

文章编号: 1002-0446(2004) 04-0320-05

基于蚯蚓原理的多节蠕动机器人*

左建勇, 颜国正

(上海交通大学电子信息学院精密工程及智能微系统研究所, 上海 200030)

摘要: 介绍了多节蠕动机器人的机体构造和运动原理, 建立了机器人运动模型并进行了分析. 阐述了该机器人系统的控制组成和软件设计. 讨论了机器人在不同倾角橡胶管道内的驱动性能试验. 进行了机器人温度试验及转弯性能试验. 结果表明: 该微小机器人运行可靠、平稳, 控制方便, 有一定的爬坡能力; 连续工作时机器人温度不超过 35℃; 可通过大于 36mm 的弯曲半径. 该研究为非结构环境狭小空间及人体消化道探察机器人的研制奠定了基础.

关键词: 蠕动; 机器人; 驱动机理; 运动模型

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

A Multi-unit Creeping Robot Based on Earthworm Principle

ZUO Jian-yong, YAN Guo-zheng

(Institute of Precision Engineering and Intelligence Micro-System, School of Electronics and Information Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The structure and locomotion principle of the multi-unit creeping robot are introduced. The kinematic model is built and analyzed, and the control blocks and software design are discussed in detail. Some actuating experiments have been done when the micro robot creeps in the declining rubber tubes. The experimental results show that this micro robot can move reliably in horizontal and certain declining curving tubes. The temperature of robot is under 35℃ when it moves continually. The robot moves freely when the curve radius is more than 36mm. This research has laid a foundation for the development of miniature robots used in unstructured environments such as limited spaces and intestinal tract.

Keywords: creeping; robot; locomotion mechanism; kinematic model

1 引言(Introduction)

90年代以后, 非结构环境机器人已从单纯的自动化机械中脱颖而出, 进入了其它领域, 如航空航天等高精度设备. 由于非结构环境的特殊性, 如结构复杂、内部空间狭小、检修和维护困难等, 对机器人系统提出了更高的要求. 其中微小型机器人就是一类, 它致力于解决毫米领域中信息收集、信息处理、自身行动决策及周围环境适应等方面的问题, 可广泛应用于原子能、石油化工、城市管道(如煤气、自来水)的维修、探伤等, 通过其自主移动及协调动作, 及时发现故障以至解决和处理问题.

在生物医学领域, 微创手术(Minimally Invasive Surgery)历来是外科诊断与手术发展的方向, 近年来

人们提出并发展了多种微小机器人诊察系统. Ikuta 在 1988 年提出了以微小机器人代替传统内窥镜的想法. 文[1]讨论了一种微小医用机器人“MEDIWORM”用于检查大肠, 机器人采用形状记忆合金(Shape Memory Alloy)作为驱动源, 并集成了一个 SMA 驱动的夹持器用于微创手术. 文献[2~5]介绍了一种基于尺蠖运动原理的机器人内窥镜系统. 文献[6]研制了一种带有驱动和操纵机制的微小智能内窥镜系统. 以上研究都是基于尺蠖运动原理实现的, 其驱动源以气动为主, 为了使机器人能较好地“吸附”在肠道内壁, 采用流体驱动方式设计的机器人外径较大, 容易引起受试者的不适甚至痛苦. 此外, 还有人采用 SMA 方式驱动, 由于人体肠道内的温度较高, 且肠道

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目(2001AA422210).

收稿日期: 2003-09-01

组织对高温的耐受力较差,故 SMA 可用的温差范围较小,可以实现的变形和回复较小,同时 SMA 响应速度较慢,因此 SMA 多用于夹持机构等单元的设计。

随着科学技术的发展和加工制造工艺水平的提高,体积小、功重比大的马达已逐渐得到广泛应用,鉴于此,本文提出一种基于蚯蚓生物体运动原理、采用直流电机驱动的微小型机器人系统,由于采用直流电机驱动,控制简单,避免了气动方式中气流导管较粗的缺点;同时克服了 SMA 方式温差较小的固有缺陷,使机器人对狭小空间管道有更好的适应性,如核工业管道、人体肠道、食道以及类似的微小管道等。

2 机器人系统结构与工作原理(Structure and operation principle of the robot system)

2.1 机器人组成与驱动原理

基于蚯蚓运动原理设计的微小型蠕动机器人采用 5 节铰链结构,由 1 个前舱和 4 个伸缩单元组成,机器人实物如图 1 所示。

机器人直径 6.8mm,长度 110mm,设计步距 4mm,重约 10g。前舱、伸缩节和后舱之间分别用 2 自由度的万向节相连以实现机器人在弯曲的环境下能自由调整其姿态。前舱可以装有摄像头、各种检测传感器、微操作手等微型设备。伸缩单元由直流电机和螺纹螺杆减速增力机构组成,电机通过驱动螺母丝杠机构带动导套在壳体上滑动实现伸缩功能。另外,在驱动螺母两侧安装有回复弹簧以实现伸长和缩短功能之间的转换。

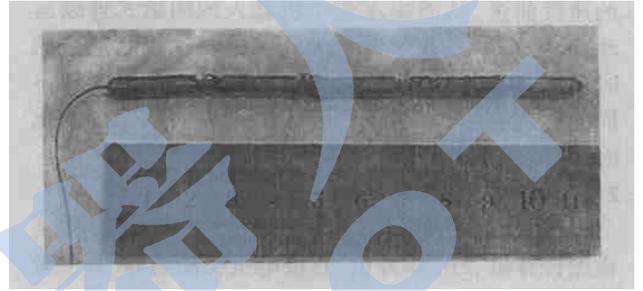
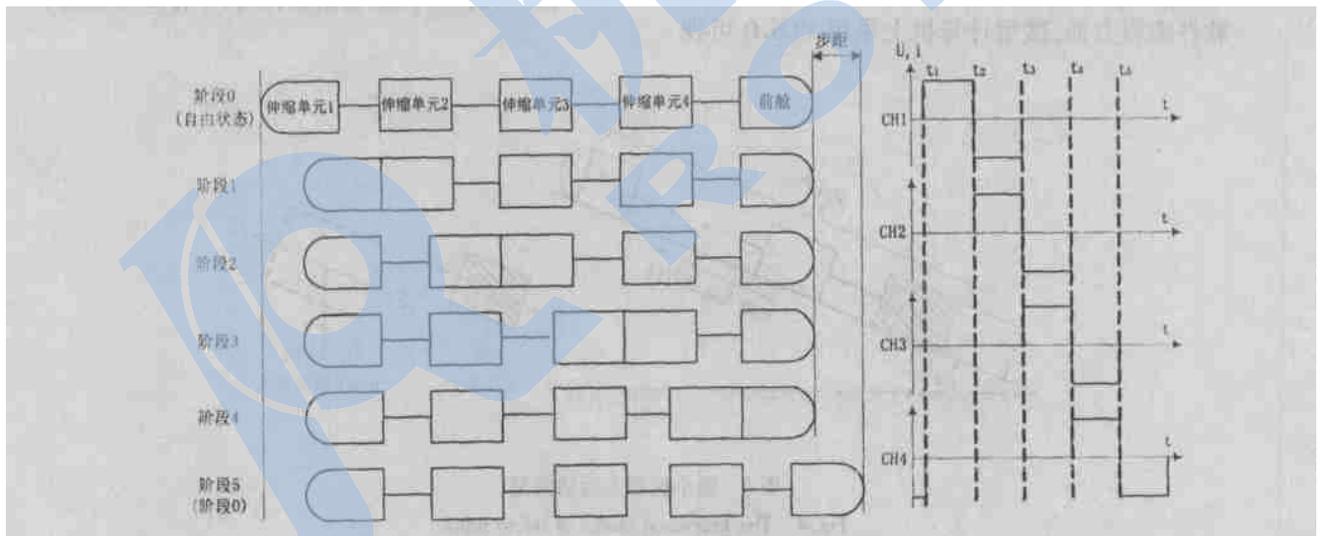


图 1 微小型机器人样机

Fig. 1 The prototype of micro robot



(a)

(b)

图 2 微小机器人运动原理

Fig. 2 Locomotion principle of the micro robot

图 2(a) 为微小型蠕动机器人运动原理图,图 2(b) 为机器人各伸缩单元的直流电机控制信号。机器人运动时,每一时刻只有一个单元运动,采用“多推一”的方式,借助被动单元和主动单元之间的摩擦力差实现机器人的整体运动。具体过程描述如下:机器人运动前处于自由伸长状态(阶段 0); t_1 时刻, CH_1 为正, CH_2 、 CH_3 和 CH_4 均为 0,此时伸缩单元 1 的电机正转,带动伸缩单元 1 前进一个步距,伸缩单元 2、3、4 的电机不动,机器人处于阶段 1;在 t_2 时刻, CH_1 为负, CH_2 为正, CH_3 和 CH_4 为 0,此时伸缩单元 1 的电机反转,伸缩单元 2 的电机正转,带动伸缩单元 2 前进一步,伸缩单元 3、4 的电机不动,机器人处于阶段 2; t_3 时刻, CH_1 和 CH_4 为 0, CH_2 为负, CH_3 为正,此时伸缩单元 1 的电机不动,伸缩单元 2 的电机

正转,带动伸缩单元 1 前进一个步距,伸缩单元 2、3、4 的电机不动,机器人处于阶段 1;在 t_2 时刻, CH_1 为负, CH_2 为正, CH_3 和 CH_4 为 0,此时伸缩单元 1 的电机反转,伸缩单元 2 的电机正转,带动伸缩单元 2 前进一步,伸缩单元 3、4 的电机不动,机器人处于阶段 2; t_3 时刻, CH_1 和 CH_4 为 0, CH_2 为负, CH_3 为正,此时伸缩单元 1 的电机不动,伸缩单元 2 的电机

反转, 伸缩单元 3 的电机正转, 故伸缩单元 3 前进一步, 机器人完成阶段 3 的运行; t_4 时刻, CH_1 和 CH_2 为 0, CH_3 为负, CH_4 为正, 此时伸缩单元 1、2 的电机不动, 伸缩单元 3 电机反转, 伸缩单元 4 电机正转, 故伸缩单元 4 前进一步, 机器人完成阶段 4 的运行; t_5 时刻, CH_1 、 CH_2 和 CH_3 均为 0, CH_4 为负, 伸缩单元 1、2、3 的电机不动, 伸缩单元 4 的电机反转, 推动前舱前进一个步距, 机器人完成阶段 5 的运动. 重复阶段 1 到阶段 5, 机器人就以每个循环走一个步距的速度前进, 从而实现整个机器人的间歇式连续运动; 改变 CH_1 、 CH_2 、 CH_3 和 CH_4 路驱动控制信号的时序和频率, 即可改变机器人的驱动方向和实现不同的行进速度, 当组成机器人的伸缩节数发生变化时, 其循环周期也发生变化.

2.2 机器人控制

图 3 为多节蠕动机器人的控制部分组成, 包括微型计算机、PIC 单片机、直流电机驱动器等. 其中微型计算机实现人机对话和机器人控制信号的发送, 微机与单片机之间的通讯采用串口中断方式进行; 4 个伸缩单元中直流电机的正反转均通过单片机控制 4 个电机驱动器来实现.

软件编程方面, 微型计算机上采用 VC6.0 可视

化编程实现人机对话, 与单片机之间采用中断方式控制机器人的前进、后退、停止以及行进速度的改变. 由于采用开环控制, 机器人在每次启动时必须进行初始化, 使每个单元节处于初始(自由伸长)状态. 为保证每个伸缩节的协调运动和机器人整体运动的可靠性, 机器人在一个循环过程中不允许停止, 即改变行进方向和速度参数只能在完成一个步距运动之后才能进行.

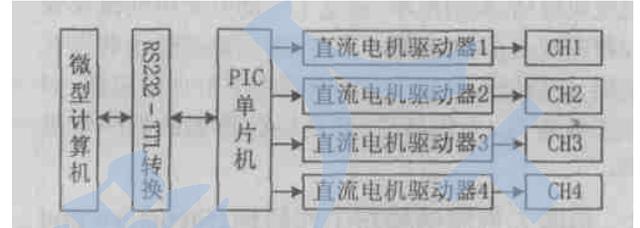


图 3 机器人系统控制框图

Fig. 3 The block control diagram of robot system

3 机器人运动模型分析 (Analysis of the robot kinematic model)

图 4 为机器人运动模型, 分析中作如下假设:

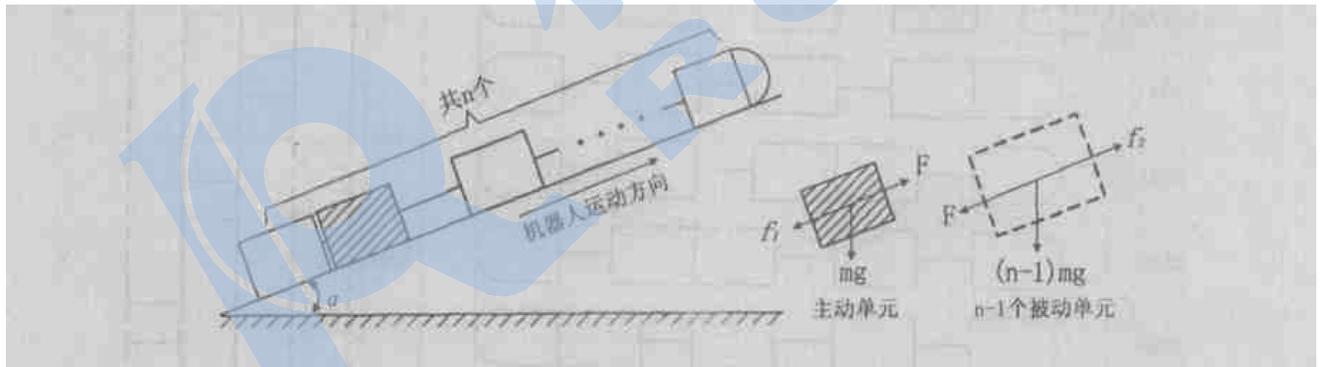


图 4 微小机器人运动模型

Fig. 4 The kinematic model of micro robot

(1) 机器人由 n 个质量均为 m 的单元节组成, 其中包括 $n-1$ 个伸缩单元和 1 个前舱, 图中阴影部分单元为主动单元, 其余为被动单元;

(2) 机器人外表与行进表面之间的摩擦系数 μ 恒定, 不考虑行进表面弹性变形对机器人运动的影响;

(3) 设每个伸缩单元的驱动力为 F_q , 主动单元与被动单元组之间的内力为 F , 且 $F_q > F$, 即每个伸缩单元均能提供足够的牵引力;

(4) 以机器人在角度为 α 的斜坡上爬行为例建

立运动模型;

(5) 所选直流电机的转速约 2000rpm, 且每个单元的质量较小, 因此驱动单元在运动过程中的动量不能忽略.

根据力学及运动学知识, 机器人运动状态可分为被动单元发生打滑和打滑不打滑两种情况, 而每种情况的整个过程可分 3 个阶段:

(1) 主动单元和被动单元的加速运动阶段(不打滑情况时, 被动单元静止);

(2) 主动单元与被动单元之间的碰撞阶段;

(3) 机器人整体滑移阶段

下面具体讨论机器人的两种运动状态:

3.1 被动单元发生打滑

(1) 主动单元和被动单元加速运动阶段

满足关系式:

$$\left. \begin{aligned} F - f_1 - mg \sin \alpha &= ma_1 \\ F - f_2 + (n - 1)mg \sin \alpha &= (n - 1)ma_2 \\ f_1 &= \mu mg \cos \alpha \\ f_2 &= (n - 1)\mu mg \cos \alpha \\ S_1 + S_2 &= h \\ \frac{S_1}{S_2} &= \frac{a_1}{a_2} \end{aligned} \right\} (1)$$

式中: F 为机器人运动时主动单元和被动单元之间的内力; f_1 、 f_2 分别为主动单元和被动单元所受的动摩擦力; a_1 、 a_2 分别为两者的运动加速度; S_1 、 S_2 分别为两者在该阶段的移动距离; h 为机器人的设计步距, 本设计为 4mm.

(2) 主动单元和被动单元碰撞阶段

满足瞬时动量守恒:

$$m \sqrt{2a_1 S_1} - (n - 1)m \sqrt{2a_2 S_2} = nmv \quad (2)$$

式中: v 为矢量, 表示主动单元和被动单元在碰撞后的共同瞬时速度.

(3) 机器人整体滑移阶段

满足能量守恒:

$$\frac{1}{2}nmv^2 = \mu mg \cos \alpha S_3 + nmgs \sin \alpha S_3 \quad (3)$$

式中: S_3 为矢量, 表示机器人因克服重力和摩擦力滑行的距离.

图 2 所述的一个循环周期内, 机器人的前进距离 S 可表示为:

$$S = S_1 + S_3 - (n - 1)(S_2 - S_3) \quad (4)$$

3.2 被动单元不发生打滑

(1) 主动单元加速运动, 被动单元静止阶段

满足关系:

$$\left. \begin{aligned} F - f_1 - mg \sin \alpha &= ma_1 \\ f_1 &= \mu mg \cos \alpha \\ S_1 &= h, S_2 = 0 \end{aligned} \right\} (5)$$

(2) 主动单元和被动单元碰撞阶段

满足瞬时动量守恒:

$$m \sqrt{2a_1 S_1} = nmv \quad (6)$$

(3) 机器人整体滑移阶段

满足能量守恒:

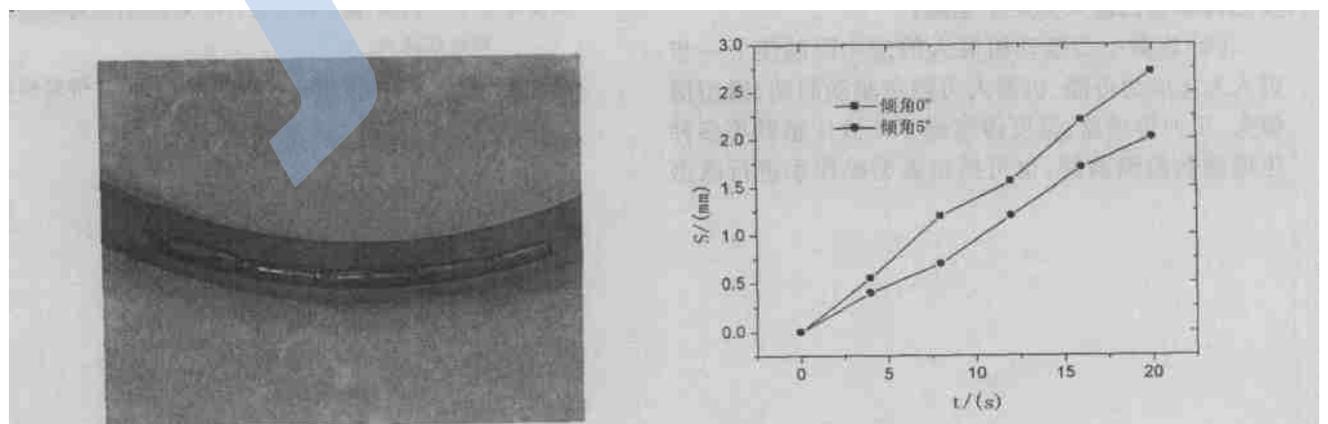
$$\frac{1}{2}nmv^2 = \mu mg \cos \alpha S_3 + nmgs \sin \alpha S_3 \quad (7)$$

综上所述, 在图 2 所述的一个循环周期内, 机器人的前进距离 S 为:

$$S = S_1 + nS_3 \quad (8)$$

4 试验(Experiment)

为了考察微小机器人的运动特性, 采用图 1 所示的机器人(由 4 个伸缩单元和一个前舱组成)在内径为 15mm 的橡胶管道中进行试验, 见图 5(a), 试验机器人相关参数: 质量 $m = 2.2g$, 伸缩单元驱动力 $F_q = 0.5N$, 机器人与橡胶管之间的摩擦系数 $\mu = 0.8$. 试验中采用相同的驱动频率, 考察机器人分别在斜面倾角为 0° 和 5° 时的运动情况, 试验结果如图 5(b) 所示. 由图可知, 当斜面倾角为 0° 和 5° 时, 机器人整体连续运动的平均速度分别为 $0.13mm/s$ 和 $0.10mm/s$.



(a)

(b)

图 5 试验与结果

Fig. 5 Experiment and results

将上述试验参数代入(8)式,计算可得机器人在斜面倾角为 0° 和 5° 时的整体连续运动速度分别为 0.148mm/s 和 0.110mm/s ,可见试验结果和理论分析基本一致.两者存在差别的主要原因是由于机器人运动模型的建立是在上述几个假设条件下进行的,另外机器人在运动过程中的振动也会引起机器人表面与橡胶管内部的摩擦力发生变化,从而导致机器人运行特性发生变化.

此外,还进行了机器人可靠性试验、温度试验以及转弯性能试验,结果表明:

(1) 在橡胶管内,微小型蠕动机器人能可靠运动,有一定的爬坡能力;

(2) 机器人在斜面上的运动特性类似于相应界面水平驱动时所呈现的特性,但机器人的爬坡能力随界面摩擦系数减小而降低;

(3) 在连续工作的情况下机器人最高温度不超过 35°C ;

(4) 在弯曲半径大于 36mm 的弯曲管道内,机器人有较好的通过性能,但其转弯依赖环境界面被动进行,机器人不能自主转弯.

5 结论(Conclusion)

(1) 基于蚯蚓运动原理研制的多节、多自由度微小型蠕动机器人,由于通过各单元体之间有规律的伸缩以及界面的摩擦力来实现各单元的运动传递,因而特别适应于在柔软、狭窄环境下的运行;

(2) 建立了微小型蠕动机器人的运动学模型并进行了分析,为机器人的优化设计提供了理论依据;

(3) 试验表明该机器人可在水平和一定倾斜度的管道内可靠移动,且具有一定的转弯能力,为进一步完善蠕动机器人奠定了基础;

(4) 该微小型蠕动机器人的成功研制使下一步进入人体成为可能,机器人可携带驱动照明、微型摄像头、压力传感器、温度传感器、PH值传感器等多种

生理参数检测器件,也可携带微型操作手进行微型手术,从而实现肠道生理参数检测和治疗.当然,研制适于人体肠道检测的微小型机器人将对机器人系统提出更高的要求,包括机器人的密封性、可靠性、安全性、灵活性以及与人体肠道环境的相容性等,有待深入研究.

参考文献 (References)

- [1] Ikuta K. The application of the micro/miniature mechatronics to medical robotics[A]. Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Robot[C]. Tokyo, Japan: 1988. 9-14.
- [2] Slatkin A B, Burdick J, Grundfest W. The development of a robotic endoscope[A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems - Human Robot Interaction and Cooperative Robots[C]. Stanford: 1995. 162-171.
- [3] Heg H D, Slatkin A B, Burdick J W. Biomechanical modeling of the small intestine as required for the design and operation of a robotic endoscope[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation[C]. San Francisco: 2000. 1599-1606.
- [4] Carozza M C, Lencioni L, Magnani B, et al. A microbot for colonoscopy[A]. Proceedings of the Seventh International Symposium on Micro Machine and Human Science[C]. Nagoya, Japan: IEEE, 1996. 223-228.
- [5] Carozza M C, Lencioni L, Magnani B, et al. The development of a microbot system for colonoscopy[A]. Proceedings of Computer Vision, Virtual Reality and Robotics in Medicine and Medical Robotics and Computer-assisted Surgery[C]. Grenoble, France: 1997. 779-788.
- [6] Krishnan S M, Kumar S, Yap C J. Computer-assisted intelligent endoscopy[A]. Proceedings of the 13th International Congress and Exhibition on Computer Assisted Radiology and Surgery[C]. Paris, France: 1999. 156-160.
- [7] 颜国正,林良明,丁国清. 新型机器人驱动内窥镜系统的研究[J]. 高技术通讯, 2000, 10(5): 60-62.

作者简介:

左建勇(1977-),男,博士研究生.研究领域:微特机器人,医用机器人.

颜国正(1964-),男,博士,教授,博士生导师.研究领域:精密工程及智能微系统.