

新型微型六足机器人的运动原理及控制程序

张 涛, 颜国正, 刘 华

(上海交通大学测控技术与仪器系, 上海 200240)

摘 要: 介绍了一种微型六足机器人的新结构, 该结构将直线行进运动与转向运动合理地结合了起来, 论述了这种新型结构的运动结合原理以及基于 IO 板的机器人控制系统 VB 软件编程, 分析了机器人的运动稳定性和灵活性, 给出了实验结果和分析。成功制作了机器人样机——“银甲虫 1 号”, 其大小为: 半径 3cm, 高 4.2cm, 重 49g。实验证明“银甲虫 1 号”运动灵活可靠, 有很好的机动性。

关键词: 六足机器人; 仿生机器人; 微型机器人; IO 板; 机器人运动控制程序

Kinematical Principles and Movement Control Program of New Miniature Bionic Hexapod Robot

ZHANG Tao, YAN Guozheng, LIU Hua

(Dept. of Measurement & Control Technology and Instrument, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

【Abstract】 This paper introduces a new mechanics of miniature bionic hexapod robot, which combines motion with rotation rationally. The following introduction is focused on the special combination method and program design of the robot's control system and the analysis of the kinematical stability and flexibility of the robot. In the end, it presents some experimental results and analyses. A robot prototype have been successfully maden according to the new mechanics, and it is named “Silver Scarab I”. The size of the prototype is 3cm in radius, 4.2cm in height, and it weighs 49g. The experimental result shows that the “Silver Scarab I” is very agile and reliable.

【Key words】 Hexapod robot; Bionics robot; Miniature robot; IO board; Program of robot's movement control

本文在仔细研究昆虫实现爬行的运动学机理的基础上, 针对微型仿生六足机器人直线运动与转弯运动的合理、有效结合问题, 设计出一种可实现自由前进、后退与转弯的微型仿生六足机器人——“银甲虫 1 号”。本文介绍了“银甲虫 1 号”的步行原理以及基于 IO 板的控制系统及其 VB 程序设计。

1 步行原理

本文所设计的机器人模仿昆虫爬行的脚的运动方式, 将 6 只足分为两组, 每组 3 个等边分布在外接圆半径为 R 的正三角形 3 个顶点上, 如图 1 所示。

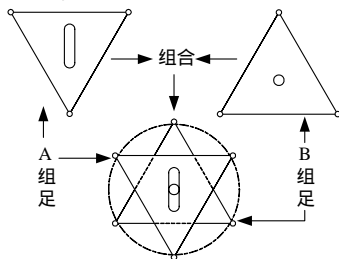


图 1 步足结构示意图

机器人在行走过程中, 两组足交替支撑。两组足中的任一组三足可独立支撑起整个机器人身体, 机器人重心始终落在 A 组或 B 组三足的三角形区域内, 因此在平面爬行中没有倾覆的危险。

机器人具有独立的直行和转弯机制, 二者可在各自的允许范围内以任意方式结合, 这就使得机器人的爬行十分灵活。

2 结构设计

图 2 是本文设计和加工的微型六足爬行机器人的结构。部件 A、B 由特殊的驱动器 C 桥接成机器人主体。C 包含两

个独立的驱动器, 分别是与 A 相连的直线驱动器和与 B 相连的转角驱动器。两个驱动器都由步进电机精确驱动。因此, A 仅可相对 C 做最大行程为 L 的直线运动, B 仅可相对 C 做最大转角为 2 的转动。

显然, 这里的 L 和 2 受到空间的约束有一定的界限, 对于本设计, 取 $2=30^\circ$, $L=0.5R$, 验证直线运动与转动无干扰如图 3 所示。

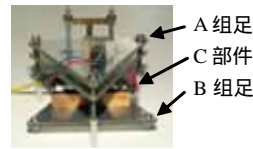


图 2 结构组成示意图

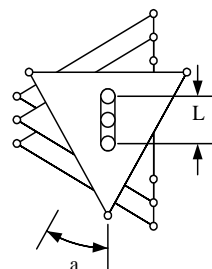


图 3 平动与转动相关参数的选取与不相干性验证

由此, 本设计的最大步距达到 $0.5R$, 最大步转角达到 60° , 全速时的最小转弯半径为边长为 $0.5R$ 的正六边形的内切圆半径, 即 $0.433R$, 可见机器人有很高的灵活性。

基金项目: “985”工程基金资助项目(121503000)

作者简介: 张 涛(1981-), 男, 硕士, 主研方向: 微型机器人及医学用微型特种机器人; 颜国正, 教授、博导; 刘 华, 博士、讲师

收稿日期: 2006-12-20

E-mail: ivylongbow@sjtu.edu.cn

3 稳定性分析^[1,3]

如图 4 所示,点 ABC 分别是起支撑作用的三足, O 是重心位置, $A' B' C'$ 分别是 ABC 到相对边的垂足。

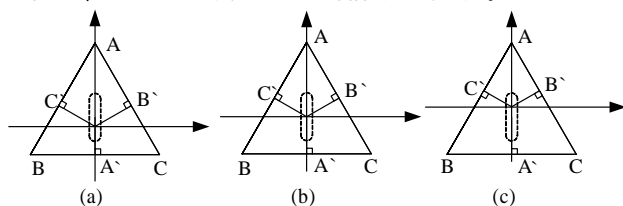


图 4 三角步态稳定裕量计算示意图

显然, $d_{OA'} = y_B$; $d_{OB'} = \frac{y_A}{2} = d_{OC'}$ 。则六足机器人以三角步态行走时,其最小稳定裕量判据为

$$d = \min\{d_{OA'}, d_{OB'}\} = \min\{y_B, \frac{y_A}{2}\}$$

又因为, B 足加上 C 部件总重约等于 A 足,所以运动中 $\min(y_B) = 0.375R$

$$\min(y_A) = 0.875R$$

$$d_{\min} = 0.375R$$

即最小稳定裕量判据为 0.375R。

4 驱动与控制电路的设计

本文设计的微型仿生六足爬行机器人采用了两个步进电机分别对直线驱动器和转角驱动器来进行精确控制。步进电机选用 Vitech 公司 M8SP-XX21 和 M10SP-GX15,分别为 8mm × 9mm 和 10mm × 10mm 微型步进电机。电机定位精确、输出力矩较大、尺寸满足要求,作为本设计的力驱动部件十分理想。

步进电机驱动芯片采用 Sanyo 公司 LB1848M 专用微步双全桥集成模块。该芯片集成双 MOS 桥,输出控制电流大,在 5V 电压下,它可以提供上述两种步进电机所需最大电流。同时该芯片仅有 3 个输入控制信号,控制起来十分方便。

支撑足更替的实现采用一个 6mm 直流电机驱动蜗杆蜗轮,蜗轮再带动有精密内螺纹的螺母在螺杆上实现轴向直线运动。这样,只需改变直流电机的铜电极性,就可实现 AB 两组足的上下相对运动,从而实现了交替支撑。

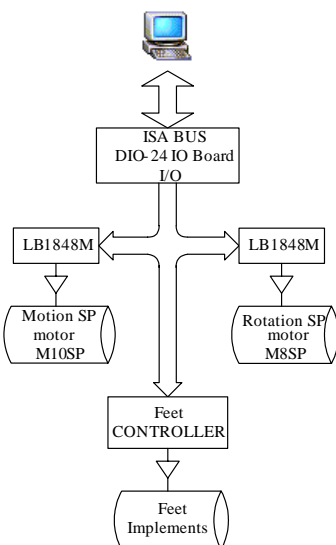


图 5 控制系统框图

本设计采用了一块 24 位的 IO 卡来产生机器人的控制信号。IO 卡选取的是 ICP DAS 公司的 DIO-24。该卡有 24 个可

独立变成控制的 IO 口,可同时驱动 8 个 1848,工作稳定,响应时间短、速度快,并且有 +5V 的电源输出可直接给步进电机驱动 LB1848 供电,作为电脑与机器人之间的桥梁十分理想。

如图 5,控制软件产生的控制各执行器的运动控制信号通过 ISA 总线发给 DIO-24, DIO-24 再通过 I/O 口将控制信号发给两个步进电机驱动芯片和一组步足起落控制电路,步进电机驱动芯片再分别驱动两个步进电机实现机器人的移动和转向,步足起落控制电路完成 AB 两组足交替支撑的控制。

5 上位机软件设计

上位机在整个系统中起着统筹发号施令的作用,它实现的功能为:根据操作员发出的直接命令或间接命令计算编译出机器人运动控制信号,再把控制信号通过 PC ISA BUS 发给 DIO-24。图 6 是控制软件界面。



图 6 软件界面

如图 6,水平滚动轴可以控制转向步进电机进而直接设定 A 组足和 B 组足间的角度在 $\pm 30^\circ$ 之间;同理,垂直滚动轴控制进退步进电机从而直接指定 A 组足和 B 组足中心的相对位置在 $\pm 7.5\text{mm}$ 之间;按钮 A、B 控制两组足的起落支撑;右侧 9 个按钮是产生连续的波形序列控制机器人用以连贯地完成诸如前后直行、左右转向等动作。

LB1848 专用步进电机驱动芯片使用 3 个信号: IN1, IN2 和 EN 来对步进电机进行控制;步足起落控制电路对每组足的控制只需要一位数字信号。因此,根据设定的机器人爬行轨迹,计算产生以下 8 个信号的波形就构成了上位机的软件控制逻辑:

M_IN1, M_IN2, M_EN, R_IN1, R_IN2, R_EN, FEET_A, FEET_B

DIO-24 的 24 位 IO 口按 8 位 1 组分为 3 组,分别是 PA0~PA7、PB0~PB7 和 PC0~PC7,本设计的 IO 口分配如表 1。

表 1 IO 口的分配

M_IN1	PA0
M_IN2	PA1
M_EN	PC0
R_IN1	PA2
R_IN2	PA3
R_EN	PC1
FEET_A	PB6
FEET_B	PB7

为方便控制,程序首先定义了一个步进电机的类:

```
Private Enum TTL
L = 0
H = 1
End Enum
Public status As Integer '对应足 AB 的相对状态
Private ACoil As TTL '对应 LB1848 的 IN1
Private BCoil As TTL '对应 LB1848 的 IN2
Public IO_value As Integer '对应 DIO - 24 的输入

Public Sub CCW() '电机逆时针转 18 度
tmp = ACoil
```

```

ACoil = BCoil
BCoil = 1 - tmp '波形左移 90 度相位
IO_value = ACoil * 2 + BCoil
status = status - 1
End Sub

```

```

Public Sub CW() '电机顺时针转 18 度
tmp = BCoil
BCoil = ACoil
ACoil = 1 - tmp '波形右移 90 度相位
IO_value = ACoil * 2 + BCoil
status = status + 1
End Sub

```

```

Private Sub Class_Initialize()
ACoil = L
BCoil = L
status = 0
IO_value = 0
End Sub

```

通过拖动两个滚动条实现对机器人的控制只需编写触发滚动轴的改变事件即可，下面以进退控制为例：

```

Private Sub sclBackandforce_Change()
Dim i As Integer, tmpDes As Integer
tmpDes = sclBackandforce '终态
sclBackandforce = M10SP.status
If tmpDes > M10SP.status Then '判断所需旋转方向
DIO_OutputByte (wBase + wOffset + 2), Val("&h0F") ' 使能电机[4]
For i = M10SP.status To tmpDes - 1
M10SP.CW '顺时针转一格
Call IO_output '输出到 LB1848
sclBackandforce.Value = M10SP.status '更新电机状态
valBackandforce = M10SP.status '文本框显示实时状态
If HALT Then Exit For '收到停机指令则停止动作
Next
DIO_OutputByte (wBase + wOffset + 2), Val("&h00") ' 禁用电机
ElseIf tmpDes < M10SP.status Then
DIO_OutputByte (wBase + wOffset + 2), Val("&h0F") ' Port C
For i = tmpDes To M10SP.status - 1
M10SP.CCW
Call IO_output
sclBackandforce.Value = M10SP.status
valBackandforce = M10SP.status
If HALT Then Exit For
Next
DIO_OutputByte (wBase + wOffset + 2), Val("&h00") ' Port C
End If
End Sub

```

足部起落控制的代码：

```

Private Sub change_feet()
If Feet_status = A_step Then ' 判断支撑足
DIO_OutputByte (wBase + wOffset + 1), Val("&h55") '
FEET B
Else
DIO_OutputByte (wBase + wOffset + 1), Val("&hAA") '
FEET A
End If

```

```

DIO_OutputByte (wBase + wOffset + 2), Val("&hF0") ' 使能足起落电机
stopwatch.Reset
Do
txtTimer = stopwatch.Elapsed
DoEvents
Loop While Val(txtTimer.Text) < FeetStepTime And Not HALT ' 精确延时
DIO_OutputByte (wBase + wOffset + 2), Val("&h00") ' 停止电机
End Sub

```

步进电机调速是通过调用 IO_output 函数时的精确延时实现的：

```

Private Sub IO_output()
Dim tmpByte As Byte
stopwatch.Reset
tmpByte = (M10SP.IO_value * 64 + M8SP.IO_value * 4) ' IO 输出
DIO_OutputByte (wBase + wOffset + 0), tmpByte ' 到 PA 口
Do
txtTimer = stopwatch.Elapsed ' 精确定时显示
DoEvents
Loop While Val(txtTimer.Text) < StepMotorInterval And Not HALT ' 精确定时
End Sub

```

由于 VB 自带的 Timer 控件定时精度太低，因此这里所有的精确定时采用的都是仅供 Windows 95 及其后续版本使用的精确时间 API 函数 QueryPerformanceFrequency() 和 QueryPerformanceCounter()^[5]。精确定时器类代码这里不再详述。

6 实验结果与误差分析

根据上述原理和设计方案，作者制作了微型仿生六足机器人样机，其基本尺寸为：R=3cm，H=4.2cm，重 49g，实物如图 7 所示。

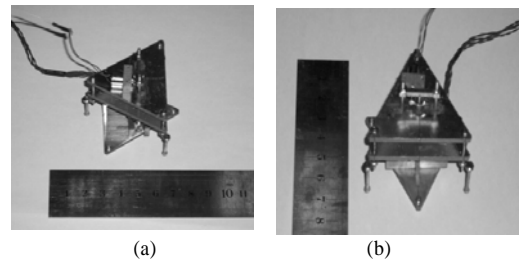


图 7 实物照片

对样机的测试结果表明：机器人运动平稳，转弯自如，平均最大步行线速度达 7.9mm/s，转弯角速度达 0.42rad/s，即转一圈需要 14s 左右。但转弯不够精准，原地转一圈后不能严格继续原来的行进方向，误差在每圈 10°之内；行进距离也不能严格保证，不能精确地直行指定的距离，如 150mm(10步)误差在 5mm 以内。分析其原因主要是：零件的加工精度不够，如齿轮的中心距不能严格保证，导致齿轮与齿轮、齿轮与齿条啮合不理想，进而在每一步产生误差；足与地面接触点材料选择不佳，目前采用的是钢，今后的实验拟采用橡胶、硅胶等做对比实验。

7 结束语

在研究了昆虫步态的基础上，运用仿生原理，本文提出了一种六足机器人机械结构设计的新思路，并研制了基于这

(下转第 246 页)

填充数据，64 位的整数表明输入数据长度，被填充后的数据是 1 024 位的倍数。填充后的数据被分割成 N 个等长度的数据块 $M^1 \dots M^N$ 并且按照下面的公式顺序处理。

$$\begin{cases} W_i = M^i & 0 \leq i \leq 15 \\ W_i = \sigma_1 W_{i-2} + W_{i-7} + \sigma_0 W_{i-15} + W_{i-16} & 15 < i < 80 \end{cases}$$

标准规定一种算法的基本转换要对数据进行 80 次的操作。80×64-位 ROM 块被用来预定义 K_i 常量。在最后阶段，修正函数处理数据并将处理后的结果输出。

5 实验结果

系统的结构用 VHDL 来描述并且用 XINLINX FPGA Vertex Device (v300pq240)集成实现。本文的随机数发生器集成实现的结果如表 1 所示。

表 1 FPGA 实现结果

Allocated Area	Used/allocation	Utilization
Fun. Generators	5 268/6 144	86%
CLB Slices	2 710/3 072	88%
Dffs or Latches	4 182/6 144	68%
Frequency	80MHz	

统计质量是衡量随机数序列的主要指标。因此，我们采用了 FIPS140-1 和 SP800-22 两种测试标准对所生成的随机序列进行检测。所有的测试都是在长度为 10^6 位的基础上进行。由物理随机数发生器生成的原始位序列和被 SHA-2(512)处理后的序列都能通过 FIPS140-1 测试，但是对 SP800-22 测试，两种随机位序列的测试结果是不相同的。表 2 和表 3 展示了用 SP800-22 测试对两种随机位序列的测试结果。从两个表中可以看出，由 SHA-2(512)哈希函数处理过的随机位序列有着更好的统计特性。

表 2 物理随机数发生器的测试结果

	P Low	P High	Avg score	Pass Ratio
Frequency	0.762	0.873	0.805	0.967
Block-Frequency	0.706	0.849	0.810	1.000
Cusum-Forward	0.822	0.861	0.837	0.822
Cusum-Reverse	0.632	0.682	0.664	0.724
Runs	0.242	0.354	0.293	0.872
Long Runs of ones	0.102	0.172	0.135	0.662
Rank(32×32)	0.742	0.812	0.796	0.945
Spectral DFT	0.682	0.752	0.716	0.663
Non-overlapping	0.447	0.506	0.495	0.796
Overlapping	0.114	0.627	0.449	0.801
Universal (L=7,Q=1280)	0.427	0.521	0.483	0.812
ApproxEntropy(m=5)	0.462	0.521	0.793	0.897
Lempel-ziv Complexity	0.842	0.865	0.851	0.915
Linear Complexity	0.345	0.521	0.369	0.925
Serial(m=5), ($\nabla\psi_m^2$)	0.632	0.682	0.664	0.724

(上接第 243 页)

种设计思路的样机。实验证明，该机器人可以实现直线运动与转向运动的合理、有效结合，转向角度、角速度可控，直线行进步距、速度可调，行动灵活可靠，实现了预期的设计目标。

下一步的工作包括：研制基于这种机械结构的适应特殊环境的机器足，如适应垂直光滑平面的吸盘式步足、适应导磁材料（如钢板表面、钢管内壁）上的电磁步足等。

表 3 SHA-2(512)处理后的序列测试结果

	P Low	P High	Avg score	Pass Ratio
Frequency	0.768	0.932	0.886	0.995
Block-Frequency	0.811	0.862	0.849	1 000
Cusum-Forward	0.917	0.943	0.925	0.987
Cusum-Reverse	0.612	0.689	0.668	0.992
Runs	0.323	0.361	0.344	0.961
Long Runs of ones	0.187	0.446	0.213	0.885
Rank(32×32)	0.869	0.887	0.878	0.977
Spectral DFT	0.561	0.615	0.573	0.904
Non-overlapping	0.602	0.784	0.671	0.966
Overlapping	0.076	0.083	0.077	0.924
Universal (L=7,Q=1280)	0.437	0.677	0.593	0.992
Approx Entropy (m=5)	0.691	0.740	0.733	0.948
Lempel-ziv Complexity	0.365	0.419	0.396	0.998
Linear Complexity	0.294	0.315	0.310	0.972
Serial(m=5), ($\nabla\psi_m^2$)	0.685	0.762	0.746	0.997

6 结论

本文提出了一种新的随机数发生器结构并用硬件加以实现。热噪声为我们提供了物理随机位流源，SHA-2(512)的安全强度和哈希函数的优势确保了所生成的随机数序列的不可预测性。所提出的随机数发生器结构在很多应用中都是一种灵活的解决方案，在该系统中，也可以用其他好的算法来处理物理随机数发生提供的原始随机序列以提高随机序列的统计特性。

参考文献

- Callegari S, Rovatti R, Setti G. Embeddable ADC-based True Random Number Generator for Cryptographic Applications Exploiting Nonlinear Signal Processing and Chaos[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(2): 793-805.
- Rankl W, Effing R. Smart Card Handbook(2nd Edition)[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- Kocher P, Jaffe J, Jun B. Differential Power Analysis, Advance in Cryptology(Crypto'99)[M]. Heidelberg, Germany: Springe-Verlag, 1999: 388-397.
- Tsoi K H, Leung K H, Leong P H W. Compact FPGA-based True and Pseudo Random Number Generators[C]. Proc. of the 11th Annual IEEE Symposium on Field-programmable Custom Computing Machines, 2003: 51-61.
- Menezes A J, Van Oorschot P C, Vanstone A. Handbook of Applied Cryptography[M]. CRC Press, 2001.

参考文献

- 徐小云, 颜国正. 六足移动式微型仿生机器人的研究[J]. 机器人, 2002, (5): 427-429.
- 徐小云, 颜国正, 丁国清. 微型六足仿生机器人及其三角步态的研究[J]. 光学精密工程, 2002, 10(4): 392-396.
- 蒋新松. 机器人学导论[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994.
- ICP DAS 公司. DIO-24/144 使用说明书[Z]. 2005.
- 游志宇. VC 中基于 Windows 的精确定时 VC 知识库在线杂志[EB/OL]. <http://www.vckbase.com/document/viewdoc/?id=1301>.