

# 双足机器人稳定行走步行模式的研究

韩亚丽 王兴松 罗 翔

(东南大学机械工程学院, 南京 211189)

**摘要:** 研究了一种基于零力矩点(ZMP)预观控制系统的双足机器人稳定行走步行模式生成方法. 通过对双足机器人行走过程中行走参数及 ZMP 轨迹进行规划, 计算出机器人行走过程中的质心轨迹. 由运动学模型求解出其行走过程中步行姿态, 预观控制器利用未来目标 ZMP 参考值和双足机器人状态计算控制输入, 对机器人进行稳定行走控制. 最后采用 ADAMS 和 Matlab/Simulink 联合仿真技术对离线步行模式进行仿真验证, 仿真结果表明双足机器人虚拟样机可实现稳定行走效果.

**关键词:** 双足机器人; 零力矩点; 步行模式; 预观控制; 联合仿真

**中图分类号:** TH112 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2009)02-0238-07

## Study of stabilization walking pattern for biped robot

Han Yali Wang Xingsong Luo Xiang

(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** A method of stabilization walking pattern generation based on zero moment point (ZMP) and preview control system is introduced. By planning the walking parameters (step length, step height, cycle time etc.) and ZMP trajectories, the CoM (center of mass) trajectory is derived by using a cart-table model, and a robot state is computed by inverse kinematics. The preview control system calculates the input by using the frame reference of ZMP and the robot state. Gait planning information based on walking pattern generation method is imported into ADAMS as control signals through ADAMS/Control module. Errors compensation based on control algorithm is implemented by Matlab/Simulink. In the ADAMS/Simulink united simulation environment, the virtual model can walk stably. The simulation results verify the validity of walking pattern generator.

**Key words:** biped robot; zero moment point; walking pattern; preview control; united simulation

双足机器人的研究历史已有近 40 年, 早在 1968 年, 美国通用公司试制了一台名为“Rig”的操纵型双足机器人, 揭开了双足机器人研究的序幕<sup>[1]</sup>. 目前双足机器人已取得了一些重要成果, 尤其是近几年来随着驱动器、传感器、计算机软硬件等相关技术的发展, 出现了大量的机器人样机, 不仅实现了平地步行、上下楼梯和上下斜坡等步态, 有的还能实现跑步、弹跳及跳舞等动作, 但是双足机器人距离实用化尚有距离, 主要原因就是步态综合问题还没有彻底解决<sup>[2]</sup>, 步态综合之所以困难是由于双足机器人是一个复杂的多刚体系统, 自由

度多, 动力学系统复杂, 其运动的稳定性很难保证.

如何进行双足机器人行走步态的设计以适应不同路况下动态稳定行走的需要已经成为双足机器人动态行走的关键. 双足步行机器人的步态规划方法主要有以下几种: ① 早期步行模式规划方法是利用记录人类行走的数据通过模拟人类行走过程中关节角度的变化, 来进行双足机器人稳定行走步态规划<sup>[3]</sup>; ② 将神经元振动网络用于双足步行机器人 3D 空间内关节轨迹生成, 并采用谐波平衡法和遗传算法来决定网络的连接权值进行机器人行走规划<sup>[4]</sup>; ③ 将 ZMP 稳定性原则应用到双足步

收稿日期: 2008-08-21. 作者简介: 韩亚丽(1978—), 女, 博士生; 王兴松(联系人), 男, 博士, 教授, 博士生导师, xswang@seu.edu.cn.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA04Z234)、国家自然科学基金资助项目(50775037).

引文格式: 韩亚丽, 王兴松, 罗翔. 双足机器人稳定行走步行模式的研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(2): 238-244.

行机器人步态轨迹和控制中,提出了带上体补偿的双足步行机器人的控制策略等<sup>[5]</sup>;④ 基于倒立摆模型的步行模式生成方法<sup>[6-7]</sup>;⑤ 近年来,神经网络、遗传算法及各种优化算法已广泛地被用于双足机器人步态轨迹设计,以期获得输入能量最小和峰值力矩等优化步态<sup>[8-9]</sup>. 这些步态规划方法,大都是在机构关节角度变量设计可行域内求解空间变量组合的问题,双足机器人的行走是一个动态过程,在行走过程中不仅要保证系统能够实现动态的协调运动,而且要保证系统的实时稳定性,故寻求一种合理优化的稳定行走步行模式一直是研究者们多年来致力研究的课题.

本文根据日本学者 Kajita 提出的基于预观控制的步行模式生成器理论<sup>[10]</sup>,对基于 ZMP 的步行模式离线生成方法及带有预观控制系统的步行模式在线生成方法进行了研究,并对离线方法生成的步行模式进行仿真验证. 通过对双足机器人行走过程中足部轨迹及零力矩点 (zero moment point, ZMP) 轨迹进行规划,得到机器人行走过程中的质心轨迹,由运动学模型得到其行走过程中步行姿态,预观控制器利用未来目标 ZMP 参考值和双足机器人的状态计算控制输入,进而对机器人进行行走控制,并在三维软件 Pro/E 中对双足机器人进行建模,导入动力学仿真软件 ADAMS 中,利用 Matlab/Simulink 建立虚拟样机的控制系统对双足机器人的离线步行模式进行稳定行走联合仿真验证,结果表明双足机器人可实现稳定的行走效果.

1 步行模式离线生成方法

1.1 方法介绍

通过给定的步行参数(步长、步高、步行周期等),规划出机器人行走过程中足部轨迹及 ZMP 轨迹,再通过 ZMP 方程式计算出质心轨迹,进而由逆运动学求解得出机器人的空间位姿,这种方法即为基于 ZMP 的步行模式生成方法.

ZMP 的概念最早由南斯拉夫的伍科布拉托维奇提出<sup>[11]</sup>,经过几十年的发展现在已经成为机器人稳定行走的重要判据,是机器人步态规划的重要工具. 本文通过桌子-小车模型来描述行走过程中 ZMP 的变化.

一辆质量为  $M$  的小车在一个质量可以忽略的桌子上行走,当小车走向边沿时整个系统会翻倒,但是当小车以某个适当的加速度运动时桌子可以维持瞬时平衡而不倒. 这个模型称为桌子-小车模型<sup>[12-14]</sup>. 如图 1 所示,双足步行机器人近似为不计质量的桌子及在其水平面上行走的小车. 小车的运

动状态决定地面对桌子的压力中心,即小车的运动改变 ZMP,此时 ZMP 表达式为

$$x_{zmp} = x - \frac{z}{g}\ddot{x}$$
(1)

$$y_{zmp} = y - \frac{z}{g}\ddot{y}$$
(2)

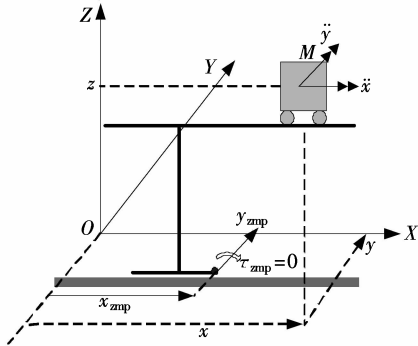


图 1 桌子-小车模型

1.2 足部轨迹规划

为了方便分析,在进行轨迹规划时做如下假设:①双足机器人在行走过程中前进方向为  $X$  轴正方向;②行走过程中左右脚关于  $Y$  轴对称;③行走过程中总质心在  $Z$  方向上的高度保持不变;④迈步过程中脚板与地面保持平行.

一个完整的步行周期包括左右脚 2 个单脚支撑期和 2 个双脚支撑期共 4 部分<sup>[15]</sup>. 通过临床医学检验可知,每个双脚支撑期大约占 16%,而一个单脚支撑期约占 34%. 设定仿真系统中双足机器人行走过程中的步行参数如表 1 所示,则双足在  $X$  方向的轨迹可由起步点与落脚点的空间位置、速度及加速度的坐标值组合成的一个 5 次多项式拟合求得,在  $Y$  方向的轨迹为 2 条直线,在  $Z$  方向的轨迹可由起步点、脚步抬起最高点、落脚点的空间位置、速度及加速度的坐标值生成的 6 次多项式拟合求得. 根据假设条件及步行参数,规划出的足部质心轨迹在 4 个步态周期内的轨迹曲线如图 2 所示.

表 1 步行参数

参数	数值
单脚支撑时间/s	0.2
双脚支撑时间/s	0.4
步行周期/s	1.2
步长/m	0.3
步高/m	0.07
两脚间的距离/m	0.24
质心高度/m	0.96
小腿长度/m	0.38
大腿长度/m	0.40

由于踝关节中心与足部质心的相对位置保持不变,故可由足部质心的轨迹,求解出踝关节的轨迹.

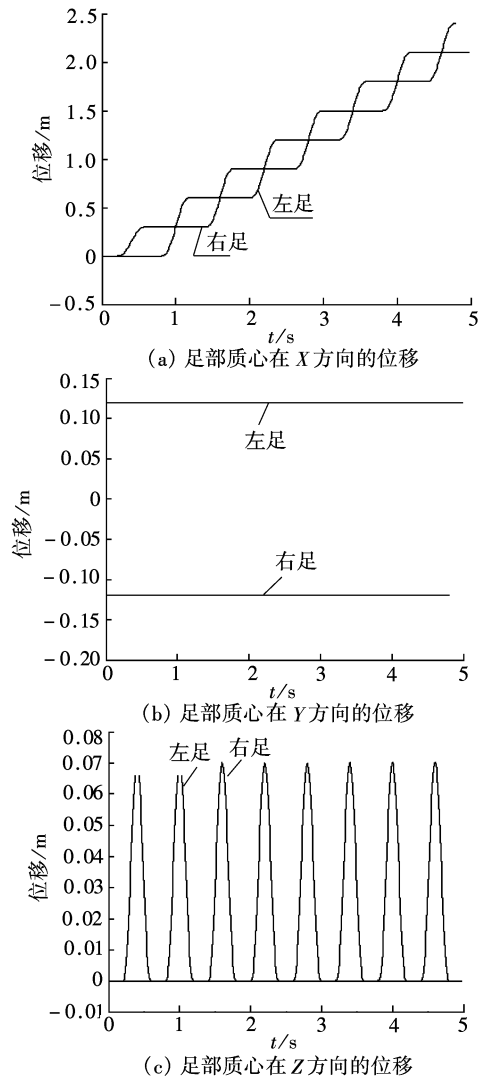


图 2 足部质心轨迹规划

1.3 ZMP 的轨迹规划

由足部的轨迹,可对行走过程中的 ZMP 进行简单的规划,假定在单脚支撑期,ZMP 落在单脚支撑范围内,在双脚支撑内,ZMP 沿直线运动切换到下一个支撑脚.

由双足机器人的步行参数可规划出双足机器人 X 方向与 Y 方向的 ZMP 轨迹如图 3 所示.

1.4 质心轨迹的求解

将 ZMP 方程(1)、(2) 用采样时间  $\Delta t$  离散化后,加速度  $\ddot{x}, \ddot{y}$  可近似为<sup>[17]</sup>

$$\ddot{x}_i = \frac{x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1}}{\Delta t^2} \tag{3}$$

$$\ddot{y}_i = \frac{y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}}{\Delta t^2} \tag{4}$$

式中,  $x_i = x(i\Delta t), y_i = y(i\Delta t)$ . 离散化后的 ZMP 方程为

$$x_{zmp} = a_i x_{i-1} + b_i x_i + a_i x_{i+1} \tag{5}$$

$$y_{zmp} = a_i y_{i-1} + b_i y_i + a_i y_{i+1} \tag{6}$$

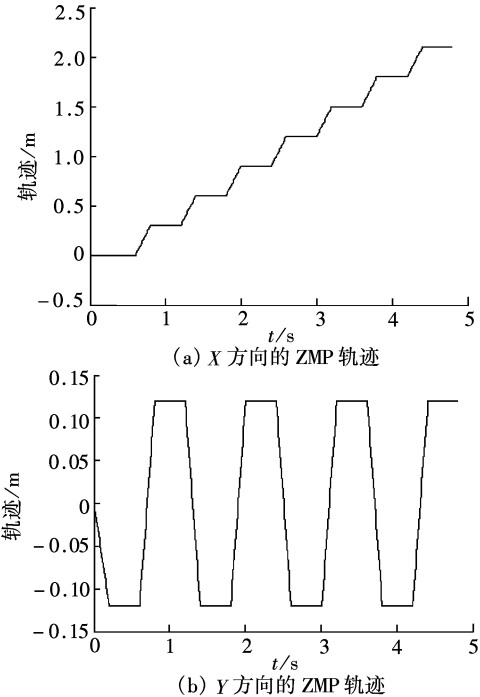


图 3 ZMP 轨迹规划

式中,  $a_i \equiv -z/g\Delta t^2, b_i \equiv 2z/(g\Delta t^2) + 1, g = 9.8 \text{ m/s}^2, \Delta t = 1 \text{ ms}$ .

将对应于时间段  $1, 2, \dots, N$  的式(5) 并在一起,式(6) 并在一起,写成矩阵的形式,则有

$$\begin{bmatrix} (x_{zmp})'_1 \\ (x_{zmp})'_2 \\ \vdots \\ (x_{zmp})'_{N-1} \\ (x_{zmp})'_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 + b_1 & c_1 & & & \\ & a_2 & b_2 & c_2 & \\ & & a_3 & \ddots & \ddots \\ & & & \ddots & b_{N-1} & c_{N-1} \\ & & & & a_N & b_N + c_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N-1} \\ x_N \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} (y_{zmp})'_1 \\ (y_{zmp})'_2 \\ \vdots \\ (y_{zmp})'_{N-1} \\ (y_{zmp})'_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 + b_1 & c_1 & & & \\ & a_2 & b_2 & c_2 & \\ & & a_3 & \ddots & \ddots \\ & & & \ddots & b_{N-1} & c_{N-1} \\ & & & & a_N & b_N + c_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{N-1} \\ y_N \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中,  $(x_{zmp})'_1, (x_{zmp})'_N$  根据初始速度  $v_1$  和终止速度  $v_N$  给定如下:

$$\begin{aligned} (x_{zmp})'_1 &= (x_{zmp})_1 + a_1 v_1 \Delta t \\ (x_{zmp})'_N &= (x_{zmp})_N - a_N v_N \Delta t \end{aligned}$$

式(7)、(8) 简写为

$$\begin{aligned} x_{zmp} &= A^* x \\ y_{zmp} &= A^* y \end{aligned}$$
$$A^* = \begin{bmatrix} a_1 + b_1 & c_1 & & & \\ & a_2 & b_2 & c_2 & \\ & & a_3 & \ddots & \ddots \\ & & & \ddots & b_{N-1} & c_{N-1} \\ & & & & a_N & b_N + c_N \end{bmatrix}$$

其解为

$$x = (A^*)^{-1}x_{zmp} \tag{9}$$

$$y = (A^*)^{-1}y_{zmp} \tag{10}$$

当双足机器人 X 及 Y 方向的 ZMP 轨迹已知时,可由式(9)、(10) 求出机器人质心的轨迹。

由图 3 规划出的 ZMP 轨迹,结合等式(9)、(10),可求出质心在 X 及 Y 方向的轨迹,如图 4 所示。

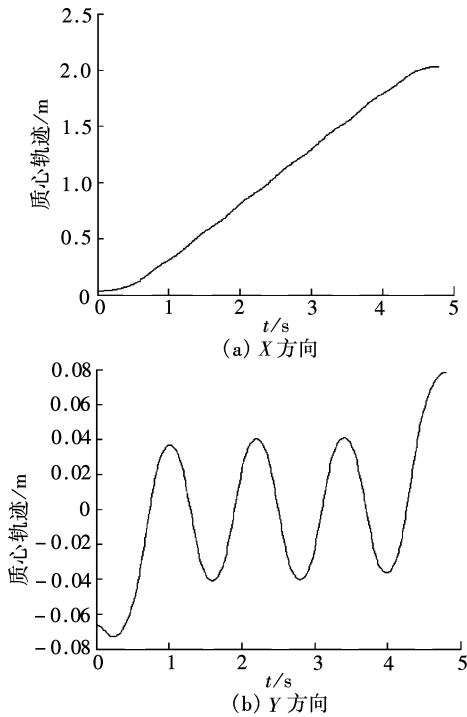


图 4 双足机器人质心轨迹

由于质心位置与机器人左右髋关节的相对位置保持不变,故可通过质心的轨迹求解出左右髋关节的轨迹。

1.5 双足机器人机构的逆运动学求解

为了简化模型分析,双足机器人每条腿上分别有 5 个自由度:髋关节处 2 个,分别为髋关节的外展 / 内收及屈 / 伸;膝关节 1 个,为膝关节屈 / 伸;踝关节处 2 个,分别为踝关节的外展 / 内收及屈 / 伸。机器人的关节结构图如图 5 所示。当机器人踝关节及髋关节的空间坐标给定时,可以通过几何的方法,求解出踝关节的屈 / 伸、外展 / 内收及膝关节屈 / 伸角度,如图 6 所示。

设髋关节和踝关节的坐标分别为  $(H_x, H_y, H_z)$  和  $(A_x, A_y, A_z)$ ,  $H_{zx}$  和  $H_{xy}$  是在 ZX 平面和 XY 平面的投影,  $\theta_1, \theta_2$  旋转轴分别为 X 和 Y 轴,即踝关节的外展 / 内收角度与屈 / 伸角度。  $\theta_3$  为膝关节的屈 / 伸角度。杆件 KA 和 HK 分别为小腿与大腿,其长度为  $l_1, l_2$ 。根据投影原理,可以得到

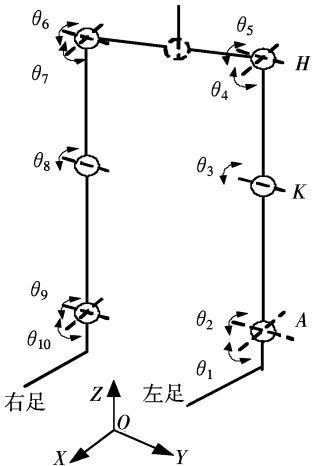


图 5 双足机器人运动学模型

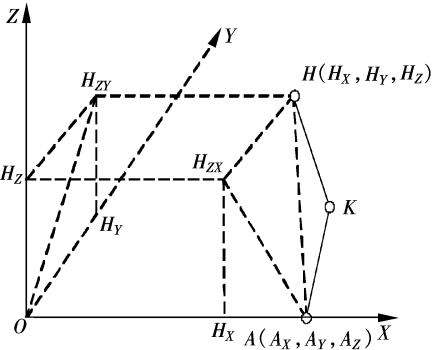


图 6 腿部机构示意图

$$\theta_1 = -\angle H_zOH_{zy} = -\tan^{-1} \frac{H_y - A_y}{H_z - A_z}$$

$$\theta_2 = \angle HAK = \tan^{-1} \frac{A_x - H_x}{H_z - A_z}$$

式中

$$\angle HAK = \cos^{-1} \frac{HA^2 + KA^2 - HK^2}{2HA \times AK}$$

$$\theta_3 = \angle HKA = \cos^{-1} \frac{HK^2 + KA^2 - HA^2}{2HK \times KA}$$

$$KA = l_1, HK = l_2$$

$$HA = \sqrt{(H_x - A_x)^2 + (H_y - A_y)^2 + (H_z - A_z)^2}$$

由上述假设,在行走过程中双足机器人脚板保持与地面平行可知,髋关节的外展 / 内收角度及屈 / 伸角度  $\theta_4$  与  $\theta_5$  为

$$\theta_4 = \theta_1$$

$$\theta_5 = 180^\circ - \theta_2 - \theta_3$$

同理可用此方法求出另一条腿的各关节角度。由已知的踝关节及髋关节的轨迹及机器人的空间位姿,通过 Matlab 编程可求出左右腿的各关节角度曲线,图 7 给出了下肢部分关节角度曲线图。

1.6 误差补偿

根据质心轨迹,利用逆运动学求解可生成双足机器人系统的步行模式,使用此步行模式对双足机

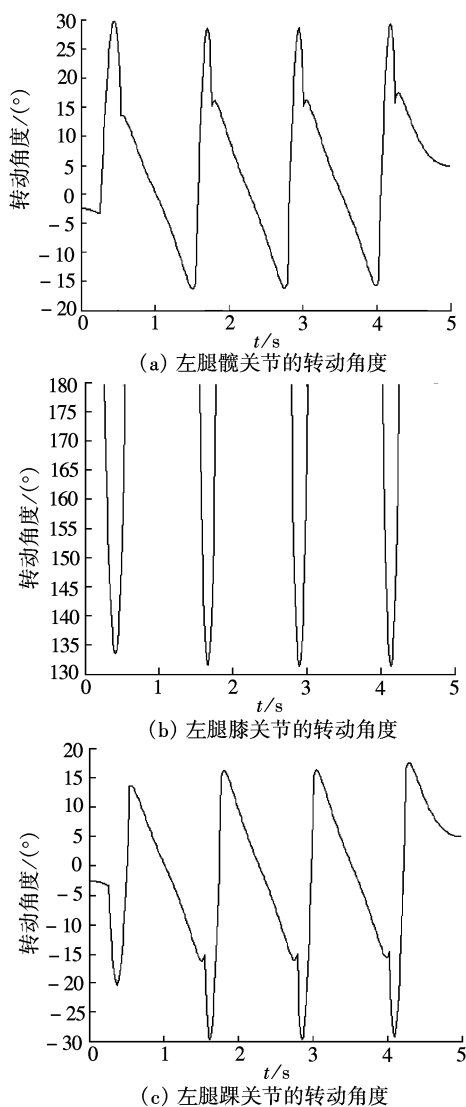


图 7 下肢部分关节角度曲线

机器人进行行走驱动,则可计算出双足机器人模型在行走过程中的实际 ZMP 轨迹为  $x_{zmp}^*, y_{zmp}^*$ .

ZMP 的误差  $x_{zmp} - x_{zmp}^*, y_{zmp} - y_{zmp}^*$  包含桌子-小车模型和双足机器人系统之间差异的信息. 为了补偿 ZMP 误差,可用式(11)、(12)计算质心的校正量,即

$$\Delta x = (A^*)^{-1}(x_{zmp} - x_{zmp}^*) \tag{11}$$

$$\Delta y = (A^*)^{-1}(y_{zmp} - y_{zmp}^*) \tag{12}$$

重新设置质心的轨迹为  $x := x + \Delta x, y := y + \Delta y$ .

重复同样的过程,直至误差达到要求,在本实验仿真系统中,所设置的误差满足  $\Delta p < 10^{-4}$  时迭代终止.

2 基于 ZMP 预观控制的步行模式在线生成方法

在行走过程中,整个步态周期中的信号需要实

时反馈来调节前进的步态,便于保证整个行走过程中的稳定性,故研究步行模式的在线生成方法,对改善双足机器人的动态性能,实现稳定的动态步行具有重要的意义. 本节介绍了一种使用预观控制理论实现 ZMP 跟踪控制的稳定行走步行模式生成方法<sup>[10]</sup>,由双足机器人传感器系统得到未来目标 ZMP 参考值储存于缓冲器中,其输出值作为当前的参考值,预观控制器用缓冲器中 ZMP 参考值和双足机器人的状态控制输入,从而保证机器人系统的行走稳定性.

2.1 ZMP 跟踪控制

将双足机器人作为一个动力学系统,可以建立一个通过反馈控制实现 ZMP 目标轨迹跟踪的伺服系统,如图 8 所示.

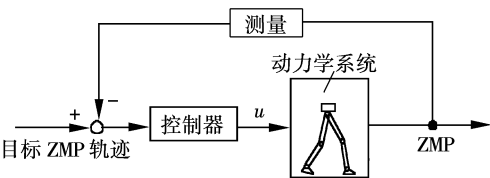


图 8 ZMP 目标轨迹跟踪控制器

使用现代控制理论处理动力学系统,定义双足机器人加速度对时间的微分为系统输入变量,即  $\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix}$ ,输出变量为 X 及 Y 方向的 ZMP 值. 则输入、输出系统的状态空间表达式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \\ x_{zmp} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{z_c}{g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v \\ y_{zmp} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{z_c}{g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \tag{14}$$

由式(7)、(8)可知,在 ZMP 变化之前质心必先开始运动,也就是在系统输入变化之前,双足机器人就必须运动;另外,在通常的伺服系统中,参考值变化后输出有一定的滞后,故在双足步行模式的生成中,仅用标准控制器并不能得到合适的步行模式,必须用将来的某种信息来影响当前的状况,所以引入预观控制系统.

2.2 预观控制系统

利用未来的信息进行控制的方法叫作预观控

制,基于此理论的控制器设计方法<sup>[13]</sup>如下:

首先利用采样时间  $\Delta t$  对连续系统方程(13)、(14)进行离散化

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{b}\mathbf{u}_k \\ \mathbf{x}_{zmp,k} &= \mathbf{c}\mathbf{x}_k \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{y}_{k+1} &= \mathbf{A}\mathbf{y}_k + \mathbf{b}\mathbf{v}_k \\ \mathbf{y}_{zmp,k} &= \mathbf{c}\mathbf{y}_k \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &\equiv \{x(k\Delta t), \dot{x}(k\Delta t), \ddot{x}(k\Delta t)\}^T \\ \mathbf{u}_k &\equiv u(k\Delta t), \mathbf{x}_{zmp,k} \equiv \mathbf{x}_{zmp}(k\Delta t) \\ \mathbf{y}_k &\equiv \{y(k\Delta t), \dot{y}(k\Delta t), \ddot{y}(k\Delta t)\}^T, \mathbf{v}_k \equiv v(k\Delta t) \\ \mathbf{y}_{zmp,k} &\equiv \mathbf{y}_{zmp}(k\Delta t), \mathbf{c} \equiv \left\{1, 0, -\frac{z_c}{g}\right\} \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^3}{6} \\ \frac{\Delta t^2}{2} \\ \Delta t \end{bmatrix} \end{aligned}$$

为了使系统的输出  $\mathbf{x}_{zmp,k}, \mathbf{y}_{zmp,k}$  尽可能精确地跟踪目标 ZMP,即  $\mathbf{x}'_{zmp,k}, \mathbf{y}'_{zmp,k}$ ,考虑一个使跟踪性能指标极小化的问题.以  $X$  方向运动为例,则有

$$J = \sum_{j=1}^{\infty} \{Q_1(\mathbf{x}'_{zmp,j} - \mathbf{x}_{zmp,j})^2 + Q_2 u_j^2\} \quad (17)$$

式中,  $Q_1, Q_2$  为正的加权系数,根据预观控制理论,这一性能指标可通过使用未来  $N$  步目标参考值的输入进行极小化,即

$$\mathbf{u}_k = -\mathbf{K}\mathbf{x}_k + [f_1 \quad f_2 \quad \cdots \quad f_N] \begin{bmatrix} \mathbf{x}'_{zmp,k+1} \\ \mathbf{x}'_{zmp,k+2} \\ \vdots \\ \mathbf{x}'_{zmp,k+N} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{K} &\equiv (\mathbf{Q}_2 + \mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{b})^{-1} \mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \\ f_i &\equiv (\mathbf{Q}_2 + \mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{b})^{-1} \mathbf{b}^T (\mathbf{A} - \mathbf{b} \mathbf{K})^{T(i-1)} \mathbf{c}^T \mathbf{Q}_1 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中,矩阵  $\mathbf{P}$  为下列方程的解:

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{c}^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{c} - \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{b} (\mathbf{Q}_2 + \mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{b})^{-1} \mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \quad (20)$$

同理可以解决  $Y$  方向的跟踪性能指标极小化问题.由式(18)可知,预观控制器由一个状态反馈和一个未来  $N$  步目标参考值和加权因子之内积的前馈组成.

基于预观控制的步行模式生成方法用方框图描述为如图 9 所示.由双足机器人传感器系统得到未来目标 ZMP 参考值储存在缓冲器中,其输出值

作为当前的参考值.预观控制器用缓冲器中 ZMP 参考值和双足机器人的状态控制输入,而双足机器人的状态,如  $X$  及  $Y$  方向的位移及速度则是由基于 ZMP 步行模式生成的结果,即满足目标 ZMP 的质心运动.基于预观控制系统的步行模式生成方法得到的双足机器人步行模式可使机器人实现实时稳定行走的目的.

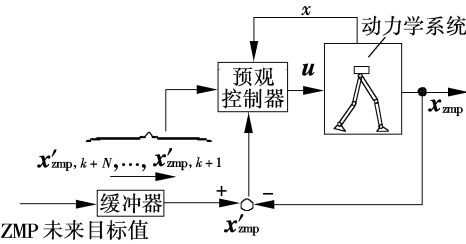


图 9 基于预观控制的步行模式生成系统

3 双足机器人行走过程仿真

为了验证理论分析的正确性,对生成的步行模式进行了仿真验证.首先在 Pro/E 下对简化的双足机器人进行建模,然后导入动力学仿真软件 ADAMS 中,在 Matlab/Simulink 中建立关节运动控制,可对其进行联合仿真,仿真流程图如图 10 所示.

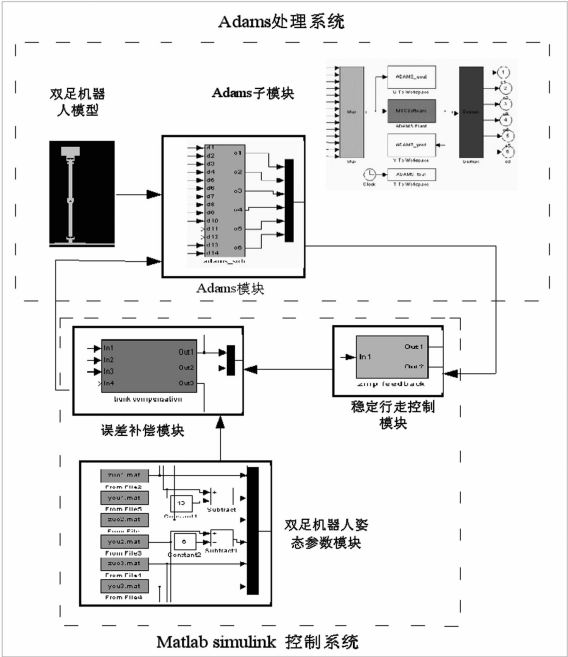


图 10 仿真流程图

由前文基于 ZMP 步行模式生成方法得到的步行模式信息(见图 7)作为控制信息,结合误差补偿,双足机器人可实现稳定行走,行走过程系列图如图 11 所示.

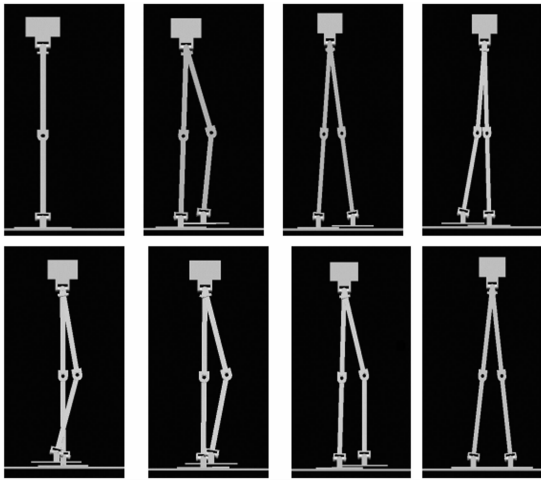


图 11 步态周期内双足机器人的行走系列图

## 4 结语

研究了双足机器人基于 ZMP 的步行模式离线生成方法及带有预观控制系统的步行模式在线生成方法,通过给定的步行参数(步长、步高、步行周期等),规划出机器人行走过程中足部轨迹及 ZMP 轨迹,根据 ZMP 方程式计算出质心轨迹,由逆运动学求解得出机器人行走过程中的空间位姿.在实际行走控制中,结合预观控制系统,双足机器人可达到稳定行走的效果.最后通过联合仿真对步行模式进行了仿真验证,结果表明,双足机器人虚拟样机模型能实现较为稳定的行走.本研究为双足机器人样机的稳定行走步态规划的实施提供了理论依据.

## 参考文献 (References)

- [1] 阮晓钢, 仇忠臣, 关佳亮. 双足机器人发展现状及展望[J]. 机械工程师, 2007(2): 17-19.  
Ruan Xiaogang, Qiu Zhongchen, Guan Jialiang. Development status and prospects of biped robot [J]. *Mechanical Engineering*, 2007(2): 17-19. (in Chinese)
- [2] 马培荪, 曹曦, 赵群飞. 两足机器人步态综合研究进展[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(4): 407-414.  
Ma Peisun, Cao Xi, Zhao Qunfei. Review of studies on biped robot gait [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2006, 41(4): 407-414. (in Chinese)
- [3] Miura H, Shimo Yama I. Dynamic walking of a biped [J]. *International J of Robotics Research*, 1984, 3(2): 60-74.
- [4] Cao M, Kawamura A. A design method of oscillatory networks for generation of humanoid biped walking patterns [C]//*Proc of IEEE Int Conf of Robotics and Automation*. Leuven, Belgium, 1998: 2357-2362.

- [5] Chevallereau C, Djoudi D, Grizzle J W. Stable bipedal walking with foot rotation through direct regulation of the zero moment point [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(2): 390-401.
- [6] Sugihara T, Nakamura Y, Inoue H. Realtime humanoid motion generation through ZMP manipulation based on inverted pendulum control [C]//*Proc of the 2002 ICRA*. Washington, DC, 2002: 1404-1409.
- [7] Noh Kyung-Kon, Kim Jin-Geol, Huh Uk-Youl. Stability experimental of a biped walking robot with inverted pendulum [C]//*The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Bustan, Korea, 2004: 2475-2479.
- [8] Er Meng Joo, Zhou Yi, Chien Chiang-Ju. Gait synthesis self-generation by dynamic fuzzy Q-learning control of humanoid robots [C]//*2006 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. Taipei, China, 2006: 4231-4236.
- [9] Kim Taegyu, Kim Jong-Wook. Planning walking pattern of a biped robot with uDEAS optimization [C]//*International Conference on Control, Automation and Systems 2007, COEX*. Seoul, Korea, 2007: 2693-2699.
- [10] Kajita Shuuji, Kanehiro Fumio, Kaneko Kenji, et al. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point [C]//*Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Taipei, China, 2003: 1620-1626.
- [11] 伍科布拉托维奇 M, 马培荪, 沈乃颢. 步行机器人和动力型假肢[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [12] Ramzi Sellaouti, Olivier Stasse, Shuuji Kazuhito Yokoi. Faster and smoother walking of humanoid HRP-2 with passive Toe joints [C]//*Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*. Beijing, China, 2006: 4909-4914.
- [13] 梶田秀司(日). 仿人机器人[M]. 管贻生, 译. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [14] Kajita Shuuji, Morisawa Mitsuharu, Harada Kensuke, et al. Biped walking pattern generator allowing auxiliary ZMP control [C]//*Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*. Beijing, China, 2006: 2993-2999.
- [15] 钱竞光, 宋雅伟, 叶强, 等. 步行动作的生物力学原理及其步态分析[J]. 南京体育学院学报: 自然科学版, 2006, 5(4): 2-8.  
Qian Jingguang, Song Yawei, Ye Qiang, et al. The biomechanics principle of walking and analysis on gaits [J]. *Journal of Nanjing Institute of Physical Education; Natural Science*, 2006, 5(4): 2-8. (in Chinese)