

文章编号 1004-924X(2017)07-1866-08

3-PRR 平面三自由度纳米定位平台的设计

马立¹, 杨斌¹, 田应仲^{1*}, 肖金涛¹, 华晓青¹, 孙立宁²

- (1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;
2. 苏州大学 机器人与微系统研究中心, 江苏 苏州 215021)

摘要: 本文设计了一种由压电陶瓷驱动的应变片进行检测的平面三自由度纳米定位平台, 该平台采用的是平板铰链、直圆铰链及单边 V 型铰链导向的 3-PRR 结构。通过建立平台的伪刚体模型及对其进行位姿分析, 获得了平台的正、逆解。同时, 运用有限元分析方法对平台进行了仿真分析。搭建了 3-PRR 平面三自由度纳米定位平台测试实验系统对所设计平台进行试验。实验结果显示: 3-PRR 平台沿 x 轴、 y 轴的行程及最大转角分别为 $-11.32 \sim 11.41 \mu\text{m}$ 、 $-12.47 \sim 12.76 \mu\text{m}$ 、 $3.63'$, 对应的分辨率分别为 71 nm 、 83 nm 、 $1.35''$ 。理论分析结果、有限元仿真结果与实验结果的最大误差分别为 5.87% 、 6.19% , 验证了理论分析和有限元仿真的正确性。 x 轴及 y 轴的位移输出与应变片的输出电压近似呈正比关系, 证实了利用应变片来检测 3-PRR 平台运动的可行性。

关键词: 纳米定位; 柔性铰链; 压电陶瓷; 有限元分析; 位移检测

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172507.1866

Design of 3-DOF planar nano-positioning platform with 3-PRR structure

MA Li¹, YANG Bin¹, TIAN Ying-zhong^{1*}, XIAO Jin-tao¹, HUA Xiao-qing¹, SUN Li-ning²

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University,
Shanghai 200072, China;

2. Robotics and Microsystems Center, Soochow University, Suzhou 215021, China)

* Corresponding author, E-mail: 1027485536@qq.com

Abstract: A 3-DOF nano-positioning platform detected by strain gauges driven by piezoelectric ceramics based on orientation of plate hinge, right angle flexure hinge and unilateral V-type hinge was designed. Pseudo-rigid-body model was established, and position analysis was conducted on it to obtain positive solution and inverse solution of the platform. Meanwhile, simulation analysis was conducted on the platform with finite elements analysis. Test experiment system of 3-DOF planar nano-positioning platform with 3-PRR structure was established. Experimental result indicates that travel ranges of 3-PRR platform along x -axis, y -axis and maximum rotary angle are respectively $-11.32 \sim 11.41 \mu\text{m}$, $-12.47 \sim 12.76 \mu\text{m}$, $3.63'$, and corresponding resolution ratios are respectively 71 nm , 83 nm , $1.35''$. Maximal errors of theoretical analysis and finite element simulation to experimental result are respectively 5.87% , 6.19% to verify correctness of theoretical analysis and finite element simulation. Displacement output of x -axis and y -axis is approximately proportional to output voltage of strain

收稿日期: 2016-10-21; 修订日期: 2017-02-17.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61573238); 国家科技支撑计划(2015BAF10B01); 上海市教育委员会科研创新项目(No. 14YZ008); 江苏省先进机器人技术重点实验室基金(No. JAR201304)

gauges, which verifies the feasibility to use strain gauges to detect movement of 3-PRR platform.

Key words: Nano-positioning; flexible hinge; piezoelectric ceramics; finite element analysis; displacement detection

1 引言

目前,微电子制造、光学微装配、生物医疗工程及超精密加工领域对精密和超精密技术的要求越来越高,传统的驱动和传动方式已经很难满足目前的需求。采用压电陶瓷驱动的柔性铰链机构,兼具压电陶瓷的位移分辨率高、体积小、响应速度快、输出力大及静态不发热等特点和柔性铰链的无机械摩擦、不需要润滑、体积小、运动灵敏度高等优点,应用广泛^[1-3]。

平面三自由度纳米定位平台因具有结构简单、精度高、刚度高等诸多优点,已成为重点研究对象。韩国科学技术院 Hyo-Young Kim^[4]设计了一个运动范围为 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m} \times 3''$ 的三自由度定位平台。北京航空航天大学 Chao Daihong 等^[5]设计的三自由度定位平台,具有 $120\ \mu\text{m} \times 130\ \mu\text{m} \times 1.03^\circ$ 运动范围,但其转角分辨率只有 $18''$ 。南京航空航天大学周丽平等设计了一种通过直线超声电机驱动的平面 3-PRR 微动平台^[6],采用视觉定位方法实现闭环控制,其工作空间可达 $60\text{mm} \times 60\text{mm} \times 20^\circ$,控制精度只有 $5\ \mu\text{m}$,其采用的是支链,整体结构较大。

平面三自由度纳米定位平台主要有 3-PRR 及 3-RRR 两种结构。其中,3-PRR^[7-9] 结构比较简单,能达到较大的运动范围和旋转范围;并且,由于压电陶瓷的位移比较小,在较小的范围内,该 3-PRR 平台的位移与压电陶瓷的位移成正比,线性度较好。3-RRR^[10-12] 结构相对于 3-PRR 结构来说,虽然具有良好的解耦性和各向同性,算法和控制相对简单,但是该结构的刚度随形状变化比较大,故 3-RRR 机构不宜输出直线位移。因而,目前常见的平面三自由度纳米定位平台多采用 3-PRR 结构。

针对光学领域中的精密定位需求,平台应当具有 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 的直线行程和 $3''$ 的转动范围,以及 $100\ \text{nm}$ 的直线分辨率和 $5''$ 的转动分辨率。本文基于该指标设计了一种由压电陶瓷驱动的基于平板铰链、直圆铰链及单边 V 型铰链导向的 3-PRR 平面三自由度纳米定位平台。并对其

进行位姿分析,计算平台运动范围,仿真分析及试验验证。

2 3-PRR 纳米定位平台结构

图 1 为 3-PRR 平面三自由度纳米定位平台的整体结构,主要由固定平台、运动平台、压电陶瓷驱动器、单边 V 型铰链、直圆铰链、平板铰链、应变片等组成。其中压电陶瓷驱动器是驱动源,直圆铰链和平板铰链用于精密定位,应变片用于检测单边 V 型铰链形变,以实现位移反馈。

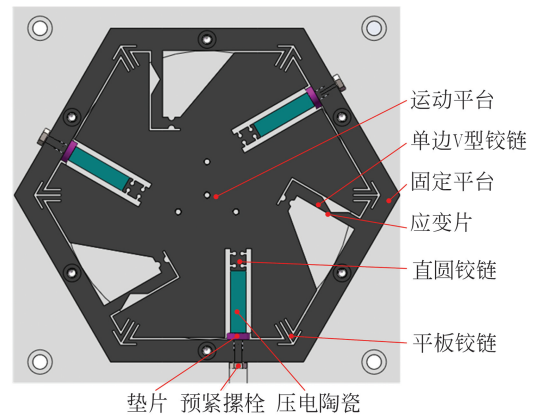


图 1 平面三自由度纳米定位平台的整体结构
Fig. 1 Structure of 3-DOF planar nano-positioning platform

3 个压电陶瓷均安装在固定平台上,它通过两个对称直圆柔性铰链直接作用于运动平台,直圆铰链可保证压电陶瓷的推力沿轴线方向,不会发生偏离,同时也可使压电陶瓷避免受到剪切类型的反作用力。运动平台与固定平台通过 6 组间隔 60° 分布的对称式 L 型平板铰链连接,L 型平板铰链可为平台提供转动刚度,使平台能有效回正。单边 V 型铰链均安装应变片,当压电陶瓷伸长驱动平台运动时,会使单边 V 型铰链弯曲变形,其变形大小由惠斯通半桥连接的应变片采集,以此来检测平台的运动位移。

该平台采用整体式机构,经线切割加工而成,具有结构紧凑、低摩擦、无间隙以及各部分热膨胀

系数相同等特点。

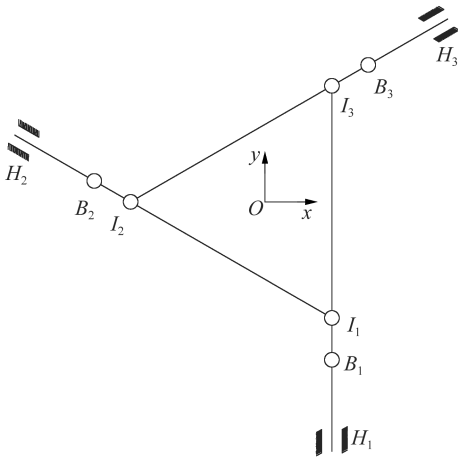


图 2 3-PRR 并联机构

Fig. 2 3-PRR parallel mechanism

上述 3-PRR 纳米定位平台的伪刚体机构简图如图 2 所示,下角标数字(1、2、3)代表支链数,字母 B 、 I 代表柔性铰链(转动副), H 代表压电陶瓷(移动副),从图中可以得到共有 $n=7$ 个构件,共有运动副 $P_L=9$ 个,其中转动副 6 个,移动副 3 个,整个机构的自由度 F 计算公式见式(1):

$$F = 3n - 2p_L = 3 \times 7 - 2 \times 9 = 3. \quad (1)$$

可见,该 3-PRR 平台是一种并联机构,它具有 3 个自由度,即平面两平动一转动。由图 2 可知,3-PRR 机构沿着输出平台中心呈 120° 对称布置。该纳米定位平台受到 3 条结构相同的支链约束,并且每条支链上的所有柔性铰链都在同一个平面内,压电陶瓷驱动器输出的位移直接驱动平台,实现运动和定位,通过控制 3 个驱动器的不同输出,即 H_1 、 H_2 、 H_3 ,就可以控制运动平台运动,即实现平面内 x 、 y 两个互相垂直方向上的平动和绕 z 轴的转动。

3 3-PRR 纳米定位平台的位姿分析

该 3-PRR 平台机构具有平面内的两个移动自由度和一个绕平面法线的转动自由度,如图 2 所示,三角形 $I_1I_2I_3$ 为运动平台,3 个移动副 H_1 、 H_2 、 H_3 分别代表 3 个压电陶瓷,作为此机构的输入部分,输入位移 $d=[d_1 d_2 d_3]^T$ 由压电陶瓷的输出电压决定,三角形 $I_1I_2I_3$ 的几何中心 O 作为运动平台的输出中心,则输出位姿为 $u=[X_P \ Y_P \ \varnothing]^T$ 。

为了分析方便,将 O 点作为坐标原点,水平

方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴。由于平面 3-PRR 机构为中心对称结构,故以移动副 H_1 所在的支链为研究对象进行分析,其他 2 个方向类似,位姿分析示意图如图 3。

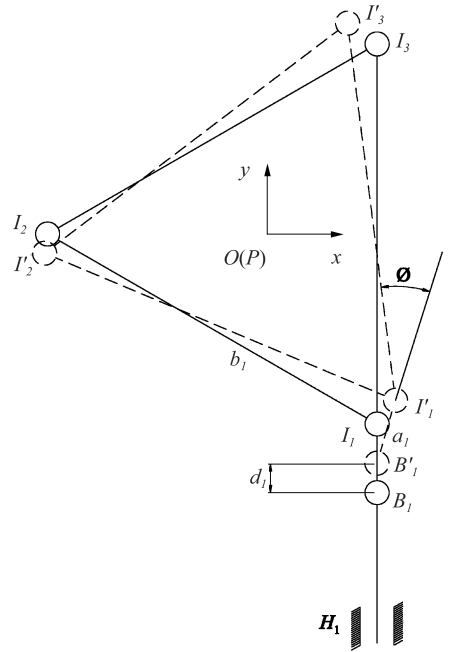


图 3 位姿示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pose

图 3 中, B'_1 为 B_1 运动后的位置, d_1 为转动副 B_1 的运动距离,即 $d_1=B_1B'_1$,三角形 $I_1I_2I_3$ 的边长 I_1I_2 为 b_1 ,根据图中的几何位置关系,容易得出移动后 B'_1 的坐标:

$$\begin{cases} X_{B'_1} = \frac{\sqrt{3}}{6} b_1 \\ Y_{B'_1} = -(B_1I_1 - B_1B'_1 + \frac{1}{2} b_1) \end{cases}, \quad (2)$$

I'_1 点的坐标为:

$$\begin{cases} X_{I'_1} = X_P + \frac{\sqrt{3}}{3} b_1 \cos(\frac{\pi}{3} - \varphi) \\ Y_{I'_1} = Y_P + \frac{\sqrt{3}}{3} b_1 \sin(\frac{\pi}{3} - \varphi) \end{cases}. \quad (3)$$

由于 $B_1I_1=B'_1I'_1=a_1$ (杆长为定值,保持不变),可得到如下关系:

$$(X_{I'_1} - X_{B'_1})^2 + (Y_{I'_1} - Y_{B'_1})^2 = a_1^2, \quad (4)$$

综合式(2)、式(3)、式(4)得到公式(5):

$$\begin{aligned} & [X_P + \frac{\sqrt{3}}{3} b_1 \cos(\frac{\sqrt{3}}{3} - \varphi) - \frac{\sqrt{3}}{6} b_1]^2 + \\ & [Y_P + \frac{\sqrt{3}}{3} b_1 \sin(\frac{\sqrt{3}}{3} - \varphi) + \frac{1}{2} b_1 + a_1 - d_1]^2 = a_1^2 \end{aligned}. \quad (5)$$

为了简化公式,引入变量 A_1 、 B_1 ,其中:

$$A_1 = a_1^2 - \left[X_P + \frac{\sqrt{3}}{3} b_1 \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{3} - \varphi\right) - \frac{\sqrt{3}}{6} b_1 \right]^2, \quad (6)$$

$$B_1 = Y_P + \frac{\sqrt{3}}{3} b_1 \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{3} - \varphi\right) + \frac{1}{2} b_1 + a_1, \quad (7)$$

$$\text{则式(5)为: } [A_1 - d_1]^2 = B_1, \quad (8)$$

最终得到机构的逆解 $d_1 = A_1 - \sqrt{B_1}$ 。

由结构对称性,可得 $d_2 = A_2 - \sqrt{B_2}$, $d_3 = A_3 - \sqrt{B_3}$ 。

将公式(4)改写为如下形式:

$$X_P^2 + Y_P^2 + a_{11} X_P + a_{12} Y_P + a_{13} = 0, \quad (9)$$

其中:

$$a_{11} = 2 \left[\frac{\sqrt{3}}{3} b_1 \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{3} - \varphi\right) - \frac{\sqrt{3}}{6} b_1 \right], \quad (10)$$

$$a_{12} = 2 \left[\frac{\sqrt{3}}{3} b_1 \sin\left(\frac{\pi}{3} - \varphi\right) + \left(a_1 - d_1 + \frac{1}{2} b_1\right) \right], \quad (11)$$

$$a_{13} = \left[\frac{\sqrt{3}}{3} b_1 \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{3} - \varphi\right) - \frac{\sqrt{3}}{6} b_1 \right]^2 + \left[\frac{\sqrt{3}}{3} b_1 \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{3} - \varphi\right) + \left(a_1 - d_1 + \frac{1}{2} b_1\right) \right]^2 - a_1^2, \quad (12)$$

同理,对另外两支链可得类似方程:

$$X_P^2 + Y_P^2 + a_{21} X_P + a_{22} Y_P + a_{23} = 0, \quad (13)$$

$$X_P^2 + Y_P^2 + a_{31} X_P + a_{32} Y_P + a_{33} = 0. \quad (14)$$

根据公式(9)(13)(14)可得出正解:

$$\begin{cases} X_P = \frac{n_1}{n_2} \\ Y_P = \frac{n_3}{n_4} \end{cases}, \quad (15)$$

其中

$$\begin{cases} n_1 = (a_{11} - a_{21})(a_{12} - a_{32}) - (a_{11} - a_{31})(a_{12} - a_{22}) \\ n_2 = (a_{13} - a_{33})(a_{12} - a_{22}) - (a_{13} - a_{23})(a_{12} - a_{32}) \\ n_3 = (a_{12} - a_{22})(a_{11} - a_{31}) - (a_{12} - a_{32})(a_{11} - a_{21}) \\ n_4 = (a_{13} - a_{33})(a_{11} - a_{21}) - (a_{13} - a_{23})(a_{11} - a_{31}) \end{cases}$$

将公式(15)代入公式(9)可得:

$$\frac{n_1^2}{n_2^2} + \frac{n_3^2}{n_4^2} + \frac{a_{11} n_1}{n_2} + \frac{a_{12} n_3}{n_4} + a_{13} = 0. \quad (16)$$

公式(16)是关于 $\sin\phi$ 、 $\cos\phi$ 的四阶方程,根据输入位移(d_1 、 d_2 、 d_3)可解得转角 ϕ ,进而可通过公式(15)求得 X_P 、 Y_P 。

假设运动平台为刚体,分别取 x 方向和 y 方向进行分析,根据惠斯通半桥特性和单边 V 型铰链伸长变形可得电压输出与平台 x 和 y 方向的

变形关系如公式(17)所示。其中 $U_{o,x}$ 、 $U_{o,y}$ 分别是平台 x 和 y 方向上惠斯通电桥的输出电压, $U_{i,x}$ 、 $U_{i,y}$ 分别是平台 x 和 y 方向上惠斯通电桥的输入电压, N 是应变片的特性参数。平台行程为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$,公式(17)在该工作范围内呈近似线性关系。

$$\begin{cases} U_{o,x} = U_{i,x} \frac{\frac{3}{4} N^2 X_P^2 - \sqrt{3} N X_P}{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} N X_P + 2\right)^2} \\ U_{o,y} = U_{i,y} \frac{\frac{1}{4} N^2 Y_P^2}{\left(\frac{1}{2} N Y_P + 2\right) \left(\frac{3}{2} N Y_P + 2\right)} \end{cases}. \quad (17)$$

4 3-PRR 纳米定位平台的有限元分析

在 Solidworks 软件中创建平面三自由度纳米定位平台模型,然后将其导入 ANSYS Workbench 中,材料选用铝合金(7075-TS),在 Workbench 中,网格采用自动划分方式,节点采用 10 节点四面体 solid92,网格尺寸为 medium,并对柔性铰链处进行局部细化,以保证结果精度。

根据平台的正、逆解,得到当 3 个陶瓷的输出位移分别为 $30, 7.5, 7.5 \mu\text{m}$ 时,平台的参考中心沿 y 轴正方向有最大位移(图 4)(彩图见期刊电子版);当压电陶瓷的输出位移分别为 $7.5, 30, 30 \mu\text{m}$ 时,沿 y 轴负方向有最大位移(图 5)(彩图见期刊电子版);当平台 3 个陶瓷的输出位移分别为

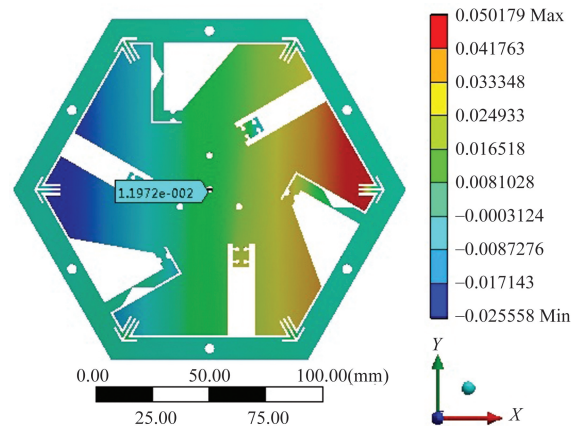
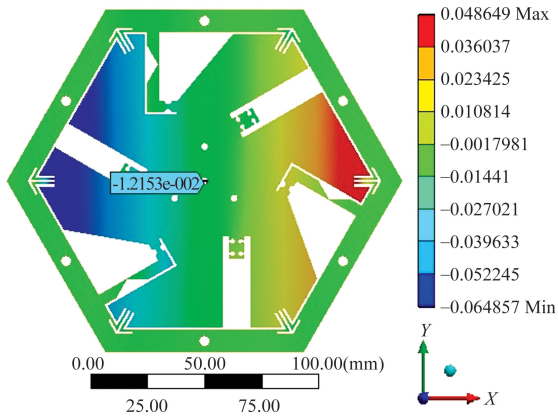


图 4 平台沿 y 轴正方向最大位移

Fig. 4 Maximum displacement of platform along y -axis positive direction

图 5 平台沿 y 轴负方向最大位移Fig. 5 Maximum displacement of platform along the y -axis negative direction

15, 30, 7.5 μm 时, 平台沿 x 轴正方向具有最大的位移; 当平台 3 个压电陶瓷的输出位移分别为 15, 7.5, 30 μm 时, 平台沿 x 轴负方向有最大位移; 当 3 个压电陶瓷的输出位移相同时, 可得到平台相应的转角, 即每个压电陶瓷输出的最大位移均为 30 μm 时有最大转角(图 6)。

由于无法在 ANSYS Workbench 中表示出转角的大小, 因此, 本文通过图 6 所示的探针标记相关点的位移变化, 以此推导出平台参考点的转角。

其平台的转角公式如下:

$$\theta = \arctan \frac{\Delta y + \frac{\pi}{3} \Delta y}{l}, \quad (18)$$

其中, Δy 为标定点在 y 轴方向的位移, l 为标定点之间的距离。

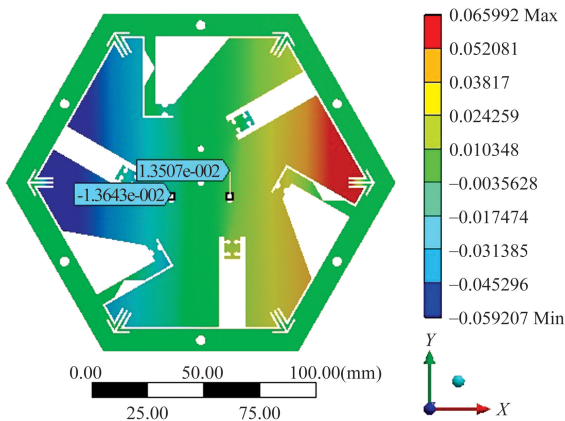


图 6 平台最大转角

Fig. 6 Maximum rotation angle of platform

当 3 个压电陶瓷的伸长量都最大, 即平台处于最大转角时, 平台的变形最大, 此时平台产生的应力最大, 效果如图 7 所示。最大应力为 121.49 MPa, 远小于材料的许用应力, 满足平台的使用要求, 最大应力出现在平板铰链与运动平台的连接处。

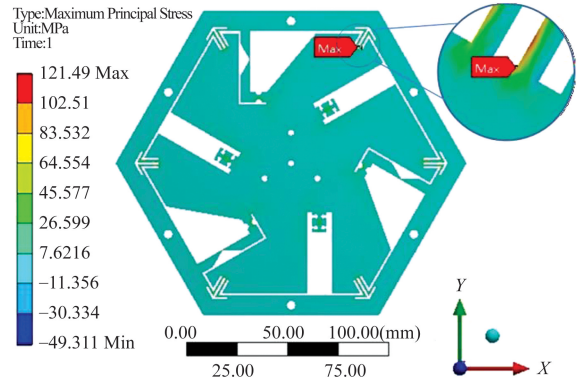


图 7 平台的最大应力

Fig. 7 Maximum stress of platform

柔性铰链的尺寸会直接影响平台的性能。对于直圆柔性铰链, 其变形与宽度呈曲线递减关系, 与切割半径呈曲线递增关系; 对于平板铰链, 其变形随宽度增大而快速减小; 而单边 V 型铰链, 其变形随着切槽最小宽度的增大而减小, 随着切槽角度的增大而增大。综合考虑平台设计指标、压电陶瓷性能以及平台刚度等, 通过仿真分析最终确定直圆柔性铰链的切割半径为 1 mm, 宽度为 1.5 mm, 平板柔性铰链的宽度为 1 mm, 单边 V 型铰链的切槽最小宽度为 0.6 mm, 切槽角度为 120° 。

5 3-PRR 纳米定位平台性能测试

选择 $a_1 = 10 \text{ mm}$, $b_1 = 48 \text{ mm}$, $l = 26 \text{ mm}$, 加工三自由度纳米定位平台, 并搭建了平台测试实验系统, 如图 8 所示。压电陶瓷选用 PTBS/7 \times 7/30, 电源采用三通道 XE500-D, 使用 Lab VIEW 编制了平台的控制程序, 并通过 MCV-5005S 激光多普勒干涉仪对平台的性能进行测试。

5.1 平台行程范围测试

通过激光多普勒干涉仪测得三自由度纳米定位平台行程范围, 实验结果如表 1 所示, 其理论分析结果及有限元仿真结果也见表 1。从结果可知, 平台理论分析结果与实验结果时误差最大为

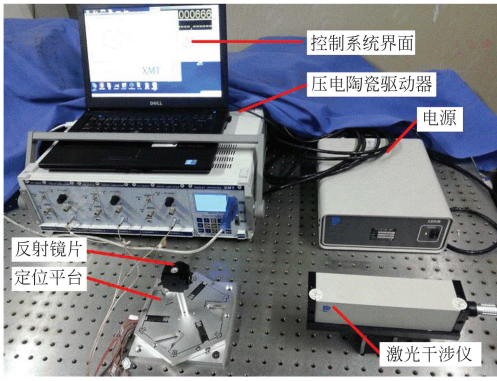


图 8 3-PRR 平台的实验系统

Fig. 8 Experimental system of 3-PRR platform

5.87%，有限元仿真与实验结果误差最大为 6.19%。这是因为理论分析过程中，仅考虑了各种铰链在功能方向上的受力，而没有考虑铰链在非功能方向上的受力；有限元仿真网格划分以及数值解具有近似性；平台加工和测量过程也存在误差，故三者之间存在一定偏差。

5.2 平台分辨率测试

平面三自由度纳米定位平台的分辨率是指平台在各个自由度上可测得的最小行程。测量方法是在不同的起始电压下，以某一个可以分辨的电压增量 ΔU 连续施加 10 次，得到输出行程的变化

表 1 平台的理论分析结果和有限元分析结果

Tab. 1 Theoretical and finite element analysis results of platform

	$x/\mu\text{m}$	误差/(%)	$y/\mu\text{m}$	误差/(%)	$\phi/(')$	误差/(%)
理论	-10.74	5.12	-12.40	0.56	0~3.44	5.23
	~10.74	5.87	~12.40	2.82		
有限元	-11.17	1.33	-12.15	2.57	0~3.67	1.10
	~11.42	0.09	~11.97	6.19		
实验	-11.32	--	-12.47	--	0~3.63	--
	~11.41		12.76			

曲线。测试时，3 个陶瓷的起始电压和增量都不同。 y 轴按 4 : 1 : 1 的比例同时增加， x 轴按 5 : 2 : 1 的比例同时增加。当 3 个压电陶瓷的起始电压分别为 70、28、14 V，对应的电压增量分别为 1、0.4、0.2 V 时， x 轴分辨率测试结果如图 9 所示。当 3 个压电陶瓷的起始电压分别为 70、17.5、17.5 V，对应的电压减量分别为 1、0.25、

0.25 V 时， y 轴分辨率测试结果如图 10 所示。

由分辨率测试结果可以得出：平台沿 x 轴、 y 轴的分辨率分别为 71 nm、83 nm。而旋转分辨率可由公式(18)间接计算得出，为 $1.35''$ ，其中， $\Delta y=83 \text{ nm}$ 。

当给平台的压电陶瓷施加不同的电压时，平台运动将导致 3 个应变片变形，惠斯通电桥输出相应电压。通过测试得到应变片输出电压与平台

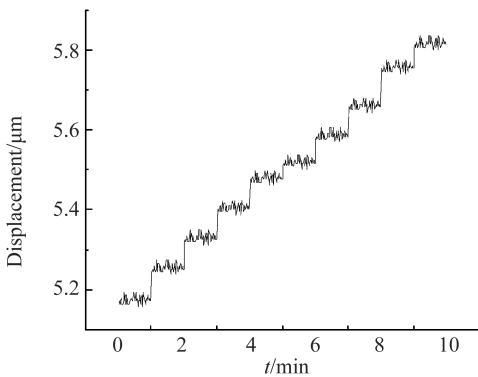


图 9 x 轴分辨率测试效果

Fig. 9 Test results of x -axis resolution

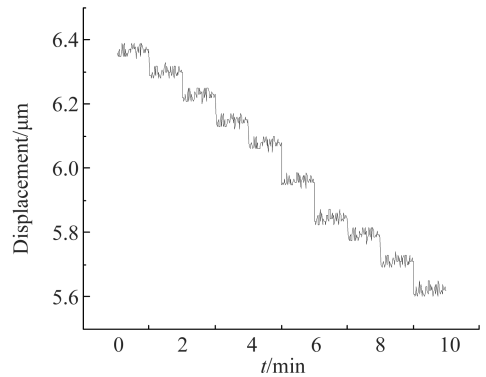
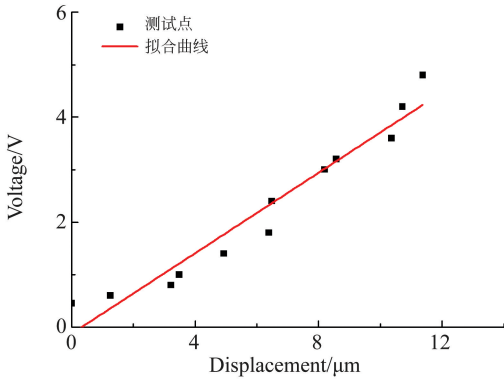
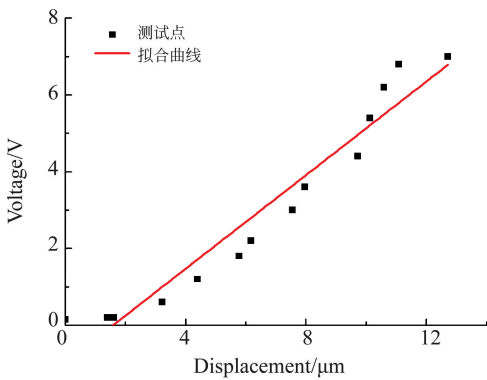


图 10 y 轴分辨率测试效果

Fig. 10 Test results of y -axis resolution

图 11 x 轴位移与应变片输出电压关系Fig. 11 Relationship between x -axis displacement and output voltage of strain gauge图 12 y 轴位移与应变片输出电压关系Fig. 12 Relationship between y -axis displacement and output voltage of strain gauge

x 、 y 方向运动关系,如图 11 和图 12 所示。图中方点是测试得到的结果,直线是最小二乘法回归拟合的直线。

从图 11 和图 12 的拟合曲线可以看出:惠斯通电桥的输出电压与平台的输出位移近似呈正比关系,与前面理论分析结果一致。可见,该 3-PRR 纳米定位平台采用应变片进行位移检测具有可行性。但是,受 3 个应变片的粘贴误差、应变片阻值误差以及电源性能等的影响,使得标定曲线与实际结果存在一定偏差,有待进一步研究。

6 结 论

本文设计了一种新型的 3-PRR 平面三自由度纳米定位平台,该平台由 3 个压电陶瓷驱动,由应变片进行运动检测,通过均匀分布的平板铰链、直圆铰链及单边 V 型铰链进行导向。建立了平台的伪刚体模型,并对其进行了位姿分析,得出了平台的正、逆解。同时,运用有限元方法对平台进行了仿真分析。在理论分析与有限元仿真基础上,搭建了整个平台的实验系统进行性能测试。测试结果显示:该 3-PRR 平台沿 x 轴、 y 轴行程及转角分别为 $-11.32 \sim 11.41 \mu\text{m}$ 、 $-12.47 \sim 12.76 \mu\text{m}$ 、 $3.63'$;分辨率分别为 71 nm 、 83 nm 、 $1.35''$ 。 x 轴及 y 轴的位移输出与应变片的输出电压近似呈正比关系,表明可以利用应变片来检测控制 3-PRR 平台的运动。

参考文献:

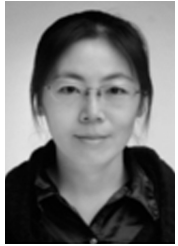
- [1] CAI K H, TIAN Y L, WANG F J, *et al.*. Development of a piezo-driven 3-DOF stage with T-shape flexible hinge mechanism [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, 37: 125-138.
- [2] 马立, 谢炜, 刘波, 等. 柔性铰链微定位平台的设计 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 338-345.
MA L, XIE W, LIU B, *et al.*. Design of micro-positioning stage with flexure hinge [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 338-345. (in Chinese)
- [3] CHEN G M, LIU X Y, DU Y L. Elliptical-arc-fillet flexure hinges: Toward a generalized model for commonly used flexure hinges [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2012, 133(8): 81-85.
- [4] KIM H Y. Development and optimization of a novel 3-DOF precision flexure stage [C]. *Proceedings of 10th IEEE International Conference on Nanotechn-*
- [5] CHAO D H, ZONG G H. Design of a 6-DOF compliant manipulator based on serial-parallel architecture [C]. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Monterey, CA, USA, 2005, 24-28. July
- [6] 周丽平, 张泉, 孙志峻. 直线超声电动机驱动的平面 3-PRR 并联平台视觉精密定位 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(19): 18-23.
ZHOU L P, ZHANG Q, SUN Z J. Precision positioning of a 3-PRR planar parallel manipulator driven by linear ultrasonic motors based on machine vision [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(19): 18-23. (in Chinese)
- [7] SELVAKUMAR A A, KARTHIK K, KUMAR ALN, *et al.*. Kinematic and singularity analysis of 3 PRR parallel manipulator [J]. *Advanced Materi-*

ology, Seoul, South Korea, 2010.

als Research, 2012, 403-408; 5015-5021.

- [8] STAICU S. Inverse dynamics of the 3-PRR planar parallel robot [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2009, 57(5): 556-563.
- [9] KALOORAZI M H F, MASOULEH M T, CARO S. Determination of the maximal singularity-free workspace of 3-DOF parallel mechanisms with a constructive geometric approach [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 84: 25-36.
- [10] 胡俊峰,张宪民. 3自由度精密定位平台的运动特性和优化设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12): 2686-2695.
- [11] YU Y Q, DU Z C, YANG J X, *et al.*. An experimental study on the dynamics of a 3-RRR flexible parallel robot [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(5): 992-997.
- [12] BUIUM F, LEOHCHI D, DOROFTEI I. A workspace characterization of the 3-RRR planar parallel mechanism [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 658: 563-568.
- HU J F, ZHANG X M. Kinematical properties and optimal design of 3-DOF precision positioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2686-2695. (in Chinese)

作者简介:



马立(1977—),女,黑龙江人,博士,研究员,2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为上海大学机电工程与自动化学院教师,主要从事微操作机器人技术方面的研究。E-mail: hitlian@163.com