面向高精度、大行程应用的整体式六自由度并联定位系统

MohammadaliGhafarian[1,2],Bijan Shirinzadeh[1],Ammar Al-Jodah[1]机器人与机电一体化研究实验室（*RMRL*）机械与航空航天工程系，莫纳什大学，澳大利亚墨尔本，维多利亚州 *3800*[2]智能系统研究与创新研究所（*IISRI*），迪肯大学，澳大利亚沃恩池塘，维多利亚州 *3216*m.ghafarian@deakin.edu.au

arXiv:2302.01424v1 [cs.RO] 2 Feb 2023

摘要—**本文提出了一种紧凑型大行程六自由度并联定位系统，具有高分辨率、高谐振频率和高重复性。该系统主要由三个相同的运动学单元组成。每个运动学单元由两个相同的位移放大与导向机构组成，并最终连接到一条支链。每条支链两端均设计有万向节，并与移动平台相连。利用 ANSYS 软件包建立了该定位器的计算模型，据此确定了系统的输入刚度、输出柔度、行程范围并进行了模态分析。此外，采用丙烯腈-丁二烯-苯乙烯（ABS）材料，通过 3D打印工艺成功制造了整体式原型。该原型分别由压电执行器（PEA）驱动，并使用电容式位移传感器进行测量。最后，通过实验研究了该定位器的性能。其定位分辨率达到 10.5nm × 10.5nm × 15nm× 1.8μrad × 1.3μrad × 0.5μrad。实验结果验证了所提出定位系统的行为与性能，并进一步证实其在整个行程范围内具备纳米级空间定位精度。该系统的实际应用可拓展至拾取与放置操作、显微外科手术/微组装中的振动消除，以及协作机械臂系统。**

索引词—**六自由度定位系统；高分辨率；大行程；压电致动器；反馈控制**

I. 引言

Compliant 具备微纳操纵能力的定位系统已成为众多不同产业关注的焦点，例如纳米压印、细胞操纵、扫描探针显微镜、高密度数据记录、光学仪器、测量系统以及航空航天与国防应用 [1], [2]。整体式特性是柔顺定位系统的一项重要特征，值得强调，因为它带来的优势包括运行平稳、分辨率高、准确率高、重复性好以及动态带宽高。此外，它还能避免非整体式定位器存在的缺陷，例如回程间隙、磨损和摩擦 [3]。整体式制造可利用先进技术实现，例如线切割放电加工（WEDM） [4], [5], 3D打印[6]–[9], 以及湿法/干法刻蚀 [10]。然而，考虑到3D打印制造技术的先进改进随着制造技术的发展，利用不同材料可便捷地制造空间结构设计，同时具有制造成本低、废料率低、耗时少等优点。

从结构角度来看，柔顺定位系统可分为三类：串联 [11],并联 [12], 和混合 [13], [14] 系统。串联定位器由一系列连接基座与末端执行器的关节组成，由于其悬臂式运动学布置，存在刚度不足和定位误差相对较大的问题。相反，并联定位器具有刚度高、精度高、速度能力强和紧凑性好等优点。尽管具备这些特点，其机械设计和控制算法也更为复杂。另一方面，并联定位器由一组并联运动学部件组成，其中包含用于维持系统运动性和可控性的主动关节与被动关节。将这两种方案结合起来便构成混合定位器。

柔顺定位系统由不同类型的驱动原理驱动，这些原理在此类系统的设计和应用中发挥着重要作用。电磁致动器 (EMA) [15]–[17], 静电致动器 (ESA) [18], 电热致动器 (ETA) [19], [20], 形状记忆合金 (SMA) [21],和压电致动器 (PEA)[22], [23] 都是已应用于柔顺定位系统的著名驱动原理。在上述原理中，压电致动器因具有诸多重要优势而得到广泛应用，包括极高的分辨率、较大的力生成能力、快速响应、高带宽频率、高机电能量转换效率以及体积小。

鉴于上述介绍，许多研究致力于提出能够沿不同工作轴执行微纳操纵任务的新型柔顺定位器。显然，定位器所具备的工作轴越多，要实现具有高精度和准确率的可控系统，就越需要克服重重困难和挑战。因此，我们将注意力转向以往的六自由度定位系统 [24]。文献 [25] 介绍了一种采用压电执行器的非整体式六自由度柔顺系统，该系统能够实现以下运动

范围：77.42μm、67.45μm、24.56μm、 930μrad、 950μrad 和 3100μrad。文献 [26]介绍了一种六自由度柔顺双冗余串并联平台的设计与建模。该机构采用两种不同的驱动原理（共 16 个执行器）：压电执行器和超声波电机（USM）。因此，该平台实现了微动和宏动两种工作模式，其可达工作空间分别为 140μm × 140μm × 135μm 和 9.7mm × 9.7mm × 9.5mm。通过实施拓扑优化，文献 [27], 构建了一种具有亚微米工作空间的六自由度空间柔顺单体系统模型，该模型具有与 Gough–Stewart原型平台相同的微分运动学特性。文献 [28]介绍了一种小行程非整体式六自由度微定位器，该定位器基于柔顺机构，整体尺寸为 241 × 241 × 67mm^3, ，由 8 个压电执行器驱动。由于压电执行器的数量多于工作轴数量，定位器的控制设计变得复杂。文献 [29], 研究了一种六自由度柔顺并联定位系统的设计及基于螺旋理论的雅可比分析，该系统具有较小的旋转运动和面外平移运动。文献 [30]介绍了一种六自由度柔顺压电驱动微定位系统的设计与测试，该系统由两个串联组装的三自由度柔顺定位器组成。所提出的定位系统具有较小的平移和旋转工作空间，分别为 8.2μm、10.5μm、13.0μm 以及 105μrad、 97μrad、 224μrad。文献 [31]介绍了一种由 8 个音圈电机（ VCMs）驱动的六自由度磁悬浮平台。该系统采用铝制上下两块板，整体尺寸为 450 × 450mm^2。由于悬浮特性，此类系统的带宽频率较低，动态特性也相应较差。

根据上述文献综述，六自由度微定位系统在设计和实验方面面临的难题，包括整体尺寸、过驱动、低分辨率、动态特性较差、工作范围小、测量策略以及控制技术，都是导致该领域缺乏深入实验研究的挑战。为解决这一需求，本文提出对一种紧凑型整体式大范围六自由度并联定位器进行深入的计算与实验研究，该定位器具有高分辨率、高谐振频率和高重复性。鉴于整体式结构在静态和动态方面已确立的优势，该设计采用3D打印技术一体成型。系统采用六个压电执行器产生精细运动，并使用六个高分辨率电容式位移传感器实现极低分辨率的测量。利用有限元分析软件 ANSYS 研究了六自由度定位器的静态和动态特性，结果显示其最低带宽频率为137.41Hz，工作范围较大，分别为403.7μm × 398.5μm× 390.94μm和8864.4μrad × 8297.8μrad × 15278.2μrad。在反馈控制策略下，对六自由度定位器开展了广泛的实验研究，以评估所提出系统特性的不同方面。根据实验结果，该六自由度定位器具有低分辨率、高精度、高带宽频率和极低迟滞等特性。根据研究结果，所提出的系统适用于取放操作、碳纳米管（CNT）采集、显微镜自动对焦、精密光束转向模块、显微外科手术中的震颤补偿、微型机械装配以及协作机械臂系统等应用。

II. 机械设计

图 1(a-c) 展示了六自由度定位器的等轴测图、俯视图和侧视图，以及其相对于 X、Y 和 Z 轴的空间尺寸，分别为 172.78 mm、160.20 mm 和 24.27 mm。

如图 1(a-c) 所示，该机构采用六个桥式机构和六个叶片平行四边形机构，并通过三条臂与平台连接。每条臂由两个万向节组成，一个位于臂的起始端（与叶片平行四边形机构连接），另一个位于末端（与平台连接）。各臂相对于水平面以相同角度（30°）布置。桥式机构用作输入压电执行器的放大器，而叶片平行四边形机构则允许沿单一方向产生平移位移。每个万向节有两个自由度，允许在两个相互垂直的平面上进行不同的旋转。万向节使臂能够在每个关节的中心点弯曲，避免臂承受扭转等不必要的运动。六个压电执行器可分别置于六个桥式机构的中间，并向机构施加必要的输入力，从而产生所需运动。

在所提出的定位器中，运动空间的维数为 $\lambda = 6$；连杆数量为 $n = 8$；关节数量为 $j = 9$。根据 Kutzbach-Gr¨ubler 判据，定位器的自由度计算如下：

$$M = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^{j} m_i = 6 \times (8 - 9 - 1) + (6 \times 2 + 3 \times 2) = 6 \tag{1}$$

III. 计算分析

使用仿真软件（ANSYS）研究了所提出定位器的性能。选用丙烯腈-丁二烯-苯乙烯作为制造材料，其机械和物理特性如表 1 所示。仿真过程中，在模型中布置了 175000 个四面体单元（Tet10）。此外，网格划分过程采用自适应方式进行，即在铰链等敏感区域使用较小的单元尺寸（更多单元）。测得单元的平均长宽比（AR）为 2.24。根据有限元法（FEM）指南， [32]这表明 AR 不应超过 3，以获得高质量网格和准确结果，并避免单元变形。

A. 模态分析

对定位器的动态特性进行了研究，以验证其高带宽特性和预期的

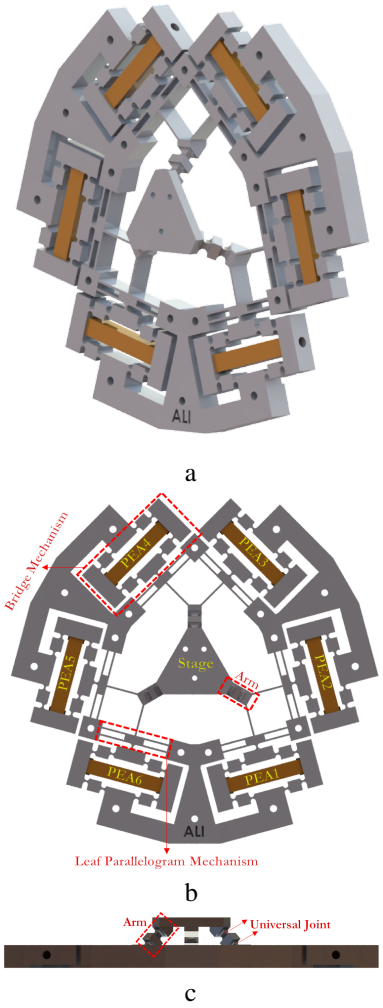

图1. 六自由度定位器的三维实体模型；(a) 等轴测视图 (b) 俯视图 (c) 侧视图

表I ABS材料的物理和机械性能

符号	数量	数值
ν	泊松比	0.35
ρ	密度	908.7(千克/米^3)
E	杨氏模量	2.2（GPa）
σ_{yield}	拉伸屈服强度	31(MPa)
σ_{ultimate}	拉伸极限强度	55(MPa)

运动。系统的前六阶固有频率及其对应的振型如图 2(a-f) 所示。可以看出，第一阶固有频率为 137.41Hz。所提出的聚合物制六自由度并联定位器具有整体式特性，因此带宽频率较高。由此结果可确认该系统的重复性和稳定性。

显然，在定位器的平台上增加质量，例如安装微夹爪或传感器，会导致系统的固有频率降低。因此，为了在平台上安装工具或末端执行器时仍能保持最佳性能，设计的系统必须具有较高的一阶固有频率

。图2所报告的结果是在定位器搭载100克装置的情况下获得的。移除该装置后，所提出的定位器具有较高的一阶固有频率，达到633.25 Hz。

B. 运动学与工作空间分析

雅可比矩阵描述了所提出的六自由度定位器的输入与输出之间的关系。该关系由式（2）表示，

$$\mathbf{O}_{6\times1} = \mathbf{J}_{6\times6}\mathbf{I}_{6\times1} \tag{2}$$

其中 $\mathbf{O}$ 和$\mathbf{I}$ 分别为定位器输出位移和输入位移的矩阵。输入位移由六个压电执行器产生，输出位移则是通过高分辨率位移传感器测得的平台沿六个轴向的运动。

通过评估平台在覆盖整个输入范围的100组输入下的运动，并对所得输出进行回归，计算了定位器的运动学。最佳运动学拟合结果如下:

$$\mathbf{J_{FEA}} = \begin{pmatrix} -0.65214 & -0.926 & -0.26136 & 0.26204 & 0.91721 & 0.65117 \\ 0.68583 & 0.22332 & -0.90423 & -0.89984 & 0.21785 & 0.69157 \\ 0.59421 & 0.59531 & 0.59273 & 0.58933 & 0.58998 & 0.59237 \\ 6.8766 & -19.846 & 13.804 & 13.74 & -19.594 & 6.7252 \\ -18.912 & -3.8375 & 14.909 & -14.936 & 3.9577 & 18.883 \\ 23.248 & -23.313 & 23.035 & -23.009 & 23.089 & -23.199 \end{pmatrix}_{6\times6} \tag{3}$$

由式3可知，所提出的六自由度并联定位器的运动存在耦合，因为雅可比矩阵并非对角矩阵。利用该雅可比矩阵，将计算定位器沿三个平移轴和三个旋转轴的运动范围。系统的工作空间取决于定位器在发生永久变形之前所能承受的最大输入位移。因此，必须进行安全系数分析以获得这一结果。图3显示了系统的最小安全系数。该结果是在对定位器施加六个相等的输入位移后得出的。由图3可知，最小安全系数为1.5，对应的输入位移为110µm，此时应力集中处的冯·米塞斯应力为20.688MPa。该应力集中发生在定位器的一个万向节处（见图3），这符合我们的预期，因为万向节是系统所设计结构中最脆弱的部分。

定位器的平移和旋转工作空间可利用雅可比矩阵以及安全系数分析所得的信息进行计算。因此，根据公式 2 对定位器的输入和输出进行映射后，得到的运动范围为 403.7μm $\times$ 398.5μm $\times$ 390.94μm（平移）和 8864.4μrad $\times$ 8297.8μrad $\times$ 15278.2μrad（旋转）。图 4(a) 和图 4(b) 展示了工作空间所覆盖的三维／二维空间。在三维空间中，定位器末端执行器的平移和旋转运动所占据的体积分别约为 2.0339e+07μm^3 和 3.7015e+11μrad^3,。根据这些结果，定位器沿 X、Y 和 Z 方向的放大比分别为 3.67、3.62 和 3.55。

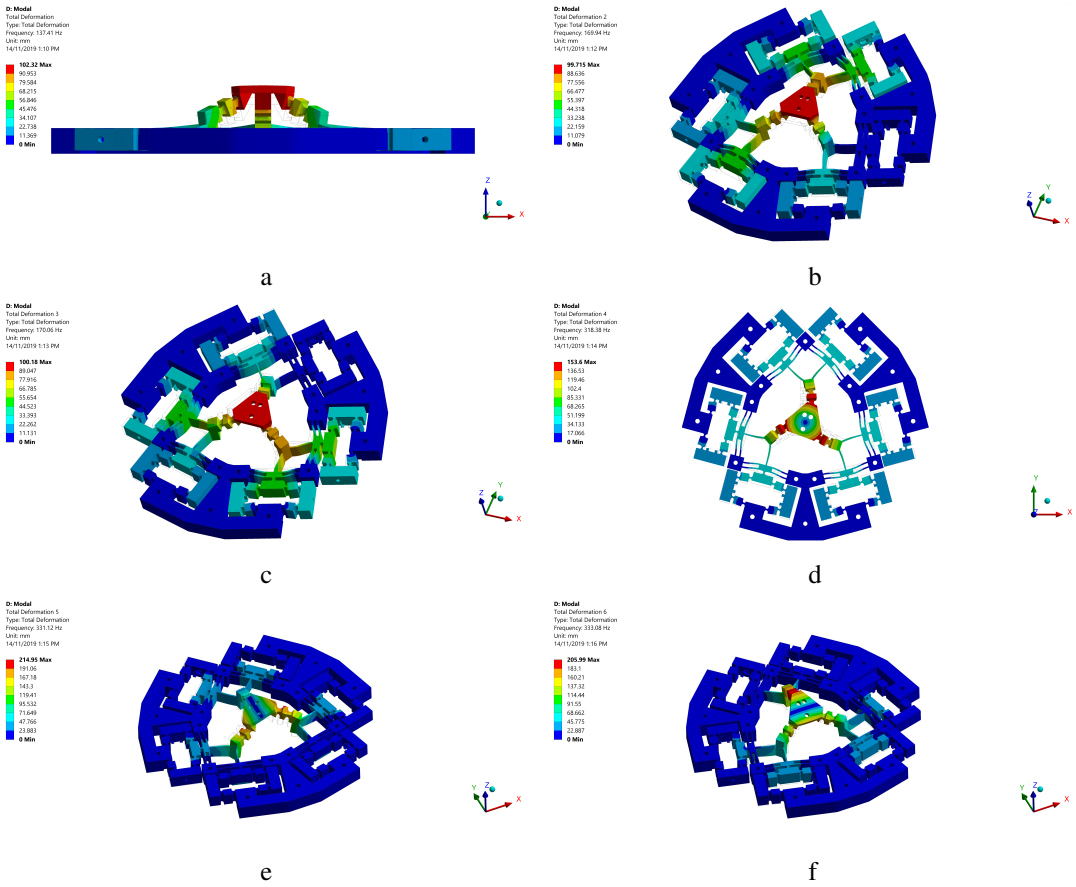

图2. 加载100克装置时六自由度并联定位器的振型；(a) Z向平移（第1阶）(b) Y向平移（第2阶）(c) X向平移（第3阶）(d) θ_z-旋转（第4阶）(e) θ_y-旋转（第5阶）(f) θ_x-旋转（第6阶）

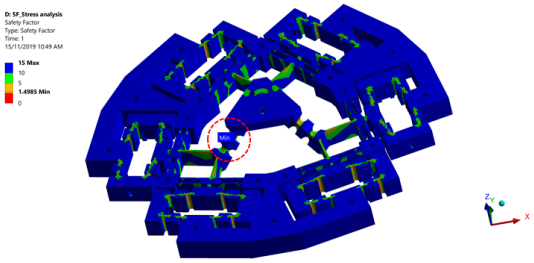

图3. 所提出定位器的安全系数分析

C. 输入刚度与输出柔度

为计算输入刚度，在桥式机构的输入段施加一定的力 Fin。随后从有限元分析中提取相应的输入位移，以获得输入刚度。此外，对平台施加一定的力 Fout 和力矩 Mout，并通过提取平台的位移和旋转来评估输出柔度。根据仿真结果，输入刚度为 3.0378×10^6N/m，线性和角输出柔度（m/N 和 rad/N.m）（公式 4、 C_{ij}=C_{ji} 和 C_{ii} >0）分别为 8.1702e-06、8.1760e-06、10.1760e-06 和 3.0963e-02、3.0831e-02、1.8005e-02。因此，为达到六自由度定位器的全运动范围，实际上需要六个压电执行器，各自能够产生 110μm 的输入位移和 334.2N 的力。此外，输入之间的线性关系力和输入位移，如图5所示，表明所提出的定位器中不会发生应力刚化。

$$\mathbf{C}=\begin{pmatrix} 8.1702e-06 & 2.9018e-09 & -8.1048e-09 & 2.2626e-07 & 1.5341e-04 & 6.7613e-07 \\ 2.9006e-09 & 8.1760e-06 & 2.1384e-08 & -1.5340e-04 & 1.5135e-07 & -5.8689e-07 \\ -8.1046e-09 & 2.1240e-08 & 1.0176e-05 & -1.2287e-06 & 2.4710e-07 & -2.7619e-07 \\ 2.2628e-07 & -1.5340e-04 & -1.2577e-06 & 3.0963e-02 & -2.6427e-07 & 9.1629e-06 \\ 1.5341e-04 & 1.5135e-07 & 2.4704e-07 & -2.6427e-07 & 3.0831e-02 & 3.1156e-05 \\ 6.9291e-07 & -5.8687e-07 & -2.7620e-07 & 9.1629e-06 & 3.1156e-05 & 1.8005e-02 \end{pmatrix}_{6\times6} \quad (4)$$

IV. 实验验证

本节通过一系列实验测试评估了所提出定位器的行为和特性，并展示了测试结果。系统开发的原型和实验装置如图6所示。定位器的基本工作原理是通过电压控制单元 THORLABS MDT693A 改变施加到 THORLABS 六个压电执行器（型号 PK4FYC2）上的驱动电压，从而驱动定位器。安装压电执行器时，施加预压缩力，以确保执行器尖端与机构保持接触。这些压电执行器在0 V至150 V的工作电压范围内可产生38.5 μm的位移。通过六个 Physik Instrumente 电容式传感器（三个 D-050 和三个 D-100）测量移动平台的位置。电容式传感器具有圆形有效区域，半径分别为4.64 mm和6.00 mm，周围环绕着环形保护环；其规定的工作范围分别为 50μm和100μm。电容式传感器的电子接口（Physik Instrumente E-509.C3A）将距离

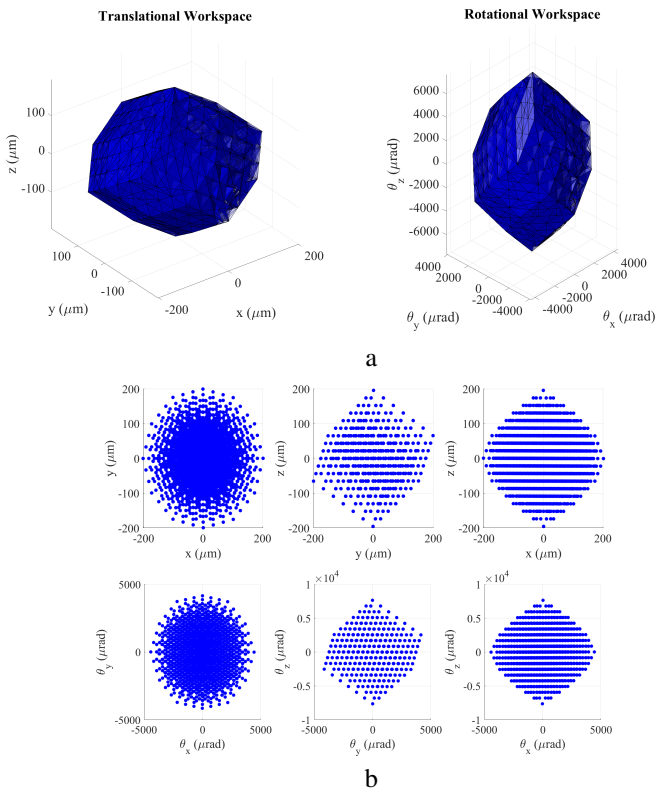

图4. 六自由度定位器工作空间；（a）三维视图，（b）三维工作空间在不同工作平面上的投影

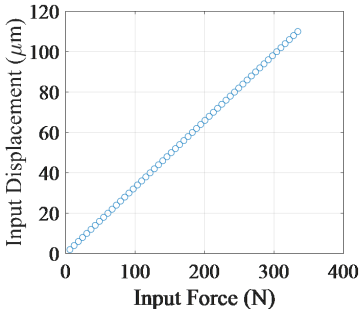

图5. 定位器输入力与输入位移之间的关系

测量结果转换为模拟电压，并通过16位模数转换器（ADC）记录到控制计算机中。为校准位置电容传感器，确保测量读数准确、精确，使用了三个 Elliot Scientific MDE263 XYZ微型定位器和三个 THORLABS MS1单轴平移台。为减小外部振动干扰，所有实验测试均在Newport气动隔振光学平台上进行。

为了提升定位器的跟踪性能和可控性，采用了反馈控制器。因此，使用比例-积分-微分（PID）控制器（式5）为输入信号建立反馈，以实现精确、可控的定位任务。调试后，确定最佳PID参数分别为： k_p（比例常数）、 k_i （积分常数）和 k_d （微分常数），其数值依次为0.1、300和0。

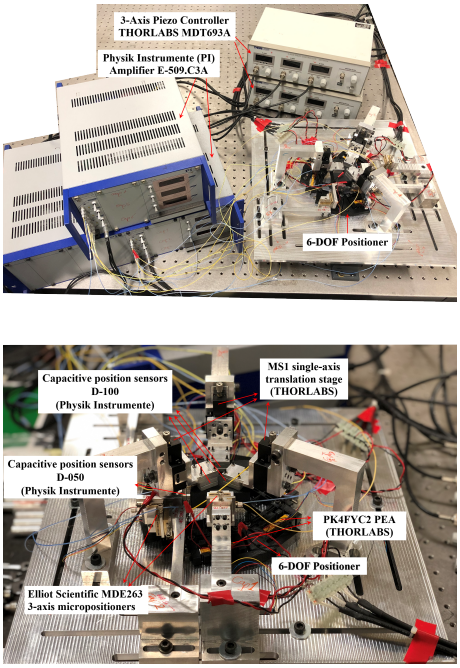

图6. 系统的实验装置（六自由度定位器及设备）

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau)d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \tag{5}$$

其中， u 是压电放大器模块的控制输入。图7展示了实时实验中采用的反馈控制策略示意图。

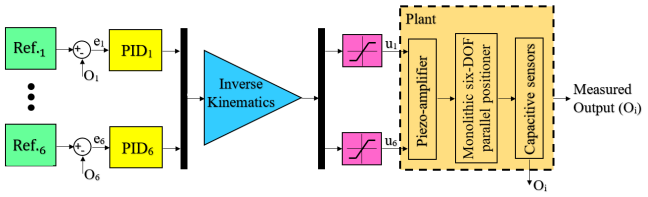

图7. 反馈PID控制策略示意图

A. 系统的分辨率表征

通过利用周期为 $2s$的阶梯信号，对定位器的最小分辨率进行了测试。如图8所示，分别确定了各工作轴的最小分辨率，结果发现：X轴方向为10.5nm，Y轴方向为10.5nm，Z轴方向为15nm， θ_x轴方向为1.8μrad， θ_y轴方向为1.3μrad，以及 θ_z轴方向为0.5μrad。值得一提的是，定位器的分辨率受到散射辐射、几何效应和测量电子噪声的影响。因此，未来仍可进一步提高最小分辨率。

B. 运动跟踪与迟滞减小

为验证所开发的六自由度定位器的动态运动跟踪能力，设计了一系列一维、二维和三维复杂轨迹，并对系统进行编程，使其沿这些轨迹运动。所得结果

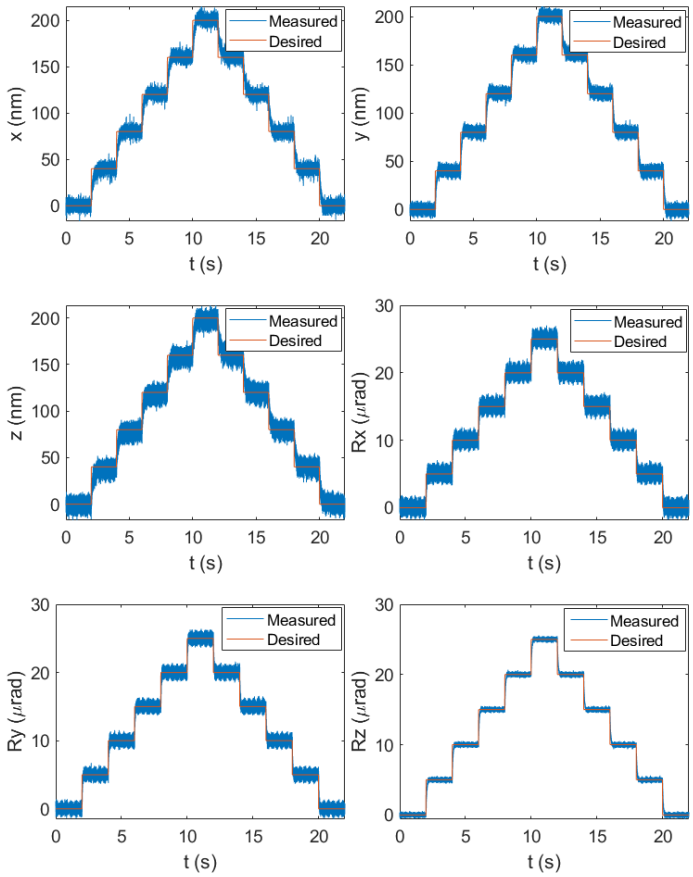

图8. 系统对施加的阶梯输入的响应

如图 9–11 所示。

在图9(a,b)和图9(c,d)中，定位路径分别为两个圆形轨迹和两个玫瑰线轨迹。设计每条圆形或玫瑰线轨迹时，均使定位器能够沿指定工作轴执行定位任务。相应的轨迹跟踪误差也显示在图9中。

在另一项实验测试中，研究了定位器的操作范围对跟踪误差的影响。因此，向系统输入了两组信号，每组包含六个信号，频率恒定为 0.5 Hz，振幅各不相同（一组振幅是另一组的两倍）。根据图10所示的采集结果可以看出，所有工作轴上的操作范围加倍会导致操作精度误差随之增大。此外，对于某些特定应用，需要以不同频率扫描轨迹。因此，操作频率的影响变得十分重要，也为了解操作准确率对这一参数的依赖关系提供了有用且有趣的信息。图11展示了相似输入信号的轨迹跟踪实验结果，这些信号具有相同的振幅和相位等特征，但频率分别为 0.1 Hz、0.5 Hz 和 1 Hz。正如预期，结果表明扫描频率会影响操作任务的准确率，而提高操作速度会导致跟踪误差增大。因此，始终需要在两者之间进行权衡。

压电陶瓷驱动器固有的滞后效应是一种不良现象，会影响精密定位系统的性能。为研究所实施的反馈控制方案在迟滞减小方面的能力，生成了一系列正弦输入并将其施加到所提出的压电驱动定位器上。结果如图12所示。根据所得结果可以观察到，系统在各平移方向和旋转方向上的输入与输出之间呈线性关系，这验证了迟滞现象已显著减小。

C. 频率响应实验

为研究所提出的六自由度定位器的动态特性，进行了频率分析测试。图13显示了前六次频率模态测试的实验结果。为获取这些结果，向压电执行器施加了一系列频率线性递增的正弦扫频信号，作为系统输入。该实验的数据是在10kHz的控制频率下采集的。与计算结果相比，实验结果对共振模态作出了较为合理的预测。由于负载质量的影响，固有共振频率高于计算值。此外，在制造过程中采用刚度更高的材料，可使定位器具有更高的带宽频率，从而适用于高速实时应用。

V. 讨论

本文提出了一种柔顺式并联整体式大行程六自由度精密定位系统。该系统采用3D打印技术制造为单一、连续的整体式结构。通过对定位器性能进行大量计算和实验评估，深入了解了其能力与特性。由于定位器具有大行程、高分辨率和紧凑性，因此可加以改造，用于多种应用，包括取放操作、显微外科手术和微组装中的震颤补偿，以及协作机械臂系统。为提高所提出定位器执行定位任务时的准确率，可建立一种鲁棒自适应 [33]基于扰动观测器的控制器 [34]–[36]。此外，还可进行不确定性分析，以提高旋转测量的准确率。

参考文献

[1] McClintock, H., Temel, F. Z., Doshi, N., Koh, J.-S. & Wood, R. J. milliDelta机器人：一种高带宽、高精度、毫米级Delta机器人。《科学机器人》3, eaar3018 (2018). [2] Yang, S., Maclachlan, R. A. & Riviere, C. N. 六自由度手持式抗震显微外科器械的机械臂设计与操作。IEEE/ASME《机电一体化汇刊》20, 761 772 2015– ( ). [3] Zhang, D., Li, P., Zhang, J., Chen, H., Guo, K. & Ni, M. 六自由度微纳定位系统的设计与评估。IEEE/ASME《机电一体化汇刊》4435, 1–11 (2019). [4] Wang, F., Liang, C., Tian, Y., Zhao, X. & Zhang, D. 采用三级柔性铰链放大的压电驱动微夹持器设计。IEEE/ASME《机电一体化汇刊》20, 2205–2213 (2015).

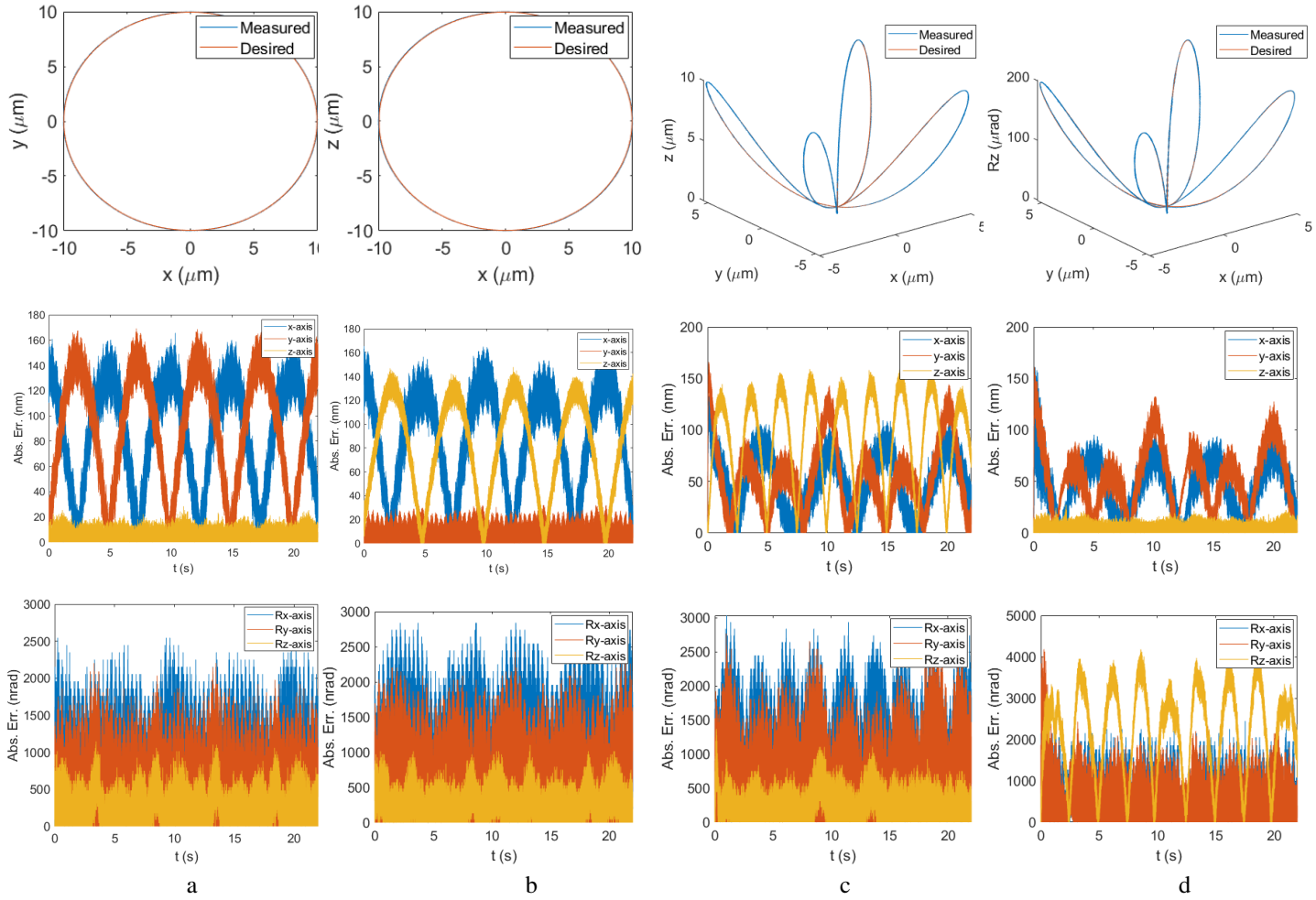

图9. 轨迹跟踪及其对应的平移和旋转跟踪误差；(a) XY圆形轨迹 (b) XZ圆形轨迹 (c) XYZ玫瑰线轨迹 (d) XYθ_z 玫瑰线轨迹

[5] Li, Y. & Xu, Q. 用于微纳操作的新型并联运动学XY压电平台的设计与鲁棒重复控制。IEEE/ASME《机电一体化汇刊》17, 1120–1132 (2012).[6] Ghafarian, M., Shirinzadeh, B., Al-Jodah, A., Das, T. K., Wei, W., Tian, Y. & Zhang, D. 新型并联整体式三自由度柔顺微操作器的设计。2019年国际微型机器人操作与自动化会议论文集 1–6 (2019).[7] Ghafarian, M., Shirinzadeh, B., Al-Jodah, A., Das, T. K., Wei, W. & Shen, T. 具有纳米级精度的整体式3-PUU并联微操作器建模与原型实验。《智能材料与结构》29, (2020).[8] Ghafarian, M., Shirinzadeh, B., Al-Jodah, A., Das, T. K., Wei, W., Tian, Y. & Zhang, D. 用于精密定位应用的XYZ微操作器。《微生物机器人学杂志》16, 53–63 (2020).[9] Ghafarian, M., Shirinzadeh, B., Al-Jodah, A., Das, T. K. & Pinskier, J. 整体式z轴/俯仰/倾斜微操作器完整结构的基于有限元分析的优化。《微生物机器人学杂志》16, 93–110 (2020).[10] Jensen, K. A., Lusk, C. P. & Howell, L. L. 一种具有三个平移自由度的XYZ微操作器。Robotica 24, 305–314 (2006).[11] Kenton, B. J. & Leang, K. K. 三轴串联运动学高带宽纳米定位器的设计与控制。IEEE/ASME《机电一体化汇刊》17, 356–369 (2012).[12] Ghafarian, M., Shirinzadeh, B., Al-Jodah, A. & Das, T. K. 用于多自由度微纳操作器高精度运动跟踪的自适应模糊滑模控制。IEEE机器人与自动化快报 5, 1–8 (2020).[13] Zi, B., Sun, H. & Zhang, D. 缠绕式混合驱动绳索并联操作器的设计、分析与控制。《机器人与计算机集成制造》48, 196–208 (2017).[14] Gao, Z. & Zhang, D. 性能分析、映射与多目标优化混合机器人机床的目标优化。IEEE工业电子学汇刊 62, 423–433 (2015).[15] Xu, Q. 设计并开发一种紧凑型柔性铰链式XY精密定位系统，行程达厘米级。IEEE工业电子学汇刊 61, 893–903 (2014).[16] Al-Jodah, A., Shirinzadeh, B., Ghafarian, M., Das, T. K., Tian, Y. & Zhang, D. 一种新型单自由度微定位机构的模糊扰动观测器控制方法。机电一体化 65, (2020).[17] Al-Jodah, A., Shirinzadeh, B., Ghafarian, M., Das, T. K., Tian, Y., Zhang, D. & Wang, F. 大行程XYθ 微定位平台的开发与控制。机电一体化 66, 102343 (2020).[18] Chang, H., Zhao, H., Ye, F., Yuan, G., Xie, J., Kraft, M. & Yuan, W. 一种大位移范围的旋转梳齿驱动微夹持器。微系统技术 20, 119–126 (2014).[19] Chen, S. C. & Culpepper, M. L. 六轴微型纳米定位器HexFlex的设计。精密工程 30, 314–324 (2006).μAkbari, S. & Pirbodaghi, T. 使用一种新型六轴柔顺纳米操纵器实现精密定位。微系统技术 23, 2499–2507 (2017).[20] Sreekumar, M., Nagarajan, T. & Singaperumal, M. 形状记忆合金驱动柔顺智能结构的设计：弹性线方法。ASME机械设计汇刊 131, 0610081–06100811 (2009).[21] Liaw, H. C. & Shirinzadeh, B. 用于微纳操纵的压电驱动柔性铰链机构神经网络运动跟踪控制。IEEE/ASME《机电一体化汇刊》14, 517–527 (2009).[22]Tang, H. & Li, Y. 具有双模式的柔顺式微纳定位压电平台的开发与主动扰动抑制控制。IEEE工业电子学汇刊 61, 1475–1492 (2014).[23] Ghafarian, M., Shirinzadeh, B., Das, T. K., Al-Jodah, A. & Wei, W. 一种新型并联整体式六自由度柔顺微操纵器的设计-

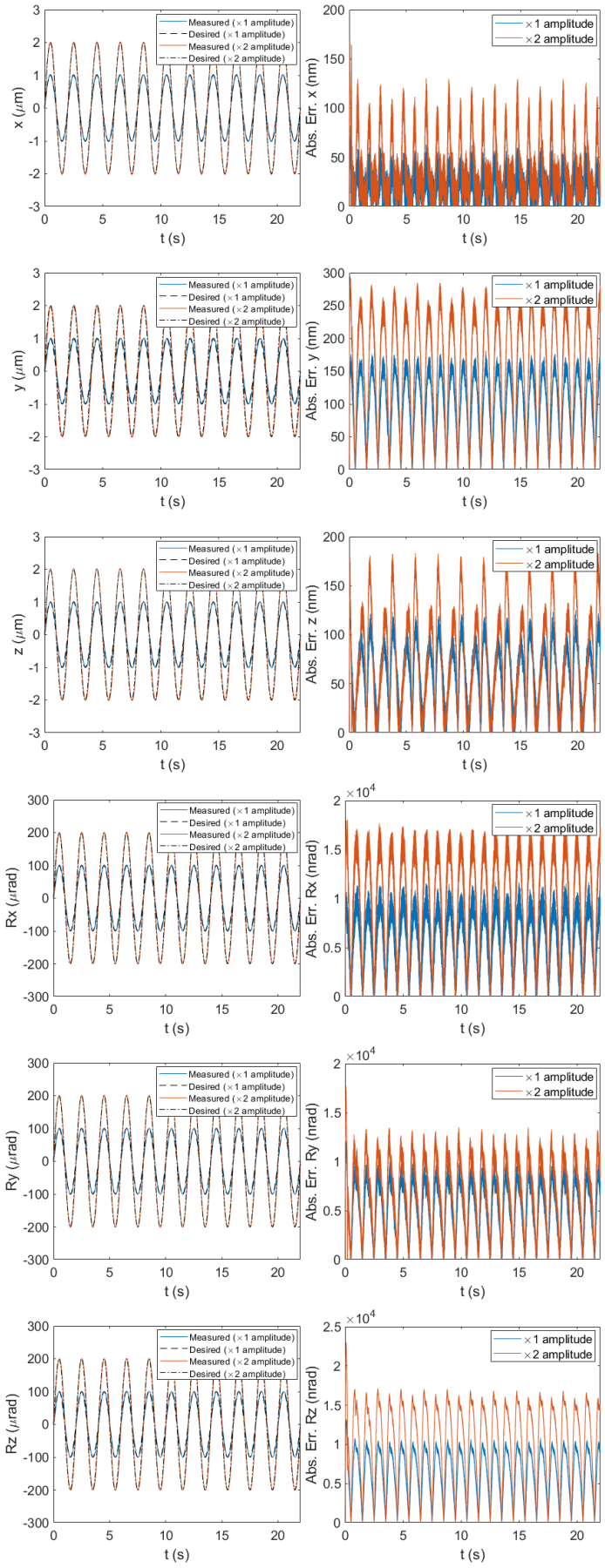

图10. 操作范围对操作任务准确率的影响

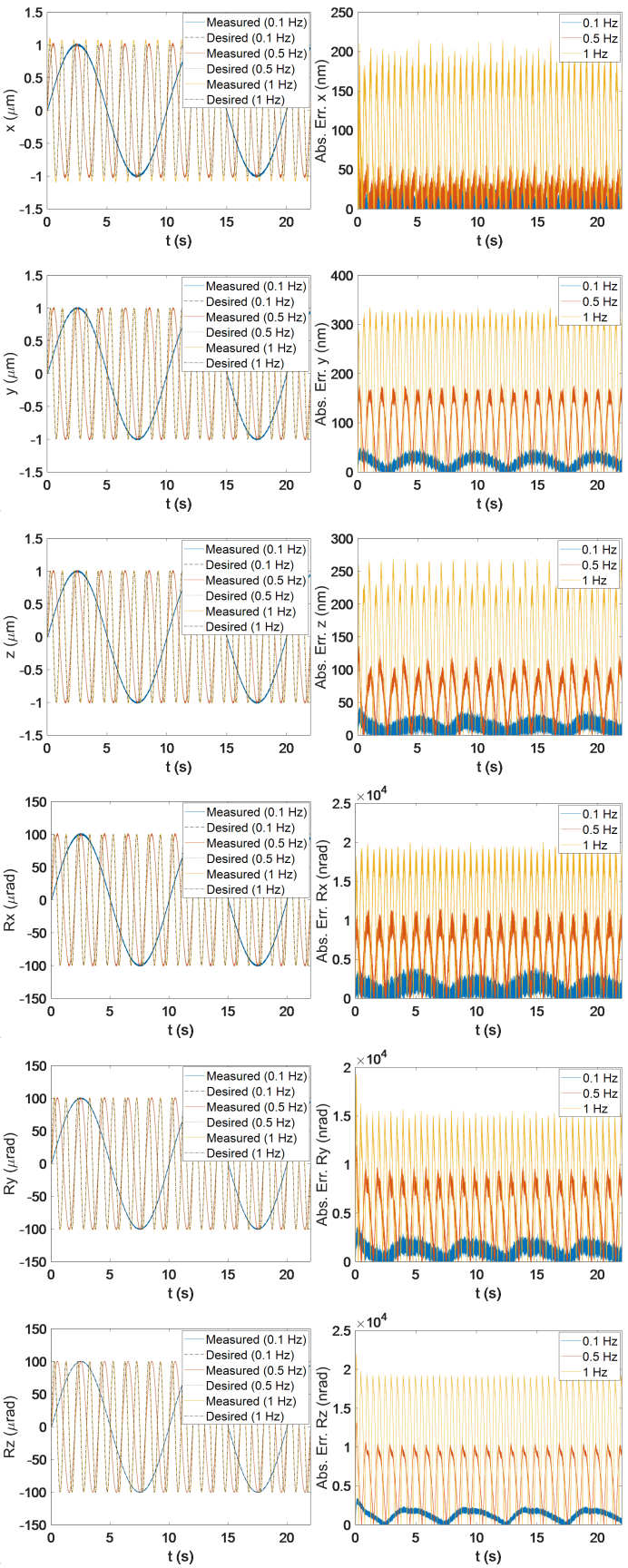

图11. 操作频率对操作任务准确率的影响

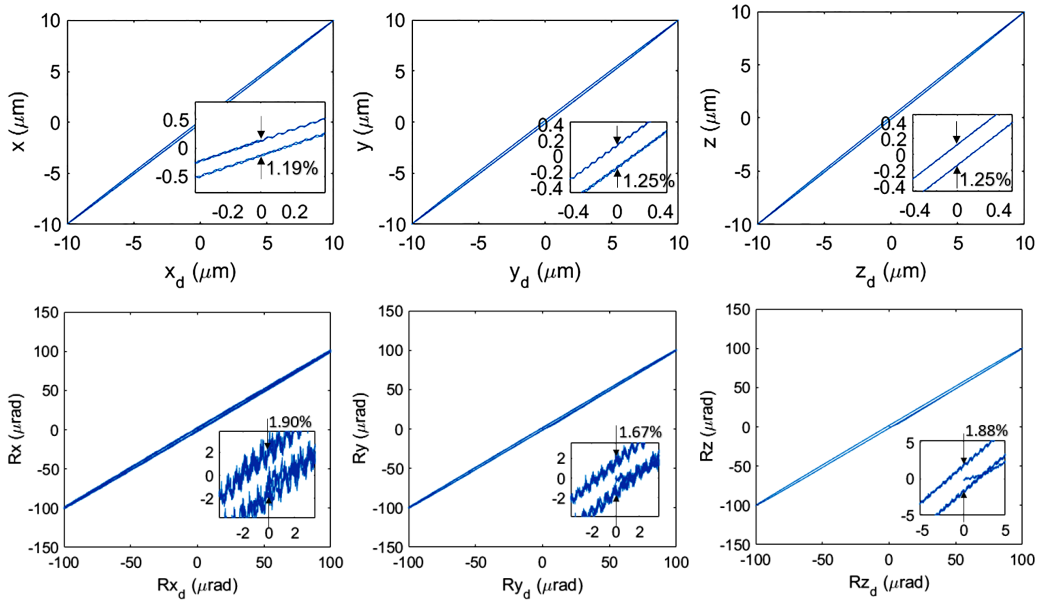

图12. 六自由度压电驱动定位器的实际参考迟滞补偿回线

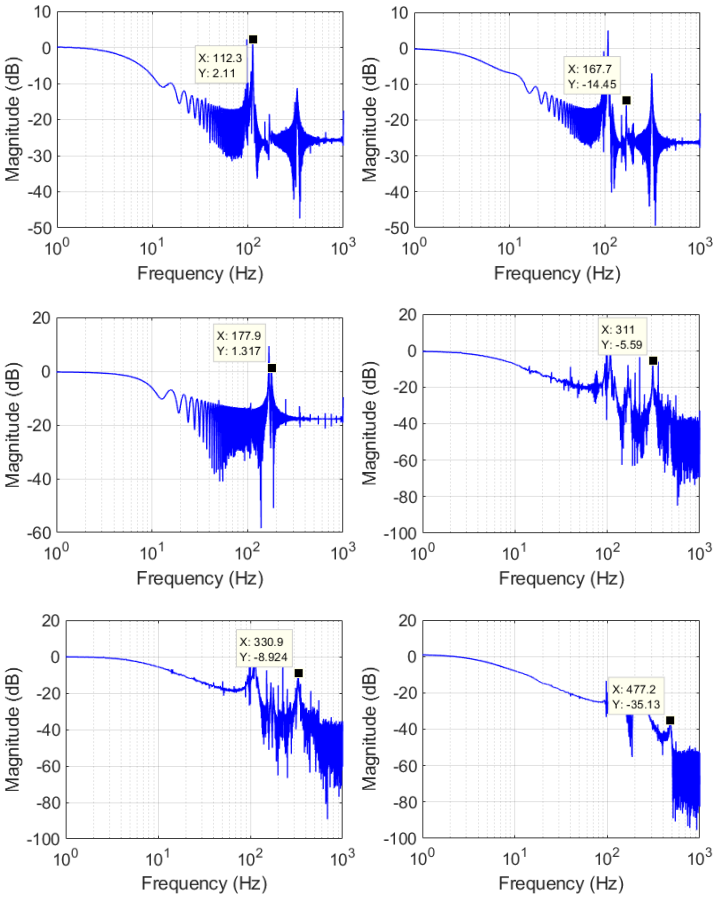

图13. 六自由度定位器的频率分析结果

tion 机构。在 IEEE/ASME智能机电国际会议（AIM 2018-July）上，（2018）。[25] Hu, K., Kim, J. H., Schmiedeler, J. & Menq, C. H. 六轴柔顺平台的设计、实现与控制。Rev. Sci. Instrum. 79, (2008).[26] Yun, Y. & Li, Y. 用于高精度定位的新型六自由度冗余驱动并联机器人（带柔顺铰链）的设计与分析。Nonlinear Dyn. 61, 829–845 (2010).

[27] Zhu, D. & Zhan, W. 基于 Stewart 原型平台的六自由度空间柔顺机构拓扑优化。Acta Mech. Sin. Xuebao 35, 1044–1059 (2019). [28] Lin, C., Zheng, S., Li, P., Shen, Z. & Wang, S. 压电驱动六自由度微定位器的定位误差分析与控制。Micromachines 10, (2019). [29] Liang, Q., Zhang, D., Chi, Z., Song, Q., Ge, Y. & Ge, Y. 基于柔顺并联机构、集成力传感器的六自由度微型机械手。Robot. Comput. Integr. Manuf. 27, 124–134 (2011). [30] Cai, K., Tian, Y., Wang, F., Zhang, D., Liu, X. & Shirinzadeh, B. 六自由度精密定位系统的设计与控制。Robot. Comput. Integr. Manuf. 44, 77–96 (2017). [31] Kim, M., Jeong, J. H., Kim, H. & Gweon, D. 用于高精度高加速度双伺服平台的六自由度磁悬浮精密平台。Smart Mater. Struct. 24, 105022 (2015). [32] Okereke, M. & Keates, S. 有限元应用：有限元法流程实用指南。施普林格国际出版社 (2018). doi:10.1016/b978-0-12-521650-0.50021-8.[33] Kebria, P. M., Khosravi, A., Nahavandi, S., Wu, D. & Bello, F. 针对存在时延和不确定性的遥操作系统的自适应二型模糊神经网络控制。IEEE模糊系统汇刊, 28(10), 2543- 2554 (2019). [34] Ghafarian, M., Shirinzadeh, B., Al-Jodah, A., Das, T.K. & Shen, T. 整体式 $Z\theta_x\theta_y$ 精密定位系统。arXiv 预印本arXiv:2301.05358 (2023)。[35] Al-Jodah, A., Shirinzadeh, B., Pinskier, J., Ghafarian, M., Das, T.K., Tian, Y. & Zhang, D. 用于微定位轨迹跟踪任务的蚁狮优化鲁棒控制方法。IEEE Access 8 (2020): 220889-220907.[36] Al-Jodah, A., Shirinzadeh, B., Ghafarian, M., Das, T. K., Pinskier, J., Tian, Y. & Zhang, D. 低寄生运动大行程三自由度微定位器的建模与交叉耦合补偿控制方法。机构与机器理论, 162, 104334 (2021).



Mohammadali Ghafarian （电气与电子工程师学会会员）曾是机器人与机电一体化研究实验室（RMRL）的成员，并于2021年获得莫纳什大学机器人与机电一体化领域的博士学位。他是电气与电子工程师学会（IEEE）会员，也是澳大利亚工程师学会（MIEAust）会员。目前，他正在迪肯大学智能系统研究与创新研究所（IISRI）开展下一代车辆运动模拟器的研制工作。

大利亚。他目前的研究兴趣包括机器人系统、鲁棒/自适应控制系统设计、实时系统、传感器融合和有限元建模。



Bijan Shirinzadeh 获得了密歇根大学安娜堡分校机械工程学士学位、航空航天工程学士学位和机械工程硕士学位，以及西澳大利亚大学（UWA）的机械工程博士学位。他现任正教授，并担任机器人与机电一体化研究实验室（RMRL）主任。目前的研究兴趣包括基于激光的测量与基于传感的控制、微纳操作

机构与系统、串联与并联机构、自动化制造以及机器人手术。



Ammar Al-Jodah 获得了伊拉克技术大学控制与系统工程学士学位，以及美国南伊利诺伊大学卡本代尔分校电气与计算机工程硕士学位。他在澳大利亚莫纳什大学机器人与机电一体化研究实验室（RMRL）完成了博士学位。他的研究兴趣包括大行程微/纳操纵机构、基于激光干涉测量的测量系统、鲁棒控制器设计和实时控制器。