

Laufbewegungen bei Roboter, Tier und Mensch: Analyse, Modellierung, Simulation und Optimierung

Maximilian Stelzer, Oskar von Stryk

Fachgebiet Simulation und Systemoptimierung, Technische Universität
Darmstadt

Zusammenfassung

Die Wurzeln der Forschung zum Verständnis der komplizierten Laufprozesse bei Robotern, Tieren und Menschen liegen in der Biologie, der Medizin und den Ingenieurwissenschaften. In der Biologie und Medizin ist das Interesse u.a. durch die Diagnose und bessere Heilung von Laufproblemen und die Entwicklung intelligenter, aktiver Beinprothesen begründet. Die Ingenieurwissenschaften sind z.B. an Bau und Betrieb von Laufmaschinen zur Fortbewegung in unebenem Gelände und der Integration von interner und externer Sensorik und Motorik in die zielorientierte Planung und Steuerung der Laufbewegung autonomer Roboter interessiert. Für alle diese Untersuchungen sind Modellierung und Simulation der Dynamik des Laufens von zentraler Bedeutung.

Abstract

The roots of the scientific research interest in understanding the complicated dynamic walking processes of robots, animals and humans are in biology, medicine and engineering sciences. Biological and medical research is interested in improved diagnosis and healing of walking problems and in the development of an intelligent, active leg prosthesis. In engineering sciences research is performed in design and operation of walking machines for locomotion in rough terrain as well as in the integration of internal and external sensors and actuators in the goal oriented planning and control of legged locomotion for autonomous robots. Modelling and simulation of the dynamics of legged locomotion is of central importance for all of these fundamental research themes.

1. Einführung

In den neunziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts begann weltweit das wissenschaftliche und kommerzielle Interesse an Laufmaschinen und laufenden Robotern (z.B. Honda ASIMO, Sony AIBO) stark anzuwachsen. Konstruktion, Steuerung und Regelung laufender Roboter sind um ein Vielfaches aufwendiger zu realisieren als beispielsweise die Fortbewegung auf Rädern. Die Fortbewegung auf Beinen ermöglicht jedoch das Schreiten über Hindernisse und Gräben, das Treppen steigen und allgemein eine gleichmäßige Fortbewegung über unebenem Untergrund durch Kompensation von Unebenheiten durch Anpassung von Schrittlänge und -höhe. Auch besteht auf weichem Grund ein geringeres Risiko des Einsinkens gegenüber Rädern. Computerbasierte Modellierung und Simulation bietet neben Theorie und Experiment einen neuen Zugang zum Verständnis und zur Lösung vieler noch offener, grundlegender Fragen im Verständnis der Dynamik des Laufens bei Mensch, Tier und Roboter.

2. Grundlagen der vier- und zweibeinigen Fortbewegung

2.1. Statisch und dynamisch stabile Gangarten

Das statisch stabile Laufen bei vier-, sechs- oder mehrbeiniger Fortbewegung ist dadurch gekennzeichnet, dass mindestens drei Füße fest mit dem Boden verbunden sind und sich die Projektion des Körperschwerpunkts entlang der Richtung des Gravitationsvektors auf den Boden innerhalb der durch drei oder mehr Ecken gebildeten konvexen Hülle der Bodenkontaktpunkte befindet. Solange diese Bedingung erfüllt ist, sind Gleichgewichtsverlust und Umkippen unmöglich. Stabile Laufbewegungen mit weniger als drei Füßen in Kontakt mit dem Boden, bei denen sich das Kontaktpolygon während des Bewegungsablaufs ein- oder mehrmals zu einer Linie, einem Punkt oder gar nichts reduziert, werden als dynamisch stabil bezeichnet. Bei zweibeiniger Fortbewegung wird zur Definition des statisch stabilen Laufens das Polygon der Bodenkontaktpunkte ersetzt durch die konvexe Hülle der Bodenkontaktflächen der beiden Füße.

In der Natur werden mehrheitlich reguläre Gangarten mit periodischem Bewegungsmuster beobachtet, die nach Anzahl der Füße mit gleichzeitigem Bodenkontakt, Reihenfolge der Beinbewegungen, Dauer des Bodenkontakts eines einzelnen Fußes etc. unterschieden werden. Bei sechs- und mehrbeinigen Tieren findet man ausschließlich statisch stabile Gangarten. Bei Vierbeinern gibt es in der Natur dagegen nur eine einzige und sehr

langsame, statisch stabile Gangart, so dass hier mehrheitlich dynamisch stabile Gangarten verwendet. Beispiele sind Schritt, Trab und Galopp.

Die Klassifikation einer Gangart allein legt jedoch noch nicht die zeitlichen Trajektorien der einzelnen Beingelenksbewegungen während der Ausführung einer Laufbewegung eindeutig fest, da die Bewegungsapparate bei Mensch und Tier (und meist auch bei mehrbeinigen Robotern) hochredundant sind.

Die Realisierung dynamisch stabil laufender, zwei- und vierbeiniger Roboter stellt wegen der hohen Dynamik der Bewegung und der permanenten Umkipppgefahr eine große, bisher nur in Spezialfällen gelöste, ingenieurwissenschaftliche Problemstellung dar. Dies gilt insbesondere dann, wenn sich der laufende Roboter zielorientiert und autonom bezüglich der Verarbeitung von Sensorinformationen sowie der Planung und Steuerung von Bewegungen einerseits und des Energie- und Rechenzeitbedarfs andererseits fortbewegen soll.

2.2. Exkurs: Sechsheiniges Laufen

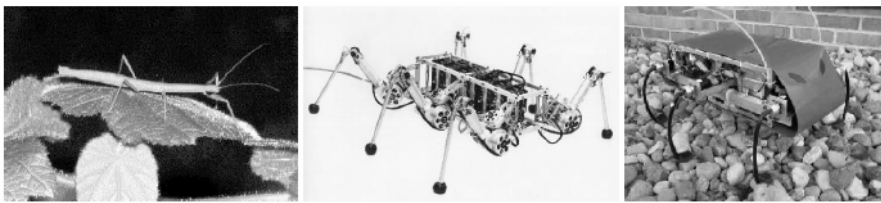


Abb. 1. Sechsheiniges Laufen, links; Vorbild Stabheuschrecke [2], Mitte; Laufmaschine der TU München [3], rechts; Laufroboter RHex [4]

Allgemeine Untersuchungen des Nervensystems mehrbeiniger Tierarten haben gezeigt, dass die Beinbewegungen im Wesentlichen lokal gesteuert werden und nicht zentral durch das Gehirn. Die Stabheuschrecke (Abb. 1, links) ist eines der biologischen Vorbilder zur Realisierung sechsheiniger Laufmaschinen [2]. Zur Fortbewegung werden drei Teilaufgaben unterschieden: die räumlich-zeitliche Koordination der Beinbewegungen, die Bewegungssteuerung eines einzelnen Beines und die Steuerung der Körperhöhe über Grund. Zur Simulation der dezentralen Bewegungsregelung der Stabheuschrecke wurden weitgehend autonome Beinbewegungsregelungen mit künstlichen neuronalen Netzen jeweils für die Schwing- und Bodenkontaktphasen einer Fußbewegung entwickelt [2]. Auf Grund dieser Erkenntnisse wurde zuerst an der TU München [3] (Abb. 1, Mitte) eine sechsheinige Laufmaschine entwickelt. Mit je drei durch Elektromotoren steuerbaren Bewegungsfreiheitsgraden pro Bein müssen zur Fortbewegung

mindestens 18 Motoren koordiniert werden, was mit Hilfe der Übertragung der von der Stabheuschrecke abgeleiteten dezentralen Regelungsmechanismen jedoch möglich ist. Am häufigsten wird die statisch stabile Dreifußgangart (tripod) verwendet, bei der jeweils die beiden äußeren Beine der einen und das innere Bein der anderen Seite gemeinsam geschwungen bzw. aufgesetzt werden. Kollisionen werden durch Anstoßen der Beine an Hindernisse erkannt (trotz hohen Motorstroms keine Änderung der Gelenkwinkel), so dass die Anforderungen an externe Sensorsysteme wie Kamera oder Ultraschall zur Realisierung eines autonomen, sechsbeinigen Laufroboters gering sind. Die bisher erreichten Laufgeschwindigkeiten sind jedoch im Vergleich zur Natur niedrig.

Doch es gibt Alternativen zur Realisierung schneller und robuster sechsbeiniger Laufmaschinen bei sehr viel einfacherem Design von Mechanik und Steuerung: 1999 wurde an der Montrealer McGill Universität der Laufroboter RHex (Abb. 1, rechts) vorgestellt, dessen sechs Beine je nur einen, dafür beliebig rotierbaren Bewegungsfreiheitsgrad an der Hüfte besitzen [4]. Die Beine sind darüber hinaus elastisch, so dass während der Bodenkontakte bei schneller Beinrotation in Dreifußgangart Dämpfungseffekte beim Auftreffen und Federeffekte beim Abfedern auftreten. Die resultierenden Laufbewegungen haben sich selbst bei unwegsamstem Gelände als extrem robust erwiesen. Die erreichbare Höchstgeschwindigkeit von mehr als 5 km/h ist weltrekordverdächtig. Die nach ingenieurwissenschaftlichen Kriterien entworfene Laufmaschine hat nur einen entfernten Verwandten in der Natur mit ähnlichem Gewichtsverhältnis zwischen leichten Beinen und schwerem Körper, niedrigem Schwerpunkt und robuster, schneller Laufbewegung: die Kakerlake.

Die Übertragung der Erkenntnisse des statisch stabilen, sechsbeinigen auf das dynamisch stabile, vierbeinige Laufen ist beschränkt, denn eine stärkere Koordination der Beinbewegungen durch Zwangskopplung kinematischer (z.B. Abmessungen) und dynamischer (z.B. Kräfte) Größen sowie höhere Anforderungen an die externe Sensorik zur rechtzeitigen Hinderniserkennung und Anpassung des Bewegungsverhaltens noch vor dem ersten Hinderniskontakt sind weitere, notwendige Voraussetzungen.

3. Dynamik des Laufens bei Robotern

3.1. Modellierung und Simulation

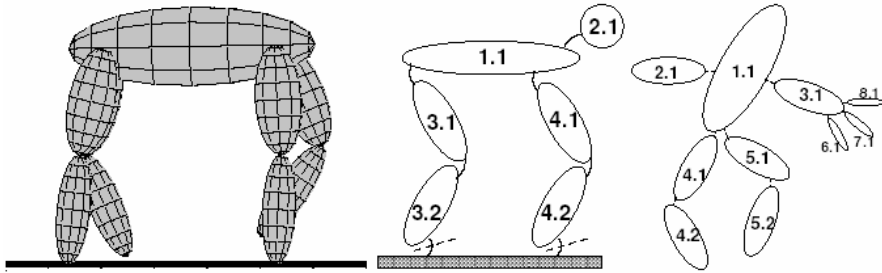


Abb. 2. Idealisierte kinematische Strukturen vier- und zweibeiniger Roboter

Die Mehrkörpersystemdynamik bildet die Grundlage der Modellierung der Dynamik des Laufens. Das kinematische Robotermodell beruht auf der Modellierung des Roboters als geometrische Verkettung elementarer Gelenkstrukturen (z.B. von Dreh- oder Schubgelenken) mittels starrer Roboterglieder (Abb. 2). Mit Hilfe des Vorwärtskinematikmodells wird die aus einer vorgegebenen Kombination von Hüft-, Knie- und Fußgelenkwinkeln resultierende Position und Orientierung des Fußes beschrieben. Das numerisch schwieriger zu lösende inverse Kinematikmodell liefert die für eine Position und Orientierung des Fußes notwendigen Gelenkwinkel. Zur Modellierung der Dynamik des Laufens müssen darüber hinaus die bei einer Bewegung auftretenden bzw. die dafür notwendigen Kräfte und Drehmomente berücksichtigt werden. Unter zusätzlicher Verwendung der Massen, Schwerpunktslagen und Trägheitstensoren aller Roboterglieder und -gelenke kann das Dynamikmodell z.B. auf der Grundlage von Impuls- und Drallsatz ermittelt werden. Mehrere, alternative mathematische Darstellungen des resultierenden Systems von Differentialgleichungen zweiter Ordnung sind möglich [21], z.B. als

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = u + J_c(q)^T f_c \quad (1)$$

Dabei bezeichnen q den zeitabhängigen Vektor der n Gelenkvariablen, \dot{q} den Vektor der Gelenkgeschwindigkeiten, u den Vektor der von den Gelenkantrieben aufgebrauchten Drehmomente oder Kräfte, $M(q)$ die Massenmatrix, $C(q, \dot{q})$ den Vektor der Coriolis- und Zentrifugalkräfte, $G(q)$ den Vektor der Gravitationskräfte und $J_c(q)^T f_c$ die Kontaktkräfte. Die Vorwärtsdynamiksimulation bezeichnet die numerische Integration

des Dynamikmodells für gegebene Anfangswerte $q(0)$, $\dot{q}(0)$ und gegebenen Momenten- bzw. Kraftsteuerungsverlauf $u(t)$, $0 < t < t_f$ zwischen Anfangs- ($t = 0$) und Endzeitpunkt ($t = t_f$). Besondere Schwierigkeiten liegen im Auftreten von kinematischen Schleifen mit wechselnder Struktur. Diese können je nach Modellierung zu gekoppelten Systemen von Differentialgleichungen und algebraischen Gleichungen führen, die besonderen numerischen Aufwand bedingen. Weitere Schwierigkeiten bestehen in der effizienten Formulierung von $M^{-1}(q)$ mit $O(n)$ arithmetischen Operationen und nicht zuletzt in der Modellierung unterschiedlicher Kontaktsituationen.

3.2. Steuerung

Ein erstes, grundlegendes Modell dynamischer Stabilität wurde von Raibert entwickelt [6]. Für einen einbeinigen Hüpfroboter (Abb. 3, links) wird das Steuerungsproblem in drei unabhängige, zeitabhängige Teilprobleme zerlegt: Hüpfhöhe, Vorwärtsgeschwindigkeit und Haltung, die jeweils durch eine Differentialgleichung modelliert werden. Die Synchronisierung der Steuerungen während eines in fünf unterschiedliche Bewegungszustände zerlegten Hüpfzyklusses erfolgt durch einen diskreten Zustandsautomaten. Dieses Prinzip ließ sich erfolgreich auf zwei- und vierbeinige Hüpfroboter übertragen (Abb. 3, rechts), wobei bei Vierbeinern Beinpaare als ein virtuelles Bein betrachtet werden. Auf diese Weise können zwar schnelle, dynamisch stabile Gangarten realisiert werden, für die Entwicklung vielseitig einsetzbarer, autonomer laufender Roboter sind diese Antriebe und Bewegungssteuerungen jedoch nur beschränkt verwendbar.

Übertragbar auf allgemeine, vier- und zweibeinige Laufmaschinen ist jedoch das Prinzip der Zerlegung eines Bewegungszyklusses – und damit des Problems der Modellierung bzw. Realisierung dynamischer Stabilität – in einzelne Phasen. Das Systemverhalten wird in jeder Phase durch ein System nichtlinearer Differentialgleichungen beschrieben. Mit Hilfe eines diskreten Zustandsautomaten und Übergangsbedingungen werden die Wechsel zwischen einzelnen Phasen beschrieben. Im Unterschied zu Hüpfrobotern ist jedoch die Komplexität der Dynamik in den einzelnen Phasen der Bewegung, die Komplexität des Zustandsautomaten und die zur Realisierung erforderliche, integrierte Betrachtung von Antrieben, Sensoren und Steuerungsentwurf erheblich aufwendiger. Darüber hinaus enthält die Entwicklung autonomer zwei- und vierbeiniger Roboter, die selbsttätig

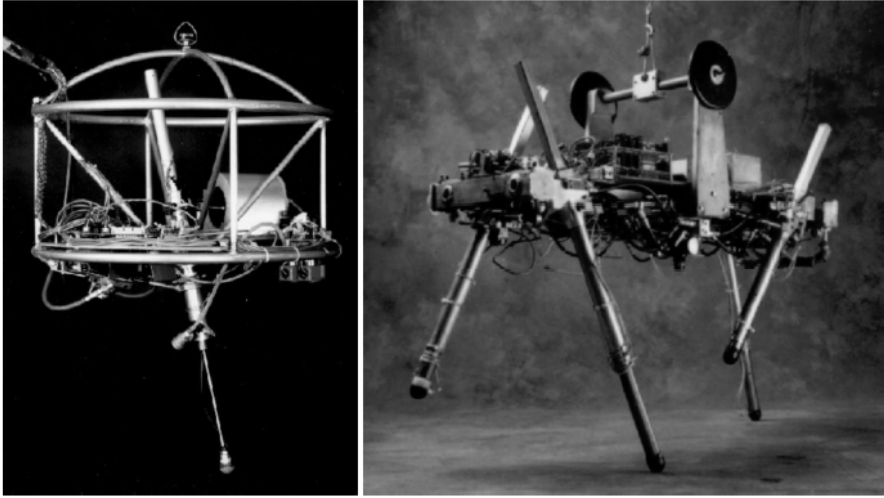


Abb. 3. Ein- und vierbeinige Hüpfroboter [6]

sich ändernde Erfordernisse der Umwelt erkennen und dynamisches Bewegungsverhalten selbsttätig und robust anpassen, noch viele, weltweit ungelöste Teilprobleme.

In einer Studie für ein aus neun Starrkörpern bestehendes, vollständig dynamisches Basismodell eines vierbeinigen Roboters wurde die Möglichkeit der Ausnutzung der Redundanz des Bewegungsapparates durch numerische Berechnung der Steuerungen für die acht Gelenkmotoren demonstriert, derart dass bei vorgegebener Gangart in der Vertikalebene ein Gütekriterium wie der Energieaufwand pro Schrittlänge p_1

$$J[u] = \left(\int_0^{t_f} \sum_{i=1}^8 u_i^2(t) dt \right) / p_1 \quad (2)$$

minimiert wird [7, 19, 21]. Zur numerischen Lösung von Optimalsteuerungsproblemen wie der Minimierung eines Gütekriteriums $J[u]$ unter den Nebenbedingungen der vollen Systemdynamik sowie weiteren Beschränkungen an die Gelenkvariablen oder Motormomente wurden in der letzten Dekade leistungsfähige neue Verfahren entwickelt [8]. Die solchermaßen berechneten Referenztrajektorien eignen sich für grundlegende Designstudien [9] sowie als Sollwerttrajektorien für eine Gelenkregelung zur Realisierung einer festen Laufbewegung bei geringen Unsicherheiten in System- und Umweltmodellen [18, 20] für zweibeinige Roboter.

Zur Modellierung und Implementierung dynamischer Stabilität zweibeiniger Roboter werden derzeit meist Heuristiken in Kombination mit dem

Konzept des Zero-Moment-Points [10] oder der Steuerung eines umgekehrten Pendels verwendet. Diese sind jedoch allesamt im Falle schnellen Gehens, Laufens und gar Rennens nicht anwendbar, so dass hier noch erheblicher Bedarf an Grundlagenforschung besteht.

4. Dynamik des Laufens bei Tier und Mensch

4.1. Modellierung und Simulation

Die bei Robotern verwendete Modellierung des Bewegungsapparates lässt sich zunächst auf die Modellierung des Skelettes übertragen. Die Antriebe der Natur sind jedoch Muskeln und Sehnen und keine Gelenkmotoren. Geeignete Modelle für die muskeldynamischen Beziehungen zwischen Kraft-Geschwindigkeit (z.B. nach Hill) und Kraft-Ausdehnung (z.B. nach Huxley) wurden in der Literatur bereits vorgestellt und erweitert [11]. Darüber hinaus müssen die Auswirkungen passiver Schwabbelmassen bei dynamischen Bewegungen berücksichtigt werden. Die Steuerung und Regelung der Muskeln selbst erfolgt durch das zentrale Nervensystem. Dessen Modellierung ist im Vergleich zur Modellierung von Skelettaufbau und Muskel-Sehnen-Gruppen bisher am wenigsten erforscht.

Der menschliche wie der tierische Bewegungsapparat sind hoch redundant. Durch ganz unterschiedlichen Einsatz der beteiligten Muskelgruppen können dieselben Bewegungsfreiheitsgrade realisiert werden (Abb. 4). Eine gängige Arbeitshypothese in der Biomechanik ist, dass bei regulären Muskelsteuerungen der Energie- oder Belastungsaufwand minimiert wird [11]. Eine spezielle Wahl dieses Gütekriteriums (die Minimierung der Aktivität der maximal aktiven Muskeln) ermöglicht eine besonders effiziente numerische Lösung, so dass die Simulation von Bewegungsabläufen auch für eine sehr hohe Anzahl von Muskeln schnell durchführbar ist [12]. Allerdings gilt dies nur bei Verwendung kinematischer Punktmassenmodelle, die zur Modellierung langsamer Bewegungen ausreichen, wobei die Trägheiten von Skelett und Schwabbelmassen ebensowenig wie muskeldynamische Eigenschaften und Beschränkungen betrachtet werden. Werden diese dagegen in einer Vorwärtsdynamiksimulation mitberücksichtigt, so sind bei Minimierung eines Gütekriteriums für die Muskelsteuerungen die resultierenden optimalen Steuerungsaufgaben noch sehr viel höher dimensional als bei laufenden Robotern, so dass der Rechenaufwand bei Verwendung von Standardverfahren zur Simulation und Optimierung auf einer Workstation z.B. für eine vertikale Sprungbewegung bei einem zweidimensionalen Beinmodell mit 9 Muskelgruppen im Bereich von Tagen [13]

und für ein dreidimensionales Gesamtkörpermodell mit 54 beteiligten Muskelgruppen im Bereich von Monaten [14] liegt. Daher wird die volle Modellierung und Simulation menschlicher Bewegungen als neue Methodik in Sport, Biomechanik und Medizin nur durch Verwendung möglichst effizienter Verfahren zur Modellierung und Simulation [5] sowie zur Optimierung [8] und durch Hochleistungsrechner ermöglicht werden können.

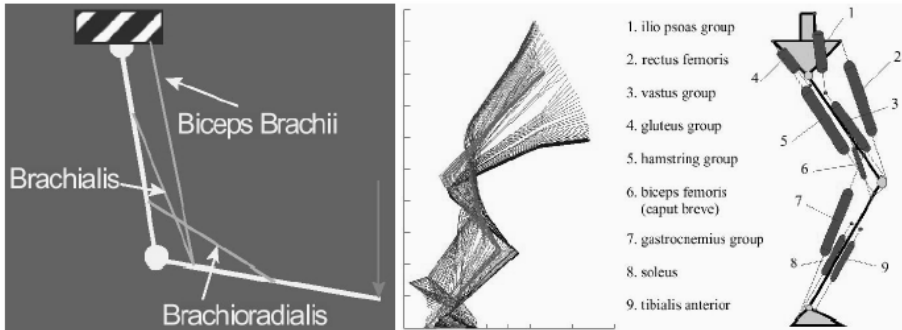


Abb. 4. Ausgewählte Muskelgruppen am Ellbogengelenk [12] (links) und am Ober- und Unterschenkel [13] (rechts).

4.2. Besonderheiten der Bewegungsapparate von Tier und Mensch

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal zu Robotern liegt im energieeffizienten Design natürlicher Beingliedmaße. Negative Arbeitsmodi der Beintriebe, bei denen zur Stabilisierung der Vorwärtsbewegung Bremskraft erzeugt werden muss, möchte man bei der Konstruktion von Laufmaschinen vermeiden, um stattdessen möglichst Energie zurückzugewinnen und Stöße zu dämpfen. In der Natur wird dies durch Speicherung elastischer Energie in einem Teil der Muskeln beim Einstauchen und durch Zurückgabe der Energie beim Abfüßen erreicht. Eine weitere Möglichkeit zur konstruktionsbedingten Vermeidung negativer Arbeitsmodi ist die Entkopplung von Antriebs- und Tragemechanismus. Beides lässt sich durch ein Pantographenbein realisieren wie es z.B. beim Pfeifhasen der Fall ist [15] (Abb. 5).

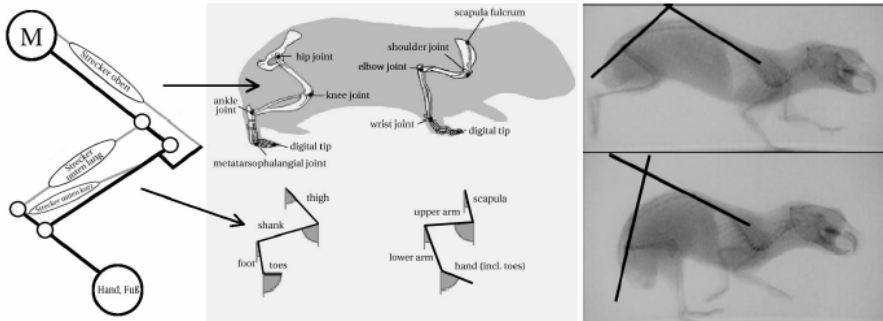


Abb. 5. Pantographenbeine des Pfeifhasen [15].

Bei vierbeinigen Tieren spielt darüber hinaus die Rolle der Biegeschwüngen der Wirbelsäule und deren Abstimmung mit der Anordnung der Beine und den Beinschwüngen eine Rolle, die bei vierbeinigen Robotern bisher noch wenig berücksichtigt wurde. Die zweibeinige Fortbewegung des Menschen ist durch die kontralateralen Pendelschwüngen von Armen und Beinen besonders gekennzeichnet, die zur wechselseitigen Kompensation der am Rumpf angreifenden Kräfte und Momente dienen. Bei der dabei auftretenden Torsion hat die Wirbelsäule in Verbindung mit den diagonal verlaufenden schrägen Muskelschichten der Brust- und Bauchwand die Wirkung einer Torsionsfeder mit elastischer Energiespeicherung [16].

Im Gegensatz zu den eher punktförmigen Bodenkontakten bei Vierbeinern ermöglicht die Unterstützungsfläche des menschlichen Fußes über die Kopplung mit den Muskelsystemen der großen Gelenke die Erzeugung von Drehmomenten und je nach Gangart ganz unterschiedliche Kontakt- und Abrollphasen.

5. Integration von Sensorik und Motorik

Zur Entwicklung eines schnell beweglichen, autonomen humanoiden Roboters muss man einen *circulus vitiosus* durchbrechen: je schneller die gewünschten Bewegungen, umso leistungsfähiger müssen die Gelenkantriebe sein, doch umso höheres Eigengewicht haben die Antriebe und umso höher ist das Gewicht der benötigten Energieversorgung und damit das Gesamtgewicht und schließlich umso langsamer die möglichen Bewegungen. D.h. ein guter Prototyp eines autonomen, laufenden Roboters muss hinsichtlich kinetischer Daten aller Komponenten, angestrebter dynamischer Laufbewegung, daraus resultierender Anforderung an Verfügbarkeit von Sensordaten und Taktraten von Regelkreisen, Energieversorgung etc. bei wider-

strebenden Anforderungen möglichst optimal ausgelegt werden. Modellierung und Simulation kann hierbei helfen. Ein erster Schritt ist der gemeinsam mit dem Fachgebiet Regelungssysteme der TU Berlin entworfene Prototyp [9] (Abb. 6).

Doch es sind nicht allein die motorischen Fähigkeiten, die die Dynamik des Laufens bestimmen, vielmehr spielt die Integration mehrerer, unterschiedlicher Sensorsysteme und deren wechselseitige Beeinflussung, z.B. bei visuell stimulierten Bewegungsreflexen (visual servoing), eine wichtige Rolle für das Verständnis menschlicher Bewegungen in Biomedizin und Sport und ebenso für die Entwicklung autonomer, humanoider Roboter in den Ingenieurwissenschaften. Auch hier ist der Stand der Forschung mehr durch offene als beantwortete Fragen gekennzeichnet.

Im Projekt der „Darmstadt Dribbling Dackels“ [17] (Abb. 7) schließlich geht es bei der Entwicklung und Implementierung von Algorithmen für ein Team autonomer, kooperierender, vierbeiniger Roboter in dynamischer Umgebung am Beispiel des Fußballspiels um alle diese Fragen.

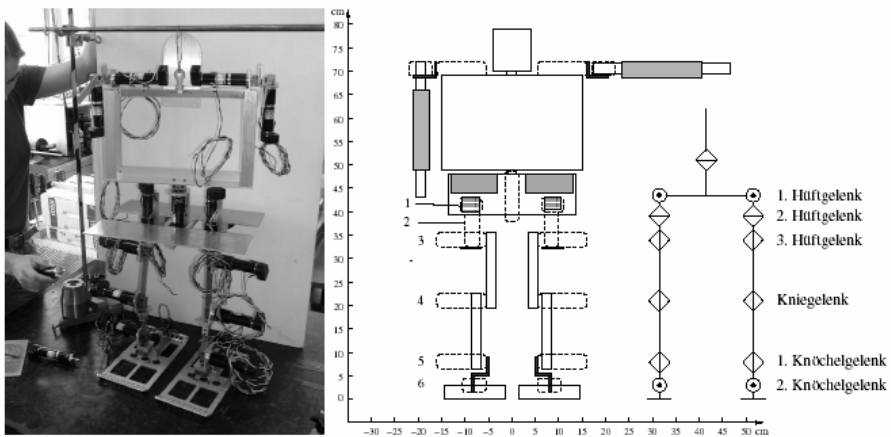


Abb. 6. Kinematische Struktur eines humanoiden Roboters (rechts) und Prototyp des Laufapparates (links) [9]

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Modellierung und Simulation der Dynamik des menschlichen Laufens kann die Grundlage für künftige Methoden und Erkenntnisse im Sport, in der Rehabilitation und in der Entwicklung intelligenter Beinprothesen bil-

den. Im Bereich der Robotik sind Modellierung und Simulation der Dynamik Voraussetzungen, um vielseitig einsetzbare, dynamisch stabil laufende vier- und zweibeinige Roboter zu entwickeln. Doch warum sollte man dies überhaupt tun? Aus ähnlichen Gründen wie beim Apollo-Flug zum Mond: Weil bei der Entwicklung eines so extrem komplexen wie neuartigen Systems eines dynamisch stabil laufenden, autonomen Roboters viele innovative neue Teillösungen in allen beteiligten Wissenschaftsgebieten notwendig sind, so dass ein kleiner Schritt für einen Roboter einen großen Schritt für die Wissenschaft bedeutet. Und weil die Untersuchung der sensomotorischen Fähigkeiten des zweibeinigen Laufens uns nicht zuletzt auch neue Einsichten über den Menschen selbst liefert. Joseph Engelberger, in den sechziger Jahren einer der „Väter“ der Industrierobotik, hat dies 1985 so ausgedrückt: „You end up with a tremendous respect for a human being, if you're a roboticist“.

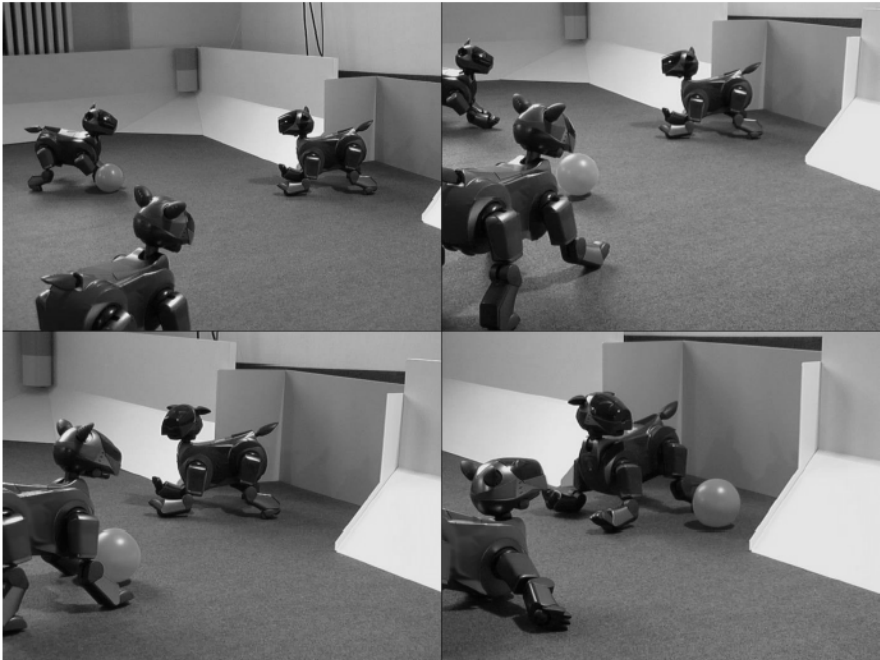


Abb. 7. Fußballspielende, autonome vierbeinige Roboter [17]

Literatur

- [1] Alexander R McN (1984) The gaits of bipedal and quadrupedal animals. *International Journal of Robotics Research* 3 (2): 49-59
- [2] Dean J, Kindermann T, Schmitz J, Schumm M, Cruse H (1999) Control of walking in the stick insect: from behavior and physiology to modeling. *Autonomous Robots* 7: 271-288
- [3] Pfeiffer F, Weidemann HJ, Eltze J (1994) The TUM walking machine. *Intelligent Automation and Soft Computing* 2, TSI Press, pp 167-174
- [4] Saranli U, Buehler M, Koditschek DE (2000) Design, modeling and preliminary control of a compliant hexapod robot. *Proc IEEE Int Conf Robotics and Automation*
- [5] Hardt M, Stryk O von (2003) The role of motion dynamics in the design, control and stability of bipedal and quadrupedal robots. In: Kaminka GA, Lima PU, Rojas R (Eds): *RoboCup 2002: Robot Soccer World Cup VI. Lecture Notes in Artificial Intelligence* 2752, Springer, Heidelberg, pp 206-223
- [6] Raibert M (1986) *Legged Robots That Balance*. MIT Press, Cambridge/Mass
- [7] Hardt M, Stryk O von (2000) Towards optimal hybrid control solutions for gait patterns of a quadruped. In: Armada M, González de Santos P (Eds): *Proc 3rd Int Conf Climbing and Walking Robots (CLAWAR)*, Oktober 2000, Madrid. Professional Engineering Publishing, Bury St. Edmunds, London, pp 385-392
- [8] Stryk O von (2004) User's Guide for DIRCOL. Simulation and Systems Optimization Group, Department of Computer Science, Technische Universität Darmstadt, World Wide Web: <http://www.sim.informatik.tu-darmstadt.de/sw/dircol/>
- [9] Hardt M, Wollherr D, Buss M, Stryk O von (2002) Actuator selection and hardware realization of a small and fast-moving autonomous humanoid robot. *Proc Int Conf Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Lausanne (CH), pp 2491-2496.
- [10] Vukobratovic M, Borovac B, Surla D, Stokic D (1990) *Biped Locomotion: Dynamics, Stability, Control and Application*. Springer, Berlin New York
- [11] Nigg BM, Herzog W (1999) (Hrsg) *Biomechanics of the Musculoskeletal System*. 2nd ed., Wiley, Chichester
- [12] Rasmussen J et al. (2002) The AnyBody Project. <http://anybody.auc.dk>
- [13] Spägle T (1998) Modellierung, Simulation und Optimierung menschlicher Bewegungen. Dissertation, Universität Stuttgart
- [14] Anderson FC, Pandy MG (1999) A dynamic optimization solution for vertical jumping in three dimensions. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 2: 201-231
- [15] Witte H, Fischer MS, Schilling N, Ilg W, Dillmann R, Eckert M, Wittenburg J (2000) Konstruktion vierbeiniger Laufmaschinen anhand biologischer Vorbilder. *Konstruktion* 9-2000: 46-50
- [16] Witte H, Biltzinger J, Schilling N, Preuschoft H, Fischer MS (2000) Was hat der Sportbiomechaniker von den Ergebnissen biomechanischer Analysen an Tieren? In: Nicol K, Peikenkamp K (Hrsg): *Apparative Biomechanik – Methodik und Anwendungen*. Schriften der Deutschen Vereinigung für Sportwissenschaft 115. Czwalina Verlag, Hamburg, pp 23-37
- [17] Darmstadt Dribbling Dackels. <http://robocup.informatik.tu-darmstadt.de>
- [18] Hardt M, Stryk O von, Wollherr D, Buss M (2003) Development and control of autonomous, biped locomotion using efficient modeling, simulation and optimization techniques. *Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, September 14-19, Taipei, pp 1356-1361

- [19] Stelzer M, Hardt M, Stryk O von (2003) Efficient dynamic modeling, numerical optimal control and experimental results for various gaits of a quadruped robot. Proc CLAWAR: International Conference on Climbing and Walking Robots, Catania, Italy, September 17-19, pp 601-608
- [20] Buss M, Hardt M, Kiener J, Sobotka J, Stelzer M, Stryk O von, Wollherr D (2003) Towards an Autonomous, Humanoid, and Dynamically Walking Robot: Modeling, Optimal Trajectory Planning, Hardware Architecture, and Experiments. In: Proc IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, Karlsruhe - München, September 30 - October 3, 2003. Laufbewegungen bei Roboter, Tier und Mensch 151
- [21] Hardt M, Stryk O von (2003) Dynamic modeling in the simulation, optimization, and control of bipedal and quadrupedal robots. ZAMM - Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 83 (10): 648-662

Publikationen und Animationen aus der Arbeitsgruppe der Autoren sind online verfügbar unter <http://www.sim.informatik.tu-darmstadt.de> .

Der vorliegende Beitrag beruht auf einer Überarbeitung des in „thema Forschung“, Bionik: Biologisch-technische Systeme, Heft 2/2002, Technische Universität Darmstadt (2002), S.56-63 erschienenen Artikels.

Bionik

Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur-
und Geisteswissenschaft

Rossmann, T.; Tropea, C. (Hrsg.)

2005, XIV, 599 S., Hardcover

ISBN: 978-3-540-21890-6