

# Optimierte Energieeffizienz des zweibeinigen Gehens auf nachgiebigem Untergrund durch elastische Kopplung

## Optimized Energy Efficiency of Bipedal Walking on Compliant Ground Using Elastic Coupling

Yinnan Luo<sup>\*1</sup>, Ulrich J. Römer<sup>1</sup>, Marten Zirkel<sup>2</sup>, Lena Zentner<sup>2</sup>, Alexander Fidlin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Mechanik, 76131 Karlsruhe, Deutschland.

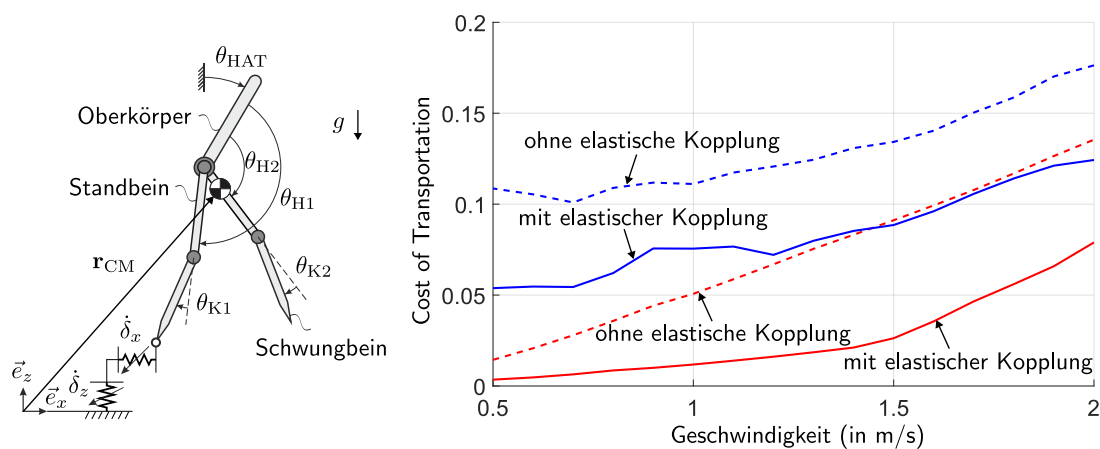
<sup>2</sup>Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Mechanik Nachgiebiger Systeme, 98684 Ilmenau, Deutschland.

\*Korrespondierender Autor. Email: yinnan.luo@kit.edu.

### Kurzfassung

Energieeffizienz ist von grundlegender Bedeutung für die Entwicklung zweibeiniger Roboter. Insbesondere, wenn ein Roboter eine Energieversorgung mit begrenzter Kapazität - wie beispielsweise in Form eines Akkus - während der Fortbewegung mitführt, ist die Energieeffizienz ausschlaggebend für die Betriebsdauer und die erreichbare Reichweite. Da zweibeinige Gehbewegungen sehr flexibel sind, können solche Roboter in verschiedenen Umgebungen eingesetzt werden. Dies motiviert unser Forschungsziel, einen zweibeinigen Roboter zu entwickeln, der mit hoher Energieeffizienz in variierenden Umgebungen laufen kann. In diesem Beitrag wird spezifisch die periodische Gehbewegung auf nachgiebigem Untergrund untersucht, deren Energieeffizienz durch das elastische Koppeln von Robotersegmenten mithilfe von nachgiebigen Mechanismen verbessert wird.

Das ebene Robotermodell besteht aus fünf Starrkörper-Segmenten für einen Oberkörper, zwei Oberschenkel, und zwei Unterschenkel (Bild 1, links). Das untere Ende des Beins ist als Punktfuß modelliert, weswegen kein Drehmoment im Kontakt zwischen Boden und Bein übertragen werden kann. Vier elektrische Antriebsstränge sind in den zwei Hüft- und zwei Kniegelenken integriert. Daher entsteht ein unter-aktuiertes Mehrkörpermodell, dessen Gehbewegung bei einer konstanten Durchschnittsgeschwindigkeit - definiert als  $v = \ell_{\text{Schritt}}/t_{\text{Schritt}}$  mit Schrittlänge  $\ell_{\text{Schritt}}$  und Schrittdauer  $t_{\text{Schritt}}$  - als periodisch angenommen wird.



**Bild 1** Links: Robotermodell mit fünf Starrkörper-Segmenten. Rechts: Optimierte  $CoT$  für Gehen auf (rot) hartem und (blau) nachgiebigem Untergrund.

Da die Energieeffizienz des Roboters einerseits vom verwendeten Regelungskonzept und andererseits von den Eigenschaften des mechanischen Systems abhängig ist, wird ein Optimierungsverfahren entwickelt, durch das die Parameter von Regler und System gleichzeitig optimiert werden [1]. Die Zielfunktion der Optimierung ist die dimensionlose Cost of Transportation ( $CoT = E_{zu}/mg\ell_{\text{Schritt}}$ ), die ein Maß für die Energieeffizienz der Fortbewegung ist. Dabei ist  $E_{zu}$  die gesamte zugeführte (elektrische) Energie,  $m$  die Masse, und  $g$  die Erdbeschleunigung. Um eine stabile periodische Gehbewegung zu erzeugen, wird das Regelungskonzept Hybrid Zero Dynamics (HZD) Control ausgewählt. Ein Vorteil dieser Regelungsstrategie ist die hohe Energieeffizienz, weil der Roboter die passive Dynamik des mechanischen Systems - freie Schwingung des Starrkörper-Systems - für die Gehbewegung ausnutzt [2]. Außerdem wird der Oberkörper des Roboters über nachgiebige Mechanismen elastisch mit den Oberschenkeln verbunden. Durch Anpassen der Mechanismensteifigkeit wird die passive Dynamik des Robotersystems modifiziert. Die nichtlinearen Kennlinien der Mechanismen werden somit als mechanische Parameter numerisch optimiert [3]. Nach der Optimierung stimmt die Frequenz der freien Schwingungen des Roboters mit der Schrittfrequenz der Gehbewegung überein. Durch Ausnutzen der Resonanzbewegung kann sich der

Roboter mit sehr hoher Energieeffizienz fortbewegen, wie beispielsweise von Autoren bereits für das effiziente Gehen auf hartem Untergrund mit verschiedenen Neigungswinkeln untersucht wurde [4].

In diesem Beitrag sollen die periodische Gehbewegung und die Effizienzstudie für nachgiebige Untergründe erweitert werden. Im Gegensatz zum harten Untergrund, bei dem der Kontakt durch einen diskreten plastischen Stoß abgebildet wird [5], wird der Kontaktvorgang auf weichem Untergrund durch einen kontinuierlichen dynamischen Prozess der Bodenverformung approximiert [6]. Das Kontaktmodell und die Parameter des Bodens (Material: Torf) werden aus den Studien [7] und [8] übernommen. Das nachgiebige Kontaktmodell resultiert aus einer Kombination von nichtlinearer Steifigkeit und nichtlinearer Dämpfung. Dabei wird Energie während der Kompression des Bodens gespeichert und wieder bei der Restitution freigegeben. Das Modell hat drei nicht-aktuierte Freiheitsgrade, die durch die Schwerpunktslage  $\mathbf{r}_{CM}$  und die absolute Körperorientierung  $\theta_{HAT}$  beschrieben werden. Die vier aktuierten Gelenkwinkel in Hüfte und Knie werden durch den Regler auf die jeweilige Referenztrajektorie (Bézier-Polynome) synchronisiert. Falls keine Regelabweichung vorhanden ist, lässt sich die Synchronisierung als virtuelle Zwangsbedingung verstehen, und die volle Systemdynamik wird durch die (Null-)Dynamik der nicht-aktuierten Freiheitsgrade repräsentiert. Mittels eines Multiple-Shooting-Verfahrens wird die periodische Lösung dieser Nulldynamik berechnet, aus der sich in Kombination mit den Referenztrajektorien alle Systemzustände rekonstruieren lassen. Damit werden die Energieeffizienz ( $CoT$ ) und die physikalischen Nebenbedingungen beim Gehen ausgewertet.

Die optimierte  $CoT$  für das Gehen bei verschiedenen konstanten Geschwindigkeiten ( $v \in [0.5, \dots, 2.0]$  m/s) ist in Bild 1 (rechts) dargestellt. Laut Simulation kann der Energieverbrauch durch den Einsatz von optimalen elastischen Kopplungen zwischen Oberkörper und Oberschenkeln um 63,3% auf hartem, und um 35,3% auf nachgiebigem Untergrund reduziert werden. Außerdem generiert die Optimierung die Wunschennlinie der elastischen Kopplung, die durch nachgiebige Mechanismen zu realisieren sind [9]. Da die Parameter von Regler und der elastischen Kopplung gleichzeitig optimiert werden, findet dieser Algorithmus optimale Bewegungsmuster, deren Schrittfrequenzen ähnlich zur Frequenz freier Schwingungen der Beine sind. Mit anderen Worten, läuft der Roboter sowohl auf hartem als auch auf nachgiebigem Untergrund in Resonanz mit hoher Energieeffizienz. Die Effizienz auf weichem Untergrund ist generell schlechter als bei hartem Untergrund, weil die Gangart aus Sicht der Effizienz nicht optimal ist. Auf hartem Untergrund läuft der Roboter mit minimaler Beteiligung von Aktoren und kleinen Relativbewegungen der Segmente, um Energie zu sparen. Das ist jedoch auf weichem Untergrund nicht möglich, weil die Kontaktbedingungen viel anspruchsvoller durch den Regler sichergestellt werden müssen. Um die Bewegung zu stabilisieren müssen alle Aktoren stets stark beschleunigen und bremsen, was viel Energieverbrauch verursacht.

Zusammenfassend zeigt die Studie, dass das Gehen auf weichem Untergrund im Vergleich zu hartem Untergrund weniger effizient ist. Die Anwendung nachgiebiger Mechanismen im Roboterdesign ist vorteilhaft um die Effizienz zu verbessern: auf hartem Untergrund werden 63,3% Energie gespart, auf weichem Untergrund 35,3%. Aktuell wird ein Roboterprototyp entwickelt, um die Simulationsergebnisse im Experiment zu validieren.

**Die Arbeit ist durch Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert, Grant FI 1761/4-1 | ZE 714/16-1.**

## Literatur

- [1] Römer, U.J., Kuhs, C., Krause, M.J., Fidlín, A.: *Simultaneous optimization of gait and design parameters for bipedal robots*. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). (2016), S. 1374–1381.
- [2] Westervelt, E.R., Grizzle, J.W., Koditschek, D.E.: *Hybrid zero dynamics of planar biped walkers*. IEEE Transactions on Automatic Control. (2003) **48**(1), S. 42–56.
- [3] Luo, Y., Römer, U.J., Zentner, L., Fidlín, A.: *Improving Energy Efficiency of a Bipedal Walker with Optimized Nonlinear Elastic Coupling*. Advances in Nonlinear Dynamics. (2022), S. 253–262.
- [4] Luo, Y., Zirkel, M., Römer, U.J., Zentner, L., Fidlín, A.: *Improving energy efficiency of bipedal walking using nonlinear compliant mechanisms*. Proc. Appl. Math. Mech. (2021) **21**(1), e202100197.
- [5] Pfeiffer, F.: *On non-smooth multibody dynamics*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics. (2012) **226**(2), S. 147–177.
- [6] Flores, P.: *Contact mechanics for dynamical systems: a comprehensive review*. Multibody System Dynamics. (2022) **54**(2), S. 127–177.
- [7] Carvalho, A.S., Martins, J.M.: *Exact restitution and generalizations for the Hunt–Crossley contact model*. Mechanism and Machine Theory. (2019) **139**, S. 174–194.
- [8] Silva, M.F., Machado, J.A.T., Lopes, A.M.: *Modelling and simulation of artificial locomotion systems*. Robotica (2005) **23**(5), S. 595–606.
- [9] Zirkel, M., Luo, Y., Römer, U.J., Fidlín, A., Zentner, L.: *Parameter Study of Compliant Elements for a Bipedal Robot to Increase Its Walking Efficiency*. Microactuators, Microsensors and Micromechanisms. (2021), S. 58–75.

# 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/81582

**URN:** urn:nbn:de:hbz:465-20240304-103147-9



Dieses Werk kann unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0 Lizenz (CC BY 4.0) genutzt werden.