

# 基于显微视觉的宏/微双重驱动微动台的自动标定

于保军<sup>1,2</sup>, 张 玮<sup>1</sup>, 王红东<sup>3</sup>, 杨志刚<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022; 2. 长春工业大学 机电学院, 长春 130012; 3. 长春科技创业服务中心, 长春 130012)

**摘要:**提出了基于压电技术的微操作系统的自动标定方法,采用混合式步进电机直接驱动的宏动平台,实现系统大行程宏动定位,安装在宏动平台上的压电陶瓷驱动的微动平台和精密光栅,实现亚微米级的分辨率和定位精度,通过以上两部分实现定位机构的全闭环反馈控制,采用显微视觉反馈获取微动台操作器在图像中的位置信息进行标定。实验结果表明:系统的动态和稳定性能良好,自动标定运算速度快,运行速度达到 11 frame/s,实现了对系统的精确标定,标定精度达到 0.1  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:**仪器仪表技术;宏微双重驱动;压电技术;精密定位;显微视觉;自动标定

**中图分类号:**TH137 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)06-1326-06

## Automatic calibration of macro-micro dual-drive micromotion stage based on micro-vision

YU Bao-jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, WANG Hong-dong<sup>3</sup>, YANG Zhi-gang<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China; 3. The Science and Technology Carve Out Service Center of Changchun, Changchun 130012, China)

**Abstract:** An automatic calibration technique based on the piezoelectric technology (PZT) micro-operation system was presented. Long travel macro-motion positioning is realized by a hybrid step motor. Submicron resolution and positioning precision are realized by a micro-stage driven by PZT which is mounted on a macro-stage as well as a high resolution optical linear encoder. A closed-loop control was achieved by both of the above-mentioned positioning systems. Micro-vision feedback was integrated into the closed-loop system to get the position information of the micro-stage of the operator in the image to do the calibration. The experimental results showed that the dynamic performance and working stability of the system were satisfactory. The system is characterized by high calibration speed and precision with the image processing rate of 11 frames per second and the positioning precision of 0.1  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** technology of instrument and meter; macro-micro dual-drive; piezoelectric technology (PZT); precision positioning; micro-vision; auto calibration

收稿日期:2007-07-19.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50735002).

作者简介:于保军(1970-),男,讲师,博士研究生.研究方向:压电驱动与控制,机器视觉,机电一体化.

E-mail:bruce5257@126.com

通信作者:杨志刚(1956-)男,教授,博士生导师.研究方向:微小机械与精密机械. E-mail:yzg@jlu.edu.cn

由于 MEMS(微机电系统)、生物医学工程、精密光学工程和超精密加工等领域的快速发展,迫切需要能够在亚微米级,甚至在纳米级尺度上进行精密定位的系统及装备,各种大行程精密定位系统应运而生。针对上述情况,在 20 世纪 80 年代中后期,国内外学者相继提出了宏/微双重驱动微操作系统的初步想法<sup>[1-2]</sup>。经过近 20 年的探索,证明了宏/微双重驱动微操作系统在很多方面的性能优于传统的采用单一驱动方式的微操作系统。是目前实现大行程、高精度定位的一种有效手段<sup>[3-5]</sup>。

微操作是许多尖端科技领域中的关键技术,其共同特点是:被操作对象外形尺寸十分微小(一般为微米级甚至纳米级),这就要求操作手具有很高的运动精度和分辨率。为实现高精度,许多特殊的驱动器和机构形式被采用。但由于微操作机构的结构特点和对精度的过高要求,很难找到理想的标定方法和仪器。即使标定实验中得到了满意的结果,但由于机构重力以及温度等环境因素的影响,随着时间的推移,机构结构参数会发生微小变化,进而导致运动模型发生变化。为了方便研究和应用,微动机构经常采用简化的运动学模型,以及经常更换操作工具(如在一次细胞操作中需多次更换注射针),这些都会导致运动模型不准确。为补偿这一误差,视觉反馈控制是一个好的选择。同时,视觉系统为微操作提供了必不可少的微观世界的观察手段<sup>[6-7]</sup>。但是,利用视觉伺服控制的时候,不可避免地会涉及到系统的标定问题,宏观条件下的标定技术不适合于微操作系统的标定。

作者对自行研制的一种宏/微双驱动精密定位微动台系统进行了自动标定的研究。针对上面提到的标定困难的问题,利用微动台自身的结构器件对微动台进行标定。该微动台的宏动部分采用混合式步进电机、滚珠丝杠组成;微动部分由压电驱动器构成,显微镜头、CCD、图像采集卡构成视觉位置传感器。兼备混合式步进电机的大行程和压电陶瓷响应快、位移分辨率高等优点,微动部分的压电微驱动器可实现亚微米级的分辨率和定位精度,通过标定后缩短了系统运行的稳定时间。

## 1 微动台的组成与控制

### 1.1 宏动部分的组成与控制

宏动部分即宏动台由精密级滚珠丝杠副组

成,由混合式步进电机直接驱动。在 XYZ 三个方向各有一个电机和一个丝杠驱动执行系统组成,分别实现上下、纵向、横向三种运动。这种传动形式适于工作行程较大的情况。

将输入信号的电源正极连接到混合式步进电机驱动器公共端子上,控制信号连接到对应的信号端子上。控制信号低电平有效,此时对应的内部光耦导通,控制信号输入驱动器中,并驱动电机运行一步,信号响应频率为 15 kHz,图 1 为电机驱动器与电机的连接图。

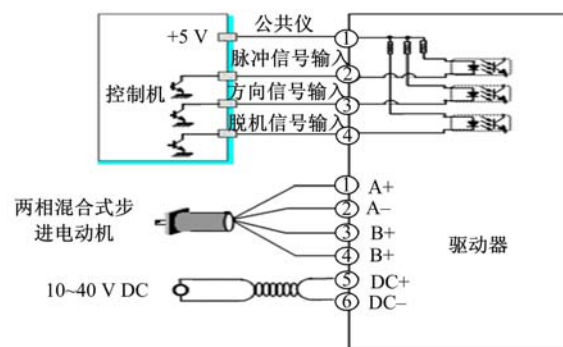


图 1 电机驱动器与电机的连接图

Fig. 1 The connect diagram of driver and step motor

微操作系统的宏动部分的丝杠行程是 78 mm,螺旋副的导程为 0.5 mm。理论上,螺旋副的相对运动关系可以用式(1)计算出。

$$l = \frac{P_h}{2\pi}\varphi \quad (1)$$

式中: $P_h$  为螺旋副的导程,本工作台采用的  $P_h = 0.5$  mm; $\varphi$  是螺杆和螺母之间的相对转角; $l$  为 XYZ 三个方向上的直线移动最小分辨率。

此混合步进电机的控制电路里带有细分电路,最大细分参数  $K = 128$ 。若不细分时的步距角为  $\Delta$ ,细分后式(1)中的  $\varphi$  可表示为

$$\varphi = \frac{\Delta}{K} (K \text{ 为细分数}) \quad (2)$$

将相关参数带入式(1)、(2)进行计算,可以得到粗动部分的 XYZ 三个方向上的直线移动最小分辨率为  $1 \mu\text{m}$ 。

### 1.2 微动部分的构成与控制

当压电晶体置于外电场中,由于电场的作用,晶体会发生变形,形变的大小和外电场强度的大小成正比,这种由于电场的作用而使压电晶体发生变形的现象称为逆压电效应,可描述为

$$S = s^E T + dE \quad (3)$$

式中: $S$  为应变; $s^E$  为弹性常数; $T$  为应力; $d$  为压电常数; $E$  为电场强度。

利用压电陶瓷的逆压电效应可产生微位移。压电陶瓷在电压控制下可获得纳米级分辨率,其频率响应高、承载大,有良好的机械静压力特性和结构简单及受外力干扰小等优点。

步进式的工作原理如图 2 所示,在一个平行槽形轨道内,放置了一个步进式直线驱动机构(以下简称驱动机构)。驱动机构由三部分构成:用于箝位的压电叠堆 A;用于直线驱动的压电叠堆 B;用于箝位的压电叠堆 C。三部份成一个“工”字形布置,并连接成一个整体。

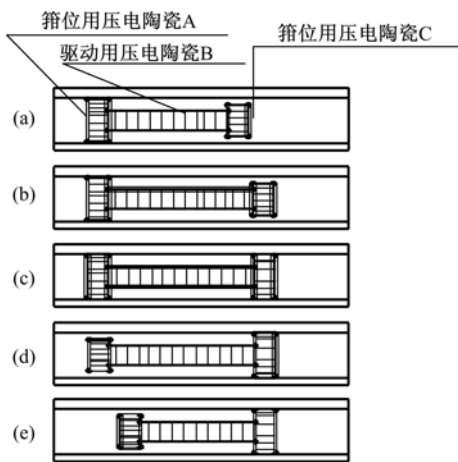


图 2 步进式运动原理

Fig. 2 Working principle of stepping linear actuator

控制电压信号作用下的驱动机构动作如下:

- (1) A 得电伸长并顶紧轨道,形成箝位。
  - (2) B 得电伸长。
  - (3) C 得电伸长并顶紧轨道,形成箝位。
  - (4) A 失电, A 与轨道松开。
  - (5) B 失电, B 收缩。C 失电, C 与轨道松开。
- 至此,驱动机构向右前进了一个步长。

循环(1)~(5)步,驱动机构可向右运动(步进),改变时序控制信号则可实现向左运动<sup>[8-12]</sup>。

由于单独一个压电晶片的变形不能满足实验要求,采用压电叠堆的方法获得更大的变形,在忽略压电叠堆的非线性及迟滞等因素后,根据压电叠堆的变形特性

$$x = au_o - \frac{1}{k_p} f \quad (4)$$

可得到压电叠堆的输出特性

$$f = k_p(au_o - x) \quad (5)$$

式中:  $f$  为压电叠堆的驱动力;  $k_p$  为压电叠堆的等效刚度系数;  $x$  为压电叠堆的变形;  $a$  是待定系数。

对图 2 所示的步进驱动机构作一些简化,可得如图 3 所示的驱动机构简化模型。当 A 形成箝位时,左端可视为固定端, C 未得电,则右端可视为自由端。  $M$  为自由端质量,  $f$  为压电陶瓷产生的驱动力,  $k$  为 B 和 C 的连接刚度,  $c$  为阻尼,  $x$  为伸长用压电陶瓷的变形,  $y$  为自由端的位移。  $M_p$  为伸长用压电陶瓷的等效质量。

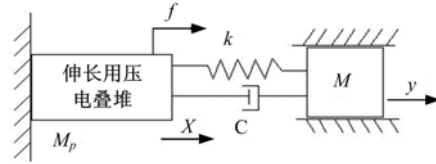


图 3 步进伸长的动力模型

Fig. 3 Dynamics model of stepping flex

可以列出该系统的动力学方程

$$M_p \frac{d^2 x}{dt^2} = f - k(x - y) - c \left( \frac{dx}{dt} - \frac{dy}{dt} \right) \quad (6)$$

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} = k(x - y) + c \left( \frac{dx}{dt} - \frac{dy}{dt} \right) \quad (7)$$

将式(4)代入式(5)中,作拉普拉斯变换,并对式(7)作拉普拉斯变换。联立两式变换的结果,消去中间变量  $x(s)$ ,可得机械部分的传递函数

$$G_2(s) = \frac{Y(s)}{U_o(s)} = \frac{ak_p cs + ak_p k}{MM_p s^4 + (M + M_p)Cs^3 + (Mk_p + Mk + M_p k)s^2 + k_p cs + k_1} \quad (8)$$

则系统总的传递函数为

$$G(s) = G_1(s)G_2(s) = \frac{a_1 s + a_2}{b_1 s^5 + b_2 s^4 + b_3 s^3 + b_4 s^2 + b_5} \quad (9)$$

- 式中  $a_1 = ak_p c, a_2 = ak_p k, b_1 = rc_p MM_p,$   
 $b_2 = MM_p + (M_p + M)rc_p,$   
 $b_3 = (M + M_p)c + (Mk_p + Mk + M_p k)rc_p,$   
 $b_4 = Mk_p + M_p k + Mk + rc_p k_p c,$   
 $b_5 = k_p c + rc_p k_p k,$   
 $b_6 = k_p k。$

## 2 自动标定的视觉反馈系统

### 2.1 视觉反馈系统的组成及控制策略

视觉反馈系统是利用 CCD 视觉传感器反馈微动台和目标点的位置信息,进行闭环控制。它是利用机器视觉的原理,从直接得到的图像反馈信息中快速进行图像处理,在尽量短的时间内给出反馈信息,参与标定目标位置信息的产生。在

系统的标定过程中,直接利用了视觉反馈技术。

由于微动台工作环境的不同,微动台在运动后到达的实际空间位置将不可控。为解决该问题,显微视觉反馈控制将是一个较佳的解决方案。为提高系统的效率,增强实际应用性,对微操作工具末端的控制拟采用分两步走的控制方法,即定点闭环,点间开环的方法,也就是在非关键点,且不需要精确定位的地方采用开环的控制,到达关键点或关键阶段时采用全闭环的方式控制,利用精密光栅来确认系统的真实坐标,利用视觉反馈确认末端执行器的图像坐标,从而进行系统的标定工作。在构建该显微视觉反馈系统时,首先要对显微图像进行如下的预处理:色彩空间的变换、图像的直方图均衡、图像的二值化、微操作工具边缘的检测、微操作工具边缘的细化等<sup>[13]</sup>。

### 2.2 基于图像的视觉反馈控制策略

本文设计的视觉反馈标定系统利用 CCD、显微镜头、北京大恒图像采集卡以及 Visual C++ 编程语言设计实现。根据微动台的不同用途,采用基于运动规划和图像匹配技术实现。

根据微动台的不同用途以及末端执行工具的不同,由系统末端执行工具的形状制作含有位置信息以及定位点的模板。此视觉反馈控制系统第一次运行的时候利用步进电机驱动器将末端执行工具移动大致在视频窗口的中间位置,然后通过模板匹配并利用压电驱动器进行精确调整,使得末端执行工具能够精确地处在视频采集窗口的中间位置,利用这一次匹配获得的执行工具的位置作为整个系统标定的初始化定位点。

以第一次获得的初始化位置点以及电机和压电驱动器的移动速度为参数,使以后的每次匹配识别不再进行整个视频采集窗口的匹配识别,而是利用宏微驱动器来驱动执行部件运动到标定所需要的位置,然后在该位置附近进行模板匹配,这样每标定一个点只需要在很小的区域内进行一次的模板匹配运算,大大减少了计算机的运算量,图 4 为基于视觉反馈控制的微动台系统示意图。

由于存在图像噪声、空间和振幅量化效应以及被检测物体的精确形状和结构的预先不确定性,模板匹配很难保证精确性<sup>[14]</sup>因此,采用的方法是在图像区域的所有的点上生成一个在模板和图像区域之间的差分度量  $D(m, n)$ ,这里  $-M \leq m \leq M$  和  $-N \leq n \leq N$  表示试验偏移量。当该差分小于事先建立的标准  $L_D(m, n)$  时,可以认为是匹

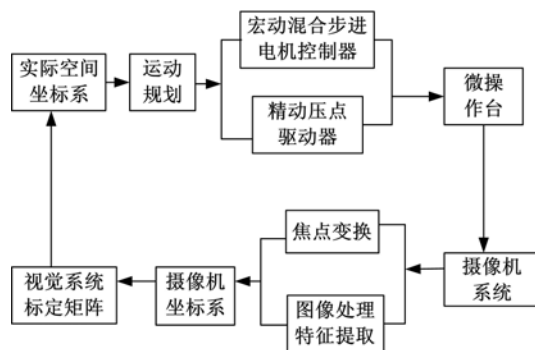


图 4 基于视觉反馈控制的微动台系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of MEMS base on machine vision 配的。差分度量采用如下均方误差

$$D(m, n) = \sum_j \sum_k [F(j, k) - T(j - m, k - n)]^2 \quad (10)$$

式中:  $F(j, k)$  表示要进行搜索的图像区域;  $T(j, k)$  是模板。

此时如果  $D(m, n) < L_D(m, n)$ , 则称模板匹配在坐标点  $(m, n)$  处是存在的。

对式(10)进行整理得到

$$D(m, n) = D_1(m, n) - 2D_2(m, n) + D_3(m, n) \quad (11)$$

式中:  $D_1(m, n) = \sum_j \sum_k [F(j, k)]^2$ ,

$$D_2(m, n) = \sum_j \sum_k [F(j, k) T(j - m, k - n)],$$

$$D_3(m, n) = \sum_j \sum_k [T(j - m, k - n)]^2.$$

$D_3(m, n)$  表示模板能量的和,是一个常数,并且独立于坐标  $(m, n)$ 。通常,在第一项  $D_1(m, n)$  所表示的窗口区域内的图像能量在图像区域内变化得非常缓慢。第二项  $D_2(m, n)$  是图像区域和模板之间的互相关性  $R_{FT}(m, n)$ , 在模板匹配的坐标位置上,互相关性应该变得较大以产生一个较小的差分。然而,互相关性的数量也并不总是模板差分的一个充分的度量,因为图像能量项  $D_1(m, n)$  是随位置变化的。即如果在模板区域内的图像振幅在一个特殊的坐标  $(m, n)$  处是较高的,则甚至是在模板不匹配的条件下互相关性也可以变得很大而产生假的匹配位置。作者通过下面标准化的互相关性比较来避免这种现象。

$$\tilde{R}_{FT}(m, n) = \frac{D_2(m, n)}{D_1(m, n)} = \frac{\sum_j \sum_k [F(j, k) T(j - m, k - n)]}{\sum_j \sum_k [F(j, k)]^2} \quad (12)$$

对于阈值标准  $L_R(m, n)$ , 如果下面的不等式 (13) 成立, 则认为模板匹配是成功的, 即可以获得目标的位置坐标。

$$\tilde{R}_{FT}(m, n) > L_R(m, n) \quad (13)$$

当且仅当模板下的图像函数与模板精确匹配时, 标准化了的互相关性才有一个整数最大值。

### 3 实验研究与系统测试

实验系统由以下几部分组成: 监控及运算计算机、运动控制卡、显微镜、CCD、图像采集卡、混合步进电机及其驱动器、压电陶瓷驱动的微动工作台及其驱动器。本研究中采用的电机是中国北京和利时生产的混合步进电机及驱动器; 运动控制卡采用两块中国台湾研华工控生产的 PCI-1240U; 使用的压电驱动器是日本 TOKIN 公司生产的 AE0505D08, 截面为  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ , 长度为  $10 \text{ mm}$ , 最大变形量为  $8 \mu\text{m}$ , 最高承受电压为  $150 \text{ V}$ , 最大输出驱动力为  $850 \text{ N}$  的压电叠堆以及我国哈尔滨工业大学博实精密测控公司研制的 HPV 系列压电陶瓷电源设计的压电驱动器。

微动台系统自动标定的工作过程如下。

微动台的宏动部分以工作台面为参考物, 微动部分的压电驱动器安装在宏动台上面。在各个运动部件上安装有精密光栅进行位移的精确反馈。首先, 设备启动后各个运动部件均回到设备的零点位置, 启动标定程序后, 宏动台实现大行程的移动粗定位, 本微动台的设定为  $1 \mu\text{m}$  的补偿范围, 也就是说宏动台定位到离目标点  $1 \mu\text{m}$  范围内的时候, 切换到微动的压电驱动器进行定位误差补偿, 完成系统的微米甚至纳米的定位精度。标定程序分以下几个过程执行:

(1) 利用宏/微驱动器和模板匹配算法将微操作器件移动到显微镜的中间位置。此时可以通过精密光栅确认微操作器件与设备零点的距离关系。根据镜头的原理及实践检验可知, 镜头中间的畸变最小, 一般情况下对于系统的误差影响可以忽略不计。

(2) 以精密光栅作为反馈元件, 将微操作器件移动到镜头范围内的左上角规定位置处, 然后, 利用摄像头拍摄图像, 利用模板匹配技术在左上角的小范围内寻找微操作器件在图像中的具体位置, 寻找到后进行标定计算。

(3) 设定各个标定点的实际位置数据, 反复执行第(2)步中的运动控制及标定程序, 在整个镜头

的范围内进行标定。

(4) 将得到的标定结果存入数据库, 以便在视觉反馈的微操作过程中进行精确定位。以下是本研究中用到的一种标定用模板和用该模板标定时的图片。

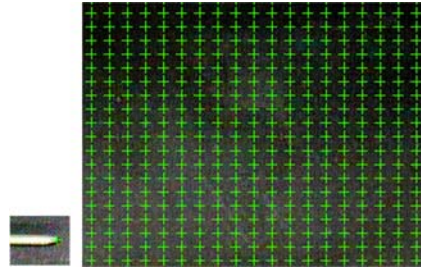


图 5 模板及用该模板标定后的界面

Fig. 5 Template and interface after auto calibration with the template

为了验证标定的作用, 将目标点作圆周运动, 在运动过程中每隔  $5^\circ$  让微动台运动并跟踪该目标点。图 6 和图 7 分别是标定前后微动台不进行后续补偿运动的跟踪目标点位图, 两图中横纵

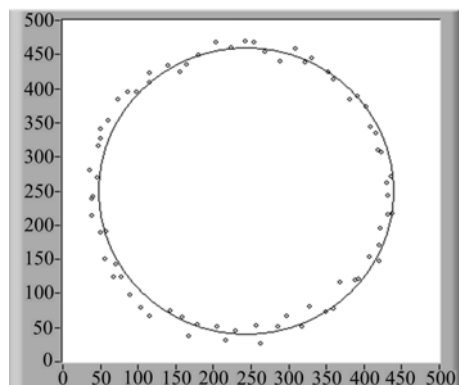


图 6 标定前微动台跟踪目标曲线图

Fig. 6 Trace the target curve before auto calibration

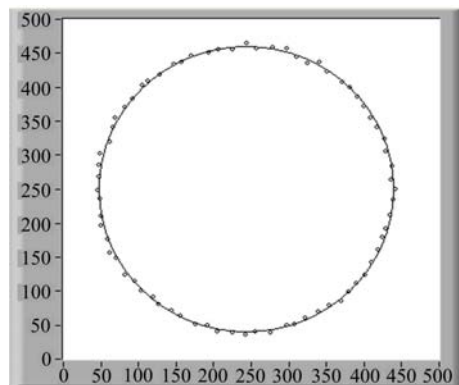


图 7 标定后微动台跟踪目标曲线图

Fig. 7 Trace the target curve after auto calibration

坐标均为像素数。图中的圆形为目标的运动轨迹,为了观察方便,将跟踪点进行了放大处理,每个点的中心位置为跟踪后的操作器位置。

## 4 结束语

构建的基于显微视觉伺服的微动台系统能够满足大多数类型的微操作要求,具有较好的操作空间(8 mm×10 mm×8 mm)。由于系统中微动部分采用了基于压电驱动的压电驱动器,使得系统完全消除了间隙;经过标定后的系统提高了定位精度,并且由于一次性跟踪的位置精度的提高减少了后续反馈的动作时间,从而提高了系统的响应速度。

### 参考文献:

- [1] Sharon A, Hogan N, Hardt D E. High bandwidth force regulation and inertia reduction using a macro/micro manipulator system[C]// The 1988 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Philadelphia, 1988.
- [2] Weber T E, Hollis R L. A vision based correlator to actively damp vibrations of a coarse-fine manipulator [C]// The 1988 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Scollsdale, 1989.
- [3] Chen O J, Wolfgang H. Development of 4 DOF planar macro-micro manipulators system [C] // The IEEE 28th Annual Conference on Industrial Electronics, Sevilla, 2002.
- [4] 节德刚,刘延杰,孙立宁,等.一种宏微双重驱动精密定位机构的建模与控制[J].光学精密工程,2005(4):171-178.  
Jie De-gang, Liu Yan-jie, Sun Li-ning, et al. Modeling and control of a macro-micro dual-drive ultra-precision positioning mechanism[J]. Optics and Precision Engineering, 2005(4):171-178.
- [5] 孙立宁,董为,杜志江.宏/微双重驱动机器人系统的研究现状与关键技术[J].中国机械工程,2005,16(1):89-93.  
Sun Li-ning, Dong Wei, Du Zhi-jiang. State-of-the-art and key technologies of macro/micro dual manipulator system[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2005,16(1):89-93.
- [6] 王麟琨,徐德,谭民.机器人视觉伺服研究进展[J].机器人,2004(5):277-282.  
Wang Lin-kun, Xu De, Tan Min. Survey of research on robotic visual servoing[J]. Robot, 2004(5):277-282.
- [7] 赵玮,宗光华,毕树生.微操作机器人的视觉伺服控制[J].机器人,2001(3):146-151.  
Zhao Wei, Zong Guang-hua, Bi Shu-sheng. Visual servo control system for micromanipulator[J]. Robot, 2001(3):146-151.
- [8] 程光明,杨志刚,曾平,等.压电式移动机构的研究[J].压电与声光,2003(4):105-108.  
Cheng Guang-ming, Yang Zhi-gang, Zeng Ping, et al. Study of piezoelectric locomotive mechanism[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2003(4):105-108.
- [9] 华顺明,程光明,阚君武,等.压电型精密位移驱动器的研究进展[J].压电与声光,2004(6):192-195.  
Hua Shun-ming, Cheng Guang-ming, Kan Jun-wu, et al. The current research on the piezoelectric actuators for precision displacement[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2004(6):192-195.
- [10] 华顺明,曾平,王忠伟,等.新型二维压电移动机构[J].吉林大学学报:工学版,2004,34(4):587-591.  
Hua Shun-ming, Zeng Ping, Wang Zhong-wei, et al. New planar locomotive device using bimorph[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2004,34(4):587-591.
- [11] 李欣欣,卢全国,杨志刚,等.蠕动式精密直线驱动器[J].吉林大学学报:工学版,2003,33(2):20-24.  
Li Xin-xin, Lu Quan-guo, Yang Zhi-gang, et al. Precision linear actuator of piezoelectric based on wriggle principle[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2003,33(2):20-24.
- [12] 于保军,杨志刚,齐会良,等.基于显微视觉的宏/微双重驱动微动台系统[J].农业机械学报,2008,39(2):125-129,174.  
Yu Bao-jun, Yang Zhi-gang, Qi Hui-liang, et al. The research of macro-micro dual-drive micro-locomotion platform based on micro-vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(2):125-129,174.
- [13] 刘连臣,卢桂章,翁春华,等.微操作机器人及其显微视觉伺服控制系统的研究[J].高技术通讯,2001(6):51-56.  
Liu Lian-chen, Lu Gui-zhang, Weng Chun-hua, et al. Research on micro-manipulation robot and its micro-visual servo control system[J]. Chinese High Technology Letters 2001(6):51-56.
- [14] Willian K Pratt. 数字图像处理[M].邓鲁华,张延恒等译.北京:机械工业出版社,2005:418-419.