

Locomotion: Laufen als Fortbewegung

Jan Krieger

**Vortrag im Seminar
Humanoide Roboter - Hard- und Softwarekonzepte
WS 2005 / 06**

Dr. Katja Mombaur, Prof. H. G. Bock

Warum will man auf zwei Beinen laufende, humanoide Roboter?

- Heute werden viele mobile Roboter mit Rädern konstruiert. Dies hat einige Nachteile:
 - Unüberwindbare Hindernisse (Treppen)
 - Umgebung muss an Roboter angepasst werden, man möchte aber gerne Roboter, die an unsere Umgebung angepasst sind
- Außerdem kann versucht man das menschliche Laufen über den Bau von Robotern besser zu verstehen
- Das Laufen hat sich in der Natur als robuste und erfolgreiche Fortbewegungsvariante bewährt
- Beispiele für moderne Roboter auf Rädern:

Mars-Rover zur Exploration fremder Planeten



<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/database/MasterCatalog?sc=2003-027A>

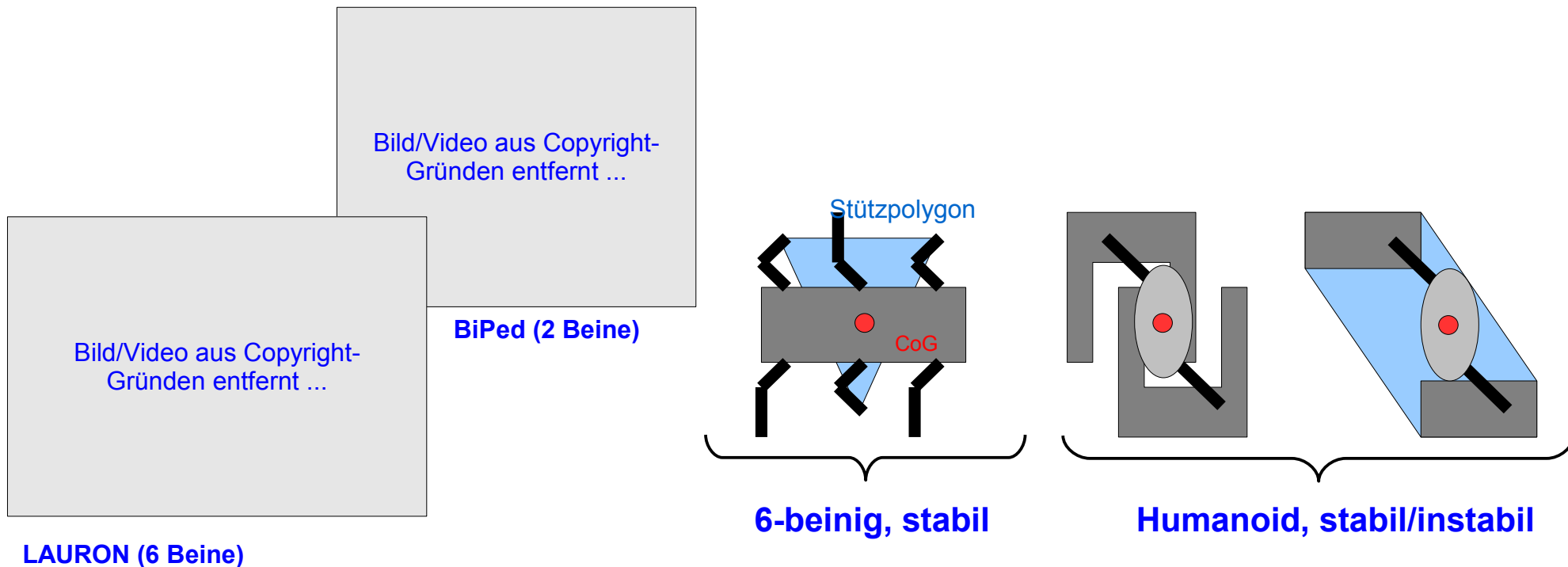
ferngesteuerter Roboter zur Bombenentschärfung



<http://www.rwii.com/sp.cfm?pageid=138>

Statisch stabiles Laufen

- **Eine einfache Definition:** Ein Roboter ist stabil, wenn er nicht umfällt.
- **Statische Stabilitätsbedingung:**
Massenschwerpunkt (CoG) ist immer über dem Stützpolygon
- Möglich für alle Beinanzahlen ≥ 2
- **Stützpolygon** = minimales Polygon, das alle Kontaktstellen des Roboters mit dem Boden enthält



Pseudo-Dynamisches Laufen I

- Das statische Stabilitätskriterium wird jetzt verletzt (z.B. beim humanoiden Laufen, wenn man sich nur auf ein Bein stützt) => statische Stabilität wird erweitert zum **dynamischen Stabilitätskriterium**:
Zero Moment Point (ZMP) muss über dem Stützpolygon liegen.
- Anschauliche Bedeutung: Beschleunigung/Bewegung des Roboters kompensiert die (natürliche) Kippbewegung des Roboters.
- In der Literatur werden zwei wichtige Größen definiert:

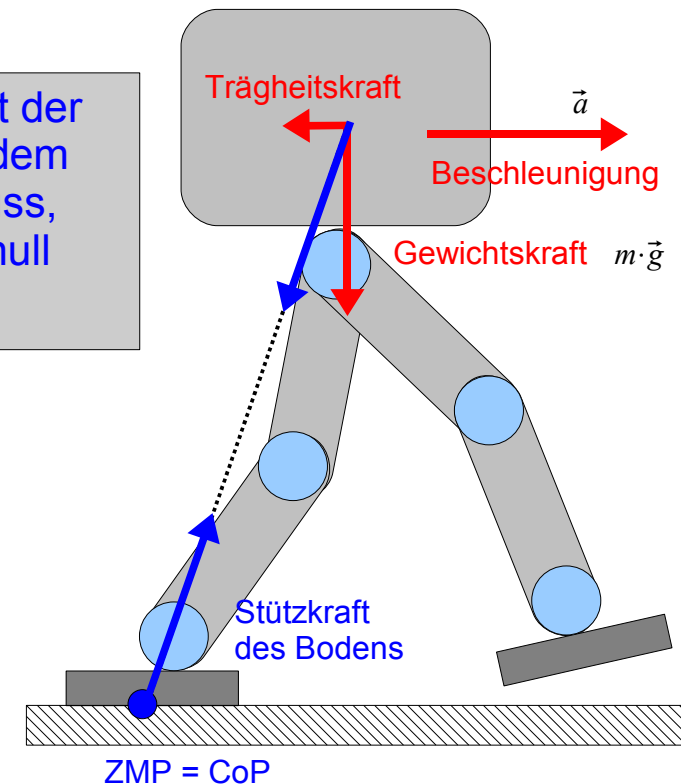
ZMP ist der Punkt auf dem Boden, an dem die Kippmomente null werden:

$$\vec{M} = \vec{Z} \times (m \vec{g} - m \vec{a}) \stackrel{!}{=} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ M_z \end{pmatrix}$$

\vec{Z} ist Vektor vom Schwerpunkt zum ZMP.

Center of Pressure (CoP) ist der Punkt auf dem Boden, an dem die Stützkraft angreifen muss, sodass die Kippmomente null werden

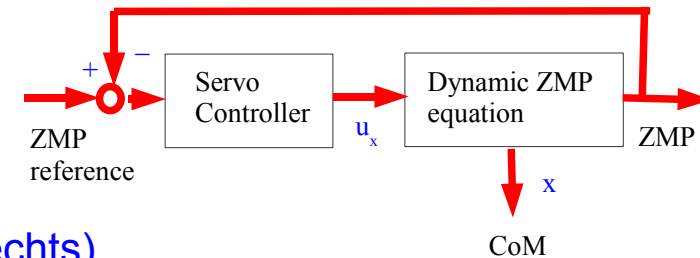
- Im CoP greift also die Stützkraft des Bodens an. Liegt der ZMP innerhalb des Stützpolygons, so fällt er auch mit dem CoP zusammen und der Boden kann die Bewegung des Roboters ausgleichen (der Stand ist dynamisch stabil). Liegt der ZMP außerhalb des Stützpolygons, so kippt der Roboter um. Der Abstand des ZMP zum Stützpolygon ist ein Maß für die Stabilität/Instabilität des Zustands. (siehe Abbildung auf der nächsten Seite)



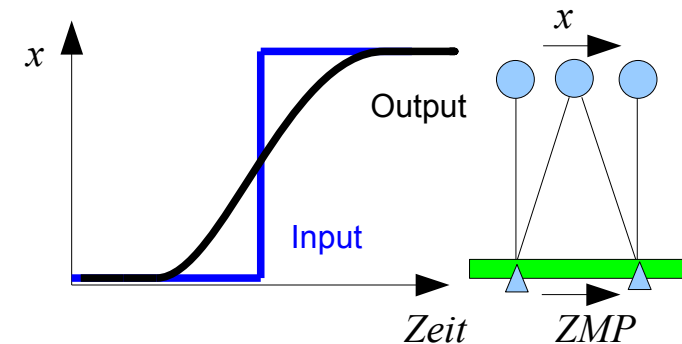
Pseudo-Dynamisches Laufen II

- Aufbau eines Laufmustergenerators:
 - 1) ZMPs vorgeben = Position der FüÙe vorgeben
 - 2) Schwerpunkttrajektorie $x(t)$ daraus berechnen
 - 3) Daraus schließlich die Bewegung der Aktoren des Roboters bestimmen
- Es kann eine einfache Regelschleife verwendet werden (siehe rechts).
- Dieses Konzept ermöglicht das Laufen mit beliebigen (vernünftig gewählten) Trajektorien auf dem Boden, z.B. auch Treppensteigen! Das Berechnen der Trajektorien benötigt aber viel Zeit.
- Vorteile einer ZMP-Regelung:
 - Genau definiertes Modell für Stabilität
 - Es kann gewährleistet werden, dass Roboter nicht umkippt
- Nachteile einer ZMP-Regelung:
 - Genauer Kenntnis der Dynamik des Roboters erforderlich, um ZMP-Gleichungen zu bestimmen
 - Zusätzliche on-line Stabilisierung ist notwendig
 - Modifikation einer berechneten Trajektorie kann sehr zeitintensiv sein
- Beispiele (Roboter): QRIO, ASIMO, Johnnie

Regelschleife zur Muster-Generierung:



Ergebnisse der Regelschleife:



Passiv-dynamisches Laufmaschinen

- Bisher wurden menschenähnliche Körper gebaut, denen ein menschenähnlicher Gang aufgeprägt wurde. Dies erfordert, dass die Aktoren des Roboters der natürlichen Bewegung des Gerätes (Umfallen etc.) entgegenwirken. Die erzielten Geschwindigkeiten bei Zweibeinern sind schon recht beachtlich (2-3 km/h), aber immernoch recht langsam.
- Daher wird ein neues Konzept untersucht: *Man baue den Körper so, dass er an die Bewegung angepasst ist bzw. diese von alleine ausführt.*
- Passiv-dynamische Laufmaschinen sind selbst-stabilisierend, benötigen also (fast) keine Intelligenz, um stabil zu sein.
- Die natürliche Bewegung des Systems wird ausgenutzt
- Die Energie für die Bewegung kommt aus der Bewegung ein schiefe Ebene hinab, oder aus kleinen, energiesparenden Aktoren. Die Energieeffizienz eines solchen Systems ist vergleichbar mit der eines Menschen (und um Größenordnungen besser als die klassischer Laufmaschinen).
- Passiv-Dynamische Roboter können aber bisher nur wenige, einfache Bewegungen ausführen (geradeaus laufen)

Bild/Video aus Copyright-Gründen entfernt ...

Cornell Biped

Literaturverzeichnis

Pseudo-Dynamisches Laufen, ZMP, CoP, ...:

- S. Kajita, F. Kanehiro et al. (2003): „**Biped Walking Pattern Generation by Using Preview Control of Zero-Moment Point**“ in Proc. 2003 IEEE Int. Conf. On Robotics & Automation, S. 1620-1626
http://staff.aist.go.jp/k.kaneko/publications/2003_publications/ICRA2003-1620.pdf
- Zu ZMP und humanoiden Robotern allgemein: http://www.igi.tugraz.at/lehre/RoboSem/SS05/Slides_Humanoide.pdf
- H. Asada: Vorlesung über „Humanoids and Biologically-Inspired Robots“
<http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Mechanical-Engineering/2-12Fall-2004/D00B5C7A-7A9D-44EF-A302-1E9560A6431D/0/final.pdf>
- P. Sardain, G. Bessonnet (2004): „**Forces Acting on a Biped Robot. Center of Pressure – Zero Moment Point**“: IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics A, Vol. 34, No. 5, S. 630-637

Passiv-Dynamische Laufroboter:

- S. Collins, A. Ruina, R. Tedrake, M. Wisse (2005): „**Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers**“, in: Science, Vol. 307, S. 1082-1085 (+ supporting online material)
- ZEIT-Artikel über passiv-dynamische Laufroboter: <http://www.zeit.de/2005/08/robotik?page=all>

Informationen zu den Beispiel-Robotern:

- SCORPION: <http://ag47.informatik.uni-bremen.de/ger/projekt.php?id=3&details=ja>
- LAURON II: <http://wwwred.fzi.de/ids/projekte.php?id=18>
- BiPed: <http://home.planet.nl/~j.havinga/BiPed/BiPed.htm>
- Johnnie: http://www.amm.mw.tu-muenchen.de/index_e.html
-