

# 面向球型障碍物的六足机器人越障步态研究

周永亮, 沈伟平, 高建华

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

**摘要:** 以多自由度六足机器人为研究对象, 针对球型障碍物的模型特点, 研究其爬越球型障碍物时的行走步态, 以找到一种适合的越障步态并分析越障时的稳定性。在仿真软件中建立虚拟样机模型, 动态模拟对球型障碍物的越障运动。模拟结果表明: 在该行走步态下控制的六足机器人能平稳地爬越球型障碍物。

**关键词:** 六足机器人; 球型障碍物; 越障步态; 仿真

**中图分类号:** TP242      **文献标识码:** A

## 0 引言

机器人所处环境是多变及不可预测的, 且所遇到的障碍物也是复杂多样的。目前多足步行机器人在遇到障碍物时首先采用的都是越障方式跨越障碍物<sup>[1]</sup>, 但目前对越障方面的研究较少, 越障步态研究相对更少。国内外六足机器人越障研究主要有上海交通大学研制的一种微型六足机器人, 实验证明其能够爬越某些不规则障碍物<sup>[2]</sup>; 加拿大麦吉尔大学智能机器人中心研制了六足机器人 Rhex 能爬越如岩石等一些较大的障碍物<sup>[3]</sup>; 加州大学电气工程系制作的小型六足机器人 DASH 在较大倾斜度的斜坡上能平稳行走<sup>[4]</sup>。对六足机器人越障步态的研究, 为实现六足机器人能更好地爬越障碍物, 提高越障稳定性具有较重要的意义。

球型障碍物模型是包含了多种障碍物的理想化模型, 实现六足机器人对球型障碍物越障研究, 对提高多足步行机器人越障能力有重要帮助, 能够提高多足步行机器人在未知环境下的适应能力。本研究主要是对六足机器人爬越球型障碍物过程中需使用的越障步态进行规划以及对越障过程稳定性进行分析, 从而实现球型障碍物的平稳越障。

## 1 越障步态规划

本文中六足机器人仿真模型机体长 74 mm, 球形障碍物模型为直径 90 mm 的球体, 因此, 对六足机器人来说该球体模型属于较大类型的障碍物, 需要找到一种较为合适的越障步态来完成越障过程。六足机器人在直行过程中常采用步态为三角步态行走方式<sup>[5]</sup>。三角运动步态指六足机器人在行走过程中任何时刻都只有 3 条足支撑地面, 另外 3 条足处于摆动状态。这种步态下足每交替支撑一次, 机体就前进一个步长。所以, 三角步态是直线行走中最快的步态。但六足机器人在对球型障碍物越障过程中机体会发生较大倾斜, 从而很难保证机体重心落在 3 条站立足所构成的稳定域内。所以, 三角步态并不适合这种越障过程。

为了保证越障过程的稳定性, 采用了多边形步态<sup>[6]</sup>, 在这种步态下, 六足机器人在行走过程中有不少于 4 条足处于支撑状态, 并在考虑越障效率前提下, 规划了一组适合越障的改进型多边形步态, 以保证机体在运动过程中其重心落在支撑足所构成的稳定区域内<sup>[7]</sup>, 改进后的多边形步态运动原理如图 1 所示。

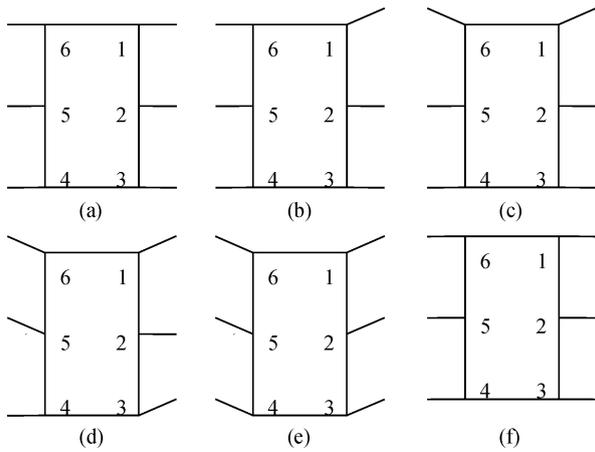


图 1 改进后的多边形步态运动示意图

首先对六足机器人的足端进行编号,如图 1 所示。图 1(a)~图 1(f)示意一个完整的步态周期。当六足机器人开始运动时,1 号足摆动,余下 2,3,4,5,6 号足处于支撑状态,保证机体重心处于余下 5 只足所构成的五边形内(图 1(b))。当 1 号足摆动结束转为支撑状态时,6 号足开始摆动,机体重心落在 1,2,3,4,5 号足所构成的五边形区域内(图 1(c))。6 号足摆动结束时,3 号足和 5 号足同时摆动,余下 4 足处于支撑状态,机体重心落在 1,2,4,6 号足构成的四边形区域内(图 1(d))。当 3,5 号足摆动结束后,2 号足和 4 号足同时摆动,此时机体重心在 1,3,5,6 号足组成的四边形形内(图 1(e))。等 2,4 号足完成摆动后,机体发生前移和倾斜,机体运动结束后,机器人完成一个步态周期(图 1(f))。后面接着从第一步开始,循环以上 6 个过程,从而完成整个越障过程。

## 2 越障过程稳定性分析

机器人运动过程中首先要保证的是机器人运动的稳定<sup>[8]</sup>。对于采用上面所规划的步态来爬越球型障碍物的六足步行机器人来说,在任何时候都需要 4~5 条腿来支撑机体,并且由这些腿的立足点所构成的多边形区域必须包围机器人重心的垂直投影。六足机器人步行时,这个多边形区域在不断的变化,但只要六足机器人重心的垂直投影始终落在这个交替变化的区域内,那么六足机器人的运动就是稳定的<sup>[9]</sup>。图 2 表示六足机器人的重心  $C$  落在 5 条支撑腿的立足点所构成的五边形区域内,此时的机器人的状态是稳定的;图 3 表示六足机器人重心  $C$  的垂直投影落在机器人 4 条腿的立足点所构成的四边形区域外,从而不具备静态稳定性,这可能会造成机器人在越障过程中机体出现翻转的情况。

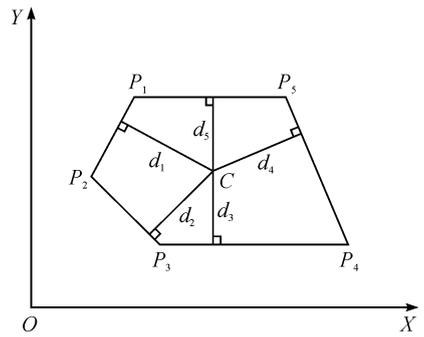


图 2 多足步行机器人静态稳定性几何描述

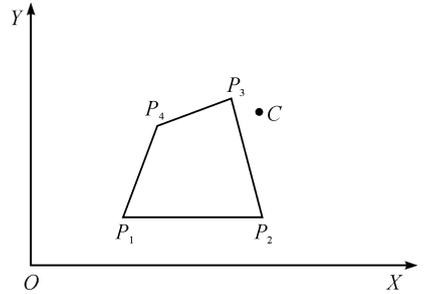


图 3 机器人处于不稳定状态

图 4 所示为六足机器人越障过程中的某一时刻,图中  $P_1(a_1, b_1)$ 、 $P_2(a_2, b_2)$ 、 $P_3(a_3, b_3)$ 、 $P_4(a_4, b_4)$  表示机器人的 4 条支撑腿的立足点在水平面上的投影点坐标,机器人重心点为  $O$ , $d_1, d_2, d_3, d_4$  为机器人重心点  $O$  到各支撑边的垂直距离, $P'_1, P'_2, P'_3, P'_4$  为各自的垂足。

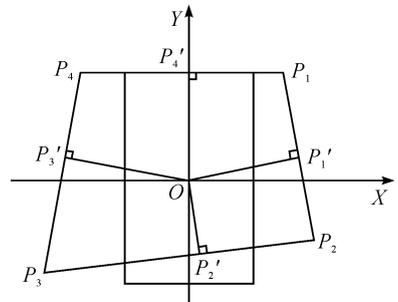


图 4 改进后多边形步态下六足机器人的稳定裕度计算

由图 4 可知,直线  $P_1P_2$  的斜率  $K_{P_1P_2} = \frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1}$ , 所以直线  $OP'_1$  的斜率  $K_{OP'_1} = \frac{a_1 - a_2}{b_2 - b_1}$ , 得到两条直线方程:

$$y - b_1 = K_{P_1P_2} (x - a_1) \quad (1)$$

$$y = K_{OP'_1} x \quad (2)$$

由方程(1)和方程(2)可解出两直线交点  $P'_1$  的坐标:

$$\left( \frac{(b_2 - b_1)(a_1 b_2 - a_2 b_1)}{l_1^2}, \frac{(a_2 - a_1)(a_1 b_2 - a_2 b_1)}{l_1^2} \right)$$

其中  $l_1 = \sqrt{(b_2 - b_1)^2 + (a_2 - a_1)^2}$  表示线段

$P_1P_2$  的长度。

若令  $P'_1$  为  $(m, n)$ , 则可得到

$$d_1 = \sqrt{m^2 + n^2}$$

同理可求出  $d_2, d_3, d_4$ , 得到六足机器人在越障过程的最小稳定裕度<sup>[10]</sup>:

$$d_m = \min(d_1, d_2, d_3, d_4)$$

以六足机器人越障过程的某一时刻求解其稳定裕度, 如图5所示, 图中腿1处于摆动状态, 余下5条腿支撑机体。在图5中用  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$  来表示六足机器人立足点2到立足点6在平面上的投影点,  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$  为机体重心到  $P_1 \sim P_5$  所组成的五边形各边界  $L_1 \sim L_5$  的垂直距离。通过仿真软件可得到各立足点的平面投影坐标分别为  $P_1(-6, -30)$ 、 $P_2(-30, -37)$ 、 $P_3(-30, 37)$ 、 $P_4(-6, 30)$ 、 $P_5(30, 30)$ , 其中  $X$  轴表示机器人前进的方向。

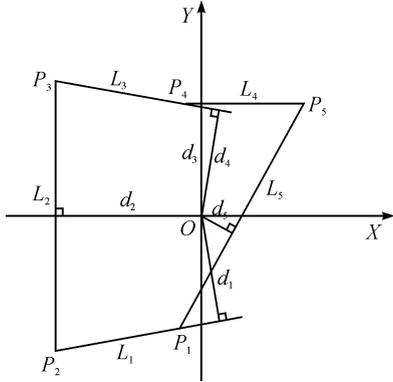


图5 改进后多边形步态下六足机器人的稳定裕度计算

以机体重心  $O$  到  $L_5$  的距离  $d_5$  为例, 由  $P_1, P_5$  点的坐标得到  $L_5$  的直线方程为:

$$y = \frac{5}{3}x - 20 \quad (3)$$

令在  $L_5$  上的垂足为  $Q_5(x_5, y_5)$ , 则  $K_{OQ_5} = -\frac{3}{5}$ , 所以直线  $OQ_5$  的方程为:

$$y = -\frac{3}{5}x \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可解得  $Q_5(8.8, -5.3)$ , 得到  $d_5$  为 10.3 mm, 同理可得到  $d_1 \sim d_4$  的数值。最终得到六足机器人此时的稳定裕度:

$$d = (27, 30, 30.3, 30, 10.3)$$

可以看出此时机器人的最小稳定裕度:

$$d_m = \min(d_1, d_2, d_3, d_4, d_5) = 10.3 \text{ mm}$$

计算结果表明六足机器人此时是稳定。六足机器人在越障过程中机体重心位置是不断变化的, 如图6所示, 图中  $X$  轴表示机器人前进距离,  $Y$  轴表示机体高度位置变化。按照上述方法可计算六足机器

人在爬越球型障碍物过程中的任一时刻的运动稳定裕度, 可得到如图7所示的爬越球型障碍物的稳定裕度曲线图, 图中  $d$  为越障过程的稳定量。对比图8可以看出, 采用这种多边形步态越障的六足机器人比采用其他一些步态越障相比, 明显具有更好的稳定性能。

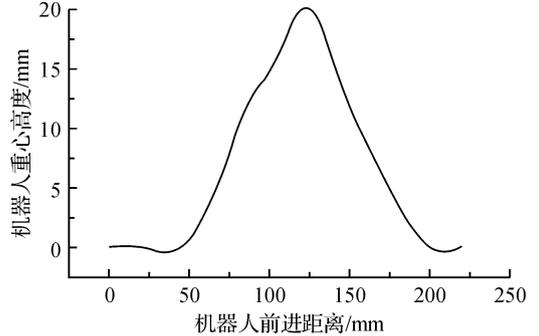


图6 六足机器人机体重心轨迹曲线

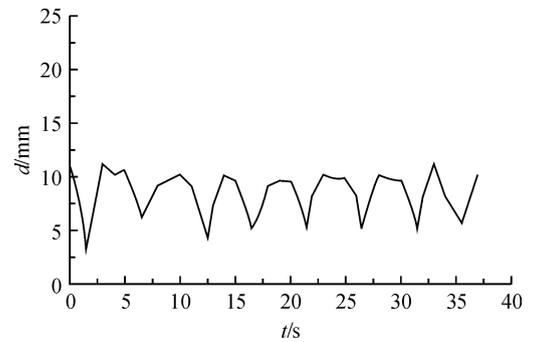


图7 六足步行机器人爬越球形障碍物的稳定裕度图

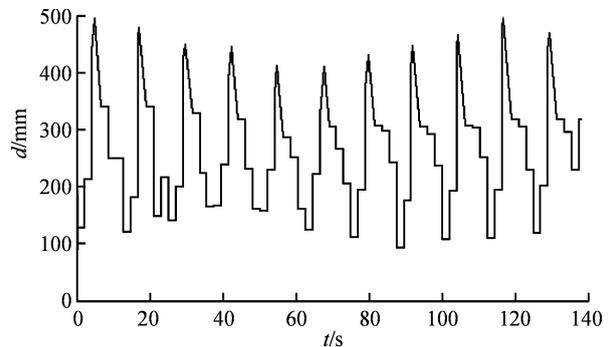


图8 四边形步态越障稳定裕度曲线

### 3 六足机器人的越障步态仿真

根据研究的需要, 在仿真软件中建立了六足机器人虚拟样机模型及球型障碍物模型, 该机器人单腿具有6个自由度, 每条腿的足端具有3个自由度, 能够调节足端的姿态, 整个机器人系统具有42个自由度, 在运动过程中具有很好的灵活性和柔韧性, 增强了机器人越障的能力。通过对该机器人的建模和采用前面所设计的运动步态, 对机器人进行编程, 实现在改进后的多边形步态下六足机器人对球型障碍

物的越障,部分越障结果如图9、图10所示。

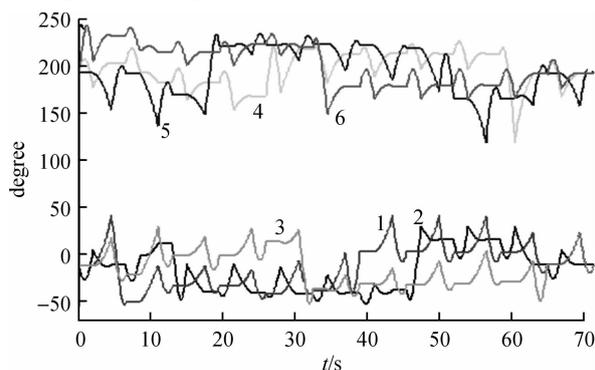


图9 六足机器人6条腿的第三关节角度曲线

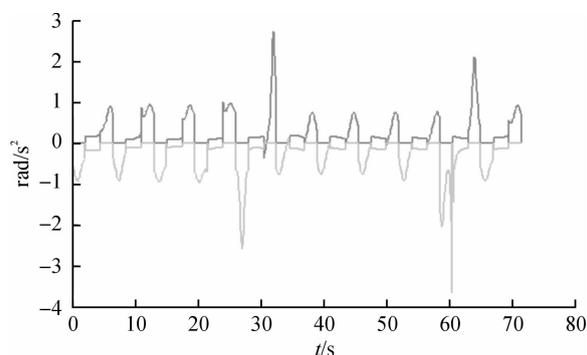


图10 3号腿、4号腿的第三关节角加速度曲线

仿真结果显示在采用改进后的多边形步态的六足机器人在越障过程中机器人在越上障碍物和爬下障碍物时机体关节运动变化较大,其他时刻机身运动较为平滑,机身抖动微小,整个越障过程具有良好的稳定性能。

## 4 结论

针对球型障碍物提出了一种适合六足机器人越障的改进型多边形步态,经仿真软件验证,采用这种步态的六足机器人在越障过程中具有良好的稳定性。

由于球型障碍物自身特点,属于较难爬越的障碍物,所以,采用这种步态运动的六足机器人具有较强的地形适应能力。但由于六足机器人步态组合方式是多种多样的,因此,要找到更好的爬越球型障碍物的步态,需要更深入的研究与实验。

## 参考文献:

- [1] Hazon N, Kaminka G A. On redundancy efficiency and robustness in coverage for multiple robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, 56: 1102-1114.
- [2] 徐小云, 颜国正, 丁国清, 等. 六足移动式微型仿生机器人的研究[J]. *机器人*, 2002(5): 81-83.
- [3] Moore E Z, Campbell D. Reliable stair climbing in the simple hexapod 'RHex'[J]. *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2002, 12: 2222-2227.
- [4] Birkmeyer P, Peterson K. DASH: a dynamic 16 g hexapedal robot[J]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009, 10: 2683-2689.
- [5] 徐小云, 颜国正, 丁国清, 等. 微型六足仿生机器人及其三角步态的研究[J]. *光学精密工程*. 2002, 10(4): 392-396.
- [6] 叶献伟, 陈 樊, 高建华. 六足仿生机器人越障步态方法研究[J]. *浙江理工大学学报*, 2008, 25(5): 611-614.
- [7] 王新杰. 多足步行机器人运动及力规划研究[J]. *华中科技大学学报*, 2005, 16(5): 211-215.
- [8] Mcghee R B. Some finite state aspects of legged locomotion[J]. *Mathematical Biosciences*, 1968, 2(1): 67-84.
- [9] Chen Xuedong. A new method on judgment of static stability for the quadruped robot[J]. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 1999, 19: 953-964.
- [10] 蒋新松. 机器人学导论[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1993: 29-37.

## Study on Gait of Obstacle-Crossing of Hexapod Robot to Spherical Barriers

ZHOU Yong-liang, SHEN Wei-ping, GAO Jian-hua

(School of Machinery & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** For the model characteristics of multi-DOF hexapod robot, a suitable obstacle-crossing gait is found by studying its walking gait of climbing over spherical barriers, and analysis of the stability during the walking process. In the simulation software, a virtual prototype model is built to imitate the obstacle-navigation movement over spherical barriers. The results show that the hexapod robot can climb over spherical obstacles stably under the control of this walking gait.

**Key words:** hexapod; spherical-barriers; obstacle-crossing gait; simulation

(责任编辑: 杨元兆)