

文章编号: 1001-0920(2013)08-1152-05

双足机器人自适应常值驱动与传感反馈结合的仿生行走控制

刘丽梅^{1,2}, 田彦涛¹

(1. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130025; 2. 吉林财经大学 应用数学学院, 长春 130117)

摘要: 为了将双足机器人的混沌步态控制收敛到稳定的周期步态, 提出一种控制策略. 首先用庞卡莱截面法研究斜坡倾角变化对步态的影响, 结果表明, 坡度增大会导致倍周期步态到混沌步态的产生; 然后以人类步行的生物力学为仿生依据, 根据延迟反馈控制的基本思路, 设计了自适应常值驱动与传感反馈相结合的仿生行走控制策略, 并依据当前步和前两步初始状态对控制器参数进行逐步调节, 最终将混沌步态控制收敛到周期步态. 仿真结果表明了所提出算法的有效性.

关键词: 被动行走机器人; 混沌步态; 常值力矩; 仿生学; 极限环

中图分类号: TP242

文献标志码: A

Bionic walking control based on adaptive constant torque and sensory feedback for the biped robot

LIU Li-mei^{1,2}, TIAN Yan-tao¹

(1. School of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China; 2. School of Applied Mathematics, Jilin University of Finance and Economics, Changchun 130117, China. Correspondent: TIAN Yan-tao, E-mail: tianyt@jlu.edu.cn)

Abstract: To make the chaotic gaits converge to a stable cycle gait, a control algorithm is proposed for the biped robot with knees. Firstly, the passive gaits changes with the changing of the slope are studied by using the Poincaré section method. It shows that the increasing of the ground slope will result in the appearance of period-doubling and chaotic gaits. Then, based on the biomechanics in human walking and delayed feedback control theory, bionic walking control based on adaptive constant torque and sensory feedback for the biped robot is designed. The controller parameters are regulated gradually in terms of the initial states of the current step and the first two steps. Finally, the chaotic gaits converge to the cycle gaits with this controller. Simulation results show the effectiveness of the presented control algorithm.

Key words: passive dynamic biped robot; chaotic gait; constant torque; bionics; limit cycle

0 引言

双足机器人是一个复杂的机械系统, 动力学特性比较复杂, 这给机器人行走的步态分析与控制策略的开发设计带来了很大的困难. 例如传统的控制方法多采用轨迹跟踪手段^[1], 需要预先规划轨迹, 能耗较高且实时性不好, 在工程实践中难以实现. 被动动力学理论的出现使得高效稳定行走的实现成为了可能.

被动动力学理论是由McGeer^[2]提出的, 是指机器人不需要任何主动控制, 仅依靠重力便能在斜坡上稳定行走. 这种行走模式称为“被动行走”. 但是被动行走对初始状态和斜坡的变化比较敏感^[3-4].

Goswami等^[5]和Garcia等^[6]发现, 随着坡度的不断增大, 被动行走会出现倍周期步态. 柳宁等^[7]和刘振泽等^[8]对无膝关节的被动行走模型进行了研究, 发现结构参数的变化会导致倍周期步态和混沌步态的产生. 混沌步态使机器人行走具有非周期性, 难以预测, 很容易摔倒. 因此如何抑制混沌步态, 使混沌步态收敛到稳定的周期步态是一个研究热点. 目前国内外对该问题的研究还比较少. Li等^[9]提出了反向同步控制和脉冲控制, 使compass-like无动力行走机器人的混沌步态收敛为对称的周期步态. Iribe等^[10-11]发现, 在动力学特性方面机器人的被动行走步态与锁相环

收稿日期: 2012-03-22; 修回日期: 2012-09-24.

基金项目: 国家863计划项目(2006AA04Z251); 国家自然科学基金项目(60974067); 教育部青年基金项目(12YJC630002).

作者简介: 刘丽梅(1979—), 女, 讲师, 博士, 从事复杂系统建模与优化控制的研究; 田彦涛(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统建模与优化控制等研究.

电路很相似, 于是用类比的方法提出了控制步态分岔的算法. 倪修华^[12]提出了方波力矩控制策略, 将混沌步态和分岔步态控制收敛到稳定的单周期步态. Sugimoto 等^[13-14]以无膝关节的双足步行机器人为研究对象, 基于延迟反馈控制原理设计了控制器, 对于增强系统的稳定性和鲁棒性效果明显, 但控制器中增益系数的选取是个难点.

虽然混沌控制的方法很多, 如参数微扰法及其各种改进法、自适应控制法、神经网络法、模糊控制法等, 但是延迟反馈控制法不需要精确的系统模型, 避免了目标轨道的确定, 控制器结构简单、适时性好、计算方便、易于工程实现, 在高维混沌系统的控制中也比较有效^[15-16]. 鉴于延迟反馈法的以上优点, 考虑到机器人的动力学方程是个高维的微分-代数混杂系统, 本文将基于延迟反馈控制思想设计机器人混沌步态的控制策略.

1 双足步行机器人的动力学模型

本文以带膝关节的点足步行机器人为研究对象, 机器人模型如图1所示^[17]. 模型建立基于如下假设:

1) 机器人的大腿、小腿和髌关节的质量都为点质量, 每条腿的膝关节处都按有锁死装置, 摆动腿的大腿和小腿发生的是瞬间碰撞;

2) 支撑腿的点足与地无相对滑动, 摆动腿与地面的碰撞是完全非弹性碰撞, 碰撞过程瞬间完成.

根据上述假设条件, 可以把一个周期步态划分为4个阶段: 膝盖碰撞前的摆动阶段、膝盖碰撞阶段、膝盖碰撞后的摆动阶段、足与地碰撞阶段.

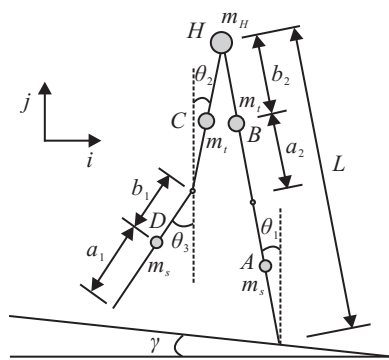


图1 带膝关节的双足步行机器人模型

1.1 膝盖碰撞前摆动阶段的动力学方程

在阶段I中, 支撑腿的膝关节始终被锁死, 而摆动腿的膝关节未被锁死并自然弯曲向前摆动. 根据牛顿-拉格朗日动力学原理, 阶段I对应的动力学方程为

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

其中: $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$; $\tau = [u_1, u_2, u_3]^T$; u_1, u_2, u_3 分别为施加在支撑腿和摆动腿髌关节, 以及支撑腿踝关节的力矩.

1.2 膝盖碰撞方程

在阶段II中, 摆动腿的大腿和小腿发生碰撞, 膝关节被锁死, 此时摆动腿的大腿和小腿具有相同的角度, 即 $\theta_2 = \theta_3$, 因此设定碰撞面为 $S_1 = \{[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T | \theta_2 = \theta_3\}$. 由角动量守恒原理, 膝盖碰撞方程为

$$q^+ = \Delta_1(q^-). \quad (2)$$

其中: $q^- = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T$ 为碰撞前机器人的状态变量, $q^+ = [\theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2]^T$ 为碰撞后机器人的状态变量.

1.3 膝盖碰撞后摆动阶段的动力学方程

阶段III中, 摆动腿的膝关节被锁死, 并相对于支撑腿向回摆动. 由拉格朗日动力学原理可得机器人的动力学方程为

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta) = \tau. \quad (3)$$

其中: $\theta = [\theta_1, \theta_2]^T$; $\tau = [u_1, u_2]^T$; u_1, u_2 分别为施加在支撑腿和摆动腿髌关节的控制力矩.

1.4 摆动腿的足与地的碰撞方程

阶段IV是摆动腿的足与地发生瞬间碰撞, 摆动腿足与地面碰撞的接触面为 $S_2 = \{[\theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2]^T | h(\theta_1, \theta_2) = 0\}$. 由角动量守恒原理可得碰撞方程为

$$q^+ = \Delta_2(q^-). \quad (4)$$

其中: $q^- = [\theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2]^T$ 为碰撞前机器人的状态变量, $q^+ = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T$ 为碰撞后机器人的状态变量. 碰撞后原支撑腿变为摆动腿, 原摆动腿变为支撑腿, 机器人开始新的周期步态.

因机器人行走的摆动方程是由连续型微分方程描述的, 而碰撞方程是由离散型代数映射描述的, 故双足步行机器人的动力学方程是一个连续-离散混杂系统.

2 被动行走的倍周期步态与混沌步态

步行机器人的动力学方程是一个多模型的连续-离散混杂系统, 因此本文采用庞卡莱截面法对步态进行分析. 将摆动腿的足碰地后的瞬间状态空间设定为庞卡莱截面 S , 与其对应的庞卡莱映射为

$$P(q_0) = \Delta_2 \cdot \varphi_2(t_2, t_1, q(t_1)) \cdot \Delta_1 \cdot \varphi_1(t_1, 0, q_0). \quad (5)$$

其中: $q_0 \in S$; t_1, t_2 分别为膝盖碰撞前和摆动腿碰地前的摆动时间; φ_1, φ_2 为阶段I和阶段III的摆动方程的解轨迹. 本文采用Newton-Raphson迭代法计算庞卡莱映射的不动点, 进而对步态进行分析.

由于被动行走机器人只在重力和自身惯性的作用下向下行走, 没有外力输入, 系统的稳定性较差, 斜坡倾角的变化势必会影响步态的稳定性. 本文将斜坡倾角 γ 作为唯一变化参数, 通过仿真实验分析被动步

态随 γ 变化的情况. 表 1 列出了仿真实验中机器人的主要结构参数值. 图 2 是双足被动行走机器人支撑腿的初始角速度随地面倾斜角度变化的分岔和混沌图. 由图 2 所示的分岔可以看出, 随着斜坡倾角的不断增大, 被动步态会出现复杂的动态特性, 最终出现混沌现象.

表 1 模型仿真参数值

参数	符号	数值
腿长/m	L	1
大腿、小腿质量比	m_t/m_s	10
腿与髋关节的质量比	$(m_t + m_s)/m_H$	11/16
大腿小腿长度比	l_t/l_s	1
大腿质心位置	a_2/l_t	0.35
小腿质心位置	a_1/l_s	0.75

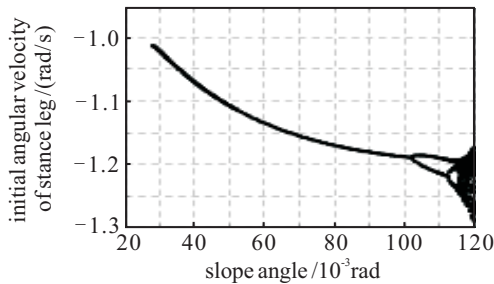


图 2 支撑腿初始角速度随坡度变化的分岔图

上述研究表明, 当环境参数变化到一个临界值时, 系统的拓扑结构会从稳定的运动状态转变到不稳定的运动状态, 因此被动行走步态会出现倍周期现象或混沌现象. 而混沌步态具有非周期性, 难以预测, 容易导致危险情况的发生. 为了将混沌步态调整为稳定的周期步态, 本文提出了自适应常值驱动与传感反馈结合的仿生行走控制算法.

3 自适应常值驱动与传感反馈结合的仿生行走控制

3.1 控制器设计的基本原理

延迟反馈控制 (DFC) 是控制混沌的有效方法之一. 其基本思想是: 系统的一部分输出量经时间延迟后与原输出量相减的结果作为控制信号进行反馈, 在不改变原有动力学性能的情况下将系统状态控制收敛到周期轨道. 其数学表达式为

$$F(t) = K(y(t - \tau) - y(t)). \quad (6)$$

其中: $F(t)$ 是系统的扰动输入量, K 是反馈增益系数矩阵, y 是系统的一部分输出量, τ 是延迟反馈时间. 由于延迟反馈控制器的结构比较简单, 物理实现容易, 本文将根据延迟反馈控制的基本思想设计控制策略.

3.2 控制器设计的仿生学依据

稳定的被动动态行走是一种周期运动, 因此可以

采用振荡信号进行关节驱动. 在人类行走过程中, 足与地面的碰撞是环境反馈, 而膝关节的碰撞是运动状态反馈. 这两种传感反馈信息能够确保机器人的稳定行走, 故可将它们作为激励信号应用于控制器的设计. 另外, 人类行走还具有以下特点^[18]:

1) 人在行走时, 支撑腿膝关节的肌肉会发生牵张反射, 使支撑腿的膝关节始终处于伸直锁死状态.

2) 人在行走时, 摆动腿膝关节的肌肉活动量非常小, 基本处于被动状态.

3) 人在行走时, 支撑腿的踝关节与地面间呈现被动柔顺特性.

4) 人在行走时, 髋关节的摆腿是人类行走的主要能量输入来源, 且这种能量输入是间断的, 仅在摆动相的初期作用明显. 这是因为当足与地面发生碰撞后, 髋关节开始摆腿迈步. 在身体重心到达最高点之前, 为了保证向前运动, 必须由关节作用力对系统进行能量输入; 在身体重心到达最高点之后, 由于重力的作用, 系统会自发向前运动.

上述的仿生学依据表明, 只需要在髋关节施加驱动力矩, 且输入力矩在每步的摆动初期作用即可, 因此本文仅在机器人髋关节设计自适应常值驱动与传感反馈结合的仿生行走控制策略.

3.3 控制器的设计

首先借用延迟反馈控制的思想, 将机器人摆动腿的点足与地面碰撞后的瞬间状态设定为系统的输出量, 以每步完成的时间作为延迟反馈时间, 采用与延迟反馈相同的控制结构, 则第 i 步的控制器设计为

$$\begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = \begin{cases} K_i(x_{i-1} - x_i), & t \in [t_s, t_k]; \\ [0, 0]^T, & t \in [t_k, t_h]. \end{cases} \quad (7)$$

其中: $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 分别为作用在机器人支撑腿髋关节和摆动腿髋关节的控制力矩; t_s 为机器人第 i 步行走的起始时间, t_k 为第 i 步中摆动腿的膝关节发生碰撞的时间, t_h 为第 i 步行走中摆动腿与地面发生碰撞的时间; $x_i = q_{i-1}^+ = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T$ 表示机器人第 i 步的起始步态, 即第 $(i-1)$ 步中摆动腿与地面碰撞后机器人的瞬间状态; $K_i \in \mathbb{R}^{2 \times 6}$ 是第 i 步控制器内的增益系数矩阵. 本文将给出增益系数矩阵的自适应调节率, 以避免多重稳定解的存在.

定理 1 对于带膝关节的双足步行机器人系统, 当控制器 (7) 中的增益系数矩阵采用如下调节率时:

$$K_{i+1}(j, h) = K_i(j, h) + B_{jh}\delta_i, \quad (8)$$

机器人的混沌步态能重新收敛到稳定的周期步态. 式 (8) 中: $B_{jh} \in \mathbb{R}^{1 \times 6}$ 为事先确定的权重系数矩阵, $j = 1, 2, h = 1, 2, \dots, 6$; $\delta_i \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, 其分量 $\delta_i(s)$ ($s = 1, 2, \dots, 6$) 自适应取值为

$$\begin{cases} |x_i(s) - x_{i-1}(s)|, \|x_i - x_{i-1}\| > \|x_{i-1} - x_{i-2}\|; \\ -|x_i(s) - x_{i-1}(s)|, \|x_i - x_{i-1}\| \leq \|x_{i-1} - x_{i-2}\|. \end{cases}$$

其中: i 为当前步; $i-1, i-2$ 分别代表前一步和前两步.

证明 将摆动腿的足碰地后的瞬间状态空间设定为庞卡莱截面 S , 与其对应的庞卡莱映射为

$$x_{i+1} = P(x_i, \tau_i).$$

假设庞卡莱映射的不动点为 x^* , 且满足 $x^* = P(x^*, 0)$, 在 x^* 处对庞卡莱映射进行线性化, 可得

$$\delta x_{i+1} = A \cdot \delta x_i + B\tau_i. \quad (9)$$

其中: τ_i 为第 i 步的输入力矩, $\delta x_i = x_i - x^*$, $A = \frac{\partial}{\partial x_i} P(x^*, 0)$, $B = \frac{\partial}{\partial \tau_i} P(x^*, 0)$.

由于机器人以 x^* 为初始状态进行单周期的被动行走, 必满足 A 的特征值的最大模小于 1, 则 $\det(I - A) > 0$, I 为单位矩阵. 由文献[19]的命题 1 知, 必存在增益系数矩阵 K , 当 $\tau_i = K(x_{i-1} - x_i)$ 时能将不稳定的步态控制收敛到稳定的周期步态.

由于机器人系统是个高维的微分-代数混杂系统, 增益系数矩阵主要基于步态收敛则减小力矩, 步态发散则增大力矩这一物理意义进行调节. 若 $\|x_i - x_{i-1}\| > \|x_{i-1} - x_{i-2}\|$, 则表明步态是发散的, 此时增加增益系数, 令 $\delta_i(s) = |x_i(s) - x_{i-1}(s)|$; 否则减小增益系数, 令 $\delta_i(s) = -|x_i(s) - x_{i-1}(s)|$. 最终使 $\|x_i - x_{i-1}\| \rightarrow 0$. 即经过控制作用, 使得相邻两步的起始状态相同, 由解对初值的连续依赖性, 使得相邻两步的状态都收敛到以 x^* 为初始步态的周期步态中. \square

由控制器的结构可知, 在第 i 步起作用的是常值方波力矩, 因而避免了控制过程中抖动现象的发生. 通过增益系数的自适应调节, 使常值力矩是自适应变化的, 从而加快机器人步态的收敛速度, 最终获得稳定的周期步态, 同时增益系数也收敛到固定值, 此时控制力矩为常值或 0 N·m. 控制器的设计采用了被动和主动相结合的方式, 能效性较高.

4 仿真实验

4.1 控制器的有效性

为了验证控制算法的有效性, 以带膝节点足的双足步行机器人为对象, 在 Matlab 中进行仿真实验. 主要结构参数取值同表 1, 斜面倾角为 $\gamma = 0.1194 \text{ rad}$. 若初始步态为

$$[0.2502, -0.489, -0.489, -1.197, 1.2137, 1.2137]^T,$$

则由图 2 可知, 不加控制力矩时, 机器人会出现混沌步态. 为了获得稳定步态, 本文从机器人的第 31 步开始对其作用自适应常值驱动与传感反馈相结合的仿

生控制器. 取

$$K_1 = \begin{bmatrix} 5 & -2.5 & 0 & 0.7 & -0.06 & 0 \\ -5 & 2.5 & 0 & -0.7 & 0.06 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{11} = B_{21} = [0.3, 0.15, 0.15, 0.3, 0.05, 0.05],$$

$$B_{12} = B_{22} = [0.1, 0.3, 0.1, 0.1, 0.3, 0.1],$$

$$B_{13} = B_{23} = [0.05, 0.15, 0.3, 0.05, 0.15, 0.3],$$

$$B_{14} = B_{24} = [0.2, 0.1, 0.1, 0.3, 0.15, 0.15],$$

$$B_{15} = B_{25} = [0.1, 0.2, 0.1, 0.1, 0.4, 0.1],$$

$$B_{16} = B_{26} = [0.1, 0.1, 0.2, 0.1, 0.2, 0.3].$$

图 3 是机器人从无动力行走到施加了自适应常值驱动与传感反馈相结合的仿生行走控制整个过程前 100 步的关节角度随时间变化曲线图. 图 4 和图 5 分别给出了控制器增益系数变化曲线和控制力矩变化曲线. 图 4 中控制器的增益系数逐渐趋于定值, 说明机器人相邻两步的初始状态逐渐趋于一致, 即机器人进入稳定的周期步态. 由图 5 可以看出, 步态调节过程中输入力矩较小, 且经过有限步后驱动力矩为 0. 这些都表明控制器是有效的.

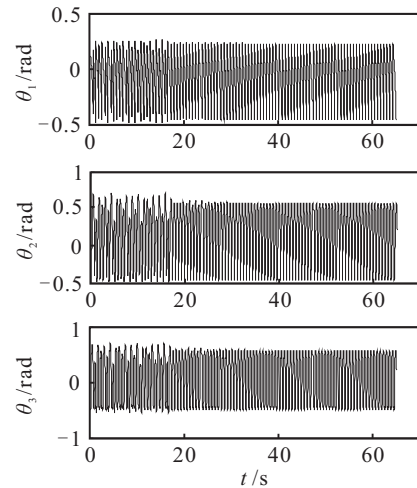


图 3 关节角度随时间变化曲线

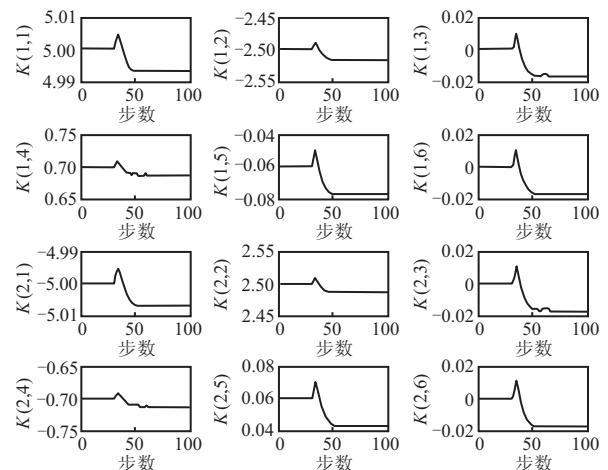


图 4 增益系数变化曲线

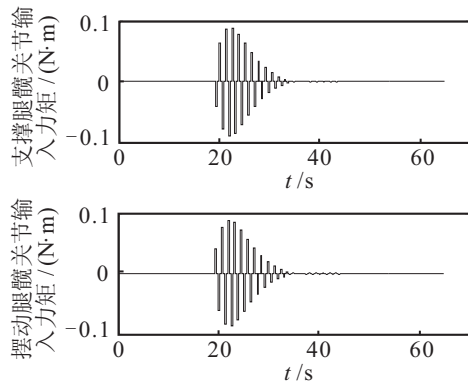


图5 输入力矩变化曲线

4.2 控制系统的鲁棒性

为了考察控制系统的鲁棒性,本文分别对地面坡度和机器人的初始步态施加扰动.首先在初始步态和力矩控制参数不变的条件下,仅对地面坡度施加扰动.结果表明,只要坡度在 $(0.1194 - 0.01, 0.1194 + 0.007)$ rad 范围内变化,机器人都可获得稳定的周期步态.图6(a)是地面坡度扰动为 (-0.008) rad时摆动腿大腿的运动相图,该图说明控制系统对地面坡度的变化具有较强的鲁棒性.

另外,在地面坡度和力矩控制参数保持不变的条件下,对机器人的初始角速度施加的扰动分别为 $[0, -0.4, 0.1]^T$ rad/s 和 $[0, 0.3, 0.2]^T$ rad/s,如图6(b)所示.虽然机器人的初始角速度受到不同的扰动,但最终收敛到同一个极限环,即该控制系统能够提高双足步行机器人行走的稳定性.

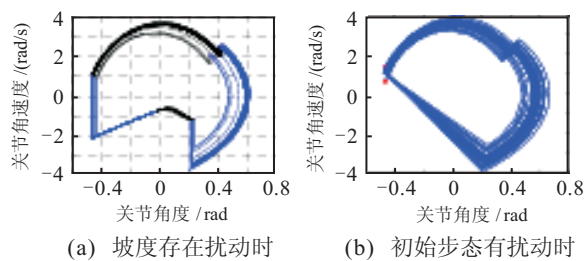


图6 摆动腿大腿的运动相图

5 结论

本文对带膝关节的双足行走机器人进行研究,针对机器人结构参数发生变化会引起周期步态的分岔和混沌的问题,提出了自适应常值驱动与传感反馈相结合的仿生行走控制算法.该算法综合了仿生学、被动动力学和延迟反馈控制原理,仅在机器人的髋关节施加输入力矩,选择易于观测的摆动腿碰地后的瞬间状态作为输出量和参数自调节律的设计准则,达到了抑制混沌步态,使混沌步态收敛到稳定周期步态的目的.增益系数调节律的设计,避开了延迟反馈控制中增益系数矩阵选择难的缺点,节省了力矩输入值.由于仅在膝盖碰撞前施加控制力矩,且不需要预先设计轨迹进行跟踪,整个控制过程消耗的能量较少,最终

实现了高效稳定行走.仿真实验结果验证了算法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Hirai K, Hirose M, Haikawa Y, et al. Development of Honda humanoid robot[C]. Proc of the Int Conf on Robotics and Automation. Piscataway, 1998: 1321-1326.
- [2] McGeer T. Passive dynamic walking[J]. Int J of Robotics Research, 1990, 9(2): 62-82.
- [3] Collins S H, Ruina A. A bipedal walking robot with efficient and human-like gait[C]. Proc of the Int Conf on Robotics and Automation. Piscataway, 2005: 1983-1988.
- [4] Collins S, Ruina A, Russ T, et al. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers[J]. Science, 2005, 307(5712): 1082-1085.
- [5] Goswami A, Thuilot B, Espiau B. Study of the passive gait of a compass-like biped robot: Symmetry and chaos[J]. Int J of Robotics Research, 1998, 17(12): 1282-1301.
- [6] Garcia M, Chatterjee A, Ruina A, et al. The simplest walking model: Stability, complexity and scaling[J]. J of Biomechanical Engineering, 1998, 120(2): 281-286.
- [7] 柳宁, 李俊峰, 王天舒. 双足模型步行中的倍周期步态和混沌步态现象[J]. 物理学报, 2009, 58(6): 3772-3779. (Liu N, Li J F, Wang T S. Period-doubling gait and chaotic gait of biped walking model[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(6): 3772-3779.)
- [8] Liu Zhenze, Tian Yantao, Zhang Peijie, et al. The analysis on bifurcation and chaos in the compass-gait biped[C]. Proc of the Int Conf on Robotics and Biomimetics. Piscataway, 2008: 972-977.
- [9] Li Yong, Du Qiaoling, Liu Zhenze, et al. Impulsive control of passive compass-like biped robot based on anti-phase synchronization[J]. J of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(S2): 292-295.
- [10] Iribe M, Osuka K. Analogy between passive walking robot and phase locked loop circuit[C]. Proc of SICE-ICASE Int Joint Conf. Busan, 2006: 1195-1199.
- [11] Iribe M, Osuka K. Analysis and stabilization of the passive walking robot via analogy with the phase locked loop circuits[C]. Proc of the Int Conf on Humanoid Robots. Genoa, 2006: 548-553.
- [12] 倪修华. 双足被动步行机器人性能分析及一种动力输入方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 2010: 88-92. (Ni X H. Research on performance and a power input method of a passive dynamic walker[D]. Harbin: School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 2010: 88-92.)

(下转第1164页)