

文章编号: 1002-0446(2004)03-0259-04

基于测力平台阵列的双足步行机器人实际零力矩点检测*

钱敏, 吴仲城, 申飞, 戈瑜

(中国科学院合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 提出一种多维测力平台阵列系统, 通过机器人行走过程中脚部与平台接触力的测量, 并根据 Vukobratovic 关于 ZMP 的定义, 得到机器人行走过程的 ZMP 实际轨迹信息, 为双足步行机器人的稳态行走步态规划提供参考依据. 更进一步, 该系统也可以用作双足步行机器人行走过程步态规划的实验平台.

关键词: ZMP; 双足步行机器人; 测力平台; 阵列

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

The Study of Actual ZMP Measurement for a Biped Walking Robot Based on Force Plates Array System

QIAN Min, WU Zhong-cheng, SHEN Fei, GE Yu

(He fei Institute of Intelligent Machine, CAS, He fei 230031, China)

Abstract: In this paper, a multi-dimensional force plate array is presented and the ground reaction forces are examined. The ZMP trajectory of human subject is precisely calculated based on the Vukobratovic's ZMP definition and is a significant reference for the stability control of humanoid robot. Furthermore, the system can be used to measure the actual ZMP trajectory of a biped walking robot.

Keywords: ZMP; biped walking robot; force plates; array

1 引言 (Introduction)

对双足步行机器人来说, 步行稳定性是首要的问题, 是实现其他复杂功能的前提和基础. 南斯拉夫学者 Vukobratovic (简称伍氏) 的零力矩点理论是关于步行稳定性的经典理论. ZMP 是这样描述的: ZMP 是地面上的一点, 重力和惯性力对这一点的力矩, 其水平分量为零^[1]. 也就是说整个系统对于这个点的前向、侧向的倾翻力矩为零. 伍氏认为: 机器人在动态行走时, 若 ZMP 落在一定的稳定区域内, 则其运动是稳定的. 在早期时候, 由于双足步行机器人系统的复杂性很难用数学模型来准确地描述, 因而只在行走前考虑了 ZMP 的轨迹, 并未考虑到实际 ZMP 的轨迹, 这种方法显然不能保证机器人稳定的动态行走.

随着研究工作的深入, 研究人员采用各种方法进行实际 ZMP 的检测^[2-5]. 如: 早稻田大学的 Takanishi 等人为双足步行机器人 WL-12R III 设计了 ZMP 检测装置, 他们将两套通用的力/力矩传感器

安装在机器人的小腿部位, 采用离线获取 ZMP 轨迹的方法^[2]. 本田公司的 P2、P3 和 ASIMO 采用六维力/力矩传感器获得地面反力, 进行实时 ZMP 的检测, 构成了姿态控制系统, 但是未见其公布核心技术^[3]. 清华大学的刘莉、汪劲松等人开展的“拟人机器人技术及其系统研究”工作中, 确定了基于六维力/力矩传感系统的实际 ZMP 检测方案, 将传感器安装在机器人的脚部, 推导了单脚支撑期、双脚支撑期的实际 ZMP 计算公式^[4].

从 ZMP 计算模型来看, 六维力/力矩传感器的最佳安装位置越靠近地面越好. 例如: 将传感器安装在小腿部的 WL-12R III, 获得的测量值必须经过数学变换才能计算出实际 ZMP; 同样, 安装在脚部的检测方案, 在建立数学模型时, 传感器以下部分的重量需忽略不计, 才能推导出计算公式. 基于这一思想, 我们提出用新型结构的六维力/力矩传感器构建的测力平台阵列, 将脚力信息的获取转化为全部地

面反力的获取,并利用 ZMP 的概念,建立数学模型,推导实际 ZMP 计算公式.

2 多维力测力平台阵列测量实际 ZMP 的数学模型 (The mathematic model of actual ZMP measurement using multi-dimensional force plate array)

2.1 ZMP 计算模型^[6]

根据伍氏的定义,重力和惯性力对 ZMP 这一点的力矩的水平分量为零.

对于如图 1 所示的运动链来说,ZMP 条件可以描述为:

$$\sum_i (r_i \times m_i a_i + I_i \alpha_i + \omega_i \times I_i \omega_i) - \sum_i r_i \times m_i g = (0, 0, *)^T \quad (1)$$

其中: $r_i = p_i - p_{zmp}$, $p_i = (x, y, z)^T$ 是第 i 个运动链与坐标系原点的距离, $p_{zmp} = (x_{zmp}, y_{zmp}, 0)^T$;

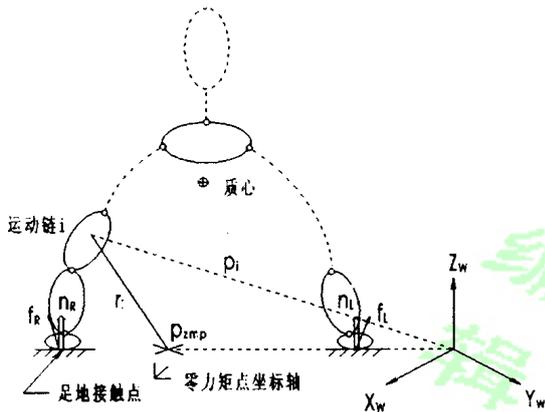


图 1 一个运动链的 ZMP 的定义

Fig.1 Definition of ZMP for a kinematic chain

m_i 和 I_i 分别是第 i 个运动链的质量和转动惯量;
 ω_i 和 α_i 分别是第 i 个运动链的角速度和角加速度;
 g 为重力加速度;

* 表示某一个值, $(0, 0, *)^T$ 表示矢量的一种形式.

在双支撑期,左右脚与地面均有接触点,通过这一点,地面对运动链有合成的反作用力 (f_L 或 f_R) 和反作用力矩 (n_L 或 n_R),这里的反作用力矩实际上就是六维力/力矩传感器所测量出的 M_z ,从而(1)式可转化为:

$$-\sum_i (r_i \times m_i (a_i - g) + I_i \alpha_i + \omega_i \times I_i \omega_i) + r_L \times f_L + r_R \times f_R + n_L + n_R = 0 \quad (2)$$

其中: $r_{L/R} = p_{L/R} - p_{zmp} = (*, *, 0)^T$, $p_{L/R}$ 分别为左右足与地面的接触点; $n_{L/R} = (0, 0, *)^T$, 所以:

$$r_L \times f_L + r_R \times f_R + n_L + n_R = (0, 0, *)^T \quad (3)$$

2.2 单脚支撑期

如图 2 所示.

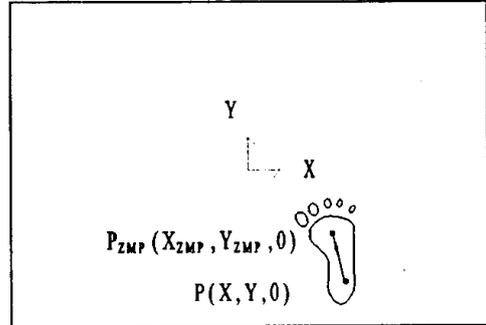


图 2 单脚支撑状态

Fig.2 Single-leg support phase

在单脚支撑状态下,(3)式简化为:

$$r \times f + n = (0, 0, *)^T \quad (4)$$

其中: $r = (x - x_{zmp}, y - y_{zmp}, 0)$, $f = (f_x, f_y, f_z)$, $n = (0, 0, *)^T$,由式(4)可有:

$$\begin{cases} (y - y_{zmp}) f_z = 0 \\ (x - x_{zmp}) f_z = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_{zmp} = x \\ y_{zmp} = y \end{cases} \quad (5)$$

所以,在单脚支撑期,实际 ZMP 点就是单脚与地面的接触点.

2.3 双脚支撑期

如图 3 所示.

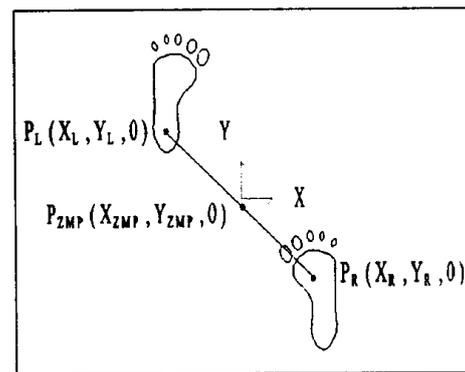


图 3 双脚支撑状态

Fig.3 Double-leg support phase

在双脚支撑状态下,左足 $r_L = (x_L - x_{zmp}, y_L - y_{zmp}, 0)$, $f_L = (f_{Lx}, f_{Ly}, f_{Lz})$,同理,右足类似,带入(3)式中,有:

$$\begin{cases} (y_L - y_{zmp}) f_{Lz} + (y_R - y_{zmp}) f_{Rz} = 0 \\ (x_L - x_{zmp}) f_{Lz} + (x_R - x_{zmp}) f_{Rz} = 0 \end{cases}$$

得:

$$\begin{cases} x_{zmp} = \frac{x_L f_{Lz} + x_R f_{Rz}}{f_{Lz} + f_{Rz}} \\ y_{zmp} = \frac{y_L f_{Lz} + y_R f_{Rz}}{f_{Lz} + f_{Rz}} \end{cases} \quad (6)$$

3 ZMP 检测系统^[7] (The ZMP measurement system)

3.1 系统介绍

本文用于检测 ZMP 的系统,即多维力测力平台阵列系统,是在以新型结构六维力/力矩传感器为主体的单台多维力测力平台的基础上,设计的一种基于 CAN 总线的测力平台阵列系统,如图 4 所示.

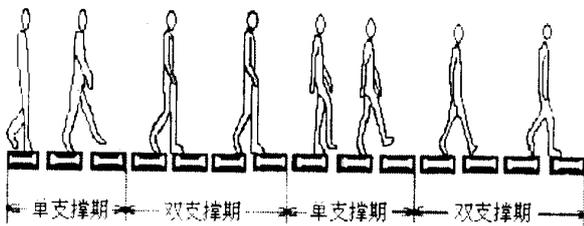


图 4 测力平台阵列系统示意图

Fig.4 The schematic diagram of force plate array system

该系统采用总线方式的拓扑结构,实现对每个平台上力信息的实时获取.上位计算机通过 CAN 总

线驱动卡与 CAN 总线相连,进行信息交换和监控管理,平台节点模块直接与 CAN 总线相连接,具有简单的数据采集、数据计算与数据通讯功能.测力平台阵列系统的结构图如图 5 所示,平台节点模块的硬件结构图如图 6 所示,以单片机 PIC16C773 为核心,包括数据采集、数据处理和以 MCP2150 和 PCA82C250 组成的数据通讯接口三部分,节点模块中保留有基于 RS232 通信协议的通信接口,以方便模块的功能扩展.

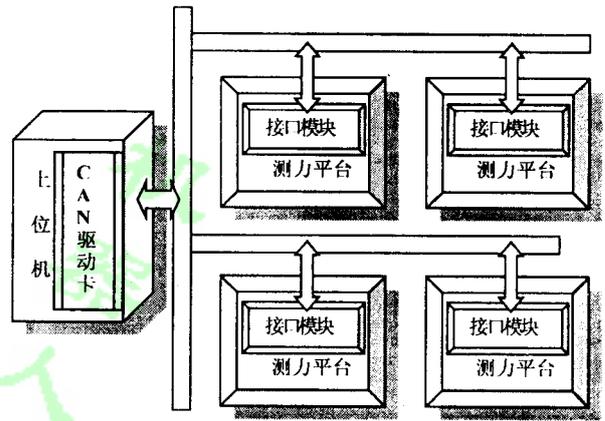


图 5 多维力测力平台阵列系统结构图

Fig.5 The structure of multidimensional force plates array system

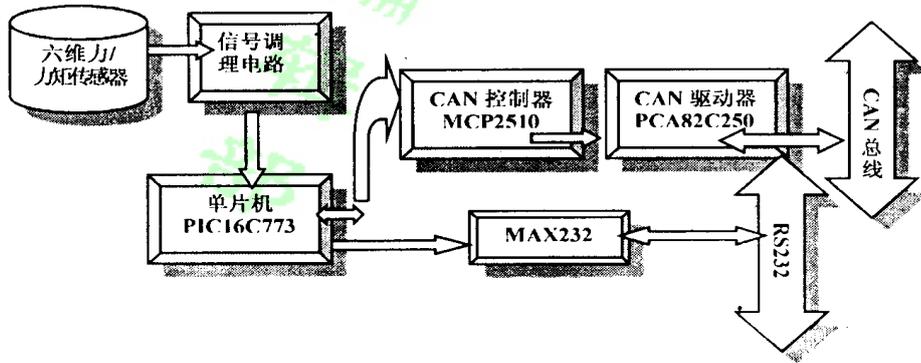


图 6 节点模块的硬件结构图

Fig.6 The hardware structure of a node module

3.2 地面反作用点计算

双足机器人在行走时,足部分别落在不同的平台上,动态实时获取的信息是足与台面接触点处地面反力力矩(f_x, f_y, f_z)和(M_x, M_y, M_z),依据已设定平台阵列的坐标系,如图 7 所示,可以推导出接

触点的坐标(x, y, z),进而可以得到单支撑期、双支撑期的 ZMP 点轨迹:

$$\begin{cases} x = \frac{-M_y + F_x z}{F_z} \\ y = \frac{M_x + F_y z}{F_z} \end{cases}$$

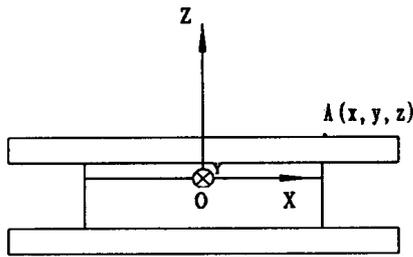


图 7 单个测力平台坐标系

Fig.7 The coordinate of a force plate

4 结论 (Conclusion)

本文从 ZMP 的测量原理出发分析比较了六维力/力矩传感器安装的最佳位置,提出了一种基于 CAN 总线的多维力测力平台阵列系统,通过机器人行走过程中脚部与平台接触力的测量,并根据 Vukobratovic 关于 ZMP 的定义,得到机器人行走过程的 ZMP 实际轨迹信息,为双足步行机器人的稳态行走步态规划提供参考依据.在今后的研究中,这种多维力测力平台阵列系统也可以用作双足步行机器人行走过程步态规划实验平台.

参考文献 (References)

[1] 伍科布拉托维奇,马培菀,沈乃熏.步行机器人和动力型假肢

[M].北京:科学出版社,1983.

[2] Li Q H, Takanishi A, *et al.* A biped walking robot having a ZMP measurement system using universal force-moment sensors [A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Workshop on Robots and Intelligent Systems[C]. Osaka: IEEE, 1991. 1568 - 1573.

[3] Hirai K, Hirose M, *et al.* The development of Honda humanoid robot [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Leuven: 1998. 1321 - 1326.

[4] 刘莉,王劲松,陈昱,等.基于六维力矩传感器的拟人机器人实际 ZMP 检测[J].机器人,2001,23(5):459 - 466.

[5] Erbaturo K, Okazaki A, *et al.* A study on the zero moment point measurement for biped walking robots [J]. Proceedings of the 7th International Workshop on Advanced Motion Control[C]. Maribor: 2002. 431 - 436.

[6] D Gupta A Y, Nakamura Y. Making feasible walking motion of humanoid robots from human motion capture data [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Detroit: 1999. 1044 - 1049.

[7] 钱敏,卞亦文,吴仲城.基于 CAN 总线的多维力测力平台阵列的设计 [A]. 第八届全国敏感元件与传感器学术会议 [C]. 北京: 2003. 446 - 452

作者简介:

钱敏 (1977-),女,硕士研究生.研究领域:机器人传感器,信息获取与信息处理.

吴仲城 (1968-),男,博士,副研究员.研究领域:机器人传感器,信息获取,生物力学,网络传感技术.

(上接第 258 页)

参考文献 (References)

[1] Tejima N, Funakubo H, Dohi T, *et al.* A new microsurgical robot system for corneal transplantation [J]. Precision Machinery, 1988, 9: 1 - 9.

[2] Lang G K, Schroeder E, Koch J W, *et al.* Excimer laser keratoplasty [J]. Ophthalmic Surgery, 1989, 20: 262 - 267.

[3] Langenbucher A, Seitz B, Kus M M, *et al.* Graft decentration in penetrating keratoplasty: Nonmechanical trephination with the excimer laser (193 Nm) versus the motor trephine [J]. Ophthalmic Surgery and Lasers, 1998, 29(2): 106 - 113.

[4] Seitz B, Langenbucher A, Fischer S, *et al.* The regularity of laser keratectomy depth in nonmechanical trephination for penetrating keratoplasty [J]. Ophthalmic Surgery and Lasers, 1998, 29: 33 -

42.

[5] Smith N, Bete mps M, Jutard A, *et al.* Penetrating keratoplasty: a robotised cut of corneal [A]. Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Kyongju, Korea: 1999, 2: 740 - 745.

作者简介:

于永初 (1976-),男,硕士生.研究领域:机器人控制,微操作机器人.

毕树生 (1967-),男,教授.研究领域:微操作机器人,机器人机构学.

李大寨 (1967-),男,高级工程师.研究领域:微操作机器人,擦窗机器人,多指灵巧手,自主移动机器人.