

移动可伸缩三维倒立摆模型的双足机器人步态控制策略

王立权¹, 李恒楠¹, 俞志伟², 韩金华¹

(1. 哈尔滨工程大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所, 江苏 南京 210016)

摘要: 双足机器人的步态控制策略是保证双足稳定行走的重要条件之一。结合人在行走时 ZMP 平稳移动的特性, 建立了一种移动可伸缩三维倒立摆模型; 在约束平面内分析 ZMP 与 COG 的运动关系, 将 ZMP 和 COG 分别定为快变因子和慢变因子, 提出了移动可伸缩三维倒立摆模型的双足机器人步态控制策略; 最后通过 Matlab/ADAMS 进行了步态控制仿真研究。仿真结果表明双足机器人可以稳定地行走, 验证了该步态控制策略的可行性。

关键词: 双足机器人; 三维倒立摆模型; 步态控制策略

中图分类号: TP39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2010)01-0030-05

A gait control strategy of biped robots based on the 3-D inverted pendulum model

WANG Li-quan¹, LI Heng-nan¹, YU Zhi-wei², HAN Jin-hua¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Gait control strategies are an important factor affecting the walking stability of bipedal robots. After analyzing the stable motion of zero moment point (ZMP), we modeled the motion as a scalable 3-D inverted pendulum. The relationship between motion of the ZMP and the center of gravity (CoG) in the constrained plane was analyzed. ZMP was defined as a fast variable, and CoG as a slow variable. With these preconditions, a strategy for controlling bipedal robotic gait could be implemented. It was then simulated using Matlab/ADAMS. The simulation results indicated that this control strategy allows the bipedal robot to walk with good stability, thus verifying the feasibility of the gait control strategy.

Keywords: biped robot; 3-D inverted pendulum model; gait control strategy

近些年来,国内外仿人双足机器人的技术发展迅速,比较著名的仿人双足机器人有日本本田公司最新的 ASIMO^[1]、索尼公司的 QRIO^[2]、东京大学的 H7^[3]、北京理工大学的“汇童”仿人机器人^[4]。双足机器人的步态控制策略是保证双足稳定行走的重要条件之一。目前,双足机器人步态控制策略主要分为2类:一种是基于 ZMP 稳定的步态规划或基于倒立摆模型的步态生成,得到具有稳定性的行走步态轨迹,然后通过跟踪生成的各关节位置轨迹实现双足行走^[5-6];另一种是基于桌子—小车模型的预观控

制,规划期望的理想 ZMP 轨迹,通过上身的位置调整或上身加速度调整,对 ZMP 的轨迹进行跟踪控制^[7]。第1类控制策略直接跟踪规划后的理想运动轨迹实现稳定行走,由于缺乏一定的抗干扰能力或不具有鲁棒性,很难保持稳定行走;第2类控制策略可以实现行走的步态控制,但桌子的支撑脚相对于小车的行走范围太小,当小车走向边沿整个系统会失去控制。

在人的整个行走步态中,零力矩点 ZMP (zero moment point) 是随支撑区域的变化而移动的,而且双足机器人重心 COG (center of gravity) 在空间的运动也是多样的。本文提出一种基于移动可伸缩三维倒立摆模型的双足机器人步态控制策略,通过调整双足机器

人 ZMP 位置来跟踪 COG 位置,并根据伸缩杆的驱动力对双足机器人各关节力矩进行补偿;通过 Matlab/ADAMS 进行步态控制策略的仿真研究。

1 双足机器人 HEUBR_1

双足机器人 HEUBR_1 如图 1 所示。下肢具有 14 个自由度,分别为:髋关节 3×2 个、膝关节 1×2 个、踝关节 2×2 个、足趾关节 1×2 个。机器人高 1.5 m,重约 30 kg,表 1 为 HEUBR_1 的基本设计参数^[8-9]。

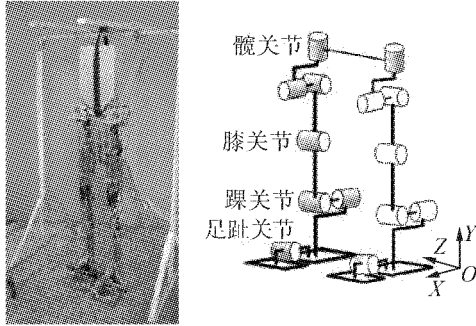


图 1 双足机器人 HEUBR_1 及自由度分配

Fig. 1 Biped robot of HEUBR_1 and DOF distribution

表 1 双足机器人 HEUBR_1 设计参数

Table 1 The parameters of biped robot HEUBR_1

各部名称	长度/m	质量/kg
躯干	0.5	8
腰部	0.5	4
大腿	0.5	4
小腿	0.5	3
后足	0.2	1.5
前足	0.1	0.5

双足机器人在行走过程中足部与地面时而接触时而分离,采用支撑腿作为固定世界坐标系时,在行走过程中通常对步态进行分段分析,使其复杂化,不利于全局规划。

针对双足行走的特殊性,将双足机器人躯干部分的坐标作为动坐标系,进而分析双足行走时单腿支撑和双腿支撑相互替换运动。相对于地面的世界坐标系具有在空间的六自由度运动,可假设为躯干由固定于地面的 6 自由度虚拟机械臂操作控制(空间 3 自由度移动和 3 自由度转动),双足机器人的其他部分相对于躯干的动坐标系通过串联连接。双足机器人多杆模型如图 2 所示, l_{li} 和 l_{ri} 分别为左右腿 i 杆件的长度, m_{li} 和 m_{ri} 分别为左右腿 i 号杆件的质量, l_{lic} 和 l_{ric} 分别为左右腿 i 杆件的相对重心位置, θ_{li} 和 θ_{ri} 分别为左右腿 i 杆件与 $i-1$ 杆之间相对于初始站立状态下的关节转角。

世界坐标系为 Σ_e ,在双足机器人躯干的动坐标系为 Σ_o ,动坐标系为 Σ_o 相对于 Σ_e 的空间位置为

$[x_0, y_0, z_0]$,绕 X_e 、 Y_e 和 Z_e 姿态旋转参数为 $[\alpha_0, \beta_0, \gamma]$, $\chi_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0 \ \alpha_0 \ \beta_0 \ \gamma_0]^T$,即双足机器人的躯干相对于世界坐标的位姿转换矩阵为

$${}^e_0T = \begin{bmatrix} C_\alpha C_\beta & C_\alpha S_\beta S_\gamma - S_\alpha C_\gamma & C_\alpha S_\beta C_\gamma - S_\alpha S_\gamma & x_0 \\ S_\alpha C_\beta & S_\alpha S_\beta S_\gamma + C_\alpha C_\gamma & S_\alpha S_\beta C_\gamma - C_\alpha S_\gamma & y_0 \\ -S_\beta & C_\beta S_\gamma & C_\beta C_\gamma & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据机器人学理论可以建立双足机器人左右腿相邻各关节之间的位姿转换矩阵^[8-9],则各关节相对于世界坐标的位姿转换矩阵为

$${}^e_\mu T = {}^e_0 T_1 {}^0_1 T_2 \dots {}^{j(i-1)}_j T, \quad (2)$$

双足机器人重心表达式:

$${}^e P_{cog} = \frac{{}^e_0 T_0 P_{oc} m_0 + \sum_{li} {}^e T_{li} P_{ic} m_{li} + \sum_{ri} {}^e T_{ri} P_{ic} m_{ri}}{m_0 + \sum m_{li} + \sum m_{ri}}. \quad (3)$$

式中: ${}^li P_{ic}$ 和 ${}^ri P_{ic}$ 分别为左腿和右腿的第 i 杆件质心相对于自身动坐标位置。

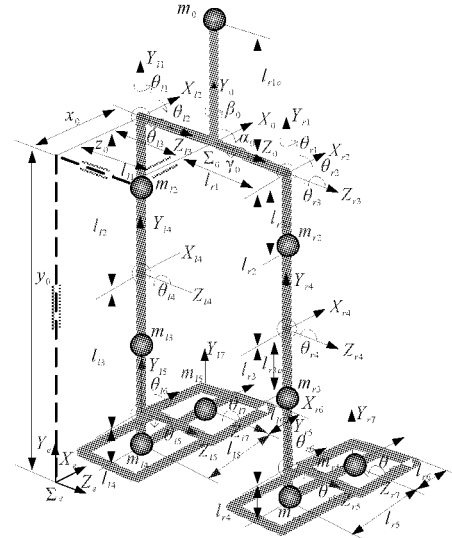


图 2 双足机器人多杆模型

Fig. 2 Biped robot multi-bar model

2 双足机器人步态控制策略

2.1 移动可伸缩三维倒立摆模型

为简化复杂的双足机器人多杆模型,将双足机器人多杆模型简化为单质点模型。由于双足机器人在行走时实际 ZMP 在水平地面内移动,且 COG 与 ZMP 之间也存在位置变化,采用一种移动可伸缩倒立摆三维模型作为双足机器人的简化模型,如图 3 所示。倒立摆的质心为双足机器人 COG,倒立摆的支撑点为 ZMP,支撑点可在水平面内移动,且伸缩杆可在三维空间内可伸缩摆动,模拟 COG 与 ZMP 的位置变化,简化后更方

便分析双足行走的内在运动机理。

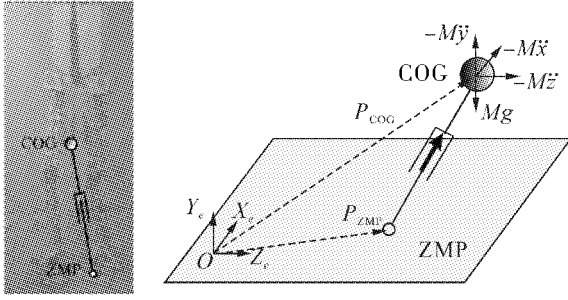


图3 移动可伸缩三维倒立摆模型

Fig.3 3-D model of movable and telescopic inverted pendulum

在世界坐标系 Σ_e 中, COG 的空间位置为: $P_{COG} = [X_e \ Y_e \ Z_e]^T$, ZMP 的空间位置为: $P_{ZMP} = [X_z \ Y_z \ Z_z]^T$, $Y_z = 0$, M 为单质点质量, g 为重力加速度, $\ddot{P}_{COG} = [\ddot{X}_e \ \ddot{Y}_e \ \ddot{Z}_e]$ 为 COG 沿 X_e 、 Y_e 、 Z_e 轴的加速度, F_r 为伸缩杆的驱动力. 分析移动可伸缩倒立摆的受力情况, 可得到如下关系式:

$$\frac{-M\ddot{X}_e}{X_e - X_z} = \frac{-M(g + \ddot{Y}_e)}{Y_e - Y_z} = \frac{-M\ddot{Z}_e}{Z_e - Z_z}, \quad (4)$$

$$F_r = [M\ddot{X}_e \ M(g + \ddot{Y}_e) \ M\ddot{Z}_e]. \quad (5)$$

式中: $F_r = [F_{rx} \ F_{ry} \ F_{rz}]^T$.

由式(4)整理可以得到该模型在侧向面 $X_e O Y_e$ 和前向面 $Y_e O Z_e$ 内的运动关系式:

$$\begin{cases} \ddot{X}_e = \omega^2 (X_e - X_z), \\ \ddot{Z}_e = \omega^2 (Z_e - Z_z). \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\omega = \sqrt{g + \ddot{Y}_e / Y_e}$.

假设 COG 保持在恒定的水平面内, 则 $Y_e = H > 0$ 为恒定值, 同时 $\ddot{Y}_e = 0$, $\omega = \sqrt{g/H}$. 其中, H 值为结

合 ZMP 与 COG 的步态综合稳定性判据下行走步态的稳定裕度^[9]. 该移动可伸缩倒立摆的三维模型可简化为侧向面 $X_e O Y_e$ 和前向面 $Y_e O Z_e$ 内的 2 组线性倒立摆方程. 将式(6)离散化, 得到

$$\begin{cases} X_z(i) = -X_e(i-1) + (\xi+2)X_e(i) - X_e(i+1)/\xi, \\ Z_z(i) = -Z_e(i-1) + (\xi+2)Z_e(i) - Z_e(i+1)/\xi. \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\xi = \omega^2 \Delta t^2$.

设定初始和终止状态后, 可写成 $X_z = J_z X_e$, 可得到 ZMP 和 COG 在离散后的关系矩阵:

$$J_{zc} = \begin{bmatrix} j_1 & j_2 & j_1 \\ & j_1 & j_2 & j_1 \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & j_1 & j_2 & j_1 \\ & & & & j_1 & j_2 & j_1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

式中: $j_1 = -1/\xi$, $j_2 = 1 + 2/\xi$.

2.2 基于移动可伸缩倒立摆模型的步态控制策略

基于 ZMP 与 COG 的运动关系特点, 设定 ZMP 为一个快变因子, 而 COG 为一个慢变因子, 不需要精确控制 ZMP 轨迹, 在有效稳定范围内主动调整 ZMP 实现对 COG 的位置跟踪控制. 针对 ZMP 在有效稳定范围的调整, 对足部的踝关节和足趾关节进行力矩限定, 同时将伸缩杆的驱动力作为实际多杆模型下各关节驱动补偿力矩. 根据双足机器人的步态综合稳定性判据实时调整 ZMP 的有效稳定范围, 在失稳状态下重新调整步态参数, 改变支撑区域以保持步态重新稳定. 双足机器人的步态控制框图如图 4 所示.

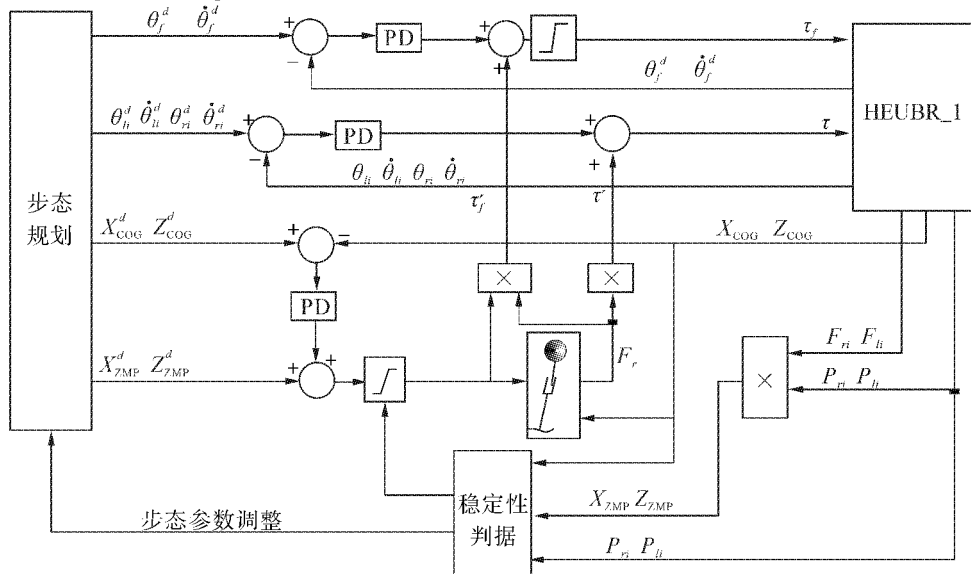


图4 双足机器人步态控制框图

Fig.4 Biped robot gait control diagram

结合离线规划的拟人稳定行走的步态数据(包括各关节角度和角速度、COG 轨迹、ZMP 轨迹等)作为控制的目标数据,通过对关节 PD 位置跟踪和移动可伸缩倒立摆伸缩杆驱动力在各关节上的力矩补偿,同时对足部的踝关节和足趾关节进行力矩限定,防止出现足底发生倾覆,基于双足机器人反馈的足底压力信号检测 ZMP/COP 位置及支撑区域,结合稳定性判据对 ZMP 有效区域限定,通过对足底 ZMP 的位置调整,实现对双足机器人 COG 的稳定跟踪,根据 COG 的跟踪状况,当基于稳定性判据表明双足机器人处于不稳定状态时,采用改变规划步态的参数实现对支撑面的改变,使双足机器人再次保持稳定。

对 ZMP 的位置采用 PD 调整,并做了上下值限定,如式(9)和(10)所示:

$$\ddot{X}_z = \ddot{X}_z^d - k_{PX}(\dot{X}_c - \dot{X}_c^d) - k_{DX}(\dot{X}_c - \dot{X}_c^d), \quad (9)$$

$$\ddot{Z}_z = \ddot{Z}_z^d - k_{PZ}(\dot{Z}_c - \dot{Z}_c^d) - k_{DZ}(\dot{Z}_c - \dot{Z}_c^d). \quad (10)$$

式中: k_{PX} 和 k_{PZ} 分别为 X 和 Z 方向的比例增益, k_{DX} 和 k_{DZ} 分别为 X 和 Z 方向的微分增益, $x_{z\max}$ 、 $X_{z\min}$ 、 $Z_{z\min}$ 和 $Z_{z\max}$ 分别为支撑区域前后左右的极值, $X_{z\min} < X_z < X_{z\max}$, $Z_{z\min} < Z_z < Z_{z\max}$ 。

基于移动可伸缩倒立摆的伸缩杆的驱动力:

$$\mathbf{F}_r = [Mg(\dot{X}_c - \dot{X}_z)/H \quad Mg \quad Mg(\dot{Z}_c - \dot{Z}_z)/H]^T. \quad (11)$$

对各个关节进行力矩补偿的 PD 关节位置控制:

$$\begin{cases} \tau_{ri} = k_{pri}\sigma_{ri} - k_{dri}\dot{\varphi}_{ri} + \mathbf{F}_r \times ({}^e\mathbf{P}_{ri} - [X_z \ 0 \ Z_z]^T), \\ \tau_{li} = k_{pli}\sigma_{li} - k_{dli}\dot{\varphi}_{li} + \mathbf{F}_r \times ({}^e\mathbf{P}_{li} - [X_z \ 0 \ Z_z]^T). \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\sigma_{ri} = (\theta_{ri} - \theta_{ri}^d)$; $\varphi_{ri} = (\dot{\theta}_{ri} - \dot{\theta}_{ri}^d)$; $\sigma_{li} = (\theta_{li} - \theta_{li}^d)$; $\varphi_{li} = (\dot{\theta}_{li} - \dot{\theta}_{li}^d)$; τ_{ri} 和 τ_{li} 分别对应的右腿和左腿的第 i 关节驱动力矩, θ_{ri}^d 和 θ_{li}^d 分别为右腿和左腿第 i 关节的控制角度值, $\dot{\theta}_{ri}^d$ 和 $\dot{\theta}_{li}^d$ 分别为右腿和左腿第 i 关节的控制角速度值, ${}^e\mathbf{P}_{ri}$ 和 ${}^e\mathbf{P}_{li}$ 分别为右腿和左腿第 i 关节转动轴位置向量。

3 仿真模型及仿真分析

在步态控制的仿真中,必须针对与实际双足机器人 HEUBR_1 相一致的仿真对象,为此在 ADAMS 仿真环境中建立了详尽的双足机器人 HEUBR_1 的多杆模型,如图 5 所示,各杆件的尺寸、质量参数通过在 Pro/E 零件建模后导入 ADAMS 中装配,即建立了与实际双足机器人的尺寸、质量、传动方式相一致的虚拟样机模型^[9]。为增加步态控制实现的可行性,在 Matlab/SimMechanics 中搭建控制模块,结合离散规划的拟人稳定行走的步态数据(包括各关节角度和角速度、COG 轨迹、ZMP 轨迹等)作为控制的目标数据,通过 ADAMS/Controls 接口模块链接 2 种软件,实现 Matlab 中控制算法输出和 ADAMS 中运

动仿真中信息传输。

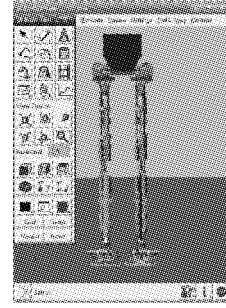


图 5 双足机器人的 ADAMS 仿真模型

Fig. 5 Biped robot ADAMS Simulation model

定义了足底面各个接触点与地面的接触力参数,如图 6 所示,使双足机器人与地面接触时具有较为稳定的接触力和足够的静摩擦力,较好地模拟了实际双足机器人行走时与平整地面接触碰撞的特性。通过步态控制,在地面上完成了步态在步幅为 0.2 m 下的拟人行走,调整参数 $k_{PX} = 1.5$ 、 $k_{DX} = 1$ 、 $k_{PZ} = 1.0$ 、 $k_{DZ} = 0.5$ 、 $H = 0.85$ m、 $d_{\min} = 0.02$ m、 $k_{pri} = k_{pli} = 100$ 、 $k_{dri} = k_{dli} = 5$ 。从双足机器人行走过程中的步态侧面和前向面的运动截图,如图 7 所示,可以看出双足机器人可以稳定行走。

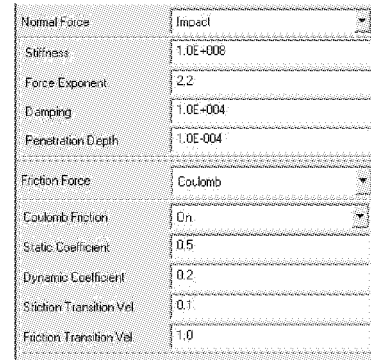
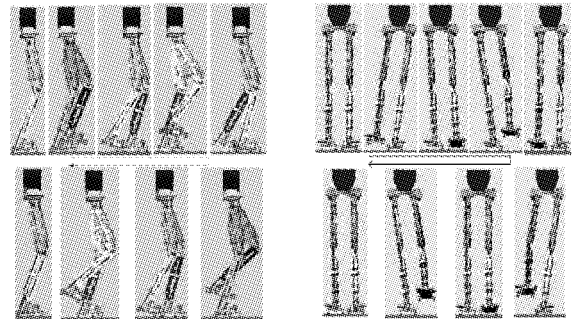


图 6 ADAMS 中足底力参数设定

Fig. 6 The foot pressure parameter setting in ADAMS



(a) 侧面内行走步态 (b) 前向面行走步态

图 7 双足机器人行走步态

Fig. 7 Biped robot walking gait

如图 8 双足机器人 COG 运动轨迹可知,在该步态方式下行走中给定的 COG 轨迹,与实际 COG 运动仿真结果的总体运动趋势相一致,实际 COG 轨迹与给定轨迹相比欠光滑,但仍能保证 COG 在空间

的平稳运动。

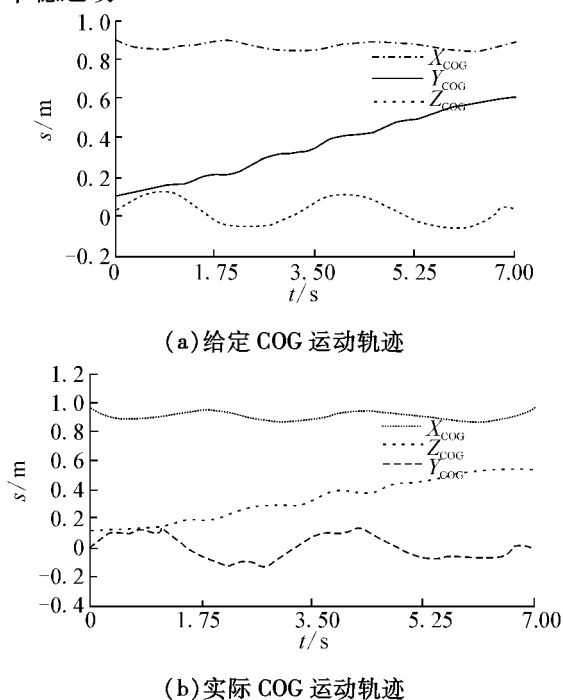


图8 双足机器人COG运动轨迹

Fig. 8 Biped robot COG motion trajectory

4 结束语

本文对双足机器人 HEUBR_1 的多杆模型进行了运动学分析,推导出了双足机器人的重心表达式.结合人行走时 ZMP 平稳移动的特点,建立了一种移动可伸缩倒立摆模型.在约束平面内分析 ZMP 与 COG 的运动关系,将 ZMP 和 COG 分别定为快变因子和慢变因子,提出了基于移动可伸缩倒立摆模型的步态控制策略,将伸缩杆的驱动力作为实际多杆模型下关节驱动力矩补偿.通过 Matlab/ADAMS 的联合步态仿真,实现了步幅 0.2m 时机器人步态的稳定行走,验证了该步态控制方法是可行的.

参考文献:

- [1] CHESTNUTT J, LAU M, CHEUNG G, et al. Footstep planning for the Honda ASIMO humanoid[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, Spain, 2005: 629-634.
- [2] ENDO G, NAKANISHI J, MORIMOTO J, et al. Experimental studies of a neural oscillator for biped locomotion with QRIO[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, Spain, 2005: 598-604.
- [3] NISHIWAKI K, KAGAMI S, KUNYOSHI Y, et al. Toe joints that enhance bipedal and fullbody motion of humanoid robots[C]//Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington DC, 2002: 3105-3110.
- [4] 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.
- [5] ZHAO Xiaojun, HUANG Qiang, PENG Zhaoqin, et al. Kinematics mapping of humanoid motion based on human motion[J]. Robot, 2005, 27(4): 358-361.
- [6] HONG S, OH Y, CHANG Y, et al. An omni-directional walking pattern generation method for humanoid robots with quartic polynomials[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego, USA, 2007: 4207-4213.
- [7] ERBATUR K, KURT O. Humanoid walking robot control with natural ZMP references[C]//The 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Paris, France, 2006: 4100-4106.
- [8] KAJITA S, KANEHIRO F, KANEKO K, et al. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei, China, 2003: 14-19.
- [9] WANG Liqun, YU Zhiwei, HE Feng, et al. Research on biped robot gait in double-support phase[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China, 2007: 1553-1558.
- [10] WANG Liqun, YU Zhiwei, LI Hengnan. Study on optimal design for two DOF parallel ankle joint mechanism of a biped robot[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Takamatsu, Kagawa, Japan, 2008: 155-160.

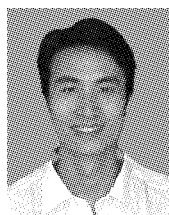
作者简介:



王立权,男,1957年生,教授,博士生导师,海洋智能机械研究所所长,主要研究方向为机器人技术.承担国家自然科学基金项目2项,“863”重大项目资助项目2项,国家基础研究项目2项,黑龙江省自然科学基金重点项目2项.发表学术论文40余篇,获国家发明专利15项.



李恒楠,男,1983年生,硕士研究生,主要研究方向为双足仿人机器人结构及其步态控制.



俞志伟,男,1980年生,博士研究生,主要研究方向为双足机器人拟人步态规划与控制研究.