文章编号: 1001-0920 (2011) 08-1203-06

被动行走机器人变路况切换控制

刘丽梅[1a, 2], 田彦涛[1], 李建飞[1a], 侯至丞[1a], 黄孝亮[1a]

(1. 吉林大学 a. 通信工程学院，b. 工程仿生教育部重点实验室，
长春 130025；2. 吉林财经大学 应用数学学院，长春 130117)

摘 要: 针对路面坡度变化后, 如何使被动行走机器人在有限时间内只需一步即可完成低能耗的行走模式转换问题, 提出一种控制策略. 首先基于胞映射思想, 提出了估计机器人稳定行走初始状态的变胞胞映射法; 然后利用 Lyapunov 稳定性理论和鲁棒控制思想, 设计了变路况切换控制算法. 该算法既能实现不同坡度路面上稳定行走模式的转换, 又能提高转换过程的鲁棒性. 仿真结果验证了所提出算法的有效性.

关键词: 被动行走机器人；切换控制；变胞胞映射；有限时间；极限环

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Switch control between different slopes for passive dynamic walker

LIU Li-mei[1a,2], *TIAN Yan-tao*[1], *LI Jian-fei*[1a], *HOU Zhi-cheng*[1a], *HUANG Xiao-liang*[1a]

(1a. School of Communication Engineering，1b. Key Laboratory of Bionic Engineering of Ministry of Education，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: Concerning the change of slopes, a control strategy is proposed to make the passive dynamic walker realize the switch of walking mode with low energy dissipation in finite time. The alter cell to cell mapping method based on cell mapping theory is proposed to estimate the initial state of the stable gaits. Then the switch controller between different slopes is designed based on Lyapunov stability theory and robust control theory. This controller can accomplish the switch between different gaits for different slopes efficiently and improve the robustness of switch process. Simulation results show the effectiveness of the control strategy.

Key words: passive dynamic walker；switch control；alter cell to cell mapping；finite time；limit cycle

1 引 言

被动动力行走机器人的研究始于20世纪90年代, 比主动行走机器人的研究落后了近20年[1]. 然而它的出现以其低能耗、步态与人类相似和易于揭示人类行走内部原理的特点而引起了人们的广泛关注.

1991 年, McGeer[2]成功设计了一个在没有外力驱动和能量输入的条件下, 仅在重力作用下沿斜坡向下稳定行走的无膝关节的点足机器人, 并将这类只依靠重力和自身结构特性而获得的双足步行称为“被动动力行走”, 简称“被动行走”. 之后, 许多学者开始研究被动行走, 开发的机器人结构从简单发展到复杂. 但由于被动行走机器人只能在坡度非常小的路面上获得单一的周期步态, 且对路面坡度、初始状态以及外界扰动很敏感, 被动行走机器人有待改进[3-4]. 于是产生了部分关节带驱动和控制机构的半被动动力行走机器人, 也称为准被动动力行走机器人[5-6]. 在被动行走机器人上施加控制驱动的目的之一是扩大产生周期步态的路面坡度范围, 使机器人能以较低的能耗行走在不同坡度的路面甚至平地上. Asano 等人[7-8]提出了虚拟重力场概念, 用控制力矩替代被动行走中重力的作用, 实现了机器人的平地行走. Tedrake[9] 和 Kentarou Hitomi[10]等人将再励学习理论应用于半被动行走机器人的控制器设计中, 通过在线调整, 使机器人在几分钟内便能适应地形和坡度的变化. Spong 等人[11-12]采用重力补偿的思想设计了势能整形控制算法, 使机器人稳定行走在不同坡度的路面上. 但势能整形控制实质是一种开环控制, 系统的鲁棒性较差, 通常与其他控制算法结合使用. 因此,

收稿日期: 2010-05-11；**修回日期:** 2010-07-14.

基金项目: 国家863计划项目(2006AA04Z251); 国家自然科学基金项目(60974067); 吉林财经大学青年项目(2009Q11).

作者简介: 刘丽梅(1979−), 女(满族), 讲师, 博士生, 从事双足机器人控制的研究；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.

Spong 等人[13]将势能整形控制与能量跟踪控制相结合, 加快了行走极限环的收敛速度, 扩大了极限环的收敛域. Goswami 等人[14]在机器人的髋关节或踝关节上施加控制力矩以调节机器人的能量, 扩大了稳定行走的吸引域. Grizzle 等人[15]在被动行走的基础上, 基于零动态理论, 利用输出反馈线性化方法设计控制器, 使机器人在水平地面上稳定行走. 刘振泽等人[16]引入分域控制的思想, 实现了行走步态的自然切换. 付成龙等人[17]在机器人的髋关节上施加一个间断的开环振荡力矩, 实现了机器人稳定的行走模式转换. Pierre-BriceWieber 等人[18]根据地面情况连续地设计参考轨迹, 通过传统的 PID 控制, 实现了参考轨迹的在线适应, 使控制器对坡度变化具有鲁棒性. 虽然现有的半被动动力行走机器人的控制方法可以扩大机器人稳定行走的路面坡度范围, 但是这些算法或者需要驱动力矩持续作用, 或者行走模式转换的收敛速度不够理想.

为使被动行走机器人在不同坡度的路面上进行切换行走, 本文设计了变路况切换控制算法. 该算法作用于坡度变化后的摆动阶段, 同时考虑了外界扰动对转换过程的干扰作用, 设计的控制器对外界扰动具有较好的抑制作用, 进而提高了行走模式转换的鲁棒性. 通过仿真实验以及对比分析可知, 变路况切换控制不但扩大了机器人被动行走的路面坡度范围, 而且加快了行走极限环的收敛速度, 增强了系统的鲁棒性.

2 被动行走机器人模型

基于牛顿-拉格朗日原理建立的双足步行机器人的摆动方程为 $M(\theta)\ddot{\theta}+C(\theta,\ \dot{\theta})\dot{\theta}+g(\theta)=\tau$. 其中: $\theta,\ \dot{\theta},\ \ddot{\theta}$ 分别为各关节的角度、角速度和角加速度; τ 为驱动力矩, 若 $\tau=0$, 则为被动行走机器人; $M(\theta)$ 为惯性矩阵; $C(\theta,\ \dot{\theta})$ 为离心力和哥氏力矩阵; $g(\theta)$ 为重力矩阵. 该系统具有以下特征:

1) $M(\theta)$ 为正定矩阵;

2) $M(\theta)-2C(\theta,\ \dot{\theta})$ 为反对称矩阵;

3) $M(\theta)$ 和 $C(\theta,\ \dot{\theta})$ 对于任意的 θ 和 $\dot{\theta}$ 是一致有界的, 即存在常数 $\lambda_1>0,\ \lambda_2>0$ 和正定函数 $\beta(\dot{\theta})$, 使得 $\lambda_1 I\leqslant M(\theta)\leqslant\lambda_2 I$, $C^{\mathrm{T}}(\theta,\ \dot{\theta})C(\theta,\ \dot{\theta})\leqslant\beta(\dot{\theta})I$.

假设机器人行走中发生的碰撞是瞬间发生的完全弹性碰撞, 且没有相对滑动, 则利用角动量守恒原理可以建立行走过程的碰撞方程. 令 $x=[\theta,\ \dot{\theta}]^{\mathrm{T}}$, 则双足步行机器人系统可表示为由连续微分方程和代数映射构成的混合系统, 即

$$\begin{cases}\dot{x}=f(x),\ x\notin S;\\ x^{+}=h(x^{-}),\ x\in S.\end{cases}\tag{1}$$

其中: $S=\{x\,|r(x)=0\}$ 为碰撞面, $r(x)$ 为碰撞探测函数, $h(x)$ 为碰撞映射, x^{-} 为碰撞前状态, x^{+} 为碰撞后状态.

3 变胞胞映射法估计稳定行走的初始状态

在某一坡度路面上被动行走机器人只存在唯一的稳定行走步态, 因此得到坡度变化后稳定行走的初始状态是行走模式转换的关键. Newton Raphson 迭代法是估计稳定行走初始状态的常用方法, 但迭代初值的选择是难点[19]. 为克服初值的影响, 本文基于胞映射思想, 提出估计双足步行机器人稳定行走初始状态的数值方法——变胞胞映射法.

3.1 变胞胞映射法

考虑系统 (1), 将机器人脚与地面碰撞后的瞬间作为庞加莱截面, 设 $t=0$ 时系统的状态为 x_0, 则系统 (1) 对应的庞加莱映射为 $x(t)=h\circ\varphi(t,0,x_0)$, 其中 $\varphi(t,0,x_0)$ 为摆动过程的解轨迹. 变胞胞映射法的步骤如下:

Step 1: 状态空间离散为胞空间. 设选定的状态空间为 $\Omega\subset R^N$, $x_i(i=1,2,\cdots,N)$ 为状态变量. 将每个状态变量对应的取值范围用 $h_{1i}(i=1,2,\cdots,N)$ 进行等距分割, 设 x_i 对应的最小值为 a_i, 如果状态变量在 x_i 轴上的投影满足 $a_i+(z_i-1)h_{1i}\leqslant x\leqslant a_i+z_ih_{1i}(i=1,2,\cdots,N)$, 则称此状态属于胞 z_i. 于是可用 N 维胞矢量 $Z=(z_1,z_2,\cdots,z_N)$ 来表征该状态变量的位置. 所有胞矢量构成的集合即为胞空间.

Step 2: 用胞映射对胞空间中的每个胞矢量作用, 获得周期胞、平衡胞和暂态胞. 对胞矢量 $Z(n)=(z_1(n),z_2(n),\cdots,z_N(n))$, 找出胞矢量中心点 $x^d(n)=(x_1^d(n),x_2^d(n),\cdots,x_N^d(n))$, 其中 $x_i^d(n)=a_i+(z_i(n)-1/2)h_{1i}$. 设 $x_0=x^{(d)}(n)$ 是 $\dot{x}=f(x)$ 的初始状态, 如果 $r(x(t_e))\neq 0$, 则 $Z(n)$ 为陷胞; 如果 $r(x(t_e))=0$, 则 $x^{+}=h(x(t_e))$. 经过胞映射得到像胞 $Z(n+1)$, 其中

$$z_i(n+1)=C_i(z_i(n))=\mathrm{Int}\left\{\frac{(x_i^{+}-x_i)}{h_{1i}}+\frac{1}{2}\right\}.\tag{2}$$

若 $Z(n)=Z(n+1)$, 则 $Z(n)$ 为平衡胞; 若 $Z(n)\neq Z(n+1)$, 则对 $Z(n+1)$ 继续进行胞映射, 直到得到周期胞.

Step 3: 用相对于 h_{1i} 更细的间距 h_{2i} 分割每个周期胞和平衡胞 $(i=1,2,\cdots,N)$. 所有细分后的胞矢量对应的中心点构成的集合称为概吸引域.

Step 4: 以概吸引域内的每个点 x^* 为初始状态, 在精度允许的范围内作用庞加莱映射, 即

$$x^{**}=P(x^*)=h\circ\varphi(t,0,x_0).$$

令 $x^*=x^{**}$, $x^{**}=P(x^*)$, 若经过循环作用后得到 $|P(x^*)-x^*|<\varepsilon$ (ε 是任意小的正数), 则 x^* 即为稳定行走的初始状态.

3.2 变胞胞映射法的数值实验

采用文献[16]的Compass-like被动行走机器人模型. 实验参数分别为 $m_H = 10\,\mathrm{kg}$, $m = 5\,\mathrm{kg}$, $g = 9.8\,\mathrm{kg/m^2}$, $l = 1\,\mathrm{m}$, $a = 0.5\,\mathrm{m}$, $b = 0.5\,\mathrm{m}$, $\phi = 2°$. 选定状态范围为$[-0.3,\ 0.3]\times[-0.3,\ 0.3]\times[-1,1]\times[-1,1]$.

$$h_{11} = 0.06,\ h_{12} = 0.06,\ h_{13} = 0.2,\ h_{14} = 0.2;$$

$$h_{21} = 0.03,\ h_{22} = 0.03,\ h_{23} = 0.1,\ h_{24} = 0.1.$$

用变胞胞映射法得到机器人稳定行走的初始状态为 $[-0.2710, 0.2013, -0.5202, -1.0122]^{\mathrm{T}}$. 图 1 是Compass-like双足机器人以其为初始状态, 沿斜面被动行走的双腿运动角位移曲线, 它表明变胞胞映射法是有效的.

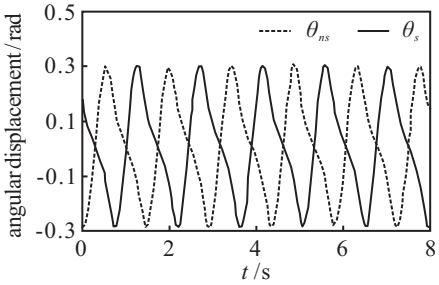


图 1　Compass-like被动行走机器人的双腿运动角位移曲线

4　变路况切换控制

为了增强行走模式转换对外界扰动的鲁棒性, 本文针对带有不确定性的双足步行机器人系统设计了变路况切换控制算法. 因为碰撞过程具有自调节功能, 所以控制器只需施加在摆动阶段. 设带有不确定性(如随机干扰、摩擦等)的双足步行机器人的摆动方程为

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

其中 $\varDelta$ 为不确定性, 其上界可测. 一旦路面坡度发生变化, 利用变胞胞映射法估计出被动行走机器人在新坡度路面上稳定行走的初始状态, 并于新坡度路面上机器人行走的第 1 步设计变路况切换控制器, 通过控制器的作用使机器人在给定的时间内运动到新坡度路面上稳定行走的初始状态, 这样机器人便可继续进行被动行走, 从而完成行走模式在一步内的转换.

引理 1　考虑非自治系统

$$\dot{x} = f(x,t), \tag{4}$$

对于给定的时间 T, 若存在连续可微的正定函数 $V(x,t)$, 使 $0 \leqslant t < T$ 时, 下列不等式成立:

$$\lambda_1 \|x\|^2 \leqslant V(x,\ t) \leqslant \lambda_2 \|x\|^2,\ \forall x; \tag{5}$$

$$\dot{V}(x,\ t) \leqslant -\frac{\lambda_3}{(T-t)^2}\|x\|^2 + \varepsilon,\ \forall x. \tag{6}$$

其中: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \varepsilon$ 均为正常数. 则对于任意初始状态 $x(0)$, $0 \leqslant t < T$ 时, 下式成立:

$$\|x(t)\| \leqslant \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}\,\mathrm{e}^{\frac{\lambda_3 t}{2\lambda_2 T(t-T)}}\|x(0)\| + \sqrt{\frac{\varepsilon T}{\lambda_1}}. \tag{7}$$

证明　由式(5)得

$$-\frac{\lambda_3}{(T-t)^2}\|x\|^2 \leqslant -\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\frac{1}{(T-t)^2}V(x,t),$$

故由式(6)得

$$\dot{V}(x,t) \leqslant -\frac{\lambda_3}{\lambda_2(T-t)^2}V(x,t) + \varepsilon.$$

将上式两端同乘以 $\mathrm{e}^{\frac{\lambda_3}{\lambda_2(T-t)}}$, 得

$$\mathrm{e}^{\frac{\lambda_3}{\lambda_2(T-t)}}\left[\dot{V}(x,t) + \frac{\lambda_3}{\lambda_2(T-t)^2}V(x,t)\right] \leqslant \varepsilon\mathrm{e}^{\frac{\lambda_3}{\lambda_2(T-t)}}.$$

易证上式左端为

$$\frac{\mathrm{d}\left[\mathrm{e}^{\frac{\lambda_3}{\lambda_2(T-t)}}V(x,t)\right]}{\mathrm{d}t} \leqslant \varepsilon\mathrm{e}^{\frac{\lambda_3}{\lambda_2(T-t)}},$$

则有

$$\left[\mathrm{e}^{\frac{\lambda_3}{\lambda_2(T-t)}}V(x,t)\right] - \left[\mathrm{e}^{\frac{\lambda_3}{\lambda_2 T}}V(x,0)\right] \leqslant \varepsilon T\mathrm{e}^{\frac{\lambda_3}{\lambda_2(T-t)}}.$$

上式经整理可得

$$V(x,t) \leqslant \mathrm{e}^{\frac{t\lambda_3}{T\lambda_2(t-T)}}V(x,0) + \varepsilon T.$$

又由式(5)知

$$\|x(t)\|^2 \leqslant \frac{\mathrm{e}^{\frac{\lambda_3 t}{T\lambda_2(t-T)}}V(x,0) + \varepsilon T}{\lambda_1} \leqslant \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\mathrm{e}^{\frac{\lambda_3 t}{T\lambda_2(t-T)}}\|x(0)\|^2 + \frac{\varepsilon T}{\lambda_1}.$$

因此

$$\|x(t)\| \leqslant \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}\mathrm{e}^{\frac{\lambda_3 t}{2\lambda_2 T(t-T)}}\|x(0)\| + \sqrt{\frac{\varepsilon T}{\lambda_1}}. \qquad \square$$

定理 1　考虑系统(3), 对于给定的时间 T, 当 $0 \leqslant t < T$ 时, 存在正定函数 $\rho(e,\ \dot{e})$, 使得

$$\|\varDelta\| \leqslant \rho(e,\ \dot{e}). \tag{8}$$

其中: $e = \theta - \theta^d$, $\dot{e} = \dot{\theta} - \dot{\theta}^d$, θ^d 和 $\dot{\theta}^d$ 是由新坡度路面上机器人行走第 1 步的初始状态作为出发点、机器人在新坡度路面上被动行走的初始状态作为目标点和 T 构成的三次样条插值状态轨迹. 令输入控制力矩为

$$\tau = g(\theta) + M(\theta)\ddot{\theta}^d + C(\theta,\dot{\theta})\dot{\theta}^d - \frac{\lambda}{(T-t)^3}\eta - \frac{M(\theta)\dot{e}}{(T-t)^2} - \frac{2\alpha M(\theta)e}{(T-t)^3} - \frac{\alpha C(\theta,\ \dot{\theta})e}{(T-t)^2} - \frac{\eta\rho^2(e,\ \dot{e})}{\|\eta\|\,\rho(e,\ \dot{e}) + \varepsilon}. \tag{9}$$

其中: $\eta = \dot{e} + \frac{\alpha e}{(T-t)^2}$; $\alpha, \lambda, \varepsilon$ 为给定的正常数. 则 $0 \leqslant t < T$ 时, 有

$$\|\,e(t)\,\| \leqslant N\,\|e(0)\|\,\mathrm{e}^{\frac{\alpha t}{T(t-T)}} + N\mathrm{e}^{\frac{\alpha}{t-T}} \times \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}\,\|\eta(0)\|\,\mathrm{e}^{\frac{\alpha}{T}}T + NT\sqrt{\frac{2\varepsilon T}{\lambda_1}}.$$

其中: λ_1 和 λ_2 为 $M(\theta)$ 的最小特征值和最大特征值, N 为 $e(t)$ 的维数.

证明　令 $\tau = M(\theta)\ddot{\theta}^d + C(\theta,\ \dot{\theta})\dot{\theta}^d + g(\theta) + \tilde{u}$,

记 $e=\theta(t)-\theta^d(t)$, 则跟踪误差动态系统为

$$M(\theta)\ddot{e}+C(\theta,\ \dot{\theta})\dot{e}+\varDelta=\tilde{u}. \tag{10}$$

定义 $\eta=\dot{e}+\dfrac{\alpha e}{(T-t)^2}$, 则

$$M(\theta)\dot{\eta}=\tilde{u}-\varDelta-C(\theta,\dot{\theta})\eta+\frac{\alpha M(\theta)\dot{e}}{(T-t)^2}+\frac{2\alpha M(\theta)e}{(T-t)^3}+\frac{\alpha C(\theta,\ \dot{\theta})e}{(T-t)^2}. \tag{11}$$

令

$$w=\frac{\alpha M(\theta)\dot{e}}{(T-t)^2}+\frac{2\alpha M(\theta)e}{(T-t)^3}+\frac{\alpha C(\theta,\dot{\theta})e}{(T-t)^2},$$

代入式 (11), 得

$$M(\theta)\dot{\eta}=\tilde{u}-\varDelta-C(\theta,\ \dot{\theta})\eta+w. \tag{12}$$

定义连续可微的正定函数为

$$V(t,\ \eta)=\eta^{\mathrm{T}}M(\theta)\eta, \tag{13}$$

沿方程 (3) 的任意轨迹求 V 对时间 t 的微分, 得

$$\dot{V}=2\eta^{\mathrm{T}}M(\theta)\dot{\eta}+\eta^{\mathrm{T}}\dot{M}(\theta)\eta=2\eta^{\mathrm{T}}w-2\eta^{\mathrm{T}}(\varDelta+\tilde{u})+\eta^{\mathrm{T}}(\dot{M}(\theta)-2C(\theta,\dot{\theta}))\eta. \tag{14}$$

因为 $\dot{M}(\theta)-2C(\theta,\ \dot{\theta})$ 为反对称矩阵, 所以

$$\eta^{\mathrm{T}}(\dot{M}(\theta)-2C(\theta,\ \dot{\theta}))\eta=0.$$

设

$$\tilde{u}=-\frac{\lambda}{(T-t)^2}\eta-w-v,\ v=\frac{\eta\rho^2(e,\dot{e})}{\|\eta\|\,\rho(e,\dot{e})+\varepsilon},$$

得

$$\dot{V}=2\eta^{\mathrm{T}}\Big(-\frac{\lambda}{(T-t)^2}\eta-\varDelta-v\Big).$$

利用柯西不等式 $\left|\eta^{\mathrm{T}}\varDelta\right|\leqslant\|\eta\|\cdot\|\varDelta\|$, 可得

$$\dot{V}\leqslant-2\eta^{\mathrm{T}}v+2\|\eta\|\cdot\|\varDelta\|-\frac{2\lambda}{(T-t)^2}\eta^{\mathrm{T}}\eta\leqslant-\frac{2\lambda\|\eta\|^2}{(T-t)^2}+2\varepsilon.$$

又因为 $M(\theta)$ 具有一致有界性, 由引理 1 可得

$$\|\eta\|\leqslant\sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}\|\eta(0)\|\,\mathrm{e}^{\frac{\lambda t}{\lambda_2T(t-T)}}+\sqrt{\frac{2\varepsilon T}{\lambda_1}}. \tag{15}$$

利用常数变易法解 $\eta=\dot{e}+\dfrac{\alpha\cdot e}{(T-t)^2}$, 可得

$$e(t)=e(0)\mathrm{e}^{\frac{\alpha t}{(t-T)T}}+\mathrm{e}^{\frac{\alpha}{t-T}}\int_0^t\eta(s)\mathrm{e}^{\frac{\alpha}{T-s}}\mathrm{d}s.$$

记 $e(t)=[e_1(t),e_2(t),\cdots,e_N(t)]^{\mathrm{T}}$, 则式 (15) 等价于

$$e_i(t)=e_i(0)\mathrm{e}^{\frac{\alpha t}{(t-T)T}}+\mathrm{e}^{\frac{\alpha}{t-T}}\int_0^t\eta_i(s)\mathrm{e}^{\frac{\alpha}{T-s}}\mathrm{d}s. \tag{16}$$

其中: $\eta=(\eta_1,\eta_2,\cdots,\eta_N)^{\mathrm{T}},i=1,2,\cdots,N$.

由 $\|e(t)\|\leqslant\sum\limits_{i=1}^N|e_i(t)|,|e_i(t)|\leqslant\|e(t)\|,|\eta_i(t)|\leqslant\|\eta(t)\|$, 可得

$$\sum_{i=1}^N|e_i(t)|\leqslant\Big(\sum_{i=1}^N|e_i(0)|\Big)\mathrm{e}^{\frac{\alpha t}{(t-T)T}}+\mathrm{e}^{\frac{\alpha}{t-T}}\int_0^t\Big(\sum_{i=1}^N|\eta_i(s)|\Big)\mathrm{e}^{\frac{\alpha}{T-s}}\mathrm{d}s.$$

进而有

$$\|e(t)\|\leqslant N\|e(0)\|\,\mathrm{e}^{\frac{\alpha t}{T(t-T)}}+N\mathrm{e}^{\frac{\alpha}{t-T}}\times\int_0^t\mathrm{e}^{\frac{\alpha}{T-s}}\|\eta(s)\|\,\mathrm{d}s,$$

即

$$\|e(t)\|\leqslant N\|e(0)\|\,\mathrm{e}^{\frac{\alpha t}{T(t-T)}}+N\mathrm{e}^{\frac{\alpha}{t-T}}\int_0^t\mathrm{e}^{\frac{\alpha}{T-s}}\times\Big[\sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}\|\eta(0)\|\,\mathrm{e}^{\frac{\lambda s}{\lambda_2T(s-T)}}+\sqrt{\frac{2\varepsilon T}{\lambda_1}}\Big]\mathrm{d}s,$$

所以

$$\|e(t)\|\leqslant N\|e(0)\|\,\mathrm{e}^{\frac{\alpha t}{T(t-T)}}+N\mathrm{e}^{\frac{\alpha}{t-T}}\sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}\times\|\eta(0)\|\,\mathrm{e}^{\frac{\alpha}{T}}T+NT\sqrt{\frac{2\varepsilon T}{\lambda_1}}.$$ □

注 1 由定理 1 控制率的设计可知 $e(t)$ 和 $\dot{e}(t)$ 最终只与 α 有关. 调节 α 值保证 $e(t)$, $\dot{e}(t)$ 与 $(T-t)^3$ 是同阶无穷小量 $(t\to T)$, 即可保证控制器的能耗 c_{mt} 较低, 从而实现低能耗的行走模式转换.

注 2 实际控制中切换时间 T 取坡度变化前机器人稳定行走的周期值, 通过恰当地选取 α, λ, ε, 可保证控制器的控制性能.

5 仿真结果

5.1 不同坡度间的行走模式转换

将 Compass-like 被动行走机器人作为仿真实验对象, 参数取值与 3.2 节相同. 令 $\varDelta=[0.5\mathrm{sign}(\dot{\theta}_1),\ 0.5\mathrm{sign}(\dot{\theta}_2)]^{\mathrm{T}}$, $e(0)=[0.05,\ 0.05]^{\mathrm{T}}$, $\dot{e}(0)=[0.02,\ 0.02]^{\mathrm{T}}$, $T=0.7\,\mathrm{s}$. 图 2 是未加控制和施加本文控制算法情况下, 机器人的摆动腿角度和支撑腿角度在 0.7 s 内的跟踪误差曲线. 其中: $\alpha=15$, $\lambda=80$, $\varepsilon=0.000\,1$. 显然, 所设计的控制器具有良好的动态跟踪特性, 可在给定时间内到达目标点.

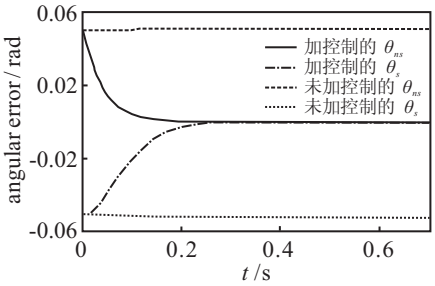


图 2 加控制和未加控制情况下跟踪误差曲线

假设被动行走机器人从 2° 斜坡路面行走到 4° 斜坡路面. 由于被动行走机器人对路面坡度变化的抗扰动性较差, 为了获得稳定行走步态, 用变胞胞映射法估计出 4° 路面上被动行走的初始状态为

$$[-0.368\,6,0.229\,0,-0.217\,7,-1.139\,5]^{\mathrm{T}}.$$

以该状态作为机器人行走模式转换的目标点, 使其在给定时间内通过一步调整到该目标点. 已知机器人在 2° 路面上被动行走的周期为 0.7 s, 所以令机器人

步态转换过程的时间为 $T = 0.7$ s. 设坡度变为 4° 后行走模式转换过程中存在外界扰动 $\Delta = [10\mathrm{sign}(\theta_{\mathrm{ns}}), 10\mathrm{sign}(\theta_{\mathrm{s}})]^{\mathrm{T}}$, 将变路况切换控制作用于新坡度路面上机器人行走第 1 步相应的摆动阶段. 其中: $\lambda = 4.5$, $\alpha = 0.5$, $\rho = 15$, $\varepsilon = 0.000\,1$, $T = 0.7$ s. 图 3 是机器人在 2° 路面上被动行走 4 步, 在第 5 步通过变路况切换控制完成步态转换, 最后在 4° 路面上被动行走 3 步的极限环, 其中: 实线表示被动行走步态, 虚线表示一步转换步态.

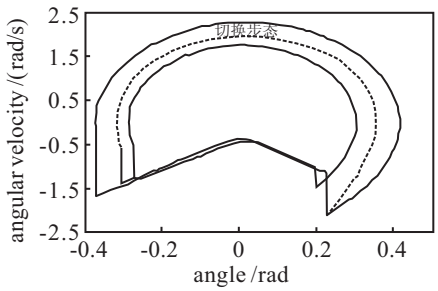


图 3　存在外界扰动时机器人从 2° 到 4° 路面的步态极限环

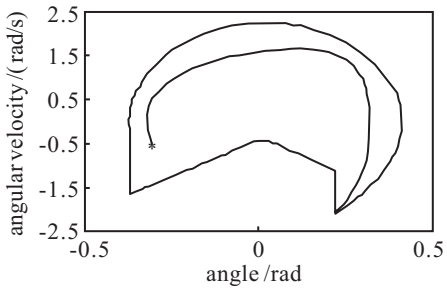
仿真实验表明, 变路况切换控制器对外界扰动具有鲁棒性, 既能实现行走模式在一步内的转换, 又能提高步态转换过程对外界扰动的鲁棒性.

为计算机器人行走模式转换过程的功耗, 采用无量纲行走功耗公式

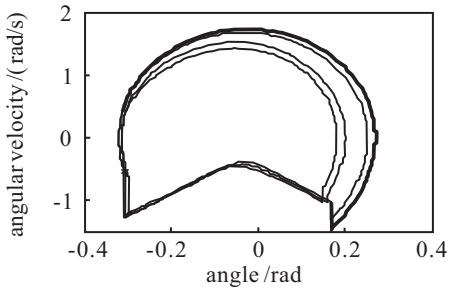
$$c_{mt} = \int_0^{0.7} |\tau\dot{\theta}|\mathrm{d}t \Big/ (m \times g \times D) = \frac{6.646\,8[\mathrm{J}]}{20[\mathrm{kg}] \times 9.8[\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-2}] \times 0.588\,7[\mathrm{m}]} = 0.057\,6.$$

由于人类行走的功耗 c_{mt} 约为 0.05, 可见变路况切换控制的步行能耗特性与人类相似.

5.2　对比实验



(a) 变路况切换控制效果



(b) 基于能量的角度不变控制效果

图 4　坡度变为 4° 后极限环收敛图

基于能量的角度不变控制是被动行走机器人控制中较为有效的控制算法, 它能扩大机器人行走路面坡度的范围, 提高极限环的收敛速度 [16]. 本文对变路况切换控制和基于能量的角度不变控制进行了对比实验. 图 4 表明, 本文设计的控制器使得极限环的收敛速度更快, 对提高系统的稳定性效果好; 而且变路况切换控制可使机械能收敛速度加快 (见图 5). 通过对比实验可以看出, 变路况切换控制对于提高机器人步态的稳定性和收敛速度具有较好的优势.

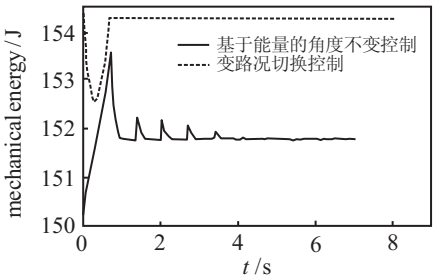


图 5　坡度变为 4° 后机械能收敛图

6　结　论

当机器人行走的路面坡度发生变化后, 为获得持续的稳定行走步态, 本文提出了变路况切换控制算法. 变路况切换控制作用于机器人行走的摆动阶段, 通过选取恰当的控制器参数值, 可使机器人在任何给定的有限时间内完成低能耗的步态转换, 重新获得稳定行走步态. 它不需要对机器人施加持续不断的驱动力矩, 只需在切换时间内对机器人的部分关节施加驱动力矩. 变胞胞映射法可以估计机器人稳定行走的初始状态, 对机器人原型机的开发和设计具有参考价值. 在仿真实验中, 对 Compass-like 双足机器人的髋关节和支撑腿的踝关节施加控制力矩, 使机器人在一步内实现了步态调整, 获得了高效稳定的行走步态. 与基于能量的角度不变控制的对比实验表明, 变路况切换控制对保持步态的稳定性和鲁棒性具有很好的控制作用.

当控制器的参数值只有切换时间未确定时, 步态调整的能耗基本与时间成反比. 因此, 下一步的研究内容是找到控制器参数之间的关系, 并通过智能算法进行优化调节, 给出最优参数值, 使能耗最少, 同时达到步态调整的目的.

参考文献(References)

[1] Kato I, Tsuiki H. The hydraulically powered biped walking machine with a high carrying capacity[C]. Proc of the Int Symposium on External Control of Human Extremities. Dubrovnik: Yugoslavia, 1972: 410-421.

[2] McGeer T. Passive dynamic walking[J]. The Int J of Robotics Research, 1990, 9(2): 62-82.

[3] Garcia M, Chatterjee A, Ruina A. Efficiency speed and scaling of two-dimensional passive-dynamic walking[J]. Dynamics and Stability of Systems, 2000, 15(2): 75-99.

[4] Goswami A, Thuilot B, Espiau B. A 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.

[5] Sugimoto Y, Osuka K. Motion generate and control of quasi passive dynamic walking based on the concept of delayed feedback control[C]. Proc of 2nd Int Symposium on Adaptive Motion of AnimalsandMachines. Tokyo: Springer, 2006: 165-174.

[6] Collins S, Ruina A, Tedrake R, et al. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers[J]. Science, 2005, 307(5712): 1082-1085.

[7] Asano F, Yamakita M, Furuta K. Virtual passive dynamic walking and energy-based control laws[C]. Proc of the 2000 IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Takamatsu, 2000: 1149-1154.

[8] Asano F, Yamakita M, Kamamichi N, et al. A novel gait generation for biped walking robots based on mechanical energy constraint[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2004, 20(3): 565-573.

[9] Tedrake R, Zhang T W, Seung H S. Stochastic policy gradient reinforcement learning on a simple 3D biped[C]. Proc of IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Japan: Sendal, 2004: 2849-2854.

[10] Kentarou Hitomi, Tomohiro Shibata, Yutaka Nakamura, et al. Reinforcement learning for quasi-passive dynamic walking of an unstable biped robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2006, 54(12): 982-988.

[11] Spong M W, Bhatia G. Further results on control of the compass gait biped[C]. Proc of IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2003: 1933-1938.

[12] Spong M W, Bullo F. Controlled symmetries and passive walking[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(7): 1025-1031.

[13] Spong M W, Holm J K, Lee D. Passivity-based control of bipedal locomotion[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2007, 14(2): 30-40.

[14] Gosiwami A, Espiau B, Keramane A. Limit cycles in a passive compass gait biped and passivity-mimicking control laws[J]. Autonomous Robots, 1997, 4(3): 273-286.

[15] Grizzle J W. Asymptotically stable walking for biped robots: Analysis via systems with impulse effects[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2001, 46(1): 51-64.

[16] 刘振泽, 田彦涛, 张佩杰, 等. 无动力双足步行机器人控制策略与算法[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(2): 113-121.
(Liu Z Z, Tian Y T, Zhang P J, et al. Control strategies and algorithms for passive compass-like biped robot[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(2): 113-121.)

[17] 付成龙, 黄元林, 王健美, 等. 半被动双足机器人的准开环控制[J]. 机器人, 2009, 31(2): 110-123.
(Fu C L, Huang Y L, Wang J M, et al. Quasi open-loop control for semi-passive biped robots[J]. Robot, 2009, 31(2): 110-123.)

[18] Pierre-Brice Wieber, Christine Chevallereau. Online adaptation of reference trajectories for the control of walking systems[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2006, 54(7): 559-566.

[19] 柳宁, 李俊峰, 王天舒. 简单被动行走模型仿真及不动点的吸引盆计算[J]. 力学与实践, 2008, 30(1): 18-22.
(Liu N, Li J F, Wang T S. Simulation of a simple passive dynamic walking model and the basin of attraction of its fixed point[J]. Mechanics and Engineering, 2008, 30(1): 18-22.)

下 期 要 目

时变系统控制方法综述 · · ·