

文章编号 1004-924X(2002)02-0160-05

# 基于蚯蚓运动原理的微小机器人构件的运动特性

迟冬祥, 颜国正

(上海交通大学 电子信息学院 820 所, 上海 200030)

**摘要:**介绍了一种基于蚯蚓运动原理的微小机器人内窥镜系统的原型,分析了单一构件活动件的运动特性,并通过调整各个线圈的驱动波形可以有效地控制微小机器人的运动。详细讨论了构件通电时间与构件活动件的运动位移、速度、加速度的关系,由此确定了微小机器人驱动电压的最高频率。可以通过调整驱动电压的频率来调节微小机器人的运行速度;也可以通过减少构件的通电时间解决微小机器人在运行过程中的发热问题。这项研究为微小机器人内窥镜的实际应用奠定了基础。

**关键词:**微小机器人;内窥镜;驱动机理;运动特性

**中图分类号:**TP242 **文献标识码:**A

## 1 引言

微创治疗(MIT)减轻了病人的痛苦,降低了治疗的费用,是外科诊断与手术发展的方向。作为微创治疗的一部分,内窥镜应用于疾病检查、微创治疗等多个领域,由于其无创性和有效性,引起了研究者的广泛关注。现在,用于消化道的内窥镜仍是刚性或半刚性的,其远端动作由绳索及外部旋钮控制。由于肌肉的皱折、凹陷和弯曲,很难做到将内窥镜插入肠道深处而又不形成肠道折叠和组织损伤。所以,微小机器人内窥镜近几年来得到迅速发展。

Ikuta 在 1988 年提出了以微小机器人代替传统内窥镜的设想<sup>[1]</sup>。他将医用机器人 MEDIWORM 用于对大肠的检查。机器人和微夹持器由形状记忆合金驱动。这种主动式内窥镜机器人原型的直径是 13mm,长 215mm。从那以后,微型医用机器人内窥镜的驱动机理和理论的研究更多涌现出来。尺蠖型机器人内窥镜<sup>[2-5]</sup>是最具有代表性的。Slatkin A B 等人的尺蠖型机器人内窥镜<sup>[2]</sup>的驱动包括驱动单元和伸展单元,由于这种机制由流体(气体)压力作为驱动源,因此解决了两个问题:首先,机器人的直径可以随着肠道各部

分直径的变化而变化;其次,机器人可以适应肠道的柔软、纤弱和粘滑。在文献[6]中,Krishnan S M 等人研制的用于内窥镜系统的微小机器人由组合机制完成驱动和操纵,机器人尺寸为 30mm ×40mm ×85mm。其路径规划通过图像和触觉传感器参数的融合实现。Ikeuchi K 等人提出了以螺旋形棱纹圆柱体驱动的机理<sup>[7,11]</sup>。在文献[8]中,Peirs J 等人介绍了两种可集成到主动式内窥镜系统中的微机器人执行器。这种内窥镜是基于尺蠖运行原理的,它将被用于人体结肠的介入检查。在上述的几种机器人内窥镜的研究中,以形状记忆合金驱动和气流驱动方式为主。由于人体肠道内的温度较高且不能承受太高的温度,形状记忆合金的变形与回复温差必须较小,因而形状记忆合金驱动的速度较慢。采用气流驱动方式的机器人外径不可能太小,而且靠扩张方式行走会引起患者的不适甚至痛苦<sup>[2]</sup>。

在众多的机器人内窥镜中,用于肠道检查的机器人内窥镜是研究的重点之一。这是由肠道在人体中的特殊地位决定的。人的消化道始于咽止于肛门,主要包括食道、胃、小肠、大肠和直肠。由于消化道两端有自然开口与外界相通,肠道内窥镜很容易由人体的自然开口进入。所以,消化道是最早为内窥镜所触及的领域。

本文提出了一种基于蚯蚓运动原理的肠道检查微小机器人内窥镜的原型(图 1)。这种机器人的外形很小,长 64mm,外径 7mm,重 9.8g。它的头部可以携带 CCD 等微小摄像器件,将肠道的图像传输出来。机器人各个单元之间由 2 自由度的铰链连接,使它可以适应蜿蜒盘曲的肠道。本文对这一机器人的构造、驱动原理和单一构件的运动特性作了讨论。

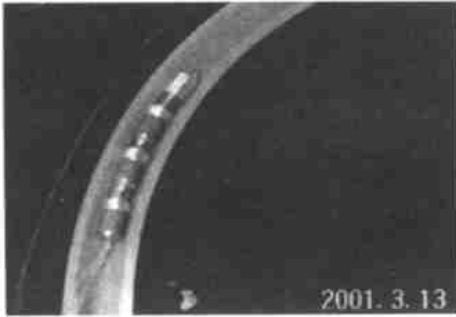


图 1 机器人内窥镜原型

Fig. 1 Prototype of the robotic endoscope.

### 2 肠道检查微小机器人

微小机器人是基于蚯蚓运动原理的<sup>[9]</sup>,它由几个结构相同的构件组成。各个构件间由 2 自由度的铰链连接,这就使微小机器人在肠道中可以自由调整自身的体态。机器人的头部,安装了照明和成像装置。图 2 是一个基本构件的剖面图,包括磁体和活动件。磁体的外层和内层是永磁材

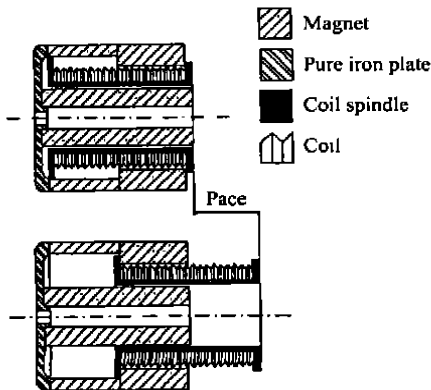


图 2 构件截面图

Fig. 2 Cross-sectional view of the component.

料,在底部由纯铁材料连接内层磁体和外层磁体。由于在磁体的顶部内、外层磁体距离近,因此磁力

线集中于此,均匀密布,沿径向由内部磁体外表面指向外部磁体内表面。活动件(包括线圈和线圈轴)的线圈无电流通过时,可以自由运动。当线圈通有正向电压时,活动件相对于磁体向外弹出一个单位位移,也就是一个步距;反之,活动件向里缩回一个步距。当各个基本构件的线圈按次序通以一定方式的电压时,机器人就前进或后退,典型的驱动电压波形如图 3 所示。

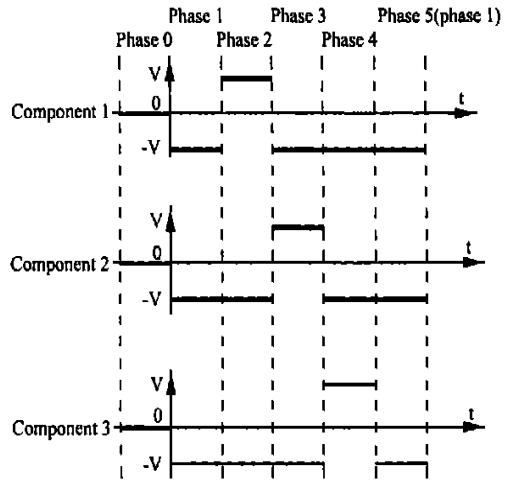


图 3 典型驱动波形

Fig. 3 Typical driving waveform.

### 3 单一构件的运动特性

在运动过程中,机器人的整体运动是靠各个构件的一定次序的单独运动实现的。活动件的线圈由于通过了电流并处于磁场中,受到安培力的作用沿轴向运动;在磁场中运动的线圈产生了感应电动势,感应电动势的方向与线圈的外加阶跃电压变化的方向相反。活动件在外磁体内部来回运动,相对于它所受到的电磁力而言,受到的摩擦力较小,在此忽略不计。因此,有:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{U(t) - BL \frac{dx}{dt}}{R} \cdot BL, \quad (1)$$

整理此式,得到:

$$\frac{MR}{BL} \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + BL \frac{dx}{dt} = U(t), \quad (2)$$

式中,  $M$  是活动件的质量,  $R$  是线圈的电阻,  $B$  是线圈运动区域的磁感应强度,  $L$  是线圈处于径向磁场中的导线长度,  $U(t)$  是线圈的外加阶跃电压,其值由下式表示:

$$U(t) = \begin{cases} V & 0 < t < \tau \\ 0 & t > \tau \end{cases}, \quad (3)$$

令  $a = \frac{MR}{BL}$ ,  $b = BL$ , 则有:

$$a \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} = U(t), \quad (4)$$

方程(4)的初始条件是

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = 0, \quad \left. x \right|_{t=0} = 0, \quad (5)$$

在式(5)的条件下由方程(4), 有位移表达式:

$$x(t) \Big|_{0 < t < \tau} = L^{-1} \left[ \frac{V}{(as + b)s^2} \right] = \frac{V}{b} t - \frac{aV}{b^2} (1 - e^{-\frac{b}{a}t}), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} x(t) \Big|_{t > \tau} &= L^{-1} \left[ \frac{V(1 - e^{-\frac{b}{a}\tau})}{(as + b)s^2} \right] \\ &= \frac{V}{b} + \frac{aV}{b^2} (1 - e^{-\frac{b}{a}\tau}) \cdot e^{-\frac{b}{a}t}, \end{aligned} \quad (7)$$

又有速度和加速度表达式:

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{0 < t < \tau} = \frac{V}{b} (1 - e^{-\frac{b}{a}t}), \quad (8)$$

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t > \tau} = \frac{V}{b} (1 - e^{-\frac{b}{a}\tau}) \cdot e^{-\frac{b}{a}t}, \quad (9)$$

$$\left. \frac{d^2x}{dt^2} \right|_{0 < t < \tau} = \frac{V}{a} \cdot e^{-\frac{b}{a}t}, \quad (10)$$

$$\left. \frac{d^2x}{dt^2} \right|_{t > \tau} = \frac{V}{a} (1 - e^{-\frac{b}{a}\tau}) \cdot e^{-\frac{b}{a}t}, \quad (11)$$

在本文的实验条件下,  $M$ 、 $R$ 、 $L$ 、 $U(t)$  均唯一确定, 如表 1 所示。其中  $B$  值由实验测得<sup>[9]</sup>。

表 1 实验构件参数表

Parameters	Values
M/ kg	0.002
R/	32.9
B/ Tesla	0.06
L/ m	5.32
U(t)/ V	10

图 4 是当线圈通电时间为 0.1s 时, 活动件的位移曲线、速度曲线、加速度曲线(横坐标为时间, 纵坐标对应各自的单位)。为其他值时, 曲线形状大体相同。当  $t = \tau$  时, 由式(7), 有:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \frac{V}{b}, \quad (12)$$

可见,  $x(t)$  的极限值与  $V$  成正比。但在实际运行过程中, 并不允许  $t \rightarrow \infty$ , 只要活动件移动一个步距即可。在本文的讨论中, 活动件的步距是 3mm。移动一个步距, 可能在  $t < \tau$  之前实现, 也可能在  $t > \tau$  后实现:

(a) 在  $t < \tau$  前实现一个步距, 也就是求式(6)在  $x(t) = 0.003$  时的  $t$  值。此时,  $t$  值与  $V$  无关。由割线法, 给出初值  $t_1 = 0.1$ ,  $t_2 = 0.5$ , 经 11 次迭代后, 得到  $t$  值为 0.0112s。也就是说, 当

0.0112s 时, 活动件位移在  $t = \tau$  结束前达到一个步距。在实际控制波形中,  $V$  值远远大于 0.0112s, 大部分情况下构件的活动件都是在  $t = \tau$  结束前达到一个步距。因此, 在大部分情况下, 在构件达到一个步距后线圈中仍然有电流通过并持续到  $t > \tau$ 。

(b) 在  $t > \tau$  后实现一个步距, 也就是求式(7)在  $x(t) = 0.003$  时的  $t$  值。由(7)式可知,  $t$  值与  $V$  的取值有关。由(7)式, 有:

$$S(t, \tau) = \frac{V}{b} + \frac{aV}{b^2} (1 - e^{-\frac{b}{a}\tau}) \cdot e^{-\frac{b}{a}t} - 0.003, \quad (13)$$

当  $S(t, \tau) = 0$  时, 也就是达到一个步距时,  $t$  与  $V$  有如下关系式成立:

$$t = -\frac{a}{b} \cdot \ln \frac{bV - 0.003b^2}{aV(e^{\frac{b}{a}\tau} - 1)}, \quad (14)$$

又由于当  $t = 0.0112s$  时, 活动件位移在  $t = \tau$  结束前达到一个步距, 所以(14)式在  $t < 0.0112s$  时才有意义, 依据(14)式的  $t - V$  关系曲线(图 5)也验证了这一点。

由图 4 的曲线可见, 在  $t = \tau$  时, 速度达到最大值, 加速度的变化量也达到最大。

由于构件的控制波形只要满足使其移动一个步距即可, 因此根据上述结论, 对微小机器人的实际驱动电压波形加以改进。改进的驱动电压波形与原来的波形相似, 只是各个构件的通电时间大大缩短, 这样既达到了快速运动的目的, 又减少了由于通电时间长造成的机器人机体过热以致于无法正常工作, 避免了对人体的损伤。

在正常工作状态下, 每一周期的驱动电压使微小机器人运行一个步距。当步距已由构件结构唯一确定时, 微小机器人的运行速度由下式表示:

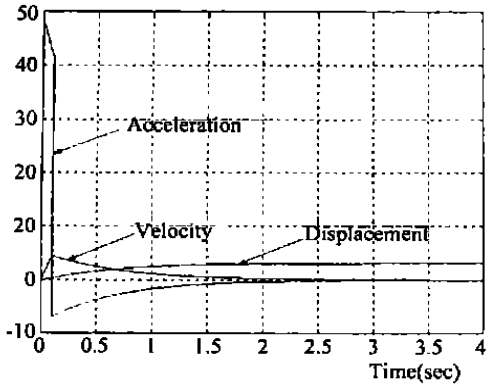


图 4 为 0.1s 时的位移、速度、加速度图

Fig.4 Graph of displacement , speed and acceleration when is 0.1 sec.

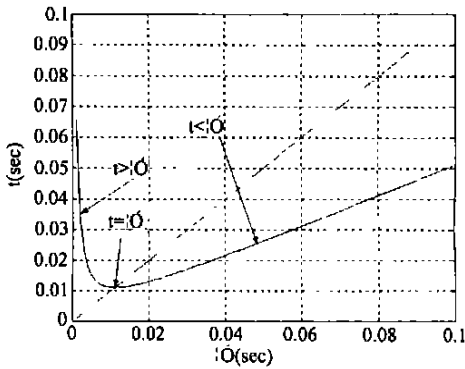


图 5 t 与 的关系曲线

Fig. 5 Relationship between t and .

$$V = \frac{P}{T} = \frac{P}{4 T_s} = \frac{P f_s}{4}, \quad (15)$$

其中,  $P$  是步距,  $T$  是机器人驱动电压的周期,  $T_s$ 、 $f_s$  是单一构件的驱动电压的周期和频率。假设单一构件在  $t$  前实现一个步距,也就是单一构件的通电时间  $0.0112\text{ s}$  时,  $f_s$  由  $1/t$  表示,  $f_s = 1/0.0112 = 89.29\text{ Hz}$ ;若单一构件在  $t >$  后实现一个步距,也就是单一构件的通电时间

$< 0.0112\text{ s}$ ,  $f_s$  由  $1/t$  表示,  $t$  由(14)式确定。

由于各个构件的通电时间相同,所以微小机器人的运行速度实际上决定于单一构件的驱动频率,即其通电时间。图 6 是单一构件活动件的位移、速度、加速度与通电频率 ( $1/t$ ) 的关系曲线(纵坐标均为自然对数坐标)。由图可见,随着频率的提高,位移、速度值逐渐减小,而加速度值却渐渐趋近一恒定值。当频率低于  $89\text{ Hz}$  时,位移值在  $t$  前达到步距  $3\text{ mm}$ 。所以,  $89\text{ Hz}$  可以视为单一构件允许输入的最高频率。由典型电压驱动波形图 3 可知,对于微小机器人而言,其允许的最高频率是  $f_s/4$ , 约是  $22.32\text{ Hz}$ 。

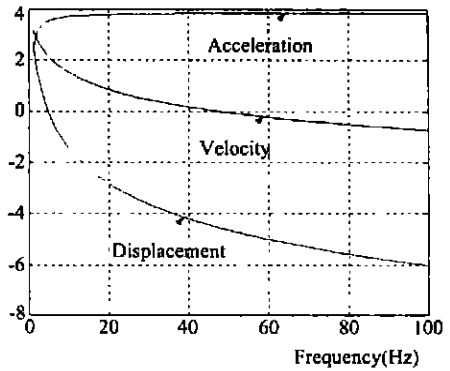


图 6 位移、速度、加速度与频率的关系曲线

Fig. 6 Relationship among displacement , speed , acceleration and frequency.

### 4 结 论

本文介绍了一种基于蚯蚓运动原理的微小机器人内窥镜系统的原型,分析了单一构件活动件的运动特性,通过调整各个线圈的驱动波形可以有效地控制微小机器人的运动<sup>[10]</sup>。可以通过调整驱动电压的频率来调节微小机器人的运行速度;也可以通过减少构件的通电时间解决微小机器人在运行过程中的发热问题。这项研究为微小机器人内窥镜的实际应用奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] Ikuta K. The application of the micro/miniature mechatronics to medical robotics[A]. *Proc. IROS '88, Tokyo*[C]. Japan, 1988. 9 - 14.
- [2] Slatkin A B, Burdick J, Grundfest W. The development of a robotic endoscope[A]. *Proc. Int. Symposium on Experimental Robotics, Stanford*[C]. CA, 1995, 5:162 - 171.
- [3] Høeg 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]. *Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, San Francisco*[C]. CA, 2000. 1599 - 1606.
- [4] Carrozza M C, Lencioni L, Magnani B, et al. A microrobot for colonoscopy[A]. *Proc. IEEE. 7th Int. Symposium on Micro Machine and Human Science*[C]. 1986. 223 - 228.
- [5] Carrozza M C, Lencioni L, Magnani B, et al. The development of a microrobot system for colonoscopy[A]. *CVRMed - MR-CAS '97*[C]. 1997. 779 - 788.
- [6] Krishnan S M, Kumar S, Yap C J. Computer - assisted intelligent endoscopy[A]. *CARS '99*[C], 1999. 156 - 160.
- [7] Ikeuchi K, Yoshinaka S, Hanshimoto et al. Locomotion of medical robot with spiral ribs using mucus[A]. *Proc. IEEE. 7th Int. Symposium on Micro Machine and Science*[C]. 1996. 217 - 222.
- [8] Peirs J, Reynaerts D, Van Brussel H. Design of miniature parallel manipulator for integration in a self - propelling endoscope[A]. *Sensors and Actuators (85)*[C]. 2000. 409 - 417.
- [9] Chi D X, Yan G Z, Lin L M. A novel miniature robotic endoscope design for intestinal inspection based on earthworm[A]. *Proceeding of 2001 International Workshop on Bio - Robotics and Teleoperation*[C], Beijing, China, 2001.
- [10] 高志军, 颜国正, 丁国清, 等. 多机器人协调与合作系统的研究现状和发展[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(2): 99 - 101.
- [11] 熊翔, 颜国正, 丁国清, 等. 基于蛇类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.

## Motion characteristics of earthworm-based miniature robotic components

CHI Dong-xiang, YAN Guo-zheng

(No. 820 Institute, College of Electronics and Information Technology,  
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** In this paper an earthworm-based miniature robotic endoscope prototype is put forward, and the structure and driving principles of the robot are introduced, and still the motion characteristics of each component are discussed as well. The motion of the miniature robot can be controlled effectively by adjusting the driving waveform. The relationship between driving time of the component and the displacement, velocity and acceleration is illustrated in detail, and thus the maximum driving frequency is determined. The velocity of the miniature robot can be adjusted by adjusting the driving frequency and the heat generation is reduced by shortening the driving time. The research has laid foundation for the application of the miniature robotic endoscope.

**Key words:** miniature robots; endoscopes; driving principles; motion characteristics

**作者简介:** 迟冬祥(1971 - ), 男, 吉林省通化市人, 博士研究生, 研究方向为特种机器人及其相关领域;  
颜国正(1961 - ), 男, 湖南益阳人, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能机器人系统及其相关领域。