第 50 卷 第 4 期

2018 年 7 月

Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics

动力学与控制

基于步态切换的欠驱动双足机器人控制方法"

葛一敏 袁海辉 甘春标2)

(浙江大学机械工程学院,杭州 310027)

摘要由于高维、非线性、欠驱动等特点, 3-D 双足机器人的稳定性控制依然是一个研究难点.一些传统的控制方法, 如基于事件的反馈控制方法和 PD 控制方法, 抗扰动能力较弱, 鲁棒性较差. 通过观察, 人类受到外部扰动影响时, 会通过调整步态重新获得稳定性, 相较之下仅依靠一个步态获得的稳定性是有限的. 受此启发, 本文针对上述问题提出一种基于步态切换的欠驱动 3-D 双足机器人控制方法. 首先, 以能耗最少为优化目标, 通过非线性优化方法预先设计多组不同步长、步速的步态作为参考步态, 以构建一个步态库; 然后, 通过综合考虑步态切换过程中的稳定性与能效, 建立了多目标步态切换函数; 最后, 将该步态切换函数作为优化目标, 并求解该最小化问题获得下一步的参考步态, 从而实现步态切换, 达到使用步态库—多轨迹方法来提高鲁棒性的目的. 在仿真实验中运用该步态切换控制方法, 欠驱动 3-D 双足机器人可实现相对高度在 [-20, 20] mm 内随机变化的不平整地面上行走, 而仅采用单步态控制策略则无法克服这样的外部扰动, 从而说明了基于步态切换的欠驱动双足机器人控制方法的有效性.

关键词 双足机器人, 欠驱动, 步态切换, 不平整地面, 控制方法

中图分类号: TP24 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-18-049

CONTROL METHOD OF AN UNDERACTUATED BIPED ROBOT BASED ON GAIT TRANSITION ¹⁾

Ge Yimin Yuan Haihui Gan Chunbiao²⁾

(School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract The stability control of underactuated 3-D biped robot is still a hard nut to crack, as a result of locomotion characteristics which mix high dimension, strong nonlinearity and underactuation. Some traditional control methods, such as event-based feedback control and PD control, are poor in robustness and weak in resistance to external disturbances. Through observation, it is certain that humans adjust gaits tactically to regain stability when they are affected by external disturbances, by contrast with trying to keep the stability sustained by only one gait which is quite limited. Inspired by this, a control method based on gait transition is proposed for the underactuated 3-D biped robot. First of all, taking the minimum energy consumption as the optimization goal, a multi group of gait and step gait is designed as the reference gait to build a gait library by nonlinear optimization method. Secondly, to obtain an optimal performance in terms of the balance between the stability and input torques, a multi-objective gait transition function is established. Finally, a

2) 甘春标, 教授, 主要研究方向: 非线性动力学、仿人机器人以及故障诊断. E-mail: cb_gan@zju.edu.cn

引用格式: 葛一敏,袁海辉,甘春标.基于步态切换的欠驱动双足机器人控制方法.力学学报,2018,50(4):871-879

Ge Yimin, Yuan Haihui, Gan Chunbiao. Control method of an underactuated biped robot based on gait transition. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(4): 871-879

²⁰¹⁸⁻⁰³⁻⁰⁴ 收稿, 2018-06-03 录用, 2018-06-04 网络版发表.

¹⁾ 国家自然科学基金资助项目 (11772292, 91748126, 11372270).

reference gait that minimizes the gait transition function is obtained by solving a quadratic optimization problem, and it is then used as the walking gait for the next step with the purpose of using gait library (multiple trajectories) method to reach the goal of improving robustness. In the simulation experiment, using the proposed gait transition control method, the underactuated 3-D biped robot can walk through the rough ground with the relative height varying within the range [-20,20] mm without falling down, in contrast to the failure of previous one-gait control method. The results show the effectiveness of the method.

Key words biped robot, underactuation, gait transition, rough terrain, control method

引言

机器人作为多学科交叉的代表, 是一个集环境 感知、动态决策与规划、运动控制与执行等多功 能于一体的综合系统[1-3]. 双足机器人模仿人类移 动方式,适合融入人类生活和工作的环境中,能够 胜任车轮无法克服的崎岖地形,被认为是最有希望 融入人类和自然环境中服务于人的机器人类型[4]. 传统双足机器人的运动规划,通常以 ZMP (零力矩 点) 作为稳定判据, 保证足底相对地面不发生反转. 这样的静态步行方式过于保守,并严重限制了双足 机器人的动态运动能力[5-6]. 在双足机器人的动态 行走过程中, 欠驱动状态不可避免, 必须着重对其 进行规划和控制.目前,双足机器人在欠驱动行走 方面已取得很大突破[7-8],但实际抗扰动能力依然较 弱,鲁棒性较差,仍难以在现实环境中得到充分利 用. 综上, 加强抗干扰能力, 提高系统鲁棒性, 是当 前欠驱动双足机器人研究需要解决的重点问题.

双足机器人的关节自由度一般高于常见的六 自由度工业机器人,动力学模型非常复杂,包含了 连续变量动态系统、离散事件动态系统以及两者 相互作用的动态系统,表现为混杂系统.其中连续 项模型本身就是一个多变量、强耦合的复杂非线 性系统,微分方程所表达的连续动力学模型非常繁 琐.足部与地面之间关节运动不可控的欠驱动特 性,使得双足机器人需要通过反馈控制算法结合控 制对称性^[9],混杂降维^[10-11],横向线性化^[12]和混杂 零动力学(HZD)^[13-14]等方法稳定步态.其中,基于 HZD的控制器已经在 2-D 和 3-D 机器人^[15-17], 2-D 和 3-D 动力假肢^[18-20],外骨骼^[18]上进行了数值和实 验验证^[21-23].在此基础上,为提高机器人的抗扰动 能力,Griffin等^[24]和 Dai等^[25]将步态设计及控制 器设计结合到一起,作为一个优化扰动衰减问题, 允许求解时搜索一系列非线性控制器,予以近碰撞时刻的轨迹偏差更高的惩罚系数,使获得的步态能够迅速恢复至预设轨迹;李超等^[26-27]按照外力作用的位置将扰动分成3种情况,并基于髋策略分别规划对应的3种开环控制方法,可以在身体水平稳定状态和直立姿态都受影响的情况下,同时完成水平方向的平衡控制和直立姿态恢复.然而从当前的研究结果来看,欠驱动 3-D 双足机器人控制策略灵活性不足,导致吸引域仍比较窄小,抗扰动能力还有待提高^[13,22].

现实中,人类在遇到外部扰动时,会随时通过 调整步态以重新获得稳定性.受此启发,本文提出 一种基于步态切换的控制方法.该策略首先通过求 解一系列不同步速、步长的稳定步态建立步态库, 并仿照控制器代价函数,通过选取合适的尺度构造 多目标步态切换函数,根据碰撞发生后的系统状态, 从步态库中选择最接近的步态并结合基于事件的 反馈控制器将其引至相应步态的理想轨迹.最后, 通过仿真结果表明该方法在地面不平整情况下能 够有效地提高机器人行走鲁棒性.

1 机器人动力学建模

1.1 机器人描述

欠驱动双足机器人的特点是机器人和地面只存在点接触或线接触.因此考虑建模真实性,根据 人运动平面的划分以及前向为主、侧向为辅的步 行运动规律,参考文献 [28] 中提出的无质量线足模 型,建立如图 1 所示具有一个前向欠驱动自由度的 3D 双足机器人.

机器人由躯干、臀部、大腿、小腿以及无质量 的线型双足组成,整体关于矢状面严格对称,脚踝 关节位于线足中点,仅作为冠状面运动的转轴,限 制偏航运动.



Fig.1 3-D biped robot with line-shaped feet

1.2 连杆模型

机器人作为多连杆模型关于矢状面严格对称,因此无论哪条腿用作站姿腿,可通过重新标记关节角度并在必要时改变其方向标志,使单足支撑模型可同时表达左右腿支撑期.建立如图 2 所示多连杆模型, oxyz 为地面参考坐标系,以机器人前进的方向为 x 轴正方向,以坚直向上为 z 轴正方向; (x_{st}, y_{st}, z_{st})为支撑脚中点坐标, (q₀, q₁, q₂) 代表了支撑脚相对地面



图 2 机器人自由度配置图 Fig.2 Configuration of the robot's degrees of freedom

坐标系的 *Z*-*Y*-*X* 方向上的欧拉角; (x_{sw} , y_{sw} , z_{sw} ,)为 摆动脚中点坐标, (q_{10} , q_{11} , q_{12})为摆动脚相对地面坐 标系的 *Z*-*Y*-*X* 方向上的欧拉角; (q_3 , q_4 , ..., q_9)是其 他表达机器人姿势的相应关节变量. 定义机器人广 义坐标为 $q_e = [x_{st}; y_{st}; z_{st}; q_0; q_1; q_2; q_3; q_4; q_5; q_6; q_7; q_8; q_9].$

1.3 单足支撑动力学模型

令 **q**_e = [*x*_{st}; *y*_{st}; *z*_{st}; *q*₀; *q*₁; *q*₂; *q*₃; *q*₄; *q*₅; *q*₆; *q*₇; *q*₈; *q*₉] 为单足支撑期的位形坐标, 其中 *Q* 为单足支撑 期的位形空间. 根据欧拉-拉格朗日原理建立单足 支撑期的动力学模型

$$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{B}\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0}_{1\times8} \\ \boldsymbol{I}_{1\times8} \end{bmatrix} \boldsymbol{u} \quad (1)$$

式中, $D \in \mathbb{R}^{9\times9}$ 为惯性矩阵; $C \in \mathbb{R}^{9\times9}$ 为科氏力矩阵; $G \in \mathbb{R}^{9\times1}$ 为重力相关矩阵; $B \in \mathbb{R}^{9\times9}$ 表示了关节 力矩对广义坐标的作用效果, 是输入矩阵; $u \in \mathbb{R}^{9\times1}$ 为关节力矩向量.

定义机器人的状态变量为 $x = [q; \dot{q}] \in TQ$,则 单足支撑期的状态空间方程为

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ -\mathbf{D}^{-1}(q) \left[C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) \right] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{9\times 1} \\ \mathbf{D}^{-1}(q) \mathbf{B} \end{bmatrix} \mathbf{u} := \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u}$$
(2)

式中

$$f(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ -D^{-1}(q) \left[C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) \right] \end{bmatrix}$$
$$g(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{9\times 1} \\ D^{-1}(q) B \end{bmatrix}$$

1.4 双足支撑期机器人动力学模型

当摆动腿落地时,既没有反弹也没有滑动,仅 发生瞬时非弹性碰撞,且碰撞后原支撑腿立即抬起. 根据角动量守恒定律可推得机器人的碰撞模型^[25] 为

$$\boldsymbol{D}_{\mathrm{e}}(\boldsymbol{q}_{\mathrm{e}}^{-})(\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{e}}^{+}-\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{e}}^{-})=\boldsymbol{J}_{\mathrm{sw}}^{\mathrm{v}}(\boldsymbol{q}_{\mathrm{e}}^{-})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{F}_{\mathrm{sw}}+\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{sw}}) \qquad (3)$$

式中, $q_e^- 和 q_e^+ 分别为碰撞发生前后机器人广义坐标; <math>F_{sw} 和 \Gamma_{sw} 分别为地面施加给摆动腿的冲击力和力矩; 其中$

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{sw}}^{\mathrm{v}} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}_{\mathrm{e}}} \left[\boldsymbol{x}_{\mathrm{sw}}; \boldsymbol{y}_{\mathrm{sw}}; \boldsymbol{z}_{\mathrm{sw}} \right]^{\mathrm{T}}$$

力

整理后可得

$$\mathbf{x}_{e}^{+} := \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_{e}^{+} \\ \dot{\boldsymbol{q}}_{e}^{+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_{e}^{-} \\ \dot{\boldsymbol{q}}_{e}^{-} + \boldsymbol{D}_{e}^{-}(\boldsymbol{q}_{e}^{-})\boldsymbol{J}_{sw}^{v}(\boldsymbol{q}_{e}^{-})^{T}(\boldsymbol{F}_{sw} + \boldsymbol{\Gamma}_{sw}) \end{bmatrix} = \Delta(\boldsymbol{x}_{e}^{-})$$
(4)

1.5 混杂动力学模型

由式 (3) 和式 (4), 可建立如下机器人完整混杂 动力学模型

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x), \quad x \notin S \\ x^+ &= \Delta(x^-), \quad x \in S \end{aligned}$$
 (5)

其中, S 为碰撞面

$$\boldsymbol{S}(\boldsymbol{d}) := \left\{ \boldsymbol{x} \in T\boldsymbol{Q} \mid \boldsymbol{p}_{\mathrm{st}}^{\mathrm{z}} = \boldsymbol{0}, \boldsymbol{p}_{\mathrm{sw}}^{\mathrm{z}} = \boldsymbol{d} \right\}$$
(6)

且 p_{st}^{z} 和 p_{sw}^{z} 分别为支撑腿与摆动腿末端的 z 轴方向位置, d 为地面相对高度.

2 步态规划与控制器设计

本节简要介绍欠驱动双足机器人的步态规划 理论以及反馈控制方法,为后续步态切换方法提供 理论基础.

2.1 虚拟约束设计

虚拟约束^[29] 是指通过选择一个与时间无关且 在单个运动周期内单调变化的循环变量作为机器 人系统的时间尺度,并以该变量作为自变量设计参 数样条曲线作为理想关节运动轨迹. 当系统输出为 零时,执行器相当于对各关节之间添加了虚拟的运 动学约束.

采用虚拟约束的方法设计系统输出函数时,自 变量只有构型坐标有关,具体形式如下

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{q}) = \mathbf{h}_0(\mathbf{q}) - \mathbf{h}^{\mathrm{d}}(s(\mathbf{q}), \mathbf{a}) \tag{7}$$

式中, *h*₀(*q*) 作为主动控制的姿态变量, 是关节角度 变量的线性组合

$$\boldsymbol{h}_{0}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{H}_{0}\boldsymbol{q} = \left[\theta_{\text{tor}}; \theta_{\text{mirr}}; q_{2}; q_{3}; q_{5}; q_{6}; q_{7}; q_{9}\right]^{1} \quad (8)$$

其中,系数矩阵 $H_0 \in \mathbb{R}^{8\times9}$ 是常数矩阵; $\theta_{mirr} = q_1 + \frac{(2l_f + l_f)q_3 - l_fq_9}{2(l_f + l_f)} + \frac{q_4 - q_8}{2}$; $l_f 和 l_t 分别为大小腿长 度$; $\theta_{tor} = q_1 + q_3 + q_4$. 当 $q_2 = q_5 = q_6 = q_7 = 0$ 时, θ_{tor} 为躯干与竖直平面的夹角, θ_{mirr} 为摆动腿与支撑腿

夹角的角平分线与竖直平面的夹角.此外, h^d(s, a) 是一组四次贝塞尔曲线, 代表各个控制变量理想轨 迹

$$\boldsymbol{h}^{d}(s,\boldsymbol{a}) = [h^{d}_{tor}(s,\boldsymbol{a}), h^{d}_{tor}(s,\boldsymbol{a}), h^{d}_{mirr}(s,\boldsymbol{a}), h^{d}_{2}(s,\boldsymbol{a}), h^{d}_{3}(s,\boldsymbol{a}), h^{d}_{5}(s,\boldsymbol{a}), h^{d}_{7}(s,\boldsymbol{a}), h^{d}_{8}(s,\boldsymbol{a})]^{T}$$
(9)

式中,系数 *a* 为一组构成虚拟约束的实数参数向量, 将在后续求解周期步态的过程中作为优化参数;自 变量 *s* 定义为

$$s(\boldsymbol{q}) = \begin{cases} \frac{\theta(\boldsymbol{q}) - \theta^+}{\theta^- - \theta^+}, & \theta^+ < \theta(\boldsymbol{q}) < \theta^-\\ 0, & \theta(\boldsymbol{q}) < \theta^+\\ 1, & \theta(\boldsymbol{q}) > \theta^- \end{cases}$$
(10)

以及 θ(**q**) 定义为

报

$$\theta(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{c}\boldsymbol{q} = q_1 + \frac{l_{\rm f}}{l_{\rm f} + l_t} q_3 \tag{11}$$

相当于胯部与地面支撑点的夹角, θ⁻ 和 θ⁺ 分别表 示碰撞发生前后的值.

2.2 步态规划

欠驱动双足机器人的步态规划问题常常被转 化为求解虚拟约束系数的非线性约束优化过程^[7,16]. 此时,可以以驱动关节输入能量最小作为目标,求 解参数向量 *a*. 考虑到电机的输入功率和电枢电流 的平方成正比,设双足机器人行走周期为 *T*,每行走 一步驱动关节所需输入的能量可等效为

$$C = \int_0^T \left\| \boldsymbol{u}(t) \right\|_2^2 \mathrm{d}t \tag{12}$$

可利用 MATLAB 软件中 FMINCON 函数对优 化目标 (12) 及相应非线性约束进行设定并求解.除 参考文献 [28] 中所述的约束条件外,需增大速度和 步长作为不等式约束条件,以获得不同步长和步速 的步态.

2.3 控制器设计

目前, 欠驱动 3-D 双足机器人的控制器设计 主要基于混杂零动力学方法 (hybrid zero dynamics framework) ^[30-31]. 通过对式 (7) 进行二阶求导, 可得

$$\ddot{\mathbf{y}} = L_f^2 \mathbf{y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + L_g L_f^2 \mathbf{y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{u}$$
(13)

再利用输入输出线性化方法,将控制器设计为

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) = \boldsymbol{u}^*(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) + (L_g L_f^2 \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}))^{-1} \boldsymbol{\mu}$$
(14)

式中, $u^*(q, \dot{q}) := -(L_s L_f h(q))^{-1} L_f^2 y(q, \dot{q}); \mu = -\frac{K_p}{\varepsilon^2} y - \frac{K_d}{\varepsilon} \dot{y}; K_p, K_d, \varepsilon > 0.$ 根据文献 [22], 通过选取合适的 ε , 机器人状态轨迹将收敛到所设计的虚拟约束平 面 $Z = \{(q, \dot{q}) \mid y(q, \dot{q}) = 0, \dot{y}(q, \dot{q}) = 0\}$. 但由于欠驱 动关节的存在, 控制器 (12) 还不能保证所设计的周 期步态的稳定性. 针对该问题, 国内外学者目前主 要采用基于事件的反馈控制方法^[10,22].

为实现基于碰撞事件的反馈控制,首先引入β 作为在单足支撑期保持不变的一组辅助参数向量, 利用向量β拓展系统输出函数,添加基于碰撞事件 更新项h_s(θ,β),其中β只在每次碰撞后进行更新. 这样有

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}_0(\mathbf{q}) - \mathbf{h}^{\mathrm{d}}(s(\mathbf{q}), \mathbf{a}) - \mathbf{h}_{\mathrm{s}}(\theta, \boldsymbol{\beta})$$
(15)

且

$$\begin{aligned} h_{s}(\theta, \beta) &= \mathbf{0} \\ \frac{\partial h_{s}(\theta, \beta)}{\partial \theta} &= \mathbf{0} \\ h_{s}\left(\frac{\theta^{+} + \theta^{-}}{2}, \beta\right) &= \beta \\ h_{s}(\theta, \beta) &\equiv \mathbf{0}, \ 0.1\theta^{+} + 0.9\theta^{-} \leq \theta \leq \theta^{-} \end{aligned}$$

$$(16)$$

进而,利用文献 [27] 中的定理 2,选取碰撞后状 态集 $x^{z} = (q_{1}, \dot{q}_{1}, \theta)^{T}$ 作为庞卡截面上的点集,通过 庞卡莱映 $P^{z} : S \cap Z \to S \cap Z$,建立一个离散时间系 统 $x_{k+1}^{z} = P^{z}(x_{k}^{z}, \beta^{*})$.对该系统在庞卡莱截面上的不 动点 x^{Z*} 进行线性化,并定义 $\beta^{*} = 0_{8\times 1}$,则可推得

$$\delta \boldsymbol{x}_{k+1}^{z} = A \delta \boldsymbol{x}_{k}^{z} + \boldsymbol{F} \delta \boldsymbol{\beta}_{k} \tag{17}$$

式中, $\delta \beta = \beta - \beta^*$, **F**为 **P**关于 β 的雅可比矩. 这样, 可设计反馈增益矩阵如下

$$\delta \boldsymbol{\beta}_k = -\boldsymbol{K} \delta \boldsymbol{x}_k^z \tag{18}$$

根据离散系统的线性二次型最优调节器 (DLQR) 设计方法, 以

$$J = \sum_{i=1}^{\infty} (\delta \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Q} \delta \boldsymbol{x} + \delta \boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Q} \delta \boldsymbol{\beta})$$
(19)

为目标函数,求解最小化问题获得最优增益矩阵 K. 其中, Q 和 R 为加权矩阵.

结合已公开的一些数值仿真结果^[21-32] 来看, 通 过上述基于碰撞事件的反馈控制, 3-D 双足机器人 稳定步态的吸引域仍然窄小, 抗干扰能力较弱, 尤 其当地面高度发生变化时, 控制器容易失效.

3 基于步态切换的控制方法

为了提高基于碰撞事件的反馈控制的鲁棒性, 本文受人类在遇到外部扰动时会通过步态调整重 新获得稳定性所启发,提出一种基于步态切换的控 制方法.该方法其由3个部分组成,包括建立步态 库,设计步态切换条件,以及通过求解最小化问题 得到下一个步态.

该步态切换方法的整体闭环控制系统如图 3 所示. 首先, 根据反馈获得摆动腿落地后与地面发生碰撞后的系统状态 x⁺ := (q^{*}, q⁺); 其次, 计算步态 切换函数 Tr, 通过求解最小化问题, 获得使步态切 换目标函数取最小值的步态以及对应的关节理想 轨迹参数 a 和基于碰撞事件的反馈控制器 (DLQR 控制器) 增益 K; 最后, 将前述结果代入式 (13)、式 (14) 和式 (16) 中, 获得控制器总 u, 使机器人进行步 态切换. 简而言之, 只要通过步态切换令机器人不 摔倒, 即可认为运动是稳定的, 因为任何扰动的最 终结果都是对机器人运动状态产生影响, 这些影响 都可由闭环控制律逐步恢复.



图 3 步态切换方法的闭环控制策略

Fig.3 Closed-loop control strategy of the gait transition method

3.1 建立步态库

定义一个渐进稳定的步态库元素为 g := (x*, a, K), 其中 x* 为碰撞发生时庞卡莱截面上的不动点, a 为理想关节轨迹参数, K 为基于碰撞事件的反馈 控制增益.

如图 4 所示,本文选择最小步速为 0.4 m/s (步 长为 0.2 m) 至最大步速为 1.2 m/s (步长为 0.4 m) 的 步态,由 25 个通过上节所述的方法离线优化所得的 周期步态组成步态库

$$GL := \left\{ g_1(\boldsymbol{x}_1^*, \boldsymbol{a}_1, \boldsymbol{K}_1), g_2(\boldsymbol{x}_2^*, \boldsymbol{a}_2, \boldsymbol{K}_2), \cdots, \\ g_{25}(\boldsymbol{x}_{25}^*, \boldsymbol{a}_{25}, \boldsymbol{K}_{25}) \right\}$$
(20)

力



Fig.4 Gait library composed of 25 gaits

3.2 步态切换函数

机器人在不平整路面容易发生失稳的重要原 因是:机器人与地面碰撞后的系统状态远离了预定 的参考轨迹,而由于控制器在狭窄的吸引区域内不 能捕获该系统状态,因此导致机器人的状态演化轨 迹逐渐偏离预定轨迹.以往,国内外学者^[32-34]主要 通过扩大吸引域来捕捉碰撞后的系统状态,从而使 机器人的状态轨迹逐渐收敛至预定的参考轨迹.在 此,本文从控制器设计的另一个角度考虑:通过及 时切换到能够捕捉该系统状态的参考轨迹来实现 稳定行走.

为分析切换后的参考步态能否捕捉到机器人 发生碰撞后的系统状态,有必要定义一个度量当前 状态与参考步态的函数距离,利用相似性度量中常 用的欧式距离,定义一个欧氏距离为

$$\Delta \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Q} \Delta \boldsymbol{x} \tag{21}$$

其中 Q 是距离量度, 且 $\Delta x = x - x^*$ 是当前状态 x 与 步态库中采样状态 x^* 的偏差. 为了从步态库中获取 步态构建控制律, 最简单的方法是使用最近的局部 模型来预测当前状态的最优控制, 因此综合考虑步 态切换过程的稳定性与能效, 本文设计如下多目标 步态切换函数

$$Tr(GL, x^{+}) = \min_{g=(x^{*}, a, K)} (\Delta \theta_{i} M \Delta \theta_{i} + \Delta x^{T} N \Delta x + \Delta \beta^{T} L \Delta \beta)$$
(22)

式中, M, N, L 为加权系数矩阵, $\Delta \theta_i = \theta_i(x^+) - \theta_i(x^*)$, $\Delta x = x^+ - x^*$, $\Delta \beta = -K(x^+ - x^*)$.

所设计的步态切换函数由三项组成:首先, $\Delta x^T N \Delta x$ 项代表碰撞后的系统状态与庞卡莱截面 不动点之间的距离,该距离越短说明状态轨迹收 敛到相应的虚拟约束平面速度越快;其次, $\Delta \theta_i M \Delta \theta_i$ 项代表欠驱动状态变量的偏差,与主动关节变量相 比,欠驱动关节变量对机器人的稳定性具有更大的 影响;最后, $\Delta \beta^T L \Delta \beta$ 项代表了基于事件的反馈控 制器的能耗大小.以该步态切换函数作为最小化 问题的目标函数,求解该问题可以得到下一个步态 $g_{n+1}(x_{n+1}^*, a_{n+1}, K_{n+1})$,最终实现步态切换的目的.

4 仿真验证

为说明该步态切换策略能够有效提高行走鲁 棒性,参考文献 [34] 中的地面高度设置,以摆动腿 落地时,地面接触高 *d*[*k*] 在 [-20,20] mm (约为 4% 的腿长) 内随机变化的不平整路面作为扰动 (摆动 腿落地后,直到发生下一次碰撞前,地面高度不再 变化). 实验中共测试 100 步,并进一步假设 *d*[*k*] 以 每 20 步为一个周期,即 *d*[*k* + 20] = *d*[*k*],如图 5 所 示.



图 6 所示为机器人关节角度和角度速的相图, 仅采用基于事件的控制方法时,机器人在三步之后 相图呈发散状,即机器人摔倒. 然而,采用本文基于 步态切换的控制方法,通过切换不同的步态,机器 人能够有效克服地面高度的随机变化,通过不平整 地面,如图 7 所示.

由图 6 可知, 基于事件控制方法的鲁棒性不高, 机器人行走几步后就会摔倒. 然而, 通过预先生成 步态库, 机器人可以步态切换的形式克服地面高度 变化, 见图 7, 从而证明了本文关于步态切换控制方 法的有效性和更强的鲁棒性. 对此, 直观的解释是, 选择合适的步态,使控制器找到能够最快收敛的参 考平面,以适应不平整路面的行走.







5 结论

目前关于双足欠驱动步行运动研究的问题之 一是没有定量的方法来测量和比较某个系统的稳 定性,很难通过某个稳定性判据来提高控制器的鲁 棒性.考虑到过去仅依靠一个参考轨迹获得的稳定 性是有限的,因此本文以最原始的稳定性标准--不 摔倒为出发点,探索使用步态库--多轨迹方法来实 现鲁棒性. 在参考 HZD 控制器设计方法的基础上, 本文提出了一种步态切换控制方法,在未显著增加 步态规划复杂程度的基础上(仅仅增加步长及步速 作为不等式约束条件), 使得欠驱动双足步行机器人 在地面不平整的情况下实现稳定步行,并通过仿真 验证了其可行性. 该方法通过预先规划一些不同步 长、步速的周期步态,组成步态库,以模仿人类在遇 到外部扰动时适时调整步态 (如步长与步速等)的 行为为依据,构造了一个启发式的多目标步态切换 函数,实现不同步态间的有效切换并且保持稳定步 行.

参考文献

 程靖,陈力.空间机器人双臂捕获卫星力学分析及镇定控制. 力学学报, 2016, 48(4): 832-842 (Cheng Jing, Chen Li. Mechanical analysis and calm control of dual-arm space robot for capturing a satellite. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(4): 832-842 (in Chinese))

- 2 陶波, 龚泽宇, 丁汉. 机器人无标定视觉伺服控制研究进展. 力学学报, 2016, 48(4): 767-783 (Tao Bo, Gong Zeyu, Ding Han. Survey on uncalibrated robot visual servoing control. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(4): 767-783 (in Chinese))
- 3 王冬, 吴军, 王立平等. 3-PRS 并联机器人惯量耦合特性研究. 力 学学报, 2016, 48(4): 804-812 (Wang Dong, Wu Jun, Wang Liping, et al. research on the inertia coupling property of a 3-PRS parallel robot. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(4): 804-812 (in Chinese))
- 4 胡凌云, 孙增圻. 双足机器人步态控制研究方法综述. 计算机 研究与发展, 2005, 42(5): 728-733 (Hu Lingyun, Sun Zengxi. Survey on gait control strategies for biped robot. *Journal of Computer Research and Development*, 2005, 42(5): 728-733 (in Chinese))
- 5 Alcaraz-Jimenez JJ, Herrero-Perez D, Martinez-Barbera H. Robust feedback control of ZMP-based gait for the humanoid robot Nao. *The International Journal of Robotics Research*, 2013, 32(9-10): 1074-1088
- 6 Hurmuzlu Y, Génot F, Brogliato B. Modeling, stability and control of biped robots-a general framework. *Automatica*, 2004, 40(10): 1647-1664
- 7 田彦涛, 孙中波, 李宏扬等. 动态双足机器人的控制与优化研究进展. 自动化学报, 2016, 42(8): 1142-1157 (Tian Yantao, Sun Zhongbo, Li Hongyang, et al. A review of optimal and control strategies for dynamic walking bipedal robots. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(8): 1142-1157 (in Chinese))
- 8 Yazdani M, Salarieh H, Saadat Foumani M. Decentralized control of rhythmic activities in fully-actuated/under-actuated robots. *Robotics* and Autonomous Systems, 2018, 101: 20-33
- 9 Spong MW, Bullo F. Controlled symmetries and passive walking. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(7): 1025-1031
- 10 Ames AD, Sinnet RW, Wendel EDB. Three-dimensional kneed bipedal walking: A hybrid geometric Approach//Hybrid Systems: Computation and Control, International Conference, HSCC 2009, San Francisco, CA, USA, April 13-15, 2009: 16-30
- 11 Gregg RD, Spong MW. Reduction-based control of threedimensional bipedal walking robots. *International Journal of Robotics Research*, 2010, 29(6): 680-702
- 12 Manchester IR, Mettin U, Iida F, et al. Stable dynamic walking over uneven terrain. *International Journal of Robotics Research*, 2011, 30(3): 265-279
- Westervelt ER, Grizzle JW, Koditschek DE. Hybrid zero dynamics of planar biped walkers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(1): 42-56
- 14 Morris B, Grizzle JW. Hybrid invariant manifolds in systems with impulse effects with application to periodic locomotion in bipedal robots. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(8):

1751-1764

报

- 15 Chevallereau C, Abba G, Aoustin Y, et al. Rabbit: a testbed for advanced control theory. *IEEE Control Systems Magazine*, 2003, 23(5): 57-79
- 16 Sreenath K, Park HW, Poulakakis I, et al. Embedding active force control within the compliant hybrid zero dynamics to achieve stable, fast running on MABEL. *International Journal of Robotics Research*, 2013, 32(3): 324-345.
- 17 Martin E, Post DC, Schmiedeler JP. The effects of foot geometric properties on the gait of planar bipeds walking under HZD-based control. *International Journal of Robotics Research*, 2014, 33(12): 1530-1543
- 18 Gregg RD, Lenzi T, Hargrove LJ, et al. Virtual constraint control of a powered prosthetic leg: From simulation to experiments with transfemoral amputees. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(6): 1455-1471
- 19 Zhao H, Horn J, Reher J, et al. Multicontact locomotion on transfemoral prostheses via hybrid system models and optimizationbased control. *IEEE Transactions on Automation Science & Engineering*, 2016, 13(2): 502-513
- 20 Zhao H, Ambrose E, Ames AD. Preliminary results on energy efficient 3D prosthetic walking with a powered compliant transfemoral prosthesis//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2017, Singapore, 2017, IEEE, 2017:1140-1147
- 21 Agrawal A, Harib O, Hereid A, et al. First steps towards translating HZD control of bipedal robots to decentralized control of exoskeletons. *IEEE Access*, 2017, 5(1): 9919-9934
- 22 Chevallereau C, Grizzle JW, Shih CL. Asymptotically stable walking of a five-link underactuated 3-D bipedal robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 25(1): 37-50
- 23 Ramezani A, Hurst JW, Hamed KA, et al. Performance analysis and feedback control of ATRIAS, a three-dimensional bipedal robot. *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, 2013, 136(2): 729-736
- 24 Griffin B, Grizzle J. Walking gait optimization for accommodation of unknown terrain height variations//American Control Conference (ACC), Chicago IL USA, IEEE, 2015: 4810-4817
- 25 Dai H, Tedrake R. L2-gain optimization for robust bipedal walking on unknown terrain//Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on,Karlsruhe Germany, IEEE, 2013: 3116-3123
- 26 李超. 欠驱动双足机器人动态步行规划与抗扰动控制. [博士 论文]. 杭州: 浙江大学, 2015 (Li Chao. Dynamic locomotion and anti-disturbance control of underactuated biped robots. [PhD Thesis]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015 (in Chinese))
- 27 Li C, Xiong R, Zhu QG, et al. Push recovery for the standing underactuated bipedal robot using the hip strategy. *Frontiers of Informa*-

tion Technology & Electronic Engineering, 2015, 16(7): 579-593

- 28 Chen Z, Lakbakbi Elyaaqoubi N, Abba G. Optimized 3D stable walking of a bipedal robot with line-shaped massless feet and sagittal underactuation. *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, 83: 203-213
- 29 Maggiore M, Consolini L. Virtual molonomic constraints for Euler-Lagrange systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58(4): 1001-1008
- 30 Westervelt ER, Grizzle JW, Koditschek DE. Hybrid zero dynamics of planar biped walkers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(1): 42-56
- 31 Asano F. Fully analytical solution to discrete behavior of hybrid zero dynamics in limit cycle walking with constraint on impact posture.

Multibody System Dynamics, 2015, 35(2): 191-213

- 32 Westervelt ER, Morris B, Farrell KD. Analysis results and tools for the control of planar bipedal gaits using hybrid zero dynamics. *Autonomous Robots*, 2007, 23(2): 131-145
- 33 Grizzle JW, Westervelt ER, Canudas-De-Wit C. Event-based PI control of an underactuated biped walker//Decision and Control, 2003, Proceedings. 42nd IEEE Conference on, Maui HI USA, IEEE, 2003: 3091-3096
- 34 Hamed KA, Buss BG, Grizzle JW. Exponentially stabilizing continuous-time controllers for periodic orbits of hybrid systems: Application to bipedal locomotion with ground height variations. *International Journal of Robotics Research*, 2016, 35(8): 977-999