

文章编号: 1002-0446(2001)06-0504-05

## 基于 ZMP 的拟人机器人步态规划\*

杨东超 汪劲松 刘 莉 陈 悬

(清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084)

**摘 要:** 拟人机器人具有广阔的应用前景, 研制工作得到了各国的重视, 近年来已取得巨大的进展, 但仍存在大量的理论和技术问题有待深入研究, 基于零力矩点(ZMP)的轨迹规划是需解决的关键技术之一. 本文比较分析了一般的双足步行机与拟人机器人的步态规划特点和基于双足步行的两步规划方法, 提出了一种适用于拟人机器人步态规划的新方法——逆两步规划法, 仿真研究表明采用这种方法规划 ZMP 轨迹是可行的.

**关键词:** ZMP; 拟人机器人; 步态规划

**中图分类号:** TP24

**文献标识码:** B

## GAIT PLANNING OF HUMANOID ROBOT BASED ON ZMP

YANG Dong-chao WANG Jin-song LIU Li CHEN Ken

(Dept of Precision Instrument and Mechanism Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** There is a broad application prospect in the development of humanoid robot. Its research and manufacturing work have attracted international attention. Great achievements have been made in recent years. However, many problems on theory and technology appear and need to be further researched on. Gait planning of humanoid robot based on ZMP is one of the critical techniques. On the base of comparing and analyzing humanoid robot's different methods about gait planning, the article proposes a new way—inverse two-step method. The simulation and research indicate that it is feasible to adopt this method to plan ZMP's track.

**Keywords:** ZMP, humanoid robot, gait planning

### 1 引言(Introduction)

拟人机器人由于对环境的良好适应性, 人们期望的拟人性和广阔的应用前景, 针对拟人机器人的研究工作已越来越受到了各国的重视. 但拟人机器人与传统的轮式机器人相比, 最难解决的问题之一就在于步态的规划.

完整的步态规划包括两方面的内容: 姿态的规划和 ZMP(Zero Moment Point, 零力矩点)<sup>[1]</sup>轨迹的规划, 二者相互影响, 关系密切. 所谓姿态的规划, 是指机器人行走过程中其各组成部分运动轨迹的规划, 比如说, 脚掌何时离开地面、摆动相中整个脚掌在空中的轨迹、何时落地等. 姿态的规划相对比较简单, 常用的方法是先规划出髋关节与踝关节的轨迹, 然后计算出其它组成部分的轨迹.

根据力学原理可知, 当物体处于静止状态时, 其平衡的充要条件是其重心在地面上的投影, 落在其支撑面内, 而广义地讲, 当物体处于运动状态时, 其平衡的必要条件是所受重力与惯性力的合力的延长线通过其支撑面内(该合力的延长线与支撑面的交点称为 ZMP). 当物体处于静止状态时, 不受惯性力, 二者相统一, 故可将前者看作是后者的一个特例. 对拟人机器人来讲, 除了站立不动, 其它一切活动均应属于后者, 哪怕是速度非常缓慢的静态行走和挥手动作. 但是, 在步行过程中, 双足状态始终在摆动相和支撑相间交替转换, 步态规划仅满足平衡条件是不够的, 实际轨迹的规划需要精确地规划出 ZMP 的轨迹, 使形成的 ZMP 轨迹基本上落在支撑面的中间位置, 而且轨迹平滑、无尖点, 以获取足够大的步行运动稳定裕度, 保证摆动和支撑状态的平稳过渡, 防

\* 基金项目: 清华大学 985 项目资助.

收稿日期: 2001-02-20

止过渡期时运动轨迹、速度和加速度的突变和不连续,然而这一点也正是拟人机器人步态规划的难点所在。

到目前为止,有关拟人机器人 ZMP 轨迹规划的文章很少,该问题仍有待深入研究。为此,本文通过分析一般双足步行机和拟人机器人步行规划的特点以及基于双足步行机的两步规划法,提出了适用于拟人机器人 ZMP 轨迹规划的新方法——逆两步规划法,并通过仿真计算验证了该法的有效性。

## 2 双足步行机和两步规划法(Biped walking robot and two-step method)

从 ZMP 的计算公式(1)、(2)我们可以看到,由于机器人各组成部分的  $z$  向坐标及其 2 次导数同时出现在两个算式当中,从而造成了两式的耦合现象,给精确规划 ZMP 轨迹带来了很大的困难。

$$X_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i(\ddot{Z}_i + g_z)X_i - \sum_{i=0}^n m_i(\ddot{X}_i + g_x)Z_i}{\sum_{i=1}^n m_i(\ddot{Z}_i + g_z)} \quad (1)$$

$$Y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i(\ddot{Z}_i + g_z)Y_i - \sum_{i=0}^n m_i(\ddot{Y}_i + g_y)Z_i}{\sum_{i=1}^n m_i(\ddot{Z}_i + g_z)} \quad (2)$$

在研究中,应注意到双足步行机与拟人机器人

的不同结构特点,前者只有下肢,通过控制平衡块的运动来简化轨迹规划,以获取期望的 ZMP 轨迹,平衡块的有无给步态的规划带来了很大的不同。具有平衡块的双足步行机的步态规划可采用两步规划法<sup>[2]</sup>,第一步:规划下肢的行走姿态;第二步:根据已规划的下肢行走姿态及期望的 ZMP 轨迹来确定平衡块的运动规律。这样就能较精确地规划 ZMP 的轨迹。

图 1 为韩国 Inha 大学研制的双足步行机 IW R,身高 1.7 米,总重 130 公斤<sup>[3]</sup>。由图 1 可以看出,其无躯干和上肢,平衡块可沿  $X$ 、 $Y$  两个方向移动以及绕  $Z$  轴转动,从而可以通过调节平衡块在两个水平方向上的移动规律,控制机器人所受两个水平方向惯性力的大小和方向,进而得到期望的 ZMP 轨迹。

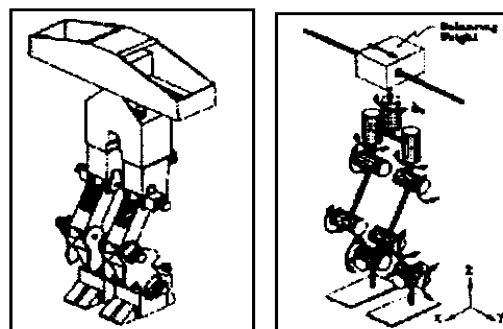


图 1 韩国 Inha 大学研制的双足步行机 IW R

Fig. 1 Visualization and link structure of IW R

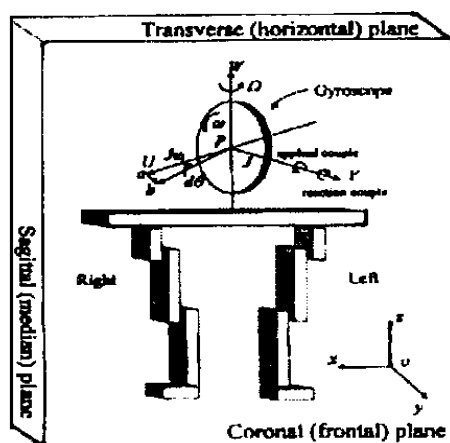


图 2 香港大学研制的双足步行机

Fig. 2 3D view of the biped

图 2 为香港大学研制的双足步行机示意图<sup>[4]</sup>,陀螺同时做两个方向的转动:一个是绕竖直轴  $PW$

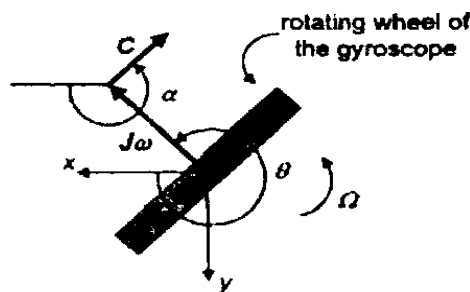


图 3 原理图

Fig. 3 Top view of the gyroscope

的旋转运动(牵连运动),一个是绕水平轴  $PU$  的旋转运动(相对运动)。设陀螺相对  $PU$  轴的转动惯量

为  $J$ , 陀螺绕  $PW$  轴和  $PU$  轴转动的瞬时角速度分别为  $\omega$  和  $\Omega$ , 则在  $dt$  的时间内, 陀螺相对其质心的动量矩变化量为  $J\omega d\theta$ , 其转矩为  $J\omega d\theta/dt$ , 记作  $C = J\omega\Omega$ , 根据右手螺旋法则可知其在水平面内, 并且始终垂直于  $PW$  轴和  $PU$  轴. 如把该转矩分解到两个水平方向, 则分转矩大小分别为  $C \cdot \sin(\alpha)$ 、 $C \cdot \cos(\alpha)$ , 如图 3 所示, 进而可以控制机器人 ZMP 的轨迹.

但对拟人机器人来说, 由于结构的要求, 难以使用平衡块来实现 ZMP 的规划, 把拟人机器人的躯干作为平衡块来辅助步态规划并不是很合适, 因为躯干的前摆运动(Pitch)和侧摆运动(Roll)均会导致  $z$  向坐标的改变. 显然, 双足步行机的两步步态规划法不适用于拟人机器人的步态规划.

### 3 逆两步规划法 (Inverse Two-Step Method)

对双足步行机来说, 其平衡块可以移动或者转动, 但有一点至关重要, 无论何种运动, 平衡块的重心高度不变. 拟人机器人没有平衡块, 其躯干最多能进行三个方向的转动, 没有移动关节. 除了绕  $Z$  轴的旋转运动不改变躯干的重心高度以外, 另外两个旋转运动都将改变躯干重心的高度. 如把躯干视作平衡块, 其绕  $X$  轴的旋转运动作为机器人  $Y$  向 ZMP 轨迹规划的辅助运动, 则躯干的  $Y$ 、 $Z$  两坐标均会发生变化, 但都可表示为转角的变量, 方程可以求解. 若又用其绕  $Y$  轴的旋转运动辅助规划  $X$  向 ZMP 的轨迹, 则躯干的  $X$ 、 $Z$  两坐标又将会发生变化, 虽也可表示为转角的变量, 解出方程, 但会影响已规划出的  $Y$  向 ZMP 轨迹, 因为躯干  $Z$  向的坐标又发生了变化, 可见任一方向的 ZMP 轨迹规划通过  $Z$  向坐标的变化都会影响到另一方向的 ZMP 轨迹. 所以即使把躯干视作平衡块, 也只能辅助规划某一方向的 ZMP 轨迹, 而不能像双足步行机那样较精确地同时规划两个方向的 ZMP 轨迹.

为此, 考虑将拟人机器人看作一个整体, 首先由期望的 ZMP 轨迹先规划出机器人重心运动参数, 然后根据重心轨迹再规划机器人的行走姿态. 由此式 (1)、(2) 可以整理如下:

$$X_{zmp} = \frac{(\ddot{Z} + g_z)X - (\ddot{X} + g_x)Z}{(\ddot{Z} + g_z)} \quad (3)$$

$$Y_{zmp} = \frac{(\ddot{Z} + g_z)Y - (\ddot{Y} + g_y)Z}{(\ddot{Z} + g_z)} \quad (4)$$

式中的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标均为拟人机器人重心坐标.

根据式 (3)、(4), 拟人机器人轨迹规划方法可以表述如下:

- 由期望的 ZMP 轨迹先规划出机器人重心的轨迹  $x(t)$ 、 $y(t)$  和  $z(t)$ ;
- 再根据重心轨迹规划机器人的行走姿态.

在使用 (3)、(4) 两式规划步态时, 可令机器人重心  $z$  向坐标为常数, 这样一方面可大大减小计算量, 另一方面从节省能量的角度讲, 重心高度保持恒定无疑有利于减小能耗. 将期望 ZMP 轨迹代入 (3)、(4) 两式, 便可求解出期望的机器人重心轨迹.

如前所述, 规划出了踝关节和髋关节轨迹之后, 如再规定躯干保持竖直, 整个机器人的姿态便确定了. 如果再规定两个髋关节的  $y$ 、 $z$  坐标时刻相等, 而机器人两个髋关节的  $x$  坐标时刻相差一个两腿中心距的距离, 机器人各关节轨迹均可表示为踝关节和髋关节坐标的函数, 踝关节坐标可由规划的摆动轨迹以及步长、脚长等参数确定, 至此未知量就只剩下机器人任一髋关节的三个坐标变量, 根据重心计算公式可建立如下一个三元一次方程组, 从而可求解出髋关节运动轨迹, 进而可解算出机器人的行走姿态.

$$\begin{cases} x(t) = X(x\_hip, y\_hip, z\_hip) \\ y(t) = Y(x\_hip, y\_hip, z\_hip) \\ z(t) = Z(x\_hip, y\_hip, z\_hip) \end{cases}$$

膝关节坐标可根据两点间距离公式求出, 亦可不求解膝关节坐标, 直接求出大小腿的总重心位置坐标, 如图 4 所示,  $ML$  表示大腿,  $NL$  表示小腿,  $H$ 、 $F$  分别表示大小腿的重心,  $P$  点表示总重心.

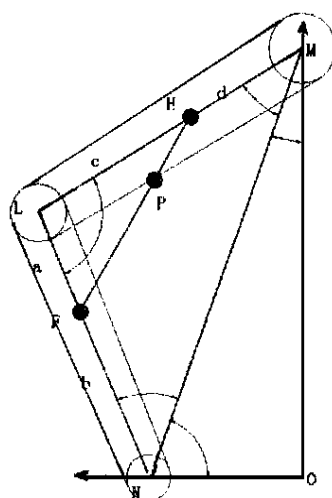


图 4 求解大小腿总重心位置坐标

Fig. 4 Front view of the leg

图中:

$$NO = y\_ankle - y\_hip;$$
$$MN = \sqrt{(x\_ankle - x\_hip)^2 + (y\_ankle - y\_hip)^2 + (z\_ankle - z\_hip)^2};$$
$$\angle ONM = \arccos(NO/MN);$$
$$\angle NLM = \arccos((L1^2 + L2^2 - MN^2)/(2 * L1 * L2));$$
$$LF: NF = a: b; (a: b \text{ 可测得});$$
$$LH: NH = c: d; (c: d \text{ 可测得});$$
$$L1: \text{小腿长度};$$
$$L2: \text{大腿长度};$$

但是不论用哪一种方法, 用髋关节坐标表示的机器人重心坐标表达式都比较繁琐, 即使利用 matlab5.3 的符号方程求解功能, 在配置了奔腾III 处

理器的微机上也无法得到精确解, 为此不得不简化算法, 本文暂时粗略地以踝关节与髋关节坐标的算数平均值作为膝关节的坐标值.

由于上述拟人机器人步态规划方法的顺序与双足步行机的两步规划法过程相反, 故称其为逆两步规划法.

4 仿真结果(Simulation)

本文采用 Matlab5.3 作为计算与仿真的工具, 微机硬件配置为 500MHz 的 CPU, 128M 的内存. 为简单起见, 本文仍采用 7 杆模型, 不考虑头和双臂, 由于它们的坐标仍是髋关节坐标的函数, 故不影响研究本问题的一般性和正确性. 计算程序的基本参数取值如表 1 所示.

表 1 基本参数表 (Table 1 Basic parameters)

大腿长度(m)	0.412	小腿长度(m)	0.365
躯干长度(m)	0.5	踝高(m)	0.11
大腿质量(kg)	18	小腿质量(kg)	5.4
躯干质量(kg)	58	脚质量(kg)	8.5
步长(m)	0.3	摆脚高度(m)	0.05
单腿支撑期(s)	4.5	双腿支撑期(s)	4.5
两腿中心距(m)	0.25	采样周期(s)	0.45
脚长(m)	0.28	脚宽(m)	0.212
前脚掌长(m)	0.18	后脚掌长(m)	0.1
重心高度(m)	0.71		

仿真结果如图 5~ 图 10 所示.

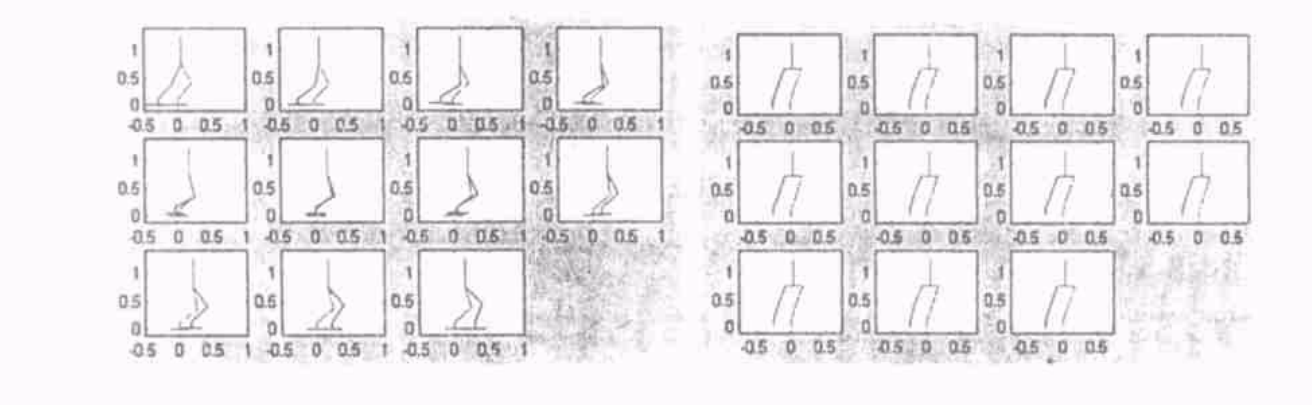


图 5 单腿支撑期 YZ 平面投影的行走棍形图

Fig. 5 The simulation in YZ plane during single support state

图 6 单腿支撑期 XZ 平面投影的行走棍形图

Fig. 6 The simulation in XZ plane during single support state

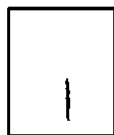


图 7 单腿支撑期时的 ZMP 轨迹图

Fig. 7 The track of ZMP during single support state

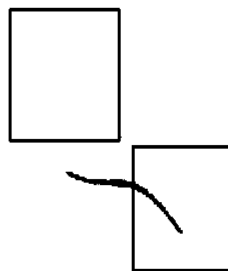


图 8 双腿支撑期时的 ZMP 轨迹图

Fig. 8 The track of ZMP during double support state

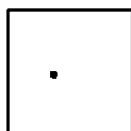


图 9 单腿支撑期时期望的 ZMP 轨迹图

Fig. 9 The anticipant track of ZMP during single support state

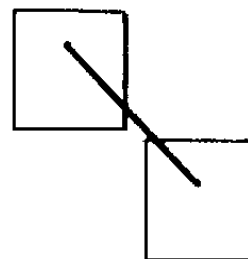


图 10 双腿支撑期时期望的 ZMP 轨迹图

Fig. 10 The anticipant track of ZMP during double support state

由图可见, 采用逆两步规划法规划拟人机器人的步态是可行的, 但 ZMP 轨迹距离期望轨迹还有不小的误差, 造成误差的主要原因是采用了近似值表示膝关节坐标.

## 5 结论(Conclusion)

综上所述, 双足步行机由于具有平衡块, 规划 ZMP 轨迹相对比较容易; 拟人机器人由于没有平衡块, 规划 ZMP 轨迹比较困难. 本文提出了逆两步规划法, 实验证明该法至少在理论上是可行的. 如果只需较精确地规划某一方向的 ZMP 轨迹, 可以把躯干当作平衡块来辅助规划, 但需要指出的是, 这种做法并不是很好, 一方面躯干的摆动需消耗能量; 另一方面, 如果躯干的摇摆角度过大也会影响步态的美观. 如果将平衡块放入拟人机器人的内部, 将不可避免

地增加拟人机器人的重量、尺寸和复杂程度, 但也不失为一种有利于拟人机器人步态规划的方法.

## 参考文献 (References)

- 1 伍科布拉托维奇 M. 步行机器人和动力型假肢. 马培荪, 沈乃勋译. 北京: 科学出版社, 1988
- 2 蒙运红, 傅祥志. 两足步行机器人动态步行规划及仿真. 华中理工大学学报, 1999, 27(3)
- 3 Sun-Ho Lim, Jin-Geol Kim. Adaptive Gait Algorithm for IWR Biped Robot. IEEE Catalogue No. 95TH 8025
- 4 Terence C F, Wong Y S Hung. Stabilization of Biped Dynamic Walking Using Gyroscopic Couple. IEEE 1996

## 作者简介:

杨东超 (1975-), 男, 博士研究生. 研究领域: 机器人步态规划与仿真、机器人结构设计与控制.