

◀ 专家论坛 ▶

基于视觉的三自由度微动平台输入耦合研究*

张宪民, 龙学俊, 林容周

(华南理工大学广东省精密装备与制造技术重点实验室 广州, 510640)

摘要 为了提高精密微动平台的定位精度,提出了一种计算微动平台输入耦合位移系数的实验方法。构建显微视觉测量系统,以柔顺铰链式平面三自由度微动平台为研究对象,实时跟踪测量微动平台输入位移;对平台与图像之间的坐标系进行标定,有效提高了平台的输入位移和耦合位移的测量精度。实验表明,基于显微视觉的测量结果与 Ansys 模拟仿真结果相符,对微动平台的分析与设计具有一定的参考意义。

关键词 显微视觉; 三自由度平台; 输入耦合; 标定

中图分类号 TN911; TH16

引言

微电子技术、宇航和生物工程等学科的发展,对精密制造与精密测量技术提出了越来越高的要求。随着显微镜等视觉传感器的精度和分辨率的不断提高,显微视觉逐渐被应用到微纳米检测与测量中^[1-2]。该方法所用设备相对简单、测量过程自动化、结果直观。在电子、光学和机械制造等领域中需要高精度、高分辨率和高可靠性的微动精密定位平台^[3-5]。该平台通常采用压电元件作为驱动装置^[6],柔顺铰链机构作为传动装置。在多输入系统中,当其中一个输入端有位移输入时,其他各输入端产生一定量的位移变化,这些输入之间的耦合影响使工作台的控制难度和精度都受到一定程度的干扰,因此设计时要求他们之间的相互干涉尽可能小。

目前,对柔顺铰链式多输入工作台进行输入耦合分析时,大多通过建立定位平台的数学分析模型、运用理论方法推导系统的输入耦合方程求解耦合位移。本实验室设计开发了一种以压电陶瓷驱动的柔顺铰链式 $xy\theta_z$ 平面三自由度精密定位平台,该平台能够实现水平 x 方向、垂直 y 方向的平移以及绕 z 轴(垂直于 xy 平面)做平面转动。笔者以该 $xy\theta_z$ 平面三自由度精密定位平台为研究对象,建立相机与精密定位平台之间的数学模型,对显微视觉系统进行标

定,并基于 LabVIEW 软件编程实现图像获取与预处理,通过模板匹配技术测量出精密定位平台的输入耦合系数。这种非接触式的测量方法在用于微米位移测量时具有过程简单、测量精度高和结果直观等优点,并为平台分析、平台输入与输出的传递函数矩阵修正提供了可靠依据。

1 实验系统

本研究的实验平台如图 1 所示,平台由压电陶瓷驱动的柔顺铰链式 $xy\theta_z$ 平面三自由度精密定位平台与显微视觉测量系统组成。

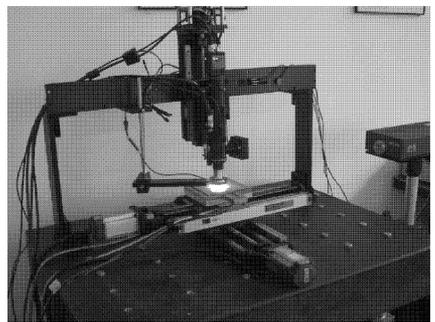


图1 显微视觉测量系统硬件平台

三自由度精密定位平台采用平面整体式结构,平台主体是在一块金属板上由慢走丝切割加工而成的,它具有结构紧凑、低摩擦、无间隙以及各部分热

* 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(91223201);国家杰出青年科学基金资助项目(50825504);NSFC-广东联合基金资助项目(U0934004)

收稿日期:2012-02-27;修改稿收到日期:2012-05-12

膨胀系数相同等优点。其中的3个压电陶瓷驱动器以及对应的传输机构沿输出平台中心旋转 120° 均匀分布,驱动器的输出位移经过具有一级放大功能的柔顺机构放大后,驱动输出平台实现运动和定位。

显微视觉测量系统以计算机、显微镜系统、照明系统以及图像采集和存储系统等为硬件平台。为了减少振动的影响,显微视觉测量系统安装在一个隔振平台上。整个测量系统的测量精度主要取决于显微镜的物镜放大倍数、CCD的析像力、采集卡的性能和图像处理算法的科学性。显微视觉测量系统选用Navitar公司型号为12X UltraZoom的显微镜系统。结合日本Mitutoyo的50X镜头,其数值孔径为0.55。成像设备选用JAI公司型CV-A2的CCD相机。照明系统选用和12X UltraZoom显微镜系统集成的基于发光二极管的BrightLight LED同轴照明光源。图像采集部分选用Foresight公司的型号为I-75的图像采集卡。本实验的平台驱动器采用PI公司的控制精度为1 nm的压电陶瓷驱动。

2 系统标定

2.1 像素当量标定

系统像素当量的标定是为了测出在该系统环境下一个像素所对应的实际尺寸。标定时,先对尺寸为 W 的物体成像,得到该物体的像所占据的CCD像素数 N ,再计算显微视觉系统的放大比例系数 K ,即像素当量。考虑到CCD相机畸变误差存在,故在水平方向和垂直方向都要进行像素当量的标定。 K 可以用下列公式得到

$$\begin{cases} K_x = \frac{W_x}{N_x} \\ K_y = \frac{W_y}{N_y} \end{cases} \quad (1)$$

其中: K_x, K_y 分别为 x 与 y 方向的像素当量; W_x, W_y 分别为物体在 x 与 y 方向的实际尺寸; N_x, N_y 分别为物体的像在 x 与 y 方向所占据的CCD像素数。

在显微视觉测量中,相机的标定精度对保证系统测量精度起着关键作用。选用美国Edmund Industrial Optics公司型号为NT57-888的精密标定块。利用该标定块对50倍物镜的显微视觉测量系统进行标定,结果如表1所示。表中, \bar{N} 为物体的像分别在 x 与 y 方向所占据的CCD像素数的平均值。

表1 50倍物镜的显微视觉测量系统的标定结果

坐标	N/pixel			\bar{N}/pixel	$K/(\text{nm} \cdot \text{pixel}^{-1})$	
x	183.9	183.8	183.5	183.1	183.50	54.50
	183.2	183.3	183.4	183.8		
y	183.5	183.4	183.2	183.3	183.24	54.57
	183.6	183.4	183.2	183.3		

2.2 角度标定

角度标定是对CCD图像坐标系和三自由度平台坐标系进行标定。如图2所示,建立图像二维坐标系为 xOy ,原点 O 位于图像的左上角,并以像素为单位。平台坐标系为 $x_1O_1y_1$,其原点 O_1 设在平台的中心点上。 A, B, C 分别表示平台的3个压电陶瓷输入端。这里令平台坐标系的横轴与平台的 A 端平行。本实验中精密定位平台是安装在一个 $x-y$ 二维宏动平台上。由于安装误差的存在,使得平台与显微系统拍摄图像的横轴与纵轴之间存在夹角,假设这个角度为 θ 。

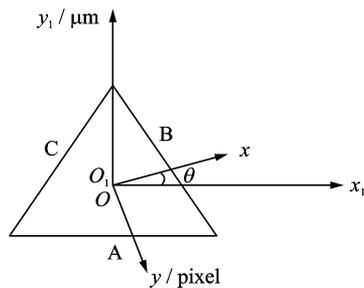


图2 平台与图像坐标系之间的关系

为了得到精确的测量结果,需检测计算出图像坐标系和平台坐标系存在的角度偏差,通过对图像进行旋转、平移等处理,实现图像坐标系和平台坐标系对应坐标轴两两平行。角度标定的步骤如下。

1) 平台的 A 端装上压电陶瓷,用CCD相机拍下并记录此时在图像坐标系下平台 A 端的坐标。

2) 驱动 A 端的压电陶瓷以 $5 \mu\text{m}$ 的步长在 $0 \sim 40 \mu\text{m}$ 范围内移动。每走一步,记下平台输入端 A 端的坐标位置,共记录9个标定点的坐标位置。

3) 重复步骤2,多次记录下平台 A 端的坐标,在每一个标定点点分别取平均值。

4) 根据每个标定点的坐标平均值,分别取得在图像坐标系下 x, y 方向上的像素差值 $\Delta x_i, \Delta y_i$ ($i = 1, 2, \dots, 9$),根据公式 $\theta_i = \arctan \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i}$,得到平台每个输入端位移所对应的角度调整量 θ_i 。

图3(a)和图3(b)分别为在平台A端沿 x 方向输入 $20\ \mu\text{m}$ 位移下,进行角度标定前、后平台模板移动位置的比较。图中A框为平台所制作的模板初始位置,B框为给定平台A端输入 $20\ \mu\text{m}$ 位移后的模板位置。

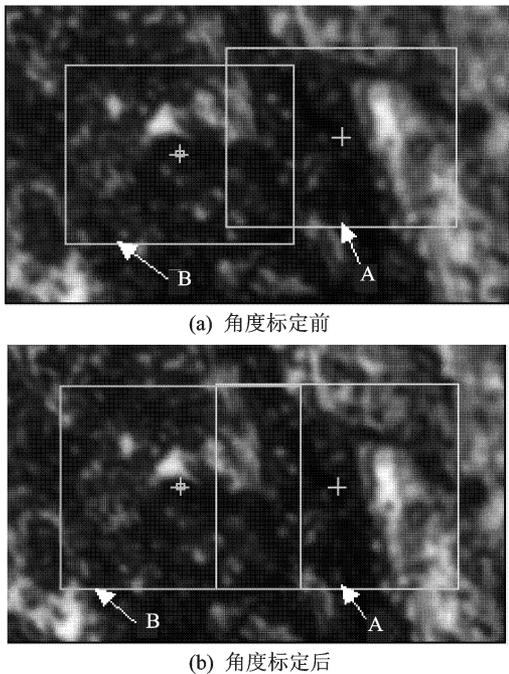


图3 角度标定前、后的模板位置比较

从图3(a)可知,在角度标定前,当平台A端沿 x 方向移动时,在 y 方向存在一定的偏移量,其偏移量为16.7个像素。从图3(b)可以看出,在角度标定后, y 方向的偏移量很小,仅为0.36个像素。此时可以认为平台坐标系的 x 轴已经与图像坐标系的 x 轴平行。

3 输入耦合的计算

在多输入的平台中,由于微位移精密定位平台依靠柔顺机构的弹性变形传递运动,各输入端之间的输入位移会产生相互影响,这就是输入耦合问题。

设在平台的任意一个输入端施加一个输入位移 s_i ,其他两端没有输入位移,由于 s_i 的作用在第 j 和第 k 输入端引起的的耦合位移分别为 $\Delta s_j, \Delta s_k$,输入耦合问题的影响^[7]可描述为

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{\Delta s_j}{s_i} \\ \lambda_2 = \frac{\Delta s_k}{s_i} \end{cases} \quad (2)$$

其中: λ_1, λ_2 均为输入耦合系数;平台3个输入端为旋转对称,因此 $\Delta s_j = \Delta s_k$,即 $\lambda_1 = \lambda_2$ 。

实验中在平台的A输入端安装压电陶瓷驱动器,B,C输入端不安装压电陶瓷驱动器。测试时对A端压电陶瓷驱动器施加电压产生一个输入位移。利用显微视觉系统记录平台B,C输入端产生的位移。整个系统的软件开发以LabVIEW软件为平台,利用模板匹配技术捕捉平台输入端的位移变化^[8]。系统测量平台输入耦合的流程如图4所示。

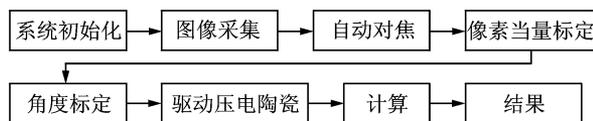


图4 三自由度平台输入耦合计算分析流程

在求得平台输入端位移变化前、后的像素差值后,可以通过式(3)求得输入耦合位移 Δs

$$\Delta s = \Delta x \sin 30^\circ K_x \pm \Delta y \cos 30^\circ K_y \quad (3)$$

其中: $\Delta x, \Delta y$ 分别为平台模板移动前后的坐标像素差值; K_x, K_y 分别为 x 与 y 方向的像素当量。

4 实验测试与分析

本实验是以LabVIEW软件为平台进行编程,实现对微动平台的图像采集、实时位移检测和实时图像处理^[9]、模板匹配以及对平台耦合的直观分析等功能。图5所示为本实验设计的软件界面。

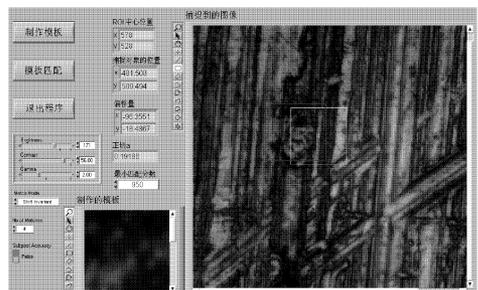


图5 显微视觉测量系统软件界面

4.1 平台输入位移测试

平台的输入端位移测试是测试平台输入端的输入精度。在实验过程中对压电陶瓷驱动器采取闭环控制。在平台的输入端装上压电陶瓷,驱动压电陶瓷输出给定的位移,利用图像系统采集平台输入端的图像并测量其实际的输入位移。其理论结果和实验

测试结果如图6所示。可以看出,平台输入端输出位移的理论结果和实验结果存在一定的偏差,引起这种偏差的原因可归结为以下2个方面:a. 压电陶瓷的安装精度以及压电陶瓷本身特有性质的影响,压电陶瓷的安装要综合考虑预紧力大小、受力状态、驱动端和柔顺机构的接触状态等,这些因素都会对平台的位移输出产生影响;b. 在该实验过程中精密定位平台是安装固定在一个二维宏动平台上,因此精密定位平台与宏动平台之间的安装间隙以及宏动平台本身零部件之间的安装间隙也是造成偏差的主要因素。从图6可看出,两组值的线性度很好,可以通过实验补偿的方法提高平台的位移精度。

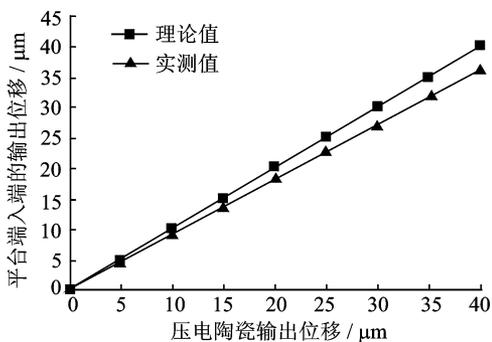


图6 平台输入端的输出位移的理论值和实测值

4.2 微动平台输入耦合位移实验测试

基于显微视觉的标定过程,对精密定位平台标定以及对平台输出位移进行误差补偿之后,则可以测量精密定位平台的输入耦合位移。实验中首先给平台A输入端装上压电陶瓷,其余两个输入端B,C不安装驱动器;然后CCD相机聚焦点分别对准平台B,C输入端,通过驱动压电陶瓷并对所制作的模板图像进行连续采集和计算,得到精密定位平台的输入耦合位移测量结果。

表2、表3为在平台A端输入 $10\ \mu\text{m}$ 时,平台B,C输入端的位移变化情况。

表2 平台B端的输入耦合位移

测量次数	坐标	模板初始像素	模板移后像素	耦合位移/nm	耦合系数 λ_1
1	x	714.643	716.442	40.814 0	0.004 4
	y	741.458	739.557		
2	x	974.545	976.458	42.905 8	0.004 6
	y	650.436	648.425		
3	x	609.466	611.437	41.419 8	0.004 5
	y	816.491	814.478		

表3 平台C端的输入耦合位移

测量次数	坐标	模板初始像素	模板移后像素	耦合位移/nm	耦合系数 λ_2
1	x	777.478	780.416	34.409 6	0.003 7
	y	694.489	693.523		
2	x	800.581	803.357	33.350 4	0.003 6
	y	730.498	729.603		
3	x	813.661	816.495	34.741 9	0.003 7
	y	721.343	720.444		

从实验结果得到,在驱动平台A端输入 $10\ \mu\text{m}$ 的情况下,另外两个输入端的耦合位移为 $0.042\ \mu\text{m}$ 和 $0.034\ \mu\text{m}$ 。耦合系数的平均值 $\bar{\lambda}_1$ 和 $\bar{\lambda}_2$ 分别为 $0.004 5$ 和 $0.003 7$ 。表4为通过Ansys仿真和通过本次实验得出的对该微动平台进行耦合分析的结果。可以看出,Ansys仿真值和本次实验结果存在一定的差异。引起这种偏差的原因如下:a. 平台自身的加工精度会引起一定的误差,加工中存在一定的尺寸偏差和变形误差;b. 受压电陶瓷安装精度的影响,压电陶瓷的安装要综合考虑预紧力大小、受力状态、驱动端和柔顺机构的接触状态等,这些因素都会对平台的位移输出产生影响;c. 测量精度也有一定的影响,虽然在该显微视觉下,一个像素只占据了几十个纳米,测量精度达到了亚微米的测量精度,但是测量环境的稳定性却对测量精度有很大的影响。外界的噪声、振动以及电流磁场的干扰等都会影响到测量精度。从结果来看,微位移精密定位平台输入耦合只有几十个纳米,说明本实验室设计的微位移平台输入耦合已经得到了有效抑制,满足了设计要求。

表4 输入耦合分析结果

输入耦合数值	Ansys 仿真值		视觉测量结果	
	λ_1	λ_2	$\bar{\lambda}_1$	$\bar{\lambda}_2$
	4.5×10^{-3}	3.2×10^{-3}	4.5×10^{-3}	3.7×10^{-3}

5 结论

1) 在实验过程中只需要对平台坐标系与图像坐标系进行角度标定就可以达到高精度测量,避免了复杂坐标系之间的相互位置关系转换。

2) 利用模板匹配技术跟踪平台的输入位移,解决了对平台输入端制作规则标记点带来的麻烦。这种方法可以对任何一种物件本身进行位移实时检测跟踪。

3) 在进行微位移测量时,图像测量作为非接触

式测量避免了测量工具与被测物件之间的接触摩擦以及位置对准关系,提高了测量精度。

参 考 文 献

- [1] Cappelleri D J, Piazza G, Kumar V. A two dimensional vision-based force sensor for microrobotic applications [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 171(2): 340-351.
- [2] Kim J H. Bias-error reduction in nanometre resolution microscopic motion tracking vision systems [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 12(2): 267-274.
- [3] 吴鹰飞,李勇,周兆英,等. 蠕动式 X-Y- θ 微动工作台的设计实现[J]. *中国机械工程*, 2001, 12(3): 263-265. Wu Yingfei, Li Yong, Zhou Zhaoying, et al. Design and development of an inchworm type of X-Y- θ micro stage [J]. *China Mechanical Engineering*, 2001, 12(3): 263-265. (in Chinese)
- [4] Tomita Y, Koyanagawa Y, Satoh F. A surface motor-driven precise positioning system [J]. *Precision Engineering*, 1994, 16(3): 184-191.
- [5] Kendall R, Doran S, Weissmann E. A servo guided X-Y-theta stage for electron beam lithography [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 1991, 9(6): 3019-3023.
- [6] 高宏,李庆祥,严普强. 亚微米弹性微位移工作台系统的设计及其精度分析[J]. *清华大学学报*, 1988, 28(5): 19-28. Gao Hong, Li Qingxiang, Yan Puqiang. Design and accuracy analysis of submicron positioning flexure fine stage system [J]. *Journal of Tsinghua University*,

1988, 28(5): 19-28. (in Chinese)

- [7] Wang H, Zhang X M. Input coupling analysis and optimal design of a 3-DOF compliant micro-positioning stage [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2008, 3(4): 400-410.
- [8] Bishop R H. LabVIEW 8 实用教程[M]. 北京:电子工业出版社,2008:138-234.
- [9] Gonzalez R C, Woods R E. 数字图像处理[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2007:49-105, 460-479.



第一作者简介:张宪民,男,1964年11月生,教授、博士生导师,国家杰出青年科学基金获得者,珠江学者特聘教授,新世纪百千万人才工程国家级人选,国务院政府特殊津贴专家。兼任机械工程学会机构学专业委员会副主任委员、中国智能学会智能制造专业委员会副主任委员、广东省机械工程学会理事长、《机械工程学报》、《振动工程学报》、《中国机械工程》等7种刊物的编委。主要研究方向为机构动力学、精密定位与精密操作、精密制造装备等。发表论文200余篇。授权美国、加拿大、欧洲、中国香港等国家和地区发明专利各1件,授权中国发明专利26件,部分研究成果荣获广东省科技进步一等奖,广东省专利金奖和中国专利优秀奖。曾发表《多输入多输出柔顺机构拓扑优化及输出耦合的抑制》(《机械工程学报》2006年第42卷第3期)等论文。E-mail: Zhangxm@scut.edu.cn