



Research
Additive Manufacturing—Article

面向精密增材制造的大范围柔性伺服系统

Zhen Zhang^{a,b,c}, Peng Yan^{d,*}, Guangbo Hao^{e,*}

^a State Key Laboratory of Tribology & Institute of Manufacturing Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

^b Beijing Key Laboratory of Precision/Ultra-Precision Manufacturing Equipment and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China

^c Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

^d Key Laboratory of High-Efficiency and Clean Mechanical Manufacturing, Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China

^e Department of Electrical and Electronic Engineering, University College Cork, Cork, Ireland

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 September 2017

Revised 24 September 2017

Accepted 25 September 2017

Available online 25 October 2017

关键词

精密增材制造

微立体光固化

纳米定位

分布柔度簧片

摘要

本文主要介绍可用于微立体光固化 (MSL) 工艺的基于分布柔度簧片的大范围柔性纳米伺服系统的设计、开发和控制。作为这一高精度工艺的使能技术, 本文设计了一种兼具毫米级运动行程和纳米级运动精度的紧凑型台式柔性纳米运动系统。由于在运行中无需装配和维护, 这种柔性运动系统非常适合苛刻的操作条件。从机械设计的角度来看, 镜像对称布局和适当的冗余约束对于抑制寄生运动至关重要。本文对此系统进行了详细的有限元分析 (FEA), 分析结果表面系统具有满意的机械特征。通过纳米运动系统的动力学模型辨识, 本文设计了实时控制策略, 并将其应用在一体加工的原型系统中。实验验证了面向 MSL 工艺过程的轨迹跟踪性能。所提出的纳米伺服运动系统具有毫米级的工作范围, 圆轨迹跟踪误差约为 80 nm (均方根值)。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

微增材制造 (micro-AM) 是提高三维 (3D) 微制品性能的有效方法。可拓展缩放的增材制造是一种主要的微增材制造工艺, 主要包括立体光固化 (SL)、选区激光烧结 (SLS) 和喷墨打印, 这些技术可在宏观和微观层面上使用, 以便高效地制备复杂的 3D 零件。

作为最流行的可拓展缩放的增材制造技术之一, 立体光固化成形通过高分辨率的光固化来固化液态聚合物。微立体光固化成形 (microscopic stereolithography, MSL) [1–3] 是微观尺度上的立体光固化成形, 已被广泛应用于诸如微传感器 [4]、光波导 [5]、三维光子能带隙

结构 [6] 和生物分析 [7] 等领域。在 MSL 过程中, 首先通过固化液态光聚合物形成微型二维 (2D) 图样, 再通过聚集 2D 图样获取 3D 结构。MSL 系统主要由液态树脂容器和精密多轴运动平台组成, 在该系统中, 二维图样需要与聚焦激光束精确定位, 以精确实现树脂的光固化。

微立体光固化成形产品的精度由激光束产生的固化区域和运动系统的运动精度决定。换言之, 运动系统必须具有足够重复运动精度, 以保证在每次光固化过程中的精确定位。在现有文献中, 大量的研究工作致力于不断减小激光光斑尺寸, 如参考文献 [8–10] 及其中的参考

* Corresponding author.

E-mail addresses: pengyan2007@gmail.com; g.hao@ucc.ie

文献,而对运动平台精度方面的研究相对较少。可能是因为相对于传统的激光光斑尺寸(10 μm 以上),对运动系统精度的要求并不十分苛刻。注意到,近期的研究结果表明,激光光斑尺寸已减小至1 μm 及以下[10],在此情况下其相应运动系统的精度应比光斑尺寸小一个数量级,即<100 nm。这就意味着需要纳米级精密的运动平台来实现相应的运动。为达到纳米级的运动精度,运动系统的支承的尤为重要。当前,大多数的多轴运动平台都采用基于接触式的支承,如线性导轨等,相应的运动精度限制在亚微米级。同时,这种接触式支承需要复杂的装配及润滑等维护。

为实现一种可支持MSL技术的纳米运动系统,本文研究了基于分布柔度簧片的柔性运动系统。在运动平台中,为了克服接触支承的缺点,将采用无摩擦的柔性单元的运动系统设计。柔性单元通过构件本身的弹性形变产生运动,在运行过程中可避免诸如摩擦、间隙和磨损等的非确定性因素,并可在紧凑的桌面尺寸下实现纳米级的运动精度。此外,由于免维护的特点,基于分布柔度簧片的纳米运动系统非常适合恶劣的操作环境。通过多个柔性单元的组合,可实现所需的柔性机构,以在紧凑的桌面尺寸下提供毫米(甚至厘米)级的运动行程[11,12]。尽管柔性单元具有上述优点,但是在柔性纳米运动系统的设计和控制中仍然存在诸多挑战。在现有的面向毫米级XY微定位平台(如参考文献[12,13])的研究中,系统的实际运动精度并不完全令人满意,特别是很少有可同时实现宏观行程(毫米以上)和纳米级跟踪精度(<100 nm)的实验报道。作为本研究的目标之一,本文希望通过精密机械设计和实时控制策略的一体化,实现面向MSL技术的纳米级跟踪精度的大范围柔性纳米运动系统。

本文的其余部分安排如下:在第2节中,讨论了大范围柔性纳米运动平台的设计,并进行了详细的有限元分析(FEA)和验证。在第3节中,提出了一种用于纳米运动系统的轨迹跟踪的实时控制策略,第4节,在原型系统中进行多组实验,以展示该纳米伺服系统的预期性能。

2. 面向微立体光固化成形的基于分布柔度簧片的纳米运动台

图1是基于柔性运动平台的MSL系统的示意图。该系统的主要组成部分及特点简要介绍如下。光源和相关光学系统负责产生诱导光固化的激光束(光斑尺寸

<1 μm)。为了减小体积,可选用蓝光光学头(OPU)作为光源[14],多轴运动系统主要由两个运动平台组成。其一是XY纳米运动台,是将激光束精确定位在XY平面中的关键,以使得3D微型部件的XY横截面可被固化。当激光光斑尺寸降至1 μm 或更小时,需要XY运动平台具有纳米级的运动精度。在紧凑的桌面级尺寸上开发这种纳米运动系统是具有挑战性的,这也是本研究的主要关注点。另一运动平台是负责Z轴的运动,将实现3D组件切片的一层厚度所需的垂直运动。由于Z轴运动的精度为微米级,目前商用的解决方案已广泛存在,故本文不再做赘述。

考虑到前文所述的运动要求,本文提出了一种面向微立体光固化成形的紧凑型柔性纳米运动台。具体而言,XY纳米运动台沿X轴和Y轴各具有3 mm的运动范围,以实现此范围内的激光束定位。通常采用诸如音圈致动器(VCA)的电磁致动器来提供驱动力。

相比于传统的较为笨重的串联结构(一轴叠加于另一轴之上),本研究采用柔性并联机构,其中每轴致动器都接地。该种设计,由于减少了移动的致动器和移动电缆的干扰,运动系统可以实现更高的带宽和更高的精度。此外,为了实现XY柔性机构的毫米运动范围和纳米级运动精度,对寄生误差运动(即单轴的实际运动与该轴推力所产生的运动不同)的抑制十分必要。特别是随着行程的增大,包括寄生平移运动和旋转运动在内的运动平台的面内寄生误差运动也随之增大,而这两者对纳米运动精度都有显著的不利影响。为了减少寄生运动,平台机构采用镜像对称布局,并通常需要引入适当的平面冗余约束以抑制各种干扰。

图2是平台的概念设计方案,其中Z形和II形分布柔度的簧片和平行四杆模块提供所需的导向和运动学解耦,并采用了四梁柔性单元作为冗余约束以提高平台的抗干扰能力。该设计(将在后面阐述)的重要特征如下:镜像对称的布局明显有利于减少寄生运动,Z形分布柔度簧片的横向刚度在所需的工作范围内具有良好的线性

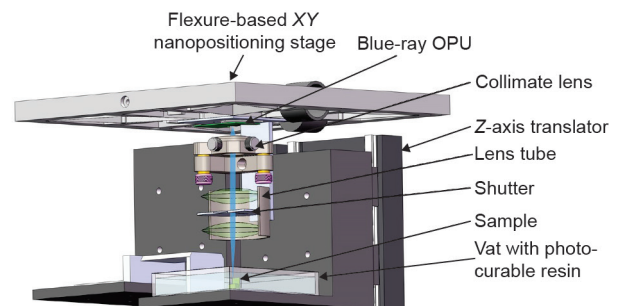


图1. 基于柔性运动平台的MSL系统的原理图设计。

度，有利于实现较大的运动范围。同时，平面冗余约束提供了足够高的刚度，可显著降低寄生误差运动。

注意，Z形分布柔度簧片模块是综合理想和非常非理想性能的折中设计。理想性能是，Z形柔性单元具有较大的运动范围，具有恒定的初始刚度和非常紧凑的结构。而非理想的特性在于因其不是严格的单自由度柔性移动副，所以作为致动器的引导支承的Z形分布柔度簧片可能导致致动器产生不可忽略的横向寄生运动。然而，此小范围的寄生运动可通过音圈电机的轴向运动加以补偿。

2.1. 建模与分析

从功能上讲，运动平台可以在没有冗余约束的情况

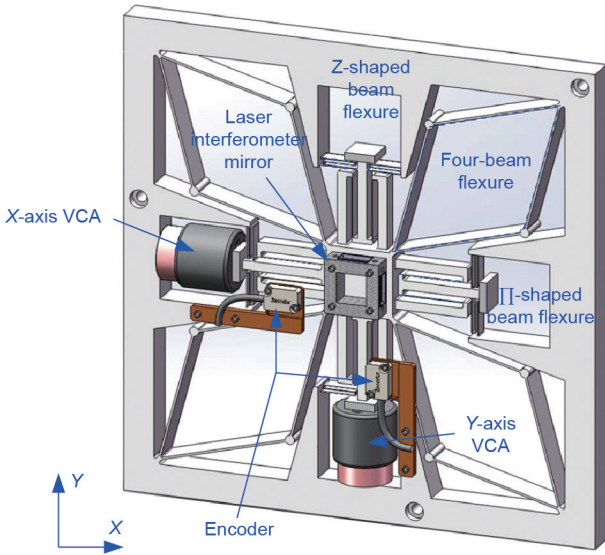


图2. 基于分布柔度簧片的大范围XY平面纳米运动台。

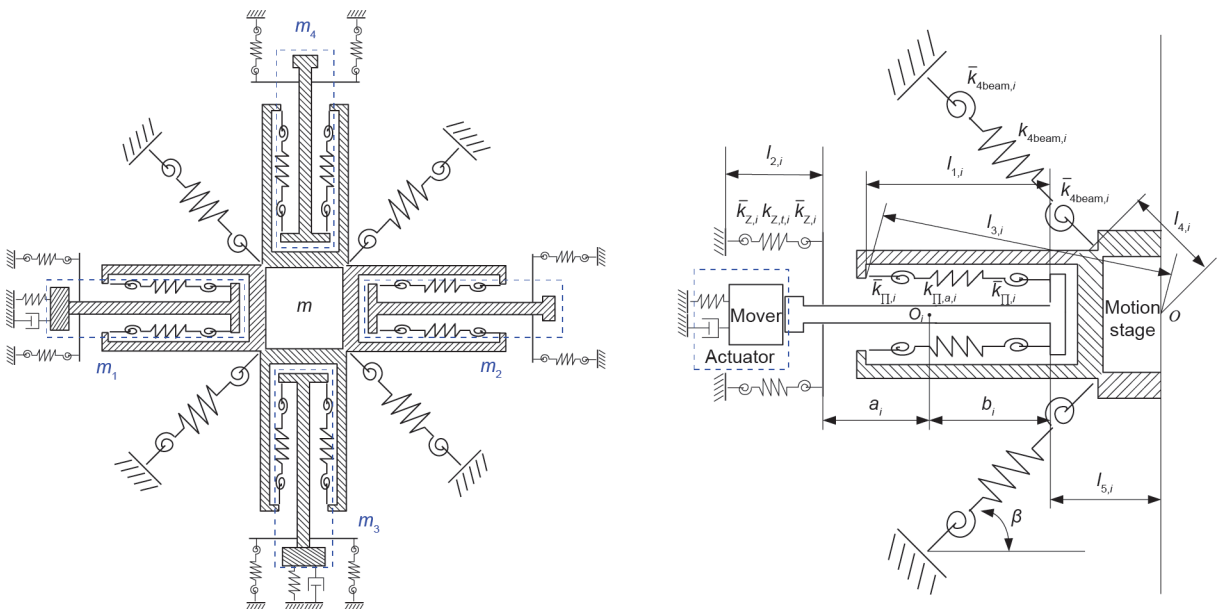


图3. XY纳米定位台的总体刚度模型。

下实现平面运动。然而，为了使运动平台能够达到纳米级的运动精度，适当的冗余约束模块是非常必要的。近期的研究表明限制寄生误差运动的冗余约束设计的有效性，如参考文献[15–17]。

为了建立力和平台尺寸间的对应关系，对柔性机构进行刚度建模。整个柔性分布柔度簧片机构的等效横向刚度 k 由Z形模块 $k_{Z,i}$ 、分布柔度平行四杆模块 $k_{\Pi,i}$ 和冗余约束（四梁）模块 k_{4beam} 组成。整体刚度模型如图3所示，各轴的等效横向刚度 k 确定如下：

$$k = 2k_{Z,i} + 2k_{\Pi,i} + k_{4beam} \quad (1)$$

在图3中，下标 i 表示第 i 个模块， \bar{k} 表示旋转刚度，如 $\bar{k}_{Z,i}$ 是第 i 个Z形模块的转动刚度，图中的其他几何参数可以直接理解。图4显示了Z形和 Π 形梁弯曲的详细几何形状，几何参数可以直接从图中获取。

参考文献[18]给出了等效刚度 k [方程(1)]各部分的详细推导，其中每部分的结果如下所述。两个Z形分布柔度簧片的横向刚度如下：

$$k_{Z,i} = \frac{8EI}{h^3} \quad (2)$$

式中， h 、 I 和 E 分别为Z形簧片的每一侧的长度、惯性矩和杨氏模量。值得注意的是，簧片的横向刚度在运动范围内呈线性，明显优于经典的平行四杆模块设计（其中横向刚度为非线性，且受横向形变影响）。上述刚度模型的验证将在2.3.1节中给出。 Π 形分布柔度平行四杆模块的横向刚度具有以下闭合形式[19]：

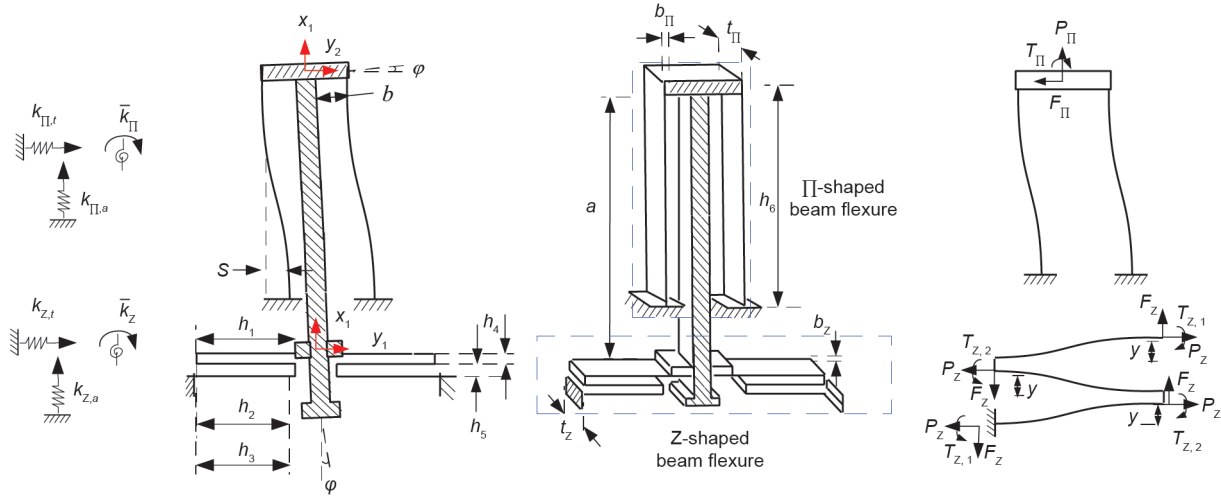


图4. Z形和II形分布柔度簧片和四个平行单元的几何构型及其等效刚度模型。

$$k_{\Pi,t} \approx \frac{24EI + 1.2P_{\Pi}h_6^2}{h_6^3} \quad (3)$$

式中, h_6 为II形平行四杆簧片的长度; P_{Π} 为II形簧片的轴向力。需要注意的是, 横向刚度取决于所施加的力。在每个轴上获得四梁弯曲刚度 $k_{4\text{beam}}$ 的闭合形式是非常困难的, 但是, 刚度可通过求解一组由几何变形和每个轴上的合成力控制的代数方程而获得。参考文献[18]提供了详细的推导。

2.2. 动力学模型

为了控制上述纳米运动台, 需要研究每个轴的动力学特性。从动力学的角度看, 音圈电机和柔性簧片机构可被视为一个弹簧-质量系统。此外, 通过使用上文所提供的刚度模型并忽略簧片的质量, 可将其视为一个五-弹簧-质量系统(图3), 其中运动平台 m 沿着 X 轴、 Y 轴和旋转轴的动力学模型建模如下:

$$\begin{cases} m\ddot{X} + 2\sum_{i=1}^2 k_{\Pi,a,i}(X - x_i) - 2\sum_{i=3}^4 \frac{\bar{k}_{\Pi,i}}{l_{1,i}} x_i + \sum_{i=1}^4 \frac{\bar{k}_{4\text{beam},i}}{l_{4,i}} X \\ \quad + \sum_{i=1}^4 k_{4\text{beam},i} X \cos \beta = 0 \\ m\ddot{Y} + 2\sum_{i=3}^4 k_{\Pi,a,i}(Y - y_i) - 2\sum_{i=1}^2 \frac{\bar{k}_{\Pi,i}}{l_{1,i}} y_i + \sum_{i=1}^4 \frac{\bar{k}_{4\text{beam},i}}{l_{4,i}} Y \\ \quad + \sum_{i=1}^4 k_{4\text{beam},i} Y \cos \beta = 0 \\ I\ddot{\theta} + 2\sum_{i=1}^4 \frac{\bar{k}_{\Pi,i} l_{3,i}^2}{l_{1,i}} \theta + \sum_{i=1}^4 \bar{k}_{4\text{beam},i} l_{i,4} \theta + 2\sum_{i=1}^2 \bar{k}_{\Pi,i} l_{5,i} x_i \\ \quad + 2\sum_{i=3}^4 \bar{k}_{\Pi,i} l_{5,i} y_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$m_1 \sim m_4$ 的动力学模型可以用与之相似的方式导出。利用五组质量的动力学方程, 从推力到沿 X 轴的位移的动力学关系可以写成如下所示的紧凑形式:

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{X} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ \dot{X} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{pmatrix} F_X \quad (5)$$

式中, $M = \text{diag}(m, m_1, m_2, m_3, m_4)$ 为质量矩阵; K 为刚度矩阵; F_X 为施加在 X 轴上的推力。具体设计参数见表1, 台面尺寸为330 mm×330 mm。

通过求解方程(3)可以得到设计的纳米定位系统的固有频率 ω 。代入刚度矩阵 K 中的几何参数得到59.8 Hz作为 X 轴和 Y 轴上的固有频率。

$$\begin{vmatrix} K_{11} - \omega^2 m & -2\frac{\bar{k}_{\Pi,3}}{l_{1,3}} & -2\frac{\bar{k}_{\Pi,4}}{l_{1,4}} \\ -2\frac{\bar{k}_{\Pi,3}}{l_{1,3}} & 2\left(\frac{\bar{k}_{z,3}}{l_{2,3}} + \frac{\bar{k}_{\Pi,3}}{l_{1,3}}\right) - \omega^2 m_3 & 0 \\ -2\frac{\bar{k}_{\Pi,4}}{l_{1,4}} & 0 & 2\left(\frac{\bar{k}_{z,4}}{l_{2,4}} + \frac{\bar{k}_{\Pi,4}}{l_{1,4}}\right) - \omega^2 m_4 \end{vmatrix} = 0 \quad (6)$$

$$\text{式中, } K_{11} = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\bar{k}_{4\text{beam},i}}{l_{4,i}} + k_{4\text{beam},i} \cos \beta \right).$$

表1 试验用的纳米定位器的优化参数

Parameter	Geometric size (mm)
The length of II-shaped beam flexure, l_{Π}	40.0
The height of II-shaped beam flexure, d_{Π}	10.0
The width of II-shaped beam flexure, t_{Π}	0.4
The length of four-beam flexure, $l_{4\text{beam}}$	80.0
The width of four-beam flexure, $t_{4\text{beam}}$	1.3
The width of Z-shaped beam flexure, t_z	0.4

2.3. 有限元分析

2.3.1. 刚度模型的验证

在本节中将进行有限元分析以模拟位移和推力间的关系。具体而言，为了使该解决方案可以实现更高的精度，在Z形模块、平行四边形模块和冗余约束模块中使用了高网格密度和大扰度的方法。该平台的材料是航空铝合金7075-T6，其具有以下性能：杨氏模量为72 GPa，泊松比为0.3，密度为 $2.7 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3}$ 。有限元分析的结果显示X轴和Y轴的最大范围为1.5003 mm，与分析范围相一致。此外，从图5中可以看出，当力从10 N变化到60 N时，横向刚度变化约为0.276%，这使式(2)中的线性刚度模型得到了验证。

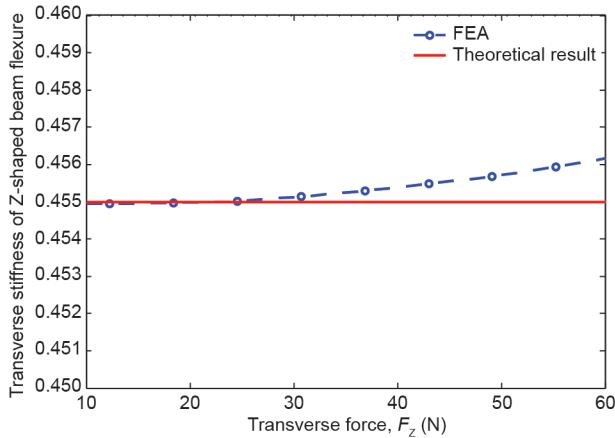


图5. Z形簧片的归一化刚度的有限元分析结果。

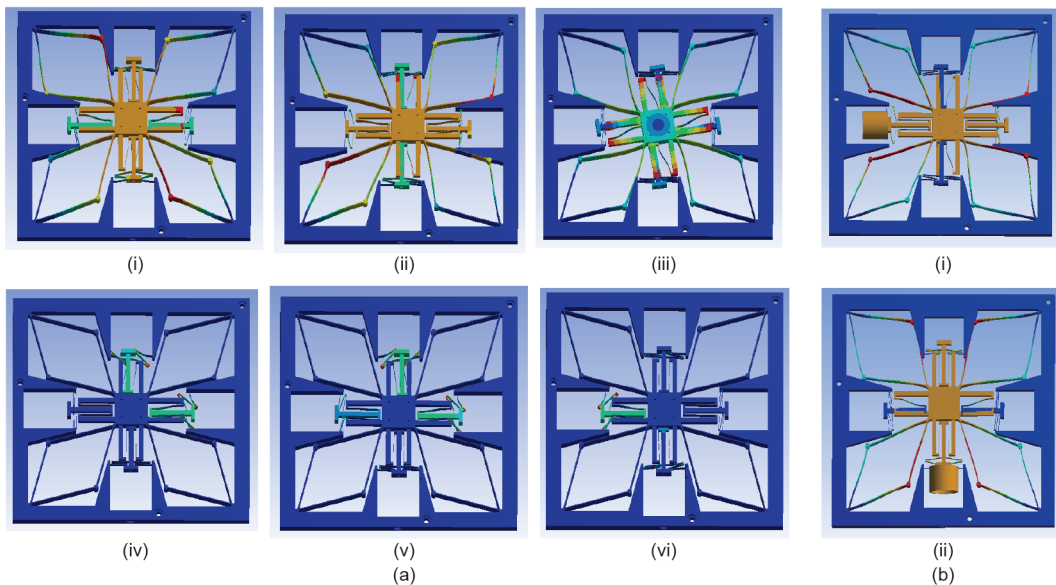


图6. 模态分析的有限元分析结果。(a) 前六阶模态的有限元分析结果：(i) 第一模态 (76.1 Hz)；(ii) 第二模态 (76.3 Hz)；(iii) 第三模态 (126.3 Hz)；(iv) 第四模态 (243.1 Hz)；(v) 第五模态 (243.6 Hz)；(vi) 第六模态 (245.2 Hz)。(b) X轴和Y轴的有限元分析结果：(i) X轴的模态 (55.0 Hz)；(ii) Y轴的模态 (55.4 Hz)。

2.1.2. 模态分析

图6显示了利用ANSYS的模态分析结果，其中冗余约束（四梁）模块主要对应于前两个模态[图6 (a-i)、(a-ii)]。此外，旋转对应于第三模态[图6 (a-iii)]，而T形连接构件的振动对应于第四到第六模态[图6 (a-iv) ~ (a-vi)]，其远远超出了工作频率的范围。

2.3.3. 冗余约束模块的验证

为了更好地展示所提出的设计的优点，比较了所提出的设计与无冗余约束模块设计的性能。进行了以下两组比较：首先，对运动轴施加1 mm的位移，同时，为了模拟干扰，在垂直于运动轴方向施加0.01 mm的非轴向位移。由此产生的运动平台的误差运动反映了所提出的设计的抗干扰能力。接下来，对两种设计进行模态分析以显示两种情况的固有频率的差异。分析结果如表2所示，本文提出的设计的误差运动为87.1 nm，而没有冗余约束的则为193.8 nm，同样，两者的固有频率分别为55.0 Hz和44.1 Hz。显然，所提出的设计具有更好的抗干扰能力和更高的带宽。

表2 提出的设计和无冗余约束的设计间的有限元分析对比

	Error motion	Natural frequency
Without four-beam redundant constraint	193.8 nm	44.1 Hz
With four-beam redundant constraint	87.1 nm	55.0 Hz
Improvement	55.1%	24.7%

3. 实时控制系统

为了能够精确、可重复地控制运动系统，需要一实时控制系统，为此需要适当地设计先进的反馈控制策略。这里所提出的控制系统具有以下特点：

- 最小化的跟踪误差提高对高频信号的跟踪性能；
- 功能强大、用户友好的控制器和驱动器以优化运动过程。

为了提高不同情况下的动力学性能，在控制体系结构内组合了诸如鲁棒控制、重复控制、扰动观察器、陷波滤波器等许多控制算法。由于篇幅限制，本文将重点介绍以优化系统性能和鲁棒性为目标的控制器设计。这里分别用 $S(s)$ 和 $T(s)$ 表示被控系统模型 $G(s)$ 的灵敏度和互补灵敏度，如下所示：

$$S(s) = \frac{1}{1+G(s)C(s)} \quad (7)$$

$$T(s) = \frac{G(s)C(s)}{1+G(s)C(s)} \quad (8)$$

在式(7)和式(8)中， $C(s)$ 是要设计的反馈控制器。控制器的综合可以通过混合灵敏度 H_∞ 优化来表述，如式(9)所示：

$$C_{\text{opt}}(s) := \inf_{C_{\text{stab}}-G} \left\| \begin{bmatrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)T(s) \end{bmatrix} \right\|_\infty \quad (9)$$

最优 H_∞ 指标 γ_{opt} 可表示如下：

$$\gamma_{\text{opt}} = \left\| \begin{bmatrix} W_1(s)[1+G(s)C_{\text{opt}}(s)]^{-1} \\ W_2(s)[G(s)C_{\text{opt}}(s)][1+G(s)C_{\text{opt}}(s)]^{-1} \end{bmatrix} \right\|_\infty \quad (10)$$

在式(9)和式(10)中， $W_1(s)$ 和 $W_2(s)$ 分别为性能加权函数和不确定性加权函数。

为了适应可以实时实现的控制器算法，还开发了具有以下特征的用户友好的界面：

- 输出归零、线性化以及温度补偿；
- 传感器校准和温度补偿；
- 固件架构的高采样频率的反馈控制；
- 复杂轨迹的跟踪；
- 通过回调函数实现的用户程序空间和数据空间。

4. 实验结果

4.1. 实验装置

图7显示了基于簧片的大范围XY纳米运动台的原型系统。该原型系统是由航空铝合金7075-T6采用电火花线切割机加工而成。在本系统中，两个音圈电机用来驱动伺服平台。雷尼绍激光干涉仪用于运动平台的位移反馈，可实现 $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 的位移。反馈控制策略(图8)在自主设计的快速成形控制系统(开放的架构)上实现。图9显示了在主机上运行的用户界面。

由于采用了对称镜像配置，系统的两个运动轴的动力学模型相同。运动系统的整体动力系统由电子子系统和机械子系统组成。由于电流放大器的带宽被设计为 2 kHz ，因此可以认为从受控电压输入到放大电流的动态变化是一个恒定的增益。

4.2. 控制性能

4.2.1. 行程分析

测试了由音圈驱动器的输入电压转化为轴向位移的运动系统的刚度。图10显示纳米伺服系统在 $[0, 1.5 \text{ mm}]$ 范围内具有良好的线性刚度。对Y轴也进行了测试，并得出了类似的结果，表明纳米定位系统有能力实现 $\pm 1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 的运动范围。

4.2.2. 频谱分析

为了测试设计的基于簧片的纳米运动台的频率响应函数(FRF)，使用冲击锤对系统施加冲击激励。并对伺服级的振动进行检测，对测得的信号进行处理，然后通过傅里叶分析将其输入计算机，得到所设计的系统的频率响应函数。其X轴的结果如图11所示，Y轴的结果相似，在此省略。在 244.2 Hz 处可以观察到明显的谐波

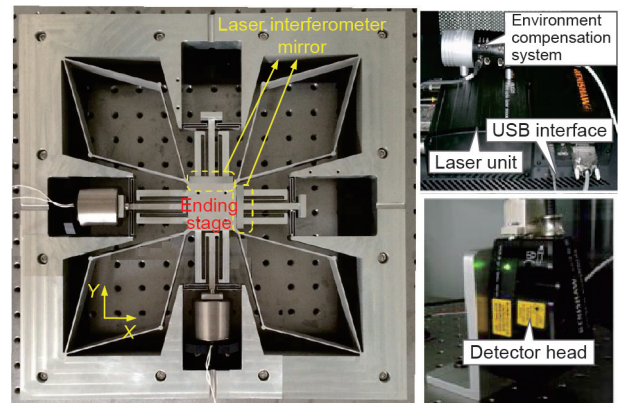


图7. 大范围XY平面纳米定位台的原型装置。

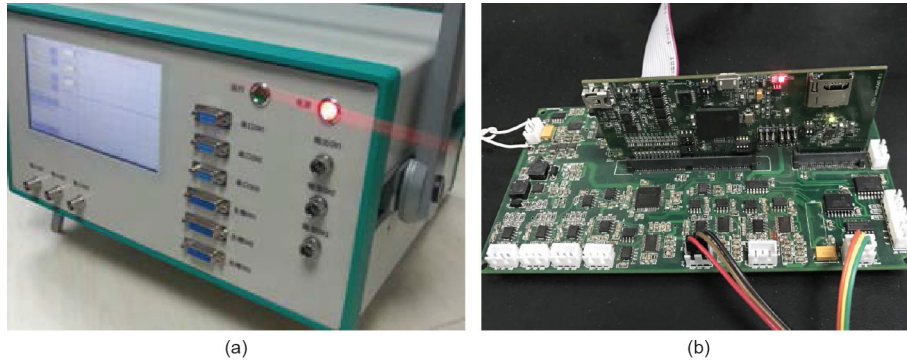


图8. 实时控制系统。(a) 控制箱；(b) 实时控制板。

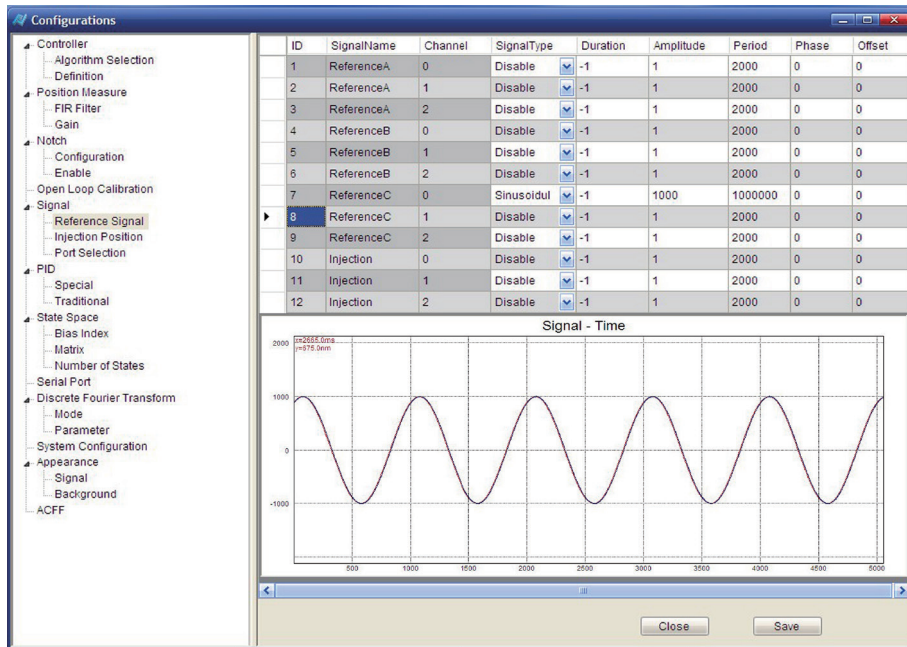


图9. 计算机主机界面。

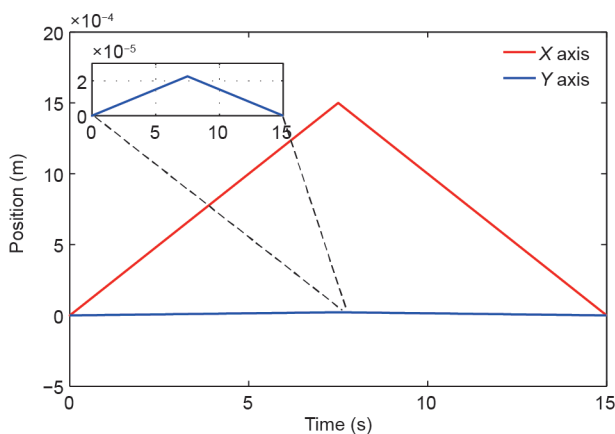


图10. 寄生运动的实验结果。

峰。理论和有限元分析的结果在第四到第六阶非常一致 (243.1 Hz、243.6 Hz和245.2 Hz) (图6)。另外, 在76.1 Hz和76.3 Hz的一阶和二阶可以看出具有71.2 Hz的谐振峰值。

4.2.3. 运动控制

为了实现对纳米伺服系统的精密运动控制, 需要对其进行动力学建模。通过建模, 确定各轴的频率响应, 分别获得X轴和Y轴的辨识的传递函数模型:

$$G_x(s) = \frac{54.2}{s^2 + 13.6s + 103\ 383.8} \quad (11)$$

$$G_y(s) = \frac{51.3}{s^2 + 17.3s + 128\ 584.9} \quad (12)$$

在式(11)和式(12)中, 其固有频率分别为51.2 Hz和57.1 Hz。这些结果与55.0 Hz和55.2 Hz的有限元分析结果一致。

为了显示纳米伺服系统的轮廓跟踪性能, 为运动平台设计了如第3节所讨论的 H_∞ 控制器。各轴的期望轨迹为幅值0.5 mm、频率5 Hz、相位差 0.5π 弧度的正弦信号, 得到的加权函数如下:

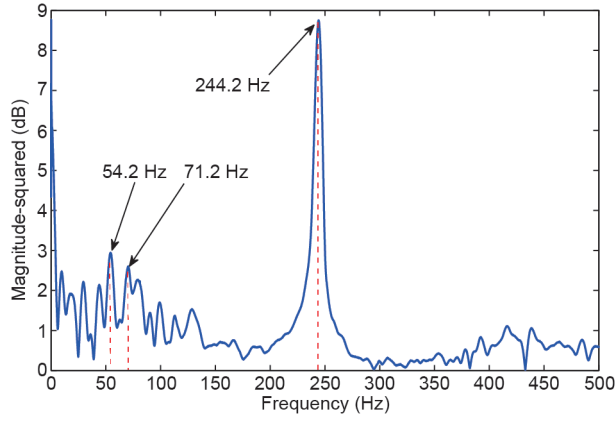


图11. 梁弯曲级的模态分析：无执行器的谐振频率。

$$W_1(s) = \frac{51}{s^2 + 0.02s + 0.0001} \quad (13)$$

$$W_2(s) = \frac{15.99s^2 + 1.306 \times 10^4 s + 2.667 \times 10^6}{16.68s^2 + 1.886 \times 10^4 s + 5.334 \times 10^6} \quad (14)$$

基于上述 H_∞ 优化，可以得到一个六阶鲁棒镇定器，其详细表述在此省略。系统的轮廓跟踪性能如图12所示。圆形轨道的均方根（RMS）误差为79.3 nm。另外，通过多次试验测试轮廓跟踪性能的可重复性，发现RMS平均跟踪误差为84.1 nm。

5. 结论

本研究旨在开发一种基于簧片的大范围纳米运动系统用以支持微光固化成形技术。本文主要介绍了纳米伺服系统的设计、建模、有限元分析和实时控制系统，展示了其静态和动态模型，以预测所期望的系统性能。详细的有限元分析结果表明理论计算和模拟计算的一致性。在所实现的纳米伺服平台上，设计和实施了实时控制策略，用于展示该系统实现毫米工作空间的性能以及约80 nm的圆轨迹跟踪误差（RMS）。

致谢

感谢摩擦学国家重点实验室开放基金（SKL2016B05）和国家自然科学基金（NSFC 61327003）的支持。

Compliance with ethics guidelines

Zhen Zhang, Peng Yan, and Guangbo Hao declare that

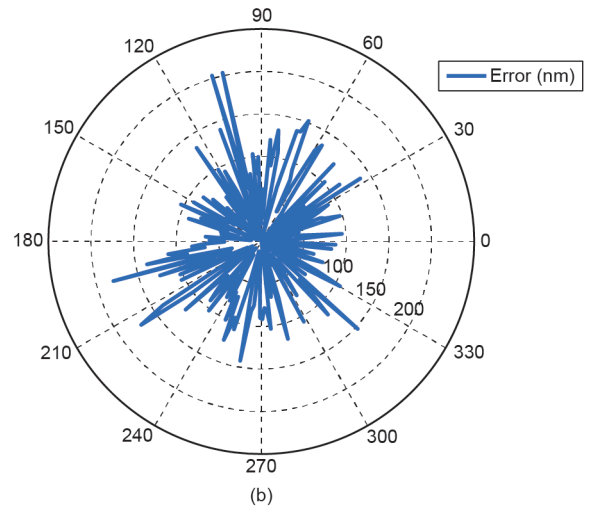
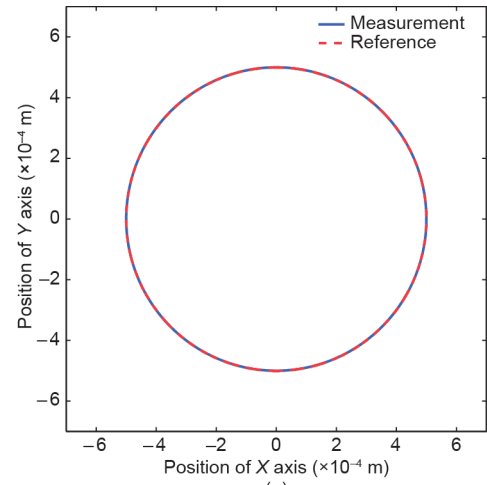


图12. 双轴轮廓跟踪实验结果。(a) 圆轨迹跟踪结果；(b) 极坐标中的跟踪误差。

they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Ikuta K, Hirowatari K. Real three dimensional micro fabrication using stereo lithography and metal molding. In: Proceedings of the IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems: An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems; 1993 Feb 7–10; Fort Lauderdale, FL, USA. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 1993. p. 42–7.
- [2] Ikuta K, Maruo S, Kojima S. New micro stereo lithography for freely movable 3D micro structure-super IH process with submicron resolution. In: Proceedings of the Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems: An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems; 1998 Jan 25–29; Heidelberg, Germany. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1998. p. 290–5.
- [3] Choi JS, Kang HW, Lee IH, Ko TJ, Cho DW. Development of micro-stereolithography technology using a UV lamp and optical fiber. Int J Adv Manuf Tech 2009;41(3–4):281–6.
- [4] Shoji S, Smith N, Kawata S. Photofabrication of a photonic crystal using interference of a UV laser. Proc SPIE 1999;3740:541–4.
- [5] Neumann J, Wiekling KS, Kip D. Direct laser writing of surface reliefs in dry, self-developing photopolymer films. Appl Opt 1999;38(25):5418–21.
- [6] Straub M, Ventura M, Gu M. Multiple higher-order stop gaps in infrared polymer photonic crystals. Phys Rev Lett 2003;91(4):043901.
- [7] Bertsch A, Zissi S, Jézéquel JY, Corbel S, André JC. Microstereolithography using a liquid crystal display as dynamic mask-generator. Microsyst Technol 1997;3(2):42–7.

- [8] Vaezi M, Seitz H, Yang S. A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. *Int J Adv Manuf Tech* 2013;67(5–8):1721–54.
- [9] Xu G, Zhao W, Tang Y, Lu B. Novel stereolithography system for small size objects. *Rapid Prototyping J* 2006;12(1):12–7.
- [10] Roy NK, Cullinan MA. μ -SLS of metals: Design of the powder spreader, powder bed actuators and optics for the system. In: Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference; 2015 Aug 10–12; Austin, TX, USA. Austin: University of Texas at Austin; 2015. p. 134–55.
- [11] Awtar S, Parmar G. Design of a large range XY nanopositioning system. *J Mech Robot* 2013;5(2):021008.
- [12] Xu Q. Design and development of a compact flexure-based XY precision positioning system with centimeter range. *IEEE Trans Ind Electron* 2014;61(2):893–903.
- [13] Zhou X, Wang D, Wang J, Chen SC. Precision design and control of a flexure-based roll-to-roll printing system. *Precis Eng* 2016;45:332–41.
- [14] Kang HW, Jeong YS, Lee SJ, Kim KS, Yun WS. Development of a compact micro-stereolithography (MSTL) system using a Blu-ray optical pickup unit. *J Micro-mech Microeng* 2012;22(11):115021.
- [15] Hao G, Yu J. Design, modelling and analysis of a completely-decoupled XY compliant parallel manipulator. *Mech Mach Theory* 2016;102:179–95.
- [16] Zhang Z, Liu Z, Yan P. Design of a flexure-based XY positioning stage with balanced axial forces on decoupling modules. In: Proceedings of the 6th International Conference on Manipulation, Manufacturing, Measurement on the Nanoscale; 2016 Jul 18–22; Chongqing, China. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2016. p. 83–8.
- [17] Yu J, Xie Y, Li Z, Hao G. Design and experimental testing of an improved large-range decoupled XY compliant parallel micromanipulator. *J Mech Robot* 2015;7(4):044503.
- [18] Zhang Z, Wang P, Yan P, Guan Y. A beam flexure-based nanopositioning stage supporting laser direct-write nanofabrication. *Sci China Phys Mech Astron* 2016;59(8):684211.
- [19] Awtar S, Slocum AH, Sevincer E. Characteristics of beam-based flexure modules. *J Mech Design* 2007;129(6):625–39.