

Trajektorienplanung für einen strukturelastischen Leichtbauroboter mit mehreren Schwingungsebenen

Trajectory planning for a link-elastic lightweight robot with multiple vibration planes

Freia Irina Muster, Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, 44227 Dortmund, Deutschland, freia.muster@tu-dortmund.de

Maximilian Krämer, Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, 44227 Dortmund, Deutschland, maximilian.kraemer@tu-dortmund.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr. h.c. Torsten Bertram, Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, 44227 Dortmund, Deutschland, torsten.bertram@tu-dortmund.de

Kurzfassung

Strukturelastische Leichtbauroboter bieten hinsichtlich der Sicherheit von Mensch-Roboter-Interaktionen aufgrund ihrer geringen Massenträgheiten und passiven Nachgiebigkeit große Vorteile. Vermeintliche Nachteile, wie lastabhängige Verbiegungen und Schwingungen, können unter Verwendung geeigneter Sensoren (z.B. Dehnungsmessstreifen) und Regler sogar genutzt werden, um Kräfte zu detektieren [1]. Die Wiederholgenauigkeit von Robotern prädestiniert sie für repetitive Aufgaben, in denen zuvor festgelegte Wegpunkte nacheinander abzufahren sind. In diesem Sinne spielt bei elastischen Robotern eine erfolgreiche Schwingungsdämpfung eine entscheidende Rolle. Treten mehrere Schwingungsebenen auf, kann jedoch die Steuerbarkeit aller Schwingungen nicht mehr unabhängig von der Konfiguration garantiert werden [2], sodass die konfigurationsabhängige Schwingungsdämpfung in der Trajektorienplanung zu berücksichtigen ist.

Der vorliegende Beitrag stellt eine Trajektorienplanung durch eine vorgegebene Punktsequenz für einen strukturelastischen Leichtbauroboter auf Grundlage von [3] vor. Dabei werden räumliche und zeitliche Komponenten sowohl an die durch das System vorgegebenen kinematischen und dynamischen Nebenbedingungen als auch an vorgegebene Gütemaße angepasst. Optimiert wird neben der Pfadlänge und Fahrzeit auch die Steuerbarkeit der Schwingungsebenen bezogen auf alle Punkte entlang des Pfades, um den Einfluss auf die Schwingungen der Armkörper zu verbessern.

Die Planung des geometrischen Pfades erfolgt mit B-Spline-Kurven (siehe [6]) und ergibt einen glatten Pfad durch die vorgegebene Punktsequenz. Optimierer verschieben dazu Kontrollpunkte unter Berücksichtigung gewichteter Gütemaße zur Anpassung des Splines, wobei zur Vermeidung von Eigenkollisionen zusätzlich eine iterative Kollisionsvermeidung implementiert ist. Das zur Evaluierung genutzte Experimentalsystem TUDORA (Technical University Dortmund Omni-elastic Robot Adapted) verfügt über drei Freiheitsgrade sowie zwei elastische Armkörper, wobei die Optimierung der Steuerbarkeit ausschließlich Gelenk zwei betrifft (vergleiche [4]). **Abbildung 1** zeigt den geometrischen Pfad des zweiten Gelenks ohne und mit verschiedenen Gewichtungen der Steuerbarkeitsoptimierung. Der blau hinterlegte Bereich, in dem eine schlechte Steuerbarkeit der Schwingungsebenen zu erwarten ist, wird mit Hilfe der Optimierung deutlich verlassen und so die Einflussnahme auf die Schwingungen entlang des Pfades verbessert.

Zur Überführung des Pfades in eine Trajektorie wird eine konstante Skalierung (siehe [6]) verwendet, oder ein Spline als Skalierungsfunktion, welcher die Fahrzeit reduzieren kann. **Abbildung 2** zeigt eine Beispieltrajektorie und ihre Ableitungen. Durch die Planung mit B-Splines und die Anpassung einer bezüglich der Optimierung geeigneten Anzahl von Kontrollpunkten ergibt sich in **Abbildung 2(a)** eine glatte Trajektorie für jedes der drei Gelenke. Zusätzlich ist es durch die Wahl der Ordnung des Splines möglich, eine Trajektorie mit stetigem Ruck zu erzeugen (vergleiche **Abbildung 2(d)**).

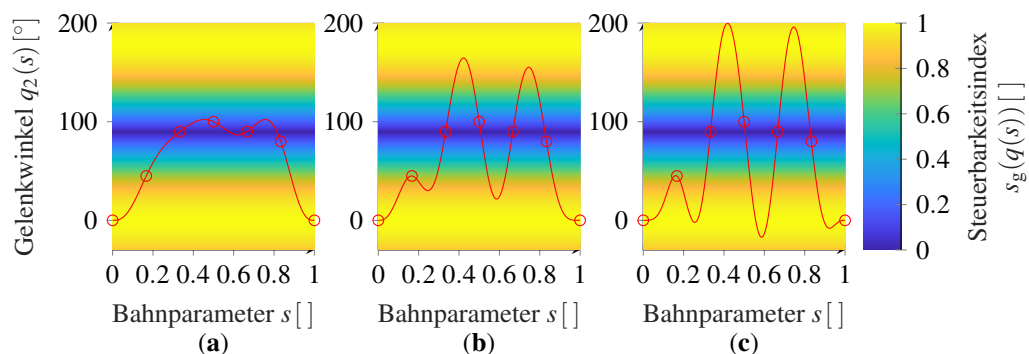


Abbildung 1 Geometrischer Pfad des zweiten Gelenks von TUDORA durch vorgegebene Wegpunkte (Kreise) ohne Optimierung der Steuerbarkeit $c_s = 0$ (a), mit mittlerer Gewichtung $c_s = 0,5$ (b) und hoher Gewichtung $c_s = 5$ (c).

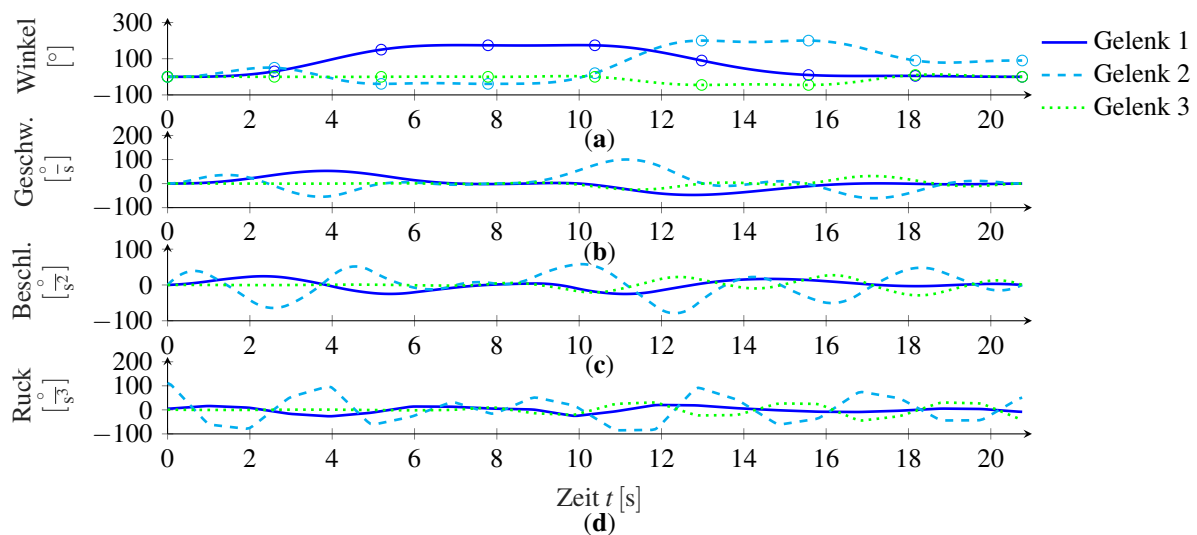


Abbildung 2 Konstant skalierte Soll-Trajektorie (a) durch vorgegebene Wegpunkte (Kreise) mit Geschwindigkeit (b), Beschleunigung (c) und Ruck (d) der drei Gelenke von TUDORA.

Die geplante Trajektorie wird an den Roboter übergeben und mit Hilfe des Trajektorienfolgereglers aus [5] abgefahren. Zur Evaluierung der Trajektorienplanung dienen verschiedene Versuche in der Simulation sowie am Experimentalsystem. Mithilfe eines Innere-Punkte-Verfahrens zum Lösen nichtlinearer Programme konnten 99 von 100 zufälligen Testsequenzen erfolgreich geplant werden. Bei einer Sequenz wurde innerhalb der Iterationsschritte der Kollisionsvermeidung keine Lösung gefunden. Die einzelnen Gütemaße konkurrieren dabei miteinander. Bei Verbesserung der Steuerbarkeit entlang des Pfades werden beispielsweise längere Strecken und Fahrzeiten benötigt, um Bereiche mit geringer Steuerbarkeit der Schwingungsebenen zu vermeiden. Dies wirkt Optimierungen hinsichtlich der Fahrzeit und Pfadlänge entgegen. Durch verschieden starke Gewichte der einzelnen Gütemaße ist es jedoch möglich, unter Einhaltung aller Nebenbedingungen einen Kompromiss einzustellen. Somit wird aus dem multikriteriellen ein skalares Optimierungsproblem. In der Simulation entsprechen sich Soll- und Ist-Trajektorie. Die Versuche am Experimentalsystem zeigen, dass der Trajektorie mit einer maximalen Abweichung unter $0,7^\circ$ bzw. $15 \frac{\circ}{s}$ gefolgt wird und im Vergleich zum sequentiellen Abfahren der Wegpunkte mit einem Sinusprofil weniger Schwingungen eingepreßt werden, was zusätzlich die Roboterstruktur schont.

Ziel der vorgestellten Trajektorienplanung ist es, für einen strukturelastischen Roboter eine Trajektorie durch vorgegebene Wegpunkte zu generieren, welche unter anderem die Steuerbarkeit der Schwingungsebenen während der Bewegung maximiert. Auf diese Weise wird der konfigurationsabhängige Einfluss der Schwingungsdämpfung optimiert und repetitive Aufgaben werden ermöglicht. Aktuelle Arbeiten beschäftigen sich mit der Erweiterung der berücksichtigten Gütemaße, um beispielsweise eine Ruckreduktion oder Energieoptimierung zu erreichen. Zudem wird eine Übertragung der Trajektorienplanung aus dem Gelenkraum in den Arbeitsraum erfolgen.

Die Autoren bedanken sich herzlich für die große Unterstützung durch Heiko Renz im Rahmen seiner Bachelorarbeit. Ebenfalls danken wir für die finanzielle Unterstützung von Teilen des Projekts durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, BE 1569/12-1).

Literatur

- [1] Malzahn, J.: *Modeling and control of multi-elastic-link robots under gravity*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2014.
- [2] John, F. I. ; Malzahn, J. ; Bertram, T.: *Vergleich von Steuerbarkeitsmetriken anhand eines strukturelastischen Roboterarms mit mehreren Schwingungsebenen*. In: Proceedings of the IFToMM D-A-CH Konferenz 2018. 15./16. Februar 2018 Lausanne, <https://doi.org/10.17185/dupublico/45336>
- [3] Renz, H.: *Trajektorienplanung für einen strukturelastischen Leichtbaurobter unter Nebenbedingungen*. Bachelorarbeit, Technische Universität Dortmund, 2019.
- [4] John, F. I.; Malzahn, J.; Bertram, T.: *Controllability and accessibility of vibrations in multiple planes on link-elastic robot arms*. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) 2017. 05./08. Dez. 2017 Macau SAR, China.
- [5] Siciliano, B.; Sciavicco, L.; Villani, L.; Oriolo, G. (Springer Science & Business Media): *Robotics: modelling, planning and control*. London: Springer-Verlag, 2009.
- [6] Biagiotti, L.; Melchiorri, C.: *Trajectory planning for automatic machines and robots*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub

universitäts
bibliothek

In: Sechste IFToMM D-A-CH Konferenz 2020

Dieser Text wird über 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/71195

URN: urn:nbn:de:hbz:464-20200220-145400-0



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