

空间六支链柔顺并联纳米定位平台设计与测试*

王瑞洲, 向彬彬

(广东工业大学省部共建精密电子制造技术与装备国家重点实验室 广州, 510006)

摘要 作为微纳操作、精密测量与微机电系统领域核心部件, 纳米定位平台是微纳技术与精密机械领域的研究热点。笔者提出基于 6-RRRR 柔顺并联机构的空间六支链纳米定位平台, 由 6 支压电促动器驱动, 经 6 条柔顺并联支链传动, 末端执行器具备纳米级精度的运动生成能力。首先, 设计平台机构构型、压电驱动、实时测量与闭环反馈方案, 实现纳米级精度的位移生成、传递、测量与控制; 其次, 推导平台在平面内外的雅克比矩阵, 引入 4 项位移损失因子予以修正, 建立高精度的运动学模型; 最后, 加工平台样机并设计刚度测试、工作空间与轨迹追踪实验, 测试平台性能指标, 验证平台雅克比矩阵的计算精度。结果表明: 笔者所设计的纳米定位平台具有刚度高、转角大与定位精度优异等特性, 经 4 项位移损失因子修正的运动学模型精度较高。

关键词 柔顺并联机构; 六支链机构; 纳米定位平台; 压电驱动

中图分类号 TH691.9; TP394.1

引言

空间纳米定位平台在精密运动生成、测量、操作、加工等领域发挥重要作用, 在生物医学领域, 通过空间纳米台辅助, 可实现细胞寻找、定位、捕捉、固定、显微注射等操作^[1]。在大口径光栅制备领域, 使用空间纳米台调整小块光栅的位姿, 可确保平移、转动误差分别达到纳米级和微弧度级^[2]。在激光差动共焦显微镜扫描领域, 利用空间纳米台精确定位被测样品扫描位置, 重构样品三维模型^[3]。在航空航天领域, 空间纳米台作为光学稳像系统的伺服补偿驱动器, 具有响应快、精度高等优势^[4]。在微机电装配领域, 借助空间纳米台有助于实现高效生产^[5]。

并联机构具有大承载能力、高刚度与高精度等特点, 六支链并联机构在 500 m 口径球面射电望远镜馈源舱两级支撑、詹姆斯·韦伯太空望远镜组装机架、卫星太阳翼自动调姿对接辅助装置、光电子器件封装台架、透射电子显微镜样本承载、医疗手术辅助、X-射线衍射仪样本调整、同步辐射装置样本操纵与细胞操作等应用场景中性能表现优异^[6-12]。六支链并联经典构型由 Gough 于 1962 年与 Stewart 于 1965 年提出, 即 Gough-Stewart 机构。驱动源有伺服电机、压电直线电机与压电陶瓷促动器等, 传动部件包括刚性杆件、柔顺机构、刚柔混合与绳索等。

基于压电陶瓷的逆压电效应生成位移, 压电促动器的分辨率可达亚纳米级, 具有输出刚度大、响应速度快等突出特点^[10-15]。柔顺机构采用柔性铰链代替传统刚性铰链, 通过一体化加工, 可免除装配误差^[9-15]。结合压电驱动、柔顺机构与六支链并联机构, 所设计的压电驱动空间六支链柔顺并联纳米定位平台具有承载力大、刚度高与速度快等优势。

针对有限尺寸(直径为 200 mm 和高度为 60 mm 构成的圆柱空间)内对高刚度、大工作空间与空间纳米级定位精度的需求, 笔者提出新型压电驱动空间六支链柔顺并联机构(compliant parallel mechanism, 简称 CPM)。结合压电促动器与电容传感器, 构建空间六支链纳米定位平台, 在有限尺寸内实现高刚度、大转角与纳米级定位精度。

1 空间六支链纳米定位平台设计

1.1 机构构型设计

笔者提出一种六支链柔顺并联机构的新构型, 即“6-RRRR”机构, 包括 6 条全并联的柔顺支链, 每条支链由 4 个转动副构成。第 1 个转动副作为等效主动副, 用“R”表示; 其余 3 个转动副作为被动副, 用“RRR”表示。因此, 每条支链称为“RRRR”支链, 整

* 国家自然科学基金资助项目(51905106); 广州市基础与应用基础研究资助项目(202201010398)

收稿日期: 2023-05-18; 修回日期: 2023-06-15

体为“6-RRRR”柔顺并联机构。采用“二合一”方案,分为上层机构和下层机构,以降低加工成本。

上层机构由3条RRRR支链构成,即平面内3-RRRR柔顺并联机构。下层机构由3条RRRR支链构成,即平面外3-RRRR柔顺并联机构。每条平面外RRRR支链所在平面与平面内3条RRRR支链所在平面相互垂直。上、下2层机构的固定部分通过连接板相结合,可动部分通过螺钉与销钉连接,空间六支链柔顺并联机构的设计方案如图1所示。

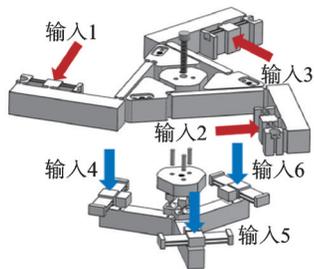
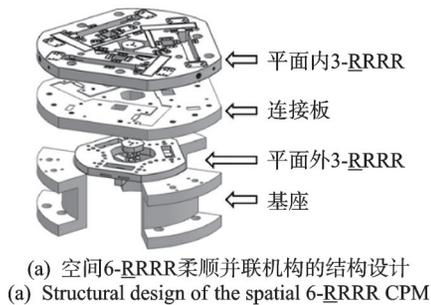


图1 空间六支链柔顺并联机构的设计方案

Fig.1 Design scheme of the spatial six-branched-chain CPM

1.2 压电驱动设计

基于6-RRRR柔顺并联机构,添加6支压电促动器与4支电容传感器,构建空间六支链纳米定位平台。与6-RRRR柔顺并联机构相同,空间六支链纳米定位平台分为平面内与平面外。平面内三支链定位平台,采用3支封装型压电促动器(packaged piezoelectric actuators,简称PEA)。平面外三支链定位平台,采用3支裸装型压电促动器。

为使压电促动器输出大位移,通常将多层压电陶瓷片叠加成压电叠堆,但不能承受剪切力、侧向力、扭力等^[16]。在预紧时,保证压电促动器工作且与平台保持连接。采用楔块或螺钉推动金属块等方案时,难以避免侧向力或扭矩的产生。文献[17]提出两级螺纹连接,并在螺钉与金属块之间增设钢珠,抵消螺钉转动时的扭矩。本研究中,在PEA预紧时,予以参考;在裸装型压电促动器预紧时,予以改进,以适配裸装压电陶瓷叠堆。

PEA的预紧方案如图2所示。在平面内三支链纳米定位平台的预紧中,采用十字交叉分布的两级预紧。推动预紧块的螺钉,选用自定义螺距的螺纹(小于公制细牙螺距)。2个螺钉呈十字交叉分布,有利于螺钉锁紧和减小螺纹间隙。预紧块两端设有4个凸台,分别与定平台4个滑槽配合,确保其轴向平移精度。在预紧块朝向螺钉的一面,加工半球形凹槽。把钢珠置于凹槽内,连接预紧块和细牙螺钉,避免侧向力、扭矩等给压电促动器带来损害。

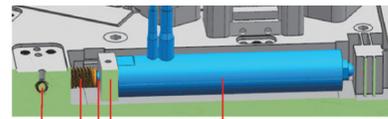


图2 PEA的预紧方案

Fig.2 Preload scheme of PEA

针对裸装型压电促动器,在压电促动器输入端采用与PEA相同的设计方案。在输出端,增设输出端金属块与金属保护壳,以保护裸装压电叠堆。设置钢珠以连接输出端金属块与平台,利用两端钢珠抵消扭矩、侧向力等作用。钢珠与金属保护壳无接触,裸装型压电促动器的预紧方案如图3所示。

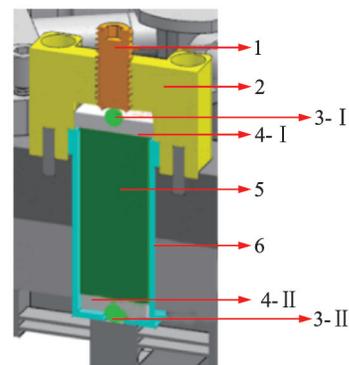


图3 裸装型压电促动器的预紧方案

Fig.3 Preload scheme of naked PEA

1.3 测量方案设计

1.3.1 位移测量

图4为4支传感器的布局及测量方法在平面内与平面外的测量方案。末端执行器的输出位移测量分为平面内和平面外2部分,采用3支电容传感器,测量平面内3个自由度($\delta_x, \delta_y, \theta_z$)。其中2支并排对称布置于末端执行器右侧,第3支布置于末端执

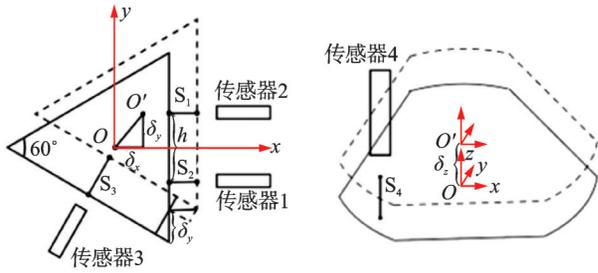


图4 平面内与平面外的测量方案

Fig.4 Design schemes of the in-plane and out-of-plane measurement

行器左下方。为测量平面外一个自由度(δ_z),采用1支电容传感器布置于末端执行器上方。

图4中实线和虚线分别表示末端执行器运动前后的位置,末端执行器的测量值计算公式为

$$\delta_x = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \quad (1)$$

$$\delta_y = \frac{\delta_3 - \delta_x \sin 30^\circ}{\cos 30^\circ} \quad (2)$$

$$\delta_z = -\delta_4 \quad (3)$$

$$\theta_z = \frac{\delta_1 - \delta_2}{h} \quad (4)$$

其中: δ_x 、 δ_y 、 δ_z 分别为末端执行器沿 x 、 y 、 z 轴的平动分量; θ_z 为绕 z 轴的转动分量; δ_1 、 δ_2 、 δ_3 和 δ_4 分别为传感器1、2、3和4的测量值; h 为传感器1与2的轴心间距。

图5为电容传感器支架的设计方案。图5(a)中,传感器1~3支架1~3均分为上、下2部分,均设有半圆形滑槽,两者之间通过销钉定位与螺钉加固。图5(b)中,传感器4的支架4为采用4个直梁型

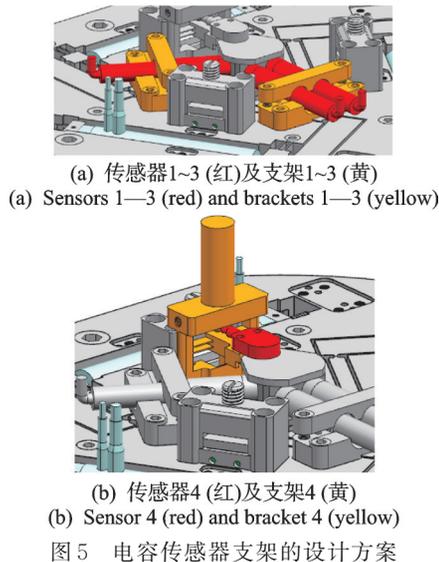


图5 电容传感器支架的设计方案

Fig.5 Design schemes of brackets for capacitive sensors

柔性铰链构成的位移导向机构。由千分尺头推动导向机构,带动传感器4沿垂直方向运动,实现传感器4与被测面间距的微米级精度调整。

1.3.2 刚度测量

为测试空间六支链纳米定位平台的输出刚度,在末端执行器的上表面加工凸台,增设通孔。在进行不同方向的刚度测试时,通孔可作为细线的连接点。将定滑轮安装在设置的固定支架上,确保在测试中受力方向与轴向保持平行,刚度测量的设计方案如图6所示。

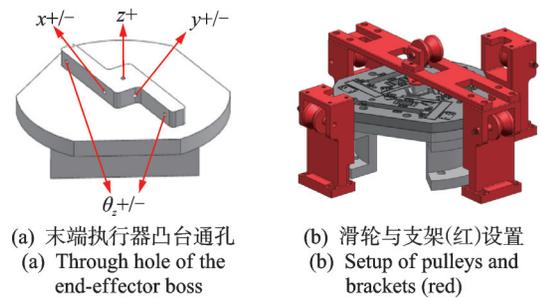


图6 刚度测量的设计方案

Fig.6 Design scheme for the stiffness measurement

使用不同重量的砝码来控制所施加力或力矩的量值,通过定滑轮导向来控制力或力矩的方向。沿 x 轴、 y 轴、 z 轴的导向,将细线连接于末端执行器中心。测量 θ_z 刚度时,同时施加方向相反的2个力,偏置相同距离,形成绕 z 轴的转矩。

1.4 闭环反馈方案设计

在末端执行器的轨迹追踪中,采用比例-积分-微分(proportional-integral-derivative,简称PID)控制器进行控制。平面内三支链所采用的PEA中内置应变片1~3,可实时反馈伸长量。平面内双回路伺服的控制方案如图7所示。

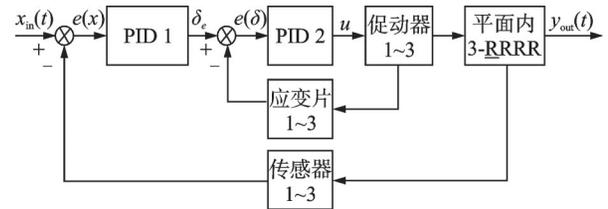


图7 平面内双回路伺服的控制方案

Fig.7 Control scheme of the in-plane double-loop servo

图7中: $x_{in}(t)$ 为平面内3-RRRR平台末端执行器的期望轨迹; $y_{out}(t)$ 为实测轨迹; $e(x)$ 为 $x_{in}(t)$ 与 $y_{out}(t)$ 的差值,并作为控制器1(PID 1)的输入量; δ_e 为促动器1~3的期望伸长量; $e(\delta)$ 为 δ_e 与促动器1~3的

测伸长量的差值,并作为控制器2(PID 2)的输入量; u 为输送到促动器的电压值。

2 空间六支链纳米台运动学分析

2.1 平面内运动学分析

平面内RRRR支链中,第4个转动副R的主柔度在平面外。为简化分析,将3-RRRR机构等效为3-RRR机构^[17-20]。采用伪刚体模型(pseudo-rigid-body model, 简称PRBM)进行建模,平面内3-RRRR柔顺并联机构的PRBM如图8所示。

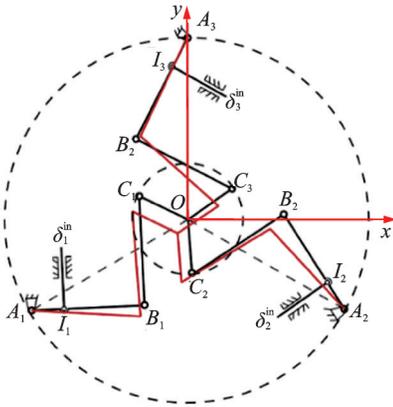


图8 平面内3-RRRR柔顺并联机构的PRBM

Fig.8 PRBM of the in-plane 3-RRRR CPM

图8中,正三角形 $A_1A_2A_3$ 表示平面内3-RRRR机构的定平台,定坐标系 xOy 原点在 A_1, A_2, A_3 中心, x 轴方向平行于 A_1, A_2 ,正三角形 $C_1C_2C_3$ 表示机构的动平台。输入为 $[\delta_1^{\text{in}}, \delta_2^{\text{in}}, \delta_3^{\text{in}}]^T$,输出为 $[\delta_x, \delta_y, \theta_z]^T$,对运动学进行求解,得

$$J_{\delta_1} \cdot [\delta_1^{\text{in}} \ \delta_2^{\text{in}} \ \delta_3^{\text{in}}]^T = J_{q_1} \cdot [\delta_x \ \delta_y \ \theta_z]^T \quad (5)$$

xOy 平面的逆雅克比矩阵可表示为

$$J_{xOy}^{-1} = J_{\delta_1}^{-1} \cdot J_{q_1} \quad (6)$$

式(6)中 J_{δ_1} 与 J_{q_1} 可分别表示为

$$J_{\delta_1} = \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_2 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$J_{q_1} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(7)、(8)中参数为求解过程中的变量。在逆运动学解的基础上,采用迭代求得正运动学解^[21]。

2.2 平面外运动学分析

平面外RRRR支链中,第3与第4个转动副RR

的主柔度在平面内。为简化分析,等效为3-RR机构,平面外3-RRRR柔顺并联机构的PRBM如图9所示。

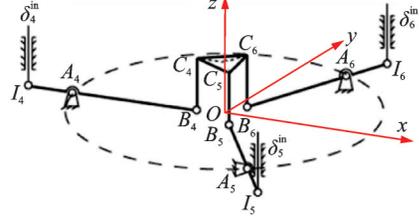


图9 平面外3-RRRR柔顺并联机构的PRBM

Fig.9 PRBM of the out-of-plane 3-RRRR CPM

图9中,正三角形 $B_4B_5B_6$ 表示平面外3-RRRR机构的定平台 $C_4C_5C_6$ 表示机构的动平台。输入为 $[\delta_4^{\text{in}}, \delta_5^{\text{in}}, \delta_6^{\text{in}}]^T$,输出为 δ_z ,对运动学进行求解,得

$$J_{\delta_2} \cdot [\delta_4^{\text{in}} \ \delta_5^{\text{in}} \ \delta_6^{\text{in}}]^T = J_{q_2} \cdot \delta_z \quad (9)$$

z 轴向上的逆雅克比矩阵可表示为

$$J_z^{-1} = J_{\delta_2}^{-1} \cdot J_{q_2} \quad (10)$$

式(10)中 J_{δ_2} 与 J_{q_2} 可分别表示为

$$J_{\delta_2} = \begin{bmatrix} \delta_4 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_5 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_6 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$J_{q_2} = [q_{41} \ q_{42} \ q_{43}]^T \quad (12)$$

式(11)、(12)中参数为求解过程的变量。在逆运动学解的基础上,采用迭代求得正运动学解。

2.3 位移损失分析

在6条RRRR支链传递力与位移时,须考虑预紧端、输入端和杠杆的位移损失^[22],即

$$\delta_i^{\text{out-act}} = \delta_i^{\text{out-the}} \cdot \prod_{j=1}^4 (1 - \gamma_j^i) \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (13)$$

其中: $\delta_i^{\text{out-act}}$ 为第 i 条支链的实际输出位移; $\delta_i^{\text{out-the}}$ 为第 i 条支链的理论输出位移; $\gamma_1^i, \gamma_2^i, \gamma_3^i, \gamma_4^i$ 分别为空载、预紧端、输入端和杠杆的位移损失因子。

空载的位移损失因子 γ_1^i 的定义为

$$\gamma_1^i = \frac{\delta_i^{\text{nom}} - \delta_i^{\text{act}}}{\delta_i^{\text{nom}}} \times 100\% \quad (14)$$

其中: δ_i^{act} 为第 i 支电压促动器在空载下的实际伸长量; δ_i^{nom} 为其名义伸长量。

预紧端的位移损失因子 γ_2^i 为

$$\gamma_2^i = \frac{K_i^{\text{pre}}}{K_i^{\text{PEA}} + K_i^{\text{pre}}} \times 100\% \quad (15)$$

其中: K_i^{PEA} 为第 i 支电压促动器的刚度; K_i^{pre} 为第 i 条支链所对应驱动槽的预紧刚度。

输入端位移损失因子 γ_i^3 的定义为

$$\gamma_i^3 = \frac{K_i^{\text{in}}}{K_i^{\text{PEA}} + K_i^{\text{in}}} \times 100\% \quad (16)$$

其中: K_i^{PEA} 为第*i*支压电促动器的刚度; K_i^{in} 为第*i*条支链的输入刚度。

杠杆位移损失因子 γ_i^4 的定义为

$$\gamma_i^4 = \gamma_i^{4-I} + \gamma_i^{4-II} \quad (17)$$

γ_i^{4-I} 为轴漂引起的位移损失因子, γ_i^{4-II} 为由挠曲引起的位移损失因子^[22],即

$$\gamma_i^{4-I} = \frac{\delta_i^{\text{drift}}}{\delta_i^{\text{in}} \gamma_i^{\text{amp}}} \times 100\% \quad (18)$$

$$\gamma_i^{4-II} = \frac{\delta_i^{\text{bend}}}{\delta_i^{\text{in}} \gamma_i^{\text{amp}}} \times 100\% \quad (19)$$

其中: γ_i^{amp} 为第*i*条支链杠杆的理论几何增益系数。

δ_i^{drift} 、 δ_i^{bend} 的定义可用图10的第*i*条支链上杠杆的位移损失进行阐述。

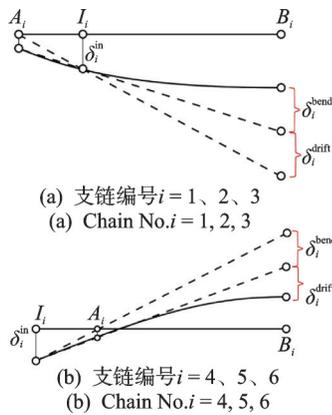


图10 第*i*条支链上杠杆的位移损失

Fig.10 Displacement loss of the lever of the No.*i* branched chain

综合式(13)~(19),引入4项位移损失因子,修正平面内与平面外的运动学理论模型。

2.4 工作空间计算

为验证经位移损失因子修正后的运动学建模精度,采用工作空间验证运动学正解的精度。设定6支压电促动器的步长,使促动器伸长量以设定步长由初始值依次增大至满量程。通过运动学正解,得到每一组促动器输入量对应的末端执行器位姿。搜索点集,得到工作空间。

平面内3支压电促动器的量程为45 μm ,步长设为5 μm ;平面外3支压电促动器的量程为42 μm ,步长设为7 μm 。工作空间的理论计算结果如图11所示,图中(a)~(d)依次为纳米定位平台工作空间在 xOy 、 xOz 、 $xO\theta_z$ 与 $yO\theta_z$ 的投影。 x 轴理论的运动范围为-79.3~79.5 μm , y 轴为-89.2~89.4 μm , z 轴为0~100.0 μm ,绕 z 轴转角可达6.3 mrad。

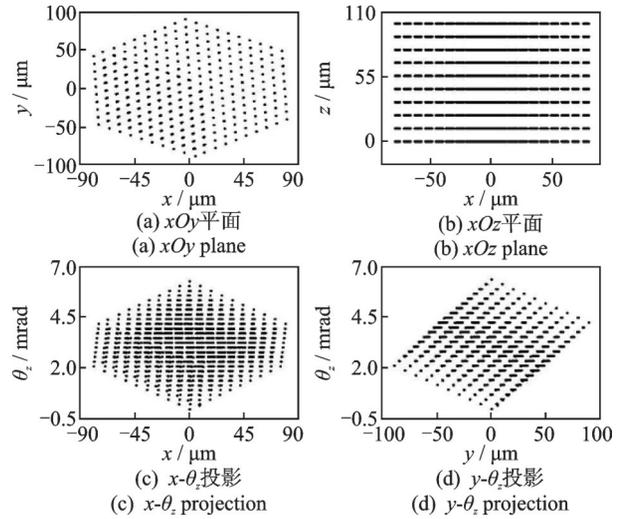


图11 工作空间的理论计算结果

Fig.11 Theoretical calculation results of the workspace

3 空间六支链纳米台性能测试

3.1 样机加工与实验设置

图12为纳米定位平台样机实验设置。选用7075-T651型铝合金,采用慢走丝线切割技术加工6-RRRR机构样机。针对平面内三支链平台,采用3支PEA(德国Physik Instrumente,P-841.3B型),内置集成应变式传感器应变片,搭配压电驱动控制器

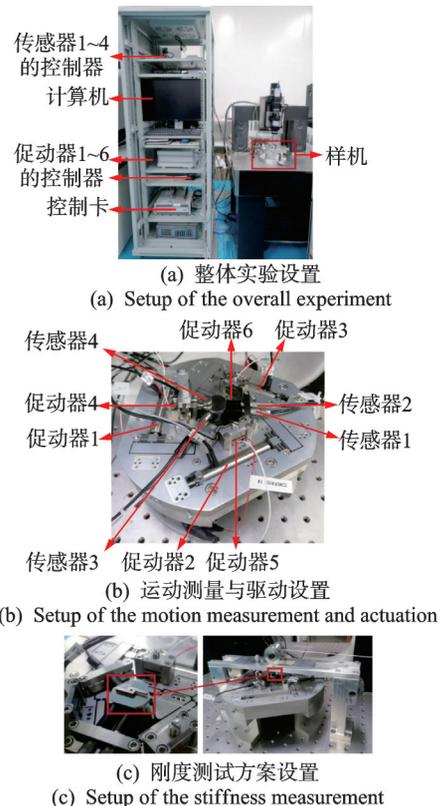


图12 纳米定位平台样机实验设置

Fig.12 Setup of the prototype and experiment of the nanopositioning stage

(E-505.00型);针对平面外三支链平台,采用3支裸装型压电促动器(哈尔滨芯明天,NAC2015-H28型),搭配压电驱动控制器(E53.A型);所配电容传感器均为德国Physik Instrumente公司生产,包括3支柱状(传感器1~3,D-E20.200型)和1支片状(传感器4,D-E30.200型)。

空间六支链纳米定位平台固定在隔振台。促动器1~6的控制器、传感器1~4的控制器、控制卡(德国dSPACE MicroLabBox实时仿真系统)和计算机均固定在机柜,为压电促动器1~6与电容传感器1~4提供电源、信号输入、数据采集及处理等。

3.2 刚度测试

针对定位平台的刚度测试实验,依次放置质量为50、100、150、200、250和300g的砝码作为加载力。通过电容传感器测得末端执行器位移量,再取平均值。线性拟合后得曲线斜率,作为沿该方向的刚度,刚度测试结果如表1所示。

表1 刚度测试结果

Tab.1 Results of the stiffness test

方向	$x+$	$x-$	$y+$	$y-$	$z+$	θ_z+	θ_z-
刚度	0.24	-0.24	0.23	-0.27	1.08	258	-250

注:直线刚度单位为 $N/\mu m$,转动刚度单位为 $N\cdot mm/mrad$ 。

3.3 工作空间测试

采用逐点搜索进行末端执行器工作空间测试。平面内3支PEA,依次从 $0\mu m$ 开始,步长设为 $5\mu m$,逐步增大至 $45\mu m$;平面外3支裸装型压电促动器,同时从 $0\mu m$ 开始,步长设为 $7\mu m$,逐步增大至 $42\mu m$ 。工作空间的样机测试结果如图13所示。

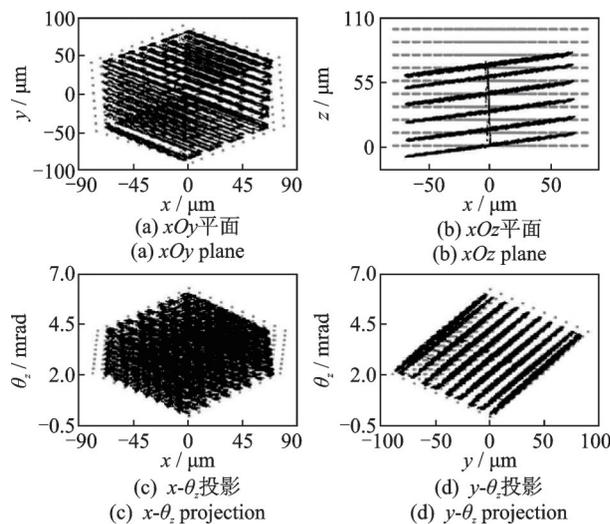


图13 工作空间的样机测试结果

Fig.13 Prototype-test results of the workspace

示,图中黑色、灰色分别表示测量值、理论值。由于充分考虑位移损失,工作空间的测量值与理论值高度重合。 x 轴实测的运动范围为 $-69.7\sim 69.9\mu m$, y 轴为 $-86.7\sim 83.2\mu m$, z 轴为 $-10.0\sim 80.3\mu m$,绕 z 轴转角可达 6.1 mrad 。

3.4 轨迹追踪精度测试

设计直径为 $50\mu m$ 的圆轨迹,作为运动追踪的目标量值,速度设为 $1\mu m/s$ 。电容传感器测量值,作为运动追踪的实测量值。轨迹实测坐标量值与目标量值的差值,作为追踪误差。通过机构运动学逆解,解算出压电促动器的伸长量。末端PID 2参数设为 $[0.5, 1.0, 0.0]$,输入端PID 1设为 $[0.8, 0.1, 0.0]$ 。平面内圆轨迹追踪如图14所示。图14(a)为末端执行器的实际运行轨迹,图14(b)与图14(c)为计算轨迹每个点的追踪误差。基于 3σ 的计量方式,得到沿 x 轴的轨迹追踪精度为 37.3 nm ,沿 y 轴的轨迹追踪精度为 56.3 nm 。

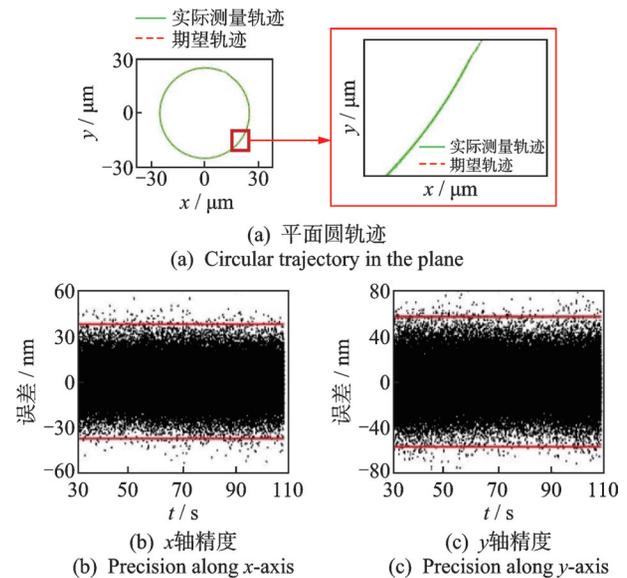


图14 平面内圆轨迹追踪

Fig.14 In-plane circular trajectory tracking

3.5 性能参数对比

与同类空间六支链柔顺纳米定位平台^[11-13]相比,笔者所设计的六支链平台结构紧凑、工作空间(尤其是可转角度)大、固有频率高,且轨迹追踪精度较高。为综合对比笔者所设计平台的优势,本研究平台与其他六支链柔顺纳米定位平台的性能指标对比如表2所示。

表2 本研究平台与其他六支链柔顺纳米定位平台的性能指标对比

Tab.2 Comparison on performance indexes between the proposed nanopositioning stage and other six-branched-chain compliant nanopositioning stages

空间六支链纳米定位平台	本研究	文献[11]	文献[12]	文献[13]
外形尺寸(W, L, H)/mm	$\varnothing 200, 56$	250, 250, 80	$\varnothing 264, 148$	$\varnothing 150, 143$
工作空间(x, y, z)/ μm	140, 170, 90	40, 40, 80	80, 80, 60	8.2, 10, 13
工作空间(θ_z)/ μrad	6 090	400	300	200
固有频率(1, 2, 3)/Hz	726, 734, 873	200	189, 189, 231	323, 323, 526
轨迹追踪精度($x-3\sigma, y-3\sigma$)/nm	37.3, 56.3	33, 33	30, 30	(93, 81)*

注:“*”文献[13]中未提供 3σ 标准的轨迹追踪误差,此处所选的数据为圆轨迹追踪最大误差。

4 结 论

1) 笔者提出六支链柔顺并联机构新构型即6-RRRR,结合压电驱动及预紧、位移测量及反馈、伺服控制等方案设计,构建空间六支链纳米定位平台。考虑到加工成本,采用2层3-RRRR柔顺并联机构相结合的方案。建立纳米定位平台的运动学模型,得到正、逆雅克比矩阵,采用4项位移损失因子予以修正。加工纳米定位平台样机,测试定位平台的刚度、工作空间与轨迹追踪精度等性能。其中,工作空间的高度重合,验证了经位移损失因子修正后的运动学正解精度;轨迹追踪的高精度,验证了经位移损失因子修正后的运动学逆解的精度。

2) 笔者所设计的空间六支链纳米定位平台,在直径为200 mm和高度为56 mm构成的圆柱空间整体尺寸约束下,具有 $139.6 \mu\text{m} \times 169.9 \mu\text{m} \times 90.3 \mu\text{m} \times 6.1 \text{ mrad}$ 的工作空间,以及 $0.24 \text{ N}/\mu\text{m}$ 的平面内直线刚度、 $1.08 \text{ N}/\mu\text{m}$ 的平面外直线刚度、 $258 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{mrad}$ 的平面内转动刚度;沿直径50 μm 的圆轨迹追踪测试中,沿 x 轴的轨迹追踪精度为37.3 nm (3σ),沿 y 轴的轨迹追踪精度为56.3 nm (3σ)。本研究平台满足有限尺寸内大转角、高刚度与纳米级定位精度的设计需求。

参 考 文 献

- [1] 田桂中,侯丽雅,章维一.显微注射中细胞位姿调节技术及实验研究[J].中国机械工程,2009,20(4):409-412.
TIAN Guizhong, HOU Liya, ZHANG Weiyi. Adjusting technology for cellular position and attitude in microinjection[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(4): 409-412. (in Chinese)
- [2] 杨国军,齐向东,于海利,等.大尺寸反射式光栅拼接技术的研究进展[J].光学精密工程,2019,27(3):542-551.
YANG Guojun, QI Xiangdong, YU Haili, et al. Development of mosaic technology for large-size reflective gratings[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(3): 542-551. (in Chinese)
- [3] 刘志群,易定容,孔令华,等.基于并行共聚焦显微系统的物方差动轴向测量[J].光学精密工程,2017,25(6):1449-1457.
LIU Zhiqun, YI Dingrong, KONG Linghua, et al. Object-side based differential axial measurement based on parallel confocal microscopy[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(6): 1449-1457. (in Chinese)
- [4] 崔志勇.二维压电微动机构的设计及其在光学稳像中的应用研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.
- [5] 薛立伟,王雄,贾玉蝶,等.MEMS摩擦传感器微组装系统研制[J].光学精密工程,2022,30(16):1943-1954.
XUE Liwei, WANG Xiong, JIA Yudie, et al. Development of micro assembly system for friction resistance sensor manufactured based on MEMS[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(16): 1943-1954. (in Chinese)
- [6] 于阳,王学问,徐振邦,等.基于柔性铰链的大口径望远镜并联调整机构[J].光学精密工程,2023,31(3):352-362.
YU Yang, WANG Xuewen, XU Zhenbang, et al. Parallel adjustment mechanism for large aperture telescope based on flexible hinges[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(3): 352-362. (in Chinese)
- [7] ZHANG Y, HAN H, ZHANG H, et al. Acceleration analysis of 6-RR-RP-RR parallel manipulator with offset hinges by means of a hybrid method[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 169: 104661.
- [8] CHANG Q B, GAO X, LIU Y X, et al. Development of a cross-scale 6-DOF piezoelectric stage and its application in assisted puncture[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 174: 109072.

- [9] XU H W, ZHOU H B, TAN S X, et al. A six-degree-of-freedom compliant parallel platform for optoelectronic packaging[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(11): 11178-11187.
- [10] WU T L, CHEN J H, CHANG S H. A six-DOF prismatic-spherical-parallel compliant nanopositioner[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, 55(12): 2544-2551.
- [11] VARADARAJAN K M, CULPEPPER M L. A dual-purpose positioner-fixture for precision six-axis positioning and precision fixturing: part I. modeling and design[J]. Precision Engineering, 2007, 31(3): 276-286.
- [12] ZHANG D F, LI P Z, ZHANG J G, et al. Design and assessment of a 6-DOF micro/nanopositioning system [J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(5): 2097-2107.
- [13] CAI K H, TIAN Y L, LIU X P, et al. Modeling and controller design of a 6-DOF precision positioning system[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 104: 536-555.
- [14] 刘英想, 邓杰, 常庆兵, 等. 压电驱动技术研究进展与展望[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(6): 1045-1061. LIU Yingxiang, DENG Jie, CHANG Qingbing, et al. Progress and prospect of research on piezoelectric drive technology[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(6): 1045-1061.(in Chinese)
- [15] 张泉, 王瑞洲, 周丽平, 等. 柔性并联平台的动力学建模及主动振动控制[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(6): 1025-1031. ZHANG Quan, WANG Ruizhou, ZHOU Liping, et al. Dynamic modeling and active vibration control of flexible parallel stage[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(6): 1025-1031. (in Chinese)
- [16] 程伶俐, 余晓芬, 余卿, 等. 压电陶瓷驱动器弹性套筒的研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(10): 1139-1142. CHENG Lingli, YU Xiaofen, YU Qing, et al. Research on elastic sleeve of piezoelectric ceramic driver [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(10): 1139-1142.(in Chinese)
- [17] WANG R Z, ZHANG X M. Parameters optimization and experiment of a planar parallel 3-DOF nanopositioning system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2388-2397.
- [18] YU W D, WANG H, CHEN Z L. Design and kinematic analysis of a 3-translational-DOF spatial parallel mechanism based on polyhedra[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 121: 92-115.
- [19] 张泉, 东益冲, 任广, 等. 压电驱动三自由度柔顺精密定位平台研究[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(1): 176-183. ZHANG Quan, DONG Yichong, REN Guang, et al. Research on piezoelectric driven three degree of freedom flexible precision positioning platform[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(1): 176-183.(in Chinese)
- [20] WANG R Z, ZHANG X M. Optimal design of a planar parallel 3-DOF nanopositioner with multi-objective[J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 112: 61-83.
- [21] 米士彬, 金振林. 基于雅克比矩阵求解并联机器人位置正解方法[J]. 燕山大学学报, 2011, 35(5): 391-395. MI Shibin, JIN Zhenlin. Seeking positional forward solution of parallel mechanism based on Jacobin matrix [J]. Journal of Yanshan University, 2011, 35(5): 391-395.(in Chinese)
- [22] WANG R Z, ZHANG X M. A planar 3-DOF nanopositioning platform with large magnification[J]. Precision Engineering, 2016, 46: 221-231.



第一作者简介:王瑞洲,男,1990年4月生,博士,副教授。主要研究方向为微定位与微视觉。曾发表《离面位移激励下微视觉运动追踪精度劣化特性》(《光学精密工程》2023年第31卷第1期)等论文。

E-mail:wangrz@gdut.edu.cn