

DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.2014.0604

基于 ZMP 的类双足步行机构行走稳定性控制

王孝义, 秦建恒, 邱晗, 陈富强, 邱支振

(安徽工业大学 机械工程学院, 马鞍山 243002)

摘要: 针对早期研究的步行机构不能独立稳定行走的缺点, 通过增加平衡装置以及一定的控制策略以实现双足步行机构的稳定行走。在介绍类双足步行机构基本构型及其行走原理的基础上, 详细分析了单足支撑和双足支撑时步行机构的 ZMP 动态位置, 并通过平衡重块的规律移动控制 ZMP 位置使得步行机构在整个行走过程中处于稳定状态; 给出了平衡重块在平衡托盘上的相对运动路径和相对运动规律。最后通过仿真实例验证了行走稳定控制分析的有效性和正确性。

关键词: 类双足步行机构; 稳定行走; 平衡装置; ZMP

中图分类号: TH112

文献标识码: A

文章编号: 1003-8728(2014)06-0802-05

Walking Stability Control of a New Biped-imitating Walking Mechanism Based on ZMP

Wang Xiaoyi, Qin Jianheng, Qiu Han, Chen Fuqiang, Qiu Zhizhen

(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002)

Abstract: There was a typical disadvantage in the early developed biped walking mechanism that it could not walk stably by only one mechanism. Balance device and control strategies were applied on a new Biped-Imitating Walking Mechanism (BIWM) to overcome this shortcoming. On the basis of introducing the basic structure of BIWM and its walking principle, the dynamic position of ZMP of BIWM during single-support phase and double-support phase were analyzed in details. The expected ZMP position, which enables BIWM to walk stably at any time, could be obtained by the controlled movement of balance mass. The relative motion path and motion function of balance mass were presented. Simulation case study was given to verify the availability of walking stability control for BIWM.

Key words: balance device; balancing; biped-imitating walking mechanism; control; controllability; efficiency; mechanisms; motion planning; schematic diagrams; stability; stably walking; ZMP

两足步行机构因对环境有良好的适应性而成为各国学者研究热点^[1]。日本 Furusho 等设计了一个三维空间运动两足步行机构^[2]。加拿大 Tad McGeer 提出一种无膝两足步行机构, 两腿为直杆并各由电机控制其伸缩^[3]。北京交通大学邓孔书提出一种两自由度空间四杆结构实现两足步行^[4]。此外, 仿人机器人则是机构和结构都更为复杂的两足步行系统, 如日本本田公司的 ASIMO^[5]、法国自动化研究所 (INRIA) 的 BIP2000^[6] 以及北京理工大

学的 BRH 系列^[7]等。然而, 仿人机器人的步行腿总体上都属于一种拓扑运动机构, 驱动关节多, 稳定行走的步态规划复杂困难。

在仿生机械研究过程中, 我们发现动物肢体的运动形式本质上都是不对称运动, 并由此提出一种动物运动仿生基础机构——半转机构^[8-9], 同时将其衍生设计成一种类两足步行机构^[10]。由于该机构自身结构原因单独步行时易发生倾覆, 只能通过安装多个步行机构形成步行车辆/平台才得以实现稳定行走。在前期研究基础上进行改进, 提出一种单独能够实现稳定行走的类双足步行机构, 并运用 ZMP (zero moment point: 零力矩点) 法分析其稳定行走的条件, 推导出平衡重块的平面运动规律, 进而给出平衡重块的运动控制模型。

收稿日期: 2012-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50975001) 资助

作者简介: 王孝义 (1970 -), 教授, 博士, 研究方向为仿生机械和数字化设计与制造等, wangxy_ahut@yahoo.com

1 类双足步行机构的基本构型及其行走原理

步行机构的基本构型如图1所示。腿杆分布在机架两侧, 定轮与机架固结, 主轴穿过定轮与一级转臂固结, 动轮则与二级转臂固结, 定轮与动轮位于一级转臂两端并采用传动链连接, 两者齿数比为1:2。定位曲柄与一级转臂等长且平行布置, 可见, 定位曲柄、一级转臂、弯头定位杆和机架共同构成双曲柄机构。当主轴驱动一级转臂转动 θ 角时, 二级转臂同向转动 $\theta/2$, 腿杆则同向转动 $\theta/4$ 。需要指出的是, 腿杆的转动由其对称中心点移动、弯头定位杆平移和滑块滑动等运动综合作用形成^[10]。随着一级转臂、二级转臂和腿杆转动的进行, 腿杆依次完成抬腿、迈腿和落腿的行走动作。由于整个步行机构仅有一个主轴为驱动输入, 因此其实质上是一个单自由度步行机构。

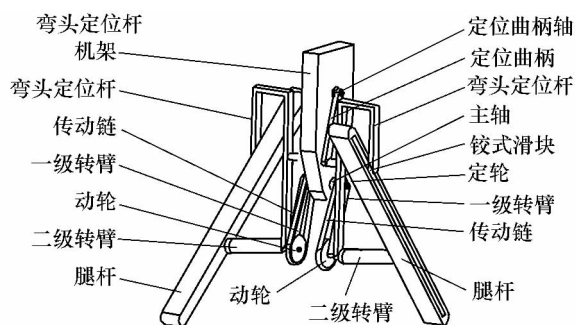


图1 步行机构的基本构型

若采用图1基本构型的步行机构直接行走不可避免地会出现左右、前后倾覆失稳现象。为了实现机构的稳定行走, 采取以下措施:

- 1) 在腿杆两端安装步行足以增加脚掌与地面接触面积, 踝关节采用弹性连接。
- 2) 在机架上部增设平衡装置。平衡装置主要由平衡重块及其托盘组成, 平衡重块在平衡托盘上可作平面运动。面向稳定行走的步行机构如图2所示。

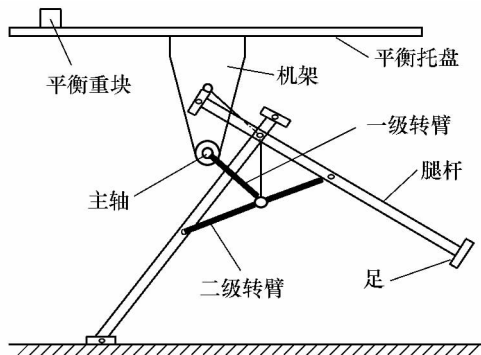


图2 面向稳定行走的类双足步行机构

2 基于 ZMP 的类双足步行机构行走稳定性及其控制

步行机构在平地上行走规律呈现周期性。每行走一步(称为行走周期)历经双足支撑和单足支撑两个阶段。设行走周期 T 内双足支撑时间为 t_d , 单足支撑时间为 t_s , 则 $t_d + t_s = T$ 。通常 t_d 较短。在双足支撑阶段, 前足即将完全接触地面(简称着地足), 后足则即将离开地面(简称离地足)。

作用在步行机构上的外力有主动力与地面的约束力(法向反力与切向摩擦力), 但分析步行机构行走的动态稳定性时, 只需考虑主动力和机构自身的惯性力。如果主动力与惯性力的合力作用线与步行机构的着地足围成的支承面相交, 则步行机构就是动态稳定的。据此最早由南斯拉夫 Vukobratovic 提出 ZMP 的概念, 这是判断双足步行机器人稳定行走的重要依据^[11]。ZMP 实质上是支承地面上的一点, 稳定行走时步行机构上的所有主动力与惯性力对该点的合力矩为零。步行机构稳定行走时, 单足支撑阶段 ZMP 点必须落在脚掌范围内; 双足支撑阶段 ZMP 点则应位于两只脚掌形成的凸多边形内。本文通过平衡重块的平面移动来控制 ZMP 点位置。

2.1 单足支撑时步行机构的 ZMP 位置及稳定性控制

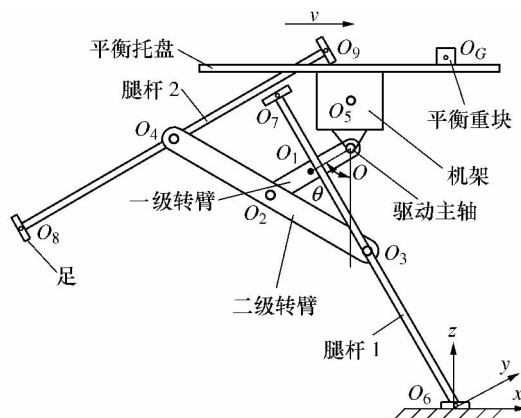


图3 步行机构连杆模型

为方便分析, 将类双足步行机构简化为连杆模型。如图3所示, 以支撑足与地面接触形成的多边形中心为原点、步行机构行进方向为 x 轴建立全局坐标系。设步行机构的一级转臂、二级转臂、两条腿杆、机架、4个步行足的质心位置、质量大小和惯性矩分别为 $O_i(x_i, y_i, z_i)$ 、 m_i 、 N_i ($i = 1, 2, \dots, 9$)。平衡重块 G 的质心位置和质量分别为 $O_G(x_G, y_G, z_G)$ 和 m_G 。一级转臂、二级转臂和腿杆长度分别为 a 、 $2b$ 和 $2c$; O 为驱动主轴中心, ω 为主轴转速。根据达朗贝尔定理, 将步行机构行走时所受的主动力和惯性

力向坐标系的原点简化,得到 X 、 Y 、 Z 方向的力与力矩分别为

$$F = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = - \sum_{i=1}^9 m_i \begin{bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{y}_i \\ \ddot{z}_i + g \end{bmatrix} - m_G \begin{bmatrix} \ddot{x}_G \\ \ddot{y}_G \\ \ddot{z}_G + g \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = - \sum_{i=1}^9 m_i \begin{bmatrix} (\ddot{z}_i + g) y_i - \ddot{y}_i z_i \\ \ddot{x}_i z_i - (\ddot{z}_i + g) x_i \\ \ddot{y}_i x_i - \ddot{x}_i y_i \end{bmatrix} -$$

$$m_G \begin{bmatrix} (\ddot{z}_G + g) y_G - \ddot{y}_G z_G \\ \ddot{x}_G z_G - (\ddot{z}_G + g) x_G \\ \ddot{y}_G x_G - \ddot{x}_G y_G \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^9 \begin{bmatrix} N_{ix} \\ N_{iy} \\ N_{iz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{Gx} \\ N_{Gy} \\ N_{Gz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

令类双足步行机构行走过程中的 ZMP 位置为 $(x_{ZMP}, y_{ZMP}, 0)$, 以 ZMP 点为矩心, 在稳定行走时主动力和惯性力绕 x 和 y 轴的倾覆力矩为 0, 即有

$$\begin{cases} M_x - F_z y_{ZMP} = 0 \\ M_y + F_z x_{ZMP} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

联立式 (1) ~ (3) 得

$$\begin{cases} x_{ZMP} = -\frac{M_y}{F_z} = \frac{\sum_{i=1}^9 m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_{i=1}^9 m_i \ddot{x}_i z_i + m_G (\ddot{z}_G + g) x_G - m_G \ddot{x}_G z_G + \sum_{i=1}^9 N_{iy} + N_{Gy}}{\sum_{i=1}^9 m_i (\ddot{z}_i + g) + m_G (\ddot{z}_G + g)} \\ y_{ZMP} = \frac{M_x}{F_z} = \frac{\sum_{i=1}^9 m_i (\ddot{z}_i + g) y_i - \sum_{i=1}^9 m_i \ddot{y}_i z_i + m_G (\ddot{z}_G + g) y_G - m_G \ddot{y}_G z_G + N_{Gx}}{\sum_{i=1}^9 m_i (\ddot{z}_i + g) + m_G (\ddot{z}_G + g)} \end{cases} \quad (4)$$

当步行机构缓慢行走时, 惯性力很小可忽略不计, 则其 ZMP 位置为

$$\begin{cases} x_{ZMP} = -\frac{M_y}{F_z} = \frac{\sum_{i=1}^9 m_i g x_i + m_G g x_G}{\sum_{i=1}^9 m_i g + m_G g} \\ y_{ZMP} = \frac{M_x}{F_z} = \frac{\sum_{i=1}^9 m_i g y_i + m_G g y_G}{\sum_{i=1}^9 m_i g + m_G g} \\ z_{ZMP} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: 步行机构各构件质心位置 (x_i, y_i, z_i) 随着行走时间 t 的推移而变化。机架的质心位置为

$$\begin{cases} x_s = a \cos \left(\frac{1}{2} \pi - \omega(t - k(t_s + t_d)) \right) - \\ b \cos \left(\frac{1}{2} \omega(t - k(t_s + t_d)) \right) + \\ c \cos \left(\frac{3}{4} \pi - \frac{1}{4} \omega(t - k(t_s + t_d)) \right) \\ y_s = \frac{d}{2} \\ z_s = a \sin \left(\frac{1}{2} \pi - \omega(t - k(t_s + t_d)) \right) + \\ b \sin \left(\frac{1}{2} \omega(t - k(t_s + t_d)) \right) + \\ c \sin \left(\frac{3}{4} \pi - \frac{1}{4} \omega(t - k(t_s + t_d)) \right) + h \end{cases}$$

式中: k 为行走周期序数; h 为机架质心与主轴在 Z 方向上的距离。

为了实现单足支撑时步行机构稳定行走, 约定 ZMP 点和支撑足与地面接触形成的多边形中心重合, 则由式 (5) 进一步得到平衡重块的平面移动规律为

$$\begin{cases} x_G = -\frac{\sum_{i=1}^9 m_i x_i}{m_G} \\ y_G = -\frac{\sum_{i=1}^9 m_i y_i}{m_G} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 双足支撑时步行机构的 ZMP 位置及稳定性控制

如图 4 所示, 在双足支撑阶段, 离地足与着地足同时与地面接触, P_1 、 P_2 为两足中心, l 、 d 分别为两足在 X 、 Y 方向的投影距离。显然 P_1 是步行机构离地足单足支撑时 ZMP 所在位置。

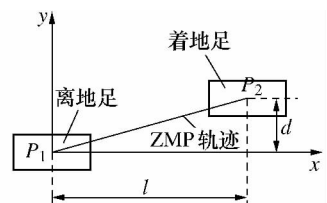


图4 双足支撑阶段 ZMP 移动轨迹

为了实现着地足即将单足支撑时步行机构能够稳定行走, ZMP 位置应该在双足支撑间隔内由 P_1 迅速移动至 P_2 。当 ZMP 到达 P_2 时, 离地足刚好脱离地面。为了实现稳定行走, 步行机构在双足支撑阶段的 ZMP 运动规律应为

$$\begin{cases} x_{ZMP} = \frac{l}{t_d} [t - k(t_s + t_d) - t_s] \\ y_{ZMP} = \frac{d}{t_d} [t - k(t_s + t_d) - t_s] \end{cases} \quad (7)$$

联立式(5)和(7)得双足支撑阶段平衡重块的平面移动规律为

$$\begin{cases} x_G = \frac{l(\sum_{i=1}^9 m_i + m_G)}{m_G t_d} [t - k(t_s + t_d) - t_s] - \sum_{i=1}^9 \frac{m_i x_i}{m_G} \\ y_G = \frac{d(\sum_{i=1}^9 m_i + m_G)}{m_G t_d} [t - k(t_s + t_d) - t_s] - \sum_{i=1}^9 \frac{m_i y_i}{m_G} \end{cases} \quad (8)$$

3 面向行走稳定控制的平衡重块相对运动规划

由上述平衡重块平面移动规律可知: 1) 在单足支撑阶段, y_G 恒定, x_G 则随时间变化而变化, 因此只需控制平衡重块在 X 方向(即步行机构行进方向)的运动; 2) 在双足支撑阶段, x_G 和 y_G 均随时间变化, 故需同时控制平衡重块在 X 和 Y 两个方向的运动。需要指出的是, 上述平衡重块平面移动规律是以地面为参考系的, 其实质是平衡重块在平衡托盘上相对机架的运动以及机架自身运动的合成。为了便于控制平衡重块实现预期的运动规律, 还应进一

步规划出平衡重块在平衡托盘上的相对运动路径和相对运动规律。

3.1 平衡重块在平衡托盘上的相对运动路径

图5为步行机构两个行走周期步态及其对应的平衡重块运动控制路径分布。起步前, 腿1为右前腿, 腿2为左后腿。在腿2抬起瞬间, 平衡重块在托盘上位于腿1右前方A处(即腿1单足支撑时平衡重块的极限位置一), 如图5b)所示。随着腿2抬腿、落腿等迈步动作的进行, 平衡重块沿行走方向反向向后直线移动, 腿1也逐渐由右前腿变为右后腿。当腿2足部与地面接触瞬间, 平衡重块在托盘上移动至腿1右后方B处(即腿1单足支撑时平衡重块的极限位置二), 步行机构进入双足支撑阶段。此时步行机构暂停迈步动作, 平衡重块则在托盘上由B处直线移动至腿2的左前方C处(即腿2单足支撑时平衡重块的极限位置一)。随后腿1开始抬腿进行迈步动作, 与腿2迈步时类似, 平衡重块在托盘上沿行走方向反向向后直线移动至D处(即腿2单足支撑时平衡重块的极限位置二)。在下一次换腿迈步前, 平衡重块由D处直线移动至A处, 从而形成封闭的相对运动路径, 如图5b)所示。不难看出, 当步行机构完成两个行走周期的稳定行走, 平衡重块沿着图5b)的箭头方向完成封闭路径的一次遍历。

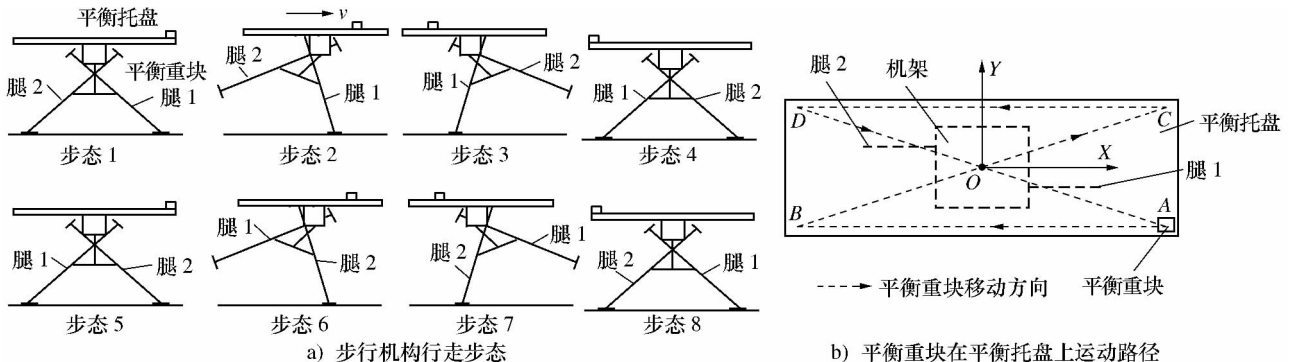


图5 步行机构稳定行走步态及其平衡装置控制策略

平衡重块在平衡托盘上的极限位置点A、B(如图5b)示)间距 L_{AB} 通过任意两个连续行走周期内平衡重块和机架的绝对位置求得, 即: $L_{AB} = 2\max(x_G - x_5)$ 。以平衡托盘中心(与机架中心在地面上投影重合)为原点、步行机构行进方向为 x' 轴, 建立如图5b)所示的局部坐标系 $O'x'y'$ 。考虑步行机构的对称性, 进一步可得到A点在局部坐标系中的位置

$$\begin{cases} x'_A = L_{AB}/2 \\ y'_A = y_G - y_5 \end{cases}$$

式中: y_G 和 y_5 分别为单足支撑阶段平衡重块和机架的绝对位置坐标。同理可求出B、C和D点在局部坐标系中的位置。

3.2 平衡重块在平衡托盘上的相对运动规律

平衡重块在局部坐标系中的位置变化实质上就是平衡重块在平衡托盘上的相对运动规律, 可通过相对运动求得, 即

$$\begin{cases} x'_G = x_G - x_5 \\ y'_G = y_G - y_5 \end{cases}$$

式中: x_G 、 y_G 、 x_5 和 y_5 分别为单足或双足支撑阶段平衡重块和机架的绝对位置坐标。

4 实例分析与验证

采用UG NX建立类双足步行机构的虚拟样机, 一

级转臂长 150 mm, 二级转臂长 400 mm, 腿杆长 870 mm, 两腿杆足端距离 $d = 240$ mm, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5 以及单个步行足的质量分别为 0.125 kg、0.304 kg、0.708 kg、0.708 kg、1.5 kg、0.1 kg。取主轴转速 $\omega = 0.5 \pi/s$, 对步行机构行走过程进行运动学仿真。

仿真分析时将平衡重块在平衡托盘上的相对运

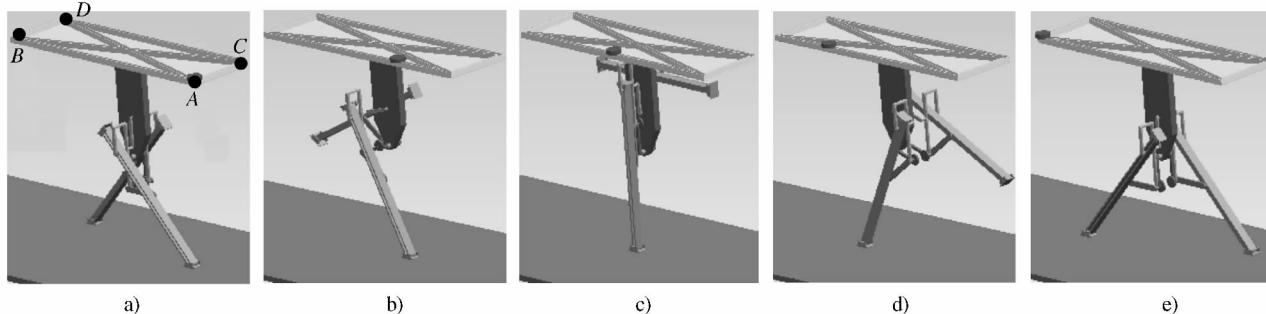


图6 步行机构稳定行走示意图

5 结论

新型类双足步行机构通过平衡装置实现双足稳定行走。将步行机构行走过程分为单足支撑阶段和双足支撑阶段,通过 ZMP 动态位置的预期规划,得出步行机构平衡重块在单、双足支撑阶段的相对于地面的平面运动规律;进一步规划出平衡重块在平衡托盘上的相对运动路径和相对运动规律;虚拟样机实例验证了步行机构行走稳定性及其控制理论推导的正确性。

[参考文献]

- [1] 包志军,马培荪,姜山,等.从两足机器人到仿人型机器人的研究历史及其问题[J].机器人,1999,21(4):313-320
Bao Z J, Ma P S, Jiang S, et al. The problem and the research history from biped robot to humanoid robot[J]. Robot, 1999, 21(4): 313-320 (in Chinese)
- [2] Furusho J, Sano A. Sensor-based control of a nine-link biped[J]. International Journal of Robotics Research, 1990, 9(2): 83-98
- [3] McGeer T. Passive dynamic walking[J]. International Journal of Robotics Research, 1990, 9(2): 62-82
- [4] 邓孔书,姚燕安,查建中.一种空间四杆两足步行机构的研究[J].工程设计学报,2005,12(6):363-365
Deng K S, Yao Y A, Zha J Z. Research on spatial four-bar biped mechanism[J]. Journal of Engineering Design, 2005, 12(6): 363-365 (in Chinese)
- [5] Chestnutt J, Lau M, Cheung G, et al. Footstep planning for the honda ASIMO humanoid[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation Barcelona, Spain, 2005: 629-634
- [6] Espiau B, Sardain P. The anthropomorphic biped robot BIP2000[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, 2000: 3996-4001
- [7] 赵晓军,黄强,彭朝琴,等.基于人体运动的仿人型机器人动作的运动学匹配[J].机器人,2005,27(4):358-361
Zhao X J, Huang Q, Peng C Q, et al. Kinematics mapping of humanoid motion based on human motion[J]. Robot, 2005, 27(4): 358-361 (in Chinese)
- [8] 邱晗,王孝义.半转机构——一种运动仿生机构的构成及其基本运动特性[J].机械科学与技术,2011,30(2):600-604
Qiu H, Wang X Y. Half-rotating mechanism: a biomimetic mechanism of animal motion and its basic motion characteristics[J]. Mechanical Science and Technology, 2011, 30(2): 600-604 (in Chinese)
- [9] 邱支振.半转机构:构成、特性、应用[M].合肥:中国科技大学出版社,2011
Qiu Z Z. Half-rotating mechanism: structure, characteristics and application[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2011 (in Chinese)
- [10] 王孝义,梅林林,陈富强,等.类两足步行机构及其运动特征分析与应用[J].机械科学与技术,2011,30(6):1020-1024
Wang X Y, Mei L L, Chen F Q, et al. Analysis and application of motion geometry feature for a new biped-imitating walking mechanism[J]. Mechanical Science and Technology, 2011, 30(6): 1020-1024 (in Chinese)
- [11] Vukobratovic M, Borovac B, Surdilovic D. Zero-moment point-proper interpretation and new applications[C]//Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2001: 237-244