

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2017.0742

## 面向非连续性地面的双足欠驱动步行稳定控制

姚 渊, 姚道金, 肖晓晖, 王 杨

(武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 为实现双足机器人在真实非连续地面上的欠驱动稳定步行, 基于自适应前馈控制算法提出一种变步长稳定步行控制策略. 首先, 针对机器人步行速度、稳定性以及质心运动轨迹的映射关系, 引出一种基于质心运动状态的单输入—单输出自适应前馈控制算法, 实现机器人在真实地面上的稳定步行. 其次, 从步行仿人性的角度出发, 为消除地面非连续性对步行稳定性的影响, 通过改变步长和质心理想跟踪速度设计变步长稳定步行控制策略, 实现欠驱动双足步行机器人在真实非连续地面上的稳定步行. 最后, 通过对四连杆机器人模型的数值仿真, 以及在木板和橡胶混合地面上的机器人样机试验, 验证变步长稳定步行控制策略的有效性. 试验结果表明: 本文提出的变步长稳定步行控制策略能够在真实非连续地面上的欠驱动稳定步行.

**关键词:** 非连续路面; 欠驱动步行; 前馈控制; 变步长; 步行试验

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2017)-05-0742-09

## Stable Control of Underactuated Biped Walking on Discontinuous Ground

YAO Yuan, YAO Daojin, XIAO Xiaohui, WANG Yang

(School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In order to achieve underactuated stable walking of the biped robot on a discontinuous real ground, a variable step-length stabilized control strategy based on the adaptive feedforward control algorithm is proposed. Firstly, a single-input and single-output adaptive feedforward controller based on CoM (centre of mass) motion state is introduced according to the mapping relationship between robot walking speed, stability and CoM trajectory, to realize stable walking on the real ground. Secondly, a variable step-length stabilized control strategy is proposed from the view of imitating human walking, in order to eliminate the influence of the ground discontinuity on walking stability. The underactuated biped robot can walk stably on the real discontinuous ground by changing the step length and the ideal tracking speed of CoM. Finally, the validity of the variable step-length stabilized control strategy is verified by numerical simulation of the four-link robot model and the prototype experiment on the mixed wood/rubber ground. The experimental results show that the proposed variable step-length strategy can achieve underactuated stable walking on the real discontinuous ground.

**Keywords:** discontinuous ground; underactuated walking; feedforward control; variable step-length; walking experiment

### 1 引言 (Introduction)

相比于传统的移动机器人, 双足步行机器人具有良好的环境适应性和高度仿人性, 是未来人类从事高危险性工作的理想替代机器人<sup>[1]</sup>. 根据步行方式的不同, 仿人机器人步行方式可分为全驱动步行和欠驱动步行. 与全驱动方式相比, 欠驱动双足步行稳定性研究和步态设计采用了动态稳定性理论, 机器人能实现更大步距、更高步速和更低功耗步行, 并且步行姿态的仿人性更高<sup>[2]</sup>. 目前, 国内外的一些研究机构在欠驱动双足步行机器人领域取得了不错的成果, 如密歇根大学<sup>[3]</sup>、德州 A&M 大

学<sup>[4]</sup>、清华大学<sup>[5]</sup>等.

为完成高效工作, 步行机器人需要携带重型装备并且实现高速行走, 那么就需要考虑真实地面环境中地面阻尼、刚度等对机器人步行速度以及稳定性的影响<sup>[6]</sup>. 另一方面, 即使是在城市的铺装路面, 也会存在地面疲劳损坏、铺装工艺缺陷而带来的地面凹陷等不连续性. 当机器人遇到这些路面障碍时, 调整步长、跨过凹陷区域是最高效的方式. 而机器人行走过程中步态的变化也会对机器人稳定系统产生扰动影响<sup>[7-8]</sup>. 因此, 对欠驱动双足步行机器人在真实非连续地面上的稳定行走研究受到广

大学者的关注.

为解决真实地面<sup>[9]</sup>对步行稳定性的影响, Westervelt 采用数值求解的方法获取基于真实地面环境的周期稳定步态, 继而通过 PD (比例-微分) 反馈控制器实现相应地面上的步速调节和稳定控制<sup>[10]</sup>; Sreenath 通过引入碰撞因子, 建立实际和理论的“机器人-地面”碰撞模型之间的映射关系, 实现 MABEL 机器人的稳定步行<sup>[11]</sup>. Wang 将“机器人-地面”步行系统模型等效简化为“单杆-地面”模型, 模仿人类步行特征, 提出一种自适应前馈控制策略, 在仿真中实现了机器人在柔性地面上的稳定步行<sup>[12]</sup>.

针对地面非连续性对机器人步行的扰动影响, Hodgins 提出 3 类控制方法, 通过调整单个运动周期内的速度、高度以及时间这 3 个参数实现了双足机器人的变步长动态平衡控制<sup>[13]</sup>. Yang 通过调整位置误差, 实现机器人步长的在线实时调整更新, 使机器人能在不平地面上稳定步行<sup>[14]</sup>. Hu 基于反馈线性化的方法, 通过调节机器人参考步长和步行速度, 在仿真情况下实现了平面两杆双足机器人在复杂路面环境中的持续步行<sup>[15]</sup>. 虽然上述控制策略实现了变步长步行, 但是算法实现大都是通过复杂的在线计算再针对性地设计控制器, 且该控制器并未考虑真实地面环境对机器人的扰动影响. 同时, 受制于辨识实验中机器人结构和地面环境的局限性, 所得算法和步态对地面环境适应性低, 且对其他欠驱动双足步行系统的适应性差.

因此, 为应对真实地面非连续性对步行稳定性的扰动影响, 本文模仿人类在非连续路面上的行走方式, 在自适应前馈控制算法基础上作进一步拓展, 提出一种变步长稳定步行控制策略. 该策略通过调整机器人的步长和质心的理想跟踪速度, 在仿真中实现机器人在真实非连续地面复合扰动下的变步长稳定步行. 同时通过对样机的调试完成了机器人样机在木板-橡胶混合地面上的变步长步行试验, 验证了该控制策略的有效性.

## 2 自适应前馈控制算法 (Adaptive feedforward control strategy)

### 2.1 机器人模型介绍

建模过程中为了接近真实地面, 本文基于泊松碰撞假设, 将地面简化为弹簧-阻尼单元<sup>[16]</sup>. 根据机器人足底与地面的接触状态, 可将一个步行周期分为单足相 (SSP) 和双足相 (DSP) 2 个阶段. 单足相阶段与地面接触的足称为支撑足, 另一足为

摆动足. 经过双足相阶段, 支撑足与摆动足互换角色, 并定义一个完整的步行周期为起始于双足相初始时刻, 终止于单足相终止时刻.

图 1 所示为“机器人-地面”刚柔耦合模型. 机器人包括 3 个主动自由度, 即 1 个髋关节  $q_3$  和 2 个膝关节  $q_2, q_4$ ; 设机器人在广义坐标系下的姿态由向量  $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T$  表达, 则机器人在第  $N$  个步行周期初始时刻的状态为  $[q_i, \dot{q}_i]_N^T$ , 终止时刻的状态为  $[q_f, \dot{q}_f]_N^T$ .

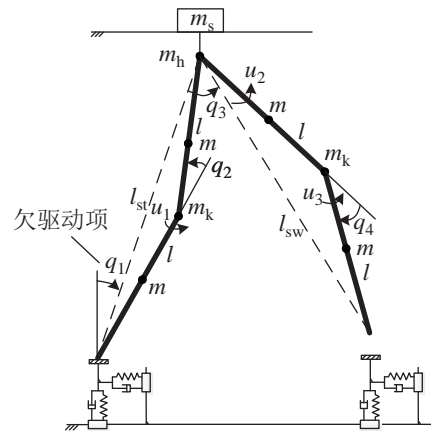


图 1 机器人-地面耦合模型

Fig.1 The robot-ground coupling model

### 2.2 控制参数确定

人类在日常步行中步行速度不为 0 即可持续步行, 当步行速度趋于不变即为稳定步行. 同样, 在机器人行走过程中, 将步行每一步视为循环周期, 针对该循环运动系统, 在采用庞加莱回归映射原理时, 若系统满足李亚普诺夫渐近稳定条件<sup>[17-18]</sup>, 即经过有限个循环周期, 机器人步行速度能收敛到一个不动点, 则认为实现了稳定步行. 综上所述, 本文提出一种步行稳定性评估方法: 如果双足欠驱动步行机器人的步行速度能始终收敛于一个已经被证明的能至少完成一个完整周期步行的定值, 则该欠驱动双足步行系统将实现周期稳定步行.

基于步行系统的循环特性, 机器人质心的水平速度  $u_f$  可有效表征在一个完整步行周期内机器人步行速度的变化, 如图 2(a) 所示. 通过观察人类的日常步行特征, 发现人类步行速度与人体重心的位置密切相关. 因此, 本文选用单足相终止时刻机器人质心的水平速度  $u_f$  为系统输出, 采用单足相终止时刻机器人质心相对于支撑足足底的水平位移  $x_f$  作为系统输入, 将“机器人-地面”的“多输入-多输出”动态模型等效简化为一个机器人运动轨迹与运动速度构成的“单输入-单输出”的动态模型, 有效降低了控制器的复杂度, 提高了计算效率且算法

通用性更好。

### 2.3 等效模型建立

为建立参数化的“单输入—单输出”机器人步行系统，结合泊松非正碰撞理论<sup>[19]</sup>，将“机器人—地面”模型进一步等效简化为“杆—地面”模型。对应于步行系统的双足相和单足相，等效模型也由等效碰撞子模型和等效摆动子模型顺序组合而成。等效模型如图2所示。

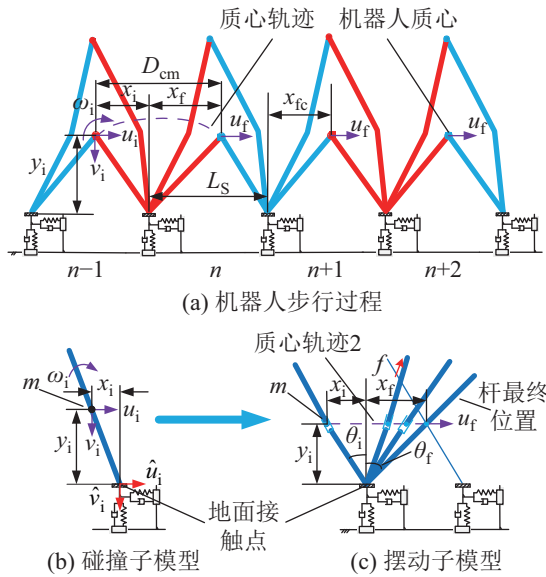


图2 等效模型

Fig.2 Equivalent model

#### 2.3.1 等效碰撞子模型

如图2(b)所示，在等效碰撞子模型中，考虑碰撞在极短的时间内完成，忽略各关节角的位移，仅考虑关节动量变化。为确定等效模型中碰撞阶段终止时刻，引入“杆—地面”接触点处的相对水平运动速度衰减率 $\lambda$ 作为表征碰撞终止时刻的指标。当刚性杆与地面接触点处的相对水平速度衰减率为该比值时，等效碰撞终止。

由上所述，当仅受水平方向的地面反力作用时，机器人终止时刻质心的运动状态可描述为

$$\begin{cases} \hat{u}(t_1) = (1 - \lambda) \hat{u}_i \\ \tilde{v}(t_1) = \hat{v}_i + \tilde{\omega}(t_1) x_i \\ \tilde{\omega}(t_1) = \omega_i + \lambda \frac{y_i}{\rho^2 + y_i^2} \hat{u}_i \end{cases} \quad (1)$$

式中， $u$ 、 $v$ 和 $\omega$ 分别表示杆质心速度的水平、竖直分量和转动速度， $\hat{u}_i$ 和 $\hat{v}_i$ 表示“杆—地面”接触点处的相对速度的水平和竖直分量， $\omega_i, x_i, y_i$ 分别表示碰撞初始时刻杆质心的转动角速度、质心相对于接触点的水平和竖直位移， $\rho$ 表示杆的回转半径，上

标“ $\sim$ ”表示仅受水平方向地面反力时的状态。由冲量定理计算得到碰撞阶段的时间为

$$t_1 = \frac{\rho^2 m \lambda}{c(\rho^2 + y_i^2)} \quad (2)$$

其中 $m$ 为机器人的总质量，包括小车的质量。

考虑到 $\omega(t)$ 必处处非负，因此连续不等式 $\hat{v}_i \leq \tilde{v}(t_1) \leq \tilde{v}(t_1)$ 必成立。由中值定理可获得竖直方向地面反力冲量，从而碰撞终止时刻杆质心的线速度和转动速度可修正为

$$\begin{cases} u = u_i - \lambda \frac{\rho^2}{\rho^2 + y_i^2} \hat{u}_i \\ v = v_i - \frac{\rho^2 \lambda [2\hat{v}_i (\rho^2 + y_i^2) + \hat{u}_i x_i y_i \lambda]}{2(\rho^2 + y_i^2)^2} \\ \omega = \omega_i - \lambda \frac{v_i x_i - u_i y_i + \omega_i (x_i^2 + y_i^2)}{\rho^2 + y_i^2} + \frac{\hat{u}_i x_i^2 y_i \lambda^2}{2(\rho^2 + y_i^2)^2} \end{cases} \quad (3)$$

#### 2.3.2 等效摆动子模型

在等效碰撞结束以后，即进入等效摆动阶段，对应于机器人单足相阶段，该阶段机器人质心动能的变化仅与其实际轨迹有关。从而在摆动子模型中，杆等效为一个可变摆长的倒立摆，如图2(c)所示。为实现周期稳定步行，在摆动的初始和终止时刻，倒立摆质心必须处于同一水平高度。考虑到在摆动过程中质心竖直方向位移远小于水平方向位移，因此采用一条水平直线作为倒立摆质心在等效摆动阶段的轨迹。同时，为了消除质心历经等效摆动阶段动能的变化总量和实际机器人质心经过单足相动能的变化总量间的误差，引入误差增益系数 $\lambda'$ ，为简化计算，令 $\lambda' = 1 - \lambda$ 。在等效摆动阶段，倒立摆质心能量的变化总量为

$$\Delta W = \frac{\lambda' m g (x_f^2 - x_i^2)}{2 y_i} \quad (4)$$

由式(4)可知，在等效摆动阶段，倒立摆质心的能量变化由其初始时刻和终止时刻的质心位置决定。

经过一个完整的等效周期，等效杆模型质心的能量变化总量可根据能量守恒定律求得：

$$E = K_f + \Delta W \quad (5)$$

其中

$$K_f = \frac{1}{2} m (u^2 + v^2 + \rho^2 \omega^2) \quad (6)$$

根据式(3)，可求得 $K_f$ 的值。因此，经过一个完整的等效运动阶段，杆质心的水平计算速度为

$$\begin{aligned} u_{fcal} &= U_{rod}(\lambda, v_i, u_i, x_i, x_f, y_i) \\ &= y_i \sqrt{3E/2m} / \sqrt{y_i^2 + x_f^2} \end{aligned} \quad (7)$$

## 2.4 控制算法实现

实际机器人系统中通过检测  $v_i, u_i, x_i, x_f, y_i$  和  $u_f$  后, 根据式 (7), 在点  $\lambda = 0$  处使用 1 阶泰勒公式展开可求得  $\lambda$  为

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda(v_i, u_i, x_i, x_f, y_i, u_f) \\ &= \frac{u_f - U_{\text{rod}}(0, v_i, u_i, x_i, x_f, y_i)}{\left. \frac{\partial}{\partial \lambda} U_{\text{rod}}(\lambda, v_i, u_i, x_i, x_f, y_i) \right|_{\lambda=0}} \end{aligned} \quad (8)$$

下一周期终止时刻计算所得的  $x_f$  用  $x_{fc}$  来表示. 针对下一步行周期目标步长  $L_S$ , 采用类似于对  $\lambda$  的求解方式, 则通过在  $x = x_i$  处使用 1 阶泰勒公式展开可求得  $x_{fc}$ :

$$\begin{aligned} x_{fc} &= f(\lambda, v_f, u_f, x_i, y_f, L_S, u_{fd}) \\ &= x_i + \left. \frac{\partial}{\partial x} U_{\text{rod}}(\lambda, v_f, u_f, x, L_S - x_i, y_f) \right|_{x=x_i} \end{aligned} \quad (9)$$

在计算得到  $x_{fc}$  之后, 采用逆运动学求解单足相终止状态时的各关节角度, 设为

$$\mathbf{q}_{fc} = [q_{1f}, q_{2f}, q_{3f}, q_{4f}]^T$$

同时为提高求解效率, 加入约束条件:

$$\begin{cases} q_{2fc} = q_{2f} + \Delta q \\ q_{4fc} = q_{4f} + \Delta q \end{cases} \quad (10)$$

设  $\mathbf{q}_f = [q_{1f}, q_{2f}, q_{3f}, q_{4f}]^T$  为一组已知的单足相终止时刻机器人的关节角度. 考虑到通过正运动学由  $\mathbf{q}_{fc}$  求解  $x_{fc}$  可求得唯一解, 即

$$x_{fc} = f_{x_f \rightarrow \mathbf{q}_f}(\mathbf{q}_{fc}) \quad (11)$$

在  $\Delta q = 0$  时, 使用 1 阶泰勒公式展开可求得  $\Delta q$  的值:

$$\Delta q = \frac{x_{fc} - x_f}{\left. \frac{\partial f_{x_f \rightarrow \mathbf{q}_f}(\mathbf{q}_f + \Delta \mathbf{q})}{\partial \Delta \mathbf{q}} \right|_{\Delta \mathbf{q}=0}} \quad (12)$$

继而求得与  $x_{fc}$  相对应的下一周期单足相终止时刻各关节角度  $\mathbf{q}_{fc}$ .

## 3 变步长稳定步行控制策略 (Control strategy for the variable step-length stable walking)

### 3.1 控制策略目标

与真实地面对机器人的扰动相同, 步长的改变也会对双足步行机器人稳定行走产生扰动. 真实地面上自适应前馈控制策略本质上是通过对在理想刚性接触假设下解得的周期稳定步态的微调, 实现在

真实地面上对目标步行速度的跟踪控制, 消除地面扰动, 从而实现稳定步行. 但是, 在步行过程中, 当机器人步长突然变化时, 机器人必然会产生新的步态, 原有的周期稳定状态必然会被打破, 而只是依靠自适应前馈控制策略不能消除步长改变对机器人带来的扰动.

此外, 地面的非连续性对步行稳定性影响显著, 与真实地面对步行稳定性的影响相对平缓相比, 地面非连续性导致的步行失稳速率更快. 也就是说, 当机器人不能跨越非连续区域时, 步行将立刻结束. 因此, 当机器人面对地面的非连续区域时, 变步长稳定步行控制策略必须完成跨越非连续区域时的步态与正常步态间的高效切换, 并且要保持机器人的步行稳定性.

### 3.2 控制策略基础

本文中步行环境是复合了非连续性的真实地面环境. 其中, 关于真实地面扰动的建模与上文所述相同, 而关于非连续扰动的建模由 2 组参数组成, 即非连续区域定位和非连续区域跨度, 如图 3 所示. 以步行周期数  $P_i$  表示非连续区域位置, 而非连续区域的跨度用  $W_{gi}$  表示, 单位为 m. 本文的研究目标是设计变步长稳定步行控制策略, 实现机器人步长对已知的步长序列的跟踪控制.

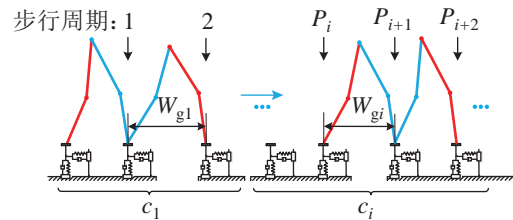


图3 真实非连续地面欠驱动双足步行

Fig.3 Underactuated biped walking on the real discontinuous ground

考虑到分析双足步行机器人的步行速度、步行稳定性以及步长变化三者之间的映射关系比较困难, 控制器不能得到不同步长所对应的机器人质心理想水平速度  $u_{fd}$ . 尽管如此, 基于前文建立的等效模型, 这里可以充分利用自适应前馈控制算法的特点来提高机器人跨越非连续区域时的步行稳定性.

首先, 需要定性分析欠驱动双足步行机器人步态与步行速度之间的关系. 根据式 (7), 可得到初始时刻质心相对水平位移  $x_i$ 、终止时刻质心相对水平位移  $x_{fc}$  和步长  $L_S$  的变化对终止时刻质心水平速度  $u_f$  的影响. 与此同时, 考虑上述 3 种变量对下一步行周期初始时刻质心相对水平位移  $x_{ic}$  的影响. 总结定步长稳定控制策略的控制结果, 得到表 1,



其中3种步态形式从根本上来讲表示的是  $x_i$ 、 $x_{fc}$  以及  $L_S$  的变化对  $u_f$  和  $x_{ic}$  的影响情况, 这里步长  $L_S$  指终止时刻机器人在该周期内的实际运动步长. 其中“↑”表示上升, “↓”表示下降. 根据表1, 可得到以下结论:

1) 当步长从已规划的尺寸增长时, 为保证步行速度以实现后续的稳定步行, 该周期单足相终止时刻质心水平速度  $u_f$  与前一周期机器人质心速度  $u_f$  相比, 该周期的  $u_f$  必须获得显著提高;

2) 为使得跨越周期  $u_f$  能显著提高, 并且防止  $x_{fc}$  的计算结果超出机器人的机械结构限制, 缩小  $x_i$  是有效的方法.

表1  $x_i, x_{fc}, L_S, u_f$  和  $x_{ic}$  之间映射关系

Tab.1 The relationship among  $x_i, x_{fc}, L_S, u_f$  and  $x_{ic}$

	$x_i$	$x_{fc}$	$L_S$	$u_f$	$x_{ic}$
步态1	—	↑	—	↑	↓
步态2	↓	↑	—	↑	↓
步态3	—	—	↑	—	↑

其次, 需要分析自适应前馈控制策略的系统误差, 注意到式(9),  $x_{fc}$  的数值实际会有一个明显的约束:

$$L_S = x_{ic} + x_{fc} \quad (13)$$

由于  $x_{ic}$  和  $x_i$  之间的系统误差,  $u_f$  常常会偏离  $u_{fd}$ , 该系统误差对  $u_f$  的影响可在表2中看到, 从中可得到2个重要的结论:

1) 当步长  $L_S$  缩短时,  $x_{ic}$  将小于  $x_i$ , 该周期实际的质心水平速度  $u_f$  必定会小于对应周期的理想质心水平速度  $u_{fd}$ ;

2) 当步长  $L_S$  增长时,  $x_{ic}$  将大于  $x_i$ , 该周期实际的质心水平速度  $u_f$  必定会大于对应周期的理想质心水平速度  $u_{fd}$ .

表2  $x_i$  对  $u_f$  的影响情况

Tab.2 The inference of  $x_i$  on  $u_f$

$x_i$ 与 $x_{ic}$ 大小关系	$u_f$ 受影响情况
$x_i > x_{ic}$	$u_f < u_{fd}$
$x_i < x_{ic}$	$u_f > u_{fd}$

### 3.3 变步长控制策略

通过观察人类日常跨越动作发现, 当人们需要跨越非连续区域时, 常常会适当地调整步态, 例如在跨越前一步缩小步长, 继而伸长步长来实现稳定跨越. 因此, 从仿人角度出发, 结合上述结论, 为了提高机器人的步行稳定性, 本文在跨越非连续区域前, 增加一个调整周期, 该周期步长  $L_S$  比已规

划的步长  $L_{Sd}$  小, 从而实现在下一个跨越周期减小  $x_i$  并提高  $u_f$ , 增加机器人跨越非连续区域的成功率. 当步长恢复至原先的规划尺寸时, 为防止  $u_f$  的急剧下降导致机器人失稳摔倒, 理想步行速度  $u_{fd}$  应根据前一步行周期的实际步行速度  $u_f$  而调整, 并逐渐恢复至初始步长所对应的周期稳定步行速度. 这里本文定义在跨越非连续区域前后的3个步行周期分别为调整周期、跨越周期以及恢复周期.

综上所述, 本文提出基于自适应前馈控制算法的变步长控制策略, 它主要分为2个控制子策略, 包括步长控制策略以及理想质心速度控制策略, 如图4所示.

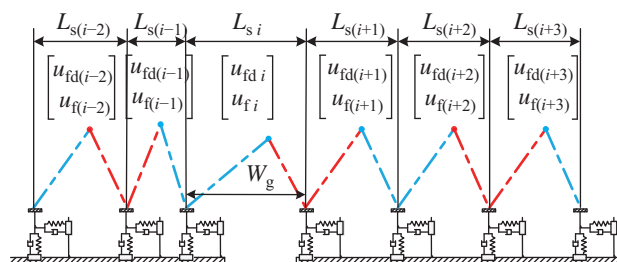


图4 变步长控制策略

Fig.4 The variable step-length control strategy

在步长控制策略中, 规划的步长为  $L_{Sd}$ , 地面非连续区域跨度为  $W_g$ , 整个步行过程包括  $N$  个周期, 机器人在第  $i$  步时跨越地面非连续区域, 即第  $i$  步是跨越周期, 第  $i-1$  步为调整周期, 第  $i+1$  步为恢复周期. 这里将调整周期的步长设计为已规划步长的2倍长与地面非连续区域跨度的差值. 因此, 步长控制策略为

$$\begin{cases} L_{Si} = W_g \\ L_{S1} = \dots = L_{Si-2} = L_{Si+1} = \dots = L_{SN} = L_{Sd} \\ L_{Si-1} = 2L_S - L_{Si} \end{cases} \quad (14)$$

在理想质心速度控制策略中, 令机器人质心在第1个稳定步行周期的单足相终止时刻的水平速度为  $u_{f1}$ . 基于本文的稳定性评估方法, 在正常步行情况下让  $u_f$  始终跟踪能实现稳定步行的第1周期单足相终止时刻质心速度  $u_{f1}$ , 那么机器人理想质心速度  $u_{fd}$  即为  $u_{f1}$ . 而当遇到非连续区域时, 机器人在跨越周期前后其质心理想速度变化情况为

$$\begin{cases} u_{fd3} = \dots = u_{fd(i-2)} = u_{fd(i+3)} \dots = u_{fdN} = u_{f1} \\ u_{fdi} = u_{fd(i-1)} = \max[u_{f(i-2)}, u_{f1}] \\ u_{fd(i+1)} = u_{fi} \\ u_{fd(i+2)} = \frac{u_{f(i+1)} + u_{f1}}{2} \end{cases} \quad (15)$$

### 4 试验与分析 (Experiment and analysis)

为验证控制算法的有效性, 本文通过数值仿真和样机试验 2 种方式进行验证.

#### 4.1 数值仿真

通过对机器人的动力学建模, 由表 3 中的机器人结构参数, 在 Matlab 中仿真可求解出一组步长为 0.1839 m 的初始稳定步态<sup>[3]</sup>, 其角度和角速度为

$$\mathbf{q}_{i0} = [0.1386, 0.2500, 0.3094, -0.1500]^T$$

$$\dot{\mathbf{q}}_{i0} = [1.0494, -0.0004, 0.4188, 1.8533]^T$$

表 3 机器人结构参数

Tab.3 Structure parameters of the robot

参数	$l/m$	$m/kg$	$m_k/kg$	$m_h/kg$	$m_s/kg$
数值	0.3	0.404	0.785	2.537	5.8

本文仿真试验中非连续区域长度采用 0.24 m ~ 0.26 m 的随机分布. 地面阻尼参数采用随机分布序列. 非连续区域的位置以步行周期数  $P_i$  计算, 考虑到变步长控制策略所需的 2 次跨越动作间至少间隔 3 个步行周期, 因此地面 2 个非连续区域间隔采用 3 ~ 5 个步行周期的随机分布形式.

地面非连续区域尺寸分布采用如表 4 和表 5 所示的 I、II 两组序列. 同时地面刚度系数选用  $1.2 \times 10^5 \text{ N/m}$ , 而地面阻尼系数也采用随机分布序列, 如表 6 所示.

表 4 地面非连续区域尺寸分布序列 I

Tab.4 The size distribution sequence I of the discontinuous ground

$i$	$W_{gi}/m$	$P_i$	$i$	$W_{gi}/m$	$P_i$
1	0.25	5	5	0.25	25
2	0.26	10	6	0.25	31
3	0.24	15	7	0.24	37
4	0.25	21	8	0.26	41

表 5 地面非连续区域尺寸分布序列 II

Tab.5 The size distribution sequence II of the discontinuous ground

$i$	$W_{gi}/m$	$P_i$	$i$	$W_{gi}/m$	$P_i$
1	0.25	5	5	0.26	27
2	0.25	10	6	0.25	33
3	0.24	16	7	0.25	39
4	0.25	22	8	0.25	43

为表征机器人步行姿态, 引入机器人质心的相对水平位置, 即在单足相终止时刻, 机器人质心相

对于支撑足足底的水平位移与步长的比值, 用  $P_{cr}$  表示, 即

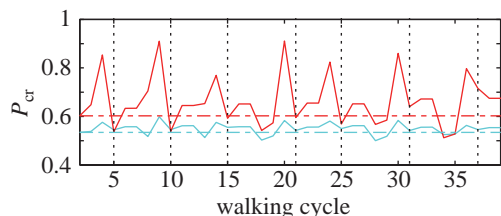
$$P_{cr} = x_f/L_S \tag{16}$$

表 6 地面阻尼随机分布序列

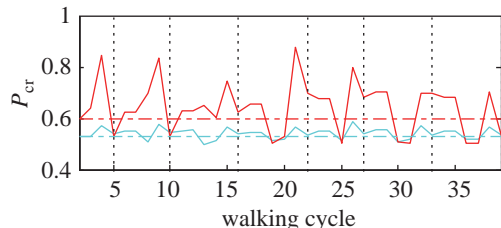
Tab.6 The stochastic ground damping distribution sequence

$i$	$c_i l/(\times 10^5 \text{ N}\cdot\text{s/m})$	$j_i$	$i$	$c_i l/(\times 10^5 \text{ N}\cdot\text{s/m})$	$j_i$
1	7.3520	1	4	5.9500	28
2	4.8210	10	5	3.0820	32
3	5.6180	19	6	2.0130	36

在有/无小车保持架的情况下, 在真实非连续地面上机器人质心的相对水平位置  $P_{cr}$  如图 5 所示, 其中下标 s 为有小车的仿真情况.



(a) 非连续区域分布采用序列 I 时的质心相对位置



(b) 非连续区域分布采用序列 II 时的质心相对位置

—  $P_{cr}$  - - -  $P_{cr1}$  —  $P_{cr,s}$  - - -  $P_{cr,s1}$

图 5 机器人质心相对位置变化

Fig.5 The relative position change of the robot CoM

图 5 中, 在跨越非连续区域前的调整周期中, 机器人质心的相对水平位置  $P_{cr}$  明显增大, 即减小了跨越周期的  $x_i$ , 并保证了跨越周期中机器人质心水平速度  $u_f$  的显著提高. 在之后的恢复周期以及后续步行周期中, 机器人也保持了较为前倾的姿态. 因此, 由步长缩短导致的步行速度下降得到了有效抑制.

图 6 所示为在有/无小车保持架情况下, 机器人在单足相终止时刻的实际质心水平速度  $u_f$  以及理想质心水平速度  $u_{fd}$  的变化情况.

图 6 中, 当步长  $L_S$  缩短时, 即跨越周期与恢复周期中, 与对应该周期理想的  $u_{fd}$  相比, 实际输出  $u_f$  迅速下降, 显著小于  $u_{fd}$ ; 当步长  $L_S$  增加时, 即跨越周期中, 与对应该周期理想的  $u_{fd}$  相比, 实际输出  $u_f$  迅速上升, 显著大于  $u_{fd}$ . 同时,  $u_{fd}$  与  $u_f$  之

间的差值始终与  $L_S$  的变化呈正相关关系. 且在不同的非连续路面情况下,  $u_f$  始终围绕在第1周期能实现稳定步行的速度  $u_{f1}$  波动, 这表明结合了自适应前馈控制算法的变步长控制策略可以实现真实非连续地面上的欠驱动双足稳定步行.

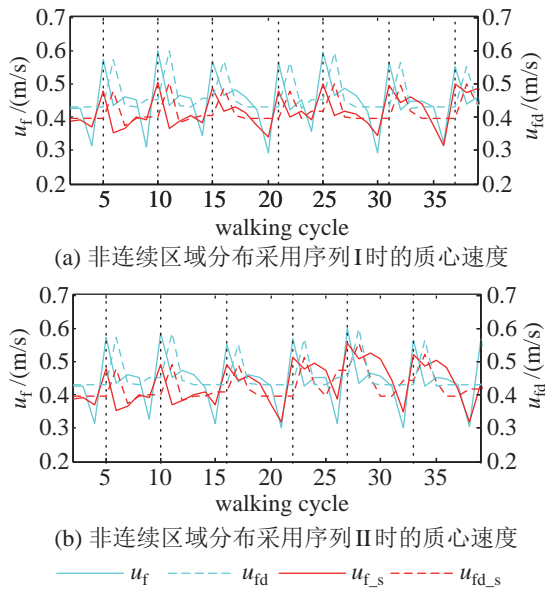


图6 机器人质心水平速度变化  
Fig.6 The horizontal velocity change of the robot CoM

在无小车保持架情况下, 在表3所示的地面非连续区域尺寸分布序列 I 以及表6所述地面环境下, 仿真步行过程如图7所示.

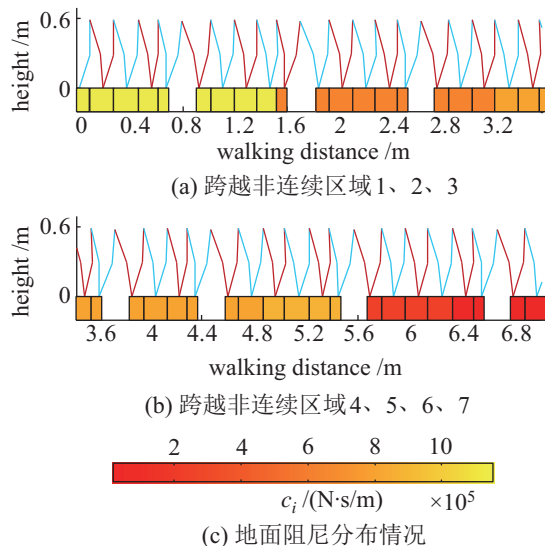


图7 真实地面情况下跨越非连续区域  
Fig.7 Walking across the discontinuous area on the real ground

变步长稳定步行控制策略不但没有改变算法的核心控制器, 而且基于本文提出的步行稳定性评估方法, 在真实非连续地面的复合扰动下, 通过改变  $u_{fd}$  和  $L_S$  的大小, 能迅速而有效地跨越非连续区域

并在之后恢复到步行稳定状态. 同时, 通过仿真试验, 自适应前馈控制算法的自适应性和潜力性也得到了证明.

### 4.2 样机试验

为进一步验证基于自适应前馈控制算法的变步长控制策略在真实非连续地面复合扰动下的有效性, 本文设计了机器人样机在非均质地面上的变步长试验. 试验所用地面环境为木板和橡胶材质混合铺设而成的非均质步行环境. 步行地面宽 130 mm, 厚 10 mm.

机器人样机在步行试验过程中采用一组预先规划的步长序列. 试验时, 规定在步行过程中, 第5步行周期为跨越周期, 步长伸长, 预设的跨越步长为 0.25 m. 根据图4所示的步长控制策略, 设计第4步行周期为调整周期, 其步长缩短. 机器人第6步行周期为恢复周期, 步长恢复至规划步长  $L_{Sd}$ .

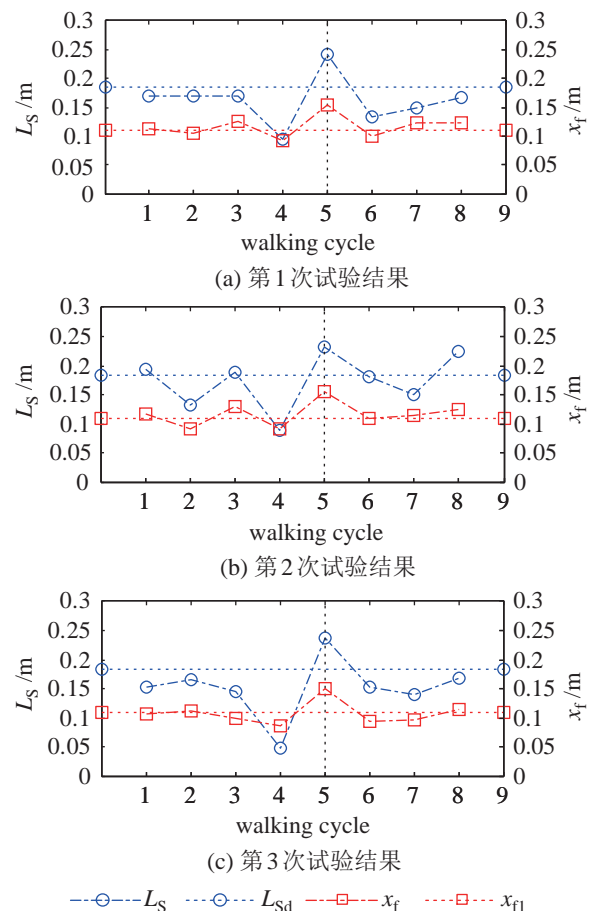


图8 变步长步行过程中质心位置与步长的关系  
Fig.8 The relationship between the CoM position and the step length in variable step-length walking process

图8为3次样机试验中, 机器人在单足相终止时刻  $x_f$  与实际步长  $L_S$  的变化情况, 由图可知, 在第4步调整周期中, 机器人的实际步长缩短,  $x_f$  和



步长  $L_S$  大小接近, 表明质心的相对水平位置显著前移, 保证了在第 5 步跨越周期中机器人质心能获得显著的速度提升. 在第 5 步跨越周期中, 3 次试验中实际步长均接近 0.25 m, 符合预期控制目标. 之后, 在第 6 步恢复周期时步长缩短,  $x_f$  同样减小, 且在后续步行周期中, 机器人实际步长渐渐恢复至

预设步长  $L_{Sd}$ , 质心位置也恢复至相对稳定位置.

图 9 为机器人在木板橡胶混合地面上的实际步行情况, 其中: (a) ~ (c) 为机器人正常步行状态; (d) ~ (f) 为调整周期阶段; (g) ~ (i) 为跨越周期阶段, 步长显著伸长; (j)、(k) 为恢复周期阶段; (l) 为后续稳定步行阶段.

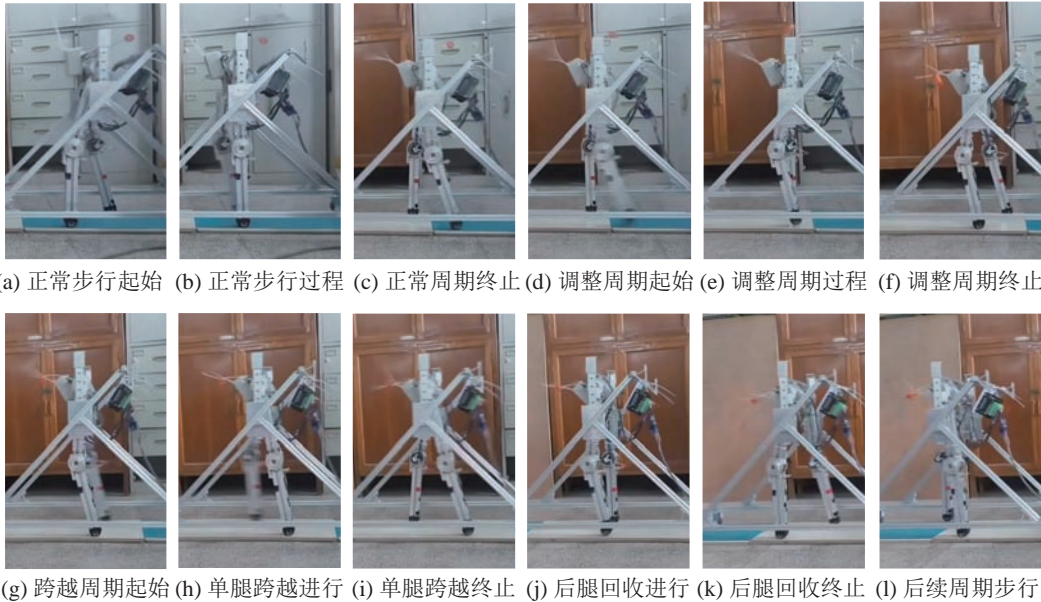


图 9 非均质地面变步长步行试验

Fig.9 Video frames of a robot walking with variable step-length on the heterogeneous ground

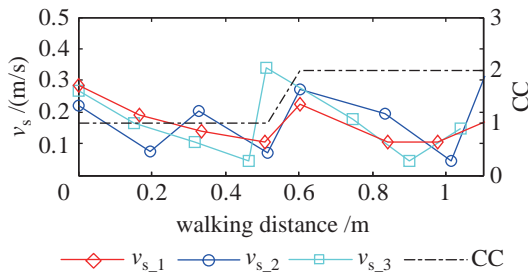


图 10 变步长步行过程中的速度变化

Fig.10 Speed change in variable step-length walking process

图 10 所示为机器人在木板橡胶混合地面上的步行速度变化情况, CC 代表地面材质种类, 当  $CC = 1$  时为橡胶地面,  $CC = 2$  时为木板地面.  $v_{s,i}$  代表第  $i$  次试验中机器人的步行速度. 从整个步行过程看, 在变步长控制策略作用下, 机器人步行速度  $v_s$  始终高于 0, 说明机器人样机实现了在木板—橡胶混合地面上的变步长欠驱动双足持续步行.

图 11 为机器人质心水平速度的变化情况,  $u_{f,i}$  代表第  $i$  次试验中机器人质心的水平速度. 首先, 从整体来看, 机器人质心的水平速度始终在步行第 1 周期测得的  $u_{f1}$  附近波动, 说明机器人实现了稳定步行. 其次, 在第 4 步调整周期中, 步长  $L_S$  缩短,

$u_f$  相比  $u_{f1}$  有一定下降; 在跨越周期中, 步长  $L_S$  伸长, 机器人质心水平速度  $u_f$  显著提升; 在之后的恢复周期中, 机器人质心水平速度  $u_f$  下降, 但未显著低于  $u_{f1}$ ; 在恢复周期后一周期中, 机器人水平速度  $u_f$  回升, 后续步行过程可持续进行.

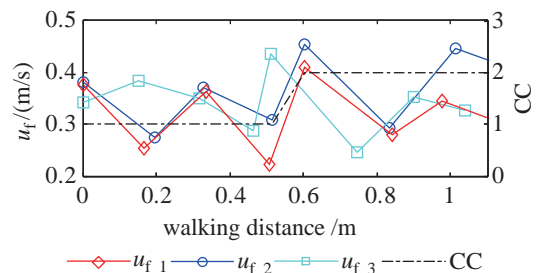


图 11 变步长步行过程中机器人质心水平速度的变化

Fig.11 Horizontal velocity change of the robot CoM in variable step-length walking process

### 5 结论 (Conclusion)

本文提出了一种基于自适应前馈控制算法的变步长稳定步行控制策略, 实现欠驱动双足步行机器人在真实非连续地面上的稳定步行.

1) 自适应前馈控制算法考虑真实地面对机器人



质心运动状态的影响,将质心位置作为被控输入,质心速度作为被控输出,构建“单输入—单输出”的步行系统,实现机器人正常步行。自适应前馈控制算法在不同的步行系统中都具有自适应性,且算法对系统资源的占用率低,求解过程快速而稳定。

2) 将自适应前馈控制算法作进一步拓展,在其基础上设计变步长稳定步行控制策略。模仿人类跨越动作,在跨越非连续区域步行周期前,增加一个步长缩短的调整周期,使机器人在跨越周期中质心速度明显提高。并在跨越周期前后,调整理想的质心速度,保证机器人在变步长前后的步行速度不显著降低,实现在不同的步态间快速稳定的切换并且保持稳定步行。该策略在并未显著增加稳定控制器复杂程度的基础上,能实现同时应对真实地面环境和地面非连续复合扰动的稳定行走。

3) 通过数值仿真与样机试验验证了变步长稳定步行控制策略的有效性。在控制策略作用下,机器人在仿真中和木板—橡胶混合地面上实现了欠驱动双足变步长稳定步行。从试验结果可知,本文提出的变步长稳定步行控制策略能同时应对真实地面阻尼刚度的改变和地面非连续性对机器人步行稳定性的影响,进一步提升了欠驱动步行系统的仿人性。

真实地面上变步长稳定步行的实现,说明了自适应前馈控制算法的扩展性。如何进一步完善算法从而实现机器人在更为复杂地面(如上下坡、崎岖路面等)环境扰动下的稳定步行,是下一步研究的方向。

### 参考文献 (References)

- [1] 梶田秀司. 仿人机器人[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.  
Kajita S. Humanoid robot[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [2] 毛勇, 王家威, 贾培发, 等. 双足被动步行研究综述 [J]. 机器人, 2007, 29(3): 274-280.  
Mao Y, Wang J X, Jia P F, et al. Passive dynamic biped walking: A survey[J]. Robot, 2007, 29(3): 274-280.
- [3] Chevallereau C, Grizzle J W, Shih C L. Asymptotically stable walking of a five-link underactuated 3-D bipedal robot[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(1): 37-50.
- [4] Yadukumar S N, Pasupuleti M, Ames A D. Human-inspired underactuated bipedal robotic walking with amber on flat-ground, up-slope and uneven terrain[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 2478-2483.
- [5] 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): 110-117,123.  
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): 110-117,

123.

- [6] Aguilar J, Goldman D I. Robophysical study of jumping dynamics on granular media[J]. Nature Physics, 2016, 12(3): 278-283.
- [7] Manchester I R, Mettin U, Iida F, et al. Stable dynamic walking over uneven terrain[J]. International Journal of Robotics Research, 2011, 30(3): 265-279.
- [8] Park H W, Ramezani A, Grizzle J W. A finite-state machine for accommodating unexpected large ground-height variations in bipedal robot walking[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2013, 29(2): 331-345.
- [9] Hyon S H. Compliant terrain adaptation for biped humanoids without measuring ground surface and contact forces[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(1): 171-178.
- [10] Westervelt E R, Buche G, Grizzle J W. Experimental validation of a framework for the design of controllers that induce stable walking in planar bipeds[J]. International Journal of Robotics Research, 2004, 23(6): 559-582.
- [11] Sreenath K, Park H W, Poulakakis I, et al. A compliant hybrid zero dynamics controller for stable, efficient and fast bipedal walking on MABEL[J]. International Journal of Robotics Research, 2011, 30(9): 1170-1193.
- [12] Wang Y, Ding J T, Xiao X H. An adaptive feedforward control method for under-actuated bipedal walking on the compliant ground[J]. International Journal of Robotics and Automation, 2017, 32(1): 63-77.
- [13] Hodgins J K, Raibert M H. Adjusting step length for rough terrain locomotion[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(3): 289-298.
- [14] Yang L, Chew C M, Poo A N, et al. Autonomous stride-frequency and step-length adjustment for bipedal walking control[M]//Autonomous Robots and Agents. Berlin, Germany: Springer, 2007: 189-198.
- [15] Hu Y, Yan G F, Lin Z Y. Feedback control of planar biped robot with regulable step length and walking speed[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2011, 27(1): 162-169.
- [16] Freeman P S, Orin D E. Efficient dynamic simulation of a quadruped using a decoupled tree-structure approach[J]. International Journal of Robotics Research, 1991, 10(6): 619-627.
- [17] Westervelt E R, Grizzle J W, Chevallereau C, et al. Feedback control of dynamic bipedal robot locomotion[M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2007.
- [18] Grizzle J W, Chevallereau C, Sinnet R W, et al. Models, feedback control, and open problems of 3D bipedal robotic walking [J]. Automatica, 2014, 50(8): 1955-1988.
- [19] Stronge W J, James R, Ravani B. Oblique impact with friction and tangential compliance[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society, A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2001, 359(1789): 2447-2465.

### 作者简介:

姚 渊 (1993-), 男, 硕士生. 研究领域: 仿生机器人, 柔性驱动器.

姚道金 (1990-), 男, 博士生. 研究领域: 双足步行稳定控制, 仿生机器人.

肖晓晖 (1969-), 女, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机械系统动力学, 非线性系统运动控制, 微/纳定位系统控制.