

文章编号 1004-924X(2001)06-0535-04

基于压电陶瓷驱动的腹腔手术微型机器人

李 勃, 吴月华, 许 , 杜华生, 杨杰
(中国科学技术大学 工程科学学院, 安徽 合肥 230027)

摘要: 介绍了一个基于压电陶瓷驱动的多节蛇型游动腹腔手术微型机器人, 其特点是响应速度快, 运动精度高, 作用力与动作范围大, 每一节均可实现两个自由度方向上 $\pm 60^\circ$ 范围内迅捷而灵活的动作。对设计中的两个关键问题进行了叙述: 压电陶瓷微位移驱动器的设计及移动机制; 特殊的机器人关节设计, 并给出了系统仿真结果。

关键词: 压电陶瓷; 微型机器人; 腹腔手术

中图分类号: TP242 文献标识码: A

1 压电陶瓷腹腔手术机器人概念的提出

在外科手术领域中, 微创腹手术一直是人们追求的目标。然而, 目前进行微创手术的器械多为刚性体, 易对患者内部脏器造成损伤, 而且不具有智能, 难以在复杂的体内环境中灵巧地进行动作。

目前, 作者曾经用形状记忆合金作为驱动元件的多节式蛇型机器人, 实现了手术器械的能动弯曲。但是, 还存在着问题和不足。第一, 机器人可运动范围偏小, 机构支撑力不足; 第二, 机器人弯曲角的控制精度有待提高; 第三, 响应速度慢, 机器人动作不够迅速。

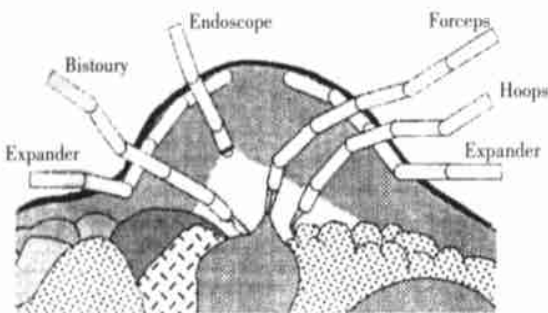


Fig. 1 View of a mini cut operation.

针对这些不足, 考虑到压电陶瓷材料体积小、响应速度快、输出力大、且易与电源、测位传感器、微机等组成闭环自控系统的特点, 作者改用压电陶瓷作为机器人的驱动功能元件, 设计了一个智能化的微型多节蛇行游动机器人, 使其可以能动地实现迅捷而灵巧的动作。将 CCD 摄像系统, 手术器械及智能控制系统分别安装在微型机器人的端部, 通过开在患者腹部的小口, 伸入腹腔进行手术。图 1 展示的是应用腹腔手术机器人进行手术的场景^[1]。

2 压电陶瓷的基本特性

压电陶瓷在电场的作用下具有逆压电效应和电致伸缩这两种效应, 可以用公式表述为^[2,5]:

$$s = dE + ME^2 \quad (1)$$

其中, dE 为逆压电效应; ME^2 为电致伸缩效应; d : 压电系数 (m/V); M : 电致伸缩系数 (m^2/V^2); E : 电场强度 (V/m); s : 应变。虽然电致伸缩效应存在于所有的电解质晶体之中, 但是一般都非常的微弱。笔者对一组机电耦合系数为 46.7, 直径 20mm, 厚度 2.07mm 的压电陶瓷材料进行了测试。图 2 所示的是基于 Michelson 干涉光路的试验装置原理图。它利用材料通电前后光程的变化, 从干涉条纹的移动变化得出微变形的值。光源为 He-Ne 激光器, 波长 0.6328 μm 。对实验

结果进行分析,并作多项式拟合,得出所测材料的位移-电压特性曲线,如图3所示。图中, O 和* 分别为电压上升过程中和电压下降过程中对应的压电陶瓷微位移量。实验结果进一步证明,对于一定的压电陶瓷材料,应变与外加电场之间存在着近似线性的关系,这种特质使其可以方便地成为位移驱动器中的驱动功能执行材料。

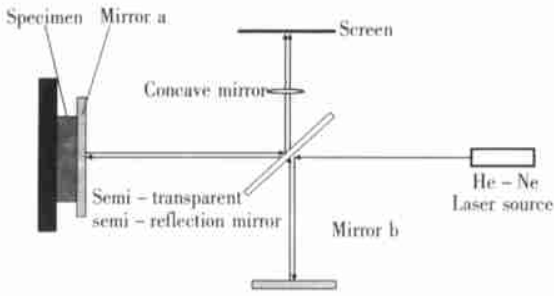


Fig. 2 Experimental setting.

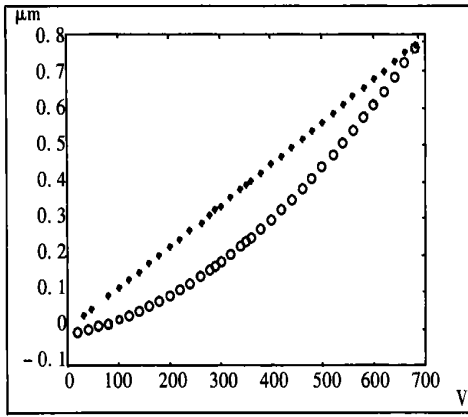
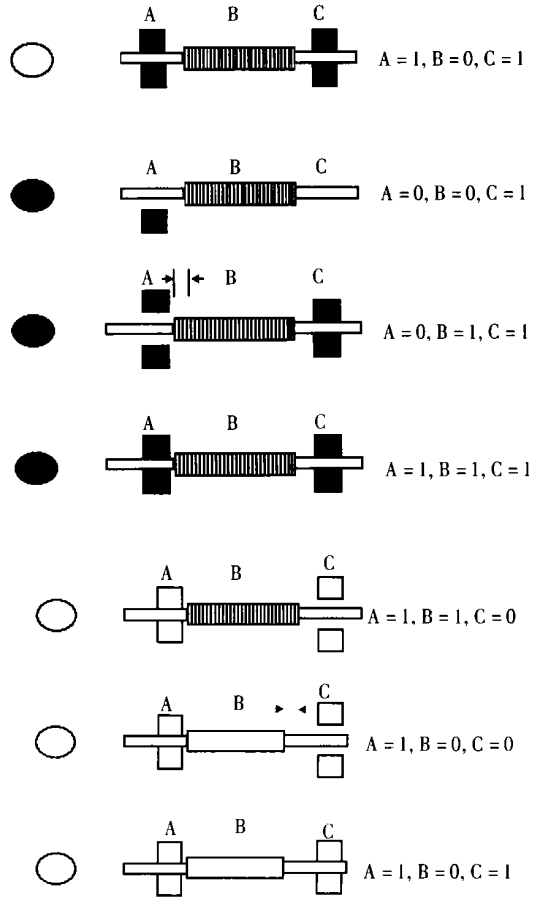


Fig. 3 Voltage deformation graph.

3 位移驱动器移动机制及实现

压电陶瓷的变形处于微米量级,如果令其成为可用的位移驱动元件,一方面,我们可以尽量增大单位长度内层叠的压电陶瓷晶片数量,另一方面,必须设计特定的驱动器结构和移动机制,使驱动器可以实现高速度和长距离的移动。本系统的移动原理如图4所示:



A: Locking unit B: Driving unit C: Locking

A. Locking unit B. Driving unit C. Locking

Fig. 4 Moving mechanism of the driver.

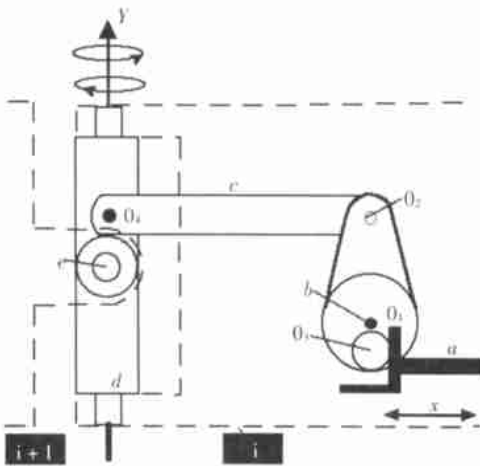
- 驱动器处于初始状态, A 与 C 通电锁紧, B 断电处于原始长度, 记为: $A=1, B=0, C=1$;
- 将锁紧单元 A 断电, 使其处于放松状态;
- 快速给压电陶瓷单元 B 加电压, 使其伸长 Δ ;
- 在 B 通电的同时, 使 A 通电锁紧;
- 在 A 和 B 通电的同时, 将 C 的电源断开, 使其处于放松状态;
- 将 B 的电源断开, B 断电后恢复到原始长度;
- C 通电加紧, 驱动器回到初始状态, 一个运动周期结束, 压电陶瓷单元 B 整体向左移动了距离 Δ_0 。

在具体实现这个驱动器时, A, B, C 均采用压电陶瓷, 使锁紧单元与力输出单元频率响应一致, 方便了驱动控制的实现。因为选用的压电陶瓷材料响应速度极高, 达到 0.1msec 以下, 所以此驱动

器可以完成高速的大范围运动。

4 基于压电陶瓷驱动器的微型机器人关节

因为以上所讨论的压电陶瓷微位移驱动器实现的是直线运动, 而我们需要的是使多节机器人的每一节都可以实现两个自由度的转动, 为了实现这个目的, 设计了如图 5 所示的关节机构, 此结构实际是将十字交叉轴、四杆运动机构及正弦机构综合演化后得来的。图中 b 为一转动中心为 O_1 的偏心轴柱, 其上有一个以 O_3 为圆心的小圆柱; a 为压电陶瓷驱动器的推杆, 其末端固接一个与小圆柱 O_3 动配合的滑槽; 当 a 沿着 X 轴(虚轴)方向直线运动的时候, O_3 在滑槽中移动, 偏心轴 O_1 整体围绕 O_1 点转动, 进而带动 c 杆沿 X 轴方向直线运动; 杆 c 通过与 d 轴相连接的 O_3 点将运动传递给 d, 使 d 围绕着 Y 轴(虚轴)转动。a, b, c 均位于系统的第 i 节中, 第 i 节以动配合的方式安装在 d 轴上, 而第 $i+1$ 节安装在 e 轴之上; 当 d 轴转动时, e 轴随之绕 Y 转动, 进而带动整个第 $i+1$ 节围绕 Y 轴转动。同理, 若在第 $i+1$ 节中与 d 轴成 90° 方向上安装一个与图 5 中相同的四杆机构, 使其作用于 e 轴, 当第 i 节固定不动时, 第 $i+1$ 节相对于第 i 节做围绕 e 轴的转动。这样一来, 第 $i+1$ 节就实现了两个自由度的转动。此外, 适当的选择 O_2O_1 与 O_1O_3 的长度, 可以达到行程放大的目的。在本系统中, $O_2O_1: O_1O_3 = 4: 1$, 压电陶瓷驱动器的输出位移被放大了 4 倍。



a. Pushing bar b. Eccentric axis O_1 c. Connection bar d. Rotating axes e. Axes intersected and upright to d.

Fig. 5 Structure of the robot joint.

所以, 此机构具有运动转化和行程放大的双重功能。由于四杆机构的输出端位移输出较小, 所以应尽量选用刚度较高的材料来制造各个部件, 并且使各部件间有比较高的安装精度, 以消除由零件弹性变形以及间隙而可能引起的运动误差。

5 结果及仿真

本机器人系统共分 5 节, 每节都具有两个转动自由度, 节长 41mm, 外径 18mm, 内径 7.3mm, 工作性能参数见下表:

Table 1 Parameters of Operating Performance

Rotation rate	$32471 [\text{sec}^{-1}]$
Max. rotating angle	$\pm 60^\circ$
Frequency of driving wave	500 [Hz]
Driving voltage	100 [V]

根据系统的结构参数与性能参数, 对微型机器人系统的运动状态进行仿真。对于给定的目标位置, 对 5 节系统建立动力学方程并求解, 求出各节的转动角度。运用 Visual C++ 编程对系统进行仿真, 通过控制每个驱动器上所加的驱动波数, 使机器人的每一节达到指定的角度和位置, 仿真效果如图 6 所示。

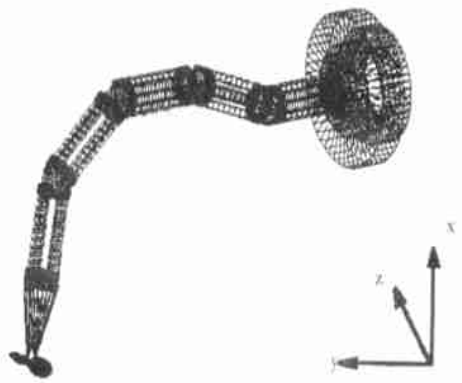


Fig. 6 Simulation result.

6 结 论

作者从压电陶瓷驱动概念的提出开始, 按照微型机器人系统的设计实现过程, 对压电陶瓷材料的特性和测试, 驱动器的移动机理, 两自由度关节机构的设计和系统仿真等一系列问题进行了讨论。由文中的讨论可以看出, 应用压电陶瓷来驱动微型的腹腔手术机器人, 可使系统具有体积小、

重量轻、精度和分辨率高、频响高、锁紧可靠、输出力大等优点,而多节蛇型游动系统又有其特有的运动范围大、动作灵活的优点。所以,基于压电陶

瓷驱动的微型多节蛇型游动机器人系统,在小创伤腹腔外科手术领域中拥有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 中村仁彦,松井启. 腹腔镜下外科手术用能动钳子的制御[A]. 日本机械学会95年讲演论文集[C], 1995, 420-423.
- [2] 张涛,孙立宁,蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. 光学精密工程, 1998, 6(5): 26-32.
- [3] Holland R. Representation of the dielectric, elastic, and piezoelectric losses by complex coefficients[J]. IEEE Trans. Sonic Ultra, 1967, 14: 18-20.
- [4] 杨杰. SMA 大肠内窥镜的导向机理与控制计算[J]. 中国科技大学学报, 1998, 28(1): 21-26.
- [5] 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, 18(5): 440-442.

Study of the Piezoelectric Element Based Micro Robot for Celiac Operation

LI Bo, WU Yuehua, XU Min, DU Huasheng, YANG Jie

(College of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: The authors introduce a micro snake-like robot system for celiac operation driven by the piezoelectric element based mini-displacement driver, which features small size, high precision displacement, prompt response and adequate output force. Every segment of the robot can rotate on 2 freedom direction in a range of $\pm 60^\circ$ freely and rapidly. Two essential questions in designing the system i. e., the structure and moving mechanism of the piezoelectric element based mini-displacement driver; the structure of the special robot joint, are specified and discussed. Finally, the system simulation on computer is given.

Key words: piezoelectric elements; micro robots; celiac operation

作者简介:李勃(1975-),男,陕西省西安市人,1999年7月毕业于中国科学技术大学工程科学学院,并获工学学士学位,现为中国科学技术大学工程科学学院硕士研究生,主要从事微型机器人技术的研究。

E-mail: libo@mail.ustc.edu.cn