

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.07.021

圆弧形腿机构六足机器人的结构和控制系统设计

冬 雷, 马举猛

(北京理工大学 自动化学院, 北京 100081)

摘要:针对轮式移动机器人越障能力不足的问题,设计出了一种兼具轮式和足式移动机构特点的圆弧腿仿生六足机器人。完成了基于飞思卡尔 MC568037 型 DSP 及 CAN 总线的机器人控制系统的设计;对机器人的运动步态、静力学及运动学模型进行了研究,并采用 ADAMS 仿真软件对运动学模型进行了验证;提出了一种基于三角函数规律的电机转速曲线。最后对电机驱动系统、机器人的越障及转向性能进行了测试。实验结果表明,机器人驱动电机的控制系统具有良好的响应特性,机器人可通过 30 cm 高的障碍,并且具有较小的转向半径,环境适应性强。

关键词:六足机器人;圆弧腿;CAN 总线;仿生

中图分类号:TH39;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)07-0883-05

Control system and structure for hexapod robot with circular arc legs

DONG Lei, MA Ju-meng

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Aiming at the poor ability of wheeled mobile robot's obstacle-navigation, a hexapod bio-robot with circular arc legs was designed, which had the advantages of wheeled and footed mobile robot. A robot control system based on Freescale's MC56F8037 DSP and CAN bus was designed; The gait, statics and kinematic model of the robot was investigated, the kinematic model was verified by ADAMS software simulation. A motor speed curve based on trigonometric function was proposed. Experiments for the driver motor and robot's ability to obstacle-navigation and turning were finished. The experimental results indicate that the motor control system has good response characteristics, the robot can go over obstacle about 30 cm and has small turning radius which is helpful for the robot adapting to the environment.

Key words: Hexapod robot; circular arc legs; CAN bus; bionics

0 引 言

移动机器人常见的移动方式包括轮式、履带式、足式等^[1-2],在这些移动方式中,最常见且效率最高的是轮式移动,但轮式移动最明显的缺陷是对复杂地形的适应能力弱。相比于轮式,履带式结构的移动机器人对复杂地形有较强的适应能力,但对于一些比较高的障碍,履带式运动明显不足。足式机器人虽能很好地适应障碍地形^[3],但是一般采用多关节,这增加了机械设计的复杂度,也给控制带来不便。

轮腿式结构的机器人兼具轮式和足式移动机构的

特点,具有速度快、效率高、环境适应性强等优点^[4],因而受到广泛的关注。由 U. Saranli 等^[5-7]设计的 RHex 是轮腿式机器人的典型代表,它模仿六足昆虫的结构,每条腿只有一个自由度,利用腿的单方向旋转产生运动。当前轮腿的结构设计日趋多样化,圆弧偏心轮^[8-9]、双轮辐^[10]、三轮辐^[11]等多种结构都被运用于轮腿式机器人。它们能在野外的多障碍地形下快速运动并可通过楼梯等特殊障碍^[12-13]。

本研究设计的六足机器人采用 270° 的圆弧腿,轮腿具有连续接地特性,运动稳定性比传统的 RHex 强。此外机器人轮腿的转速是基于三角函数规律的,它可

收稿日期:2015-12-30

作者简介:冬雷(1967-),男,河北唐山人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事电力电子与电气传动方面的研究。E-mail:pemc.bit@163.com

实现轮腿接地时转速的平滑过渡,可防止电机的载荷冲击,提高电机的效率。

本研究通过仿真和实验对机器人的特性进行研究。

1 机器人的运动步态

步态是指六足机器人行走时各条腿的相位关系^[14]。机器人仿照六足生物设计,根据运动过程中同一时刻接地的腿数目,六足生物的行走的步态可分为三足、四足和五足步态^[15]。这里按逆时针方向对腿编号,把六条腿分为两组,1、3、5 号为一组,2、4、6 为一组,如图 1 所示。

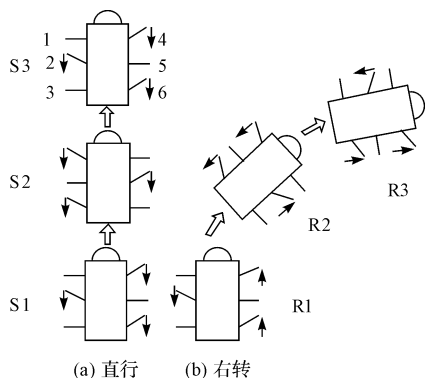


图 1 直行和右转

在图 1(a)中,在 S1 状态下 1、3、5 号腿是悬空的,当 2、4、6 号腿都向后摆动时,机器人会向前运动,进入状态 S2;此时 2、4、6 号腿悬空,1、3、5 号腿同时向后摆动,机器人向前运动到 S3 状态。

在图 1(b)中,在 R1 状态下 1、3、5 号腿是悬空的,当 4、6 号腿都向前摆动同时 2 号腿向后摆,机器人会向右旋转,进入状态 R2;此时 2、4、6 号腿悬空,1、3、5 号腿向后摆动,同时 5 号腿向前摆,机器人继续右转进入 R3 状态。值得注意的是对于圆弧腿结构的机器人,由于圆弧腿可连续触地,机器人可实现原地旋转。

2 结构设计

六足机器人结构包括机身、腿、电机、位置传感器等,样机如图 2 所示。

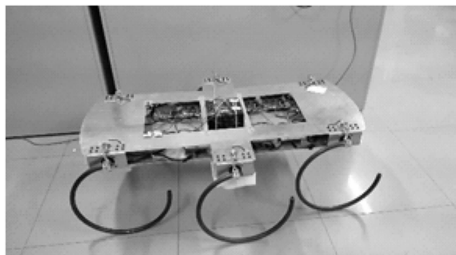


图 2 机器人样机

其中电机采用的是永磁无刷直流电机,它具有功率密度高、体积小、质量轻等特点^[16]。位置传感器采用的是电磁式接近开关,用于检测绝对位置信号。该信号配合无刷直流电机的霍尔信号可以实现对腿的绝对位置的控制^[17]。机器人的腿采用 270°的圆弧结构,机身中间部分向外突出,可以防止运动时腿之间相互干涉。该机器人最大长度 114 cm,最大宽度 68 cm,腿的直径是 35 cm。

硬件电路采用分层结构,底层(驱动层)主要负责无刷直流电机的驱动,并执行一些硬件故障检测与保护功能,顶层(中央控制层)主要负责各电机的协同运动,同时还负责人机交互,两层的主控制器均采用飞思卡尔 MC56F8037 型 DSP,考虑到 CAN 总线通讯具有速度快、可靠性高等特点^[18],因而驱动层和中央控制层采用 CAN 总线通讯。

3 受力及运动分析

3.1 三足步态静力学分析

在各种步态中,三足步态的运动最快,所需电机的输出转矩也最大。机器人的简化模型如图 3 所示。

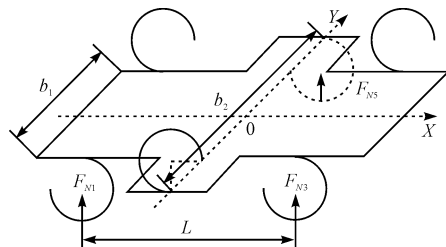


图 3 三足步态受力模型

机身所在平面为 XOY 平面。机器人前后腿之间间距为 L ,宽分别为 b_1 和 b_2 。这里分析 1、3、5 腿着地时的情况,支持力分别为 F_{N1} 、 F_{N3} 、 F_{N5} 。

机器人正常运动时,不会发生绕 X 轴或 Y 轴的旋转,所以外力对 X 轴和 Y 轴的转矩都为零。设所有力对 Y 轴的转矩为 M_y ,对 X 轴的转矩为 M_x ,则有:

$$M_y = F_{N1} \times \frac{L}{2} - F_{N3} \times \frac{L}{2} \quad (1)$$

$$M_y = 0 \quad (2)$$

$$M_x = F_{N5} \times \frac{b_2}{2} - F_{N3} \times \frac{b_1}{2} - F_{N1} \times \frac{b_1}{2} \quad (3)$$

设机器人的质量为 m ,机器人整体所受合力为零有:

$$mg = F_{N1} + F_{N5} + F_{N3} \quad (4)$$

联立以上式子可得:

$$F_{N1} = F_{N3} = mg / \left(2 + 2 \times \frac{b_2}{b_1} \right) \quad (5)$$

$$F_{N5} = \frac{2b_1/b_2}{2 + 2 \times b_1/b_2} \times mg \tag{6}$$

对比式(5)和式(6)可知,最大的支持力是 F_{N5} ,所以5号腿所需的转矩最大。机器人运动时支持力始终指向圆弧腿的圆心,最长力臂是 R ,所以设电机最大转矩为 $T_{\max}$,则有:

$$T_{\max} = F_{N5} \times R \tag{7}$$

由式(6)和式(7),得:

$$T_{\max} = \frac{2b_1/b_2}{2 + 2 \times b_1/b_2} \times mgR \tag{8}$$

实际设计时 $b_1 = 0.44\text{ m}$, $b_2 = 0.68\text{ m}$, $R = 0.175\text{ m}$, $g = 10\text{ m/s}^2$,机器人质量为 m_{robot} 则有:

$$T_{\max} = 0.69m_{\text{robot}} \tag{9}$$

3.2 机器人运动特性

由于腿是圆弧结构,机器人运动过程中,在不考虑打滑的情况下,机身的运动轨迹是摆线。质心运动轨迹如图4所示。

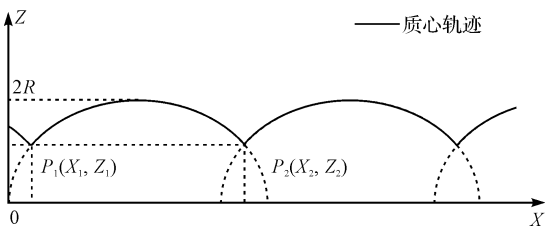


图4 质心运动轨迹

实线—机器人质心的空间轨迹;X轴—运动方向;Z轴—机身的铅垂方向

图4中 P_1 和 P_2 都是腿的换相点,摆线的参数方程为:

$$x = R(\varphi - \sin\varphi) \tag{10}$$

$$z = R(1 - \cos\varphi) \tag{11}$$

假设换相点的高度为 h_0 ,它的大小可以通过对悬空相和摆动相的转速控制来调节,所以有:

$$z_1 = z_2 = h_0 \tag{12}$$

将式(12)代入式(11),得:

$$\cos\varphi = 1 - h_0/R$$

$$\varphi_1 = \arccos(1 - h_0/R) \tag{13}$$

$$\varphi_2 = 2\pi - \arccos(1 - h_0/R)$$

代入式(10),得: $x_1 = R(\varphi_1 - \sin\varphi_1)$, $x_2 = R(\varphi_2 - \sin\varphi_2)$

设一个周期机器人前进的距离为 Δs ,则有:

$$\Delta s = x_2 - x_1 = 2R(\pi - \varphi_1 + \sin\varphi_1) \tag{14}$$

机器人质心的空间轨迹如图5所示。

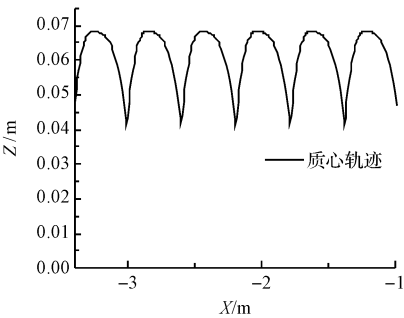


图5 质心轨迹仿真

纵轴—质心高度;横轴—前进的距离。

本研究采用了ADAMS对机器人进行仿真,初始时刻机器人不位于ADAMS全局坐标系原点,但这不影响对机器人质心运动轨迹的分析。根据仿真结果,腿摆动一个周期机器人前进的距离是 0.8 m 。机身的最大高度差是 2.9 cm 。

4 实验及结果分析

轮腿式机器人的腿包括悬空和触地两种状态。现有的机器人控制策略中轮腿在两个状态的转速不一样,但每个状态中电机都是匀速的,这种方法存在一些不足,首先是状态切换时电机的速度给定有阶跃,会造成电机的冲击载荷;其次这种控制策略的电机转速和转矩不匹配,电机效率低。

因此本研究提出一种基于三角函数规律的转速控制策略,它能实现换相点的转速平滑过渡,有效防止冲击,同时还可有效匹配电机转矩和转速,重载(腿触地)时电机转速低,轻载时(腿悬空)电机转速高,因而可提高电机效率。图6中两条曲线的交点即是换相点, W_{135} 和 W_{246} 分别表示两组电机的转速。基速以上的区域是轻载区,以下的区域是重载区。三角函数规律转速曲线如图6所示。

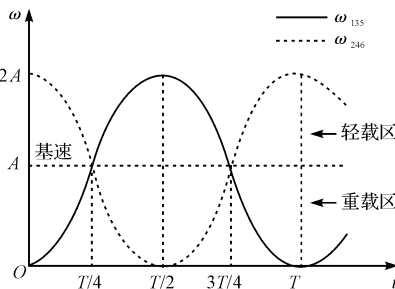


图6 三角函数规律转速曲线

4.1 电机响应特性

本研究所选无刷直流电机的位置传感器是霍尔型的,霍尔信号不仅提供了电机的换向信息、也提供了电

机的转速信息,通过检测两次换向的时间间隔,就可以求出电机的实际转速^[19]。电机采用转速位置双闭环控制,虽然不能实现对正弦转速规律的无差追踪,但基本能满足控制要求,电机的转速和位置响应特性如图 7 所示。

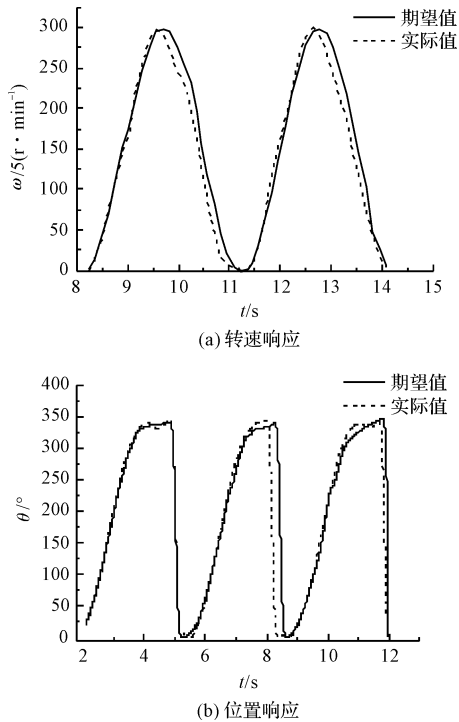


图 7 转速位置响应特性

4.2 实验效果

本研究结合上述分析设计出六足机器人的软件控制系统。并对机器人进行了实验。

机器人的越障实验如图 8 所示。

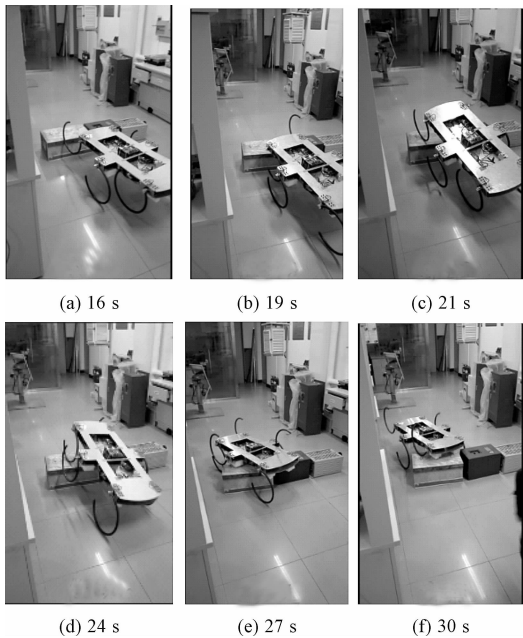


图 8 越障

机器人采用普通三足步态运动,障碍物的高度是 30 cm。

机器人转向实验如图 9 所示。

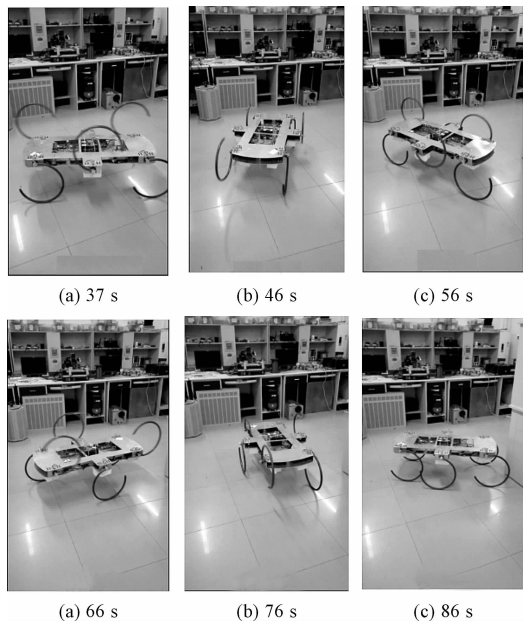


图 9 转向

通过左、右两侧轮腿的差速运转,机器人可以实现原地转向,不考虑打滑情况,转弯半径为机器人体长的一半。

5 结束语

本研究分析六足机器人的运动步态及其实现,建立机器人三足步态的受力模型,推导出机器人质量和电机最大转矩之间的关系,为驱动装置的选型提供理论依据;基于轮腿的结构特点,利用摆线模型来分析机器人的运动速度与结构参数之间的关系,获取轮腿摆动一个周期机器人的前进距离,并通过 ADAMS 仿真对模型进行验证。

本研究介绍了机器人控制系统的设计,提出基于三角函数规律的转速特性曲线,最后对机器人进行实验验证,结果表明相比轮式移动机器人,该轮腿机器人具有较强越障能力,可跨越 30 cm 高的障碍;另外机器人可采用差速转向,这缩小了转弯半径,增强机器人的环境适应性。

参考文献 (References) :

- [1] 吉爱红,戴振东,周来水. 仿生机器人的研究进展[J]. 机器人,2005,27(3):284-288.
- [2] 申耀武. 智能机器人研究初探[J]. 机电工程技术,2015,44(6):47-51,132.

- [3] 金 波,胡厦,俞亚新. 新型六足爬行机器人设计[J]. 机电工程,2007,24(6):23-36.
- [4] 李君科,王宇俊,万 婷,等. 偏心轮腿六足机器人三步步态的静态稳定性分析[J]. 河南教育学院学报(自然科学版),2012,21(1):40-43.
- [5] SARANLI U, BUEHLE M, KODITSCHKEK D. RHex: A simple and highly mobile robot [J]. International Journal of Robotics Research,2001,20(7):616-631.
- [6] SARANLI U, KODITSCHKEK D E. Back Flips with a Hexapedal Robot [C]// Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Washington, DC:[s. n.],2002:2209-2215.
- [7] SARANLI U, KODITSCHKEK D E. Template Based Control of Hexapedal Running [C]//Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Taipei, Taiwan:[s. n.],2003:1374-1379.
- [8] CHOU Ya-cheng, YU Wei-shun, HUANG Ke-jung, et al. Bio-inspired Step Crossing Algorithm for a Hexapod Robot [C]// 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Francisco, CA, USA:[s. n.],2011:1493-1498.
- [9] TAN Xing-jun, WANG Yu-jun, HE Xin-qiang. The Gait of a Hexapod Robot and Its Obstacle-surmounting Capability [C]//Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation. Taipei, Taiwan:[s. n.],2011:303-308.
- [10] 罗庆生,刘祎玮,牛 锴,等. 新型轮腿式机器人研究[J]. 大连理工大学学报,2011,51(z1):81-91.
- [11] 田 润,宋轶民,孙 涛,等. 一种新型轮腿式移动机器人的参数设计与实验研究[J]. 机器人,2015,37(5):537-545.
- [12] JOHNSON A M, HALE M T, HA YUYNES, et al. G. C. Autonomous Legged Hill and Stairwell Ascent [C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics. Kyoto, Japan [s. n.],2011:134-141.
- [13] HAYNES G C, RIZZI A A. Gaits and Gait Transitions for Legged Robots [C]// Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando, Florida [s. n.],2006:1117-1122.
- [14] 何新强. 偏心轮腿六足机器人控制策略研究[D]. 重庆:西南大学计算机与信息科学学院,2011.
- [15] 韩建海,赵书尚,李济顺. 六足机器人行走步态的协调控制[J]. 机电工程,2004,21(4):8-10.
- [16] 李悦溪,王 萌,祝长生. 飞轮储能系统用无刷直流电机驱动系统的设计[J]. 机电工程,2010,27(10):68-73.
- [17] 谢世杰,陈生潭,楼顺天. 数字 PID 算法在无刷直流电机控制器中的应用[J]. 现代电子技术,2004,2(5):59-61.
- [18] 辛龙威,李晓卉,方康玲. 基于 CAN 总线的直流无刷电机控制系统[J]. 电机与控制应用,2012,39(10):15-18.
- [19] 陈玉枫. 新型免疫克隆算法在永磁无刷直流电机系统中的应用[J]. 轻工机械,2015,33(3):62-65.
- [20] 羊 彦,景占荣,毕 强,等. 无刷直流电动机数字 PID 控制的研究[J]. 电机与控制学报,2003,7(24):299-302.
- [21] 廖志远,郭 杰. JT200 型卷纸筒机纸带张力的数学建模及 PID 控制[J]. 包装与食品机械,2014(3):53-56.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

冬 雷,马举猛. 圆弧形腿机构六足机器人的结构和控制系统设计[J]. 机电工程,2016,33(7):883-887.

DONG Lei, MA Ju-meng. Control system and structure for hexapod robot with circular arc legs[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(7):883-887.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>