

文章编号: 1006-2467(2007)08-1263-04

# 基于压应力中心的仿人机器人离散轨迹运动控制

余蕾斌, 曹其新, 孙毅军  
(上海交通大学 机器人研究所, 上海 200240)

**摘要:** 针对仿人机器人运动姿态和行为的离散轨迹规划中所存在的机器人稳定性问题, 提出了基于压应力中心反馈的控制方法. 该方法以 17 自由度的仿人机器人 Mech G 作为样机, 根据动态平衡状态下机器人的压应力中心(Center of Pressure, COP)和零力矩点(Zero Moment Point, ZMP)重合的特性, 通过检测 COP 反馈信息实时调整仿人机器人的各关节运动速度, 以此规避机器人的不稳定轨迹点. 通过机器人 Mech G 的实验, 验证了所提出的控制方法是可行的.

**关键词:** 仿人机器人; 离散轨迹规划; 压应力中心; 规避

**中图分类号:** TP 24      **文献标识码:** A

## Discrete Trajectory Controlling of Humanoid Robot Based on Center of Pressure

YU Lei-bin, CAO Qi-xin, SUN Yi-jun

(Research Inst. of Robotics, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200240, China)

**Abstract:** This paper analyzed about the stabilization of humanoid robot in discrete trajectory planning. Taking 17 freedom humanoid robot as a model, and according to the particularity of COP(center of pressure) overlapping with ZMP(zero moment point) in the dynamical balance state, the running speed of robot joints can be adjusted according to the feedback of COP, and the robot can evade the unstable trajectory with this approach. The control method was analyzed and the experiment on Mech G was done which demonstrates it is feasible.

**Key words:** humanoid robot; discrete trajectory planning; center of pressure; evade

小型仿人机器人由于控制结构简单、扩展性好, 在仿人机器人研究领域得到了广泛的重视和应用. 日本的仿人机器人比赛和国内的 RoboCup 机器人大赛正在日益发展, 一系列以小型仿人机器人为载体的教学平台, 如 KONDO 等, 正逐渐得到推广.

由于小型仿人机器人控制结构简单、可容纳的轨迹数据有限, 其轨迹规划一般采用离散的轨迹状态按照时间序列依次排列的方式组合, 即把机器人所要完成的一组连续动作, 按照一定的时间间隔进

行轨迹点定义来拟合特定的动作轨迹. 而离散的轨迹点规划具有轨迹中间过渡过程无法预知性, 这就导致机器人运动稳定性的不确定, 即在两个相邻的轨迹点之间可能存在导致机器人运动不稳定的轨迹点. 本文从力学角度对这种不稳定轨迹点存在的可能性进行了验证.

## 1 力学模型

由于在动态平衡时, 机器人的压应力中心

收稿日期: 2006-08-22

作者简介: 余蕾斌(1979-), 男, 浙江慈溪人, 博士生, 主要研究方向为仿人机器人运动规划与控制.

曹其新(联系人), 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 021-34206790; E-mail: qxcao@sjtu.edu.cn.

(COP)和零力矩点(ZMP)重合<sup>[1,2]</sup>,故提出一种通过检测 COP 调整机器人各关节轨迹运行速度、规避不稳定状况出现的控制方法. 小型仿人机器人 MechG 共 17 自由度,腿部共 10 个自由度,手臂部共 6 个自由度,头部 1 个自由度,如图 1 所示.

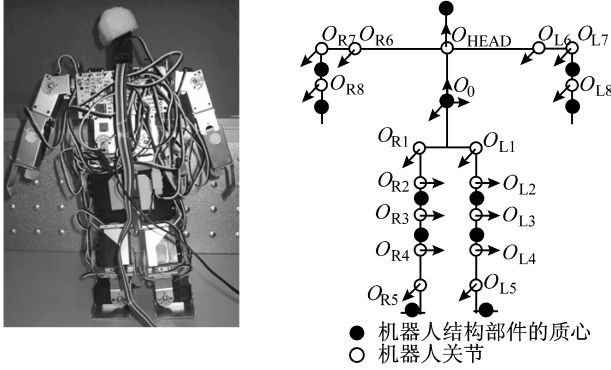


图1 机器人实体和自由度分布

Fig.1 The robot and its freedoms

验证这种不稳定轨迹点存在的可能性可通过简化力学模型<sup>[3]</sup>求证.

假设仿人机器人 MechG 不做左右幅度的侧向摆动,而做左右肢体各关节相同的动作,则把该 3D 环境下的仿人机器人简化为 2D 环境下的 7 刚体力学模型,如图 2 所示. 图中:黑色圆点表示各刚体重心的等效位置; $m_0, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_h$  为刚体质量; $M_0, M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_h$  为力矩(以脚底前沿的投影点 A 作为力矩支点); $M_n$  为地面产生反力矩. 为了简化模型,假设 MechG 所做动作缓慢过渡,不考虑惯性力和惯性力矩<sup>[4,5]</sup>. 因此,要满足机器人保持力学稳定,必须满足

$$M_0 + M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_h + M_n = 0 \quad (1)$$

以  $M_0$  所在刚体重心等效点作为原点,沿刚体方向为  $Y_0$ ,垂直刚体向前为  $Z_0$  建立机器人基坐标(见图 2).

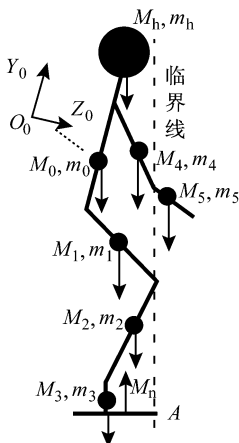


图2 2D 模型

Fig.2 2D model

根据图 1,设定 MechG 关节为  $1 = R1 = L1, 2 = R2 = L2, 3 = R3 = L3, 4 = R4 = L4, 5 = R5 = L5, 6 = R6 = L6, 7 = R7 = L7, 8 = R8 = L8, h = h$ . 令  $1 = 0^\circ, 5 = -90^\circ, 7 = -90^\circ, 8 = 0^\circ, h = -90^\circ$ , 计算可得各刚体等效重心位置点(以  $O_{M_i}$  表示)所在的运动学方程:

$$O_{M_0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$O_{M_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -26 \\ \sin 2 & \cos 2 & 0 & -23\sin 2 - 88 \\ -\cos 2 & \sin 2 & 1 & 23\cos 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$O_{M_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -26 \\ \sin 23 & \cos 23 & 0 & -42\sin 23 - 46\sin 2 - 88 \\ -\cos 23 & \sin 23 & 0 & 42\cos 23 + 46\cos 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$O_{M_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -41 \\ 0 & \sin 234 & \cos 234 & -62\sin 23 - 46\sin 2 - 88 \\ 0 & -\cos 234 & \sin 234 & 62\cos 23 + 46\cos 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$O_{M_4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -63 \\ 0 & \sin 6 & \cos 6 & -42\sin 6 + 55 \\ 0 & -\cos 6 & \sin 6 & 42\cos 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$O_{M_5} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -63 \\ 0 & \sin 6 & \cos 6 & -105\sin 6 + 55 \\ 0 & -\cos 6 & \sin 6 & 105\cos 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中:  $23 = 2 + 3; 234 = 2 + 3 + 4$ .

## 2 融合 COP 的离散轨迹运动控制

### 2.1 离散轨迹控制的稳定性判断

根据式(1),以点 A 为机器人倾倒的转动点,而压力通过支点 A,可得机器人 MechG 处于发生向前倾倒的临界状况时(见图 2),  $M_n = 0$ . 因此,以点 A 为力矩支点,可得机器人所受到的合力矩作为机器人稳定性的判别式:

$$\Delta = \sum_{i=1}^5 m_i g O_{M_i} A + m_h g O_{M_h} A \quad (2)$$

式中,  $\overline{O_{M_i}A}$  和  $\overline{O_{M_h}A}$  为支点 A 到各刚体所受力的垂直距离.

结合离散轨迹规划的特点,机器人在轨迹运动中需要满足相邻两个离散轨迹点的同步动作,即多个关节的转动满足同步启停的特点.据此,可以设定机器人采用轨迹点插值拟合的控制算法.

设相邻区间的离散轨迹点插值量点数恒定为 D,某时刻插值点的权值为  $D_i (D_i \in (0, D) \cap Z)$ . 2 ( 2st, 2ov), 3 ( 3st, 3ov), 4 ( 4st, 4ov), 6 ( 6st, 6ov). 由此可得:

$$D_2 = 2ov - 2st, \quad D_3 = 3ov - 3st$$
$$D_4 = 4ov - 4st, \quad D_6 = 6ov - 6st$$

机器人在相邻两点之间过渡时的 2、3、4、6 值分别为:

$$2 = 2st + D_2 D_i / D, \quad 3 = 3st + D_3 D_i / D$$
$$4 = 4st + D_4 D_i / D, \quad 6 = 6st + D_6 D_i / D$$

代入式(2),可得关于  $D_i$  的判别式  $\text{Delt}(D_i)$ .  $D$ 、2st、2ov、3st、3ov、4st、4ov、6st、6ov 分别为预输入参量.

令  $D = 100$ ,  $2st = 40^\circ$ ,  $2ov = 95^\circ$ ,  $3st = 0^\circ$ ,  $3ov = 50^\circ$ ,  $4st = 0^\circ$ ,  $4ov = -50^\circ$ ,  $6st = 55^\circ$ ,  $6ov = 55^\circ$ ;得到机器人在基坐标固定情况下的运动轨迹如图 3 所示.

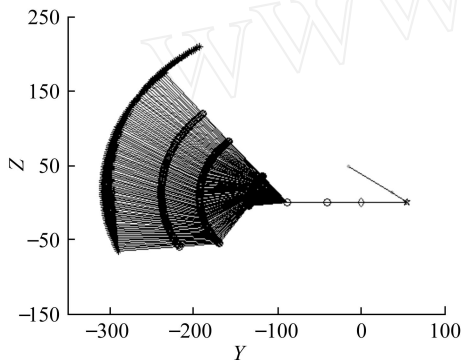


图 3 运动轨迹

Fig.3 The trajectory

$\text{Delt}(D_i)$  的变化曲线如图 4 所示.由图可见,机器人在轨迹状态 1 和轨迹状态 2 之间存在不稳定区域,需要通过修正轨迹,规避不稳定区域.

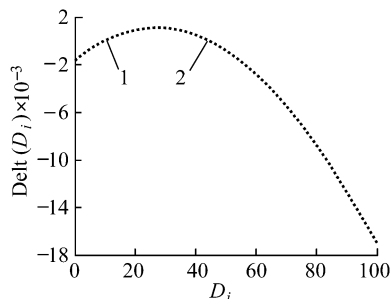


图 4 稳定性判据值

Fig.4 The value of stability judgment

## 2.2 融合 COP 的轨迹控制

检测机器人脚底面 COP 位置的公式为

$$\sum_{i=1}^5 m_i g \overline{O_{M_i}COP} + m_h g \overline{O_{M_h}COP} = 0 \quad (3)$$

式中,  $\overline{O_{M_i}COP}$  和  $\overline{O_{M_h}COP}$  均为 COP 点到各刚体所受力的垂直距离,由于等效压力矢量通过 COP 点,故其值为 0.

根据式(3),机器人轨迹运动的 COP 检测结果如图 5 所示.由图可见,在机器人向前倾倒的时候,由于脚面脱离地面,导致 COP 值无法正确检测到,而当机器人恢复直立后,又能正常检测到 COP 值,所检测到的 COP 值变化规律和  $\text{Delt}(D_i)$  一致.

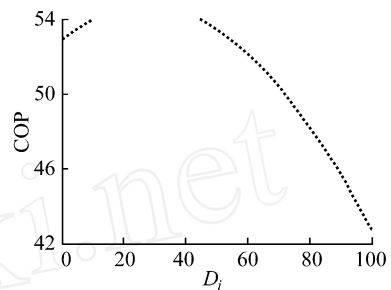


图 5 COP 检测值

Fig.5 The value of COP

因此,通过反馈 COP 信息,可以在仿人机器人 MechG 做动态平衡状态下的动作时,调整运动轨迹.以下对该轨迹控制方式进行仿真.

图 6 给出了融合 COP 的控制轨迹图.由图可见,与图 3 比较,从机器人轨迹的分布可见两者的轨迹过渡过程发生了变化.

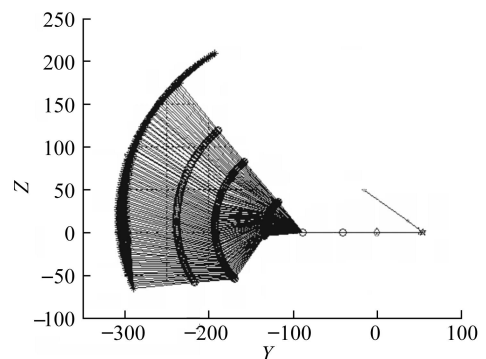


图 6 融合 COP 控制的运动轨迹

Fig.6 The trajectory based on COP control

图 7 所示为机器人在该过程中检测到的 COP 值.由图可见,检测到的 COP 值在调整区间存在波动,这是由于在控制上以 COP 值作为阈值进行反馈控制,没有对 COP 的变化情况(一阶微分量)进行控

制的结果. 但通过比较图 7 和 6 的差异处, 可以看到机器人通过调节各关节运行速度, 在两个规划的离散轨迹点之间规避所存在的不稳定轨迹点, 使机器人总是保持稳定.

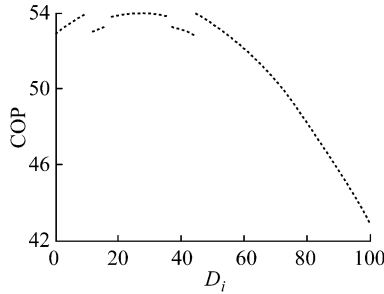


图 7 COP 检测值

Fig. 7 The value of COP

### 3 系统软硬件实现

为了实现仿人机器人 MechG 的控制, 硬件系统的处理器采用 51 内核单片机, COP 检测采用压力应变片网格阵列, 通过前置放大电路, 模拟滤波,

AD 采集, 最终获得压应力传感的数字信号, 处理器通过数值比较和网格定位, 确定 COP 的值. 仿人机器人的离散轨迹数据由 EEPROM 芯片保存, 单片机输出的 PWM 信号经由光电耦合芯片传送到机器人关节执行器, 控制器结构如图 8 所示.

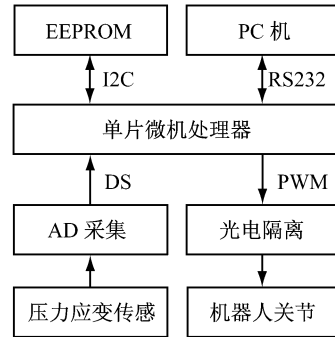


图 8 控制器结构图

Fig. 8 The control structure

本文利用 MechG 对上述的控制过程进行了实验, 结果如图 9 所示. 由图可见, 机器人通过融合 COP 的离散轨迹控制能够稳定地完成上述动作.

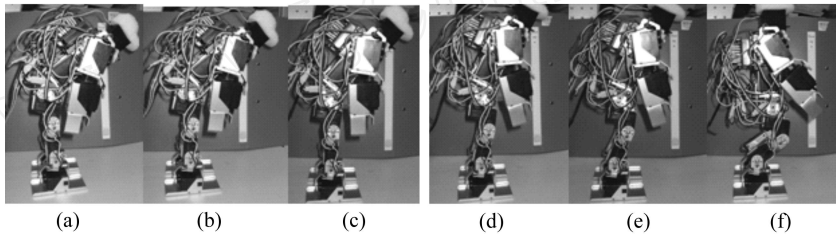


图 9 动作轨迹截图

Fig. 9 The experiment photos

### 4 结 语

本文介绍了小型仿人机器人离散轨迹规划所存在的缺陷, 以及为了弥补该缺陷所提出的融合 COP 离散轨迹运动控制方法. 通过理论计算、仿真和实验, 证明了这种融合 COP 检测、调整各关节的运动速度, 使机器人在实现既定轨迹运动的时候, 保持住稳定状态的可行性.

#### 参考文献:

[1] Vukobratovic M, Borova B, Surdilovic D. Zero-moment point-proper interpretation and new application [C]// *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. Tokyo: Waseda University,

2001: 237 - 244.  
 [2] Sardain P, Bessonnet G. Forces acting on a biped robot. Center of pressure - Zero moment point [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 2004, 34(5): 630 - 635.  
 [3] 蔡自兴. 机器人学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 29 - 82.  
 [4] Tan Guanzheng, Yang Hongzhi. Studies on mechanics problem of dynamic walking of anthropomorphic biped robots[J]. *Journal of Center South University of Technology*, 1995, 2(2): 59 - 62.  
 [5] Azevedo C, Andreff N, Arias S. BIPedal walking: From gait design to experimental analysis[J]. *Mechatronics*, 2004, 14: 639 - 665.