

## Analysis on Dynamics for Flexible Leg of ICPF Actuated Tortoise-Like Micro-Robot\*

LI De-sheng<sup>1\*</sup>, NIE Lin<sup>1</sup>, GUO Shu-xiang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;  
2. Department of Intelligent Mechanical Systems, Kagawa University, Kagawa 761-0396, Japan)

**Abstract:** A novel tortoise-like flexible micro-robot with four legs is presented, which can crawl and swim underwater. The legs are actuated by ICPF (Ionic Conducting Polymer Film) and can be driven by a low voltage. ICPF is a kind of smart films, it has the characteristics of flexibility and good response. For analyzing the characters of the robot and improving the reliability and feasibility, we establish a dynamic model of the micro-robot by applying Pseudo-Rigid-Body-Dynamic-Model (PRBDM). The model is established on the base of statics and kinetics by considering the dynamic effect of the robot. Then, the displacement of the legs of the micro-robot is investigated based on PRBDM. The relation between the displacement of the robot legs and the frequency of the electrical voltage is theoretically derived from the PRBDM model and some analyses and experiment graphs about the relation are performed.

**Key words:** pseudo-rigid-body-dynamic-model; tortoise-like flexible micro-robot; angle displacement; frequency

EEACC:7230J

## ICPF 驱动的柔性微型机器龟腿的动力学分析\*

李德胜<sup>1\*</sup>, 聂林<sup>1</sup>, 郭书祥<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学机械电子学院, 北京 100022;  
2. 日本国立香川大学, 日本香川 761-0396)

**摘要:** 一种新型仿龟的柔性微型机器人, 具有四条腿并能在水下爬行和游动, 其中龟腿由一种智能薄膜 ICPF (Ionic Conducting Ploymer Film) 驱动。ICPF 具有被低电压驱动、柔性和快速响应的特点。为了提高机器龟的可靠性和灵活性, 我们运用伪刚体动力学法 (PRBDM) 建立了机器龟腿的动力学模型, 此模型是基于静力学和运动学并考虑了动态影响因素建立起来的。然后, 分析了机器龟腿的角位移幅度系数的变化规律。最后通过实验测量了机器龟腿末端的位移, 其变化规律与理论上推导出的结果相近, 因此验证了龟腿的动力学模型可以比较精确地反映龟腿的摆动角度位移, 可以分析龟腿的频率特性。

**关键词:** 伪刚体动力学法; 柔性微型机器龟; 角位移; 频率

中图分类号: TP212.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)11-1840-04

近来, 很多人投入到微型机器人的研究中, 模仿各种生物设计出了多种多样的微机器人, 例如机器鱼<sup>[1-3]</sup>、机器蟋蟀<sup>[4]</sup>等。微型机器人有着广泛的用途, 譬如, 在医疗中可用于血管疾病的诊断和治疗, 在工业中可用于核电厂管道的检测和维修。

本文设计出一种新型机器人, 它是用一种等离子高分子导电薄膜 ICPF 驱动, 可以灵活的运用各种运动方式来完成的任务, 它既可以爬行, 也可以游动, 同时它的驱动器还可以作为操作臂来夹持物体, 从而在水下和液体中执行多种任务。

基金项目: 北京工业大学先进制造技术重点实验室基金资助项目(05001790200705)

收稿日期: 2007-07-31 修改日期: 2007-09-07

# 1 ICPF 工作原理

本机器人的驱动器 ICPF 是一种等离子高分子导电薄膜, 英文全称为 Ionic Conducting Polymer gel Film(简称 ICPF)。ICPF 是用杜邦公司的 Nafion117 作为基膜, 然后在基膜上下两面渗透上铂金制成的。ICPF 驱动器的性能要优于其他高分子膜, 例如快速响应, 在水中或湿润的条件下能够被很低的电压(1.5v)驱动, 在人体中很安全。

ICPF 包含有磺酸基酸钠分子团, 在水中钠离子从磺酸基离子中分解出来。当加在驱动器上的电压产生电场时, 钠离子在电场力的作用下从阴极迁移到阳极, 水合作用造成水分子和钠离子之间的互换。相反, 磺酸基酸分子团固定在高分子膜链上, 不能在薄膜内移动<sup>[5]</sup>。因此, 薄膜负极的那一面将产生弯曲, 如图 1。

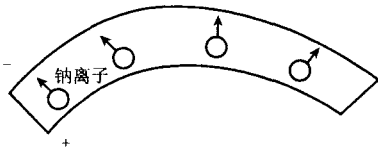


图 1 ICPF 的工作原理图

# 2 伪刚体法动力学建模

## 2.1 柔性龟腿转化为伪刚体元件

本文主要分析静态运动机器龟。为了简化分析, 我们使用伪刚体法来分析机器龟的动力学性能。伪刚体法是分析柔顺机构的一种方法, 它可以用于分析大的非线性变形。用具有同等力变形性能的刚体元件代替柔性元件, 从而可以应用刚体法分析柔顺机构。

机器龟的柔性腿可以被看作末端受力的悬臂梁。因为龟腿的变形较大, 超出了线性范围, 如图 2。因此我们用两个刚性杆来替代柔性龟腿, 这两个杆用铰链连接, 在铰链上加上弹簧, 因为弹簧可以存储柔性元件变形产生的能量同时还可以阻止柔性元件的变形, 从而较好的拟合了柔性元件的力学性能。

铰链位于龟腿与身体相连那一端附近, 距离那端为  $(1-c)l$ , 而从龟腿着地端到铰链的距离为  $cl$ 。c 是伪刚体杆的性能参数, 如图 3。这样我们就构建了机器龟的伪刚体动力学模型。在铰链处的弹簧系数为  $K$ 。所以, 我们就得到了机器龟的四条腿的伪刚体长度:

$$d_i = c_i l_i \quad i = 2, \dots, 5 \quad (1)$$

为了建立机器龟的伪刚体动力学模型, 一些伪刚体动力学参数被提出。八个扭簧的系数为  $(K_2,$

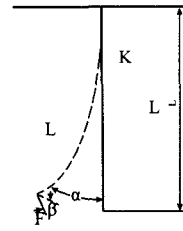


图 2 柔性龟腿的弯曲原理图

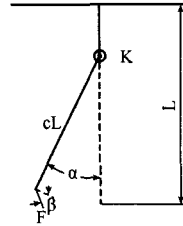


图 3 伪刚体龟腿的弯曲原理图

$K_{26}, K_3, K_{36}, K_4, K_{46}, K_5, K_{56}$ ), 四个集中质量为  $(m_{26}, m_{36}, m_{46}, m_{56})$ 。一条龟腿需要一个集中质量和两个扭簧来组成。机器龟的动能可以用到五个集中质量  $m_{26}, m_{36}, m_{46}, m_{56}$  和  $m_6$ 。势能需要八个扭簧  $K_2, K_{26}, K_3, K_{36}, K_4, K_{46}, K_5, K_{56}$ 。因此, 机器人的动力学方程就可以获得。

柔性腿动力学的性能可以用伪刚体扭转弹簧系统来代替。扭簧在点 A, 扭簧在点 C, 集中质量在点 C, 无质量杆在点 D, 扭簧在点 E, 扭簧在点 F, 扭簧在点 G, 扭簧在点 B, C, 集中质量在点 D, 集中质量在点 E, 集中质量在点 F, 集中质量在点 G, 集中质量在点 B, 如图 4。

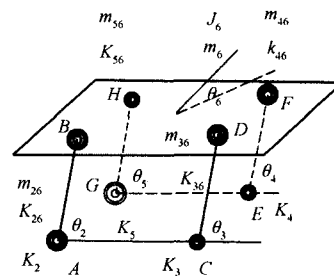


图 4 伪刚体龟腿的整体结构原理图

## 2.2 龟腿的动力学方程

根据动力学等价原理, 集中质量的动能等于替代柔性腿的动能。扭簧的势能等于柔性腿的势能<sup>[6]</sup>。

对于龟腿的动能我们可以得到等价的伪刚体动力学模型的动能公式:

$$T = \frac{1}{2} (M_d \dot{\theta}^2) \quad (2)$$

式中  $T$  为龟腿动能,  $N \cdot m$ ;  $M_d$  为龟腿的伪刚体集中质量,  $kg$ ;  $\dot{\theta}_i$  为龟腿摆动的角速度,  $rad/s$ 。

根据伪刚体理论<sup>[7-9]</sup>, 机器龟的势能表达式如

下:

$$U = \frac{1}{2} K_i \theta_i^2 \quad (3)$$

式中  $U$  为势能,  $N \cdot m$ ;  $K_i$  为扭簧系数,  $N \cdot m/\text{rad}$ ;  $\theta_i$  为龟腿摆动的角度,  $\text{rad}$ 。

因为机器龟在水中的运动速度较低, 根据低雷诺数流体理论<sup>[10]</sup>, 我们得到龟腿受到的阻力:

$$F = \frac{4\pi\rho l^2}{\ln \frac{4l}{b+h} - \frac{1}{2}} \dot{\theta}_i \quad (4)$$

式中  $F$  为龟腿受到的阻力,  $N$ ;  $l$  为龟腿的长度,  $m$ ;  $b$  为龟腿的宽度,  $m$ ;  $h$  为龟腿的厚度,  $m$ ;  $\rho$  为液体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\dot{\theta}_i$  为龟腿摆动的角速度,  $\text{rad}/\text{s}$ 。

龟腿在信号发生器的作用下, 受到的驱动力:

$$Q = \frac{\beta}{\sqrt{\omega}} A \sin \omega t \quad (5)$$

式中  $Q$  为龟腿受到的驱动力,  $N$ ;  $\omega$  是信号发生器的电压频率,  $\text{Hz}$ ;  $A$  为信号发生器的电压幅值,  $V$ ;  $\beta$  为转化系数,  $N \cdot \text{Hz}^{1/2}/V$ 。

从而得到机器龟受到的外力为:

$$P = Q - F \quad (6)$$

把动能方程(2)、势能  $U$  等式(3) 和外力  $P$ (6) 代入拉格朗日方程中:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\partial U}{\partial \theta} = P \quad (7)$$

得到机器龟腿一般的动力学方程形式如下:

$$M_i \ddot{\theta}_i + \frac{4\pi\rho l^2}{\ln \frac{4l}{b+h} - \frac{1}{2}} \dot{\theta}_i + K_i \theta_i = \frac{\beta}{\sqrt{\omega}} A \sin \omega t \quad (8)$$

经过推导得到角位移和角位移幅度系数的表达式:

$$\theta_i = \frac{0.0716A}{\{\omega[(1-0.05\omega^2)^2 + 0.012\omega^2]\}^{1/2}} \sin(\omega t - \phi) \quad (9)$$

式中  $\phi$  为相位角,  $\text{rad}$ 。

$$|G(i\omega)| = \frac{1}{\{\omega[(1-0.05\omega^2)^2 + 0.012\omega^2]\}^{1/2}} \quad (10)$$

式中  $G(i\omega)$  为角位移幅度系数。

### 3 机器龟腿角位移特性

运用 MATLAB 分析了机器龟腿的角位移幅度系数  $G(i\omega)$  的变化规律, 如图 5。在  $0 < \omega < 2$  时,  $G(i\omega)$  急剧下降; 在  $2 < \omega < 3.899$  范围时, 缓慢增加, 当  $\omega = 3.899$  时,  $G(i\omega)$  达到次高点; 当  $\omega > 3.899$  时,  $G(i\omega)$  开始缓慢下降。

机器龟腿宽 4.6 mm、长 21.6 mm, 机器龟的身体主要由泡沫塑料构成。通过数字信号发生器控制加在 ICPF 上的电压幅值和频率的变化, 从而使龟

腿产生摆动, 龟腿末端位移的测量数据如图 6。

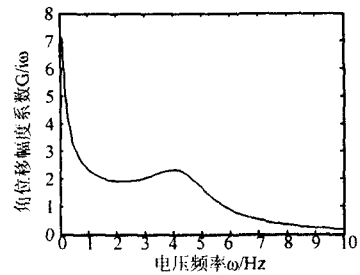


图 5 伪刚体龟腿的角位移幅度特性曲线

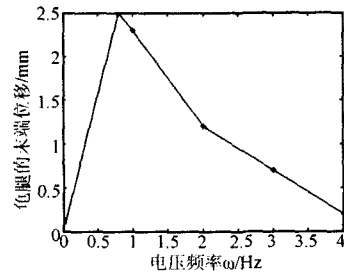


图 6 机器龟腿的末端位移测量曲线

根据机器龟腿的角位移函数(9), 我们可以得到如下信息:

当  $\omega = 0$  时,  $\theta_i = 0$ ; 当  $0 < \omega t - \phi < \pi/2$ ,  $\theta_i$  随着  $\omega$  成正比增长; 当  $\pi/2 < \omega t - \phi < \pi$ ,  $\theta_i$  和  $\omega$  成反比关系。因此, 我们可以画出当  $0s < t < 10s$ , 电压  $V = 2V$ ,  $\theta_i$  和频率  $f$  之间的关系曲线, 如图 7。

比较图 6 和图 7, 我们可以看出当  $0s < t < 10s$ , 电压  $V = 2V$ ,  $\theta_i$  和频率  $f$  之间的关系是相似的。但是仿真数据小于实验数据。我们将在今后的研究中进一步提高动力学模型的精度。

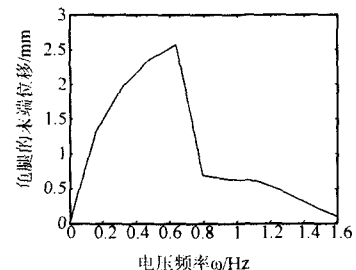


图 7 伪刚体龟腿的末端位移仿真曲线

### 4 结论

设计了一种新型 ICPF 驱动的仿龟微型机器人, 它不仅能在水中游动, 还能在不规则的环境中爬行。建立了基于伪刚体法的机器龟腿动力学模型, 推导出龟腿的动力学方程。数值仿真结果证明了伪刚体法计算分析龟腿的频率特性和摆动位移的有效性。伪刚体法可以被用于微机器人的动力学分析和设计中。

## 参考文献:

- [1] Guo Shuxiang, Toshio Fukuda and Kinji Asaka. A New Type of Fish-Like Underwater Microrobot[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2003, 8 (1): 35-40.
- [2] Guo S, Sasaki Y, Fukuda T. A New Kind of Microrobot in Pipe Using Driving Fin[C]// *Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Kobe, Japan, 2003; 667-702.
- [3] Guo S, Sasaki Y, Fukuda T. A Fin Type of Microrobot in Pipe[C]// *Proceedings of the International Symposium on Micro Machine and Human Science*. Nagoya, Japan, 2002; 93-98.
- [4] Sathaporn Laksanachoen. Models and Simulations for Design and Control of Legged Robots[D]. USA: Department of Mechanical and Aerospace Engineering in Case Western Reserve University. 2001; 3-17.
- [5] Satoshi Tadokoro, Shinji Yamagami, Toshi Takamori. An Actuator Model of ICPF for Robotic Applications on the Basis of Physicochemical Hypotheses[C]// *Proceedings of the International Conference on Robotics & Automation*. San Francisco, USA, 2000; 1340-1346.
- [6] Lin Nie, Desheng Li, Shuxiang Guo. Design and Analysis on the Dynamics of ICPF Actuated Tortoise-Like Flexible Micro-Robot[C]// *Proceedings of SPIE Sixth International Symposium on Instrumentation and Control Technology*. Beijing, China. 2006; 635-641.
- [7] Yue-qing Yu, Larry L. Howell, Craig Lusk, et al. Dynamic Modeling of Compliant Mechanisms Based on the Pseudo-Body Model[J]. *Journal of Machine Design*, 2005, 3 (6): 760-765.
- [8] Howell L. L. *Compliant Mechanisms*[M]. New York: Wiley press public. 2001; 12-33.
- [9] 陈知泰. 柔顺机构的动力学研究[D]. 北京: 北京工业大学机电学院, 2005; 3-67.
- [10] 严宗毅. 低雷诺数流体理论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002; 30-106.



李德胜(1962-),男,教授,博士生导师,研究方向为 MEMS、测控技术及微型机器人技术, dsli@bjut.edu.cn



聂林(1971-),男,机械设计及理论专业在读博士研究生,研究方向为 MEMS、测控技术及微型机器人技术, niechuanlin@emails.bjut.edu.cn