2}}\right)\ \text{ mit }\ l_f = \frac{l_4}{\overline{A_0\, D_0}},$$

wobei $\hat{h}$ die angenäherte Amplitude der idealen Knickfigur des vierten Knickfalls und l_f das Verhältnis zwischen l_4 und $\overline{A\, D_0}$ ist. Mit der Wahl des Vorzeichens von $\tilde{M}_{z,0,4}$ kann zwischen den Modi gewechselt werden. Durch Variation verschiedener Parameter ($\theta,\ \alpha,\ \overline{0A_0},\ h_i,\ l_f$) können die CK angepasst werden. Der Einfluss des Verhältnisses $h_4/h_1 = 1;\ 1,2;\ \ldots;\ 2$ mit den Höhen $h_1 = h_2 = h_3$ auf den qualitativen Verlauf ist als Beispiel in Bild 2a gezeigt. Während in Modus 1 ein nichtlinearer Abfall des Momentes mit steigendem Auslenkungswinkel φ erreicht wird, ist die Kennlinie für den Modus 2 weitestgehend gleichbleibend bis sich ein asymptotisches Verhalten bei $\varphi \approx 0.35$ einstellt und der Mechanismus von Modus 2 in Modus 1 springt. Durch Optimierung der Parameter und der Parallelschaltung zweier gespiegelter Mechanismen, sowie Wechsel der Oberschenkel (OB 1 $\widehat{=}$ Starrkörper, OB 2 $\widehat{=}$ Ursprung) aus Bild 1 wird die gewünschte CK aus [3] angenähert, siehe Bild 2b.



(a) Beispielhafte charakteristische Kennlinien beider Modi in Abhängigkeit des Parameters $\frac{h_4}{h_1}$. In Modus 2 springt der Mechanismus bei $\varphi \approx 0.35$ in Modus 1.



(b) Charakteristische Kennlinie einer Parallelschaltung gespiegelter Mechanismen in Modus 2. Die Parameter $\theta,\ \alpha,\ \overline{0A_0},\ h_i$ und l_f wurden dafür optimiert.

Bild 2 Charakteristische Kennlinien des Mechanismus in beiden Modi und als Anwendung in einer Parallelschaltung um eine gewünschte CK mit optimierten Parametern anzunähern.

Danksagung: Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für Ihre Unterstützung. Die Zuschussnummern lauten: **FI 1761/4-1** und **ZE 714/16-1**.

Literatur

[1] Guimin Chen, Yanjie Gou und Aimei Zhan. „Synthesis of Compliant Multistable Mechanisms Through Use of a Single Bistable Mechanism“. In: *Journal of Mechanical Design* (2011). DOI: 10.1115/1.4004543.

[2] P. R. Kuppens u. a. „Monolithic binary stiffness building blocks for mechanical digital machines“. In: *Extreme Mechanics Letters* 42 (2021), S. 101120. ISSN: 2352-4316. DOI: 10.1016/j.eml.2020.101120.

[3] Yinnan Luo u. a. „Improving Energy Efficiency of a Bipedal Walker with Optimized Nonlinear Elastic Coupling“. In: *Advances in Nonlinear Dynamics*. 2022, S. 253–262. DOI: 10.1007/978-3-030-81166-2_23.

[4] Ulrich J. Römer u. a. „Simultaneous optimization of gait and design parameters for bipedal robots“. In: *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* 2016, S. 1374–1381. DOI: 10.1109/icra.2016.7487271.

[5] Mohamed Zanaty, Ilan Vardi und Simon Henein. „Programmable multistable mechanisms: Synthesis and modeling“. In: *Journal of Mechanical Design* 140.4 (2018), S. 042301. ISSN: 1050-0472.

[6] Lena Zentner und Sebastian Linß. *Compliant systems: Mechanics of flexible mechanisms, actuators and sensors*. Berlin und Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2019. ISBN: 978-3110479751.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

Offen im Denken

ub universitäts bibliothek

In: Neunte IFToMM D-A-CH Konferenz 2023

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/77388
URN: urn:nbn:de:hbz:465-20230314-145548-9

Dieses Werk kann unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 Lizenz (CC BY-NC-SA 4.0) genutzt werden.