

文章编号 1004-924X(2001)06-0514-05

# 基于微操作的大行程高分辨率旋转微驱动器的研究

孙立宁, 荣伟彬, 曲东升, 高振国, 楼朝飞, 蔡鹤皋  
(哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 根据仿生学原理, 采用分立式布局, 研制出大行程高分辨率旋转微驱动器。该微驱动器采用电磁铁箝位、压电陶瓷驱动的爬行式步进机构形式, 实现了光学镜面的二维微调整操作。实验表明, 该微驱动器具有分辨率高、行程大、步距可变等特点, 也适用于其它微操作中大行程高分辨率的旋转驱动。

**关键词:** 微操作; 微驱动; 仿生型旋转微驱动器; 电磁铁箝位; 压电陶瓷(PZT)

中图分类号: TP242 文献标识码: A

## 1 引言

随着微/纳米技术的迅猛发展, 在微小机械零件装配、MEMS 组装、细胞操作、精密光学等高技术领域, 迫切需要具有纳米级微动定位能力的微操作机器人系统<sup>[1]</sup>。作为微操作的核心技术, 微/纳米级微驱动技术在相关领域的需求下, 成为人们关注的研究热点。在自适应光学系统的研究中, 经常需要通过微驱动装置动态改变光束经过的路径参数来获得高质量的光束。高速倾斜镜就是一类常用的驱动装置, 它是一种典型的大行程高分辨率微驱动机构。高速倾斜镜的性能优劣很大程度上决定了整个自适应光学系统的性能指标。因而, 其关键是研制大行程高分辨率的微动机构。

行程和分辨率是微动技术中的一对矛盾, 在保证高分辨率的条件下尽可能增大行程一直是微驱动技术的努力方向。许多研究人员在此方向上进行了深入的研究和探讨, 提出了多种形式的大行程高分辨率微驱动器<sup>[2,3,6,7]</sup>, 其中仿生型微驱动技术<sup>[4,5]</sup>是这个领域的一项新型技术。

## 2 仿生型旋转微驱动器原理及组成

### 2.1 仿生型旋转微驱动器的原理

图1是作者所研制的用于光学镜面微调整的二维旋转微驱动器的工作原理。它是根据自然界爬虫类的爬行方法提出的。其中A、C为箝位装置, B为驱动机构, D为固定镜面, E为活动镜面, F为转轴。初始状态时驱动机构B处于恢复状态, 箝位装置A松位, 箝位装置C箝位。若要实现顺时针方向转动, 则按如下步骤进行: 1) 箝位装置A由松位变为箝位; 2) 箝位装置C由箝位变为松位; 3) 驱动机构B伸长; 4) 箝位装置C由松位变为箝位; 5) 箝位装置A由箝位变为松位; 6) 驱动机构B恢复原长。这样完成了一个动作循环, 机构沿顺时针方向转动了一步。重复上述步骤, 则微驱动器继续沿顺时针方向旋转。同理可以实现机构的逆时针旋转。

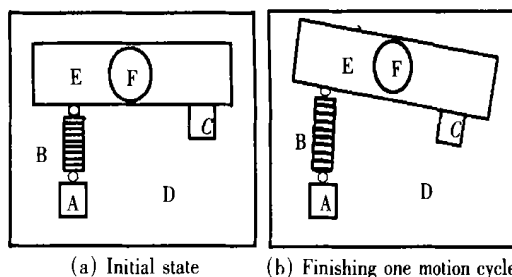


Fig. 1 Working principle of the rotary micro-actuator.

## 2.2 仿生型旋转微驱动器的组成

仿生型旋转微驱动器的结构布局如图2所示。其中,箱位装置采用电磁铁箱位方式,驱动机构为压电陶瓷驱动的柔性铰链,并且该机构同相邻部件均采用柔性铰链方式联接。箱位装置采用电磁铁,其铁心结构如图3所示。

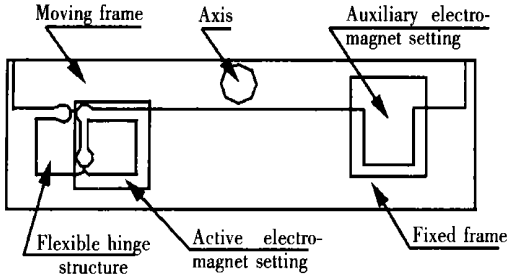


Fig. 2 Mechanical structure layout of the micro actuator.

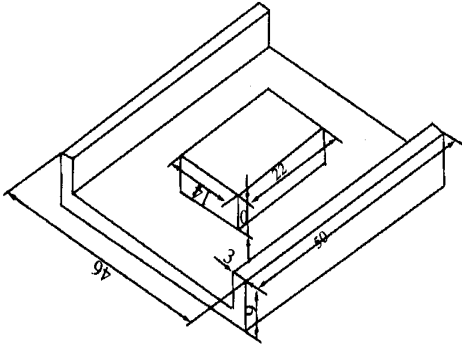


Fig. 3 Electro magnet core structure.

大气隙时(大于0.1mm),在漏磁导不随气隙变化的磁系统中,并且假定磁路为线性(不饱和)的,则电磁吸力的计算公式为:

$$F = \frac{1}{2} U_{\delta}^2 \frac{\mu_0 S}{\delta^2} \quad (1)$$

式中:  $U_{\delta}$  ——工作气隙的磁压降(A);

$\mu_0$  ——空气导磁系数,其值为  $1.25 \times 10^{-6}$  (H/m);

$S$  ——衔铁的作用面积( $\text{m}^2$ );

$\delta$  ——工作气隙的大小(m)。

小气隙时(小于0.1mm),磁极间磁感应近似均匀分布,电磁吸力的计算公式为:

$$F = \frac{B^2 S}{2 \mu_0} \quad (2)$$

式中:  $B$  ——作用面积  $S$  上的磁感应强度(T);

$S$  ——衔铁的作用面积( $\text{m}^2$ );

$\mu_0$  ——空气导磁系数,其值为  $1.25 \times 10^{-6}$  (H/m)。

表1中列出了电磁线圈导线的一些参数。根据所选取的结构参数,在小气隙情况下计算得到的电磁吸力为530N。

驱动机构中柔性铰链的结构如图4所示,铰链一端与箱位机构相连,另一端与要驱动的部件相连。经过静力学推导,柔性铰链机构的输出位移为:

$$\Delta = \frac{F b^2 l_1 l}{(k_1 + k_2) b^2 + \frac{k_3 k_5 (b + l)^2}{k_3 + k_5} - k_4 l^2} \quad (3)$$

式中:  $l_1$  ——铰链1、2之间的距离(m)(见图4);

$l_2$  ——铰链2、3之间的距离(m)(见图4);

$l$  —— $l = l_1 + l_2$  (m)

$b$  ——铰链3、4之间的距离(m)(见图4);

$k_i$  ——铰链  $i$  的转动刚度( $i = 1 \sim 5$ ) (N·m/rad);

$F$  ——压电陶瓷(PZT)的驱动力(N);

$\Delta$  ——柔性铰链机构的输出位移(m)。

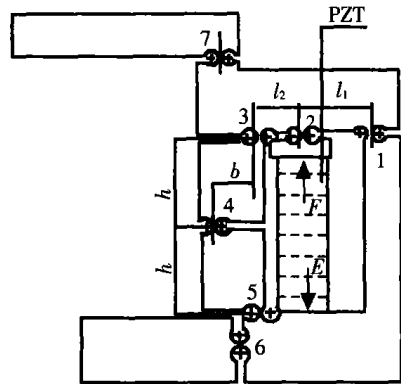


Fig. 4 Flexible hinge structural principle.

选用日本型号为AD1010D16,加120V电压,可得到位移  $11 \mu\text{m}$ 。机构的理论放大比为2.1,考虑到铰链的拉伸变形,实际放大比将略小于理论放大比。

Table 1 Parameters of the electromagnetism loop

Parameter	Diameter (mm)	Length (M)	Resistance ( $\Omega$ )	Current (A)	Voltage (V)	Inductance (H)	Circle -	Time constant (s)
V alue	0.21	77	41	0.1	4	3.16	680	0.078

### 3 仿生型旋转微驱动器的实验研究

#### 3.1 实验系统组成

仿生型旋转微驱动器测试系统的组成如图 5 所示。工业控制机为整个系统的核心, 压电陶瓷的驱动采用自行研制的 PD-II 型驱动电源。工控机通过接口板控制 PD-II 型高精度压电陶瓷驱动电源的输出。压电陶瓷驱动电源输出的电压加到压电陶瓷上控制压电陶瓷的变形, 进而使驱动机构旋转一个角度。工控机还通过接口板输出信号到箝位装置控制板, 控制箝位装置正确动作, 以实现连续的步进运动。机构的运动通过 DWS 超精密电容测量仪测得, 并通过数码管显示出来, 同时还把相应的电容测量仪模拟信号输出通过数据采集卡输入到工控机中进行控制, 并在控制界面上显示出来。

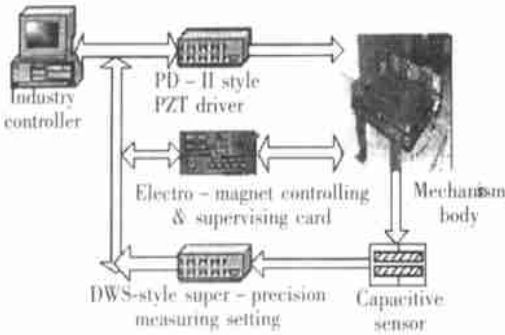


Fig. 5 Experimental system for biology imitating rotary micro actuator.

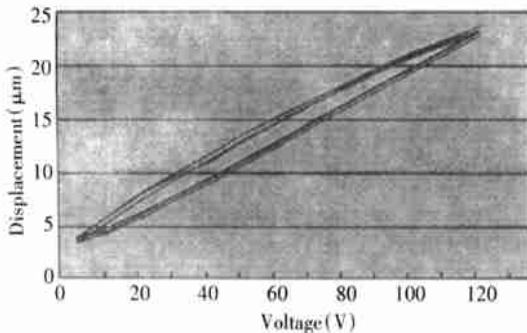


Fig. 6 Voltage displacement curve for the micro displacement mechanism.

#### 3.2 微驱动器的电压输入-位移输出特性测试

压电陶瓷微位移器输入电压从 0V ~ 120V ~ 0V 的顺序变化, 每次变化 10V, 所测得的结果如图 6 所示。从图中可以看出, 它是一条连续而不重合的曲线, 说明微位移器的输入输出特性是非线性的, 有很明显的迟滞。压电陶瓷的位移输出经柔性铰链放大后, 得到约 20 $\mu\text{m}$  的位移范围。

#### 3.3 箝位装置的电磁吸力测试

通过给电磁铁加电后, 在吸力的反方向加载的方法, 测得电磁吸力可达 500N, 基本满足要求。

#### 3.4 箝位装置的换步误差测试

反复让箝位装置箝位与松位, 同时测量被驱动机构的转角, 所得结果如图 7 和图 8 所示。从图 7 和图 8 中可以看出, 主动侧和辅助侧箝位装置的换步误差都在 0.3 $\mu\text{m}$  之内, 能较好地实现换步动作。

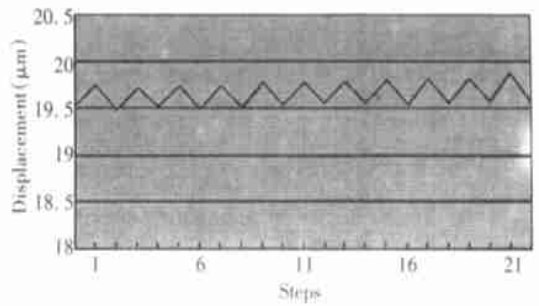


Fig. 7 Changing step error curve for the active anchor/loosen setting.

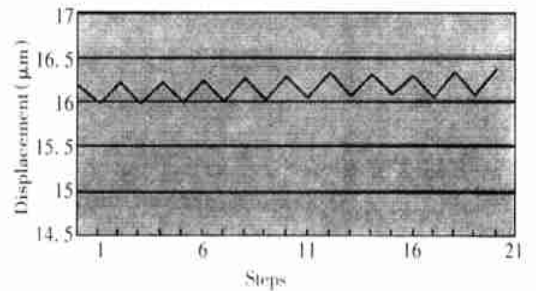


Fig. 8 Changing step error curve for the auxiliary anchor/loosen setting.

#### 3.5 系统的动态性能测试

给微驱动器施加阶跃电压信号, 同时用 3562 动态示波器记录电容测微仪输出, 所得驱动机构

的响应过程如图 9 和图 10 所示。可见系统有良好的动态相应过程。

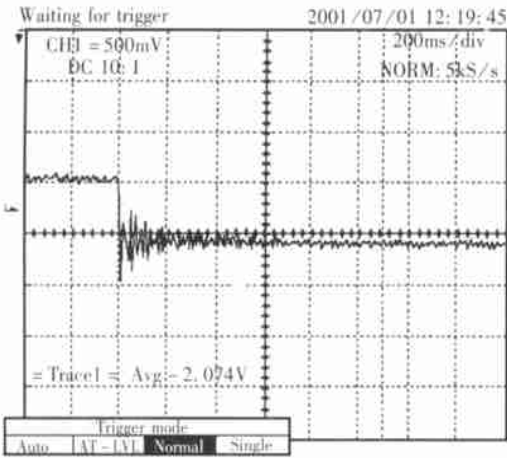


Fig. 9 Response curve for the step voltage of 100V ~ 40V.

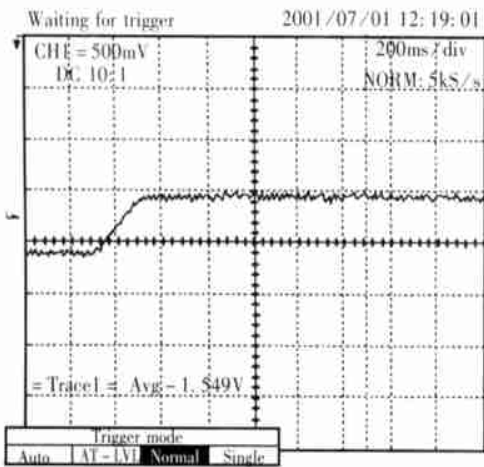


Fig. 10 Response curve for the step voltage of 40V ~ 100V.

### 3.6 系统的步进运动测试

步进运动机制是仿生型微驱动器的典型特征,这种运动机制有效地缓解了大行程和高分辨率的矛盾。图 11 是测得的微驱动器的步进运动曲线, 每一步的驱动阶段中压电陶瓷驱动电压变化为 60V。从图中可以看出, 该微驱动器每步大

约可以实现 11 $\mu$ m 的位移, 能较好的实现步进运动。其中虚线表示换步阶段, 实线表示驱动阶段。

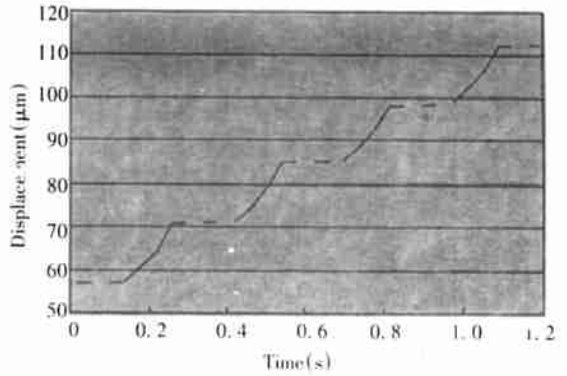


Fig. 11 Testing curve for the micro-actuator step motion.

### 3.7 主要技术参数

经测试,所研制的仿生型微驱动器的主要性能指标如下:

- 自由度: 2( 旋转)
- 转角行程: 5°
- 步进角: 最大可达 0.01°
- 分辨率: 0.02''
- 最大步速: 5 步/s

## 4 结 束 语

仿生型步进式微驱动机构能够在保持高分辨率的同时有效地增大微驱动器的行程, 研究证明了这一点。这种微动机制能广泛地用于大行程高分辨率微驱动中, 在纳米级微操作技术中有着广泛的应用前景。

### 参考文献:

[1] 孙立宁, 张涛, 等. 微操作机器人系统发展现状[A]. 中国第五届机器人学术会议论文集[C]. 哈尔滨, 1997, 32-38.

[2] 胡敏. 微细电火花加工装置研究[D]. 北京: 清华大学, 1997.

[3] 石黑明克, 武藤英一, 等. 压电陶瓷驱动电磁铁活块式微驱动装置[A]. 昭和 63 年度精密工学会秋季大会学术讲演会讲演论文集[C]. 1988, 139- 141.

[4] 杨宜民, 李传芳. 仿生型步进式直线驱动器的研究[J]. 机器人, 1994, 16(1): 37- 39.

- [5] 杨宜民, 李传芳. 高精度压电旋转驱动器的研制[J]. 机器人, 1994, 16(9): 41- 45.
- [6] 罗怡, 龚振邦, 孙麟治, 等. 双压电薄膜微机器人驱动的稳态[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(1): 59- 62.
- [7] 贾宏光, 吴一辉, 于振雷, 等. 压电驱动微位移工作台动态特性分析[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(5): 440- 443.

## Research on a Large Travel and High Resolution Rotary Micro driver Based on Micro- manipulation

SUN Li ning, RONG Wei bin, QU Dong sheng, GAO Zhen guo, LOU Chao fei, CAI He gao

( Robot Research Institute of Harbin Institute of Technology, Harbin 150001; China)

**Abstract:** According to biology imitating theory, a large travel and high precision rotary micro driver with discrete layout has been developed. Due to the stepping mechanism with electro magnet anchor/loosen and PZT driving, the micro- driver realizes two degree of freedom micro- displacement of optical mirror. Experiments show that the micro- driver realizes high resolution, large travel and variable step. Apart from optical micro driving, it can also be applied to large travel and high resolution rotary driving among some micro manipulations.

**Key words:** micro-manipulation; micro-driving; bionics imitating rotary micro-driver; electro-magnet anchor/loosen; piezoelectric elements (PZT)

作者简介: 孙立宁(1964- ),男,黑龙江鹤岗市人,教授,博士,博士生导师,国家“十五”863计划机器人技术主题专家组成员。研究方向:微机器人技术、机电一体化技术。

荣伟彬(1972- ),男,黑龙江兰西县人,博士研究生。研究方向:微操作机器人、机器人学。E-mail: rwb@hope.hit.edu.cn