



机械科学与技术

Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering

ISSN 1003-8728, CN 61-1114/TH

《机械科学与技术》网络首发论文

题目: 六足仿生机器人自主爬行步态设计与仿真分析研究
作者: 刘玲, 靳伍银, 王洪建
DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20200298
收稿日期: 2020-06-22
网络首发日期: 2021-03-04
引用格式: 刘玲, 靳伍银, 王洪建. 六足仿生机器人自主爬行步态设计与仿真分析研究. 机械科学与技术. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20200298>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20200298

六足仿生机器人自主爬行步态设计与仿真分析研究

刘玲¹, 靳伍银^{1,*}, 王洪建²

(1. 兰州理工大学, 机电工程学院, 甘肃省兰州市 730050;

2. 重庆工商大学, 机械工程学院, 重庆, 400060)

摘要: 为提高六足机器人对崎岖不平地势的适应能力, 开发了一款基于树莓派视觉导航的六足仿生机器人, 利用三维软件 SolidWorks 设计六足仿生机器人的机械结构; 通过建立 D-H 坐标系和步态模型, 对机器人进行了正-逆运动学方程推导, 构建六足仿生机器人的运动学模型; 运用多项式差值拟合对六足仿生机器人的摆动相和支撑相进行步态规划; 使用 MATLAB-ADAMS 完成六足仿生机器人的位姿仿真, 并进行六足仿生机器人实物验证。实验结果表明: 该步态设计能有效对六足仿生机器人腿部运动轨迹进行跟踪, 验证了步态设计的正确性和有效性, 为改善多足类机器人行走提供有益参考。

关键词: 树莓派; 六足仿生机器人; 步态设计; 运动学模型; 位姿仿真

中图分类号: TP24

文献标志码: A

Study on Walking Gait Design and Simulation Analysis of Hexapod Bionic Robot

Liu Ling¹, Jin Wuyin^{1,*}, Wang Hongjian²

(1. School of Mechanical and Electromechanical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of Mechanical Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400060, China)

Abstract: In order to improve the ability of hexapod robot to adapt to rough terrain, a hexapod bionic robot based on raspberry PI visual navigation was developed. The mechanical structure of the hexapod bionic robot was designed by using the 3D software SolidWorks. Through the establishment of D-H coordinate system and gait model, the forward and inverse kinematics equation of the robot and the kinematic model of the hexapod bionic robot was constructed. The gait planning of swing and support phase of hexapod bionic robot was carried out by means of polynomial difference fitting. MATLAB-ADAMS was used to jointly complete the pose simulation of the hexapod bionic robot, and carried out the verification of the hexapod bionic robot. The experimental results show that the gait design can effectively track the leg trajectory of the hexapod bionic robot, which verifies the correctness and effectiveness of the gait design, and provides reference for improving the walking of the multilegged robot.

Key words: Raspberry pie; Hexapod bionic robot; The gait design; Kinematic model; Pose simulation

收稿日期: 2020-06-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11372122); 重庆市中小学创新人才培养工程(CY190802)

作者简介: 刘玲(1994—), 硕士研究生, 研究方向为人工智能与机器视觉, 2316599130@qq.com

***通讯联系人:** 靳伍银, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为神经科学及动力系统分析、系统仿真与虚拟、信号处理, 932289110@qq.com

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]。多足行走的机器人主要仿蜘蛛，蚂蚁等多足类生物而成。由于多足的支持，可以在非结构化环境中连续行走^[2]。这些机器人在自然地形中具有良好的机动性^[3]。基于这一优势，多足机器人被广泛应用于一些自主机器人无法高效完成的特定场合^[4]，在航天，军事，抢救领域做了重大贡献^[5]。例如：谢冬福等^[6]设计了一款六足农业机器人并联腿机构；卢展等^[7]设计了一款皮带传动的六足机器人；白颖等^[8]设计了一种六足仿蜘蛛机器人，研究其运动性能；Fusheng Zha 等^[9]开发了一种适用于大型重载六足机器人的新型自由步态控制器；张陈曦等^[10]研究的仿生机器人腿部的八杆机构虚构样机，研究其运动性能；Lei Zhang 等^[11]针对多足机器人在姿态变化过程中启动和停止时出现的不稳定问题，提出了一种平稳调整方法；曹维清等^[12]研究的一种爬楼的六足机器人；J. ZicoKolter 等^[13]设计的机器人在复杂狭窄的环境中进行行走，探测地雷；樊启润等^[14]基于 SoC FPGA 平台设计了一种六足仿生机器人。

以上研究的六足仿生机器人对地形的适应能力有了突破，但运动速度慢，且难以保持机身的平衡性，效率低。基于此，本文研究的六足仿生机器人在结合原有优点的基础上，进一步提高了机器人的运动稳定性和越障能力等。

1 六足机器人结构设计

本文设计的六足仿生机器人如图 1 所示，机械结构主要由机器人主体、机械手臂、6 条弧形腿和 2 个六边形机身组成，控制系统主要由 22 个 CDS5516 电机，树莓派控制器，摄像头及其他传感器构成。机器人本体控制器、电源、电机及传感器均匀分布，保证机器人重心位于正中心，脚末端设计防滑装置以保证机器人行走的稳定性。

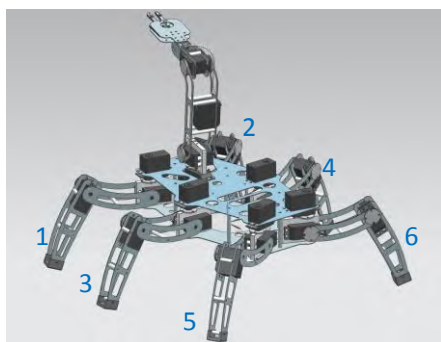


图 1 六足仿生机器人三维模型图

表 1 六足仿生机器人各零件参数

序号	名称	材料	长度/mm	质量/kg
1	六边形机身	铝合金	400	0.8
2	连杆 L_1	铝合金	5	0.02
3	连杆 L_2	铝合金	100	0.42
4	连杆 L_3	铝合金	130	0.56
5	防滑足套	ABS	20	0.01
6	机械手爪	铝合金	80	0.4

六足仿生机器人的腿部是三连杆，头部两端编号分别为 1、2 号腿，中间为 3、4 号腿，尾部为 5、6 号腿。单个的连杆长度分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 ，每条腿由 3 个关节和 3 个肢节组成。

各零件参数如表 1 所示。

CDS5516 电机的主要参数如表 2 所示。

表 2 CDS5516 电机主要参数

名称	参数
扭矩	16kgf cm
输出转速	0.16s/60°
电压	DC6.0V~16V
位置分辨率	0.32°
可串联单元	254 个
通讯波特率	1M
伺服更新率	0.25kHz

如图 2 所示，为避免六足仿生机器人在移动时腿部间产生干涉，将六边形结构机身和方形结构机身进行对比，三条支撑腿足端着地点形成的三角形范围包含了六足仿生机器人的重心投影。从图中可以看出 $D2 > D1$ ，因此六边形结构机身比方形结构机身更稳定，故采用六边形结构作为本文机器人的主体。

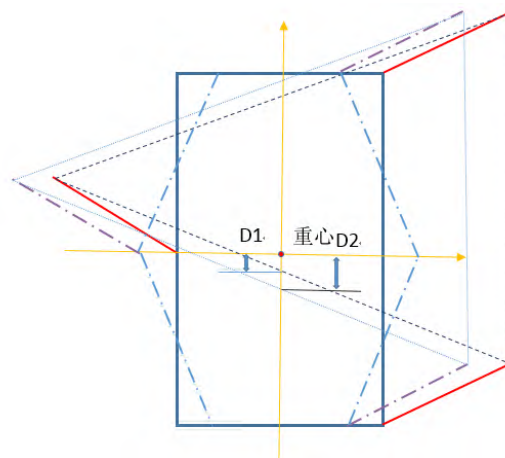


图 2 六边形机身与方形机身对照

2 六足仿生步态设计

2.1 直行步态设计方法

2.1.1 三足直行步态

本文设计的三足直行步态是保证机器人稳定行走的基础步态,此状态下机器人的承载能力最低,但运行速度最快,行走效率最高。如图3所示为六足仿生机器人的三足步态示意图。在 $t=T/2$ 的时候1、4、5号腿为摆动相的终止位姿,2、3、6号腿为支撑相的起始位姿。从 $t=T/2$ 到 $t=T$ 的时间里1号腿运动的长度为机器人的运动长度,根据周期计算,这个运动的长度算作机器人的半个步长。从 $t=T$ 到 $t=3T/2$ 的时间里1、4、5号腿作为支撑相运动,2、3、6号腿作为摆动相运动。所以三足步态是将1、4、5号腿和2、3、6号腿各为不同的两组,不断地交替运动使机器人持续前进。

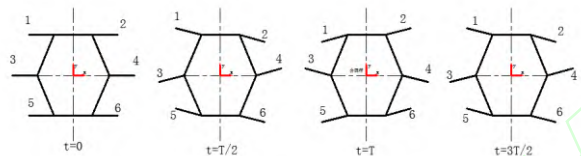


图3 三足直行步态图

2.1.2 四足直行步态

四足直行步态是比三足直行步态速度稍慢的一种步态如图4所示,在 $t=T/3$ 时,3、6号腿为摆动相的终止位姿,2、5号腿为摆动相的中点位置,1、4号腿为支撑相的终止位姿。当 $t=2T/3$ 时,1、4号腿为摆动相的终止位姿,3、6号腿为支撑相的中点位置,2、5号腿为支撑相的终止位姿。四足步态共有三种位姿方式,这个位姿方式一次有序循环交替变换就形成了四足步态的动作,此步态在运动的时候最多有6支脚与地面接触,是承载能力最强的状态,当机器人腿摆动起来就有4条腿与地面支撑,此时也是支撑腿最少的时候。支撑腿的数目随着运动变化造成机器人重心的波动。



图4 四足直行步态图

2.1.3 五足直行步态

六足仿生机器人的五足步态速度比四足步态和三足步态更慢,这种步态稳定裕度和承载能力最好。如图5所示,在运动中5条腿作为支撑相,一条腿

作为摆动相。最多的时候6条腿作为支撑相,因此五足步态是本次设计中稳定性最好的一种步态,但运动周期最长,位姿也最为复杂。设每条腿的极限摆动相位角为 θ ,各腿的相位按照运动顺序相位角差为 $\theta/5$,当中 $t=0$ 的时刻,1号腿是摆动相的终止位姿,其他各条腿都处于支撑相的某个位姿状态,摆动相一次从后向前运动整个极限夹角,支撑相每次都从前向后运动 $\theta/5$,他的运动周期分别是三足步态的3倍,四足步态的2倍,速度分别是三足步态的三分之一,四足步态的二分之一。因此五足步态是最慢的一种步态。

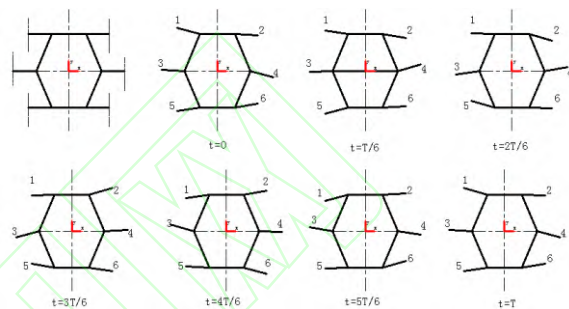


图5 五足直行步态图

2.2 原地转弯步态

六足仿生机器人以本体几何中心为中点,绕着圆心点改变机器人行走方向。以1、4、5号腿和2、3、6号腿各为一组,两组腿按照摆动相和支撑相交替运动,和三足直线步态不同的是,转弯步态的摆动动作不同。三足直线步态中的摆动相的脚从后向前摆动,支撑相的脚是从前向后摆动,而转弯步态中相同一组的腿是围绕中线旋转运行,如图6所示为向右转弯的步态。1、4、5号腿为摆动相,其中1、5号腿是从后向前摆动,而4号腿是从前向后摆动;2、3、6号腿为支撑相,其中2、6号腿都是从后向前摆动,3号腿是从前向后摆动。每条腿的运动轨迹都围绕中心点做圆弧运动,协同工作实现机器人的转弯。

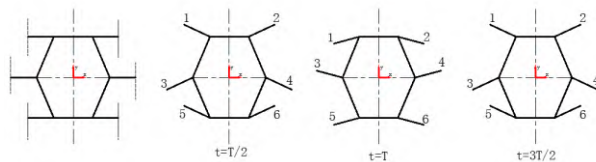


图6 原地转弯步态

3 机器人运动学及位姿仿真

3.1 D-H 坐标系的建立

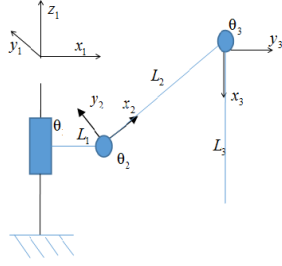


图7 腿部关节 D-H 坐标系示意图

如图7所示, 基于已有机器人学研究理论^[15], 建立腿部关节 D-H 坐标系。

由于腿部3个关节全都为转动关节, 所以 θ_n 是关节变量, 参数是不变的。首先确定各个连杆的 D-H 参数和关节变量, 如表3所示。

表3 腿部关节 D-H 参数

连杆 n	连杆夹角 θ_n	连杆扭角 α_n	连杆距离 d_n	连杆长度 a_n
1	θ_1	90°	0	L_1
2	θ_2	0	0	L_2
3	θ_3	0	0	L_3

3.2 机器人运动学正解

两连杆之间的位姿矩阵 A_n

$$A_n = Rot(Z, \theta_n) Trans(a_n, 0, d_n) Rot(X, \alpha_n)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_n & -\sin\theta_n & 0 & 0 \\ \sin\theta_n & \cos\theta_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_n \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_n & -\sin\alpha_n & 0 \\ 0 & \sin\alpha_n & \cos\alpha_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_n & -\sin\theta_n \cos\alpha_n & \sin\theta_n \sin\alpha_n & a_n \cos\theta_n \\ \sin\theta_n & \cos\theta_n \cos\alpha_n & -\cos\theta_n \sin\alpha_n & a_n \sin\theta_n \\ 0 & \sin\alpha_n & \cos\alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将表3的数据参数代入上式有:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & L_1 \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & L_1 \sin\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & L_2 \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & L_2 \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & L_3 \cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & L_3 \sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

机器人的运动方程为:

$$T_3 = A_1 A_2 A_3 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\cos\theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) & \sin\theta_1 & \cos\theta_1 [L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos\theta_2 + L_1] \\ \sin\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\sin\theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) & -\cos\theta_1 & \sin\theta_1 [L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos\theta_2 + L_1] \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

因此可得脚端落足点的坐标为:

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 [L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos\theta_2 + L_1] \\ \sin\theta_1 [L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos\theta_2 + L_1] \\ L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin\theta_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.3 机器人运动学逆解

六足仿生机器人的逆运动学是已知各足固定坐标的位置, 求解机器人各个关节的角度和各个连杆的位姿, 在求解过程中存在着无解或者多解的情况。由方程(6)式前两行变换相除可得:

$$\tan\theta_1 = \frac{\cos\theta_1 [L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos\theta_2 + L_1]}{\sin\theta_1 [L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos\theta_2 + L_1]} = \frac{y}{x} \quad (7)$$

由方程式(7)可得:

$$\theta_1 = \arctan \frac{y}{x} \quad (8)$$

由方程式(6)第一行的平方加上第三行的平方化解可得:

$$\theta_3 = \arccos \frac{\cos\theta_1^2 (Z^2 - 2Z + L_1^2) + X^2 - 2XL_1 \cos\theta_1 - \cos\theta_1^2 (L_3^2 + L_2^2)}{2L_2 L_3 \cos\theta_1^2} \quad (9)$$

求得 θ_3 , 再由方程式(6)变换可得:

$$(L_2 + L_3 \cos\theta_3) \sin\theta_2 + L_3 \cos\theta_2 \sin\theta_3 = Z \quad (10)$$

令 $a = L_2 + L_3 \cos \theta_3$, $b = L_3 \sin \theta_3$, 假设

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right)$$

则有:

$$\begin{cases} \sin \alpha = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \\ \cos \alpha = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \\ \tan \alpha = \frac{b}{a} \end{cases} \quad (11)$$

将上式代入 (3) 式可得:

$$\theta_2 = \arcsin \frac{z}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \alpha \quad (12)$$

将 $a = L_2 + L_3 \cos \theta_3$,

$$b = L_3 \sin \theta_3$$

$\alpha = \arctan \frac{L_3 \sin \theta_3}{L_2 + L_3 \cos \theta_3}$ 带入上述方程式有:

$$\theta_2 = \arcsin \frac{z}{\sqrt{L_2^2 + 2L_2L_3 \cos \theta_3 + L_3^2}} - \arctan \frac{L_3 \sin \theta_3}{L_2 + L_3 \cos \theta_3} \quad (13)$$

通过上面的推导计算可知摆动腿的足端对髋关节的运动学逆解。已知足端坐标 X、Y、Z 和各个杆件的参数 L_1 、 L_2 、 L_3 的情况下, 利用机器人逆运动学求解分析得到腿部结构关节的转角 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 。

3.4 仿真分析

3.4.1 支撑相轨迹分析

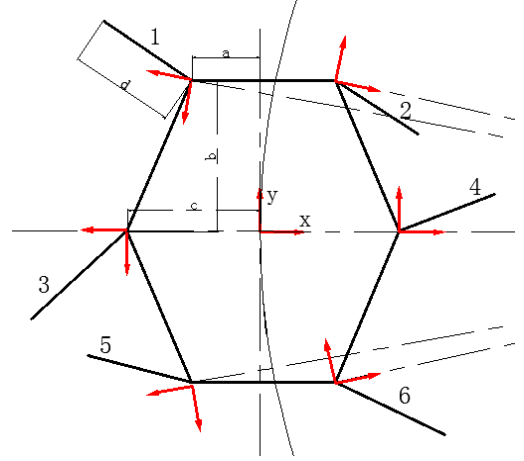


图8 六足仿生机器人相对坐标系图

根据本文设计的步态方法确定支撑相轨迹, 可以确定每条腿的足端运动轨迹为圆弧运动, 以髋节为原点建立坐标系, 计算每条腿距离圆心的距离, 如图8所示为六足仿生机器人的相对坐标系图。

则3号腿的运动轨迹为:

$$(x+R+c)^2 + y^2 = (R+c+L)^2 \quad (14)$$

1号腿和5号腿的运动轨迹为:

$$(x+R+a)^2 + (y-b)^2 = (R+a+L)^2 \quad (15)$$

$$(x+R+a)^2 + (y+b)^2 = (R+a+L)^2 \quad (16)$$

2号腿和6号腿的运动轨迹分别为:

$$(x-(R+a))^2 + (y+b)^2 = (R-(a+L))^2 \quad (17)$$

$$(x-(R+a))^2 + (y-b)^2 = (R-(a+L))^2 \quad (18)$$

4号腿运动轨迹为:

$$(x-(R+c))^2 + y^2 = (R-(c+L))^2 \quad (19)$$

当 R 趋于无穷大时, 联合三个关节的运动使支撑相相对于机身做直线运动, 靠着地面的摩擦驱动机器人向前运动。运动过程中足端的位置一直保持地面接触, 所以足端的位置一直保持在 X-Y 轴的平面内, 此时 $Z=0$, 支撑相足端的轨迹是一条与 Y 轴平行的直线。支撑相在与地面接触保持的点与原点之间保持的距离设为 120, 即 $X=120$, $Z=0$, 将实体的实际尺寸 $L_1=5$, $L_2=100$, $L_3=130$,

带入逆运动学方程, 求得 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 。

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan \frac{y}{120} \\ \theta_2 = \theta_1 = \arcsin \frac{-35}{\sqrt{100^2 + 2 \times 100^2 \times 130^2 \cos \theta_3 + 130^2}} - \arctan \frac{130 \times \sin \theta_3}{100 + 130 \times \cos \theta_3} \\ \theta_3 = \arccos \frac{\cos \theta_1^2 (35^2 + 5^2) + 120^2 - 2 \times 130 \times 5 \times \cos \theta_1 - \cos \theta_1^2 (130^2 + 100^2)}{2 \times 100^2 \times 130^2 \times \cos \theta_1^2} \end{cases} \quad (20)$$

用 MATLAB 进行关节角度和步长的关系如图 9 所示:

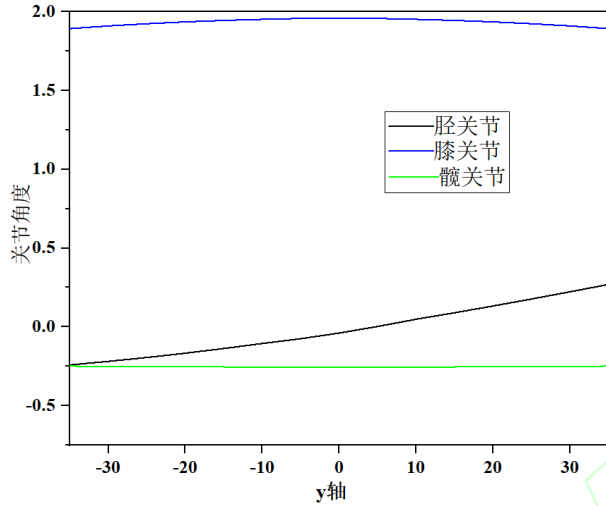


图 9 支撑相各关节与步长的关系图

3.4.2 摆动相轨迹分析

摆动相的轨迹主要用来实现机器人越障, 每条腿的摆动规律一致, 且与机器人腿的位置无关, 腿的轨迹为抛物线。前面分析可知每条腿的步长是变化的, 即极限位置之间的长度随曲率半径的长度而变化。设 Y-Z 平面函数顶点高度为 h_z , 斜率为 k_z ; Y-X 平面函数顶点高度为 h_x , 斜率为 k_x , 则有:

$$\begin{cases} k_z = -4h_z / m^2 \\ z = k_z \times y^2 + h_z \\ k_x = 4(L - h_x) / m^2 \\ x = k_x \times y^2 + h_x \end{cases} \quad (21)$$

确定了标准步长下的函数顶点高度, 步长缩短时, 为了保持六足仿生机器人运动的平衡, 对应的函数顶点高度相应降低, 因此存在实际运动函数和标准运动函数的变换。设步长变化为 Δm , Y-Z 平面函数变化高度为 Δh_z , Y-X 平面函数变化高度为

Δh_x , 则两者之间的变换为:

$$\begin{cases} \Delta h_z = k_z \times ((m - \Delta m) / 2)^2 + h_z \\ z = k_z \times y^2 + h_z - \Delta h_z \\ \Delta h_x = k_x \times ((m - \Delta m) / 2)^2 + h_x \\ x = k_x \times y^2 + h_x - \Delta h_x \end{cases} \quad (22)$$

根据函数关系结合实体尺寸带入公式, 可得机器人的轨迹图像如图 10 所示。

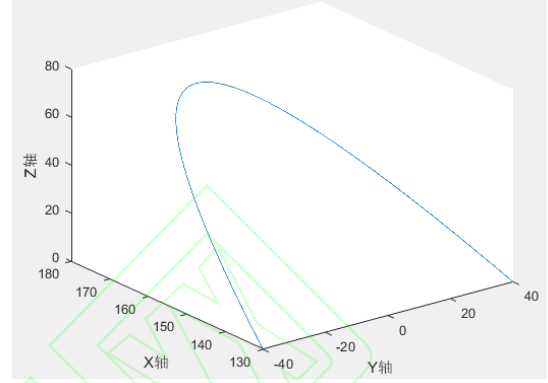


图 10 摆动相轨迹

由摆动相的运动轨迹结合机器人逆运算运动学方程, 髋关节、踝关节和膝关节之间的关节角度变化规律如图 11 所示。

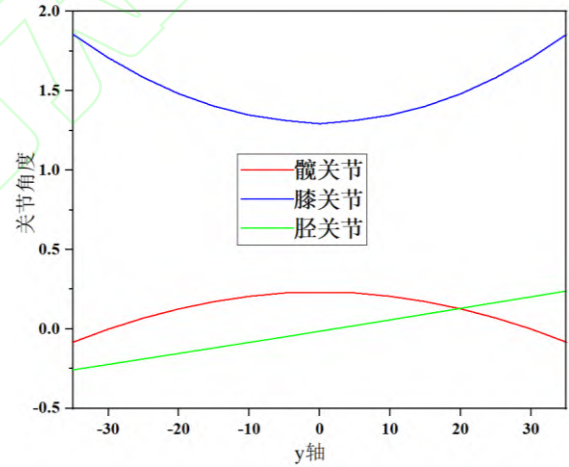


图 11 摆动相关节角度函数图

3.5 步态仿真实验验证

用 ADAMS 对六足仿生机器人的直线步态和转弯步态分别进行仿真, 验证机器人行走过程中的稳定性。为了使得仿生六足步行机器人运动平稳, 能够连续运动, 并减小冲击带来的负载, 我们选取 ADAMS 里边的三角函数进行设置。根据本文步态设计及其运动学推导的方程设置驱动函数并添加到 motion 模块当中。

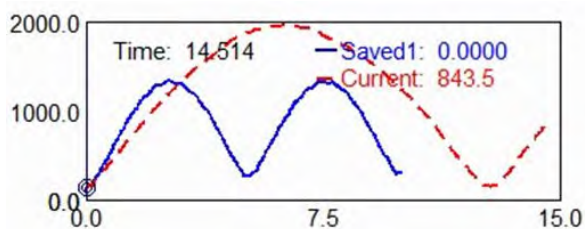


图 12 右侧步幅为 1.5 及 1.2 倍时 body 质心位移轨迹对比
本研究设置的机器人参数为：步长为 300mm；摆动时腿抬高为 80mm；仿真时间设为 10s，仿真步数为 200 步。仿真结果如图 12 和图 13 所示。

由图 12 发现，红色曲线为右侧步幅是左侧 1.2 倍时的机器人 body 质心处位移轨迹，蓝色曲线为右侧步幅是左侧 1.5 倍时机器人 body 质心处位移轨迹。可以看出，当右侧步幅减小为左侧步幅的 1.2 倍时，六足仿生机器人做圆周运动时转弯半径变大，此时波峰处位置大约在 2000mm 处，波谷处位置大约在 120mm 处，六足机器人的转弯半径为 940mm，即 0.94m。表示增大右侧步幅的情况下，右侧增大幅度越大，则机器人圆周行走的转弯半径越小，机器人越稳定。

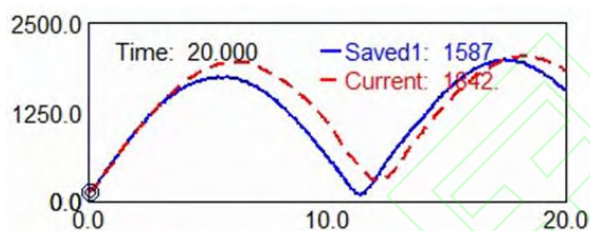


图 13 小腿宽度尺寸变为 0.5 倍时机器人 body 质心处位移轨迹对比

分析图 13 得到蓝色曲线为机器人原几何尺寸下的 body 质心处运动轨迹图，红色曲线为改变小腿几何尺寸至缩小宽度为 0.5 倍时的质心运动轨迹图，发现减小小腿宽度后转弯半径基本没有变化，机器人的运动速度减小，完成一圈圆周行走所需的时间变长，因此本步态设计具有一定的合理性。

本文设计的六足仿真机器人实物如图 14 所示。



图 14 六足仿生机器人实物图

机器人具有 18 个自由度，每个关节的角度主要是由步态规划所决定。根据本文设计的步态编写程序，采集 18 个关节中速度最小的进行数据采集，为

真实反映数据的采集次数和电机速度之间的关系，故设计一个转角为 300 度的测试程序研究他们之间的关系。如图 15 所示，随着速度增加，执行次数减少，执行精度降低。

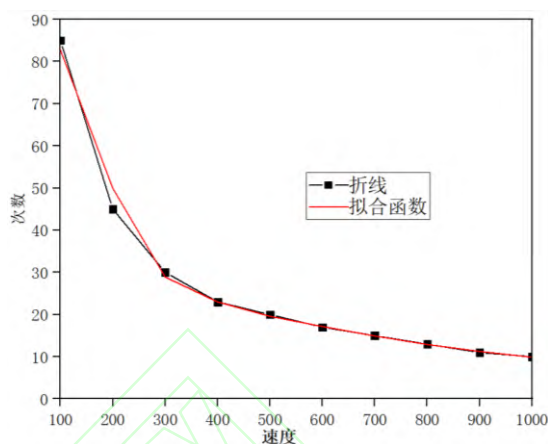


图 15 电机速度和执行次数的关系

4 结论

本文对六足仿生机器人结构特性分析的基础上，设计出几种典型步态的运动方法，通过建立 D-H 坐标系对机器人进行了运动学分析，并推导出运动方程；结合本文设计的步态方法和运动学方程对机器人进行仿真，验证步态方法的准确性和可行性；最后通过实物验证，解决了六足仿生机器人运动过程中的平衡问题，为后续多足类机器人的设计提供参考。

[参考文献]

- [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.
Tan M, Wang S. Research progress on robotics[J]. Acta Automatica Sinica, 2013,39(7):963-972. (in Chinese)
- [2] Cully A, Clune J, Tarapore D, et al. Robots that can adapt like animals[J]. Nature: International Weekly Journal of Science, 2015,521(7553):503-507.
- [3] Ijspeert A J. Biorobotics: Using robots to emulate and investigate agile locomotion[J]. Science, 2014, 346(6206):196-203.
- [4] Pfeifer R, Lungarella M, Iida F. Self-organization, embodiment, and biologically inspired robotics[J]. Science, 2007,318(5853):1088-1093.
- [5] 李满宏,张明路,张建华,就是等.六足机器人关键技术综述[J].机械设计,2015,32(10):1-8.
Li M H, Zhang M L, Zhang J H, et al. Review on key technology of the hexapod robot[J]. Journal of Machine

- Design,2015,32(10):1-8.(in Chinese)
- [6] 谢冬福,罗玉峰,石志新,等.六足农业机器人并联腿结构设计及位置分析[J].机械传动,2020,44(6):61-67.
Xie D F, Luo Y F, Shi Z X , et al. Structural design and position analysis of parallel leg of hexapod agriculture robot[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020,44(6):61-67.(in Chinese)
- [7] 卢展,蒋刚,李晨,等.六足机器人腿部损伤的容错行走研究[J].机械设计与研究,2020,36(1):68-74.
Lu Z, Jian G, Li C , et al. Study on fault-tolerant walking of hexapod robot with leg injury[J]. Machine Design and Research,2020,36(1):68-74.(in Chinese)
- [8] 白颖,蒋庆斌,莫莉萍,等.六足仿蜘蛛机器人的结构设计及仿真分析[J].机电工程,2019,36(7):732-735+743.
Bai Y, Jiang Q B, Mo L P , et al. Structural design and simulation analysis of hexapod bionic spider robot[J]. Journal of Mechanical Electrical Engineering, 2019,36(7):732-735+743.(in Chinese)
- [9] Zha F S, Chen C, Guo W, et al. A free gait controller designed for a heavy load hexapod robot[J]. Advances in Mechanical Engineering,2019, 11(3).
- [10] 张陈曦,吴胜权,何永,等.仿生步行机器人腿部八连杆机构轨迹优化[J].机械传动,2018,42(6):39-43.
Zhang C X, Wu S Q, He Y, et al. Trajectory optimization of eight-link mechanism for legs of walk bio-robot[J]. Journal of Mechanical Transmission,2018,42(6): 39-43.(in Chinese)
- [11] Zhang L, Wang F C, Gao Z H, et al. Research on the stationarity of hexapod robot posture adjustment[J]. Sensors,2020, 20(10).
- [12] 曹维清,熊一帆.六足机器人爬楼步态的力学仿真分析[J].现代制造工程,2019(10):40-44.
Cao C Q, Xiong Y F. Dynamic simulation analysis of six-legged robot in stair climbing[J]. Modern Manufacturing Engineering,2019(10):40-44.(in Chinese)
- [13] Kolter J Z, Ng A Y. The stanford little dog: A learning and rapid replanning approach to quadruped locomotion[J]. International Journal of Robotics Research, 2011,30(2): 150-174.
- [14] 樊启润,唐彪,孙开鑫,等.六足仿生机器人的设计与实现[J].计算机测量与控制,2019,27(5):245-250+270.
Fan Q R, Tang B, Sun K X, et al. Design and implementation of hexapod bionic robot[J]. Computer Measurement and Control,2019,27(5):245-250+270.(in Chinese)
- [15] 尹晓琳.六足仿生机器人步态规划及其控制策略研究[D].哈尔滨工业大学,2013.
Yin X L. Research on gait planning and control strategy for biomimetic hexapod robot[D]. Harbin Institute of Technology,2013.(in Chinese)