

Literaturanalyse zur Kinematik von Exoskeletten

Christina HARBAUER, Martin FLEISCHER, Sundaro NETH, Klaus BENGLER

*Lehrstuhl für Ergonomie,
Technische Universität München
Boltzmannstraße 15, D-85748 Garching*

Kurzfassung: Eine schlecht angepasste Kinematik führt zu Diskomfort, es sind aber auch Verletzungen durch das Assistenzsystem möglich. Diesbezüglich wurde eine umfassende Literaturrecherche zu Kinematiken von Exoskeletten durchgeführt. Die identifizierten Lösungsansätze wurden analysiert und in Körperregionen eingeordnet. Innerhalb dieser Bereiche konnten verschiedene Kategorien von Kinematiken gefunden werden. Die analysierte Literatur wurde in einer Datenbank systematisiert. Im Vergleich zur Gesamtheit der zu Exoskeletten publizierten Literatur finden sich wenige detaillierte, mathematische Betrachtungen zu Kinematiken. Dies zeigt einen großen Bedarf an mathematisch diskutierten Konzepten auf, die die gesamte kinematische Kette von Mensch und Maschine betrachten.

Schlüsselwörter: Exoskelette, Kinematik, Literaturanalyse, Assistenzsystem

1. Motivation

Bei der Evaluation von Exoskeletten werden als Ursachen für eine geringe Akzeptanz, neben anderen Faktoren, häufig auch negative Effekte der Körperanbindungen genannt. Dazu gehören unter anderem unangenehmer Druck und Scheuern beziehungsweise Scherkräfte. Diese unerwünschten Kräfte sind zu großen Teilen auf die mechanische Überbestimmtheit vieler Exoskelettkinematiken zurückzuführen.

Um diese Effekte zu reduzieren wurden schon unterschiedlichste Lösungsstrategien in der Literatur beschrieben, wie die Einstellbarkeit und Nachgiebigkeit der Körperanbindungen zu erhöhen oder das Hinzufügen weiterer Freiheitsgrade in die kinematische Kette des Systems (Schiele & van der Helm, 2006). Diese Vorgehensweise fügt jedoch dem System Redundanzen hinzu und erhöht somit die Komplexität.

Jarrasse & Morel (2011) stellten in Ihrer Veröffentlichung eine Methodik zur Integration von passiven Freiheitsgraden vor, in welcher sie einen ganzheitlichen dreidimensionalen Ansatz verfolgten, um die Überbestimmtheit des Mensch-Maschine-Systems zu vermeiden. Dazu berechneten sie für das Exoskelett ABLE die kinematische Kette aus Mensch und Exoskelett und entwickelten darauf basierend verbesserte Körperanbindungen mit passiven Freiheitsgraden. In einer Evaluation, sowohl an einem Manikin als auch an zehn Personen, konnte eine signifikante Reduktion ungewollter Interaktionskräfte an den Körperanbindungen nachgewiesen werden. Eine Einschränkung dieses Ansatzes ist, dass die Kongruenz der menschlichen und mechanischen Gelenkachsen nicht beachtet wurde, weshalb es hier zu Versatz kommt. Cempini et al. (2013) legten in einem ähnlichen Ansatz die Kinematik für ein aktives Exoskelett aus, wobei zusätzlich noch die Selbstausrichtung der Bewegungsachsen und eine Optimierung der Kraftübertragung an den Körperanbindungen betrachtet wurde. Hierbei handelt es sich um eine theoretische Betrachtung; der Designvorschlag wurde nicht evaluiert. Li

et al. (2017) entwickelten eine formelbasierte Methode, um kinematische Ketten für selbst adaptierende Exoskelette zu entwerfen, aber auch hier fand keine Evaluation statt.

Die Arbeit von Jarrasse & Morel (2011) lässt den Schluss zu, dass eine gründliche Analyse und Berechnung der kinematischen Mensch-Maschine-Kette, durch den Wegfall von ungewünschten Kräften an den Körperanbindungen, potentiell positive Effekte auf das Nutzungserlebnis und langfristig auf die Nutzerakzeptanz haben kann. Den beiden anderen erwähnten formelbasierten Herangehensweisen fehlt jedoch der Nachweis der erwünschten Effekte in der Realität.

Nach Wissen der Autoren hat bisher nur Voilqué et al. (2019) die Kinematiken passiver Überkopf-Exoskelette für industrielle Anwendungen analysiert und gegenübergestellt. Fokus lag hierbei auf dem Vergleich der Komplexität zur Nutzenabwägung für den Einsatz in der Praxis. Mallat et al. (2019) fassen in ihrer sehr aktuellen Veröffentlichung über Ausrichtungsfehler zwischen Mensch und Exoskelett zusammen, dass bisher noch kein körpergetragenes Assistenzsystem entwickelt wurde, das perfekt den Menschen und das System verbindet. Sie weisen auf die Notwendigkeit weiterer Validierungen hin, um Nutzungssicherheit, Komfort und Wirksamkeit für aktive Exoskelette sicherstellen zu können.

2. Exoskelett-Kinematiken in der Literatur

Um einen Überblick über die publizierten Kinematiken von Exoskeletten zu erhalten, wurde eine umfangreiche Datenbank erstellt. Im Folgenden wird ein Auszug dieser präsentiert. Die Literatur wird in die unterstützten Körperbereiche unterteilt und übliche Arten von Kinematiken identifiziert. In den isometrischen Skizzen werden die Körperanbindungen als Festlager dargestellt.

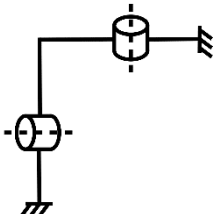
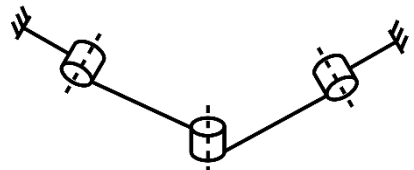
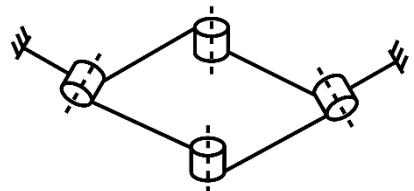
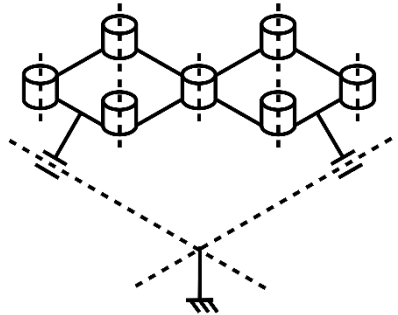
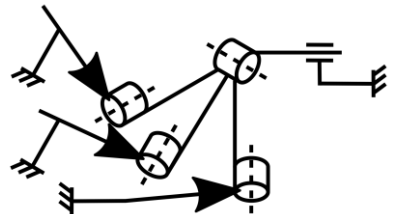
2.1 Schulter

Für die Schulter gibt es fünf publizierte kinematische Umsetzungen.

1. 2-DOF (Degrees of Freedom) Schulterdesign nach Margineanu et al. (2018):
Die einfachste Umsetzung einer Schulterkinematik bildet nur Adduktion/Abduktion und Flexion/Extension der Schulter ab und blockiert die Rotation (Tabelle 1-1).
2. Klassisches Schulterdesign:
In dieser weitverbreiteten Ausführung sind alle rotatorischen Freiheitsgrade der Schulter über drei Scharniergelenke abgebildet. Es kann allerdings zu kinematischen Singularitäten und Kollisionen mit dem Körper kommen (Tabelle 1-2).
3. Scherenstruktur nach Castro et al. (2019):
Durch vier Rotationsgelenke um die Schulter werden die drei rotatorischen Freiheitsgrade der menschlichen Schulter dargestellt. Die Rotationsachsen der Scharniergelenke treffen sich im Rotationszentrum der Schulter (Tabelle 1-3).
4. Doppelparallelogramm nach Christensen & Bai (2018):
Sieben Scharniergelenke führen um die Schulter, während die Rotationsachsen der zwei Fest-Los-Lager sich im Rotationszentrum der Schulter treffen. Die Parallelogramme ermöglichen ein Folgen des sich bewegenden Rotationszentrums ohne Singularitäten und Kollisionen mit dem Körper (Tabelle 1-4).

5. Passiver Gleitmechanismus mit Linearantrieben nach Hunt et al. (2017):
 Drei Lineararmotoren (dargestellt durch Pfeile) treiben einen Mechanismus an, der über ein Loslager am Oberarm befestigt ist. Dies bildet einen echten sphärischen Bewegungsraum um die Schulter ab (Tabelle 1-5).

Tabelle 1: Kinematiken für Schulter-Exoskelette

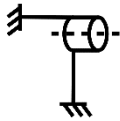
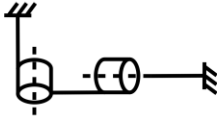
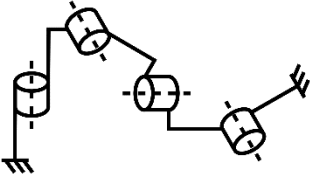
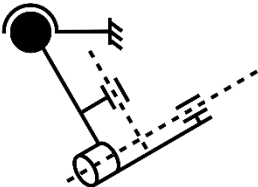
Bezeichnung	Quellen	Skizze
1. 2-DOF Schulterdesign	Margineanu et al. (2018)	
2. Klassisches Schulterdesign	Wu & Shao (2018) Kim & Deshpande (2017) Ren et al. (2013)	
3. Scherenstruktur	Castro et al. (2019)	
4. Doppel-Parallelogramm	Christensen & Bai (2018)	
5. Passiver Gleitmechanismus und parallele Aktuation	Hunt et al. (2017)	

2.2 Arm

1. 1-DOF Ellenbogendesign:
 Das einfachste und meist verbreitete Konzept zur Unterstützung des Ellenbogens wird durch ein Scharniergelenk abgebildet. Dies ist die einfachste Ausführung der Armunterstützung (Tabelle 2-1).

2. 2-DOF Armdesign:
 Hier wird das 1-DOF-Prinzip um die Pro- und Subnation des Unterarmes erweitert. Die Umsetzung dieses Freiheitsgrades ist jedoch meist mit großem Bau-raum verbunden, da eine Konstruktion um den Unterarm gestaltet werden muss (Tabelle 2-2).
3. 4-DOF Armdesign:
 Diese Systeme sind an Oberarm und Hand angebunden und unterstützen die vier DOF dieser Körperteile. Damit wird der gesamte Bewegungsraum von Arm bis Hand abgebildet. Entsprechend sind die mechanische Struktur und die Steuerung komplex (Tabelle 2-3).
4. 4-DOF mit isostatischen Anbindungen nach Jarrasse & Morel (2011):
 Dieses Exoskelett besitzt vier DOF und reicht von Schulter bis Unterarm. Jar-rasse & Morel (2011) konnten durch das Hinzufügen passiver Freiheitsgrade eine Reduktion der Zwangskräfte vorhersagen und experimentell bestätigen (Tabelle 2-4).

Tabelle 2: Kinematiken für Arm-Exoskelette

Bezeichnung	Quellen	Skizze
1. 1-DOF Ellenbogen-design	Perez et al. (2018) Manna & Dubey (2018)	
2. 2-DOF Armdesign	Liu et al. (2018) Tiboni et al. (2018) Pehlivan et al. (2011)	
3. 4-DOF Armdesign	Plitea et al. (2018) Wu & Shao (2018) Brahmi et al. (2018)	
4. 4-DOF mit isostatischen Anbindungen	Jarrasse & Morel (2011)	

3. Diskussion

Trotz der hohen Anzahl an Veröffentlichungen im Bereich der Exoskelette, werden in der Literatur selten klare Abhandlungen zum kinematischen Aufbau und theoretischen, formelbasierten Aufarbeitungen thematisiert.

Der Einfluss der Kinematik und deren Umsetzung auf die Usability beziehungsweise die Scherkräfte an den Körperanbindungen ist derzeit noch nicht ausreichend untersucht. In Anbetracht der fehlenden, langfristigen Akzeptanz von Exoskeletten und den Ergebnissen von Jarrasse & Morel (2011) sollte dieser Thematik jedoch in der Entwicklung industrieller Exoskelette mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden. So könnte eine gründliche formelbasierte Analyse der kinematischen Kette von Mensch und Maschine zu einem frühen Entwicklungszeitpunkt langfristig positive Auswirkungen auf die allgemeine Akzeptanz des Systems haben. Selbstverständlich ist eine gut gestaltete Mensch-Maschine-Schnittstelle nicht der einzige Einflussfaktor auf die Akzeptanz, aber vermutlich maschinenseitig der größte.

Vor allem für aktiv unterstützende Exoskelette ist diese Vorgehensweise notwendig, da die aufgebrachten Kräfte wesentlich höher sind als die passiver Systeme. Wenn Exoskelette nicht gründlich auf die menschliche Kinematik abgestimmt, theoretisch und praktisch evaluiert und simuliert sind, besteht das Risiko, den Träger mehr zu schädigen, als zu unterstützen. Für passive Exoskelette ist die Gefahr auf Grund der geringeren Kräfte niedriger, aber auch hier kann sich bei jahrelanger Nutzung eine Schädigung einstellen. Es sollte ein Prozess geschaffen werden, der die oben genannten Untersuchungen abbildet und vereinheitlicht.

4. Literaturverzeichnis

- Brahmi, B., Saad, M., Brahmi, A., Luna, C. O. & Rahman, M. H. (2018). Compliant control for wearable exoskeleton robot based on human inverse kinematics. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15(6), 172988141881213. <https://doi.org/10.1177/1729881418812133>
- Castro, M. N., Rasmussen, J., Andersen, M. S. & Bai, S. (2019). A compact 3-DOF shoulder mechanism constructed with scissors linkages for exoskeleton applications. *Mechanism and Machine Theory*, 132, 264–278. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.11.007>
- Cempini, M., Rossi, S. M. M. de, Lenzi, T., Vitiello, N. & Carrozza, M. C. (2013). Self-Alignment Mechanisms for Assistive Wearable Robots: A Kinetostatic Compatibility Method. *IEEE Transactions on Robotics*, 29(1), 236–250. <https://doi.org/10.1109/TRO.2012.2226381>
- Christensen, S. & Bai, S. (2018). Kinematic Analysis and Design of a Novel Shoulder Exoskeleton Using a Double Parallelogram Linkage.
- Hunt, J., Lee, H. & Artemiadis, P. (2017). A Novel Shoulder Exoskeleton Robot Using Actuation and a Passive Slip Interface.
- Jarrasse, N. & Morel, G. (2011). Connecting a Human Limb to an Exoskeleton. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(3), 697–709. <https://doi.org/10.1109/TRO.2011.2178151>
- Kim, B. & Deshpande, A. D. (2017). An upper-body rehabilitation exoskeleton Harmony with an anatomical shoulder mechanism: Design, modeling, control, and performance evaluation. *The International Journal of Robotics Research*, 36(4), 414–435. <https://doi.org/10.1177/0278364917706743>
- Li, J., Zhang, Z., Tao, C. & Ji, R. (2017). A number synthesis method of the self-adapting upper-limb rehabilitation exoskeletons. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 14(3), 172988141771079. <https://doi.org/10.1177/1729881417710796>
- Liu, K., Xiong, C.-H., He, L., Chen, W.-B. & Huang, X.-L. (2018). Postural synergy based design of exoskeleton robot replicating human arm reaching movements. *Robotics and Autonomous Systems*, 99, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.10.003>
- Mallat, R., Khalil, M., Venture, G., Bonnet, V. & Mohammed, S. (2019). Human-Exoskeleton Joint Misalignment: A Systematic Review. In *2019 Fifth International Conference on Advances in Biomedical Engineering (ICABME)* (S. 1–4). IEEE.
- Manna, S. K. & Dubey, V. N. (2018). Design Proposal for a Portable Elbow Exoskeleton.
- Margineanu, D., Lovasz, E.-C., Gruescu, C. M., Ciupe, V. & Tatar, S. (2018). 5 DoF Haptic Exoskeleton for Space Telerobotics – Shoulder Module. In M. I. C. Dede, M. İtik, E.-C. Lovasz & G. Kiper (Hrsg.), *Mechanisms, Transmissions and Applications* (Mechanisms and Machine Science, Bd. 52, S. 111–120). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60702-3_12

- Pehlivan, A. U., Celik, O. & O'Malley, M. K. (2011). *Mechanical Design of a Dista Arm Exoskeleton for Stroke and Spinal Cord Injury Rehabilitation. June 29 - July 1, 2011 ; ETH Zurich, Science City, Zurich, Switzerland ; [part of Rehab Week Zurich 2011, June 27 to July 1, 2011. IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011. Piscataway, NJ: IEEE. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=5961155>*
- Perez, C. N., Georgilas, I., Etoundi, A. C., Chong, J. & Jafari, A. (2018). A Conceptual Exoskeleton Shoulder Design for th Assistance of Upper Limb Movement.
- Plitea, N., Gherman, B., Carbone, G., Ceccarelli, M., Vaida, C., Banica, A. et al. (2018). Kinematic Analysis of an Exoskeleton-Based Robot for Elbow and Wrist Rehabilitation. In J. C. M. Carvalho, D. Martins, R. Simoni & H. Simas (Hrsg.), *Multibody Mechatronic Systems (Mechanisms and Machine Science, Bd. 54, S. 424–433)*. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67567-1_40
- Ren, Y., Kang, S. H., Park, H.-S., Wu, Y.-N. & Zhang, L.-Q. (2013). Developing a multi-joint upper limb exoskeleton robot for diagnosis, therapy, and outcome evaluation in neurorehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering : a Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 21(3), 490–499. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2012.2225073>
- Schiele, A. & van der Helm, F. C. T. (2006). Kinematic design to improve ergonomics in human machine interaction. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 14(4), 456–469. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2006.881565>
- Tiboni, M., Borboni, A., Faglia, R. & Pellegrini, N. (2018). Robotics rehabilitation of the elbow based on surface electromyography signals. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(2), 168781401875459. <https://doi.org/10.1177/1687814018754590>
- Voilqué, A., MASOOD, J., Fauroux, J., Sabourin, L. & Guezet, O. (2019). Industrial Exoskeleton Technology: Classification, Structural Analysis, and Structural Complexity Indicator. In *2019 Wearable Robotics Association Conference (WearRAcon)* (S. 13–20).
- Wu, Q. & Shao, Z. (2018). Kinematics, Dynamics and Control of an Upper Limb Rehabilitation Exoskeleton. In S. Lee, H. Ko & S. Oh (Hrsg.), *Multisensor Fusion and Integration in the Wake of Big Data, Deep Learning and Cyber Physical System (Lecture Notes in Electrical Engineering, Bd. 501, S. 284–298)*. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90509-9_17



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch?

66. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

TU Berlin
Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme

HU Berlin
Professur Ingenieurpsychologie

16. – 18. März 2020, Berlin

GfA-Press

Bericht zum 66. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 16. – 18. März 2020

**TU Berlin, Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme
HU Berlin, Professur Ingenieurpsychologie**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2020
ISBN 978-3-936804-27-0

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.
Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**
Schriftleitung: Matthias Jäger

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Screen design und Umsetzung

© 2020 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de