

基于光学聚焦方法的热驱动微执行器位移测量*

缪磊^{1,2},董再励²,陈浩然³,李文荣^{2,3},王越超²

(1.中国科学院研究生院,北京 110039;2.中国科学院沈阳自动化所机器人学重点实验室,
辽宁沈阳 110016; 3.香港中文大学微纳米技术中心,香港 Shatin N.T.)

摘要:随着微机电系统(MEMS)设计日趋成熟,度量问题越来越成为微系统技术中的热点。使用改进的拉普拉斯求和方法(SML)和深度估计法来测量热驱动微夹持器末端的弯曲程度。实验中,使用了10幅在42℃时微夹持器的水下工作图像来验证这种光学聚焦方法,结果证明使用光学聚焦方法可以测量出作为驱动器反馈输入的末端弯曲大小,实现对驱动器运动的精确控制。

关键词:微机电系统; SML 算法; 深度估计

中图分类号:TP21 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)06-0691-05

Displacement measurement of a thermally actuated polymer micro robotic gripper using the optical focus method*

MIAO Lei^{1,2}, DONG Zai-li², CHAN Ho-yin³, LI Wen-rong^{2,3}, WANG Yue-chao²

(1. Postgraduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 110039, China; 2. Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Center for Micro and Nano Systems, The Chinese University of Hongkong, Shatin N.T., China)

Abstract: With the maturing design of micro electrical mechanism systems (MEMS), the metrology for MEMS is becoming the hot research in the micro system technology. In this paper, the sum-modified-laplacian (SML) focus measure and depth estimation method are used to measure the tip deflection of a thermally actuated polymer micro robotic actuator. Ten one underwater images of the micro actuator working at 42℃ have been used to illustrate the idea of measuring the tip deflection using optical focus method. The results can be used for metrology of MEMS. Optical focus method is used to measure the tip deflection, which can act as a feedback input to the actuator. Then, an accurate control of the motion of actuator can be achieved.

Key words: Micro electrical mechanism systems; Sum-modified-laplacian algorithm; Depth estimation

收稿日期:2005-02-10; 修订日期:2005-03-18

* 基金项目:国家863计划资助项目(2002AA431620)

作者简介:缪磊(1977-),男,辽宁沈阳人,博士生,主要研究方向为显微视觉,微、纳米传感系统。

0 引言

细胞操作、细胞分离、微注射越来越成为微机器人中受到广泛关注的研究领域。传统的细胞分离是利用吸液管,但是用这种方法操作生物个体时存在很多缺点。一种新的可以在液体媒质中操作的微执行器已经设计出来^[1]。这种执行器的基本结构是由聚对二甲苯 C 聚合物层压缩的铂金加热器组成的三层热驱动器,这种热驱动器可以在低能耗的情况下产生较大的位移和力输出。

我们使用的热驱动器的结构如图 1 所示。微执行器长 2 mm、宽 100 μm ,三层的厚度分别是 0.1、0.2、0.3 μm 。为了得到驱动器完整的反馈控制,必须测量驱动器变形后末端的弯曲程度。

为了对微观结构进行准确控制,使用了一种能够真实刻画出微观结构动态特性的方法。MEMS 测量的主要目标就是提供输入反馈和仿真处理。反馈控制应该包括设备的行为、系统参数和材料性质,如果能成功实现这项处理,即可以对 MEMS 设备进行建模和控制。微观控制进步的一个重要标志就是 MEMS 动态特性的可视化,包括运动测量、剖面可视化等等。频闪干涉仪、计算机微视觉系统和激光多普勒干涉仪系统^[2]三种光学工具得到了广泛应用,尽管这些设备在应用中都体现了各自的很多优点,且应用广泛,但是它们并不都适合于所有 MEMS 变形与位移的测量。文中提出了一种光学聚焦方法来测量末端的弯曲程度,从而准确地刻画出驱动器形变特性。

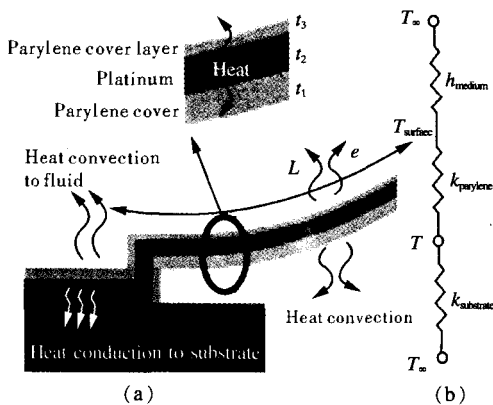


图 1 微执行器机构

Fig.1 Architecture of micro actuator

1 计算机微视觉系统

在光学聚焦微视觉应用中,显微镜可见的目标物体通常在微米范围内,而几个微米就可以占满整幅数字图像。由于观察的深度有限,微驱动器的运动图像有可能会模糊,相应地,图像强度也会以一种未知的方式发生变化。这样使用现有的主动视觉和被动视觉方法就很难测量出微驱动器的运动性质,如双目立体视觉、阴影成像、光度立体视觉、结构光等。因此,人们一直期待有一种实用并且可靠的方法能解决这个问题。

聚焦机制在人类视觉系统中起着极其重要的作用,调焦分析已经被应用于自动图像采集系统中。其中深度聚焦是一种更可靠的方法,它已经广泛应用于包括微装配等许多领域。在微视觉系统中,因为小深度观察的特性,聚焦方法和深度估计将起重要作用。

在定焦距和自动调焦系统中,使用了很多聚焦测量方法^[3-9]。改进的拉普拉斯求和算子(SML)可用来测量图像间的相对聚焦程度,从而成功地识别出图像的几种纹理特征。使用该算子可以测量序列图像,得到一序列图像中同一图像区域的聚焦测度值。因为模糊程度可以用高斯模型近似,因此在模型中加入聚焦算子就可以得到深度的准确估计。实验中使用光学显微镜来观察微驱动器驱动平台的运动,从而可以得到样本穿过聚焦图像平面的运动图像序列。

关于聚焦和模糊图像的详细描述见参考文献[4]。微驱动器安装在计算机微视觉系统的移动平台上,如图 2 所示。参考平面是相对于最初的平台位置。视觉系统定义了一个参考面,这样聚焦平面和参考平面的距离 d_f 、移动平台相对参考面的移动距离 d_s 就可以被测量出来。当移动平台面向聚焦平面移动时,微驱动器驱动的区域在聚焦平面上的成像会按照聚焦程度逐渐增大,当与聚焦平面重合时聚焦程度最好。如果移动平台继续移动,图像就又会变得模糊。

2 聚焦测度算子

为了识别出序列图像的最佳聚焦,必须使用一种图像聚焦测量方法。首先,假定平台移动和图像获取

都是连续的,实际上这么多图像不可能被全部采集到,采集到的只是部分图像。文中平台的移动距离为 Δd ($\Delta d=10 \mu\text{m}$),平台每移动到一个位置采集一幅图像。可以通过其他方法得到深度的准确估计,这种方法的显著特点就是图像区域的深度估计可以由聚焦算子算出。这样,微驱动器的移动可以由 $d=d_i-d_s-d_{\text{estimation}}$ 计算出,这里 d_i 对于给定的光学系统来说是一个常数,移动高度 d_s 可以测量,估计值 $d_{\text{estimation}}$ 即使用聚焦算子估计的深度。

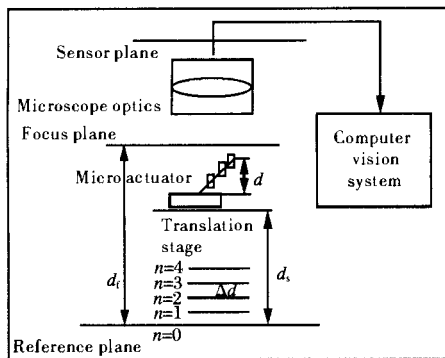


图2 计算机微视觉系统简图

Fig.2 Simple frame of computer micro vision system

假设把聚焦测度算子 $o(x,y)$ 应用在模糊图像 $I_d(x,y)=h(x,y)I_f(x,y)$ 中,结果可以表示为:

$$r(x,y)=o(x,y)(h(x,y)I_f(x,y)) \quad (1)$$

因为弯曲是线性恒变化的,可以把上式改写为:

$$r(x,y)=h(x,y)(o(x,y)I_f(x,y)) \quad (2)$$

模糊是低通滤波过程,如果图像具有高频分量,模糊对该图像的影响会更加显著。因此有效的模糊算子必须是一个高通滤波器。所谓的一幅图像的高通滤波取决于它的二维派生。对于二维图像,可以把拉普拉斯算子应用于频域。例如在模糊图像 $I_D(u,v)$ 中应用拉普拉斯算子 $L(u,v)$,可以得到 $L(u,v) \cdot H(u,v) \cdot I_F(u,v)$,这里 $L(u,v) \cdot H(u,v) = -(u^2+v^2) \cdot e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma_f^2}}$ 。

值得注意的是拉普拉斯算子的 x,y 两个方向的派生具有相反的标志而且相互抑制,因此采用改进的拉普拉斯算子^[4]:

$$\nabla_M^2 I = \left| \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \right| + \left| \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right| \quad (3)$$

通常采用的是 3×3 的离散逼近的拉普拉斯算子。为了得到可能的图像纹理尺寸变化,在像素间使用变化的步长来计算部分派生。采用的算子为:

$$ML(x,y) = |2I(x,y) - I(x-step,y) - I(x+step,y)| + |2I(x,y) - I(x,y-step) - I(x,y+step)|$$

这里运用的运算法则是:

$$F(i,j) = \sum_{i-N}^{i+N} \sum_{j-N}^{j+N} ML(x,y)$$

式中参数 N 决定聚焦测度算子的窗口尺寸。文中选择步长 $step=1$,而且不使用门限控制。

3 实验结果

通过显微镜采集了 10 幅图像,如图 3 所示,使用聚焦算子对每一幅图像中驱动器的 3 个区域进行了计算,得到 3 条可以表示 3 个区域微驱动的聚焦算子测度值的曲线,如图 4 所示。图中 Y 轴代表使用 SML 算子的聚焦测度值, X 轴代表计算测度的图像序列。星号表示区域范围在(5:55,220:350)内的测度值,矩形范围为(75:125,220:350),圆范围为(427:477,220:350)。下面将介绍如何利用聚焦算子进行深度估计。如参考文献[4]所述:

$$F = F_d \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{d-\bar{d}}{\sigma_f} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

两边取自然对数,得到:

$$\ln F = \ln F_d - \frac{1}{2} \left(\frac{d-\bar{d}}{\sigma_f} \right)^2 \quad (5)$$

如果使用树状测度值 F_{m-1}, F_m, F_{m+1} 就可以通过解方程计算出 \bar{d}, σ_f 的值^[4]。图 4 为深度曲线图。其中 X 轴表示深度估计值, Y 轴表示聚焦测度值,当曲线到达峰值时,可以得到深度估计 $d_{\text{estimation}}$ 。

4 实验系统构成

图 6 是微驱动实验的装备图。实验中使用的是 GP-KR222 CCD 相机、2000 X 数字显微镜、光纤卤素灯、XYZ 三维微动平台和图像采集卡,计算所得的聚

焦测度值如图 4 所示。选取 10 幅图像来验证使用聚焦算子进行深度估计的方法,结果如图 5 所示。

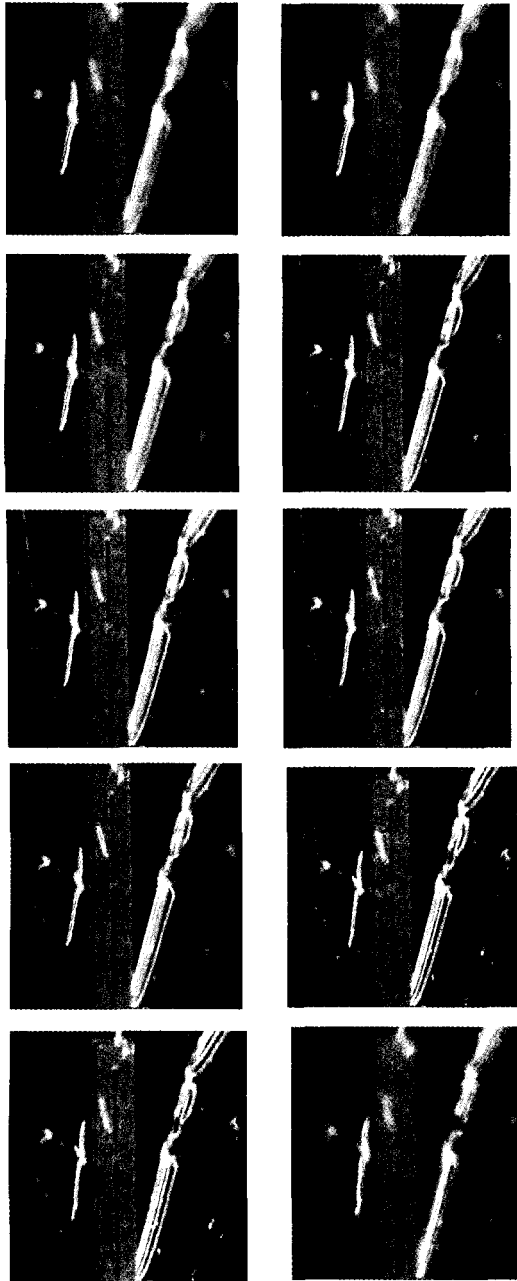


图 3 显微图像序列

Fig.3 Sequence of microscopic images

5 结论

目前,微视觉已成为热点研究领域,特别是微机电系统的测度问题。本文提出的方法可以用来测量大位移微驱动器末端弯曲程度,这样就可以为热度驱动器提供一个反馈控制,从而控制驱动器的运动。

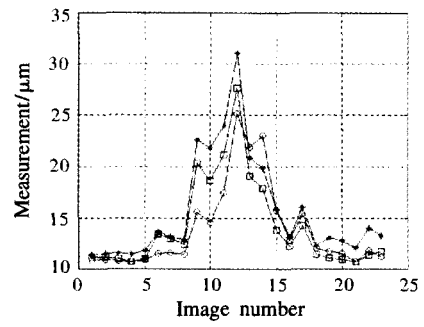


图4 3个不同区域的聚焦测度

Fig.4 Focus metrology of three different regions

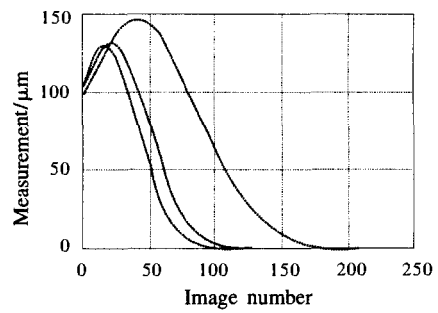


图 5 深度估计

Fig.5 Depth estimation

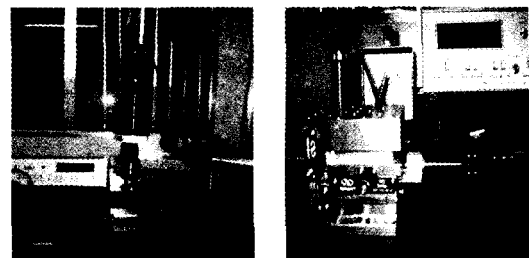


图 6 实验系统构成

Fig.6 Experiment setup

参考文献:

[1] Chan Ho-yin , LI Wen-jun. A thermally actuated polymer micro robotic gripper for manipulation of biology cells[A].IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2003)[C]. Taipei:Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.,2003. 288-293.

[2] Rembe C, Kant R, Muller R S.Optical measurement methods to study dynamic behavior in MEMS[A]. Proceeding of SPIE[C]. 2001,4400.127-137.

- [3] Fayman J A, Sudarsky O, Rivlin E, et al. Zoom tracking and its application[J]. Machine Vision and Application, 2001, 13(1): 25-37.
- [4] Nayar S K, NaKagawa Y. Shape from focus[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(8): 824-831.
- [5] Tsai D M, Chou C C. A fast focus measure for video display inspection[J]. Machine Vision and Application, 2003, 14: 193-196.
- [6] Ens J, Lawrence P. An investigation of methods for determining depth from focus[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(2): 97-107.
- [7] Lai S H, Fu C W, Chang S. A generalized depth estimation algorithm with a single image[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14: 405-411.
- [8] Pentland A P. A new sense for depth of field[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(4): 523-531.
- [9] Yang G, Nelson B J. Wavelet-based autofocusing and unsupervised segmentation of microscopic images[A]. International Conference on Intelligent Robotics and Systems[C]. Las Vegas, Nevada: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2003. 2143-2148.
- [10] Inoue S, Spring K R. Video Microscopy[M]. New York: Plenum Press, 1997. 122-167.
- [11] CHENG Ji-wei, GONG Ma-li, JIA Wei-pu, et al. Deflection angle measurement system using PSD for a 2 DOF laser scanner[J]. Infrared and Laser Engineering(程继伟, 巩马理, 贾维涛, 等. 基于 PSD 的二维定心扫描摆角测量系统. 红外与激光工程), 2003, 32(6): 57-61.
- [12] CHEN Hong, CHANG Qing, GUO Tian-tian, et al. Real-time infrared image enhancing algorithm easy to implement[J]. Infrared and Laser Engineering(陈洪, 常青, 郭天天, 等. 一种易于硬件实现的红外图像实时增强算法. 红外与激光工程), 2004, 33(3): 282-287.

(上接第 680 页)

show that far stadia and concealment are the two most important properties of pseudo random pulse laser assistant LLL imaging system.

Acknowledgement

The authors are very grateful to teacher ZHANG Bao-min, GU Guo-hua and master LI Min, TANG Hong-xia for their works in this paper.

References:

- [1] ZHANG Jing-xian, LI Yu-dan, JIN Wei-qi. LLL and Infrared Imaging Technology [M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press(张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术. 北京: 北京理工大学出版社), 1995. 156-167.
- [2] Jenkins N A, Vandenberg M, Tritchew S, et al. ALBEDOS: an airborne laser based enhanced detection and observation system for coast guard and maritime patrol application[A]. SPIE[C]. 1994, 2269. 201-207.
- [3] AI Ke-cong. Research on LLL image system's threshold detect theory and stadia detection equation (continuous)[J]. Application Optics(艾克聪. 微光成像系统的阈值探测理论和视距探测方程的研究(续). 应用光学), 1994, 15(5): 25-33.
- [4] LI Jin-zong, WEI Xiang-quan, CHEN Feng, et al. Analysis of operating range of light emitting diode[J]. Infrared and Laser Engineering(李金宗, 魏祥泉, 陈凤, 等. 发光二极管的作用距离分析. 红外与激光工程), 2004, 33(2): 142-144.
- [5] NIU Yan-xiong, WANG Yue-feng, LEI Ming, et al. Estimation of the LLL night vision system's largest operation distance [J]. Photo Electronics and Laser(牛燕雄, 汪岳峰, 雷鸣, 等. 微光夜视仪最大作用距离的估算. 光电子·激光), 2000, 11(6): 620-623.
- [6] LI Min. Research on the technique of pulse infrared laser assistant night vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology(李敏. 脉冲红外激光助视夜视技术研究. 南京: 南京理工大学), 2003. 29-33.
- [7] SHEN Bo, WEN Tao, SUN Cheng-shou. Low-power realization of m-array pseudo random coder [J]. Microelectronics(沈伯, 温涛, 孙承绶. m 序列伪随机码发生器的低功耗实现. 微电子学), 1999, 29(1): 19-24.
- [8] SUN Shao-yuan, ZHANG Bao-min, WANG Li-ping, et al. Fusion of low light level image and laser assistant vision image based on contrast modulation[J]. Infrared and Laser Engineering(孙韶媛, 张保民, 王利平, 等. 微光图像与激光助视图像的对比度调制融合. 红外与激光工程), 2003, 32(2): 170-172.