

基于零力矩点的四足机器人非平坦 地形下步态规划与控制

王立鹏, 王军政, 赵江波, 陈光荣

(北京理工大学 自动化学院 复杂系统智能控制与决策重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 为提升四足机器人在非平坦地形中的行走能力,根据零力矩点理论分析机器人行进过程的稳定条件,利用稳定裕度的概念,在支撑多边形中求取最优稳定点来规划零力矩点。为避免 walk 步态中频繁调整躯干姿态导致的能耗和行进速度损失,提出了在次优支撑三角形中求取最优稳定点的方法。针对斜坡地形中机器人运动性和稳定性的矛盾,设计了综合性能更高的躯干姿态和支撑点位置。为适应不同坡度和躯干角度,通过对零冲击足端轨迹规划方法进行改进,实现了以目标支撑点为中心的斜坡零冲击规划目标。仿真试验结果表明,该规划控制方法能够实现机器人在不同斜坡中的稳定行走。

关键词: 零力矩点理论; 非平坦地形; 稳定裕度; 足端轨迹规划

中图分类号: TP 242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2015)06-0601-06

DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2015.06.011

Foot Trajectory Generation and Gait Control Method of a Quadruped Robot on Uneven Terrain Based on Zero Moment Point Theory

WANG Li-peng, WANG Jun-zheng, ZHAO Jiang-bo, CHEN Guang-rong

(Key Laboratory of Intelligent Control and Decision of Complex Systems, School of Automation,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Aimed to improve the walking ability of a quadruped robot on uneven terrain, the stable condition in marching process was analyzed based on zero moment point (ZMP) theory. By employing the concept of stability margin, the optimal stability point (OSP) was calculated for ZMP planning. To reduce energy consumption and speed loss from wagging the body frequently, a novel scheme of calculating OSP in the suboptimal supporting triangle (SST) was proposed. Body posture and supporting points were designed to achieve trade-off between legs' work space and robot's stability. And the zero impact algorithm was improved to adapt the given supporting points and angles of slope and body. Simulations showed that the prototype robot is able to walk steadily on different slopes controlled by the given planning method.

Key words: zero moment theory; uneven terrain; stability margin; foot trajectory generation

近年来,众多学者将目光集中到足式机器人的机构设计、运动控制和环境适应性等方面的研究上,其主要原因在于:与轮式机器人相比,足式机器人对复杂地形和非结构化环境具有更好的适应性。在四

足机器人的研究中,具有重要意义的课题是步态控制器的研制。为步态控制器设计良好的步态规划和运动控制算法,可以有效地提高机器人的行走速度和能量效率,增强机器人在行进过程中的越障能力

收稿日期: 2013-09-18

基金项目: 国家“八六三”计划项目(2011AA041002)

作者简介: 王立鹏(1986—),男,博士生, E-mail: wlprz@163.com.

通信作者: 王军政(1964—),男,教授,博士生导师, E-mail: wangjz@bit.edu.cn.

和对不平坦地形的适应能力.

四足机器人步态控制方法,主要有仿生控制策略和基于模型建模控制策略两大类. 仿生控制策略以生物中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)为代表^[1]. 张秀丽等^[2-3]实现了步态行走的 CPG 控制,但没有将反馈信息引入到 CPG 网络,机器人的环境适应性不足;Kimura 等^[4]根据传感器的“反射”信息,进行 CPG 相位调整“响应”. 而针对足端轨迹规划研究,众多学者设计了如圆弧模型^[5]和椭圆轨迹^[6-7];文献^[8]设计了无速度和加速度突变的零冲击轨迹规划方法;中国科学技术大学则使用曲线拟合的方法实现了足部的 3 维轨迹规划^[9]. 针对机器人的稳定性, Vukobratović 等^[10]提出零力矩点(zero moment point, ZMP)理论,该理论已被众多学者用作机器人的稳定性判据.

本文步态控制方法采用基于模型的方法,通过对机器人建立模型,借助 ZMP 理论分析机器人稳定性,并提出在次优支撑三角形中求取最优稳定点的方法规划 ZMP,进而控制躯干姿态在稳定范围,利用改进的零冲击足端轨迹规划实现坡面上步态的连续稳定行走.

1 基于零力矩点理论的四足机器人稳定性分析

零力矩点理论由 Vukobratović 等在 1972 年首先提出,ZMP 是指地面上的一点,作用于机器人的重力和惯性力所产生的合力矩在该点水平分量为 0. 研究表明:在机器人运动时,若 ZMP 位于机器人足底与地面形成的支撑多边形内,将保证机器人运动过程的稳定性.

1.1 四足机器人支撑多边形

支撑多边形是四足机器人足底与地面之间所有接触点所构成的多边形区域. 由于 walk 步态在低速行走时具有稳定性好、对越障和不平地适应性强的优势,本文对 walk 步态进行了研究. 为确定支撑多边形的坐标值,需要对机器人进行建模. 以躯干形心为原点定义机器人坐标系 {B}, 规定 x 轴指向机器人前进方向, z 轴向上, y 轴由右手定则确定;由 {B} 向支撑面投影得到全局参考坐标系 {W}; 定义 4 条腿以左前(left fore, LF)、右前(right fore, RF)、右后(right hide, RH)和左后(left hide, LH)顺序编号为 1~4, 坐标系分别为 {LF}、{RF}、{RH}、{LH}. 各坐标系建系如图 1 所示. 根据关

节角度值由正运动学知识求出末端点 p_{ei} ($i=1, 2, 3, 4$) 在单腿坐标系 {i} 下的坐标表示 ${}^iP_{ei}$, 根据坐标系间的几何关系,先求出 {B} 中的坐标 ${}^BP_{ei}$, 再得到 {W} 中的表示 ${}^WP_{ei}$, 由各支撑点坐标确定出支撑多边形.

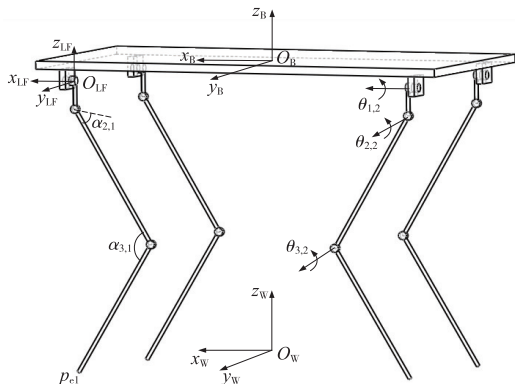


图 1 四足机器人坐标系建系示意图

Fig. 1 Diagram of coordinates and parameters for a quadruped robot

1.2 四足机器人零力矩点稳定判据

在图 1 所建全局参考坐标系中,重力加速度为 $g=[0 \ 0 \ -g]^T$. 假设四足机器人的总重量为 M , 重心坐标为 $p_c=[x_c \ y_c \ z_c]^T$; p 点为 ZMP 所在位置,坐标为 $p=[x_p \ y_p \ z_p]^T$; 支撑点受到地面反作用力合力为 f ; 则地面反作用力绕原点的力矩 τ 为

$$\tau = p \times f + \tau_p. \quad (1)$$

式中 τ_p 为过零力矩点的力矩.

由动量定理和角动量定理得

$$\dot{P} = Mg + f, \quad (2)$$

$$\dot{L} = p_c \times Mg + \tau. \quad (3)$$

联立式(1)~(3),消去 τ 和 f 求得

$$\tau_p = \dot{L} - p_c \times Mg + (\dot{P} - Mg) \times p. \quad (4)$$

由 ZMP 理论,令上式中的水平分量 τ_{px} 和 τ_{py} 为 0, 解得 ZMP 位置坐标 x_p 和 y_p ,

$$\begin{cases} x_p = \frac{Mg x_c + z_p \dot{P}_x - \dot{L}_y}{Mg + \dot{P}_z}, \\ y_p = \frac{Mg y_c + z_p \dot{P}_y + \dot{L}_x}{Mg + \dot{P}_z}. \end{cases} \quad (5)$$

式中 z_p 为支撑地面高度,平面时 $z_p=0$.

若把四足机器人简化为一个质点,则其动量和角动量分别为

$$\begin{cases} P = M \dot{p}_c = M[\dot{x}_c \ \dot{y}_c \ \dot{z}_c]^T, \\ L = p_c \times M \dot{p}_c. \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),求得 ZMP 坐标表达式为

$$\begin{cases} x_p = x_c - \frac{(z_c - z_p) \ddot{x}_c}{\ddot{z}_c + g}, \\ y_p = y_c - \frac{(z_c - z_p) \ddot{y}_c}{\ddot{z}_c + g}. \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)可知,若已知重心坐标 p_c 和地面高度 z_p 等参数,即可求出 ZMP 的坐标. 根据前文所求支撑多边形,可以方便地判断出机器人是否会失稳. 为了衡量机器人保持稳定能力的大小,采用稳定裕度(stability margin) S_m 作为标准. 如图 2 所示,对于 4 足机器人来说,定义稳定裕度为 ZMP 距离支撑三角形边界的最短距离,即

$$S_m = \min(S_{m1}, S_{m2}, S_{m3}). \quad (8)$$

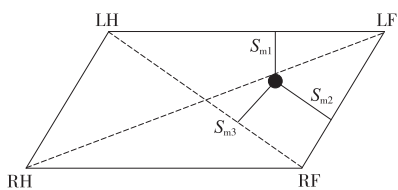


图 2 四足机器人 ZMP 稳定判断示意图

Fig. 2 Balance criterion for a quadruped robot

四足机器人在 walk 步态行进过程中,当 ZMP 位于支撑三角形内部时,稳定裕度取值为正;当 ZMP 落在支撑三角形外部则取值为负. 稳定裕度取值越大,机器人就越稳定. 由式(8)可知,当 ZMP 位于支撑三角形内心,此时机器人稳定裕度最大.

1.3 次优三角形内稳定裕度最大化

机器人行进过程中,希望保持最大稳定裕度来确保稳定性. 但是,随着各腿在摆动相和支撑相的次序变换,支撑三角形不断地变换. 刻意追求稳定性的最优化,需要频繁地调整躯干姿态,这样会严重影响步态占空比、行进速度和稳定性等. 因此,在 ZMP 规划时,需要兼顾步态条件的限制.

对于 walk 步态,一般分为横截步行(transverse walk)和旋转步行(rotary walk),并以横截步行最为常见^[11],其摆腿顺序为 LF-RH-RF-LH. 为优化 ZMP 规划过程,降低躯干调整频率,保证机器人稳定性,将摆腿相序周期内调整为 RH-RF-LH-LF. 以此相序行进时,支撑三角形的变换和 ZMP 的期望位置示意图如图 3 所示.

根据 walk 步态各腿相序特点,本文提出次优支撑三角形的概念,并在其内部求取 ZMP 最优稳定点. 具体地,以图 4 为例进行说明:A、B、C、D 依次是 LF、RF、RH 和 LH 支撑点水平投影,当 RH 和 RF 摆动时,称线段 AB 为主支撑边. RH 从后极限

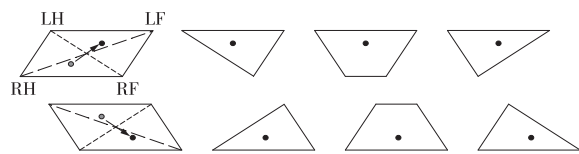


图 3 横截步态中支撑三角形变化示意图

Fig. 3 The change of supporting triangle in transverse walk

相投影点 C 前摆至前极限相投影点 C_1 ,随着 RF 进入摆动相,支撑三角形由 $\triangle ADB$ 变为 $\triangle ADC_1$,为兼顾两腿摆动相都有较大稳定裕度,以 BD 和 AC_1 连线交点 I 与 AD 构成次优三角形,其内心即为最优稳定点.

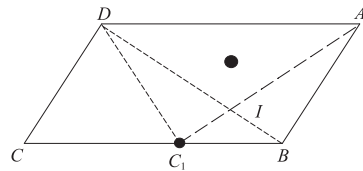


图 4 次优支撑三角形内最优稳定点示意图

Fig. 4 The OSP in suboptimum triangle

2 非平坦地形下躯干姿态

在非平坦地形中,斜坡是一种基本的典型运动环境. 与平坦地形相比,机器人在斜坡地形中行走难度更大,主要表现在:重心和 ZMP 在支撑面的投影与斜面上各腿的支撑点不在同一个水平面上;支撑面水平投影面积变小,相同条件下稳定裕度降低. 躯干姿态影响着 ZMP 的投影位置,而支撑腿足端位置决定着支撑多边形的形状和大小.

通常机器人在爬坡过程中,躯干可采取的姿态有水平和平行斜面两种. 水平姿态躯干平行于水平面,支撑多边形面积较大,稳定裕度也大,如图 5 所示. 当坡度为 β_s 、躯干长度为 l_b 、躯干形心在地面投影高度为 h_b 时,主支撑边前后腿高度 h_F 和 h_H 分别为

$$\begin{cases} h_F = h_b - l_b \tan \beta_s / 2, \\ h_H = h_b + l_b \tan \beta_s / 2. \end{cases} \quad (9)$$

若躯干长度 $l_b = 1\,000\text{ mm}$, $h_b = 600\text{ mm}$, $\beta_s = 30^\circ$,则前后腿高度分别约为 311 mm 和 888 mm . 前后腿的工作空间都极度减小,严重限制了行进步幅. 如果坡度变得更大,极有可能超出单腿的工作空间,使机器人无法运动,因此这种姿态并不利于斜坡行走.

对于图 6 所示的平行坡面姿态,以重心作为 ZMP 的稳定性参考,当机器人上坡时,躯干的重心

在水平面投影落在支撑多边形水平投影的后部. 此时如果抬动后腿, 随着支撑多边形的变化, 重心投影有可能落在支撑三角形外部, 稳定裕度值为负, 导致机器人失稳翻倒.

水平姿态支撑面积大、ZMP 稳定裕度高, 但是空间性差; 平行姿态运动规划简单、运动空间限制小, 但稳定性不足. 为避免二者的缺点, 结合其稳定性和空间性的优点, 设计如图 7 所示躯干姿态和支撑点位置. 图中, 躯干与水平面成角 β_B 、与坡面成角 β_Δ , 并根据坡度的变化适应地调整, 以增加系统稳定性; 主支撑腿垂直向下, 保证机器人重心的投影在不同坡度地形环境下都处于主支撑边中线上, 从而, 确保四足机器人有较大的稳定裕度.

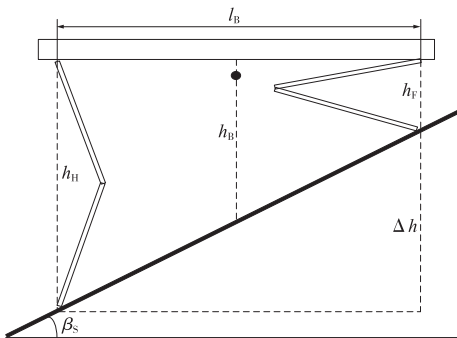


图 5 机器人躯干水平爬坡示意图

Fig. 5 The diagram of a robot climbing slope with horizontal body

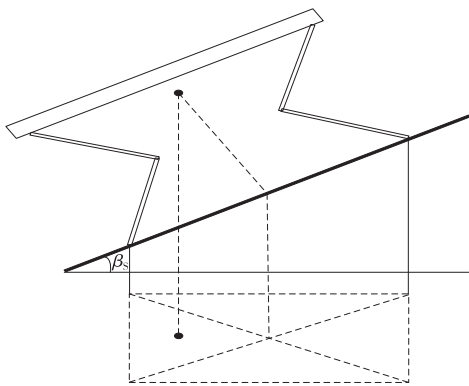


图 6 机器人平行斜面爬坡示意图

Fig. 6 The diagram of a robot climbing slope with parallel body

3 足端轨迹规划

在斜坡环境下, 支撑多边形水平投影相比平坦地形要小, 机器人的稳定裕度也随之降低. 腿部摆动过程的平稳性和落地时足部冲击力大小对机器人的稳定性有比较大的影响. 文献[8]中提出的零冲击足端轨迹规划方法具有运动过程连续平稳、抬落腿运动冲击小等优点. 但是, 规划是针对平坦地形

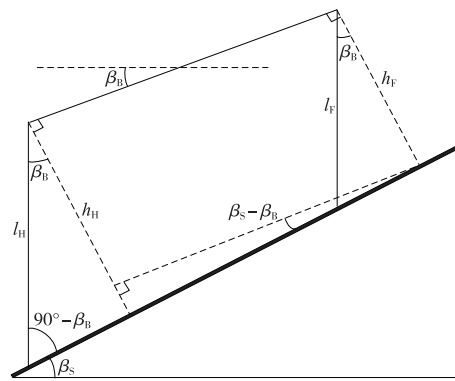


图 7 机器人坡面躯干姿态示意图

Fig. 7 Body posture of robot on slope

设计, 没有考虑重力和惯性力等影响, 所以机器人自我调整能力不足, 易产生拖地、甚至翻倒问题. 为将规划方法优点应用到斜坡运动中, 对其进行如下改进.

以 LF 为例, 单腿坐标系 $\{LF\}$ 下设定足端地面右手坐标系 $\{G\}$, 其 x 轴平行坡面指向机器人前进方向, z 轴垂直斜面向上, 原点坐标为

$${}^{LF}P_G = [x_G \quad y_G \quad z_G]^T.$$

则在 $\{G\}$ 坐标系 xoz 平面内足端轨迹如下式所示[8].

$$\begin{cases} x = S \left[\frac{t}{T_w} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(2\pi \frac{t}{T_w} \right) \right] - \frac{S}{2}, \\ z = H \left[\operatorname{sgn} \left(\frac{T_w}{2} - t \right) (2f_E(t) - 1) + 1 \right]. \end{cases} \quad (10)$$

$$f_E(t) = \frac{t}{T_w} - \frac{1}{4\pi} \sin \left(4\pi \frac{t}{T_w} \right), \quad (11)$$

$$\operatorname{sgn} \left(\frac{T_w}{2} - t \right) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < T_w/2 \\ -1 & T_w/2 \leq t < T_w \end{cases}. \quad (12)$$

式中: S 为步幅; H 为抬腿高度; t 为时间变量; T_w 为摆动周期.

根据前文的机器人坡面姿态, 假设坡度为 β_s 、躯干倾角为 β_B 、躯干与坡面夹角为 β_Δ , 则 $\{G\}$ 中规划 t 时刻足端轨迹点在 $\{LF\}$ 坐标系下表示为

$$\begin{bmatrix} x_{LF} \\ y_{LF} \\ z_{LF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\beta_\Delta & 0 & s\beta_\Delta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta_\Delta & 0 & c\beta_\Delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ 0 \\ z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix}. \quad (13)$$

根据式(10)~(13), 令步长 $S=600$ mm, 抬腿高度 $H=200$ mm, 摆腿周期 $T_w=0.5$ s, 斜坡角度 $\beta_s=30^\circ$, 躯干角度 $\beta_B=20^\circ$, 按照四足机器人躯干长度 $l_B=836$ mm, 在 Matlab 中仿真得到斜坡前腿足端轨迹如图 8 所示, 图中 $\{B\}$ 、 $\{LH\}$ 、 $\{LF\}$ 、 $\{G\}$ 、

{W}为前文所提各坐标系.

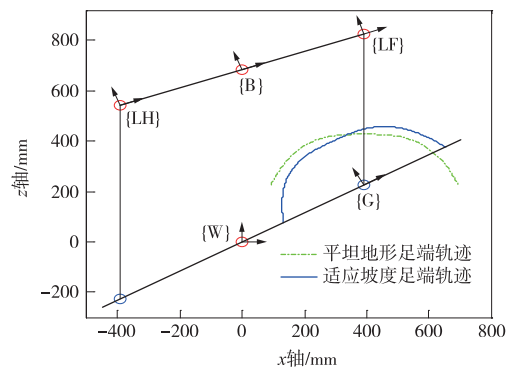


图 8 斜坡足端轨迹和各坐标系示意图
Fig. 8 Foot trajectory and coordinates on slope

4 仿真试验验证

为验证所提方法的有效性,采用 SolidWorks 设计虚拟样机,根据样机尺寸利用 Matlab 对足端轨迹

规划和单腿工作空间进行仿真,为机器人上坡行走时单腿的长度提供参考依据.将样机模型导入 Webots 软件^[12]中,根据上文所提算法编程实现四足机器人斜坡行走.

试验样机躯干总长度为 1 000 mm、宽 500 mm.为模拟实际机器人液压动力机构质量,如:泵站、发动机、散热片和电池等,设定试验样机总质量约 100 kg.根据样机数据设置 Webots 中的试验参数,包括质量、质心、转动惯量和斜坡地面参数等.

仿真结果如图 9~图 11 所示.图 9 为斜坡角度 $\beta_s=15^\circ$ 、躯干角度 $\beta_b=10^\circ$ 、步长 $S=400\text{ mm}$ 、抬腿高度 $H=100\text{ mm}$ 、初始腿长 $l_f=600\text{ mm}$ 时,样机 walk 步态爬坡截图(1 个步态周期).图 10 所示为对应的 LF 足端在斜坡上全局参考坐标系 xoz 平面的轨迹.图 11 中实线为对应的躯干形心 z 轴轨迹;虚线为 $\beta_s=20^\circ$ 、 $\beta_b=13^\circ$ 时形心 z 轴轨迹.

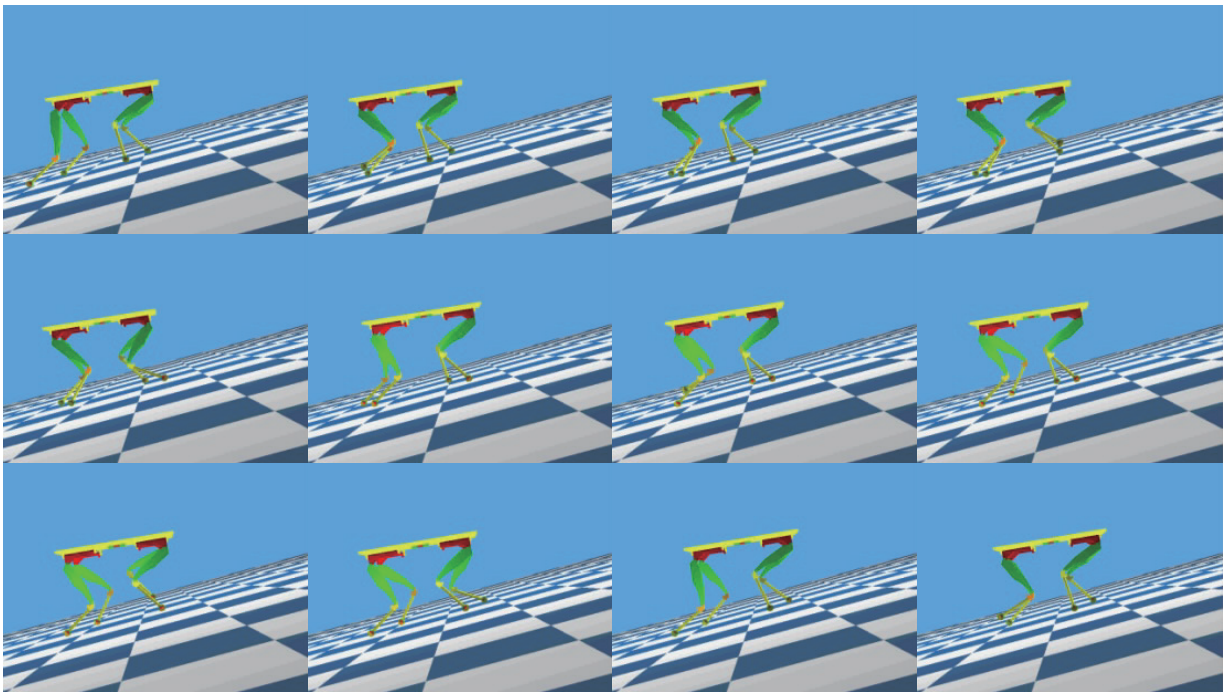


图 9 四足机器人 walk 步态斜坡运动
Fig. 9 The quadruped robot walking on slope in a gait period

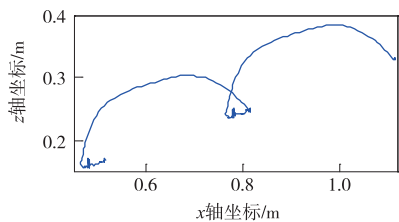


图 10 全局参考坐标系下 LF 足端轨迹
Fig. 10 Foot trajectory of LF in word coordinates

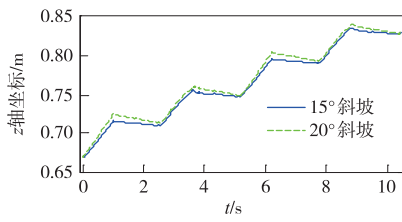


图 11 躯干形心 z 轴运动轨迹
Fig. 11 Centre body motion trail

5 结 论

① 分析了四足机器人稳定行走条件,提出了 walk 步态行进过程中,在次优支撑三角形中求最优稳定点的方法;

② 针对斜坡地形这一典型性非平坦地形,提出了通过控制支撑点和腿长的方式控制躯干角度,使四足机器人在运动空间和行进稳定两个方面获得最大的综合性能;

③ 为适应斜坡地形,减少摆动腿着地时的冲击,对零冲击足端规划方法做了改进.

试验结果表明试验样机在所提算法控制下能够在不同坡度环境中稳定持续行走,证明了方法的可行性和有效性,说明该算法有一定的实用价值.但是,由于足端结构设计和 Webots 软件中摩擦模型的缺陷等问题,致使机器人在行走过程中存在向后溜的问题,如图 11 所示.因此,后续研究将针对机器人上坡过程中向后溜问题和连续坡度变化环境的自适应行走及抗干扰等方面展开,以提高机器人的智能化水平.

参考文献:

- [1] Wu Q, Liu C, Zhang J, et al. Survey of locomotion control of legged robots inspired by biological concept [J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2009, 52(10): 1715 - 1729.
- [2] 张秀丽. 四足机器人节律运动及环境适应性的生物控制研究[D]. 北京:清华大学, 2004.
Zhang Xiuli. Biological-inspired rhythmic motion & environmental adaptability for quadruped robot [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. (in Chinese)
- [3] 曾翔宇. 基于 CPG 的四足仿生机器人复杂地形下运动控制研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2011.
Zeng Xiangyu. CPG based motion control of a quadruped robot walking on rough terrain [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [4] Kimura H, Fukuoka Y, Cohen A H. Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on natural ground based on biological concepts [J]. The International Journal of Robotics Research, 2007, 26(5): 475 - 490.

- [5] 张楫, 赵明国, 董浩. 基于圆弧模型的四足机器人步态规划[J]. 机器人, 2006, 28(5): 536 - 539.
Zhang Ji, Zhao Mingguo, Dong Hao. Gait planning of four-legged robot based on arch-shaped model [J]. Robot, 2006, 28(5): 536 - 539. (in Chinese)
- [6] 许涛, 陈启军. 四腿机器人步态参数自动进化研究与实现[J]. 机器人, 2009, 31(1): 72 - 76, 81.
Xu Tao, Chen Qijun. Research and implementation of automatic gait evolution for 4-legged robot [J]. Robot, 2009, 31(1): 72 - 76, 81. (in Chinese)
- [7] Kohl N, Stone P. Policy gradient reinforcement learning for fast quadrupedal locomotion [C] // Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 2619 - 2624.
- [8] 王立鹏, 王军政, 汪首坤, 等. 基于足端轨迹规划算法的液压四足机器人步态控制策略[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 39 - 44.
Wang Lipeng, Wang Junzheng, Wang Shoukun, et al. Strategy of foot trajectory generation for hydraulic quadruped robots gait planning [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 39 - 44. (in Chinese)
- [9] 徐凯, 陈小平. 一种有腿机器人步态轨迹生成算法[J]. 小型微型计算机系统, 2008, 29(5): 854 - 858.
Xu Kai, Chen Xiaoping. Strategy of foot trajectory generation for hydraulic quadruped robots gait planning [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2008, 29(5): 854 - 858. (in Chinese)
- [10] Vukobratović M, Stepanenko J. On the stability of anthropomorphic systems [J]. Mathematical Biosciences, 1972, 15(1 - 2): 1 - 37.
- [11] Tsujita K, Tsuchiya K, Onat A. Adaptive gait pattern control of a quadruped locomotion robot [C] // Proceedings of RSJ/IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2001: 2318 - 25.
- [12] Michel O. Cyberbotics Ltd. Webots: professional mobile robot simulation [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2004, 1(1): 39 - 42.

(责任编辑:李兵)