

六足机器人横向行走步态研究

刘连蕊, 张 泽, 高建华

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘 要: 以一种新型的多自由度六足机器人机构为对象, 研究其横向行走步态, 规划一种横向行走的三角步态, 并完成了足端轨迹规划和稳定性分析。最后采用 Pro/E 和 ADAMS 等软件相结合的方式对六足机器人的样机模型进行运动学仿真与分析, 结果证实了该横向行走步态的可行性, 为接下来的物理样机实验提供了依据。

关键词: 六足步行机器人; 横向行走三角步态; 稳定性; 虚拟样机; 步态规划

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

0 引 言

近年来, 随着经济和技术的发展, 机器人的研究越来越受到人们的关注。六足机器人因其结构简单、紧凑且同时能保证机器人在步行过程中身体平稳, 步态稳定^[1]而成为机器人领域的研究热点。

在六足步行机器人的行走过程中, 最基本的是纵向直线行走, 纵向行走中的“三角步态”是大多数人采取的方法。但在越障和避障的过程中, 让六足机器人实现横向行走也具有不可取代的意义。横向行走可以提高越障和避障的效率, 并且也可以进一步提高六足机器人对于复杂地面的适应性。

1 六足机器人横向行走步态

1.1 六足机器人结构

本文所研究的机器人基本结构如图 1 和图 2 所示, 其中基节长 55.2 mm, 股节长 110 mm, 胫节长 133.2 mm, 足端长 99.5 mm, 机身宽 200 mm, 机身前后长 456 mm。现阶段, 大部分六足机器人的腿部结构都采用 3 自由度的主流设计, 但为了提高六足机器人的越障能力和对复杂地形的适应性, 本文中所设计的机器人每条腿都具有 6 个自由度。因为对于机器人手臂来说, 手臂的关节越多, 机器人就越灵巧, 能力就越强^[2]。同样, 对于六足机器人的腿部结构来说, 为了能够适应大千世界中各种各样的未知地形, 其腿部就要相当的灵巧。

1.2 六足机器人步态规划

六足机器人平地行走时一般采用“三角步态”^[3-6], 每个时刻总有 3 条腿着地, 保持了身体的平衡, 稳定裕度大。腿的每一个支撑过程使身体前进一个步长, 所以这种步态是直线行走中最快速的步态, 对于直行的机构往往采用三角步态^[7]。为了实现六足机器人的横向行走, 提高其越障和避障的效率以及对于复杂地面的适应性, 这里为其规划了一组横向行走三角步态, 如图 3 所示。

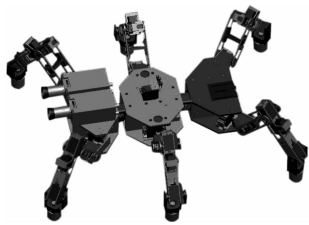


图 1 六足机器人三维模型

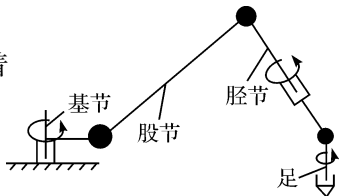


图 2 腿部自由度简图

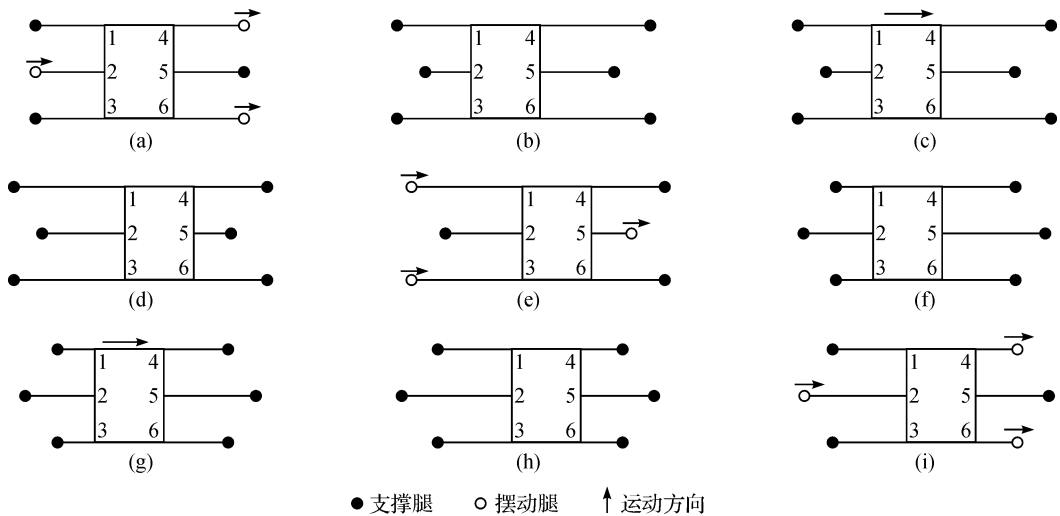


图3 六足机器人横向行走步态示意

先对机器人的6条腿编号(如图3所示)。机器人开始运动时,2、4、6号腿抬起向右侧跨步,1、3、5号腿处于支撑状态,支撑机器人的机体确保机器人的重心处于3条支撑腿所构成的三角形垂直投影面内(如图3(a)所示)。当2、4、6号腿摆动到位呈支撑状态时(如图3(b)所示),6条腿同时处于支撑状态,此时再在腿部各舵机的共同作用下机体向右侧移动(如图3(c)所示),稳定后机器人的位置状态如图3(d)所示。然后机器人的1、3、5号腿抬起准备向右移动,2、4、6号腿处于支撑状态(如图3(e)所示)。待1、3、5号腿摆动到位呈支撑状态时,机器人达到图3(f)所示状态。再在腿部各关节处舵机的共同作用下使机体向右侧移动(如图3(g)所示),最后到达图3(h)所示的状态。然后2、4、6号腿再进行运动(如图3(i)所示),使机体再次到达图3(b)所示状态。按上述步骤循环往复,即可实现六足机器人在平面上的横向行走。

上述步态是重心固定的静态步态,即在抬腿过程中机器人重心处于固定位置。如将重心移动过程和抬腿过程同时进行,则为重心随动步态。众所周知,静态步态对稳定性影响较小,这里先对静态步态进行仿真研究,以验证其可行性。

2 六足机器人横向行走三角步态的稳定性分析

多足步行机器人的静态稳定性步行是指机器人步行时不发生翻跌现象并保持机体平衡,本文中提到的步态是重心固定的静态步态,不用考虑惯性力对稳定性的影响。只要机器人在行走过程中的重心垂直投影始终被它交替变化的立足点所组成的多边形所包围,则可以说该机器人是静态稳定的^[8]。如图4所示,三角形区域表示机器人3个支撑足立足点围成的稳定区域,当机器人的重心投影位于此区域时机器人是静态稳定的,否则将导致机器人失稳。 d_1 、 d_2 、 d_3 表示机器人重心投影点距三角形各边的距离, $d_m = \min\{d_1, d_2, d_3\}$ 即为机器人行走过程中的稳定裕度。

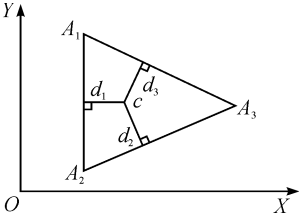


图4 多足步行机器人静态稳定性的几何描述

图5中所示 A_1 、 A_2 、 A_3 3点为某一时刻六足机器人的3个支撑足在地面上的支撑点,虚线所表示的三角形 $A_1A_2A_3$ 为3个支撑点所围成的一个支撑三角形。设定机器人在平地上行走,取机器人的重心投影点 O 为坐标原点, x 向为机器人横向行走的前进方向。 d_1 、 d_2 、 d_3 为机器人重心投影到支撑三角形各边的垂直距离, A'_1 、 A'_2 、 A'_3 分别为各自的垂足。

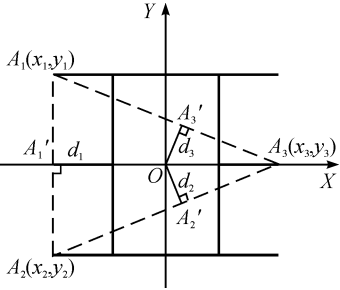


图5 三角步态稳定裕度计算

由图5中所示 A_1 、 A_2 的坐标可求出直线 A_1A_2 的斜率 $k_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$,所以直线 OA'_1 的斜率为 $k_2 = \frac{x_1 - x_2}{y_2 - y_1}$,即直线 OA'_1 的方程为: $y = \frac{x_1 - x_2}{y_2 - y_1}x$ 。由此

可得以上两直线的交点 A'_1 的坐标为: $A'_1\left(\frac{(y_2-y_1)(y_2x_1-x_2y_1)}{l_1^2},\frac{(x_1-x_2)(y_2x_1-x_2y_1)}{l_1^2}\right)$, 其中 l_1^2 表示线段 A_1A_2 长度的平方。

用上述方法即可求出六足机器人重心投影点 O 到支撑三角形三条边的距离 d_1 、 d_2 、 d_3 的值。经计算得出六足机器人横向行走过程中,重心投影点一直处于支撑三角形范围内,即机器人横向行走过程静态稳定。

3 六足机器人横向行走步态仿真

六足机器人横向行走的仿真,不仅要完成三维模型的建立与步态规划,还需要进行机器人足端轨迹规划。

3.1 六足机器人足端轨迹规划

六足机器人行走过程中足端轨迹的选择和规划不仅会影响到机器人行走的美观性、连贯性,而且对行走的稳定性以及各驱动关节所需力矩大小都有很大的影响^[9],因此在对六足机器人的步态规划完毕之后,很有必要对足端的运行轨迹进行研究分析和规划。

在足式步行机器人的步态设计中,机器人的足端轨迹主要有直线段、抛物线、摆线和心形线等几种曲线,它们都有各自的特点。直线段的特点是容易组合成给定的形状,但往往会造成直线段连接点处的速度和加速度的不连续性。抛物线的特点是高度不变,起始角和终止角可变,但在起落时会有冲击现象存在。摆线和心形线也存在着步长和步高关系固定不变以及起落角较小等问题。

六足机器人行走过程中,在静态稳定性条件下,最好是能保证每一步足端运动的初始和终止角速度均为零,并且足端轨迹要平滑、连续、二阶可导。因此这里根据足端起点和落地点以及中间点的位置和时刻进行三次样条插值,从而得出最后的足端运动轨迹。

由前面介绍可知,机器人一条腿完全伸直的长度为 400 mm 左右,综合考虑各方面因素取定机器人横向行走的步长 $s=80$ mm,步行周期 $T=5$ s,机器人沿 x 方向前进,每条腿沿 y 方向向上抬起,然后对足端轨迹进行规划。先列出满足预定轨迹的数据,如表 1 所示。

完成对足端轨迹的规划之后,用 MATLAB 编程对上述数据进行三次样条插值计算,可分别得到机器人足端在 x 、 y 方向随时间变化的曲线和 x 相对于 y 的变化曲线分别如图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)所示。

表 1 满足预定轨迹的数据

i	0	1	2	3	4
t_i/s	0	0.3	1	1.7	2
$X_i(t)/mm$	0	9	40	71	80
$Y_i(t)/mm$	0	16	30	16	0
$V(x)/(mm/s)$	0	—	—	—	0
$V(y)/(mm/s)$	0	—	—	—	0

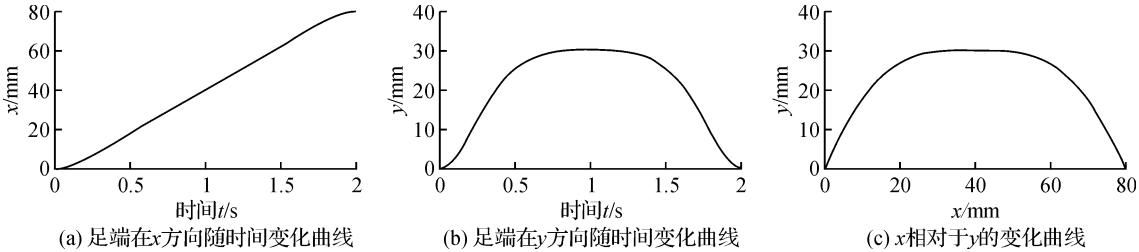
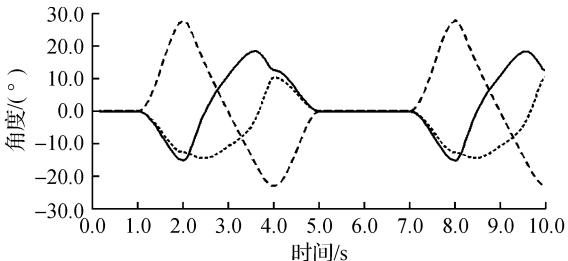


图 6 足端点轨迹曲线

3.2 六足机器人虚拟样机模型的建立及步态仿真

六足机器人作为多自由度、多连杆的空间机构,运动学、动力学特性都十分复杂,而虚拟样机技术是进行复杂机械系统样机设计、仿真研究的有效手段。用 Pro/E 建立六足机器人的三维模型,然后导入 ADAMS 中,对上面规划的六足机器人横向行走步态进行仿真分析。

由 3.1 步态介绍可知,六足机器人在横向行走时存在冗余自由度,所以在进行仿真前先将横向行走步态不做贡献的关节固定。利用上面规划的足端轨迹对各足端添加驱动,运行一次仿真,可得到各关节的运行角度曲线,图 7 所示为左前腿 3 个关节角度随时间的变化曲线。



— 关节13角度曲线; -- 关节14角度曲线; 关节15角度曲线
图 7 机器人左前腿各关节角度随时间变化曲线

由图 7 可以看出机器人各关节角度变化曲线很平滑,基本没有突变现象。将得到的各关节角度变化曲线保存为样条曲线,然后对各个关节添加驱动,并添加机器人支撑腿与刚性地面的动摩擦系数、静摩擦系数、阻尼等参数,完全模拟机器人在实际地面上行走的情况,随后即可进行仿真。本实验只进行了 10 s 仿真,机器人完成了起步调整和一个完整的步态周期,仿真动画的截图如图 8(a)~图 8(h)所示。仿真过程中六足机器人行走平稳,没有出现倾斜和跌倒现象。

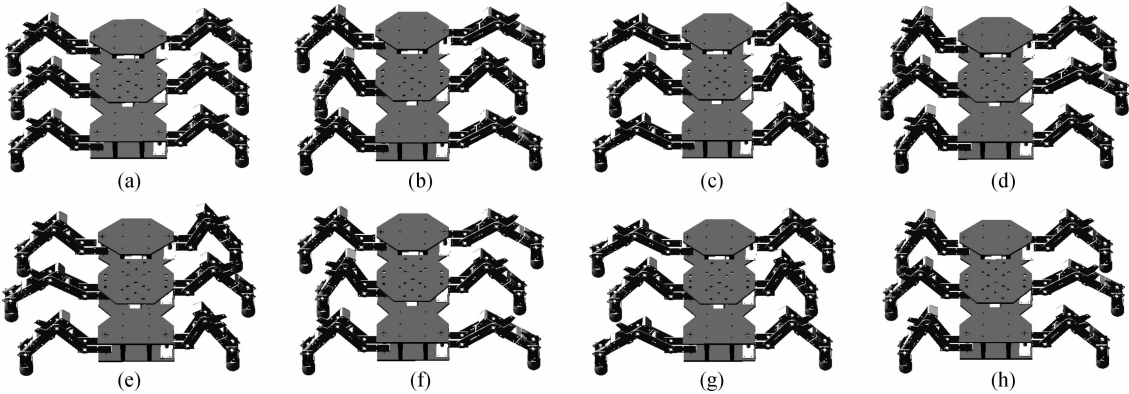


图 8 六足机器人横向行走仿真动画

图 9 所示为机器人机体质心随时间的位移曲线,图 10 所示为机器人行走过程中机体质心在垂直方向上的抖动情况。由这两条曲线可以看出六足机器人行走平稳,在 x 方向上达到了预期的行走目标,并且在垂直方向上基本保持稳定,仅有十分微小的抖动,抖动范围在 $\pm 0.1\text{ mm}$ 以内。

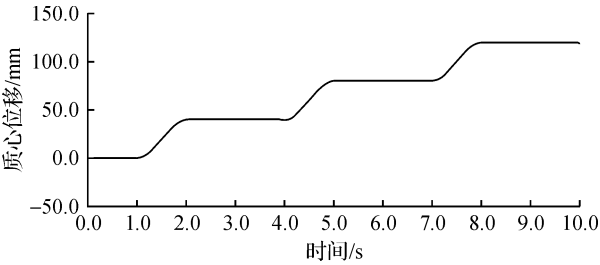


图 9 六足机器人机体质心在 x 方向随时间的位移曲线

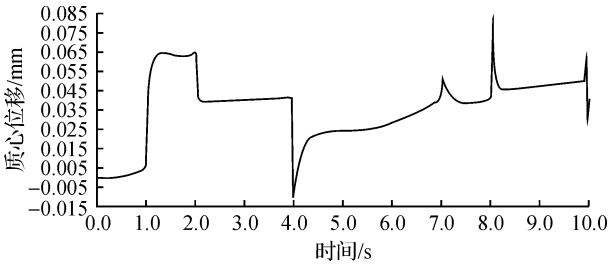


图 10 六足机器人机体质心在垂直方向上的抖动曲线

4 结 论

针对一种新型的多自由度六足步行机器人机构,规划了一种横向行走三角步态,并对该步态行走的稳定性和足端轨迹等方面进行了一定的研究,最后通过虚拟样机技术进行了仿真验证。在完全模拟现实的仿真条件下,验证了该三角步态行走的稳定性和可行性,为接下来的物理样机实验提供了依据。

参考文献:

[1] 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.
[2] 负 超. 机器人学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 6-7.
[3] 徐小云,颜国正,丁国清. 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.
[4] 徐小云,颜国正,丁国清,等. 六足微型仿生机器人及其控制系统的研究[J]. 计算机工程, 2002, 28(11): 81-83.
[5] Yu Sheng-wei, Yan Wen-jun. Design of low-level motion controller for a two-wheel mobile mini-robot[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2006, 23(9): 38-40, 46.
[6] Han Jian-hai, Zhao Shu-shang, Li Ji-shun. Movement gait harmony control for hexapod robot[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2004, 21(4): 8-10.
[7] 金 波,胡 厦,俞亚新. 新型六足爬行动物机器人设计[J]. 机电工程, 2007, 27(6): 23-25, 36.
[8] 陈学东,孙 翊,贾文川. 多足步行机器人运动规划与控制[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006: 99-113.
[9] 闰尚彬,韩宝玲,罗庆生. 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.

Research on Laterally Walking Gait of Hexapod Robot

LIU Lian-rui, ZHANG Ze, GAO Jian-hua

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

Abstract: The laterally walking gait of hexapod walking robot has been researched based on a new type of multi-DOF hexapod robot mechanism. The planning of a laterally walking tripod gait and foot trajectory, the analysis of stability are all completed. The kinematical simulation and analysis of the hexapod robot model have been done by using Pro/E and ADAMS at the end. The laterally walking gait proved feasible by the simulation results. This can provide foundation for the experiment of physical prototype.

Key words: hexapod walking robot; laterally walking tripod gait; stability; virtual prototype; gait planning

(责任编辑: 杨元兆)

(上接第 220 页)

Signal Processing Method of the Laser Heterodyne Interferometry Based on DSP

ZHAO Si-wei, YAN Li-ping, YANG Tao, ZHOU Yan-jiang, CHEN Ben-yong

(Nanometer Measurement Lab, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The principle of laser heterodyne interferometry is introduced. The signal processing method of the heterodyne interferometer is designed based on digital signal processor (DSP). Time difference between the rising edges of reference signal and measurement signal is obtained by the enhanced capture module (ECAP) of DSP. The period of measurement signal is calculated in the interrupt service routine of ECAP. Then the phase difference is calculated according to the time difference and period of measurement signal. Thus, the measured displacement can be obtained. The phase difference measuring experiment is carried out in the range of $0\sim360^\circ$ by using a two channels function generator which outputs two square signals. The experimental result shows that standard deviation is 0.041° and the linearity coefficient is 0.99989. The displacement measurement experiment is carried out with step increment 20 nm in the range of 320 nm. The experimental result shows that the standard deviation is 2.46 nm and the linearity coefficient is 0.99971. These results show that the proposed signal processing method is reasonable and feasible.

Key words: nanometer measurement; laser heterodyne interferometer; signal processing; DSP; capture unit

(责任编辑: 杨元兆)