Technische Fakultät
Universität Bielefeld

Ausarbeitung zum Vortrag im Rahmen der Verstanstaltung
"Humanoide Roboter" des Wintersemesters 2004/2005 an der
Universität Bielefeld

ZERO-MOMENT POINT

Daniel Kleinehagenbrock (dkleineh@techfak)

3. Januar 2000

Inhaltsverzeichnis

1 Überblick

1.1 Kurzbeschreibung

In dieser Ausarbeitung wird das Zero-Moment Point (ZMP) Konzept vorstellt, welches dazu genutzt werden kann, einer Laufmaschine das zweifüssige Laufen zu erleichtern. Hierfür wird als erstes auf die Gegebenheiten des zweifüssigen Laufens, mit speziellen künstlichen Laufmaschinen, eingangen. Darauf folgend, werden Bedingungen modelliert, wie sie bei diesem Laufen auftreten und der ZMP wird eingeführt. Abschliessend wird noch gezeigt wie mit Hilfe des ZMP Konzeptes das Gleichgewicht beim Laufen gehalten werden kann.

1.2 Motivation

Bei dem Wunsch humanoide Roboter zu bauen, ist eine der grössten Aufgaben diese Roboter zweifüssig laufen zu lassen. Es gibt viele verschiedene Ansätze für diese künstliche zweifüssige Fortbewegung, von einfachen planaren Mechanismen bis hin zu den heutigen Sony und Honda Robotern, die ein aufrechtes, zweifüssiges Laufen beherrschen.
Künstliche zweifüssige Fortbewegung ist schon seit Jahrzehnten Forschungsgegenstand. So ist, zum Beispiel, das hier vorgestellte ZMP Konzept schon knapp über 35 Jahre alt. Eine der grundlegendsten Aufgaben beim zweifüssigem Laufen ist es, das Gleichgewicht zu halten. Mit dem ZMP Konzept kann dieses erreicht werden. Die Position des ZMPs zeigt an, ob der Roboter beim Laufen sein Gleichgewicht hält oder umfällt.

2 Zweifüssiges Laufen

2.1 Gemeinsamkeit von Laufmechanismen

Trotz der verschiedenen Ansätze und Architekturen, die es heute für zweifüssige Laufmaschinen gibt, existieren durchaus einige Gemeinsamkeiten bei diesen Laufmaschinen. So sollten alle Gelenke, einer zweifüssigen Laufmaschine, angetrieben und direkt ansteuerbar sein. Über diese Freiheitsgrade hinaus, haben alle Laufmaschinen die Möglichkeit über eine ihrer Fusskanten zu rotieren, welches dem Auftreten eines zusätzlichen passiven Freiheitsgrades entsprechen würde. Weiterhin sollten alle Laufmaschinen eine Symmetrie in ihrer Laufbewegungen besitzen. Dafür sollten die zwei beim Laufen auftretenden Kontaktphasen, die single-support Phase und die double-support Phase, regelmässig aufeinander folgen. Bei der single-support Phase hat eine Laufmaschine nur mit einem Fuss Kontakt zum Boden, während der zweite Fuss eine Schrittbewegung nach vorne macht. In der double-support Phase hat die Laufmaschine dann mit ihren beiden Füssen Kontakt zum Boden. Diese support Phase ist, im Gegensatz zu der single-support Phase, statisch stabil.
Über diese Gemeinsamkeiten hinaus ist der Bodenkontakt der Laufmaschine grundlegent für das Laufen. Nur durch diesen, nicht direkt ansteuerbaren, Bodenkontakt interagiert die Laufmaschine, bezüglich des Laufens, mit ihrer Umgebung.

2.2 Beispiel einer Zero-Moment Point-Realisierung

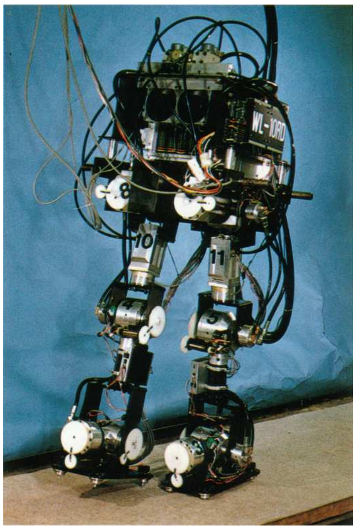

Abbildung 2.1: WL-10RD, 1984 [Waseda Universität]

Obwohl das ZMP Konzept schon sehr lange bekannt war, wurde erst 1984, 16 Jahre nachdem das Konzept erstmalig auftauchte, der erste Roboter konzipiert, der mit Hilfe dieses Konzeptes erfolgreich zweifüssig laufen konnte. Dieser Roboter war der WL-10RD der Waseda Universität.

3 Zero-Moment Point

3.1 Modellierung der Laufgegebenheiten

Um ein zweifüssiges Laufen zu ermöglichen, ist die Hauptaufgabe einer Laufmaschine, neben der Realisierung der relativen Bewegungen ihrer Gelenke zueinander, das halten einer dynamischen Balance (Gleichgewicht). Um dies zu erleichtern sollte ein vollflächiger, nicht nur an den Fusskanten aufliegender, Bodenkontakt besteht. Der Bodenkontakt wird dann nur durch die Reibung und den vertikalen Anteil der Bodenreaktionskraft realisiert.
Als Mass für diese dynamische Balance wird der ZMP zu Rate gezogen. In dem ZMP werden alle Kräfte, die in der Laufmaschine wirken, an diesem einem Punkt durch eine einzige Kraft ersetzt. Der ZMP kann dadurch als Gesamtindikator des Verhaltens der Laufmaschine gewertet werden.

3.1.1 Reduzierungsmodell

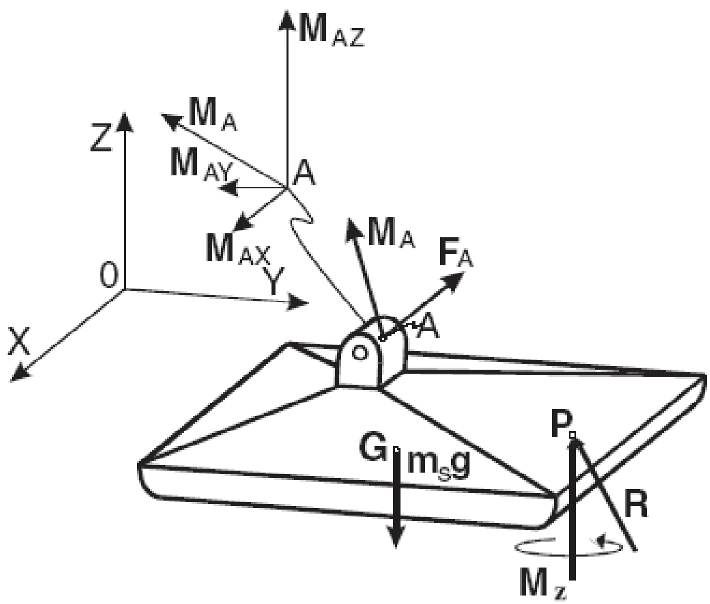

Abbildung 3.1: Reduzierungsmodell

Um die Modellierung zu vereinfachen, kann, wie in Abb. 3.1 gezeigt, die Laufmaschine oberhalb des Fusses vernachlässigt werden. Ihr Einfluss wird durch die Kraft F_A und das Moment M_A, welche im Punkt A wirken, ersetzt. Desweitern wird das Gewicht des Fusses mit dem Gewichtsschwerpunkt G representiert. Der Kontakt der Laufmaschine mit dem Boden, wird durch den Punkt P am Boden bzw. im Fuss representiert. Der Bodenkontakt besteht dann aus der Bodenreaktionskraft R und dem Moment M. Dabei muss gelten:

$$R + F_A + m_s g = 0 \tag{3.1}$$

In diesem Kontakt werden die horizontalen Anteile von der Kraft R (R_x und R_y) und der vertikale Anteil des Momentes M (M_z) durch die Reibung ausgeglichen. Dadurch representieren R_x und R_y die Reibungskräfte, die die horizontalen Anteile der Kraft F_A (F_{Ax} und F_{Ay}) ausgleichen. M_z representiert das das Moment der Reibungskräfte, welches den horizontalen Anteil des Momentes M_A (M_{Az}) und das Moment, das von der Kraft F_A ausgeübt wird, ausgleicht.

3.1.2 Dynamische Balance

Nur durch Ausgleichen der horizontalen Anteile des Momentes M_A kann das Gleichgewicht gehalten werden, da sonst die Momentanteile die Laufmaschine über die entsprechende Fusskante kippen lassen würden. M_{Ax} und M_{Ay} verschieben die Position des Angriffspunkt der Bodenreaktionskraft P so, dass sie auszugleichen werden. In Abb. 3.2 wird dieses für einen

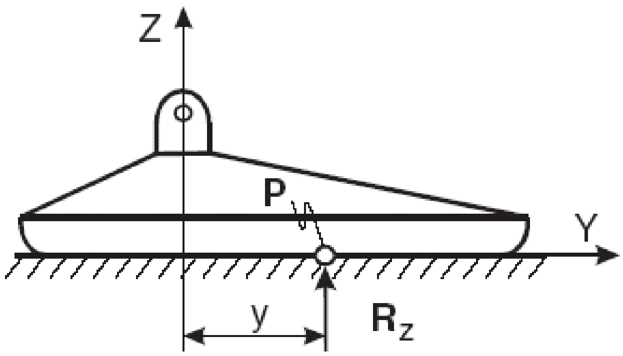

Abbildung 3.2: Dynamische Balance

einfachen planaren Fall gezeigt. P wird so verschoben, dass die Kraft R_z ein Moment ausübt, welches das Moment M_{Az} ausgleicht. Die horizontalen Anteile des Momentes M sind dabei null ($M_x = 0$ und $M_y = 0$), welches den Anstoss dazu gibt diesen Punkt Zero-Moment Point zu nennen. Sollte nun aber allerdings die neue gedachte Position des Punktes P ausserhalb des Fusses liegt, greift die Kraft R an der Fusskante und die dann noch nicht ausgeglichen Anteile in dem Moment M lassen die Laufmaschine über die entsprechende Kante kippen.

4 Gleichgewicht

4.1 Laufbedingungen

Um zweifüssiges Laufen, unter Hilfe des Zero-Moment Point Konzeptes zu ermöglichen, sollten einige Bedingungen erfüllt werden. Zunächst einmal sollte bei dem Laufen immer ein vollflächiger Fuss-Bodenkontakt zugegen sein. Innerhalb dieser Bewegungsphase sollten sich dann natürlich die Kräfte und Momente in der Laufmaschine gegenseitig kompensieren bzw. sollten die horizontalen Momentanteile noch nicht kompensiert sein, sollten diese mit Hilfe der Dynamik der Laufmaschine kompensiert werden. Dabei ist zu beachten, dass die gedachte Position des Zero-Moment Points innerhalb des Fusses liegt, damit die Laufmaschine nicht über eine ihrer Fusskanten kippt.
Wenn diese Bedingungen bei jedem Fussbodenkontakt eines zweifüssigem Laufes erfüllt sind, sollte das Gleichgewicht in diesem Lauf gehalten werden.

Literaturverzeichnis

[01] Zero-Moment Point - Thirty Five Years of its Life. ⟨Miomir Vukobratovic and Branislav Borovac⟩ (2004)

[Abb. 2.1] http://www.humanoid.rise.waseda.ac.jp/booklet/photo/WL-10RD-1984.jpg (22.2.2005)

[Abb. 3.1/Abb. 3.2] Zero-Moment Point - Thirty Five Years of its Life. ⟨Miomir Vukobratovic and Branislav Borovac⟩ (2004)