

# 四足机器人坡面运动时的姿态调整技术

韩宝玲<sup>1</sup>, 贾燕<sup>1</sup>, 李华师<sup>1</sup>, 罗庆生<sup>2</sup>, 周晨阳<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081)

**摘要:** 提出了一种四足机器人对脚小跑步态下的坡面运动姿态调整策略. 采用复合摆线对机器人足端轨迹进行规划, 以减小足端在换相点处与地面间的瞬时冲击; 以机器人质心在斜面上的落点到支撑线的距离为判据进行四足机器人坡面运动稳定性分析, 得到其姿态调整的确切值. 在 Adams 中建立了四足机器人的虚拟样机模型并进行了仿真试验, 试验结果证实所提出的姿态调整策略对提高四足机器人坡面运动稳定性有效.

**关键词:** 四足机器人; 坡面运动; 姿态调整; 对角小跑步态

**中图分类号:** TP 242; Q 811. 211

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-0645(2016)03-0242-05

**DOI:** 10.15918/j.tbit1001-0645.2016.03.005

## Posture Adjustment for Quadruped Robot Trotting on a Slope

HAN Bao-ling<sup>1</sup>, JIA Yan<sup>1</sup>, LI Hua-shi<sup>1</sup>, LUO Qing-sheng<sup>2</sup>, ZHOU Chen-yang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** A control strategy was proposed to ameliorate the trotting movement of quadruped robots on a slope. A compound cycloid line was adopted in this strategy to track the trajectory of the robot so that the instant impact on the feet of quadruped robot at phase change points could be reduced. Certain values of posture adjustment could be acquired according to stability analysis by using the distance between the projective point of the center of mass (COM) on the slope and supporting line as the stability margin. The simulation results from the virtual prototype model in ADAMS show that the posture control strategy proposed in this paper is reasonable, feasible and effective in terms of improving the motion stability of the quadruped robots on a slope.

**Key words:** quadruped robot; slope movement; posture adjustment; trot on the cross

足部的巧妙设计和多足的协调运动使得足式机器人对于复杂地形有着良好的适应性, 这一特性是轮式机器人、履带式机器人或者轮履结合式机器人所不具备的<sup>[1]</sup>. 坡面是自然环境中最为常见的地形之一. 与平地行进时的情况不同, 四足机器人在坡面运动时足端容易打滑, 机器人的稳定性大幅降低, 其落足点计算、腿部轨迹和机器人位姿控制更加困难<sup>[2]</sup>. 自然界中的实际情况是足类动物在坡面运动时会对其位姿进行调整, 以提高稳定性, 并降低能耗, 由此启发研究人员对机器人的位姿调整进行仿

生研究.

近年来, 研究人员在四足机器人的坡面运动方面已经进行了一定研究, 例如通过调整机器人的足端轨迹来实现对足端受力的重新分配; 根据动物在坡面运动时会令下方的腿伸展而令上方的腿收缩来对机器人进行类似的控制; 或基于 NESM 稳定判据对四足机器人质心位置进行调整, 以提高机器人行进时的稳定性<sup>[4-6]</sup>; 但目前现有的研究成果对可以实现机器人中高速运动的对角小跑步态所对应的坡面运动的稳定性分析较少, 多集中在静稳定步态方

收稿日期: 2014-07-16

作者简介: 韩宝玲(1957—), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: hanbl@bit.edu.cn.

通信作者: 贾燕(1991—), 女, 博士生, E-mail: tictac0324@163.com.

面,没有给出机器人位姿调整确定值,理论指导性较差。

文中拟探求一种针对四足机器人采用对角小跑步态时的坡面运动控制策略,通过对机器人足端轨迹进行合理规划,使四足机器人在坡面运动中所受的落地冲击较小,且以四足机器人质心位置在斜面上的投影到支撑足连线的距离作为判据,对四足机器人的稳定性进行分析,以求得到较为理想的四足机器人机体位姿,再对机器人的位姿进行调整,使其足端受力分配更为均匀,进而减小四足机器人在运动中的打滑。文中对文献[4]中提出的四足机器人位姿调整策略的一些问题进行讨论和改进。

## 1 四足机器人的机械模型

图1所示为一款液压驱动型四足机器人,其整体结构采用前肘后膝式关节配置,左后腿为1腿,右后腿为2腿,右前腿为3腿,左前腿为4腿。腿部采用两腿节形式,每条腿具有髋部侧摆关节、髋部前摆关节和膝关节三个自由度。

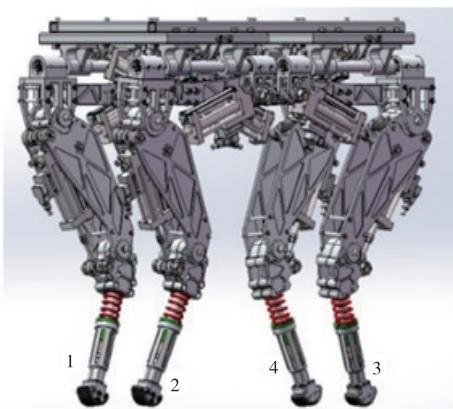


图1 四足机器人机械模型  
Fig. 1 The mechanical model of quadruped robot

## 2 四足机器人的足端轨迹规划

在对机器人进行步态规划时,机器人足端点轨迹的选择对机器人的运动特性有着重要影响<sup>[7]</sup>。四足机器人要想实现平滑、稳定、有效的坡面运动,其足端轨迹应满足如下条件:①在离地和落地的瞬间,足端速度、加速度均为0且连续,以使其与地面之间的冲击尽可能小;②对于负荷因子为0.5的对角小跑步态,在支撑相与摆动转换的瞬间,四条腿同时着地,此时四腿足端应位于同一平面内,以保证换相平稳;③前后腿步长应保持一致。通过分析发

现,文献[4]中试图通过直接改变四足机器人髋关节平衡位置的方式以实现对机器人的位姿调节,则不能满足以上三个条件。

四足机器人在坡面运动时,机体位姿的调整主要是对两个角度的调节,一是在支撑相中点时,支撑足足端与髋关节的连线同过髋关节垂直于斜面的连线之间的夹角 $\tau$ ;二是机身与水平面间的夹角 $\alpha$ 。因此在对四足机器人足端轨迹和机身质心轨迹进行规划时,应对这两个角度进行分析。

记四足机器人步长为 $S_0$ ,斜面倾角为 $\epsilon$ ,机身长度为 $2l_n$ 。在换相点位置,机器人的状态如图2所示。由于在坡面运动中,希望保持机器人机身质心与斜面间的距离不变,因此 $CG=H$ (机器人机体质心到斜面的距离), $AF$ 与 $A'F'$ 分别为前后腿支撑相中点处髋关节与足端间的连线, $AE$ 、 $A'E'$ 垂直于斜面, $AB$ 、 $A'B'$ 分别为1、3腿从支撑相到摆动相的换相点位置, $AD$ 、 $A'D'$ 分别为2、4腿从摆动相到支撑相的换相点位置。足端轨迹如图3所示。

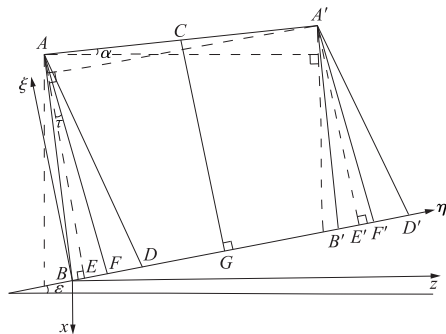


图2 换相点位置机器人姿态  
Fig. 2 The robot's posture at phase change points

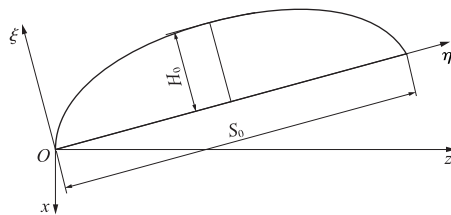


图3  $O\eta\xi\chi$  系中的足端轨迹  
Fig. 3 The foot trajectory in  $O\eta\xi\chi$

因 $l_{BD}=l_{B'D'}=S_0/2$ , $l_{BF}=l_{B'F'}=S_0/4$ ,故可计算出:

$$l_{BG} = \frac{S_0}{4} - [H + l_n \sin(-\alpha)] \tan \tau + l_n \cos(\epsilon - \alpha), \quad (1)$$

$$l_{BB'} = 2l_n \cos(\epsilon - \alpha) - 2l_n \sin(\epsilon - \alpha) \tan \tau. \quad (2)$$

文中采用复合摆线作为四足机器人的足端轨

迹<sup>[8]</sup>,该摆线可以使足端在换相点处的速度和加速度均为 0. 在  $O\eta\xi\chi$  系中(见图 3)对足端摆动相轨迹

$$\eta_1 = \begin{cases} S_0 \left[ \frac{(t-kT)}{T_s} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T_s}(t-kT)\right) \right] + kS_0 & kT \leq t < T_s + kT \\ (k+1)S_0 & T_s + kT \leq t \leq T + kT \end{cases} \quad (3)$$

$$\xi_1 = \begin{cases} \frac{H_0}{4+\pi} \left[ \frac{4\pi}{T_s}(t-kT) - \sin\left(\frac{4\pi}{T_s}(t-kT)\right) \right] & kT \leq t < \frac{T_s}{4} + kT \\ \frac{4H_0}{4+\pi} \left[ \sin\left(\frac{2\pi}{T_s}(t-kT) - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{\pi}{4} \right] & \frac{T_s}{4} + kT \leq t < \frac{3T_s}{4} + kT \\ \frac{4\pi H_0}{4+\pi} \left\{ \left(1 - \frac{t-kT}{T_s}\right) - \frac{1}{4\pi} \sin\left[4\pi\left(1 - \frac{t-kT}{T_s}\right)\right] \right\} & \frac{3T_s}{4} + kT \leq t < T_s + kT \\ 0 & T_s + kT \leq t \leq T + kT \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $H_0$  为足端最大离地高度;  $T$  为步行周期;  $T_s$  为一个摆动相持续时间.

使四足机器人的机身质心轨迹沿斜面匀速向上,在  $O\eta\xi\chi$  中的轨迹为

$$\eta_{c0} = l_{BG} + vt, \quad (5)$$

$$\xi_{c0} = H. \quad (6)$$

$b_0$  为运动开始时机身质心在  $O\eta\xi\chi$  系中的  $\eta$  坐标,将各轨迹转换到地面坐标系中,可有

$$x = -\eta \sin \varepsilon - \xi \cos \varepsilon, \quad (7)$$

$$z = \eta \cos \varepsilon - \xi \sin \varepsilon. \quad (8)$$

根据足端轨迹以及机身质心轨迹进行逆运动学分析,可以计算出四足机器人各关节的控制曲线.

### 3 四足机器人的机体姿态调整

机器人在运动过程中,质心与支撑线之间的距离直接影响了其运动稳定性. 文中采用四足机器人在步行过程中的整机质心(考虑腿节的质量)在斜面上的投影到两落足点连线的距离平均值  $d$  作为稳定性判据,并据此对四足机器人的坡面运动进行分析. 首先保持机器人机身与斜面平行,即  $\beta = -\alpha = -\varepsilon$ ,寻求  $\tau$  与  $\varepsilon$  间的关系,以使得在运动过程中  $d$  最小. 令  $\tau$  在  $[-\pi/4, \pi/4]$  间变化,不同  $\varepsilon$  下的计算结果如图 4 所示. 从图中可以知道,  $d$  取最小值时,  $\tau$  与  $-\varepsilon$  间均相差不到  $1^\circ$ ,因此可以认为,当  $\tau = -\varepsilon$  时,  $d$  最小,机器人运动最稳定.

根据文献[5],  $\varepsilon - \alpha$  与  $\varepsilon$  间成线性关系即可使四足机器人实现稳定的坡面运动,因此本文中引入参数  $k$ ,使  $\varepsilon - \nu = k\varepsilon$  成立,寻求  $\nu$  与  $\varepsilon$  间的关系也就是寻求  $k$  与  $\varepsilon$  间的关系. 令  $\tau = -\varepsilon$ ,  $k$  在  $[-15, 15]$  间变化,  $\varepsilon$  在  $[-\pi/6, \pi/6]$  中每间隔  $5^\circ$  取值时的计算结果如图 5 所示.

图中曲线从上到下分别是坡面为  $-\pi/6, \pi/$

进行规划,由于各足端轨迹之间存在固定的相位差和距离差,因此以 1 腿为例对足端轨迹进行说明.

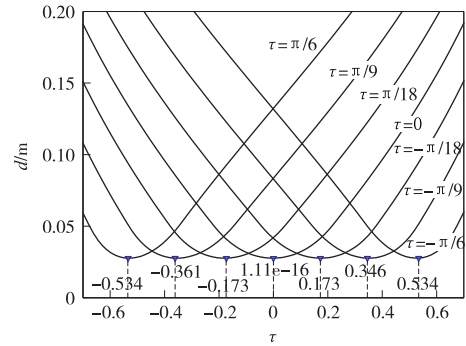


图 4 不同坡度下  $\tau$  与  $d$  的关系

Fig. 4 Changing trend of  $d$  following the change of  $\tau$

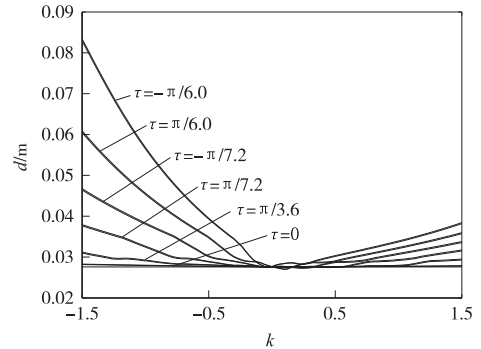


图 5 不同坡度下  $k$  与  $d$  的关系

Fig. 5 Changing trend of  $d$  following the change of  $k$

6,  $-\pi/72, \pi/72, \dots, -\pi/36, \pi/36, 0$  下的情况. 从图中可以看出,  $d$  取最小值集中在  $k \in [0, 0.4]$  内, 并且在此范围内  $d$  波动不超过 3 mm. 因此  $k$  对四足机器人坡面运动稳定性影响不大, 本文取  $k=0$ .

### 4 仿真结果与分析

通过位姿调整可使四足机器人更好地完成坡面运动,其原因主要体现在以下几个方面:① 使支撑足受力分配尽可能均匀合理,且减小了与地面间的冲击,使支撑足在运动过程中的打滑减小;② 使机

器人在运动过程中失稳趋势减小,这在一定程度上通过质心在运动过程中的波动减小反映出来;③使机器人在运动过程中消耗的能量减小.由于本文不考虑能量问题,因此主要对四足机器人在3种姿态下的上述前两个方面进行分析比较.

在Adams中建立了四足机器人的虚拟样机模型,并在坡面倾角为 $\pm\pi/10$ 的情况进行了仿真试验,得到了四足机器人在3种方式下的仿真结果分别如图6~图8所示.

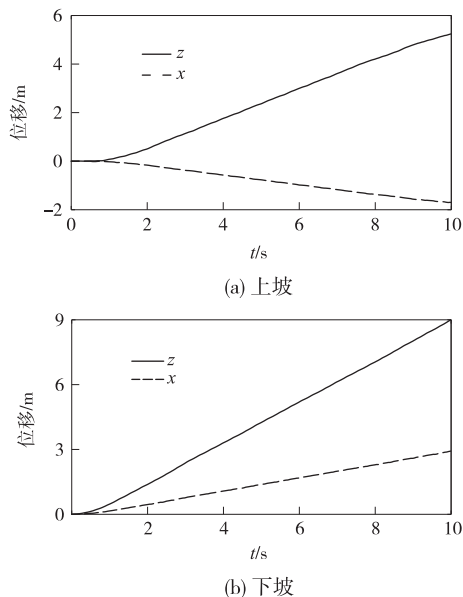


图6 无姿态调整下仿真结果  
Fig. 6 Simulation results without posture adjustment

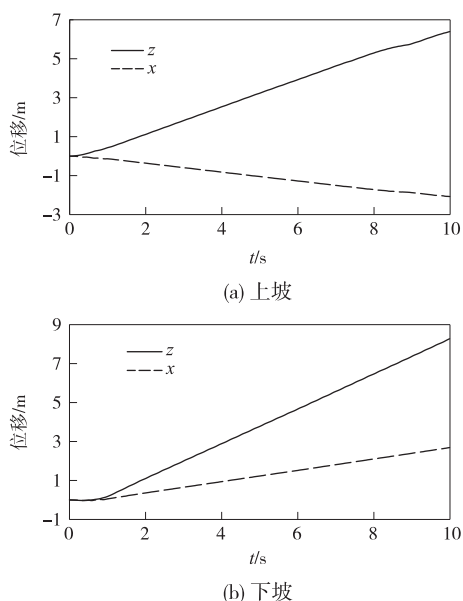


图7 按本文所述方法进行姿势调节后的仿真结果  
Fig. 7 Simulation results with posture adjustment using the method this paper mentioned

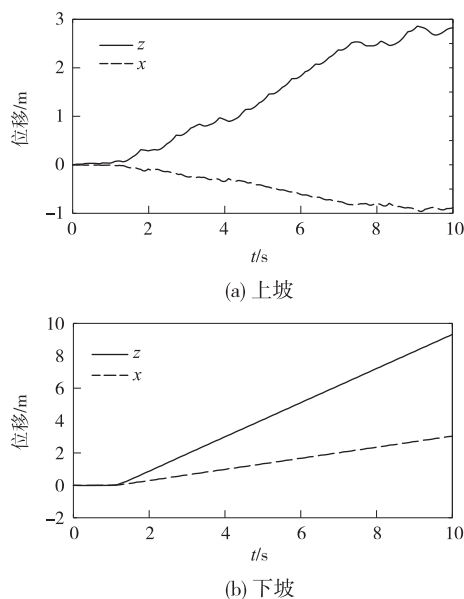


图8 通过直接改变平衡位置的方法进行调节后的仿真结果  
Fig. 8 Simulation results with posture adjustment using the method which changes the equilibrium position directly

从图6可以看出,上坡时,机器人质心10 s内在 $x$ 方向上的位移为5.24 m,下坡时,对应的位移为8.994 2 m.由于采用足端轨迹规划的方法,位姿在没有调整时,换相点处足端与地面间的冲击较小,质心沿斜面匀速向上,因此质心波动不明显.

从图7可以看出,上坡时,机器人质心10 s内在 $x$ 方向上的位移为6.40 m,下坡时,对应的位移为8.27 m.进行位姿调整后,由于质心在斜面上的落点到支撑线的距离减小,足端受力分配更合理,打滑现象得到明显改善.此外,调整后仍能保持足端在换相点处受到小的冲击,质心沿斜面匀速向上运动,质心波动不明显.

从图8可以看出,采用直接改变膝髌关节控制信号平衡位置方法,上坡时,机器人质心10 s内在 $x$ 方向上的位移为2.82 m,下坡时,对应的位移为9.32 m.由于直接对机器人平衡位置进行改变,使之前在足端轨迹规划中换相点速度和加速度为0,机身质心沿斜面匀速运动的情况遭到了破坏,机器人在换相点位置4条腿不能位于同一平面内(见图9),前后腿步长不同,与地面冲击严重,失稳趋势增大,机器人质心在运动过程中有很大的波动.另外由于冲击和足端轨迹不合理等原因,落足点不能始终与坡面有效接触,打滑现象与不进行姿态调整相比更加严重.

通过对比分析可以发现,减小四足机器人足端

与地面间的冲击,对于机器人能否顺利实现坡面运动非常重要。

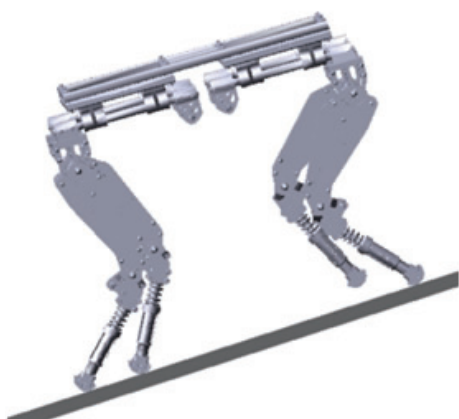


图9 使用改变平衡位置的姿势调节方法后机器人在换相点处的状态

Fig. 9 The robot's posture at phase change point after changing the equilibrium position

## 5 结 论

采用使足端在换相点处的速度和加速度均为0的复合摆线作为四足机器人的足端轨迹,以四足机器人整机质心在斜面上的投影到两支撑足连线间的距离作为稳定性判据,得到了四足机器人在对角小跑步态下,实现可靠、稳定、顺畅坡面运动的姿态调整确定值。通过在ADAMS中建立虚拟样机模型,进行了仿真试验,与不进行姿态调整、直接改变关节控制信号平衡位置的方式完成姿态调整的情形进行了比较,仿真结果证实,本文提出的姿态调整策略既可以有效抑制四足机器人坡面运动中的打滑现象,又可以保持在换相点处足端与地面冲击较小,质心波动不明显等优点,对改善四足机器人的坡面运动具有突出的理论指导意义和优异的实际工作效果。

### 参考文献:

- [1] 赵佳馨,罗庆生. 链节式八足机器人的运动分析及步态规划[J]. 机械设计与制造, 2013, 10: 171 - 174.
- [2] Zhao Jiaxin, Luo Qingsheng. The analysis of kinematics and gait planning of a segmental appendage octopod robot [J]. Machinery Design & Manufacture, 2013, 10: 171 - 174. (in Chinese)
- [3] Wook Chungjae, Lee I H. Posture stabilization strategy for a trotting point-foot quadruped robot [J]. Intell Robot Syst, 2013, 72: 325 - 341.
- [4] Fukuoka Y, Kimura H. Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain based on biological concepts [J]. The International Journal of Robotics Research, 2003, 22(3 - 4): 187 - 202.
- [5] 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.
- [6] Zhang Xiuli. Biological-inspired rhythmic motion & environmental adaptability for quadruped robot [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. (in Chinese)
- [7] 孟健, 李贻斌. 连续不规则台阶环境四足机器人步态规划与控制[J]. 机器人, 2015, 37(1): 85 - 93.
- [8] Meng Jian, Li Yibin. Gait planning and control of quadruped robots in continuous irregular steps environment [J]. Robot, 2015, 37(1): 85 - 93. (in Chinese)
- [9] 孟健, 李贻斌. 四足机器人对角小跑步态全方位移动控制方法及其实现[J]. 机器人, 2015, 37(1): 74 - 84.
- [10] Meng Jian, Li Yibin. Control method and its implementation of quadruped robot in omni-directional trotting gait [J]. Robot, 2015, 37(1): 74 - 84. (in Chinese)
- [11] 闰尚彬, 韩宝玲. 仿生六足步行机器人步态轨迹的研究与仿真[J]. 计算机仿真, 2007, 24(10): 156 - 160.
- [12] Run Shangbin, Han Baoling. Research and simulation of the walking track of bionic hexapod walking robot [J]. Computer Simulation, 2007, 24(10): 156 - 160. (in Chinese)
- [13] 雷静桃, 高峰. 六足步行机足端轨迹规划及仿真研究[J]. 机械设计与研究, 2006, 22(4): 42 - 45.
- [14] Lei Jingtao, Gao Feng. Foot trajectory planning and simulation for a hexapod robot [J]. Machine Design & Research, 2006, 22(4): 42 - 45. (in Chinese)

(责任编辑: 孙竹凤)