

文章编号: 1002-0446(2004) 04-0368-05

双足步行机器人的 ZMP-CoP 检测及研究*

林玎玎, 刘莉, 赵建东, 陈恳

(北京清华大学精仪系制造所, 北京 100084)

摘要: ZMP(零力矩点)和 CoP(压力中心)是评价双足步行机构行走稳定性的重要参数. 本文在研究了 ZMP 和 CoP 两者关系的基础上, 根据 THBIP-I 仿人机器人基于 ZMP 理论的姿态调整要求和六维力/力矩传感器的安装位置, 推导了适用于双足机器人的 CoP 计算公式, 建立了采用六维力/力矩传感器的 CoP 检测系统. 进行了 THBIP-I 仿人机器人行走过程的实际 CoP 检测实验, 并对实验结果进行了讨论. 实验证明了该系统的准确性.

关键词: 双足步行机器人; ZMP; CoP

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

Measurement and Study on ZMP-CoP of the Biped Walking Robot

LIN Ding-ding, LIU Li, ZHAO Jian-dong, CHEN Ken

(Institute of Manufacturing Engineering, Department of Precision Instruments and Mechanology,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: ZMP (Zero Moment Point) and (Center of Pressure) CoP are important criteria for the stability of the biped locomotion. In this paper, the relation between ZMP and CoP is studied. Based on the posture adjustment requirement of THBIP-I and the installation position of the 6-axis force-moment sensors, the formulae for computing CoP of a humanoid biped robot are deduced, and a CoP measurement system based on the 6-axis force-moment sensors is presented. The accuracy of this system is experimentally confirmed, and CoP is measured throughout the whole walking phase. The results of measured CoP are discussed.

Keywords: biped walking robot; ZMP; CoP

1 引言(Introduction)

双足步行机器人研究的一个关键问题是实现其稳定的行走. 目前世界上大多数双足步行机器人系统都采用 ZMP 作为稳定行走的判据^[1~3]. ZMP 即零力矩点(Zero Moment Point)的简称, 是由南斯拉夫学者 Vukobratov 提出的, 他研究了 ZMP 与双足动态系统之间的关系, 提出 ZMP 是判断动态平衡的一个重要依据. 他指出, 当双足机构处于动态平衡时, ZMP 和脚底所受地面反力的压力中心 CoP(Center of Pressure)是重合的^[4]. 因此, 我们可以根据检测到的地面反力信息, 计算 CoP, 通过控制策略调整 ZMP 和 CoP 的位置, 使二者重合, 实现机器人的动态稳定行走. CoP-ZMP 控制最为成功的应用就是日本本田(Honda)公司的仿人机器人 ASIMO, 通过安装在脚部的六维力/力矩传感器检测出地面反力信息, 计算得到 CoP(在他们的研究中称为 G-ATGRF), 通过独特的姿态控制同时调整躯干姿态和脚部姿态, 进而保持 ZMP 和 CoP 在行走过程中始终处于合适的位置, 实现稳

定的行走^[5].

本文根据清华大学 THBIP-I 仿人机器人基于 ZMP 动态平衡标准的姿态调整要求, 研究了 ZMP 和 CoP 的概念以及两者之间的关系, 建立了基于六维力/力矩传感器的 CoP 检测系统, 通过实验验证了系统可靠性, 实现了 THBIP-I 仿人机器人行走过程中的 CoP 检测, 并对实验结果进行了分析.

2 ZMP 和 CoP 的概念及关系(Concept of ZMP and CoP and their relation)

定义 1: ZMP 是行走地面上的一点, 在该点由作用在机器人上的主动力和主动力矩所产生的合力矩水平方向分量为零.

定义 2: CoP 是支撑脚与地面接触面内的一点, 该点为地面反力合力的作用点.

我们首先将一个双足机器人简化为 n 个杆件的多刚体运动链, 再根据达朗伯原理, 可以写出机器人的整体运动方程:

$$R + \sum m_i (g - a_i) = 0$$

* 收稿日期: 2004-01-07

$$M + \overrightarrow{OP} \times R + \sum \overrightarrow{OC}_i \times m_i g \quad (1)$$

其中, R 为 P 点所受地面反力矢量和; M 为 P 所受地面反力矩矢量和; $m_i a_i$ 为作用于第 i 个杆件质心 C_i 的惯性力; $m_i g$ 为作用于第 i 个杆件质心 C_i 的重力, H_{C_i} 为第 i 个杆件相对质心 C_i 的动量矩, O 为参考坐标系原点。

对于 ZMP 点, 式 (1) 可写成:

$$\begin{aligned} M_{ZMP} + \overrightarrow{OZMP} \times R + \sum \overrightarrow{OC}_i \times m_i g \\ = \sum H_{C_i} + \sum \overrightarrow{OC}_i \times m_i a_i \end{aligned} \quad (2)$$

根据 ZMP 的定义, 在 ZMP 点应该满足:

$$M_{ZMP_t} = 0 \quad (3)$$

其中下标 t 表示切向分量。

我们现在只考虑水平面内的运动方程, 并将:

$$\overrightarrow{OC}_i = \overrightarrow{OZMP} + \overrightarrow{ZMPC}_i \quad (4)$$

代入式 (1), 则得到:

$$(\sum \overrightarrow{ZMPC}_i \times m_i (a_i - g) + \sum H_{C_i})_t = 0 \quad (5)$$

根据式 (2) 也可得到:

$$\begin{aligned} (\overrightarrow{OZMP} \times R)_t = (\overrightarrow{OZMP} \times \sum m_i (a_i - g))_t \\ = (\sum H_{C_i} + \sum \overrightarrow{OC}_i \times m_i (a_i - g))_t \end{aligned} \quad (6)$$

式 (5) 和 (6) 为 ZMP 的数学表达式, 可以根据这两个方程式计算 ZMP 在水平面内的坐标。从中也得到 ZMP 的另一种解释: ZMP 是地面上的某一点, 在该点由作用于机器人的重力和惯性力所产生的力矩的水平分量为零^[6]。

对于处于动态平衡下的双足机器人, 在单脚支撑期间内, ZMP 与 CoP 是重合的。为了证明这个结论, 我们首先假设 CoP 与 ZMP 不重合, 令式 (1) 中的 $P = \text{CoP}$, 简化到 CoP 点的地面反力和地面反力矩分别为 R 和 M_{CoP} , 则:

$$\begin{aligned} M_{\text{CoP}} + \overrightarrow{OC}_{\text{CoP}} \times R + \sum \overrightarrow{OC}_i \times m_i g \\ = \sum H_{C_i} + \sum \overrightarrow{OC}_i \times m_i a_i \end{aligned} \quad (7)$$

将式 (6) 代入式 (7) 可以得到:

$$(M_{\text{CoP}} + \overrightarrow{ZMPCoP} \times R)_t = 0 \quad (8)$$

根据 CoP 的定义, 在平衡状态下为:

$$(M_{\text{CoP}})_t = 0 \quad (9)$$

因为 $R \neq 0$ 且 \overrightarrow{ZMPCoP} 和 R 不平行, 因此只有 $\overrightarrow{ZMPCoP} = 0$ 时式 (8) 才成立, 即 ZMP 和 CoP 重合。因此, 在很多研究中也检测得到的 CoP 称为实际 ZMP^[3]。

对于单脚支撑期的动态不平衡状态, 整个机器人机构围绕脚的边缘发生旋转或翻转, ZMP 和 CoP 是不重合的, 这种情况下可以根据流体力学的理论计算出压力分布中心 CoP, 而此时的 ZMP 依然运用上面的定义和推导出的表达式计算。根据定义可知 CoP 是永远不会离开支撑区域的, 而 ZMP 可以离开支撑区域。当 ZMP 处于支撑区域之外时, 机器人就会倾倒。

3 CoP 检测系统和数学模型 (CoP measurement system and mathematical model)

3.1 CoP 检测系统

系统框图如图 1 所示。系统通过两套六维力/力矩传感器及 DSP 处理卡来实现样机行走过程中的地面反力信息的测量。通过集成在传感器本体中的前置放大电路、模拟滤波器以及 A/D 转换器的处理, 传感器最终输出的信号为数字信号。这些数字信号再通过 RS-422 串行信号线传给传感器的 DSP 处理卡, 通过 DSP 处理卡的处理实现消除偏差、数据去耦、数字低通滤波, 由此获得高精度的力和力矩的数据。

在样机的行走过程中, DSP 处理卡的输出信号通过 ISA 总线传给 THBIP-I 的主控计算机, 并存储在内存中。当完成行走后, 主控计算机内的数据再装载入一台 PC 机内进行 CoP 的计算。

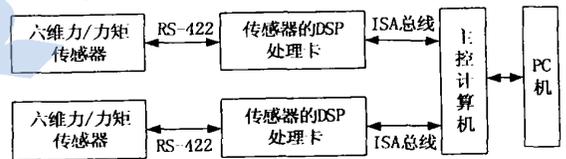


图 1 CoP 检测系统

Fig. 1 CoP measurement system

3.2 CoP 的计算模型

当机器人行走过程中一只脚着地时, 支撑脚的六维力/力矩传感器以下部分可简化为图 2 所示模型。由机器人其他部分重力和运动引起的力矢量 F 和力矩矢量 M 可由传感器检测得到。根据达朗伯原理和 CoP 的定义, 可得到 CoP 的坐标表达式:

$$\begin{aligned} X_{\text{CoP}} &= \frac{x_A m (g - \ddot{z}_A) + z_A m \ddot{x}_A + x_s F_z - z_s F_x - M_y + (\dot{H}_A)_y}{F_z + m (g - \ddot{z}_A)} \\ Y_{\text{CoP}} &= \frac{y_A m (g - \ddot{z}_A) + z_A m \ddot{y}_A + y_s F_z - z_s F_y + M_x - (\dot{H}_A)_x}{F_z + m (g - \ddot{z}_A)} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, m 为六维力/力矩传感器以下部分 A 的质量;

H_A 为A 的动量矩; g 为重力加速度; F 为六维力/力矩传感器检测的力; M 为六维力/力矩传感器检测的力矩; A 为A 的质量中心的坐标; S 为六维力/力矩传感器检测中心的坐标.

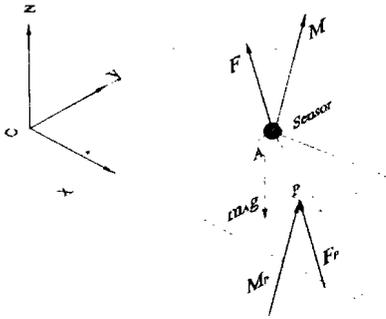


图2 CoP 数学模型

Fig. 2 Mathematical model of CoP

由于 THBIP-I 的六维力/力矩传感器安装位置接近地面, 可忽略传感器以下部分的质量, 选择合适的参考坐标系, 则式(10)可简化为:

$$\begin{cases} X_{CoP} = \frac{-z_s F_x - M_y}{F_z} \\ Y_{CoP} = \frac{-z_s F_y + M_x}{F_z} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)为机器人单脚支撑期的 CoP 计算公式. 对于行走过程中的双脚支撑期, 每只脚的 CoP 仍用式(11)计算, 整个机器人系统的 CoP 使用公式(12)进行合成, 推导过程参见文献[7].

$$\begin{cases} X_{CoP} = \frac{F_{z1} X_1 + F_{z2} X_2}{F_{z1} + F_{z2}} \\ Y_{CoP} = \frac{F_{z1} Y_1 + F_{z2} Y_2}{F_{z1} + F_{z2}} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $CoP_1 = (X_1, Y_1)$ 为右脚的 CoP, $CoP_2 = (X_2, Y_2)$ 为左脚的 CoP, F_{z1} 和 F_{z2} 分别为 CoP_1 和 CoP_2 处的地面反力垂直分量.

4 系统准确性的验证(Validation of the system accuracy)

为了验证整个 CoP 检测系统的准确性, 我们应用 THBIP-I 样机进行了验证实验. 实验方法为: 使 THBIP-I 保持如图 3 所示的姿态, 一支脚完全着地, 称为完全支撑脚, 另外一支脚和地面在 X 轴方向上保持点接触, 称为点接触脚, 并在样机的躯干上施加一个外力, 在这种状态下进行 CoP 的检测.

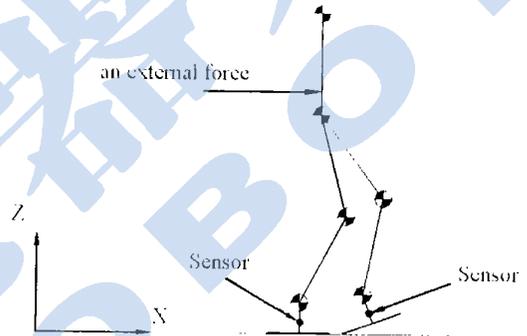


图3 一支脚完全支撑, 另一支脚在 X 轴向保持点接触状态

Fig. 3 State of single full-support with one-point ground-touch in X axis

理论上, 在图 3 所示状态下, 无论施加在样机躯干上的外力如何改变, 只要样机保持静止平衡状态, 样机点接触脚所受到的地面反力的合力作用点始终应该保持在 X 轴向的某一点上. 实验结果如图 4 所示.

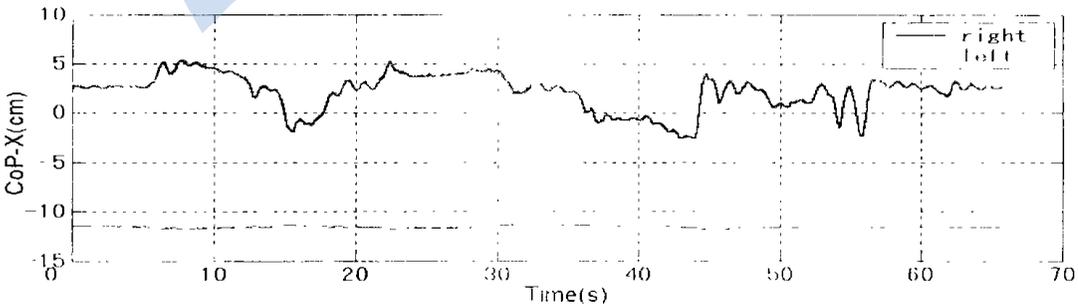


图4 一支脚完全支撑, 另一支 X 轴向保持点接触状态下的 X- CoP 轨迹

Fig. 4 X- CoP trajectories in the state of single full-support with one-point ground-touch in X axis

从图 4 可以看出, 机器人左脚即点接触脚的 X 向 CoP 曲线基本上为一条直线, 与理论结论符合, 从而验证了整个系统的准确性. 从图 4 我们可以看出点接触脚的 X 向 CoP 曲线存在很小的波动, 产生这种波动的原因是作用在样机躯干的外力使样机产生微小晃动, 这种晃动导致了点接触脚与地面的角度的变化, 最终产生了 CoP 在 X 轴向的微小波动.

5 CoP 检测实验和结果讨论(Experiments of CoP measurement and result discussion)

我们进行了 THBIP-I 仿人机器人行走过程中的 CoP 检测实验. THBIP-I 样机重 130kg, 行走步幅为 30cm, 步速分别为 6, 8, 10, 12s/step, 用文献[8]中描述的步态规划方法实现行走, 地面反力的采样频率为 50Hz.

图 5 为一组步速为 10 s/step 的行走过程中 CoP 轨迹和步态规划的期望 ZMP 轨迹. 由图可以看出

CoP 在行走过程中始终保持在稳定区域内, 这与机器人稳定行走的判据是相符合的.

规划的期望 ZMP 之间存在较大误差, 特别是在单脚支撑期间, CoP 出现了比较严重的振荡现象. 产生误差的原因主要是理论数学模型与 THBIP-I 样机结构之间存在的差异.

与单脚支撑期间的 CoP 轨迹相比, 双脚支撑期间的 CoP 轨迹与步态规划的期望 ZMP 重合情况要好得多. 可以看出, 机器人的双脚支撑期的稳定性要远优于单脚支撑期, 在单脚支撑期间内机器人发生跌倒等不稳现象的可能较大, 因此机器人单脚支撑期的稳定性控制是更为重要的.

图 6 是 3 组不同步速的 CoP 轨迹, 由图可以看出, 随着机器人步速的加快, CoP 轨迹的振荡现象越明显, 可以说明机器人走得越快, 其稳定性控制也更为困难.

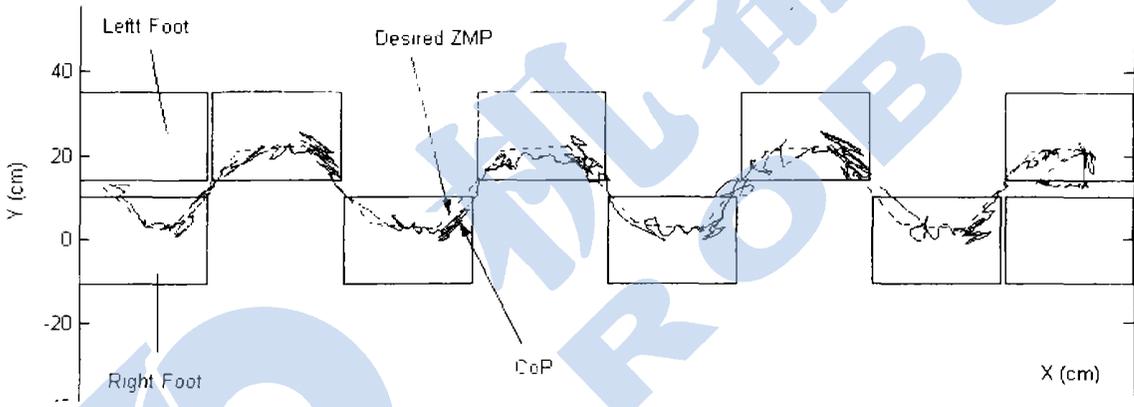
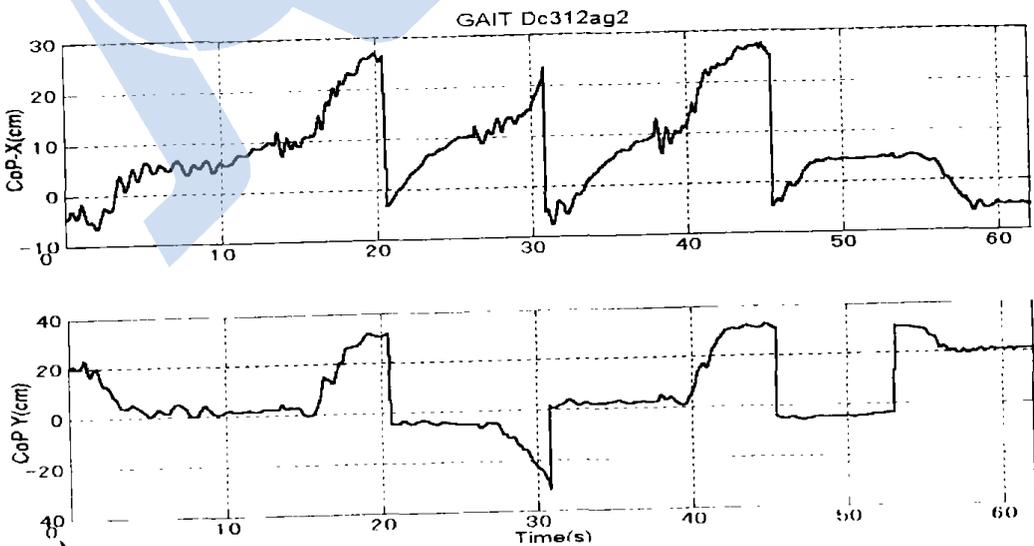
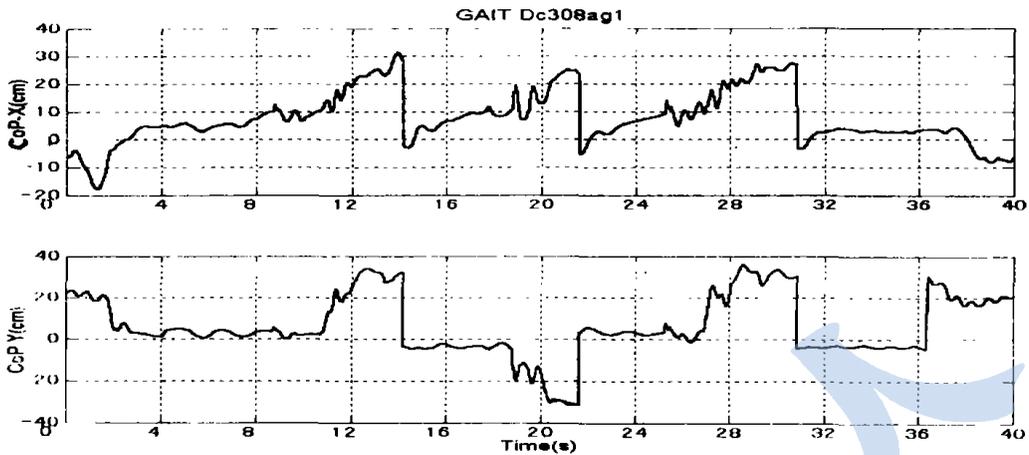


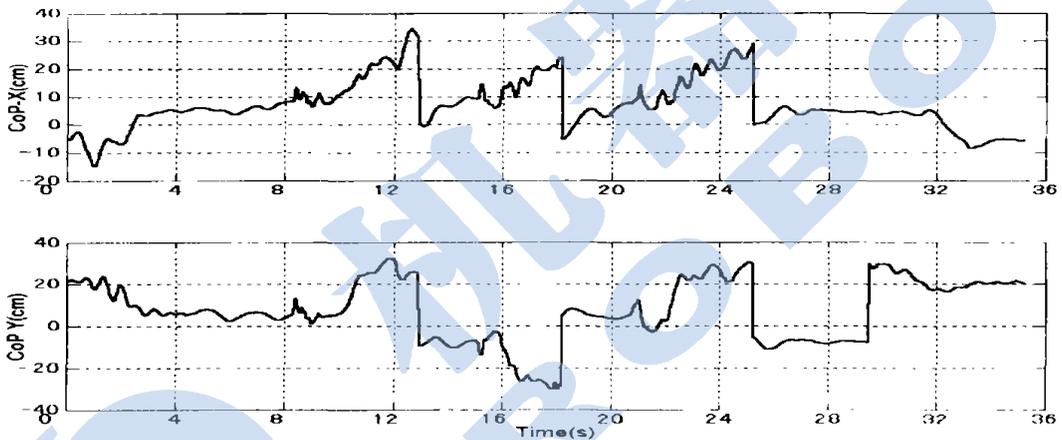
图 5 步速 10 s/step 的 CoP 轨迹和期望 ZMP 轨迹
Fig. 5 Trajectories of CoP and desired ZMP, walking speed: 10 s/step



(a) 步速: 12 s/step



(b) 步速: 8 s/step



(c) 步速: 6 s/step

图6 不同步速的 CoP 轨迹

Fig. 6 Trajectories of CoP at various walking speeds

6 结论(Conclusion)

本文在研究 ZMP 和 CoP 概念及关系的基础上,建立了 CoP 的计算模型,搭建了采用六维力/力矩传感器的 CoP 检测系统,实验证明该系统的准确性.并且,在 THBIP-I 仿人机器人行走过程中成功地检测出 CoP,分析和讨论了实验结果,指出单脚支撑期内,CoP 轨迹和理论 ZMP 有较大误差,并存在严重振荡现象,为 THBIP-I 仿人机器人行走步态修正提供了有效的参考依据.

参考文献 (References)

[1] Espiau B, Sardain P. The anthropomorphic biped robot BIP2000[A]. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. San Francisco, CA: 2000. 3997-4002.

[2] Lim S H, Kim J G. Adaptive gait algorithm for IWR biped robot [A]. Proceedings of the 1995 International Conference on Power Electronics and Drive Systems[C]. 1995. 438-443.

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

[4] Vukobratovic M, Borova B, Surdilovic D. Zero-moment point- proper interpretation and new application[A]. Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots[C]. 2001. 237-244.

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

Engineering, 2000, 159- 169.

- [29] Gerhart G, Laughery S, Goetz R. Offroad vehicle locomotion using Bekker's model[A]. Proceedings of the SPIE International Conference on Unmanned Ground Vehicle Technology II [C]. Bellingham: The International Society for Optical Engineering, 2000. 127- 136.
- [30] 蒋新松. 未来机器人发展方向的探讨[J]. 机器人, 1996, 18(6): 285- 291.
- [31] 蔡鹤皋. 机器人将是 21 世纪技术发展的热点[J]. 中国机械工

程, 2000, 11(1- 2): 58- 61.

作者简介:

闫清东 (1964), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 武器系统与运用工程.

魏丕勇 (1962), 男, 博士研究生. 研究领域: 无人地面武器系统机动与控制技术.

马越 (1977), 男, 讲师. 研究领域: 微小型武器系统机动技术.

(上接第 360 页)

- [6] Kanehiro F, Inaba M, Inoue H. Action acquisition framework for humanoid robots based on kinematics and dynamics adaptation[A]. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation[C]. Michigan: 1999. 1038- 1043.
- [7] 刘治, 李春文. 一种基于模糊神经网络的双足机器人混杂控制[J]. 控制理论与应用, 2002, 18(8): 107- 110.
- [8] Rigatos G G, Tzafestas C S, Tzafestas S G. Mobile robot motion control in partially unknown environments using a sliding-mode fuzzy logic controller[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2000, 20(33): 1- 11.
- [9] Tzafestas S G, Krikochosritis T E. Robust sliding-mode control of nine

link biped robot walking[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 1997, 20(18): 375- 402.

[10] 史忠科, 吴方向, 王蓓, 等. 鲁棒控制理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

[11] 申铁龙. 机器人鲁棒控制基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

作者简介:

周云龙 (1977), 男, 博士研究生. 研究领域: 机器人学.

徐心和 (1940), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人学.

(上接第 372 页)

- [6] Sardain P, Bessonnet G. Gait analysis of a human walker wearing robot feet as shoes[A]. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Seoul, Korea: 2001. 2285- 2292.
- [7] 刘莉, 汪劲松, 陈恩, 等. 基于六维力/力矩传感器的拟人机器人实际 ZMP 检测[J]. 机器人, 2001, 23(5): 459- 462.
- [8] Xu K, Chen K, Wang J, *et al.* A new method of gait generation for a biped walking robot[A]. Proceedings of the IEEE-RAS International

Conference on Humanoid Robots[C]. 2001. 295- 302.

作者简介:

林玎玎 (1979), 女, 硕士研究生. 研究领域: 仿人机器人传感技术, 步行信息分析.

陈恩 (1954), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人学与仿生, 特种机器人与应用, 制造自动化及系统集成.