

文章编号: 1001-0920(2016)01-0079-05

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2014.1367

基于腿部关节控制的仿人机器人偏摆力矩控制方法

杨亮^{1,2}, 傅瑜¹, 何怀文¹

(1. 电子科技大学中山学院 计算机学院, 广东 中山 528402; 2. 广东工业大学 自动化学院, 广州 510006)

摘要: 针对机器人步行过程中产生的偏摆力矩影响步行稳定性的问题, 提出一种全新的基于腿部关节控制的偏摆力矩控制方法. 分析了偏摆力矩产生的原因及步行过程中垂直方向上的力矩平衡条件; 根据仿人机器人连杆模型和力矩平衡条件, 将偏摆力矩控制问题转化为带约束条件的二次规划问题, 推导出支撑腿腿部关节角度控制的表达式, 设计了腿部关节自适应控制器以提高轨迹跟踪性能, 并给出了稳定性证明. 仿真结果表明, 该方法能较好地克服偏摆力矩的影响, 使机器人实现稳定的步行.

关键词: 仿人机器人; 偏摆力矩; 腿部关节控制; 自适应控制; 零力矩点

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

Yaw moment control method for humanoid robot based on leg joints control

YANG Liang^{1,2}, FU Yu¹, HE Huai-wen¹

(1. School of Computer Engineering, Zhongshan Institute of University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan 528402, China; 2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China. Correspondent: YANG Liang, E-mail: alex_yangliang@foxmail.com)

Abstract: In view of the problems of unstable walking caused by the undesired yaw moment when the humanoid robot walks, a yaw moment control method based on the leg joints control is proposed. The cause of yaw moment and moment balance conditions are analyzed. According to the link model of the humanoid robot and moment balance conditions, the yaw moment control problem is transferred to the problem of quadratic programming with constraints, and the control expressions of the leg joints angles are deduced. In order to improve the tracking performance, a leg joints adaptive controller is proposed and the stability proof is provided. The simulation results shows that the method can counteract the yaw moment, keep the yaw axis moment balance and guarantee the stable walking.

Keywords: humanoid robot; yaw moment; leg joints control; adaptive control; zero moment point

0 引言

仿人机器人步行的稳定性问题是机器人大规模实例化进程中必须解决的基础性问题, 国内外不少研究者已经进行了深入研究, 并取得了可喜的结果, 其中比较有代表性的步行机器人有 Asimo^[1]、Nao^[2]等. 然而, 由于仿人机器人是工程上少有的高阶、非线性、非完整约束的多自由度、多变量、强耦合和变结构复杂动力学系统^[3], 仅依靠地面对脚掌的摩擦力和支撑力来保持身体的平衡. 在步行过程中, 躯干及身体各部分在向前运动过程中将产生绕支撑腿转动的

偏摆力矩, 随着机器人步行速度的增大, 摩擦力产生的力矩不足以平衡步行过程中产生的偏摆力矩时, 机器人将失去平衡, 甚至摔倒.

为保证机器人步行的稳定, 有必要对偏摆力矩进行控制. 国内外已有相关学者对偏摆力矩的矫正方法进行了相关研究, 目前对偏摆力矩进行矫正的方法主要有以下两类:

1) 基于髋关节转动的偏摆力矩矫正方法. 文献[4-5]均采用髋关节转动来克服偏摆力矩, 其主要思想是首先计算得到偏摆力矩的大小与方向, 通过髋关节

收稿日期: 2014-09-02; 修回日期: 2015-01-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61302115); 广东高校优秀青年创新人才培养计划项目(2013LYM0104); 广东省高等学校优秀青年教师培养计划项目(Yq2013204); 广东省自然科学基金项目(S2013010015764, S2013010012307).

作者简介: 杨亮(1980-), 男, 讲师, 从事智能机器人系统的研究; 傅瑜(1962-), 男, 教授, 从事智能控制等研究.

的转动产生一个与偏摆力矩大小相等、方向相反的力矩,以获取垂直方向的力矩平衡. Barkan 等^[6]在极坐标系下采用欧拉角来计算偏摆力矩大小,再根据逆运动学计算得到髋关节的转动轨迹,这样做的优点是充分考虑了转动惯量对偏摆力矩的影响.该方法应用在体积质量比较大的仿人机器人时,能够取得较好的控制效果.然而,由于机器人主要的质量集中在躯干,通过转动髋关节来抵消偏摆力矩的方式将消耗更多的能量,并对原有位姿产生较大影响,不利于机器人的大规模应用.

2) 通过双臂摆动的方式来抵消偏摆力矩的影响.文献[7]采用力矩平衡法求得双臂需要摆动的角度并规划出双臂摆动轨迹,通过双臂的摆动来抵消偏摆力矩的影响.文献[8]采用三次样条法规划出参数化的双臂摆动轨迹,以矫正后偏摆力矩最小为目标进行寻优,最终求得摆动角参数的最优值,达到稳定步行的目的.虽然双臂摆动更符合人类自然的行走方式,然而仿人机器人最终的目的还是融入人们的日常生活中,当机器人手持重物或托举物品时,依靠双臂摆动来矫正偏摆力矩的方法则不再适用;另一方面,该方法也不适合无上肢的机器人,应用范围不具备普适性.

为克服以上方法的不足,本文提出一种全新的基于腿部关节控制的偏摆力矩控制方法.根据垂直方向力矩平衡条件得到需矫正的静摩擦力力矩矫正量,通过控制腿部关节角度调整机器人重心下降的加速度大小,从而达到增大静摩擦力矩保证垂直方向的力矩平衡的目的,并设计了腿部关节角度自适应控制器以提高轨迹跟踪性能.

1 垂直方向力矩平衡条件分析

零力矩点(ZMP)^[8-9]是广泛应用于检验仿人机器人能否实现稳定步行的主要判据^[10].然而,ZMP 稳定判据仅考虑了水平方向的力矩平衡,不能保证垂直方向的力矩平衡,因此有必要对机器人步行过程中垂直方向的力矩平衡条件进行分析.

采用连杆模型对仿人机器人进行建模,假设各连杆质量均匀,步行过程中躯干保持与地面垂直,单脚支撑的径向视图如图 1 所示.其中: l_1 为足底到踝关节的距离, l_2 和 l_3 分别表示机器人小腿及大腿的长度, q_1 和 q_2 分别表示踝关节及膝关节的关节角度,质心的位置坐标可由下式计算得到:

$$c = \sum_{i=1}^n \frac{m_i p_i}{M}. \quad (1)$$

c 为机器人质心位置坐标, m_i 为各连杆质量, p_i 为各连杆质心位置坐标, M 为机器人总质量.

由于机器人大部分质量集中在躯干,且步行过程中躯干保持竖直状态,在径向平面内,其坐标可表示

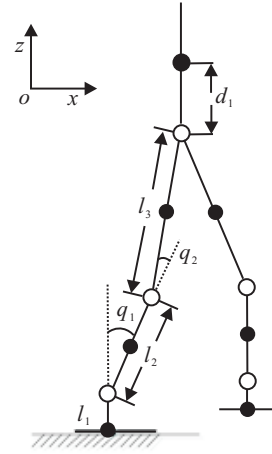


图 1 仿人机器人连杆模型的径向视图

为 $c = (x, z)$, 其中

$$z = l_1 + l_2 \cos q_1 + l_3 \cos(q_1 - q_2) + d_1, \quad (2)$$

d_1 可由式(1)计算得到.

机器人在步行过程中,身体各部分在不同平面向前运动,不可避免地产生一个绕支撑腿的垂直方向力矩,即偏摆力矩,在无其他外力辅助的前提下,机器人仅能依靠足部摩擦力产生反方向的力矩来抵消偏摆力矩的影响,偏摆力矩

$$M_z = \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i (x_i - x_{zmp}) - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i (y_i - y_{zmp}). \quad (3)$$

其中: (x_i, y_i) 为第 i 根连杆的质心位置坐标, m_i 为第 i 连杆的质量, n 为仿人机器人模型的连杆总数, (x_{zmp}, y_{zmp}) 为零力矩点的位置坐标,其具体计算公式可参见文献[10].

由静摩擦定律可知,最大静摩擦力的大小与作用在表面的压力及摩擦系数有关.考虑到最大静摩擦力矩难以精确得到,为简化模型方便讨论,假设摩擦臂已知,最大静摩擦力力矩可表示为

$$M_{fr}^{\max} = \beta \mu N. \quad (4)$$

其中: β 为等效摩擦臂, μ 为最大静摩擦系数, N 为作用于接触面的压力.假设机器人保持固定速度前进,则作用于足底接触面的力可表示为

$$N = M(g + \ddot{z}). \quad (5)$$

其中: M 为机器人质量, \ddot{z} 为机器人重心在垂直方向的加速度,由力矩平衡条件可知,当垂直方向力矩达到平衡时,有

$$\|M_z\| \leq \|M_{fr}^{\max}\|. \quad (6)$$

2 基于腿部关节控制的偏摆力矩控制

2.1 腿部关节角度校正控制器的设计

参考人类步行经验,在步行过程中当意识到身体即将失去平衡时,人总是会下意识地通过屈膝动作降

低重心以维持身体平衡. 受此启发, 本文拟通过对支撑腿腿部进行关节控制, 达到抵消偏摆力矩的目的.

当机器人运动速度变大, 检测到 $\|M_z\|$ 即将超过最大静摩擦力矩 $\|M_{fr}^{\max}\|$ 而失去平衡时, 通过对支撑腿腿部关节进行控制, 降低重心, 在垂直方向上产生一个向下的加速度, 以增加静摩擦力矩从而维持垂直方向的力矩平衡. 由式(4)~(6)可得

$$\ddot{z} = \frac{1}{M} \left(\frac{M_z}{\beta\mu} - Mg \right), \quad (7)$$

由式(2)可得机器人重心在垂直方向的加速度表达为

$$\begin{aligned} \ddot{z} = & [-l_2 \sin q_1 - l_3 \sin(q_1 - q_2)]\ddot{q}_1 + \\ & l_3 \sin(q_1 - q_2)\ddot{q}_2 - [l_2 \cos q_1 + \\ & l_3 \cos(q_1 - q_2)]\dot{q}_1^2 - l_3 \cos(q_1 - q_2)\dot{q}_2^2 + \\ & 2l_3 \cos(q_1 - q_2)\dot{q}_1\dot{q}_2. \end{aligned} \quad (8)$$

由式(8)可知, 调整支撑腿腿部关节角度能够改变重心在垂直方向的加速度, 从而达到抵消偏摆力矩的目的; 另一方面, 为减小能量消耗, 以关节角加速度最小为优化目标, 将基于腿部关节的控制问题转化为一个等式约束的二次规划问题, 即

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} \ddot{q}^T Q \ddot{q}, \\ \text{s.t. } A(q)\ddot{q} = a_z - B. \end{cases} \quad (9)$$

其中: Q 为正定对称矩阵,

$$a_z = \frac{1}{M} \left(\frac{M_z}{\beta\mu} - Mg \right), \quad \ddot{q} = (\ddot{q}_1, \ddot{q}_2)^T,$$

$$A(q) =$$

$$[-l_2 \sin q_1 - l_3 \sin(q_1 - q_2), l_3 \sin(q_1 - q_2)]^T,$$

$$B =$$

$$-(l_2 \cos q_1 + l_3 \cos(q_1 - q_2))\dot{q}_1^2 -$$

$$l_3 \cos(q_1 - q_2)\dot{q}_2^2 + 2l_3 \cos(q_1 - q_2)\dot{q}_1\dot{q}_2.$$

本文采用拉格朗日乘数法解式(9), 取矩阵 Q 为单位阵, 记

$$H(\ddot{q}) = \frac{1}{2} \ddot{q}^2 + \lambda(A(q)\ddot{q} - a_z + B).$$

$$\text{令 } \frac{\partial H(\ddot{q})}{\partial \ddot{q}} = 0, \quad \frac{\partial H(\ddot{q})}{\partial \lambda} = 0, \text{ 则有}$$

$$\ddot{q} = \frac{a_z - B}{A^T(q)A(q)} A^T(q). \quad (10)$$

其中: 关节角速度可由当前采样时刻及前一时刻的关节角度之差获得, 即 $\dot{q}_i(n) = q_i(n) - q_i(n-1)$. 观察式(10)可知, 当 $A^T(q)A(q)$ 不为零时, 式(10)成立; 当 q_1 和 q_2 同时为零时, $A^T(q)A(q)$ 等于零, 式(10)不成立. 只有当检测到偏摆力矩超过一定阈值时才开始应用本文所提出方法进行控制, 而且由图1可知, 当 q_1 和 q_2 同时为零时机器人处于直立状态, 因此在应用本文方法进行偏摆力矩控制过程中, 式(10)成立.

2.2 腿部关节角度自适应控制器的设计

由于摩擦力矩难以精确测量, 为提高控制器的自适应性能, 设计腿部关节角度自适应控制器以提高控制性能. 由机器人动力学方程可知

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tilde{\Psi} = \tau. \quad (11)$$

其中: $\tau = (\tau_1, \tau_2)^T$ 分别为支撑腿的踝关节与膝关节的驱动力矩; $M(q)$ 为对称正定的惯性矩阵; $C(q, \dot{q})$ 为斜对称矩阵, 代表哥氏力/离心力; $G(q)$ 为重力项; $\tilde{\Psi}$ 为摩擦力矩误差项. 定义参考角速度 $\dot{q}_r = \dot{q}_d - \alpha\tilde{q}$, 参考角加速度 $\ddot{q}_r = \ddot{q}_d - \alpha\dot{\tilde{q}}$ 和参考角速度误差 $s = \dot{q} - \dot{q}_r$. 由参考角加速度误差表达式可得

$$\dot{s} = \ddot{q} - \ddot{q}_r. \quad (12)$$

设计如下控制器:

$$\tau = M(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q})\dot{q}_r + G(q) - K_s s, \quad (13)$$

其中 K_s 为正定矩阵. 将式(13)代入(11), 可得系统的误差动力学方程

$$M(q)\dot{s} + (C(q, \dot{q}) + K_s)s + \tilde{\Psi} = 0. \quad (14)$$

选取如下 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} s^T M(q)s + \frac{1}{2} \tilde{\Psi}^T K_s \tilde{\Psi}, \quad (15)$$

对 V 求导化简, 得

$$\dot{V} = \frac{1}{2} s^T \dot{M}(q)s + s^T M(q)\dot{s} + \tilde{\Psi}^T K_s \dot{\tilde{\Psi}}. \quad (16)$$

在式(14)两边同乘 s^T , 并代入式(16), 化简得

$$\dot{V} = -s^T K_s \dot{s} - s^T K_s + \tilde{\Psi}^T K_s \dot{\tilde{\Psi}}. \quad (17)$$

设计如下参数自适应律:

$$\dot{\tilde{\Psi}} = K_s^{-1} s^T. \quad (18)$$

由定义 $\hat{\Psi} = \tilde{\Psi} - \Psi$ 可知 $\dot{\hat{\Psi}} = \dot{\tilde{\Psi}}$. 将式(18)代入(17), 得

$$\dot{V} = -s^T K_s \dot{s} - s^T \hat{\Psi} + \hat{\Psi}^T s. \quad (19)$$

其中: $s^T \hat{\Psi} \in R$, 等式 $s^T \hat{\Psi} = \hat{\Psi}^T s$ 成立, 且为 K_s 正定矩阵, 则有 $\dot{V} < 0$, 故系统稳定; 又因为 \dot{V} 一致连续, 由 Barbalat 定理^[13]可知, 系统渐近稳定.

2.3 基于腿部关节角度控制的偏摆力矩控制体系结构

基于腿部关节控制的仿人机器人偏摆力矩控制可描述为图2所示的双闭环控制结构, 外环根据实际关节的角度 q_r 、角速度 \dot{q}_r 、角加速度 \ddot{q}_r , 由垂直方向力矩平衡条件计算出重心需要下降的加速度 \ddot{z} , 再由腿部关节角度控制器计算出支撑腿各关节角度校正量 Δq ; 而内环将规划的支撑腿关节角度 q_d 与关节角度校正量 Δq 和实际的关节角度 q_r 相减, 得到关节角度误差 e_q ; 再由腿部关节角度自适应控制器输出驱动力矩 τ 到仿人机器人, 控制支撑腿各关节跟踪期望角度, 从而保证垂直方向的力矩平衡.

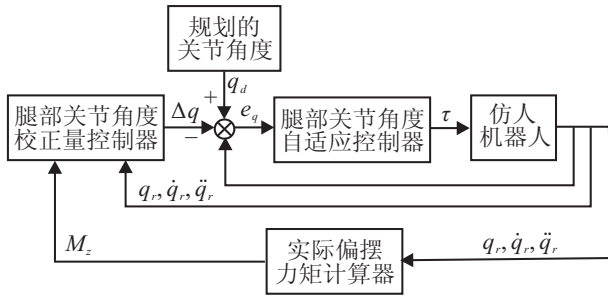


图2 基于腿部关节校正的偏摆力矩控制框图

3 仿真实验及结果分析

仿人机器人的结构参数如表1所示。

表1 仿人机器人的结构参数

参数	躯干	大腿	小腿	脚	手臂
质量/kg	6.219	2.398	1.903	0.711	1.656
长度/m	0.812	0.393	0.308	0.448	0.701

在 Matlab 7.11 环境下, 为完整模拟机器人步行的各个阶段, 采用三次样条法规划出机器人步行步态, 每个步行周期为 1.2s, 步长为 0.1m。其中第 1 个步行周期为起步, 第 2、第 3 个步行周期为周期步行, 第 4 个步行周期为止步, 采样间隔为 0.01s。假设摩擦力矩大小符合式(4), 最大静摩擦系数为 0.1, 等效摩擦力臂为 0.04m。

由式(4)计算出仿人机器人步行过程中地面的反作用力矩, 如图3中实线所示。步行过程中机器人中心在垂直方面有加速度的存在, 反作用力矩在 $\pm 0.76\text{N}\cdot\text{m}$ 左右上下波动, 振幅约为 $0.04\text{N}\cdot\text{m}$ 。由式(3)计算出控制前的偏摆力矩, 如图3中虚线所示。其中 $0 < t < 1.2\text{s}$ 为步行起步阶段, 由于起步阶段速度较小, 因此偏摆力矩相对较小; 在 $t = 1.37\text{s}$ 时, 此时已完成起步动作, 刚开始周期步行, 机器人重心偏移向支撑脚, 摆动脚即将离地, 因而各连杆加速度增大, 导致偏摆力矩出现第 1 个尖峰, 达到最大值 $1.114\text{N}\cdot\text{m}$ 。由图3可以看出, 该时刻已超出最大静摩擦力矩, 如果不加以控制, 机器人将产生绕支撑脚的转动。

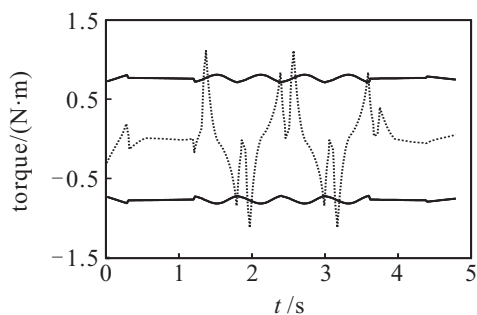


图3 控制前偏摆力矩及地面反作用力矩

应用本文方法进行偏摆力矩控制后得到的最大静摩擦力矩如图4中实线所示, 当检测到机器人偏摆力矩过大, 即将超过阈值时, 进行腿部关节控制, 通过

降低机器人重心, 产生向下的加速度以提高摩擦力矩从而达到力矩平衡的目的。

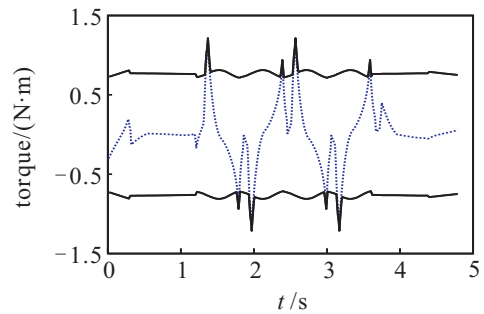


图4 控制后偏摆力矩及地面反作用力矩

文献[11]基于 ZMP 稳定判据采用粒子群优化算法离线生成机器人步态, 但该方法未考虑偏摆力矩的影响, 亦不能在线控制; 文献[8]通过双臂摆动的方式达到补偿偏摆力矩的目的。为衡量本文方法所带来额外的能耗开销, 本文采用文献[11]的方法离线生成机器人步态后, 再应用本文提出的偏摆力矩控制方法进行在线控制, 并对这 3 种方法的能耗情况进行比较。

为便于阐述, 下文将这 3 种方法分别简称为方法 1、方法 2、方法 3。在相同环境下分别计算这 3 种方法所需的平均功率, 其比较结果如图 5 所示。

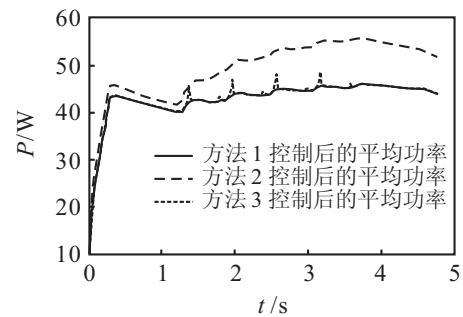


图5 控制后偏摆力矩及地面反作用力矩

由图5可知: 在起步阶段, 速度较慢、偏摆力矩较小, 方法 2 中双臂的摆动速度也较慢, 相对于方法 1 和方法 3 平均功率增加不大; 进入周期步行阶段, 随着速度的增大, 偏摆力矩也随之增大, 方法 2 中双臂摆动速度也加快, 平均功率相对于方法 1 和方法 3 的差距则开始增大; 方法 3 通过检测偏摆力矩与当前静摩擦力矩的差值来决定是否基于腿部关节的偏摆力矩控制, 与方法 2 相比, 能有效减少能量消耗。另一方面, 方法 3 相对于方法 1 增加了在线偏摆力矩控制环节, 因而增加了一定的额外能量消耗。详细的平均功率比较结果如表 2 所示。

表2 3种方法平均功率数据

方法	$t = 1.37\text{s}$	$t = 1.97\text{s}$	$t = 2.57\text{s}$	$t = 3.17\text{s}$	平均功率
方法 1	42.25	43.90	44.95	55.17	43.09
方法 2	45.62	50.59	53.41	45.61	49.48
方法 3	45.38	47.03	48.08	48.73	43.19

由表2可见: 方法3比方法1平均功率略微有所增加, 此为克服偏摆力矩影响所带来的额外能耗开销; 方法3与方法2相比, 平均功率下降率约为12.7%左右, 随着机器人质量的增大, 该数字还将更大。

4 结 论

本文提出了一种全新的基于腿部关节角度控制的偏摆力矩控制方法, 该方法通过调节支撑腿关节角度来控制重心下降的加速度, 以达到增大摩擦力矩从而达到保证力矩平衡的目的。与基于双臂摆动或髋关节转动的偏摆力矩控制方法相比, 该方法可应用于无髋关节或无上肢的机器人领域, 具有应用范围广泛的优点。仿真结果表明了该方法的有效性。

参考文献(References)

- [1] Chestnutt J, Lau M, Cheung G, et al. Footstep planning for the Honda ASIMO humanoid[C]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2005: 629-634.
- [2] Alcaraz-Jiménez J J, Herrero-Pérez D, Martínez-Barberá H. Robust feedback control of ZMP-based gait for the humanoid robot Nao[J]. The Int J of Robotics Research, 2013, 32(9/10): 1074-1088.
- [3] 陈贺. 仿人机器人控制系统的研究与实现[D]. 天津: 河北工业大学控制科学与工程学院, 2005.
(Chen H. Development and research for control system of humanoid robot[D]. Tianjin: School of Control Science and Engineering, Hebei University of Technology, 2005.)
- [4] Peterka R J. Comparison of human and humanoid robot control of upright stance[J]. J of Physiology-Paris, 2009, 103(3/4/5): 149-158.
- [5] Ugurlu B, Saglia J A, Tsagarakis N G, et al. Yaw moment compensation for bipedal robots via intrinsic angular momentum constraint[J]. Int J of Humanoid Robotics, 2012, 9(4): 1-27.
- [6] Xing D P, Su J B. Arm/trunk motion generation for humanoid robot[J]. Science in China, Series F: Information Sciences, 2010, 53(8): 1603-1612.
- [7] Vukobratović M, Borovac B, Potkonjak V. ZMP: A review of some basic misunderstandings[J]. Int J of Humanoid Robotics, 2006, 3(02): 153-175.
- [8] Vukobratović M, Borovac B. Zero-moment point—thirty five years of its life[J]. Int J of Humanoid Robotics, 2004, 1(1): 157-173.
- [9] 付根平, 陈建平, 杨宜民. 基于双臂摆动的仿人机器人偏摆力矩矫正方法[J]. 机器人, 2012, 34(4): 498-504.
(Fu G P, Chen J P, Yang Y M. A yaw moment counteracting method for humanoid robot based on arms swinging[J]. Robot, 2012, 34(4): 498-504.)
- [10] 付根平, 杨宜民, 黄春林. 基于粒子群优化算法的双足机器人步态优化[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(增2): 355-358.
(Fu G P, Yang Y M, Huang C L. Walking pattern optimization based on particle swarm optimization for biped robot[J]. J of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(S2): 355-358.)
- [11] 王丽杨, 刘治, 曾小杰, 等. 基于能效优化的两足机器人步态控制方法[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(5): 667-674.
(Wang L Y, Liu Z, Zeng X J, et al. Gait control based on energy-efficiency optimization for biped robots[J]. Control Theory & Application, 2011, 28(5): 667-674.)
- [12] 蔚伟, 包钢, 王祖温, 等. 基于腰关节力矩补偿的仿人机器人快速步行模式生成[J]. 机器人, 2010, 32(2): 219-225.
(Yu W, Bao G, Wang Z W, et al. Fast walking pattern generation for humanoid robot using waist joint moment compensation[J]. Robot, 2010, 32(2): 219-225.)
- [13] 闵颖颖, 刘允刚. Barbalat引理及其在系统稳定性分析中的应用[J]. 山东大学学报, 2007, 37(1): 51-55.
(Min Y Y, Liu Y G. Barbalat Lemma and its application in analysis of system stability[J]. J of Shandong University, 2007, 37(1): 51-55.)

(责任编辑: 孙艺红)