

Design, Erprobung und Vergleich von zwei Manipulatoren auf Basis von nachgiebigen Tensegrity-Strukturen

Design, test and comparison of two manipulators based on compliant tensegrity-structures

David Herrmann, OTH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 93053 Regensburg, david.herrmann@st.oth-regensburg.de

Leon Schaeffer, OTH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 93053 Regensburg, leon.schaeffer@oth-regensburg.de

Lukas Schmitt, OTH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 93053 Regensburg, lukas.schmitt@st.oth-regensburg.de

Wolfgang Körber, OTH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 93053 Regensburg, wolfgang.koerber@st.oth-regensburg.de

Lukas Merker, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, 98693 Ilmenau, lukas.merker@tu-ilmenau.de

Lena Zentner, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, 98693 Ilmenau, lena.zentner@tu-ilmenau.de

Valter Böhm, OTH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 93053 Regensburg, valter.boehm@oth-regensburg.de

Kurzfassung

Die Entwicklung von Robotern, basierend auf nachgiebigen Tensegrity-Strukturen, ist insbesondere unter dem Themengebiet „Soft Robotics“ ein aktuelles Forschungsthema [1–3]. Der Einsatz von diesen mechanisch vorgespannten nachgiebigen Strukturen ermöglicht es, die Systemsteifigkeit gezielt und gegebenenfalls reversibel variabel einzustellen. Die daraus resultierende Formänderung kann nur durch wenige Aktuatoren realisiert werden, was die Systemkomplexität reduziert. Zudem ermöglichen in weichen Robotern eingesetzte Tensegrity-Strukturen mehrere vorteilhafte Eigenschaften wie z. B. Faltbarkeit/Entfaltbarkeit, geringe Masse, hohes Festigkeits-Gewichts-Verhältnis und stoß-dämpfende Fähigkeiten [4]. Die in diesem Zusammenhang eingesetzten Tensegrity-Strukturen bestehen aus einer Reihe von getrennten starren Drucksegmenten, die mit einem kontinuierlichen Netz von Zugsegmenten verbunden sind. Die Form dieser Strukturen wird durch die Vorspannung des Systems bestimmt. Aktuelle Arbeiten konzentrieren sich auf die Entwicklung von mobilen Robotern [5–10] und Manipulatoren, die auf diesen Strukturen basieren [11–13]. Diese Arbeit legt den Fokus auf den Bereich Manipulatoren.

Bei der Entwicklung von Tensegrity-Manipulatoren kann in planare und räumliche unterschieden werden [13]. Bei der Realisierung von räumlichen Tensegrity-Manipulatoren werden zwei Konstruktionsprinzipien verwendet: entweder ein modularer Aufbau, der auf Modulen mit identischer Topologie basiert oder der Einsatz eines spezifischen Designs für jedes einzelne funktionale Systemteil [11, 14, 15]. Das Design der meisten bekannten räumlichen Tensegrity-Manipulatoren basiert auf einer Kaskadierung von gleichartigen Modulen, die nach dem Tensegrity-Prinzip identisch miteinander verbunden werden. Die elementaren Einheiten sind entweder selbst konventionelle Tensegrity-Strukturen oder einteilige planare bzw. räumliche Strukturen. In klassischen Tensegrity-Manipulatoren werden starre Drucksegmente und nicht elastische Zugsegmente verwendet. Die Formänderung dieser Systeme wird durch Änderung der Längen ausgewählter Zugsegmente realisiert und ist durch die Geometrie sowie Verbindung der Module untereinander begrenzt. Aufgrund ihrer komplexen räumlichen Geometrie und der großen Anzahl von Spanngliedern, die diese Module miteinander verbinden, ist die Formänderungsfähigkeit der bekannten Systeme limitiert. Durch die Verwendung planarer Module in 3D-Tensegrity-Manipulatoren kann der Bewegungsbereich potenziell vergrößert werden. Außerdem können die Konstruktion und die Aktuierung einfach gehalten werden.

Aufgrund dieser vorteilhaften Eigenschaften werden in diesem Beitrag zwei nachgiebige Tensegrity-Manipulatoren auf der Basis von planaren, auf Druck belasteten, X-Modulen gegenübergestellt. Das Design der Manipulatoren und die Topologie sind inspiriert von der Skulptur „Early X-Piece“ von Kenneth Snelson aus dem Jahr 1948 [16] und wurden in früheren Arbeiten [17] für den Einsatz als Gelenk in einem Manipulator charakterisiert. Die Aktuierung der Systeme wird durch die Längenänderung ausgewählter aktiver Zugsegmente induziert. Die Vorspannung wird durch intrinsisch nachgiebige passive Zugsegmente garantiert und eingestellt. Ausgehend von grundlegenden theoretischen Überlegungen zur Topologie, zur Konnektivität der Elemente und zur Kinematik der individuellen X-Module werden diese Erkenntnisse auf kaskadierte Strukturen übertragen und deren resultierende Gesamtkinematik theoretisch verglichen. Weiterhin wird das Systemverhalten für quasi-statische Anwendungsfälle mittels eines inkrementellen-iterativen Verfahrens auf Basis der Finite-Element-Methode [18, 19] beschrieben. Anschließend wird das Design mit zwei unterschiedlichen Aktuierungsvarianten vorgestellt. Die theoretischen Erkenntnisse werden mittels Demonstratoren der beiden Varianten durch bildgebende Verfahren experimentell verifiziert und deren Vor- und Nachteile diskutiert. Abschließend werden Weiterentwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt.



Literatur

- [1] Liu, Y., Bi, Q., Yue, X., Wu, J., Yang, B. & Li, Y. A review on tensegrity structures-based robots. *Mechanism And Machine Theory*. 168, S. 104571, 2022. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104571.
- [2] Gomez-Jauregui, V., Carrillo-Rodriguez, A., Machado, C. & Lastra-Gonzalez, P. Tensegrity Applications to Architecture, Engineering and Robotics: A Review. *Applied Sciences*. 13, 2023. doi: 10.3390/app13158669.
- [3] Böhm, V., Schorr, P., Schale, F., Kaufhold, T., Zentner, L. & Zimmermann, K. Worm-Like Mobile Robot Based on a Tensegrity Structure. *2021 IEEE 4th International Conference On Soft Robotics (RoboSoft)*. S. 358-363, 2021. doi: 10.1109/RoboSoft51838.2021.9479193.
- [4] Rieffel, J. & Mouret, J. Adaptive and Resilient Soft Tensegrity Robots. *Soft Robotics*. 5, S. 318-329, 2018. doi: 10.1089/soro.2017.0066.
- [5] Vespignani, M., Friesen J. M., SunSpiral V. & Bruce J., Design of SUPERball v2, a Compliant Tensegrity Robot for Absorbing Large Impacts. *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. S. 2865-2871, 2018. doi: 10.1109/IROS.2018.8594374.
- [6] Lu, Y., Xu, X. & Luo, Y. Path Planning for Rolling Locomotion of Polyhedral Tensegrity Robots Based on Dijkstra Algorithm. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*. Jg. 60, Nr. 4, S.273-286, 2019. ISSN: 1996-9015. doi: 10.20898/j.iass.2019.202.037.
- [7] Kim K., Agogino A. K. & Agogino A. M. Rolling Locomotion of Cable-Driven Soft Spherical Tensegrity Robots. *Soft robotics*. Jg. 7, Nr. 3, S. 346-361, 2020. doi: 10.1089/soro.2019.0056.
- [8] Shintake, J., Zappetti, D., Peter, T., Ikemoto, Y. & Floreano, D., Bio-inspired Tensegrity Fish Robot. *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. S. 2887-2892, 2020. ISBN: 2577-087X. doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9196675.
- [9] Schorr, P., Schale, F., Otterbach, J. M., Zentner, L., Zimmermann, K. & Boehm, V., Investigation of a Multistable Tensegrity Robot applied as Tilting Locomotion System. *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. S. 2932-2938, 2020. ISBN: 978-1-7281-7395-5. doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9196706.
- [10] Boehm, V., Schorr, P., Schale, F., Kaufhold, T., Zentner, L. und Zimmermann, K., Worm-Like Mobile Robot Based on a Tensegrity Structure. *2021 IEEE 4th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)* S. 358-363, 2021. doi: 10.1109/RoboSoft51838.2021.9479193.
- [11] Lessard, S., Castro, D., Asper, W. u. a., A bio-inspired tensegrity manipulator with multi-DOF, structurally compliant joints. /em 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). S. 5515-5520, 2016, ISBN: 978-1-5090-3762-9. doi: 10.1109/IROS.2016.7759811.
- [12] Fadeyev, D., Zhakatajev, A., Kuzdeuov, A. & Varol, H. A., Generalized Dynamics of Stacked Tensegrity Manipulators. *IEEE Access*. Jg. 7, S. 63472-63484, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2916681.
- [13] Fasquelle, B., Furet, M., Khanna, P., Chablat, D., Chevallereau, C. & Wenger, P., A bio-inspired 3-DOF light-weight manipulator with tensegrity X-joints. *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. S. 5054-5060, 2020. ISBN: 978-1-7281-7395-5. doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9196589.
- [14] Jung, E., Ly, V., Cessna, N., Ngo, M., Castro, D., SunSpiral, V. & Teodorescu, M. Bio-Inspired Tensegrity Flexural Joints. *2018 IEEE International Conference On Robotics And Automation (ICRA)*. S. 5561-5566, 2018, doi: 10.1109/ICRA.2018.8461027.
- [15] Li, W., Nabae, H., Endo, G. & Suzumori, K. New Soft Robot Hand Configuration With Combined Bio-tensegrity and Thin Artificial Muscle. *IEEE Robotics And Automation Letters*. 5, 4345-4351, 2020. doi: 10.1109/LRA.2020.2983668.
- [16] Snelson, K. Art and Ideas, 2013. <http://kennethsnelson.net/>.
- [17] Herrmann, D., Schaeffer, L., Zentner, L. & Böhm, V., Theoretical considerations on 3D tensegrity joints for the use in manipulation systems. *Engineering for a Changing World: Proceedings*. 60th ISC, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, September 04-08, 2023, Ilmenau, 2023. doi: 10.22032/dbt.58888.
- [18] Böhm, V., Sumi, S., Kaufhold, T. & Zimmermann, K. Compliant multistable tensegrity structures. *Mechanism And Machine Theory*. 115, S. 130-148, 2017. ISSN: 0094-114X. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.04.013.
- [19] Zhang, L., Li, Y., Cao, Y. & Feng, X. Stiffness matrix based form-finding method of tensegrity structures. *Engineering Structures*. 8, S. 36-48, 2014. ISSN: 0141-0296. doi: 10.1016/j.engstruct.2013.10.014.

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/81587

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20240304-095947-9



Dieses Werk kann unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 Lizenz (CC BY-NC-ND 4.0) genutzt werden.