

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.07.014

六足仿蜘蛛机器人的结构与仿真分析*

白颖¹, 蒋庆斌¹, 莫莉萍¹, 孙超², 王松²

(1. 常州机电职业技术学院 电气工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213002)

摘要:针对六足机器人运动规划问题,设计了一种六足仿蜘蛛机器人。首先,利用 SolidWorks 设计了六足仿蜘蛛机器人的机械结构;然后,通过建立六足仿蜘蛛机器人的 D-H 坐标系,构建了仿蜘蛛机器人行走机构的运动学模型,对机器人的单腿正、逆运动学进行了分析,推导了正逆运动学方程;最后,对几种典型步态进行了分析,运用多项式差值拟合的方法对仿蜘蛛机器人的摆动相及支撑相作了足端轨迹的规划;在此基础上,将 SolidWorks 模型导入到 ADAMS/View 中,利用 ADAMS 对几种典型步态进行了仿真,验证了对其步态规划的正确性。研究表明:该六足仿蜘蛛机器人的设计方案是有效的。

关键词:六足仿蜘蛛机器人;结构设计;运动学分析;步态规划

中图分类号:TH112;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)07-0732-05

Structural design and simulation analysis of hexapod bionic spider robot

BAI Ying¹, JIANG Qing-bin¹, MO Li-ping¹, SUN Chao², WANG Song²

(1. College of Electrical Engineering, Changzhou Institute of Mechatronic Technology, Changzhou 213164, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: Aiming at the problem of motion planning of hexapod robots, hexapod bionic spider robot was designed. Firstly, the mechanical structure of the hexapod mimic robot was designed by SolidWorks. Then, the positive and inverse kinematics of the single leg of the robot were analyzed by establishing the D-H coordinate system of the hexapod bionic spider robot, and the forward and inverse kinematics equation were deduced. Finally, several typical gaits were analyzed, and a polynomial difference fitting method was used to plan the trajectories of the swing phase and the supporting phase of the spider-like robot. Based on this, the model built in SolidWorks was imported into ADAMS/View, and ADAMS was used for simulating several typical examples. The correctness of its gait planing was verified by simulation. The results indicate that the design of the hexapod bionic spider robot is effective.

Key words: hexapod bionic spider robot; structural design; kinematic analysis; gait planning

0 引言

仿生机器人是以自然界的生物为原型,其类型主要有:仿人、仿生物和生物机器人3大类^[1]。仿蜘蛛机器人是基于对蜘蛛生理结构特性、运动原理和行为方式,设计出来的对环境具有一定适应性并且可以凭借传感器反馈的机器人^[2]。仿蜘蛛机器人有着高灵活度、柔性和易复制的优点,在路况较差条件下也能保证

稳定地行走,还有一定的避障能力。仿蜘蛛机器人凭借其优势,因而被广泛应用于工业、航天、军事、抢险救灾等多项领域^[3]。对仿蜘蛛机器人的机械结构的设计以及对其运动学、动力学的分析具有工程应用价值。

长期以来,多足移动机器人技术在机器人技术领域内一直备受瞩目。仿蜘蛛机器人从属于仿生多足机器人,国内外研究机构很早便开始了对仿生多足机器人的研究。美国的 MOSHER 成功研制了四足机器人

收稿日期:2019-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875171);江苏省青蓝工程工业机器人技术优秀教学团队项目(JSQ12017016)

作者简介:白颖(1975-),女,山东蓬莱人,副教授,主要从事机器人技术及应用方面的研究。E-mail:bying75@126.com

Walking Truck^[4];美国 MIT 研制了用于作战的六足机器人 Ariel^[5];美国麻省理工学院成功研制了用于探测外太空星球表面的六足机器人 Genghis^[6];德国某大学研制了六足机器人 Tarry-II^[7];坎特伯雷大学成功研制了六足机器人 Hamlet^[8]。国内的哈工大、华中科技大学在六足机器人技术开发方面也有着各自的特色^[9];宫赤坤等^[10]利用 D-H 法确定了机器人手臂各关节、腿部各关节间的位姿关系和相对运动;张陈曦等^[11]在 ADAMS 中建立了仿生机器人的虚拟样机模型,研究其运动学性能。

目前研究的仿蜘蛛机器人对地形的适应能力比较强,但是运动速度相对较低。本研究将提出多种运动方式结合的仿蜘蛛机器人,在保持原来优点的基础上,进一步提高速度和工作效率等。

1 六足仿蜘蛛机器人结构设计

从机构学角度看,八足蜘蛛结构复杂,参数众多,完全仿照其生理特点进行仿生十分困难,因此此次设计的仿蜘蛛机器人为六足结构。

仿蜘蛛机器人的机械结构主要由躯干和腿两部分组成^[12]。这种结构能很好地支撑躯干重量,并能保证机器人行走时的稳定性和高效率。本文设计选取的布置方式为环绕式,即机器人的 6 条腿环绕圆形机体均匀分布,灵活性高,即全方位机器人。

六足仿蜘蛛机器人三维模型图如图 1 所示。

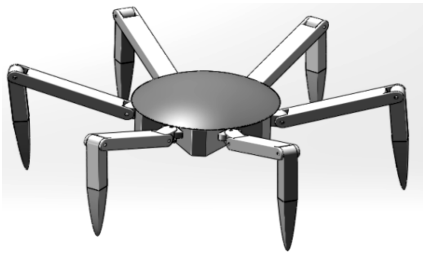


图 1 六足仿蜘蛛机器人三维模型图

六足仿蜘蛛机器人的腿部实际是三连杆,与躯干连接的连杆编号为 1,单条腿的连杆长度分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 。每条腿由 3 个节肢及 3 个关节组成。

仿蜘蛛机器人各零件参数如表 1 所示。

表 1 仿蜘蛛机器人各零件参数

序号	名称	材料	长度/mm	质量/kg
1	躯干	ABS	500	12.78
2	连杆 1	2018 铝合金	90	0.425
3	连杆 2	2018 铝合金	455	3.632
4	连杆 3	2018 铝合金	455	2.334
5	端盖	ABS	250	0.905

2 六足仿蜘蛛机器人运动学分析

2.1 单腿正运动学分析

本文在前面的基础上建立了六足仿蜘蛛机器人 D-H 坐标系。首先将机器人 6 条腿(L1、L2、L3、R1、R2、R3)按顺序编号为 1、2、3、4、5、6。

仿蜘蛛机器人单腿 D-H 坐标系如图 2 所示。

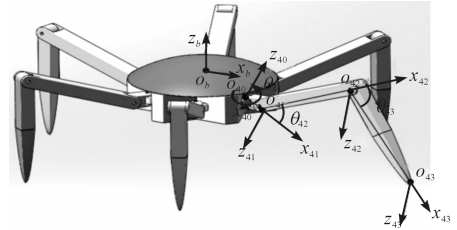


图 2 仿蜘蛛机器人单腿 D-H 坐标系

$O_{40} - x_{40}y_{40}z_{40}$ —仿蜘蛛机器人腿的基关节坐标系; $O_{41} - x_{41}y_{41}z_{41}$ —编号 4 腿髌关节坐标系; $O_{42} - x_{42}y_{42}z_{42}$ —编号 4 腿膝关节坐标系; $O_{43} - x_{43}y_{43}z_{43}$ —编号 4 腿足端坐标系

基于已有机器人学研究理论^[13],机器人腿部相邻关节的 D-H 变换矩阵为:

$${}^j T_{ij} = \text{Rot}(z, \theta_{ij}) T_{\text{rans}}(0, 0, d_{ij}) T_{\text{rans}}(a_{ij}, 0, 0) \text{Rot}(x, \alpha_{ij}) = \begin{bmatrix} c\theta_{ij} & -s\theta_{ij}c\alpha_{ij} & s\theta_{ij}s\alpha_{ij} & a_{ij}c\theta_{ij} \\ s\theta_{ij} & c\theta_{ij}c\alpha_{ij} & -c\theta_{ij}s\alpha_{ij} & a_{ij}s\theta_{ij} \\ 0 & s\alpha_{ij} & c\alpha_{ij} & d_{ij} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: θ_{ij} —第 i 条腿第 j 个关节转角; α_{ij} —第 i 条腿第 j 个关节相邻轴线的夹角; a_{ij} —第 i 条腿第 j 个连杆的长度; d_{ij} —第 i 条腿第 j 个关节相邻连杆公垂线之间的距离; s —sin 函数; c —cos 函数。

为简化书写,可定义该机器人每条腿相邻关节的 D-H 变化矩阵为:

$$F_{ij} = {}^j T_{ij} \quad (2)$$

由 D-H 变换矩阵可以得出编号 4 腿相邻关节的变换矩阵,进而求得编号 4 腿足端坐标系相对于基关节坐标系的变换矩阵为:

$${}^0 T_{43} = F_{41} F_{42} F_{43} \quad (3)$$

其中,变换矩阵 F_{41} , F_{42} , F_{43} , 可分别通过式(1) 计算得出。

由于在对仿蜘蛛机器人的机械结构进行设计时 6 条腿的形状尺寸完全相同,建立的坐标系也相同,则可以得到第条腿足端坐标系相对于基关节坐标系的变换矩阵为:

$${}^0 T_{i3} = F_{i1} F_{i2} F_{i3} \quad (4)$$

以机器人躯干坐标系 $o_b - x_b y_b z_b$ 为参考坐标系, 其中: x_b — 身体横向方向, z_b — 垂直身体方向, y_b — 右手螺旋定则确定。则足端坐标系到躯干坐标系的变换矩阵为:

$${}^b T_{i3} = {}^b T_{i0} {}^0 T_{i3} \quad (5)$$

$${}^b T_{i0} = T_{rans}(x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}) R(z, \beta_i) R(y, \alpha_i) \quad (6)$$

式中: x_{i0}, y_{i0}, z_{i0} — 第 i 条腿基关节坐标系原点在躯干坐标系中的位置; α_i — 基节与水平面的夹角; β_i — 单腿平面与躯干 $x - z$ 平面的夹角。

腿部状态示意图如图 3 所示。

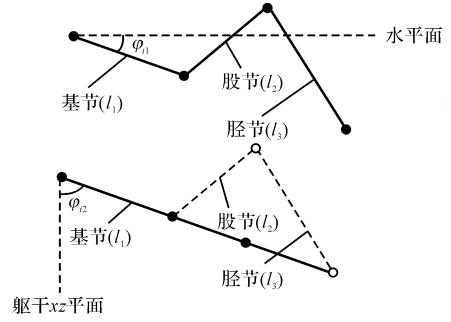


图 3 腿部状态示意图

由上式可以解得足端点在躯干坐标系中的位置 $[{}^b P_{ix} \ {}^b P_{iy} \ {}^b P_{iz}]^T$, 即:

$$\begin{bmatrix} {}^b P_{ix} \\ {}^b P_{iy} \\ {}^b P_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i0} - s\alpha_i(l_1 s\theta_{i1} + l_2 c\theta_{i1} c\theta_{i2} + l_3 s\theta_{i1} c\theta_{i23} - c\alpha_i s\beta_i(l_2 s\theta_{i2} + l_3 s\theta_{i23})) + c\alpha_i c\beta_i(l_1 c\theta_{i1} + l_2 c\theta_{i1} c\theta_{i2} + l_3 c\theta_{i1} c\theta_{i23}) \\ y_{i0} + c\alpha_i(l_1 s\theta_{i1} + l_2 s\theta_{i1} c\theta_{i2} + l_3 s\theta_{i1} c\theta_{i23} - s\alpha_i s\beta_i(l_2 s\theta_{i2} + l_3 s\theta_{i23})) + s\alpha_i c\beta_i(l_1 c\theta_{i1} + l_2 c\theta_{i1} c\theta_{i2} + l_3 c\theta_{i1} c\theta_{i23}) \\ z_{i0} - s\beta_i(l_1 c\theta_{i1} + l_2 c\theta_{i1} c\theta_{i2} + l_3 s\theta_{i1} c\theta_{i23}) - c\beta_i(l_2 s\theta_{i2} + l_3 s\theta_{i23}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: θ_{ij} — 第 i 条腿的第 j 个关节转角; θ_{ijk} — 第 i 条腿的第 j 个关节转角和第 k 个关节转角的和。

2.2 单腿逆运动学分析

单腿的逆运动学为已知仿蜘蛛机器人足端点在基关节坐标系或者躯干参考坐标系中的坐标, 然后对这条腿 3 个关节的转角进行反向求解。由于已知在基关节坐标系中的坐标之后反解关节角度比较简单, 本文只给出已知在躯干参考坐标系中的坐标反解关节角的方法。联立式(4) 中 3 个式子可以解得:

$$\begin{cases} \theta_{i1} = \tan^{-1}\left(\frac{d_{iy}}{d_{ix}}\right) \\ \theta_{i2} = \tan^{-1}\left(\frac{d_{iz}(l_2 + l_3 c\theta_{i3}) + l_3 c\theta_{i3} \sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{d_{iz} l_3 c\theta_{i3} - (i_2 + l_3 c\theta_{i3}) \sqrt{x_i^2 + y_i^2}}\right) \\ \theta_{i3} = -\cos^{-1}\left(\frac{x_i^2 + y_i^2 + d_{iz}^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3}\right) \end{cases} \quad (8)$$

式中: i — 第 i 条腿。

其中:

$$x_i = d_{ix} - l_1 c\theta_{i1},$$

$$y_i = d_{iy} - l_1 s\theta_{i1};$$

$$d_{ix} = c\alpha_i c\beta_i {}^b p_{ix} + s\alpha_i c\beta_i {}^b p_{iy} - s\beta_i {}^b p_{iz} - c\alpha_i c\beta_i x_{i0} - s\alpha_i c\beta_i y_{i0} + s\beta_i z_{i0};$$

$$d_{iy} = -s\alpha_i {}^b p_{ix} + c\alpha_i {}^b p_{iy} + s\alpha_i x_{i0} - c\alpha_i y_{i0};$$

$$d_{iz} = c\beta_i {}^b p_{iz} + c\alpha_i s\beta_i {}^b p_{ix} + s\alpha_i s\beta_i {}^b p_{iy} - c\alpha_i s\beta_i x_{i0} - s\alpha_i s\beta_i y_{i0} - c\beta_i z_{i0}$$

由此可以反解出 3 个关节(基关节、髌关节、膝关

节)的转角。而求得的关节转角可以作为输入信号驱动机器人行走。

3 步态规划与仿真分析

在仿蜘蛛机器人步行时, 每条腿按照既定的规律进行摆动—支撑的过程形成机器人行走的步态。本研究通过围绕仿蜘蛛机器人的几种比较典型的步态进行分析, 并在此基础上利用 ADAMS 软件对机器人以几种不同的步态在平面上直线行走时的情况进行仿真分析和比较。

3.1 典型步态分析

六足机器人具有代表性的规则步态按同时支撑的腿数可以分为 3 种: 三足步态、四足步态和五足步态。这里主要对四足步态和五足步态进行分析研究^[14]。

3.1.1 四足步态分析

六足仿蜘蛛机器人的四足步态表示在任意运动时刻处于支撑相的腿的数目有四条, 仿蜘蛛机器人四足步态运动的速度处于三足、五足步态之间, 其速度、稳定性和承载能力相对适中; 将仿蜘蛛机器人的六条腿分成 3 组, 每组两条腿, 第 I 组腿包括 L1、R2, 第 II 组腿包括 L2、R3, 第 III 组包括 L3、R4, 任意一组都可先摆动。

在一个运动周期内, 仿蜘蛛机器人的 3 组腿的足端位置呈交替变换。起步时, 第 I 组腿足端向前走半个步长, 此时第 II 组腿和第 III 组腿足端位置不变; 接着第 II 组腿向前一个步长, 第 I 组腿和第 III 组腿足端位置不变; 之后按第 III 组腿、第 I 组腿和第 II 组腿的顺序交替在前进方向上运动一个步长; 最后, 第 I 组腿足端

在前进方向上运动半个步长,第Ⅱ组腿和第Ⅲ组腿足端位置不变,仿蜘蛛机器人恢复静止。

3.1.2 波动步态分析

波动步态又称五足步态,所述的六足仿蜘蛛机器人的五足步态表示在任意运动时刻处于支撑相的腿的数目有5条;相对于三足、四足步态,仿蜘蛛机器人的五足步态步行速度最低,但是这种步态的稳定裕度和承载能力都是最大的。六足仿蜘蛛机器人在以波动步态向前运动时,其6条腿依次摆动并循环,每次只摆动一条腿。为了便于控制和机器人在行走时保持协调性,仿蜘蛛机器人的6条腿按照L1→R1→L2→R2→L3→R3的顺序进行摆动。

3.2 典型步态仿真

对仿蜘蛛机器人的几种典型步态进行仿真的目的是观测机器人在行走过程中是否稳定协调,对机器人的躯体质心位移、速度和加速度,及对仿蜘蛛机器人足端受力进行分析^[15]。

3.2.1 四足步态仿真

在进行仿真之前,本研究先设定机器人步长为500 mm,摆动时腿的足端抬起高度为500 mm,摆动相和支撑相时间相同,均为1 s。根据足端工作空间云图,可以确定设定值均在有效范围内。为减小冲击,设定机器人的腿部在两个相位交替变换时的速度和加速度为0。根据运动学分析公式对各关节的转角进行求解,再利用ADAMS将关节角通过step函数添加到驱动中进行仿真,便可以进行运动仿真了。

在仿真模型添加相应驱动函数后,设置仿真参数:仿真时间设为6 s,仿真步数为200步。仿真后进入到ADAMS/View的后处理模块。

四足步态质心速度和加速度曲线图如图4所示。

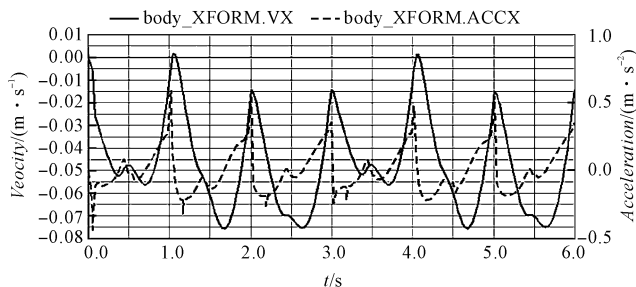


图4 四足步态质心速度和加速度曲线图

实线—速度曲线;虚线—加速度曲线

从图4中可以看出:曲线连续且平滑,最大速度和最小速度的差值仅为0.075 m/s,这说明机器人在直线行走过程中运动是平稳的。

3.2.2 五足步态仿真

本研究采取四足步态仿真同样的方法,对仿蜘蛛机器人五足步态进行仿真,其步态质心速度和加速度曲线图如图5所示。

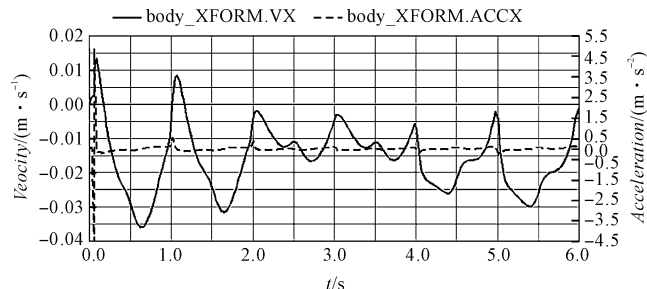


图5 五足步态质心速度和加速度曲线图

实线—速度曲线;虚线—加速度曲线

从图5中可以看出:曲线是连续且平滑的,最大速度和最小速度的差值仅为0.05 m/s,比前面的四足步态的差值还要小,说明五足步态是3种步态中步行更稳定的。

4 结束语

在对蜘蛛生理结构特性分析的基础上,本文设计出了仿蜘蛛机器人的机械结构模型,然后通过建立D-H坐标系进行了运动学分析,以及对几种典型的步态做了规划,最后利用软件对几种典型步态进行了仿真,验证了步态规划的可行性和准确性,为仿生六足机器人的设计提供了有益参考。

参考文献 (References):

- [1] 谭民,王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报, 2013, 39(7): 963-972.
- [2] 刘宇航,郑雪婷,薛恩鹏,等. 仿蜘蛛机器人的研究现状及其发展方向[J]. 机械工程师, 2017, 49(2): 106-108.
- [3] LI Man-hong, ZHANG Ming-lu, ZHANG Jian-hua. Review on key technology of the hexapod robot [J]. *Journal of Machine Design*, 2015, 10(32): 1-8.
- [4] 葛天乐. 沙漠六足机器人的系统设计与研究[D]. 上海: 上海交通大学电子信息与电气工程学院自动化系, 2014.

(下转第743页)

本文引用格式:

白颖,蒋庆斌,莫莉萍,等. 六足仿蜘蛛机器人的结构设计与仿真分析[J]. 机电工程, 2019, 36(7): 732-735, 743.

BAI Ying, JIANG Qing-bin, MO Li-ping, et al. Structural design and simulation analysis of hexapod bionic spider robot[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(7): 732-735, 743.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>