

文章编号 1004-924X(2002)04-0392-05

微型六足仿生机器人及其三角步态的研究

徐小云, 颜国正, 丁国清

(上海交通大学 信息检测技术及仪器系, 上海 200030)

摘要:基于仿生学原理,在分析六足昆虫运动机理的基础上,采用平面四连杆机构、蜗轮蜗杆减速机构、皮带传动机构、微型直流电机驱动和PC机控制方案,研制成一种新型“微型六足仿生机器人”,其样机外形尺寸为:长30mm,宽40mm,高20mm,重6.3g。讨论了该机器人的运动步态并分析了其运动稳定性,实验结果表明该机器人具有较好的机动性。

关键词:六足机器人;仿生机器人;连杆曲线图谱;三角步态
中图分类号:TP242 **文献标识码:**A

1 引言

自从人类发明了轮子并制成车以后,给生活确实带来了莫大的好处。从古代的木轮推车一直发展到今天形形色色的汽车,都采用了轮子技术。轮子为人类的生存和征服自然做出了重大的贡献。随着人类自身活动空间的扩大——开发宇宙、开发海洋,要在没有人工道路的自然环境下用轮子行走就有很多困难,有时甚至根本无法移动,因此设计和创造对自然环境具有高度适应能力的步行机构及对步行机构步态的研究显得越来越重要。

从1899年Muybridge用连续摄影方法研究动物的行走开始,人们对步行机构的步态进行了大量的研究工作,尤其是近二三十年来,关于步态研究的重要成果不断涌现^[1-2]。在60年代末,由于开发步行机器人的需要,McGhee在总结前人对动物步态研究成果的基础上,比较系统地给出了关于步态的一系列描述方法和分析步态的严格数学定义^[3],为步态的研究分析奠定了较为完整的数学基础。步态是步行机器人的一种迈步方式,是步行机器人各腿协调运行的规律,即各腿的抬腿和放腿顺序,它是研究步行机构的一个很重要的参数,是确保步行机构稳定运行的非常重要的因素^[4,7,8]。

基于仿生学原理,本文利用六套并联平面四连杆机构、微型直流电动机及相应的减速增扭机构研制了体积微小、具有良好的机动性、灵活性及对环境

适应能力强的“微型六足仿生机器人”。该机器人长为30mm,宽为40mm,高为20mm,重约6.3g。这种足式移动微型机器人配备相应的传感器和作业装置,可用于工农业生产的许多方面(如核工业中的管道裂缝检测、工农业设备的探测和检修等等)。

2 微型六足仿生机器人的三角步态运动原理

三角步态是六足机器人的两组腿(身体一侧的前足、后足与另一侧的中足),即处于支撑三角形上的三条腿的动作完全一样,均处于摆动相或均处于支撑相。

“六足纲”昆虫(蟑螂,蚂蚁等等)在平坦无阻的地面上快速行进时,多以交替的三角步态运动,即在步行时把六条足分为两组,以身体一侧的前足、后足与另一侧的中足作为一组,形成一个稳定的三角架支撑虫体,因此在同一时间内只有一组的三条足起行走作用:前足用爪固定物体后拉动虫体前进,中足用以支撑并举起所属一侧的身体,后足则推动虫体前进,同时使虫体转向,行走时虫体向前并稍向外转,三条足同时行动,然后再与另一组的三条足交替进行,两组足如此交替地摆动和支撑,从而实现昆虫的快速运动,其行走的轨迹线是一条锯齿状曲线。

机器人采用三角步态的运动示意图1所示:

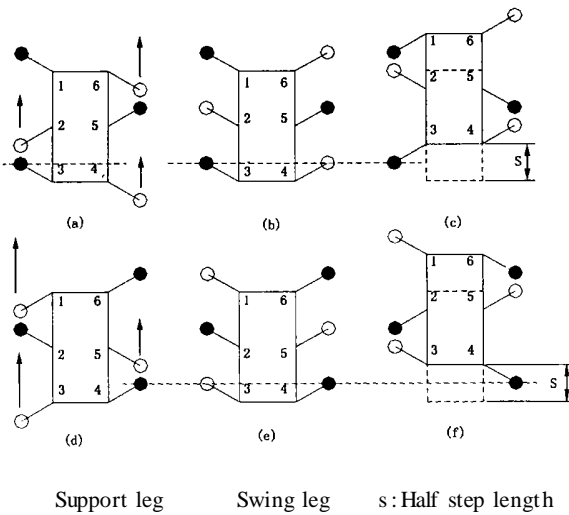


图 1 微型六足仿生机器人步态示意图

Fig. 1 Sketch map of the miniature hexapod bio-robot gait.

机器人开始运动时,左侧的 2 号腿和右侧的 4、6 号腿抬起准备向前摆动,另外 3 条腿 1、3、5 处于支撑状态,支撑机器人本体确保机器人的原有重心位置处于 3 条支撑腿所构成的三角形内,使机器人处于稳定状态不至于摔倒(见图 1(a)),摆动腿 2、4、6 向前跨步(见图 1(b)),支撑腿 1、3、5 一面支撑机器人本体,一面在小型直流驱动电机和皮带传动机构的作用下驱动机器人本体,使机器人机体向前运动了半个步长 s (见图 1(c))。

在机器人机体移动到位时,摆动腿 2、4、6 立即放下,呈支撑态,使机器人的重心位置处于 2、4、6 三条支撑腿所构成的三角形稳定区内,原来的支撑腿 1、3、5 已抬起并准备向前跨步(见图 1(d)),摆动腿 1、3、5 向前跨步(见图 1(e)),支撑腿 2、4、6 此时一面支撑机器人本体,一面驱动机器人本体,使机器人机体又向前运动了半个步长 s (见图 1(f)),如此不断从步态(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)、(a),循环往复,周而复始实现机器人不断向前运动。

3 微型六足仿生机器人三角步态设计

步态设计是实现步行的关键之一,为达到较为理想的步行,考虑下列要求:(1) 步行平稳、协调,进退自如,无左右摇晃及前后冲击;(2) 机体和

关节间没有较大的冲击,特别是在摆动腿着地时,与地面接触为软着陆;(3) 机体保持与地面平行,且始终以等高运动,没有明显的上下波动;(4) 摆动腿跨步迅速,腿部运动轨迹圆滑,关节速度与加速度轨迹无畸点;(5) 占空系数 的合理取值。

3.1 腿部动作与占空系数

图 2 为一个步行周期 T 中六足机器人的摆动相与支撑相的交替过程。根据占空系数 的大小可分为 3 种情况:(1) $= 0.5$, 在三摆动腿着地的同时,另外三支撑腿立即抬起,即任意时刻同时只有支撑相或摆动相(见图 2(a));(2) > 0.5 , 机器人移动较慢时,摆动相与支撑相有一短暂的

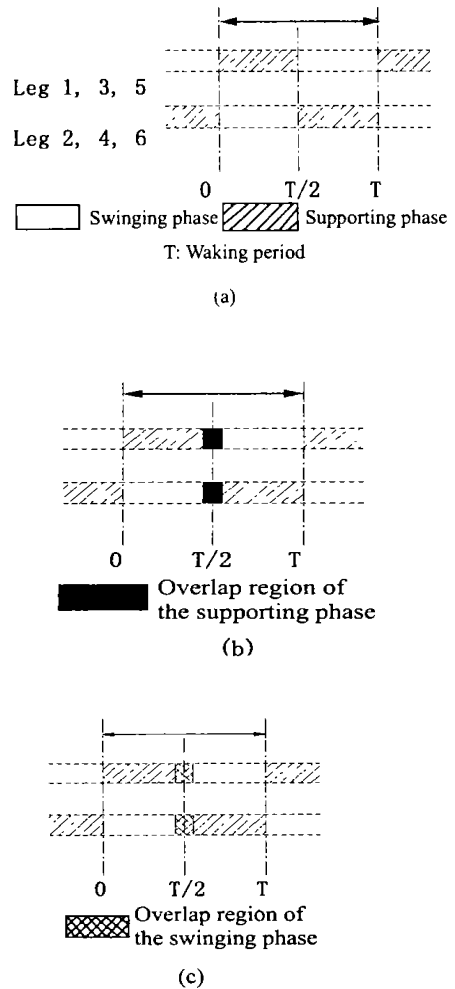


图 2 机器人三角步态的摆动相与支撑相

Fig. 2 Supporting and swinging phases of the robot's tripod gait.

重叠过程,即机器人有六条腿同时着地的状态(见图 2(b));(3) < 0.5 , 机器人移动较快时,六条腿有同时为摆动相的时刻,即六条腿同时在空中,

处于腾空状态(见图 2(c)),显然此交替过程要求机器人机构具有弹性和消振功能,否则难以实现。本文所研究的六足机器人的步态是 $\tau = 0.5$ 时的状态。

3.2 微型六足仿生机器人的足端运动轨迹曲线的确定

在进行步行机构的运动仿真设计时,如果将腿直接连在轴上则足端轨迹为圆形。这样机器人的运动将会呈半圆状起伏,如果能够使得足端轨迹在触地的部分保持平整就可以保持机器人的平稳前进。况且步行机器人要求有很强的环境适应能力,它必须能够在平面、台阶上稳定地行走,又能够跨越障碍、横沟,不同的路面对轨迹曲线有不同的要求:对于平地路面要求有一定的速度,对于台阶要求能够抬起并越过,对障碍物要求顺利跨越,可见足端运动轨迹的选择对于步行机器人来说显得非常重要。

选择足端运动轨迹曲线时应主要考虑以下问题^[4]:

(a) 曲线的高宽比:曲线的高宽比直接反应出曲线的运动特性。该比值越大则足端运动轨迹曲线越高,相应的跨越台阶的能力就越强同时前进特性(运动速度)就越差。

(b) 曲线弧长:在曲线宽度一定的情况下,曲线长度越长,在空中运动的时间就越长,这将直接影响到摆动腿的速度,进而影响到步行机的运行速度。曲线弧长越短,运动时间就越短,但相应的跨越能力就越差。

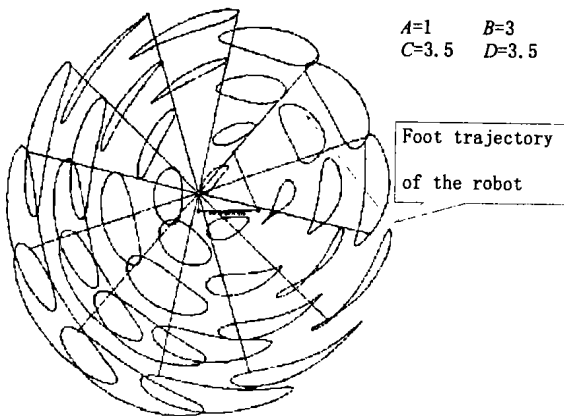


图 3 四连杆曲线图谱

Fig. 3 Atlas of the four-bar linkage s curve.

根据步行机的行走要求,初步确定足端运动曲线的高宽比和曲线弧长,然后利用事先编就的连杆曲线图谱^[5](如图 3 所示),从图谱中找出与要求相近的所需的运动轨迹曲线,然后直接查出该四杆机构的各个尺寸参数。

本文所设计的仿生机器人的步距为 3mm,所选的用来作为机器人足端运动轨迹的曲线(见图 3)的平坦部分(即机器人运动时足端触地的部分)的长度约为 3mm,由此可以确定平面四连杆机构中各个杆件的长度为:曲柄 $A = 1\text{mm}$ 、连杆 $B = 3\text{mm}$ 、摇杆 $C = 3.5\text{mm}$ 、固定杆 $D = 3.5\text{mm}$ 。

4 微型六足仿生机器人三角步态的稳定性分析

如图 4 所示:点 A 、 B 、 C 分别是六足机器人的左前腿、右中腿、左后腿在地面上的支撑点。三角形 ABC 是由三条支撑腿所构成的一组支撑三角形。取机器人本体的重心 O 为坐标原点, Y 的正方向为机器人的前进方向,设支撑点 A 、 B 、 C 的水平坐标分别为 $A(x_A, y_A)$ 、 $B(x_B, y_B)$ 、 $C(x_C, y_C)$,各点的 z 坐标都相同,点 A 、 B 、 C 是机器人重心到支撑三角形各边的垂足点, d_1 、 d_2 、 d_3 是重心到各边的相应的距离。

直线 AB 的方程为:

$$y = \frac{y_A - y_B}{x_A - x_B} (x - x_A) + y_A$$

斜率 $K_{AB} = \frac{y_A - y_B}{x_A - x_B}$, 则直线 OA 的斜率

$$K_{OA} = \frac{x_A - x_B}{y_B - y_A}.$$

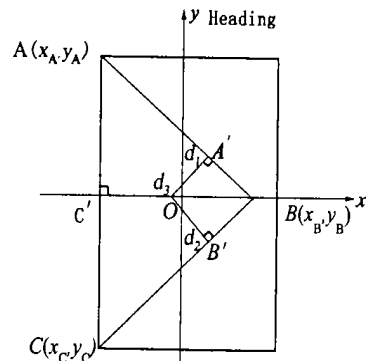


图 4 三角步态稳定裕量计算图

Fig. 4 Calculating chart for the tripod gait s stable threshold limit.

其直线方程为: $y = \frac{x_A - x_B}{y_B - y_A} x$, 以上两直线 AB 和 OA 的交点 A 的坐标为:

$$A \left(\frac{(x_A y_B - y_A x_B)(y_B - y_A)}{d_{AB}^2}, \frac{(x_A y_B - y_A x_B)(x_A - x_B)}{d_{AB}^2} \right)$$

式中 d_{AB}^2 是线段 AB 的距离的平方。

线段 OA 长: $d_1 = \sqrt{x_A^2 + y_A^2}$, 同理可以求得 d_2, d_3 。

则六足机器人以三角步态行走时,其最小稳定裕量判据为: $d = \min\{d_1, d_2, d_3\}$ 。

5 微型六足仿生机器人的驱动与控制

5.1 微型六足仿生机器人的电机驱动电路

本文设计的微型六足仿生机器人的驱动源采用日本制造的小型直流驱动电机,控制方案使用 PC 机 + 控制箱进行直接控制。电机驱动电路由串行接口、串行 - 并行转换器、74LS373 锁存器、DAC0832、集成运放组成,如图 5 所示。

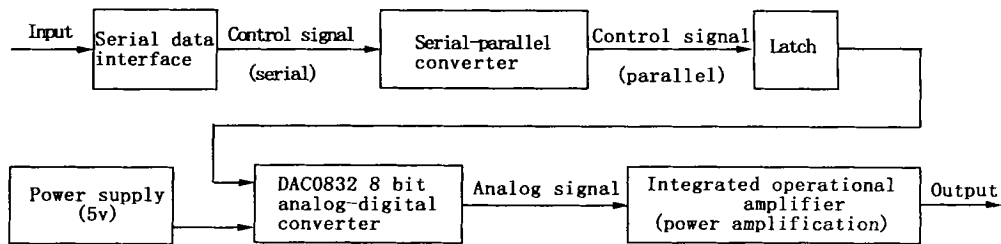


图 5 电动驱动电路原理图

Fig. 5 Schematic drive circuit diagram of the motor.

对于第二种调速方法,加入串联调节电阻 R_{ij} 后的电机转速总是比原来低,因此这种方法只能将转速往低调。另外当电枢电流 I_a 较小时,加入电阻 R_{ij} 后的电压变化不大,电机转速变化也不大,这种方法不宜采用。对于第三种调速方法,由于电枢回路中的电气时间常数较大,这种调速方法有一定的滞后,即调速的快速性较差。本文设计的机器人采用第一种调速方法,通过软件控制串行口输出一串二进制数到 DA 转换器,经 DA 转换后得到电机运转所需的直流电压后实现对仿生机器人运动的控制。不同的二进制数可以得到不同的电压,从而机器人的运动速度也不一样。

采用串行口作为数据通讯线路,将由程序控制部分产生的指令转化为一系列的二进制数输出,经过串行 - 并行转换器转变为所需要的并行数字信号。数字信号经 74LS373 锁存器锁存,使得控制信号在下一个命令到来之前能够保持不变。锁存信号作为 DAC0832 的数字信号输入端, DAC0832 利用计算机内部标准电源 ($\pm 5V$) 作为参考电源,将数字信号转换为模拟信号。为了保证电机的驱动功率,在模拟信号输出端加上由多级运算放大器组成的功率放大部分,提供直流电机的电流,而电压采用由 DAC0832 输出模拟电压直接驱动。至此,将由程序控制产生的控制信号,经过串并行转换、数模转换、功率放大,以驱动直流电机,从而完成机器人的运动,机器人的运动方向(前进、后退)由驱动电压的极性来控制。

5.2 微型六足仿生机器人的步行速度的控制

由公式^[6] $n = \frac{U_a - I_a(R_a + R_{ij})}{C_e \phi}$ 可以看出电机的调速方法有三种:(1) 改变电机的端电压 U_a ,也就是改变电枢电源电压;(2) 在电枢回路中串联调节电阻 R_{ij} ;(3) 改变磁通 ϕ 。

6 微型六足仿生机器人的实验结果及分析

根据前面所述的原理和设计方案,制作了仿生机器人的样机,其基本结构尺寸为:长 30mm,宽 40mm,高 20mm,重 6.3g。整个仿生机器人的实物如图 6 所示。

对样机的测试结果显示机器人运动平稳,其步行速度达到 3mm/s,即每秒一步,但会在运动一段时间后在原地停滞一小段时间,而且机器人的重心轨迹也不是直线而是类似于波浪形的曲线,与理论上的轨迹曲线有一定的偏差。分析其

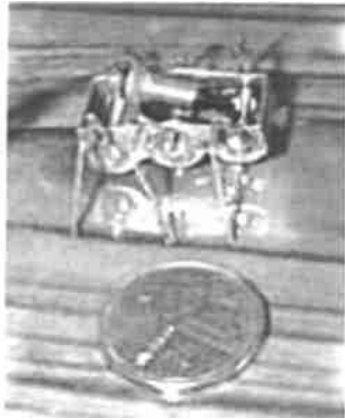


图 6 微型六足仿生机器人

Fig. 6 Photo of the miniature hexapod bio-robot.

原因主要是由于(1)皮带轮打滑带来的相位差累积到一定程度后,两组足之间的相位差不是 180°

所造成的。(2)零件的加工误差特别是连杆的加工误差所引起的。连杆的加工误差导致机器人运动时各足轨迹不一致,进而导致行进路线出现偏差。

7 结论

基于仿生学原理,在分析六足昆虫运动机理的基础上,利用连杆曲线图谱确定了用做机器人行走机构的平面四连杆的尺寸,采用微型直流电机、蜗轮蜗杆减速机构、皮带传动机构,本文研制成一种新型“微型六足仿生机器人”,并对该机器人样机进行了实验,实验结果表明该机器人具有较好的机动性。

下一步的工作包括:在驱动电路中拟增加形状记忆合金丝的驱动电路,利用形状记忆合金丝驱动机器人,实现更复杂更灵活的步态。

参考文献:

- [1] Song Sh M, Waldron KJ. *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle* [M]. The MIT Press, 1989.
- [2] Zhang C D. A Study of the Stability of Generalized Wave Gaits[J]. *Mathematical Biosciences*, 1993, 115:1 - 32.
- [3] McGhee R B. Some Finite State Aspects of Legged Locomotion[J]. *Mathematical Biosciences*, 1968, 2(1/2):67 - 84.
- [4] 蒋新松. 机器人学导论[M]. 辽宁:辽宁科学技术出版社, 1994.
- [5] 李学荣, 应瑞森, 付俊庆, 等. 连杆曲线图谱[M]. 重庆:重庆出版社, 1993.
- [6] 陈隆昌. 控制电机[M]. 西安:电子科技大学出版社, 2001.
- [7] 熊翔, 颜国正, 丁国清, 等. 基于蛇类生物的仿生变体机器人运动学研究[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(4):330 - 333.
- [8] 徐小云, 颜国正. 遗传算法及其在机器人控制中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(4):334 - 338.

Research on miniature hexapod bio-robot and its tripod gait

XU Xiao-yun, YAN Guo-zheng, DING Guo-qing

(Department of Information Detecting Technology and Instrument,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Based on the principle of bionics and analysis of the movement mechanism of hexapod, a new type of miniature hexapod bio-robot was developed by using four-bar linkage, screw gearing, belt gear, driven by D. C. micromotor and controlled by PC. The external dimensions of the model machine are 30mm \times 40mm \times 20mm and its weight is 6.3 g. The robot's movement gait and the movement stability are analyzed in this paper. The experimental results show the robot has good mobility.

Key words: hexapod robot; bionic robot; link curve atlas; tripod gait

作者简介: 徐小云(1974-),男,浙江江山市人,上海交通大学电子信息学院在读博士生,研究方向:微特机器人,多机器人分布式智能控制。E-mail: xuxiaoyun@sjtu.edu.cn 或 xxysjtu@hotmail.com