

# 未知不平整地面上的双足步行稳定控制

李 建<sup>1,2</sup>, 陈卫东<sup>1,2</sup>, 王丽军<sup>1,2</sup>, 高雪官<sup>3</sup>, 杨 军<sup>4</sup>, 李慕君<sup>4</sup>

(1. 上海交通大学自动化系, 上海 200240; 2. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001;  
3. 上海交通大学机器人研究所, 上海 200240; 4. 上海电气集团中央研究院, 上海 200070)

**摘 要:** 针对未知的不平整地面环境, 提出了双足机器人稳定步行控制算法, 该算法由步态规划和传感器反馈控制两部分组成. 采用被动倒立摆模型设计双足机器人的步态, 使得双足机器人能够自然、节能的稳定行走. 实时反馈控制用来适应地面环境的凹凸不平以及处理外部环境的扰动. 控制器包括上身姿态控制、期望 ZMP 控制以及非线性落地控制三部分. 双足机器人机构柔性的存在对机器人稳定性以及控制效果造成很坏的影响, 甚至使反馈控制造成负面的效果, 因此柔性的影响也被考虑到步行控制器的设计当中. 利用双足机器人不平地面上的步行实验验证所提出步行控制算法的有效性.

**关键词:** 双足机器人; 步态规划; 被动倒立摆模型; 稳定控制

**中图分类号:** TP242      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2010) 11-2669-06

## Stability Control for Biped Walking on Unknown Rough Surface

LI Jian<sup>1,2</sup>, CHEN Wei-dong<sup>1,2</sup>, WANG Li-jun<sup>1,2</sup>, GAO Xue-guan<sup>3</sup>, YANG Jun<sup>4</sup>, LI Mu-jun<sup>4</sup>

(1. Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;  
2. State Key Laboratory of Robotics and System (HIT), Harbin, Heilongjiang 150001, China;  
3. Institute of Robotics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;  
4. Central Academy, Shanghai Electric Group Co. Ltd., Shanghai 200070, China)

**Abstract:** For the biped walking on the rough surface, the stability control algorithm is proposed. It consists of a walking pattern generation and a sensory feedback control algorithm. The PIPM (Passive Inverted Pendulum Model) is developed for the gait generation. The generated waling pattern enables the biped robot to have a more natural and efficient walking. The online feedback controller is developed to deal with the unevenness of the environments and the unknown disturbances. The controller consists of a body attitude control, a desired zero moment point (ZMP) control and a nonlinear landing control. The flexibility of the biped robot harms to the stability and control effect so badly that it makes the feedback control yield negative effects to the walking stability. Therefore, the influence of the biped robot's flexibility is considered into the design of the walking control. Finally, the walking experiment for the biped robot walking on the uneven surface confirms the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** biped robot; gait generation; PIPM; walking control

## 1 引言

双足仿人机器人更适合在为人类设计的环境中进行服务, 已经成为智能机器人研究领域中最热门的研究课题之一. 目前, 很多研究组织已经开发出能够稳定动态步行的双足仿人机器人, 如 Asimo<sup>[1]</sup>, HRP<sup>[2]</sup>, WABI-AN<sup>[3]</sup>, KHR<sup>[4]</sup>, 以及 Johnnie<sup>[5]</sup>. 然而, 双足机器人要能够在人类生活的环境中工作, 还要能够适应各种未知不平整的地面以及来自外界的扰动, 这也是双足机器人研究当中急需解决的根本问题, 体现着双足机器人的重要能

力.

Zheng 等<sup>[6]</sup>最早就利用力传感器实现了未知斜坡地面上双足机器人的静态稳定步行. 近年来, 很多研究者也利用在线控制技术尝试实现对双足机器人的不同环境中的动态步行 (如文献 [7~9]). 大部分的双足机器人在线控制系统都是基于踝关节-髌关节策略修正双足机器人步态, 一般利用踝关节调整反映双足机器人稳定程度的零力矩点 (ZMP<sup>[10]</sup>) 的位置, 利用髌关节调整双足机器人上身姿态. 然而, 实际应用中所有双足机器人多少都存在柔性问题, 柔性的存在使得双足机器人控制

系统很难获得合适的控制参数来使机器人保持未知地面上的稳定步行. 过大的控制参数容易使得双足机器人振荡失稳, 过小的控制参数又不足以调整机器人的步态使其维持稳定.

针对上述问题, 本文提出双足机器人不平地面情况下的步行控制系统, 系统结构由步态生成部分和传感器反馈控制部分组成, 双足机器人步态生成系统基于我们在文献[11]中提出的被动倒立摆模型, 所生成的步态使双足机器人步行更加自然、更有效率. 双足机器人传感器反馈控制系统把机器人本身的柔性问题考虑进来, 针对不同的控制目标, 可以分成上身姿态控制、期望 ZMP 控制和非线性落地控制三种相互耦合的反馈控制. 这三种反馈控制结构上相互耦合来克服机器人柔性以希望加速机器人控制的收敛速度; 功能上针对不同控制目标统一为未知不平整环境下的动态步行服务; 时序上都依赖于步行的具体阶段来修正机器人预先规划好的步态, 保证机器人在不平整地面上以及受到扰动情况下仍能保证机器人的稳定步行.

## 2 基于被动倒立摆模型的步态生成

步态规划采用我们在文献[11]中所提出的被动倒立摆模型, 来设计双足机器人上身轨迹, 如图 1 所示. 被动倒立摆模型的运动方程用如下方程表示:

$$\ddot{\theta} = \frac{g}{l} \sin\theta \quad (1)$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{g}{l} \sin\varphi \quad (2)$$

$$\theta = 0 \text{ 时, } \dot{\theta} = 0 \quad (3)$$

其中,  $\theta$  和  $\varphi$  分别为摆杆前向和侧向的倾角,  $l$  为摆杆的长度, 描述从机器人支撑腿踝关节到质心位置的距离,  $g$  为重力加速度. 方程(3)用来描述被动倒立摆模型中的“零状态”约束.

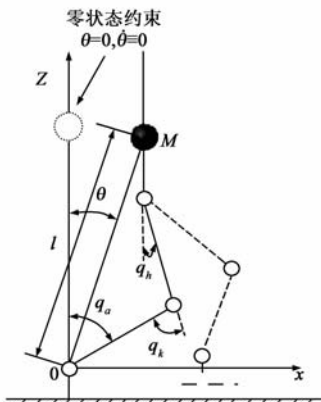


图1 双足机器人5-连杆被动倒立摆模型

根据双足机器人步行过程满足周期性和连续性条件, 建立双足机器人步行过程中的约束, 如下方程组表

示:

$$\begin{cases} x_c((k+1)T_s) - x_c(kT_s) = S_s \\ z_c((k+1)T_s) = z_c(kT_s) \\ \theta(t_1) = \theta(kT_s + t_1) = 0 \\ \dot{\theta}(t_1) = \dot{\theta}(kT_s + t_1) = 0 \\ \theta((k+1)T_s) = -\theta(kT_s) = \arcsin(S_s/l) \\ \theta(kT_s + T_s/2) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中  $(x_c, z_c)$  表示机器人步行过程中的质心轨迹,  $S_s$  为步距,  $T_s$  为步行周期,  $t_1$  为质心经过竖直状态(零状态)的时刻.

利用双足机器人动态步行过程质心的被动倒立摆模型, 可求解出双足机器人动态步行过程的质心轨迹, 如下方程表示:

$$\theta(t) = K_q(e^{Kt} - e^{-Kt}) \quad (5)$$

$$K_q = \frac{\arcsin(\frac{S_s}{l})}{(e^{-\frac{KT_s}{2}} - e^{\frac{KT_s}{2}})}$$

其中  $K = \sqrt{g/l}$ . 确定了合适的步态参数(步距、步行周期), 双足机器人重心轨迹可由方程(5)求得. 同样根据双足机器人周期性、连续性以及摆动腿在步行过程中的最大抬脚高度建立摆动腿运动轨迹的约束条件, 利用三次样条插值算法求得摆动腿的运动轨迹. 对于图 1 所示的双足机器人 5-连杆模型, 一旦双足机器人重心和摆动腿轨迹被求得, 双足机器人各关节轨迹可由逆运动学唯一确定下来.

## 3 传感器反馈控制算法

### 3.1 步行控制器的整体结构

虽然利用上面的步态规划方法能够使机器人在平地上稳定的步行, 当机器人受到扰动或者是遇到凹凸不平的地面时, 机器人仍然会失去平衡, 因此必须要通过传感器的反馈控制使机器人维持平衡. 如图 2 所示, 为双足机器人步行控制器的整体结构, 可分为三层. 在最上层, 双足机器人利用被动倒立摆模型步态规划方法预先生成离线步态数据; 第二层上, 传感器反馈控制器根据安装在上身的姿态传感器以及安装在脚底的力/力矩传感器, 实时修正所规划的步态, 使机器人在受到扰动或者在不平整地面上仍能保持步行的稳定性; 在第三层上, 双足机器人的关节伺服控制器把反馈控

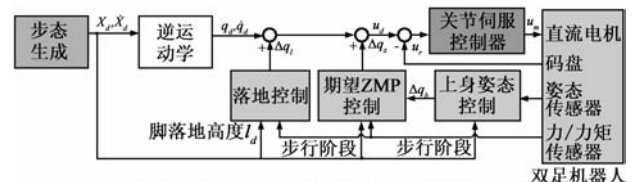


图2 双足机器人步行控制器的整体结构

制器修正后的步态数据发送到关节伺服控制器当中,以控制各关节角位置.

本节重点讨论传感器反馈控制器,包括上身姿态控制、期望 ZMP 控制和非线性落地控制三部分.反馈控制器依赖于步行控制器定义的步行阶段,决定修正摆动腿还是支撑腿.上身姿态控制和期望 ZMP 控制修正当前支撑腿的各个关节,落地控制在摆动腿将要落地之前修正其相应关节.经过反馈控制器修正后的步态数据发送到关节伺服控制器,其形式可表示如下形式:

$$u_d(t) = q_d(t) + \Delta q_l(t) + \Delta q_z(\Delta q_b(t), t) \quad (6)$$

其中,  $q_d(t)$  是步态生成器生成的关节角度矢量,  $\Delta q_l(t)$  是非线性落地控制对步态的修正量,  $\Delta q_z(\Delta q_b(t), t)$  是期望 ZMP 控制和上身姿态控制联合对修正的修正量.  $u_d(t)$  是发送给关节伺服控制器的控制变量.

### 3.2 上身姿态控制

双足机器人行走过程中,一方面希望像人那样保持上身的直立状态,另一方面当机器人行走在不平整的地面或受到扰动时,上身会发生倾斜,如果上不及时调整姿态,机器人很容易失稳摔倒.纠正上身姿态最有效的手段是控制支撑腿髋关节,因为这个关节直接影响机器人上身的姿态.利用安装在上身的姿态传感器,当机器人检测出姿态发生偏移时,上身姿态控制被激活,然后根据步态生成器所定义的步行阶段来修正当前的支撑腿的髋关节,其修正量可用下式表示:

$$\Delta q_{hb}(t) = K_{pb}(\varphi_d(t) - \varphi_r(t)) + K_{Db}(\dot{\varphi}_d(t) - \dot{\varphi}_r(t)) \quad (7)$$

其中,  $K_{pb}$  和  $K_{Db}$  是控制器的比例系数和微分系数,  $\varphi_d(t) = \dot{\varphi}_d(t) \equiv 0$  代表机器人在步行过程中总是保持期望的直立姿态.  $\varphi_r(t)$  是姿态传感器实际测量的姿态角度.

### 3.3 期望 ZMP 控制

双足机器人行走的首要目标就是保证行走的稳定性.步行的稳定性可以通过 ZMP 规范来直接反映. ZMP 是步行过程中机器人的脚与地面接触力的合力中心<sup>[10]</sup>.如果 ZMP 落于脚底与地面接触的多边形内部,机器人可以保持稳定不倒, ZMP 越靠近多边形的中心,机器人稳定裕度越大.实际 ZMP 可以通过安装在脚底的六轴力/力矩传感器测量数据计算而得.

实际 ZMP 可以通过控制支撑腿的任何一个关节得到修正.问题是,机器人本身的柔性严重影响着控制效果,使得控制器很难找到合适的参数来仅通过修正机器人的某个关节来维持机器人的稳定.因此,本文通过修正支撑腿的所有关节来加速 ZMP 控制器的收敛,正如一个柔性体那样,通过多段控制能取得更好的控制效果.另外,上身姿态控制对步态的修正也影响到机器人的稳定性,在 ZMP 控制器中也把这个修正考虑进来,以加快收敛速度.具体形式如下式表述.

$$\begin{cases} (\Delta q_{hz}(t) \Delta q_{lz}(t) \Delta q_{az}(t))^T = (k_1 \ k_2 \ k_3)^T \cdot (K_{pz}(x_{zmp}^d(t) - x_{zmp}^r(t)) + K_{Dz}(\dot{x}_{zmp}^d(t) - \dot{x}_{zmp}^r(t)) - \Delta q_{hb}(t) / k_3) \\ k_1 + k_2 + k_3 = 1 \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $(\Delta q_{hz}(t) \ \Delta q_{lz}(t) \ \Delta q_{az}(t))^T$  为控制器对支撑腿髋关节、膝关节和踝关节的修正量.  $K_{pz}$  和  $K_{Dz}$  为控制器比例系数和微分系数.  $x_{zmp}^d(t)$  为期望的 ZMP 轨迹,  $x_{zmp}^r(t)$  为实际通过传感器测量数据计算得到的 ZMP 位置,  $(k_1 \ k_2 \ k_3)^T$  为加权矩阵,  $\Delta q_{hb}(t)$  为上身姿态控制对髋关节的修正量.

期望 ZMP 控制根据步行过程的不同阶段对支撑腿的相应关节进行修正来控制实际 ZMP 的位置.当机器人处于双足支撑阶段时,会对双腿的各关节同时进行修正.

### 3.4 非线性落地控制

地面冲击不但对机构造成伤害,而且也是影响稳定性的重要因素之一,因此非线性落地控制被用来控制落地脚离地高度来防止过大的地面冲击发生.具体原理如下:当机器人行走在不平整的地面上时,落地脚会比规划的落地时间或晚或早的接触地面,产生过大的地面冲击从而影响机器人的稳定性,落地控制通过摆动腿与地面接触力垂直方向的分力大小来控制机器人柔和的接触地面.当摆动腿距离地面距离达到一定值时,落地控制被激活,来修正摆动腿的各个关节.具体控制规则如下:

(1) 当摆动腿的实际落地高度小于目前所设计的落地高度  $l_d$  时,摆动腿以固定速度  $v_a$  加速下落.

(2) 当落地脚与地面接触的垂直分力大于期望阈值 250(N) 时,也就是机器人已完全处于双足支撑阶段,每条腿支撑力为机器人重量的一半(机器人总重量为 49kg).控制器认为当前摆动脚落在了凸出的地面上,因此摆动腿以固定速度  $W_a$  抬起.

(3) 当落地脚与地面接触的垂直分力小于期望阈值 250(N) 时,因为脚部的阻抗特性的存在,控制器都认为摆动腿正常落地.这时,摆动腿的落地高度会以线性变化的值来进行修正.图 3 是机器人行走于平地过程中,脚所受到得地面反力情况,从中可以分析出机器人落地的特性.

非线性落地控制对落地脚离地高度的修正量计算如下:

$$\Delta z_a(t) = \sigma(f_z) v_a - (1 - \sigma(f_z)) w_a, \quad (9)$$

其中,  $\sigma(f_z)$  为切换函数,从 1 到 0 先行变化,如图 4 所示.

## 4 双足机器人步行仿真与实验

### 4.1 双足机器人系统

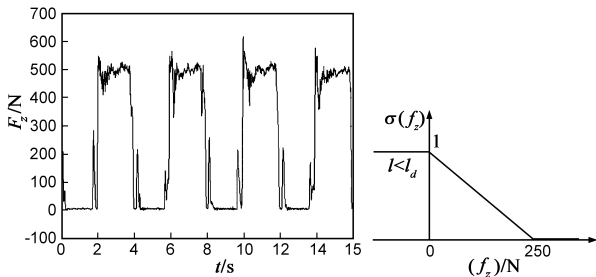


图3 机器人行走在平地上的地面反力 图4 非线性控制切换函数

双足机器人 SHR-1 是为了研究双足机器人未知环境下稳定步行问题所开发的测试平台,如图 5 所示. SHR-1 身高 1.2m,体重 49kg,总自由度为 12 个.每条腿由髋关节、膝关节和踝关节组成,其中髋关节有 3 个自由度,膝关节 1 个自由度,踝关节 2 个自由度.髋关节具有悬臂梁式结构,这种结构使得两腿之间的运动空间增大,可能实现双腿的交叉等复杂运动.踝关节结构与髋关节类似,由两个驱动轴正交组成.关节正交结构设计,能够极大的方便机器人的运动学及逆运动学计算.

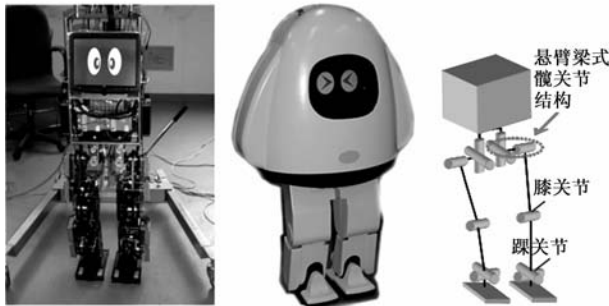


图5 双足机器人SHR-1的照片以及关节配置图

SHR-1 身体部分装有姿态传感器,用来测量上身在行走过程中的偏差;每只脚装有六维力/力矩传感器,用来测量机器人实际的 ZMP 位置.各个关节自由度都装有编码器,提供反馈控制所用的关节位置信息和速度信息.

双足机器人的控制系统采用分布式结构.所有关节的执行结构由直流电机、谐波齿轮以及同步带、驱动器构成.每个关节作为一个节点通过 CAN 网络与主控计算机通讯接收数据.主控计算机负责完成机器人的数据采集与发送、上层控制算法和人机交互及监控功能.各个关节控制器负责完成每个关节电机的底层运动控制,实现电流环、速度环和位置环的反馈控制,使得每个关节能够按照主控计算机的位置、速度指令平滑运动.为了确保机器人运动过程中的实时性,双足机器人控制系统采用 RT-Linux 作为实时操作系统.实时控制程序是机器人控制软件的核心部分,它运行在 RT-Linux 内核空间,主要完成机器人预先规划的运动轨迹的获取、控制算法、CAN 数据发送与接收以及应急处理

任务.

### 4.2 步态仿真评估

图 6 显示了利用被动倒立摆模型生成的步态与传统步态的对比,两种步态都利用相同的步态参数如表 1 所示,所用机器人模型参数采用 SHR-1 样机参数.其中虚线表示双足支撑阶段,实线代表单足支撑阶段.从对比图可以看出,该步态具有和人类相似的运动:保持上身的小范围内的上下运动,而不像那些传统步态那样始终保持髋关节的固定高度.图 7 展示了两种方法在

表 1 步态参数表

步态参数	值
步距	$S_s$ 0.25m
脚最大离地高度	$H_s$ 0.02m
步行周期	$T_s$ 0.8s
双足支撑阶段	$T_{dp}$ 0.1s
单足支撑阶段	$T_{sp}$ 0.7s

三个步行周期内的功率消耗情况,可以看出所提出的步态生成方法与传统的保持髋关节固定高度的步态生成方法相比更加省能.



图6 步态杆状图对比

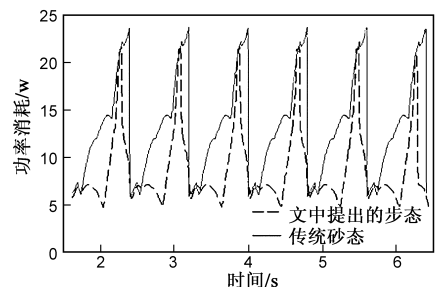


图7 两种步态消耗功率对比图

### 4.3 不平地面上的步行实验

实验中,在不施加传感器反馈控制的情况下,双足机器人利用离线规划的步态,可以稳定的步行在平整的地面上,但却不能在不平的地面上维持平衡.当机器人利用本文所提出传感器反馈控制根据地面状况修正离线步态数据,机器人能够以 0.2m 的步距、2s 的步行周期在不平的地面上稳定行走.图 8 展示的是机器人在不平地面上行走状况的视频图像.图中不平的地面由 2 块 1cm 的橡胶垫铺在水泥地面上组成.图 9 描述的是机器人在不平地面上行走时上身的前向姿态数据.可以看到,上身的姿态被控制在一个很小的范围之内,最大角度偏差不超过  $2^\circ$ .也就是说,机器人在不平地面上能够很好的保持预先规划的直立状态.图 10 描述的是机器人行走在不平地面上时的地面反力情况.由图 10 和不施加反馈控制时双足机器人平地步行的地面范例情况图 3 进行对比,可以看出地面反力得到了很好的控制,机器人能够柔和的行走在不平的地面上.

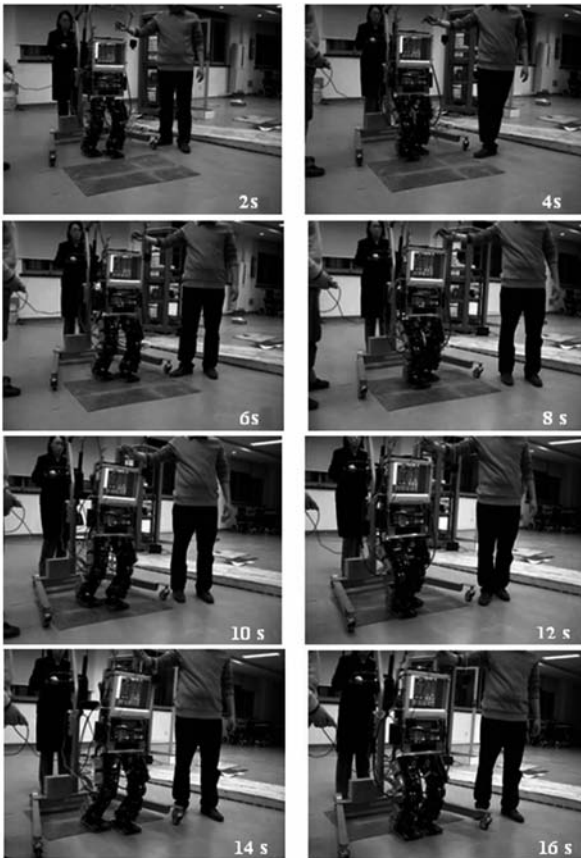


图 8 双足机器人行走于凹凸不平地面的录像截图

## 5 结论

本文提出了使双足机器人稳定步行在不平整地面上的步行控制系统.步行控制系统由步态生成系统和传感器反馈系统构成.采用被动倒立摆模型生成的步

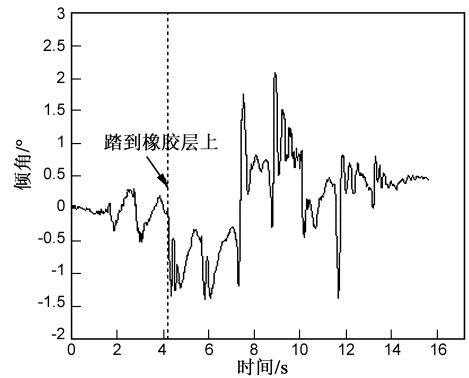


图 9 不平地面的机器人上身姿态

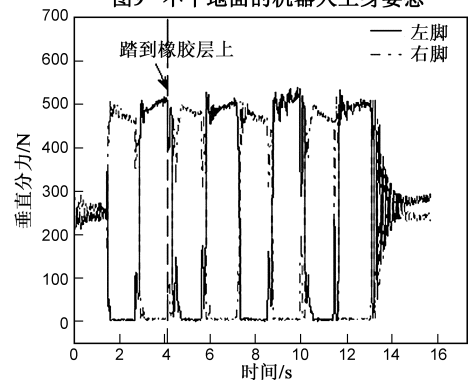


图 10 不平地面上机器人脚底所受地面反力

态由于利用了机器人的动力学特性使得机器人的步行更加自然,能量上也消耗更小.反馈控制系统根据地面的不平整程度以及扰动程度实时修正已规划的步态数据以使机器人仍能维持稳定.传感器反馈控制由上身姿态控制、期望 ZMP 控制以及非线性落地控制组成,各种控制相互耦合作用于步行过程的不同阶段根据不同的控制目标修正步态使双足机器人实现扰动抑制和环境适应.为了加快双足机器人稳定性的收敛速度,机器人本身的柔性被考虑到反馈控制器的设计当中,通过对各个关节的修正作用加快机器人对外界环境的反应程度.实验中,双足机器人利用提出的方法很好的适应了一定程度的不平地面状况,验证了该方法的有效性.

### 参考文献:

- [1] Kazuo H, Masato H, Yuji H, Toru T. Development of honda humanoid robot [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) [C]. Leuven: IEEE Press, 1998. 1321 - 1326.
- [2] Kenji K, Fumio K, Shuuji K, Kazuhiko Y, Kazuhiko A, Toshikazu K, Shigehiko O, Takakatsu I. Design of prototype humanoid robotics platform for HRP [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) [C]. EPFL, Lausanne: IEEE Press, 2002. 2431 - 2436.
- [3] Jinichi Y, Eiji S, Sadatoshi I, Atsuo T. Development of a

- bipedal humanoid robot control method of Whole body cooperative dynamic biped walking [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) [C]. Detroit: IEEE Press, 1999. 368 – 374.
- [4] Kim J Y, Park I W, Lee J, Kim M S, Cho B K, Oh J H. System design and dynamic walking of humanoid robot KHR-2 [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) [C]. Barcelona: IEEE Press, 2005. 1443 – 1448.
- [5] Gienger M, Löffler K, Pfeiffer K. Towards the design of a biped jogging robot [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) [C]. Seoul: IEEE Press, 2001. 4140 – 4145.
- [6] Zheng Y F, Shen J. Gait synthesis for the SD-2 biped robot to climb sloping surface [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(1): 86 – 96.
- [7] Fu C L, Chen Ken. Gait synthesis and sensory control of stair climbing for a humanoid robot [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2008, 55(5): 2111 – 2120.
- [8] Löffler K, Gienger M, Pfeiffer F, Ulbrich H. Sensors and control concept of a biped robot [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2008, 51(5): 2111 – 2120.
- [9] Kim J Y, Park I W, Oh J H. Walking control algorithm of biped humanoid robot on uneven and inclined floor [J]. Journal of Intelligent Robotic Systems, 2007, 48(4): 457 – 484.
- [10] Vukobratovic M. Zero-moment-point-Thirty five years of its life [J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2004, 1(1): 157 – 173.
- [11] Li Jian, Chen Wei-dong. Efficient biped pattern generation based on passive inverted pendulum model [A]. Proceedings of the 8th International Workshop on Autonomous Systems-Self Organization, Management, and Control [C]. Shanghai, 2008.

#### 作者简介:



**李 建** 男, 1979 年出生于山东省, 上海交通大学博士研究生, 主要研究方向为仿人仿生机器人的感知与控制.

E-mail: lijia\_sjtu@sjtu.edu.cn



**陈卫东** 男, 1968 年出生于黑龙江省哈尔滨市, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为智能机器人和多机器人系统.

E-mail: wdchen@sjtu.edu.cn