

文章编号: 1002-0446(2002)05-0427-05

## 六足移动式微型仿生机器人的研究\*

徐小云 颜国正 丁国清 刘 华 付 轩 吴 岩

(上海交通大学信息检测技术及仪器系 上海 200030)

**摘 要:** 本文描述了一种微型六足仿生机器人的结构与控制, 分析了这种微型六足仿生机器人的移动原理. 该机器人基于仿生学原理, 结构独特、简单、新颖, 能方便地实现前进和后退, 其样机外形尺寸为: 长 30mm, 宽 40mm, 高 20mm, 重 6.3g. 并对该样机进行了实验, 实验结果表明该机器人具有较好的机动性.

**关键词:** 六足机器人; 仿生机器人; 连杆曲线图谱; 步态

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** B

## RESEARCH ON MINIATURC HEXAPOD BIO-ROBOT

XU Xiao-yun YAN Guo-zheng DING Guo-qing LIU Hua FU Xuan WU Yan

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

**Abstract:** This paper for describes the structure and control of a new kind of miniaturc hexapod bio-robot, analyzes the moving principles for robot. The robot is based on the principles of bionics, its structure is simple, design novel and unique. It can move forwards and backwards. The external dimensions of bio-robot is: length 30 millimeter, width 40 millimeter, height 20 millimeter, weight 6.3 gram. Some tests about the model robot are made, the experimental results show that the robot has good mobility.

**Keywords:** hexapod robot, bionic robot, link curve atlas, gait

### 1 引言(Introduction)

近年来, 为实现生产过程自动化, 已有不少操作机器人广泛应用于工厂的各个生产过程, 尤其是那些人力所限和人所不及的外部环境或危险场所, 将是机器人进一步发展的应用领域.

移动机器人中轮式或履带式移动方式已获得广泛的应用, 但是足式移动方式具有轮式和履带式移动方式所没有的优点, 足式移动方式的机器人可以相对较易地跨过比较大的障碍(如沟、坎等), 并且机器人的足所具有的大量的自由度可以使机器人的运动更加灵活, 对凹凸不平的地形的适应能力更强. 足式移动机器人的立足点是离散的, 跟地面的接触面积较小, 可以在可达到的地面上选择最优支撑点, 即使在表面极度不规则的情况下, 通过严格选择足的支撑点, 也能够行走自如, 因此, 足式步行机器人的研究已成为机器人学中一个引人注目的研究领域, 特别是微型机器人, 现已成为国际科技界的一个热点——微电子机械系统(MEMS)研究开发的重要分

支. 它在军事国防、生物医学、航空航天、工业农业等领域都有广泛的应用前景.

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(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原理及构造(Principle and structure of miniature hexapod bio-robot)

#### 2.1 微型六足仿生机器人的运动原理

“六足纲”昆虫(蟑螂, 蚂蚁等)在步行时把六条足分为两组, 以一边的前足, 后足与另一边的中足为一组, 形成一个三角架支撑虫体, 因此在同一时间只

\* 基金项目: 上海市曙光计划资助项目.

收稿日期: 2002-04-02

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边的身体, 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, 然后再与另一组三条足交替进行, 这样行走的轨迹线是一条锯齿状曲线。

本文所设计的机器人的步态<sup>[1]</sup>如图 1 所示:

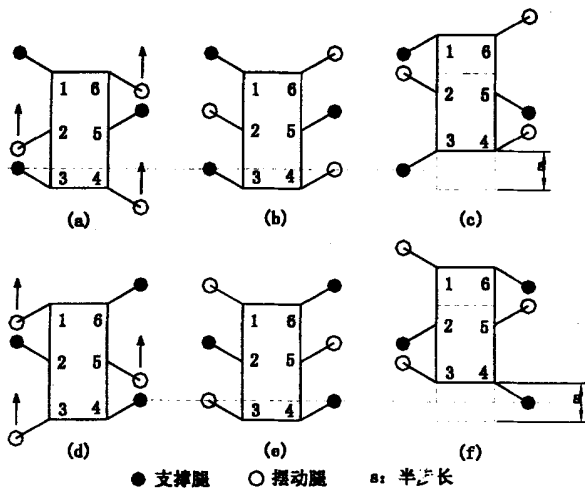


图 1 微型六足仿生机器人步态示意图

Fig. 1 The sketch map of miniature hexapod bio-robot's 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, 另外三条腿 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三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一个半步长  $s$ (见图 1(c))。

在机器人机体移动到这时, 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, 使机器人机体向前运动一个步长  $s$ (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。

### 2.2 微型六足仿生机器人的结构

图 2 所示为本文所设计和制作的微型六足仿生机器人的结构简图。由图 2 可知, 该微型仿生机器人

由小型直流驱动电机(其规格为  $\varnothing 6 \times 12 \text{mm}$ ), 蜗轮蜗杆减速机构, 皮带传动机构, 六套平面四连杆机构等组成。

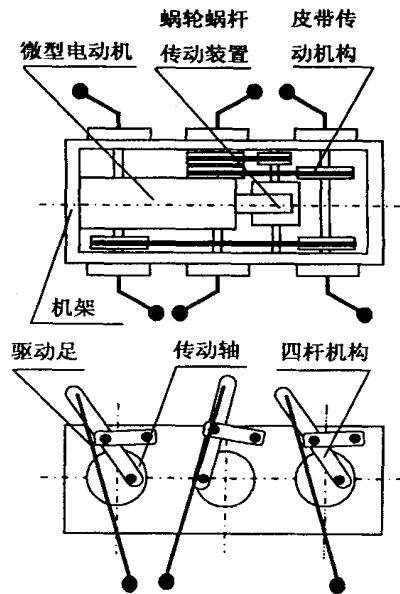


图 2 微型六足仿生机器人的结构简图

Fig. 2 Structure sketch of miniature hexapod bio-robot

在进行步态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。为了便于设计, 我们采用图谱法, 即利用事先编就的连杆曲线图谱<sup>[2]</sup>(如图 3 所示), 从图谱中找出所需的运动轨迹曲线, 然后直接查出该四杆机构的各尺寸参数。

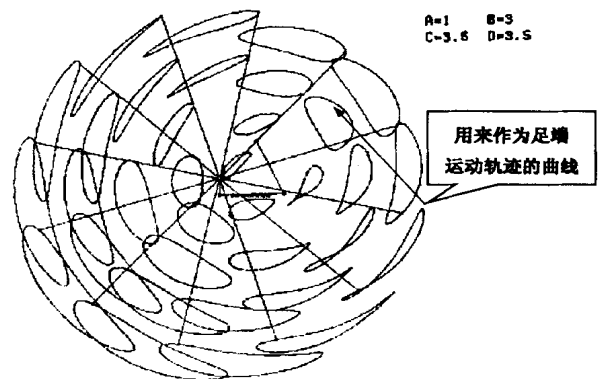


图 3 四连杆曲线图谱

Fig. 3 The atlas of four-bar linkage

首先, 从连杆曲线图谱中查出形状与要求实现的足端运动轨迹相似的连杆曲线; 其次, 按照图谱上的文字说明得出所选的连杆曲线所对应的四杆机构中各杆长度的比值; 再次, 用缩放仪求出图谱中的连

杆曲线和所要求的足端运动轨迹之间相差的倍数, 并由此确定所求四连杆机构中各杆的真实尺寸; 最后, 根据连杆曲线上的小圆圈与铰链 B、C 的相对位置, 即可确定描绘轨迹之点在连杆上的位置。

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 = 1mm、连杆 B = 3mm、摇杆 C = 3.5mm、固定杆 D = 3.5mm。

### 3 微型六足仿生机器人稳定性分析及其倒立摆模型(The stability analysis of miniature hexapod bio-robot and its inverted pendulum modeling)

#### 3.1 稳定性分析<sup>[3]</sup>

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<sub>A</sub>, y<sub>A</sub>)、B(x<sub>B</sub>, y<sub>B</sub>)、C(x<sub>C</sub>, y<sub>C</sub>), 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<sub>1</sub>、d<sub>2</sub>、d<sub>3</sub> 是重心到各边的相应的距离。

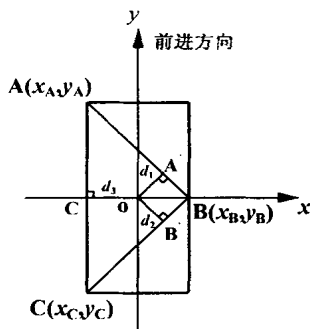


图 4 三角步态稳定裕量计算图

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

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  $K_{OA'} =$

$\frac{x_A - x_B}{y_B - y_A}$ , 其直线方程为:

$$y = \frac{x_A - x_B}{y_B - y_A}x, \text{ 以上两直线 AB 和 OA' 的交点 A'}$$

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

$$d = \min\{d_1, d_2, d_3\}$$

#### 3.2 倒立摆模型

由于本文所设计的机器人采用三角步态, 在任何时刻, 同组的三条腿一起运动, 三条腿的动作几乎完全一致, 可以等效为一条腿<sup>[4]</sup>, 其模型如图 5 所示。

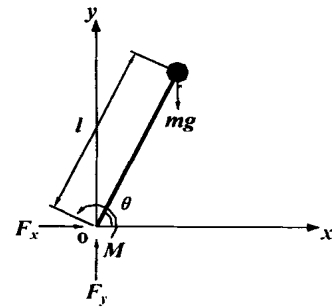


图 5 六足机器人腿的倒立摆运动模型

Fig. 5 Inverted pendulum modeling of the hexapod robot's leg

为了便于分析, 本文假定机器人的质量集中于腿(连杆)的一端, 并且机器人的腿(连杆)不计质量。如图 5 所示: M 是作用在机器人上面的驱动力矩, F<sub>x</sub> 和 F<sub>y</sub> 是地面作用于机器人支撑腿上的反作用力, g 是重力加速度, l 是腿(连杆)长, θ 是机器人支撑腿与地面在水平方向上的夹角, 由此得出下式

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_x \\ m\ddot{y} = F_y - mg \\ I\ddot{\theta} = F_x \sin\theta - F_y \cos\theta + M \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\begin{cases} x = l \cos\theta \\ y = l \sin\theta \end{cases}$  代入式(1)并化简可以得到如下式所示的机器人运动数学模型

$$\begin{bmatrix} I & -l \sin\theta & l \cos\theta \\ m l \sin\theta & 1 & 0 \\ -m l \cos\theta & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M \\ -m l \cos\theta \ddot{\theta}^2 \\ -m l \sin\theta \ddot{\theta}^2 + mg \end{bmatrix}$$

由此模型可以得到如图 6、7 所示的机器人在行走时

腿和地面的接触力的仿真结果.

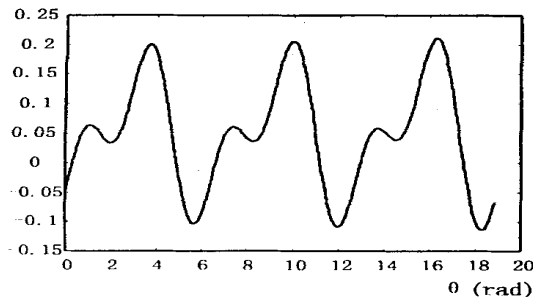


图 6 水平方向上的接触力  
Fig. 6 The horizontal contact force

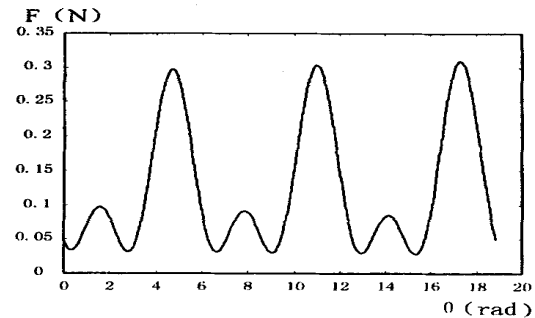


图 7 垂直方向上的接触力  
Fig. 7 The vertical contact force

#### 4 微型六足仿生机器人的驱动与控制(The drive and control of miniature hexapod bio-robot)

##### 4.1 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 8 所示.

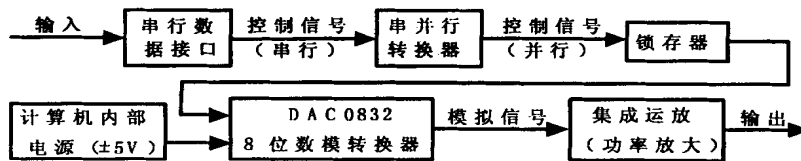


图 8 电机驱动电路原理图

Fig. 8 Schematic drive circuit diagram of motor

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(±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.

##### 4.2 微型六足仿生机器人的步行速度的控制

由公式<sup>[5]</sup> $n = \frac{U_a - I_a(R_a + R_{ij})}{C_e \Phi}$  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  $\Phi$

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.

#### 5 微型六足仿生机器人控制软件的设计(Control software designing of miniature hexapod bio-robot)

机器人控制界面的设计是这一部分的一大重

点. 一个好的控制界面可以给使用者带来极大的方便, 帮助了解机器人的运动状态, 方便直观地控制机器人的运动. 本文的控制界面采用 Visual C++ 语言编程. 整个控制是基于 Windows 平台下进行的, 在程序设计过程中, 主要采取了两大部分的设计: 步态控制部分和仿真部分. 在控制部分中使用 Visual C++ 提供的 App Wizard 建立一个普通的程序框架, 使用游标控件控制电机的转速, 从而控制机器人的爬行速度, 在控制与仿真之间采用了时钟控件, 使得控制部分的命令在实际中和电脑仿真中同步. 程序流程图和控制与仿真界面分别如图 9、10(略)所示.

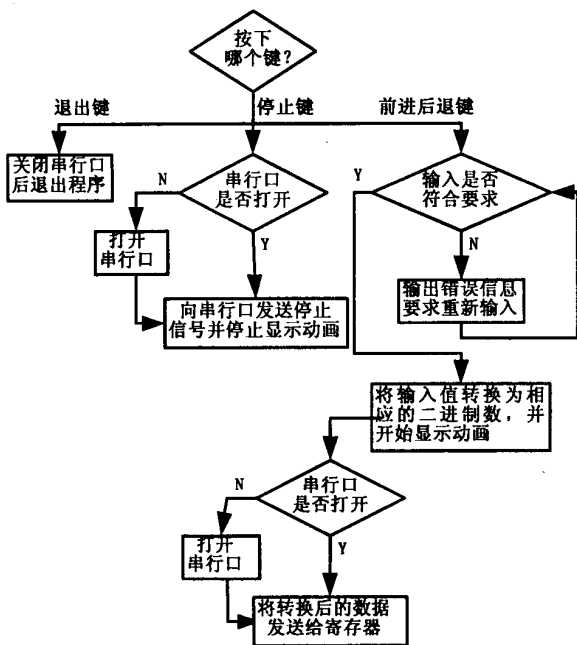


图 9 程序流程图

Fig. 9 Program flow diagram

## 6 微型六足仿生机器人的实验结果及分析 (Experimental result and its analysing)

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 11 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.



图 11 微型六足仿生机器人实物照片

Fig. 11 The photo of miniature hexapod bio-robot

## 7 结论 (Conclusion)

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 (References)

- [1] 陈佳品, 程君实, 冯萍, 马培荪等. 四足机器人对角小跑步态的研究. 上海交通大学学报, 1997, 31(6): 18- 23
- [2] 李学荣, 应瑞森, 付俊庆, 朱桥 编制. 连杆曲线图谱. 重庆出版社
- [3] 蒋新松 主编. 机器人学导论. 辽宁科学技术出版社
- [4] K S Lian, Legged Robot. Intelligent Systems for the 21st Century. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1995, 2: 1297- 1302
- [5] 陈隆昌 主编. 控制电机. 西安电子科技大学出版社

## 作者简介:

徐小云 (1974-), 男, 浙江人, 上海交通大学电子信息学院在读博士生. 研究领域: 微特机器人, 多机器人分布式智能控制.

颜国正 (1961-), 男, 湖南人, 上海交通大学电子信息学院博士生导师, 电子信息学院信息检测技术及仪器系系主任. 研究领域: 微型机器人, 特种机器人, 人工智能领域.