

无动力双足步行机器人控制策略与算法

刘振泽¹, 田彦涛¹, 张佩杰¹, 周长久²

(1. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 新加坡理工学院 先进机器人与智能控制研究中心, 新加坡 139651)

摘要: 本文研究无动力双足步行机器人的建模、分析与控制问题. 基于能量的控制增加了机器人行走极限环的稳定性、鲁棒性, 扩大了极限环的收敛域; 角度不变控制使机器人的稳定行走步态摆脱了地面倾斜角度的限制; 把基于能量的控制与角度不变控制结合起来, 可以实现在不同倾斜角度地面上行走模式的切换. 基于能量的行走平均速度控制方法在平均速度与目标能量之间建立了联系, 能使机器人的行走产生新的稳定步态. 最后, 对无动力双足步行机器人的研究前景做了展望.

关键词: 无动力双足步行机器人; 角度不变控制; 能量控制; 极限环

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Control strategies and algorithms for passive compass-like biped robot

LIU Zhen-ze¹, TIAN Yan-tao¹, ZHANG Pei-jie¹, ZHOU Chang-jiu²

(1. Institute of Automation, Jilin University, Changchun Jilin 130022, China;

2. Centre for Advanced Robotics & Intelligent Control, Singapore Polytechnic, 139651, Singapore)

Abstract: The modeling and control for the compass-like biped robot are studied through analysis and numerical simulation. The energy-based control strategy is presented to improve the stability and robustness of the biped locomotion and extend the attraction region of the limit cycle. The slope-invariance control law is then designed to make the biped locomotion invariable to different slopes. Switching between different models for different slopes can be realized by combining the slope-invariance control law with the energy-based control strategy. The average-speed control based on the desired-energy control relates the average moving speed with the desired energy level and introduces a new type of stable limit cycle in the robot's walking. Finally, the future development of the control of compass gait biped is discussed.

Key words: compass gait biped robot; slope invariance law; energy based control; limit cycle

1 引言(Introduction)

双足机器人的研究是国内外机器人领域的研究热点之一, 它涉及到机器视觉、传感器信息融合、机械设计与加工、人工智能、仿生学等多种学科^[1]. 双足机器人是一个复杂的机械系统, 腿数少, 自由度高, 动力学特性复杂, 其行走运动具有欠驱动与不稳定特性, 这给双足机器人行走的动态分析与控制带来了很大的困难^[2]. 目前, 双足机器人的行走控制仍然是一个没有完全解决的问题, 包括双足行走的稳定性、高效率 and 适应性^[3].

在双足机器人行走控制的研究中, 基本的思路可以分为基于参考轨迹的控制方法和基于模型的动态控制方法^[4]. 基于参考轨迹的方法是双足机器

人控制中较为常用的算法, 它首先通过学习人类双足行走的步态数据、特征(基于仿生学的原理)^[5]或按照某种稳定性判据(例如, 零力矩点判据, ZMP; 中心压力判据, COP等)^[6,7]离线规划机器人的各个关节的运动轨迹, 通过控制各关节的实时力矩使各个关节按照事先规划好的参考轨迹运动. 该方法能控制机器人完成复杂的动作, 算法实现较为复杂, 效率低(只有人类行走效率的1/10), 不能深入地揭示双足行走稳定性、适应性、高效率的内在机理. 基于模型的动态控制方法主要借鉴已有的物理模型, 对双足机器人的行走模型进行简化, 如倒立摆模型^[8], 被动步态模型^[9], 质量弹簧模型^[10]等控制模型. 基于模型的动态控制方法能从一定的角度揭示了双足步行及

其控制的原理,但普适性差.

其中,被动步态模型大大简化了双足行走机构,通过它来研究双足运动的内在固有特点,能揭示双足行走高效率、稳定性的内在机理,对发展双足步行基础理论具有重要的意义.被动步态模型所揭示的双足行走被动力学理论为双足机器人行走控制的研究提供了新的思路.

双足行走的被动动力学理论最早由加拿大大学者Tad McGeer提出^[9],他建立了双足机器人被动步态模型,并设计了一类简单的无膝被动行走机器人.在双足机器人的完全被动行走模式下,机器人不依靠任何主动控制,仅依靠重力驱动就能够在倾斜地面上稳定行走.除了简单结构的被动行走机器人,Tad McGeer还对具有更复杂结构的被动机器人进行了研究^[11].为了使无动力双足步行机器人能实现更稳定、更复杂、适应性更强的行走,需要对机器人进行控制.Mark Spong^[12],Goswami^[13],Collins^[14]和Garcia^[15]都分别对无动力双足步行机器人的动态分析与控制进行了研究.Spong,Goswami首次提出了无动力双足步行机器人的主动反馈控制方法^[16].Spong主要采用基于被动非线性控制以解决步态行走的角度不变性问题;Ohta^[17]也给出了相关的研究成果;Goswami也提出了对髋关节与踝关节分别或同时进行扭矩控制的方法进行能量追踪控制^[13].

本文主要针对以下几种控制策略进行了研究:1)基于能量的控制方法^[18],利用行走步态周期摆动阶段机械能守恒的性质,控制机器人的能量收敛到参考目标极限环的能量值,从而使机器人行走步态收敛到稳定极限环,增加其对自身不确定性与外界干扰的适应性,提高机器人行走步态的稳定性;2)基于角度不变的控制方法^[12],可以有效地扩大机器人的行走范围,使机器人的行走步态不受地面斜面角度的影响;3)基于能量的角度不变性控制方法.该方法是对上述1)2)方法的结合,在使机器人行走步态不受地面倾斜角度限制的同时,增加了稳定性,从而使机器人步态可以在不同地面角度间进行切换,很大程度上逼近仿人行走步态;4)基于能量行走平均速度控制方法^[13]根据1)中能量控制的思想,在踝、髋关节分别加入控制力矩,同时引入平均行走速度的负反馈,实现了对机器人平均前进速度的控制;5)引入分域控制的思想使得行走步态在不同的模式间切换.

上述控制策略可以增加无动力双足步行机器人行走步态的稳定性,提高机器人对外界干扰和斜面倾角参数变化影响的鲁棒性,为双足机器人的行走控制提供了新的研究思路.

2 无动力双足步行机器人模型(Model of compass-like gait biped)

图1所示为一个简单的无动力双足步行机器人的结构形式.机器人上身简化为点质量,双腿简化为具有点质量 m ,大、小腿总长度为 l 的连杆, a, b 分别为腿的总的等效质心与腿末段、髋关节的距离, θ_{ns} , θ_s 分别为摆动腿、支撑腿与竖直方向的夹角,取逆时针方向为正方向.

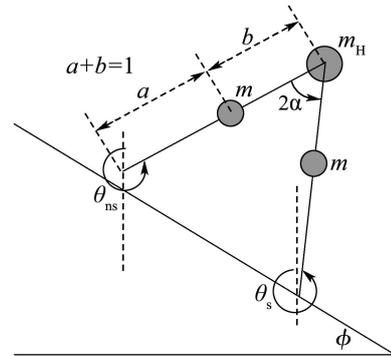


图1 无动力双足步行机器人模型

Fig. 1 Model of the compass-like gait biped

无动力双足步行机器人行走动态的数学描述是一个多模型的混合系统.根据动态特性的不同,机器人的行走过程可以分为两个不同的阶段,单腿支撑的摆动阶段和双腿着地的瞬间碰撞切换阶段.摆动阶段,机器人的动态连续变化,动力学特性可以由微分方程描述;瞬间碰撞切换阶段,机器人的状态发生不连续的变化,一般应用代数映射方程来描述.

摆动阶段,机器人的动态方程可以通过牛顿-拉格朗日原理建立,其具体形式为

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = Bu. \quad (1)$$

其中: $q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{ns} \\ \theta_s \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$, $u = \begin{bmatrix} \mu_H \\ \mu_s \end{bmatrix}$, 向量 $u \in \mathbb{R}^m$ 代表分别在髋关节或踝关节的扭矩加入;当完全无动力行走时, u 为零向量;

$$M(q) = \begin{bmatrix} mb^2 & -mlb \cos(q_2 - q_1) \\ -mlb \cos(q_2 - q_1) & (m_H + m)l^2 + ma^2 \end{bmatrix},$$

$$c(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & mlb \sin(q_2 - q_1)\dot{q}_2 \\ mlb \sin(q_1 - q_2)\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$g(q) = \begin{bmatrix} mgb \sin q_1 \\ -(m_H l + ma + ml)g \sin q_2 \end{bmatrix}.$$

对无动力双足步行机器人的碰撞切换过程,作如下假设:1)碰撞是理想的完全弹性碰撞,满足角动量守恒定理;2)该过程是瞬时完成的,机器人状态发生突变;3)在摆动腿与地面产生碰撞时,支撑腿与地面

之间没有任何的滑动. 这些假设使得在瞬间碰撞切换过程中, 机器人的空间位置保持不变, 摆动腿关于其与地面的接触点的角动量守恒, 碰撞前支撑腿关于髋关节的角动量守恒, 机器人的速度产生不连续的变化. 根据两个角动量守恒, 可以建立碰撞前后机器人状态所满足的关系方程, 求解方程就能得到碰撞切换过程数学描述的具体形式:

$$\begin{bmatrix} q^+ \\ \dot{q}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J & 0 \\ 0 & (Q^+(\alpha))^{-1}Q^-(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q^- \\ \dot{q}^- \end{bmatrix}. \quad (2)$$

其中: $J = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $Q^+(\alpha)$, $Q^-(\alpha)$ 由两个角动量守恒关系得到, 具体的表达式为

$$Q^+(\alpha) = \begin{bmatrix} mb^2 - mbl \cos(2\alpha) & \\ & mb^2 \\ (ml^2 + ma^2 + m_H l^2) - mbl \cos(2\alpha) & \\ & -mbl \cos(2\alpha) \end{bmatrix},$$

$$Q^-(\alpha) = \begin{bmatrix} -mab & -mab + (m_H l^2 + 2mal) \cos(2\alpha) \\ 0 & -mab \end{bmatrix}.$$

其中 $\alpha = (\theta_{ns}^- - \theta_s^-)/2$ 称为跨距角.

采用更为一般的描述形式, 机器人行走的动力学方程可以描述为^[19]

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u(t), & x^-(t) \notin S, \\ x^+(t) = \Delta(x^-(t)), & x^-(t) \in S. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $x(t) = (q^T \dot{q}^T)^T \in X$, X 为机器人动态的状态空间(四维向量空间 \mathbb{R}^4 的闭合开子集); S 为机器人碰撞切换的条件状态集合, $S := \{x \in X | H(x) = 0\}$, $H := X \rightarrow \mathbb{R}$, 定义为碰撞切换过程的触发函数; $x^-(t) := \lim_{\tau \rightarrow t^-} x(\tau)$, $x^+(t) := \lim_{\tau \rightarrow t^+} x(\tau)$, 描述了碰撞切换过程前后机器人的状态.

机器人行走步态动力学方程是典型的混合方程, 这种性质也使得对机器人动态的研究比较复杂, 庞卡莱映射理论是这类系统的主要分析理论^[19]. 由于方程的复杂性, 目前还没有完善的理论分析与控制综合方法, 只能通过数值仿真的手段进行分析. 摆动阶段, 机器人的动态方程是一个发散的过程, 机器人的势能减少, 动能增加. 碰撞切换过程中, 机器人的势能不发生变化, 动能减少. 整个行走周期中, 摆动阶段转化为动能的势能量恰好等于碰撞切换阶段所损失的动能, 这种能量转化、耗散平衡就是机器人稳定行走步态存在的原因.

由于机器人状态空间维数高, 一般将其四维状态空间映射到二维空间中以便于直观地进行研究. 二

维空间中, 机器人的稳定行走状态表现为极限环. 研究表明, 机器人的物理参数确定后, 机器人的极限环参数唯一取决于斜面倾角. 在机器人的无动力行走步态中, 极限环的收敛域较小, 即机器人的状态对干扰比较敏感, 当机器人的状态偏离极限环时, 其状态就会发散.

图2是3°倾斜地面上机器人被动步态的极限环, 图3是极限环对应步态的双腿位移曲线. 极限环是无动力双足步行机器人稳定行走时的重要特征, 也是机器人行走步态研究的主要手段. 理论分析与仿真实验证实, 对于某个固定角度的倾斜地面, 只存在一个稳定极限环^[20].

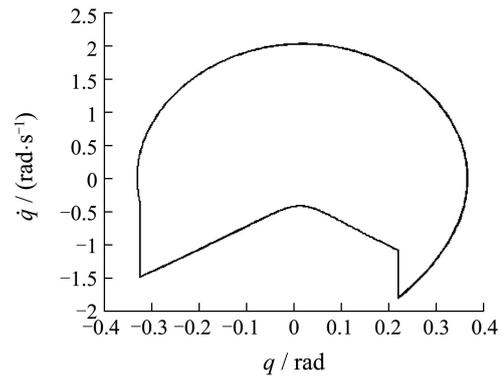


图 2 对应3°斜坡角度的稳定极限环

Fig. 2 Limit cycle of steady biped locomotion

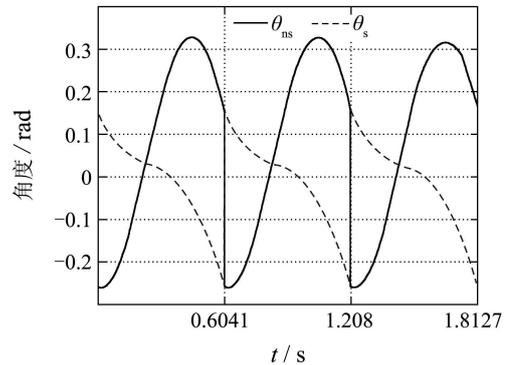


图 3 稳定行走步态双腿运动角位移变化图

Fig. 3 Two legs' angular position during steady robot gaits

3 基于能量的控制策略(Energy based control strategies)

基于能量的控制策略是无动力双足步行机器人行走控制中最直接、最常用的控制方法.

在某一倾斜角度的地面上, 无动力双足步行机器人只存在唯一的稳定行走步态. 而且, 在每个周期中, 机器人系统的机械能是守恒的. 利用行走步态周期内机器人机械能守恒的性质, 给定机器人行走控制的目标极限环的能量值, 利用控制机器人机械能收敛到目标值的思想构造闭环非线性控制系统.

机器人行走过程中,其机械能 E 是机器人运动的动能 $KE = \frac{1}{2}\dot{q}^T M(q)\dot{q}$ 与重力势能 P 的和, $E = \frac{1}{2}\dot{q}^T M(q)\dot{q} + P(q)$. 其中, $\frac{\partial F^T}{\partial q} = g(q)$. 根据刚体系统拉格朗日方程的性质,机械能的导数为 $\dot{E} = \dot{q}^T Bu$.

基于能量的控制方法主要有两个思路: 1) 以机器人的机械能为变量,构造李雅普诺夫函数,通过使用该函数的导数为负值设计反馈控制规律. 2) 根据机械能导数的表达式,直接构造控制规律,使其导数为负值,保证机械能收敛到目标值.

3.1 李雅普诺夫函数法(Method of Lyapunov function)

定义函数 $S = \frac{1}{2}(E - E_{\text{ref}})^2$,通过能量来表征机器人行走的不稳定程度,即为算法的李雅普诺夫函数. 求导数,形式如下:

$$\dot{S} = (E - E_{\text{ref}})\dot{E} = (E - E_{\text{ref}})\dot{q}^T Bu. \quad (4)$$

构造控制规律,使 \dot{S} 的导数为负值, $\bar{u} = -kB^{-1}(E - E_{\text{ref}})\dot{q}$,很明显,

$$\dot{S} = -2k\|\dot{q}\|^2 S \leq 0.$$

定理 1 如果存在常数 $\alpha > 0$,使得机器人状态在时间 $0 \leq t < T$ 内满足 $\|\dot{q}\|^2 \geq \alpha$ (T 是一个步态周期中碰撞切换时刻),那么,时间 $0 \leq t < T$ 内,机器人状态的变化满足

$$S(t) \leq S(0)e^{-2k\alpha T}.$$

在上述假设下, $S(t) \leq -2k\|\dot{q}\|^2 S \leq -2\alpha S$. 很显然,可以得到上述结论.

应用数值仿真的方法,实现了上述算法,结果如图4~6所示. 图4为未加能量控制时机器人步态施加干扰后的收敛图像,机器人需要4~5步才能收敛到稳定状态.

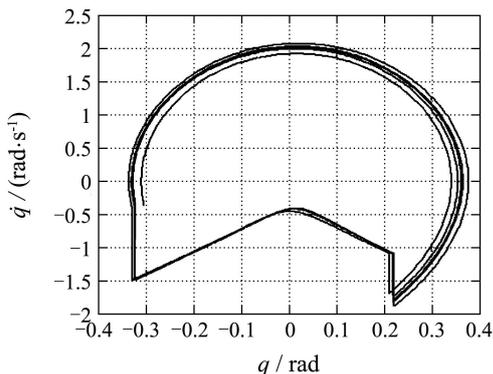


图4 无能量控制

Fig. 4 Limit cycles without control

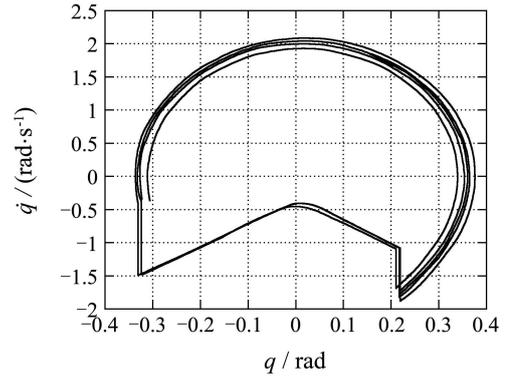


图5 能量控制后极限环图像

Fig. 5 Limit cycles under energy control

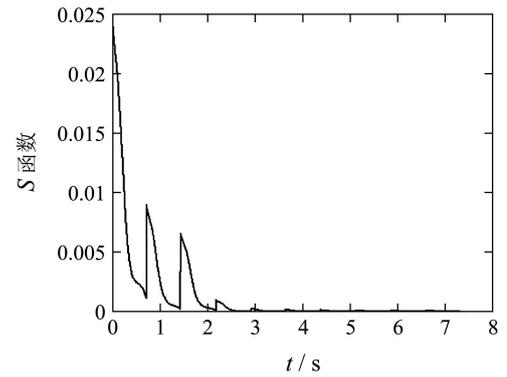


图6 S函数图像

Fig. 6 Plot of S function

加入能量控制后(图5),一步以后机器人的步态就会收敛到稳定状态. 图6为李雅普诺夫函数的图像,到达稳态后,函数的值减小到零.

3.2 机械能导数法(Method using derivative of mechanical energy)

假设参考极限环的能量为 $E^* = E((\dot{q})^*, q^*)$,加入控制 $Bu = -\beta\dot{q}$,系统的机械能变化量变为 $\dot{E} = -\dot{q}^T \beta q$. 若选取参数 β 为正,则有 $-\dot{q}^T \beta q < 0$ 成立,从而保证机器人行走过程中的动能是单调递减的,控制策略的设计可以归结为对参数 β 的设计. 为了讨论问题更具有一般性,设计控制算法时,要使机器人行走步态的对应能量值具有指数收敛速度. 具体控制作用可以分别在踝关节和髌关节加入单激励控制,也可以同时在踝关节与髌关节加入双激励控制.

1) 髌关节控制.

利用负反馈的思想,只在髌关节加入控制, $\mu_s = 0$,令

$$E = -\lambda(E - E^*) = \dot{q}^T Bu = [\theta_{\text{ns}} \quad \theta_s] \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{\text{H}} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

可以得到控制律

$$\mu_{\text{H}} = -\frac{\lambda(E - E^*)}{\dot{\theta}_s - \dot{\theta}_{\text{ns}}}. \quad (6)$$

其中: λ 决定了算法收敛的速度, 它的值越大, 算法收敛的速度越快(图9). 在 $\dot{\theta}_{ns} = \dot{\theta}_s$ 时, 控制作用 μ_H 没有定义, 因此, 在算法实现过程中, $\|\dot{\theta}_{ns} - \dot{\theta}_s\| < \varepsilon$ 时将控制作用 μ_H 强制设为零或一个合适的常数.

图7是加入髋关节控制后机器人极限环的收敛图像, 对于一个不稳定的初始状态点, 3至4步后机器人步态收敛到稳定的极限环, 图8是相应的机械能收敛图像. 髋关节控制中, 极限环与完全被动极限环相比区别较大, 在碰撞前时刻, 控制的作用较大.

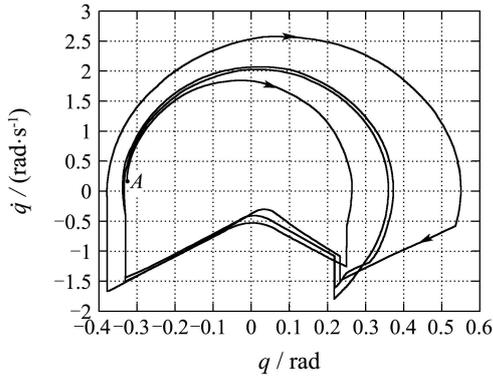


图 7 髋关节控制极限环

Fig. 7 Limit cycles under hip control

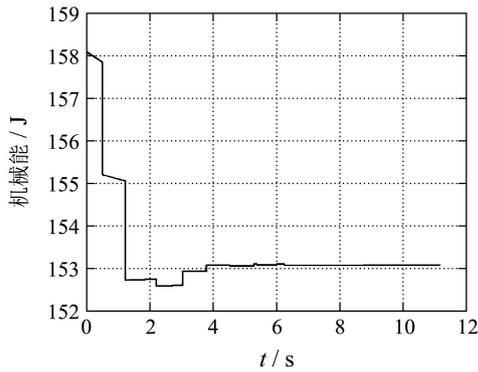


图 8 机械能收敛图像

Fig. 8 Plot of mechanical energy

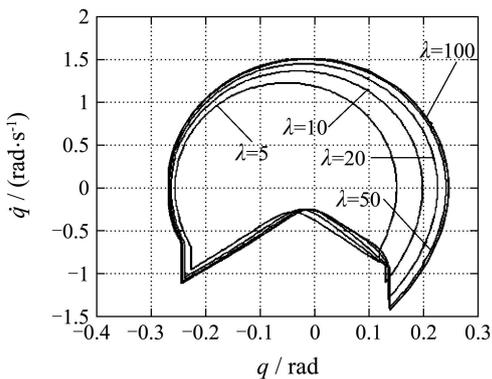


图 9 λ 的影响

Fig. 9 Simulations under some λ

2) 踝关节控制.

只在踝关节加入控制, $\mu_H = 0$,

$$E = -\lambda(E - E^*) = \dot{q}^T B u = [\theta_{ns} \ \theta_s] \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \mu_s \end{bmatrix},$$

可以得到控制律

$$\mu_s = -\frac{\lambda(E - E^*)}{\dot{\theta}_s}. \quad (7)$$

图10~12为踝节能量控制的仿真结果. 如图10所示, 对于极限环收敛域外的一个初始状态点, 至需要3~4步机器人的行走就会收敛到稳定步态, 稳定后机器人极限环的形状与完全被动极限环相似.

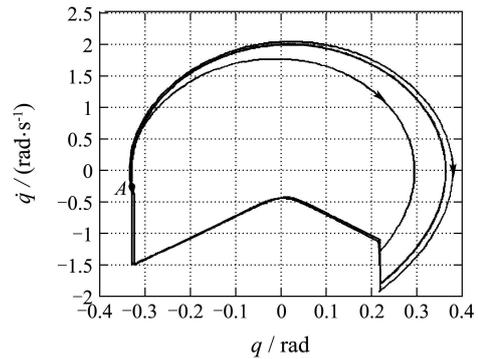


图 10 踝节能量控制极限环

Fig. 10 Limit cycles under ankle control

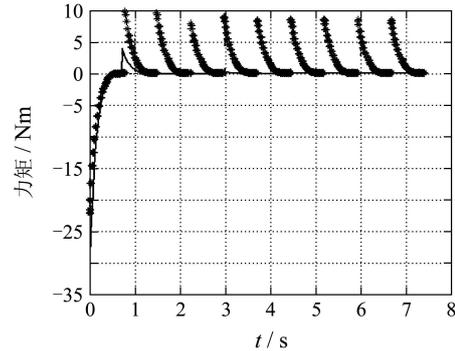


图 11 控制力矩图像

Fig. 11 Plot of ankle moment

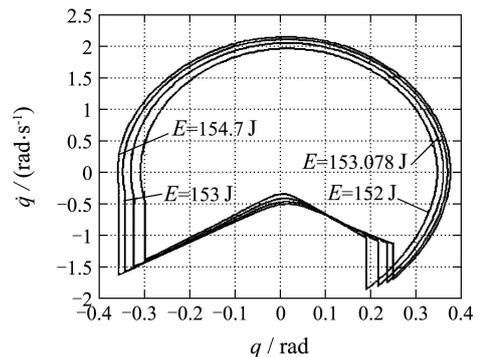


图 12 能量跟踪图像

Fig. 12 Plot of energy tracking

图11给出了机器人的机械能图像,以及每个周期的控制力矩.图12给出了不同目标能量值时的跟踪图像.

3) 平均前进速度的双激励控制.

定义机器人的平均前进速度 $\nu = \frac{2l \sin \alpha}{T}$,在机器人的反馈控制中引入 ν 的反馈,可以构造机器人的双激励控制率律.

在机器人的平均前进速度, $E_k^{\text{tar}} = E_{k-1}^{\text{tar}} + \eta(\nu^{\text{tar}} - \nu_{k-1})$,且令 $\mu_s = m\mu_H$,根据机器人机械能导数的表达式,得到

$$\mu_H[\dot{\theta}_s(1 + \mu) - \dot{\theta}_{ns}] = -\lambda(E - E_k^{\text{tar}}). \quad (8)$$

$\theta_s(1 + m) - \theta_{ns} = 0$ 时,式(8)不成立,不能得到 μ_H 的表达式,常用的解决方法是将 μ_H 强制赋一个固定的值.平均前进速度的双激励控制的表达式为

$$\mu_H = \begin{cases} \frac{-\lambda(E - E_k^{\text{tar}})}{\theta_s(1 + m) - \theta_{ns}}, & \text{如果 } \|\theta_s(1 + m) - \theta_{ns}\| > \varepsilon, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (9)$$

图13,14为髋关节、踝关节双激励控制的仿真结果,图13是给定目标能量与目标前进速度时机器人行走步态稳定后的极限环图像,图14为平均前进速度的收敛图像,速度的给定值为0.5 m/s.

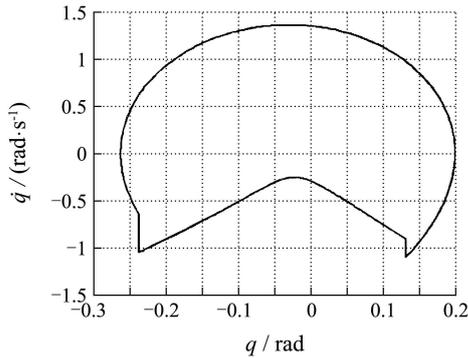


图13 双激励控制极限环

Fig. 13 Limit cycles under hip and ankle control

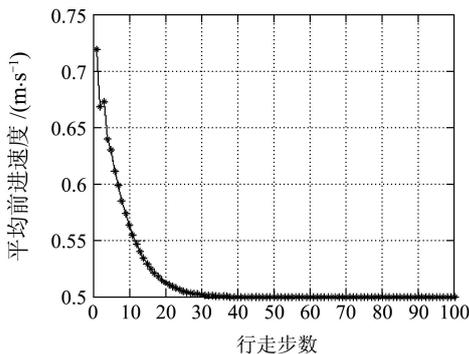


图14 平均前进速度收敛图像

Fig. 14 Convergence of average progression speed

4 角度不变控制(Slope Invariance control)

无动力双足步行机器人的稳定行走步态存在主要取决于地面倾斜角度大小(通常为 $1^\circ \sim 4.5^\circ$),随着地面倾斜角度的增大,无动力双足步行机器人的行走状态会出现分叉、混沌现象,最终导致步态不稳定直至跌倒.如何使机器人在更大角度范围的倾斜地面上产生稳定行走步态是研究控制策略的重要问题,机器人在不同倾斜角度地面间的步态切换是研究机器人行走适应性的基础.

基于无动力双足步行机器人拉格朗日动力学方程(1)的对称性,Mark Spong提出了一种角度不变控制方法,通过控制力矩来补偿重力的驱动作用,从而使机器人的行走摆脱地面倾斜角度的限制.

给定的机器人初始状态 $X = X(\phi_0) = (\theta_{ns}(0), \dot{\theta}_{ns}, \theta_s(0), \dot{\theta}_s)^T$, $u = 0$ 时,机器人在角度为 ϕ_0 的倾斜地面上存在稳定极限环, $X = X(\phi_0)$ 是极限环轨迹上的一点.

设 $\beta = \phi_0 - \phi$ (ϕ 为地面倾斜角度的取值),定义二维状态空间内的旋转变换 ϕ_A ,具体形式为

$$\phi_A = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}.$$

作用于机器人的状态变量 ϕ_A 具有如下的形式:

$$\begin{aligned} \phi_A(q) &= (q_1 - \beta, q_2 - \beta)^T, \\ \dot{\phi}_A(q) &= (\dot{q}_1, \dot{q}_2)^T, \\ \ddot{\phi}_A(q) &= (\ddot{q}_1, \ddot{q}_2)^T. \end{aligned}$$

应用旋转变换 ϕ_A ,可以定义控制作用

$$u = B^{-1}(g(q) - g(\phi_A(q))). \quad (10)$$

定理 2 $u = 0$ 时,如果 (q, \dot{q}) 是方程(1)的一个解,且对应于这个解的机器人的初始状态为 $X = X(\phi_0) = (\theta_{ns}(0), \dot{\theta}_{ns}, \theta_s(0), \dot{\theta}_s)^T$,那么,在控制(9)作用下,方程(1)的解为 $(\phi_A(q), \dot{q})$,且相对应的机器人初始状态为 $X(\beta) = (\theta_{ns}(0) + \beta, \dot{\theta}_{ns}(0) + \beta, \theta_s(0) + \beta, \dot{\theta}_s(0))^T$.

只需要得到地面角度差 $\beta = \phi_0 - \phi$ 的信息,就可以通过控制补偿重力的驱动作用,使机器人在不同倾斜角度的地面上产生稳定的行走步态.数值仿真的结果表明(图15),机器人在不同倾斜角度的地面上都能产生稳定的行走步态,并且它们的极限环具有相似的形状,只是在空间位置上沿位移轴进行了平移.

角度不变控制只是一种开环的非线性控制方式,完全依赖于地面倾斜角度的感知.在提高自身稳定性和鲁棒性方面没有任何改进,所以该方法单独应

用时的效果比较差, 一般与其他闭环控制策略结合到一起应用。

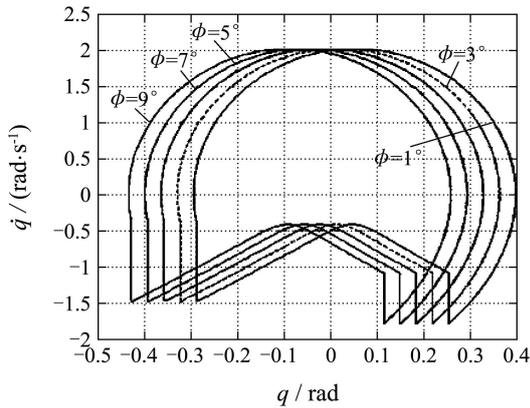


图 15 当 $\phi_0 = 0^\circ$ 时, 采用控制量 \bar{u} 所对应的不同切换角度变换的极限环

Fig. 15 Limit cycles corresponding to different slope angle using the control \bar{u} with $\phi_0 = 0^\circ$

5 基于能量的角度不变控制策略(Energy based slope invariance control)

角度不变控制可以使机器人的行走不受地面倾斜角度的大小的限制, 但是由于这只是一种开环控制, 并不能改进极限环的稳定性, 对自身不确定性与外界干扰的鲁棒性. 能量控制能增加极限环的稳定性, 扩大收敛域. 但是, 地面角度变化较大时, 能量控制方法很难使机器人的行走重新进入稳定状态。

结合能量控制与角度不变控制的优点, 在无动力双足步行机器人的角度不变性控制方法中引入能量控制分量 \bar{u} , 这时 u 的表达式为

$$u = B^{-1}(g(q) - g(\phi_A(q))) + \bar{u}.$$

摆动阶段机器人的动态方程为

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(\phi_A(q)) = B\bar{u}.$$

能量控制分量 \bar{u} 可以按照能量控制策略的设计思路来构造, 常用的为李雅普诺函数法. 首先构造李雅普诺函数 $S = \frac{1}{2}(E(\phi_A) - E_{ref})^2$, 但是, 由于角度不便控制的原因, 用于反馈的不再是机器人机械能的实际值, 与角度不变控制中的状态变量变换一样, 基于能量的角度不变控制中的能量反馈同样需要经过变换,

$$E(\phi_A) = \frac{1}{2}\dot{q}^T M(q)\dot{q} + V(\phi_A(q)).$$

函数 S 的导数为

$$\dot{S} = (E(\phi_A) - E_{ref})\dot{E} = (E(\phi_A) - E_{ref})\dot{q}^T B\bar{u}.$$

选择控制量的具体形式, 使得李雅普诺夫函数的导数为负值, 例如

$$\bar{u} = -kB^{-1}(E(\phi_A) - E_{ref})\dot{q}. \quad (11)$$

图16所示为机器人在 3° 的倾斜地面上行走时, 地面倾斜角度产生一个由 3° 到 5° 的跃变, 此时, 机器人的行走步态不再稳定. 加入基于能量的角度不变控制后, 机器人的行走步态很快收敛(2至3步)到新的稳定状态, 如图17. 图18、图19则分别给出了不加入控制时与加入控制后机器人机械能的变化曲线, 两条曲线相比较, 很明显可以看出控制后机器人机械能的收敛速度得到了很大提高。

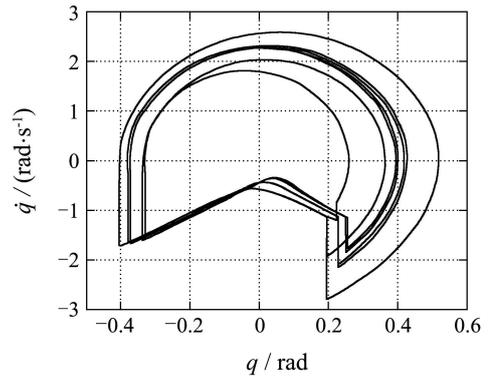


图 16 无控制角度切换极限环的收敛

Fig. 16 Convergence of the limit cycle under no control

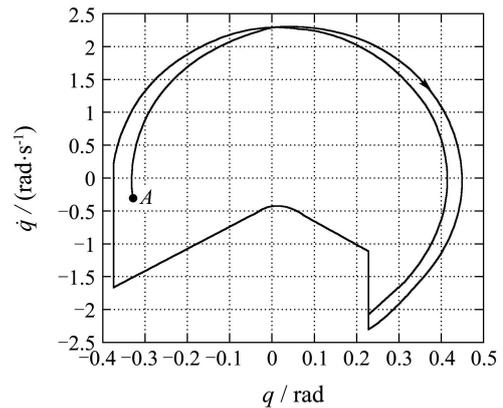


图 17 能量控制后极限环的收敛

Fig. 17 Convergence of limit cycle under the control

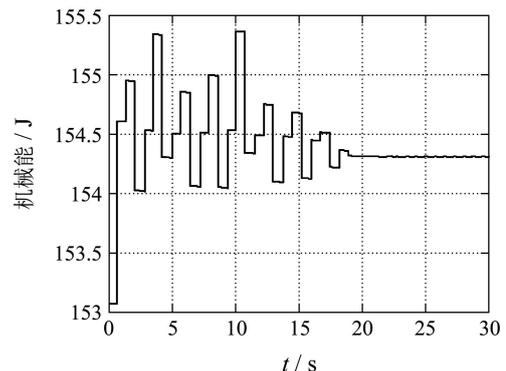


图 18 无控制机械能变化图

Fig. 18 Figure of mechanical energy with no control

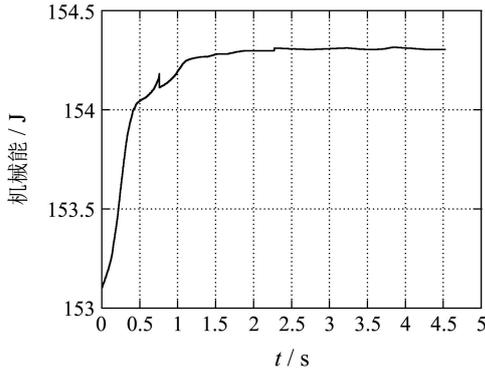


图19 控制后机械能变化图

Fig. 19 Plot of mechanical energy under the control

6 逆动力学控制和分域控制(Inverse dynamic control and switching control)

在被动机器人的控制中,常采用的方法还包括逆动力学方法^[21,22].通过非线性反馈,将机器人的动力学方程进行线性化,控制作用 u 为

$$u = B^{-1}(M(q)a + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q)). \quad (12)$$

在控制(12)的作用下,机器人的动力学方程为 $\ddot{q} = a$.通过构造 a 的具体表达式,如引入双向耦合控制器

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + \bar{K}(\bar{x} - x), \\ \dot{\bar{x}} = f(\bar{x}) + K(x - \bar{x}). \end{cases} \quad (13)$$

从而实现行走运动中双腿的同步控制,达到仿人行走控制的目的.

机器人的被动步态控制中,上述的控制算法只在机器人状态空间的一个较小的区域有较好的效果,当机器人的状态远离其稳定步态极限环的收敛域时,机器人很难收敛到稳定步态.因此,这就需要新的控制策略来实现机器人状态空间大范围收敛的算法,使机器人的行走过程具有更好的适应性,能够完成更灵巧的动作. Mark Spang提出了分域控制的思想^[18],将机器人的状态空间分为不同的区域,在不同的区域应用不同的控制算法,但并没有设计出在理论上或实际中可行的算法.在此,作者尝试将此方法进行深入研究,将机器人的状态空间分为不同的区域,在不同的区域应用不同的控制算法.

为衡量状态点稳定性,定义机器人状态与参考极限环的距离为 $r = K \min(\|q - q^*\|)$,其中 q 为机器人状态, q^* 为稳定被动行走步态极限环上的任意一点, K 为加权矩阵,与机器人状态点 q 的动力学性质有关,由于机器人状态的稳定性是渐变的,因此考虑在不同分段之间设立宽度为 r_s 的过渡区.如图20所示,在不稳定区域,步行机器人的状态与参考状态轨迹的距离较大,可以应用反馈线性化或反动态控制

的方法将系统动力学方程解耦合,根据机器人状态与参考状态轨迹的距离向量规划系统状态变化路,计算控制量;在可控制稳定区域,步行机器人的状态与参考状态轨迹较近,但仍处于参考状态轨迹收敛域外,需要通过控制的方法使步行机器人稳定行走,可以应用被动控制方法,如基于能量的角度不变控制方法;在稳定收敛区域,机器人位于参考状态轨迹的收敛域内,不需要控制就能使机器人状态收敛到参考状态轨迹,为了提高机器人状态的收敛速度与对外界干扰、自身不确定性的鲁棒性,仍然需要施加控制,如基于能量的控制方法.为了实现控制算法的平滑切换,应用模糊理论定义不同区域,不同区域的控制量根据其模糊加权函数合成为当前状态的最终控制量,状态域 A 和状态域 B 分界处的 r 值为 r_0 ,由状态域 A 到状态域 B 的变化过程中, r 的值是减小的.令状态域 A 的控制器算法为 $u_A = f_A(q, r)$,状态域 B 的控制器算法为 $u_B = f_B(q, r)$,控制量 u 的计算公式为

$$u = \begin{cases} f_A(q, r), & \text{如果 } r > r_0 + \frac{1}{2}r_s, \\ f_B(q, r), & \text{如果 } r < r_0 - \frac{1}{2}r_s, \\ \frac{r - r_0 + 0.5r_s}{r_s} f_A(q, r) + \frac{r_0 + 0.5r_s - r}{r_s} f_B(q, r), & \text{其他.} \end{cases} \quad (14)$$

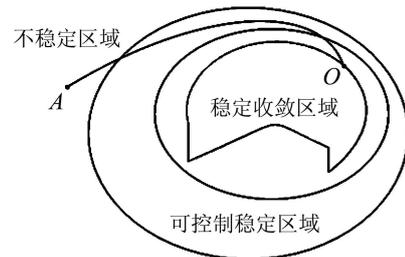


图20 分域控制示意图

Fig. 20 Convergence regions of sub-section control

分域控制算法的关键在于如何提出全局稳定的分域控制切换逻辑.

7 结论(Conclusion)

无动力双足步行机器人行走的稳定性、对自身不确定性和外界干扰的鲁棒性、适应性是步态控制的主要目标.研究依赖于机器人的完全无动力行走步态控制策略,使机器人在状态空间内大范围收敛,胜任复杂动作,是未来机器人控制策略的发展方向.

本文研究了无动力双足步行机器人的建模、分析与能量控制策略设计.能量控制策略通过控制机器人的机械能跟踪目标极限环的能量值,提高了机器人行走的稳定性,扩大了行走步态极限环的收敛

域. 角度不变控制是一种开环控制方法, 拓展了机器人稳定行走范围, 提高了机器人的适应性. 基于能量的角度不变控制结合了两者的优点, 增加了机器人行走的稳定性以及对地面倾斜角度变化的鲁棒性.

机器人行走步态在很大程度上受到碰撞模型的影响, 本文所采用的碰撞模型并不是唯一的, 如何建立更为实用的行走碰撞模型, 界定极限环吸引子的边界, 研究新的具有大范围收敛特性的控制策略, 是下一步研究的主要工作.

致谢 新加坡理工学院先进机器人学与智能控制研究中心为本文研究提供了先进实验条件和项目经费(the Singapore Polytechnic R&D Fund, 1-27801-36-R035)支持. 本文研究过程中得到美国康奈尔大学Garcia教授的指导. 在此一并表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
(CAI Zixing. *Robotics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.)
- [2] 马培荪, 曹曦, 赵群飞. 两足机器人步态综合研究进展[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(4): 407-414.
(MA Peisun, CAO Xi, ZHAO Qunfei. Review of studies on biped robot gait[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2006, 41(4): 407-414.)
- [3] 付成龙, 陈恳. 双足机器人稳定性与控制策略研究进展[J]. 高技术通讯, 2006, 16(3): 319-324.
(FU Chenglong, CHEN Ken. Research progress on stability and control strategy for biped robots[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2006, 16(3): 319-324.)
- [4] 胡凌云, 孙增圻. 双足机器人步态控制研究方法综述[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(5): 728-733.
(HU Lingyun, SUN Zengqi. Survey on gait control strategies for biped robot[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2005, 42(5): 728-733.)
- [5] IJSPEERT A J, NAKANISHI J, SCHAAL S. Movement imitation with nonlinear dynamical systems in humanoid robots[C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2002: 1398-1403.
- [6] VUKOBRATOVIC M, BOROVIAC B. Bipedal locomotion dynamics, stability, control and application[M]//*Scientific Fundamentals of Robotics*. New York: Springer-Verlag, 1990.
- [7] GOSWAMI A. Postural stability of biped robots and the footrotation indicator point[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1999, 18(6): 523-533.
- [8] HEMAMI H. Reduced order models for biped locomotion[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1978, 8(4): 321-351.
- [9] MCGEER T. Passive dynamic walking[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1990, 9(2): 62-82.
- [10] PRATT J E. *Exploiting inherent robustness and natural dynamics in the control of bipedal walking robots*[D]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [11] MCGEER T. Passive walking with knees[C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Cincinnati: Anon, 1990: 1640-1645.
- [12] SPONG M W, BHATIA G. Further results on control of the compass gait biped[C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems Proceedings*. Las Vegas, Nevada: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2003: 1933-1938.
- [13] GOSWAMI A, THUILOT B, ESPIAU B. A study of the passive gait of a compass-like biped robot: symmetry and chaos[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1998, 17(12): 1282-1301.
- [14] COLLINS S H, WISSE M, RUINA A. A 3-d passive- dynamic walking robot with two legs and knees[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2001, 20(7): 607-615.
- [15] GARCIA M, CHATTERJEE A, RUINA A, et al. The simplest walking model: stability, complexity and scaling[J]. *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, 1998, 20(2): 281-288.
- [16] GOSWAMI A, ESPIAU B, KERAMANE A. Limit cycles in a passive compass gait biped and passivity-mimicking control laws[J]. *Journal of Autonomous Robots*, 1997, 4(3): 273-286.
- [17] OHTA H, YAMAKITA M, FURUTA K. From passive to active dynamic walking[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2001, 11(3): 287-303.
- [18] SPONG M W. Passivity based control. of the compass gait biped[C]//*Proceedings of IFAC World Congress, Beijing, China*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Ltd, 1999, 3: 19-23.
- [19] GRIZZLE J W, PLESTAN F, ABBA G. Poincaré's method for systems with impulse effects: application to mechanical biped locomotion[C]//*Proceedings of the 38th conference on decision & control*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 1999: 3869-3876.
- [20] GOSWAMI A, ESPIAU B, KERAMANE A. Limit cycles in a passive compass gait biped and passivity-mimicking control laws[J]. *Journal of Autonomous Robots*, 1997, 4(3): 273-286.
- [21] BHATIA G, SPONG M. Hybrid control for smooth walking of a biped with knees and torso[C]//*Proceedings of 2004 Institute of Electrical and Electronics Engineers Conference on Control Applications, Taipei, Taiwan*. New York: IEEE Press, 2004.
- [22] LIU Z Z, TIAN Y T, ZHOU C J. Controlled anti-phase synchronization of compass-like biped[C]//*Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2006: 755-760.
- [23] LIU Z Z, ZHANG P J, TIAN Y T, et al. The passive energy tracking control law of the compass bipedal robot[C]//*Proceedings of the 26th Chinese Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2007, II: 457-462.

作者简介:

刘振泽 (1977—), 男, 硕士, 讲师, 研究领域为双足机器人控制、混沌同步、保密通信, E-mail: zzliu@jlu.edu.cn;

田彦涛 (1958—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为复杂系统建模与优化控制、双足机器人控制、分布式智能系统与多智能体系统、主动机器视觉与跟踪控制等, E-mail: tianyt@jlu.edu.cn;

张佩杰 (1982—), 男, 学士, 研究领域为双足机器人控制, E-mail: mczpj2007@yahoo.cn;

周长久 (1963—), 男, 博士, 国际RoboCup执行委员会委员, 国际RoboCup人形机器人技术委员会主席, 研究方向包括智能机器人系统、仿人机器人、智能控制、生物仿生机器人系统、多传感器融合等领域, 迄今发表EI,SCI检索文章150余篇.