

文章编号 1004-924X(2025)24-3875-14

三柔性梁激光视觉测振与自适应模糊滑模控制

胡忠礼, 邱志成, 李 旻*

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

摘要:三柔性梁耦合结构广泛应用于航空航天领域,如太空机械臂。为实现对由三根柔性耦合压电梁组成的可移动柔性多体系统的主动振动控制,本文设计了一种自适应反步模糊滑模控制器(ABFSMC),并采用激光位移传感器和线激光视觉测振系统对柔性梁的振动进行高精度测量。该系统包括两根通过弹簧耦合的柔性压电梁和一根独立柔性梁。建立了系统的动力学模型,结合小波变换与霜冰优化算法,对状态空间方程的参数进行了优化辨识,从而获得了更接近实际的精确模型。基于所提出的 ABFSMC 控制器,分别在定点激励和梯形轨迹激励两种激励方式下开展了振动测量、控制仿真和实验研究。实验结果表明:线激光视觉测振系统具有较高的测量精度,测量误差小于 0.1 mm;在定点激励条件下,ABFSMC 控制器可在约 9 s 内将双柔性梁耦合系统的振动有效抑制,而传统的 PD 控制器则需约 15 s 才能实现相同效果;在梯形轨迹激励下的双梁系统,以及定点激励和梯形轨迹激励下的单梁系统中,ABFSMC 控制器亦均表现出更快的振动抑制能力。研究结果表明,所提出的 ABFSMC 控制器在振动抑制性能方面显著优于传统的大增益 PD 控制器,尤其在小幅值振动抑制效果上表现更为优异。

关键词:激光视觉;系统辨识;主动振动控制;三柔性梁系统;自适应反步模糊滑模控制

中图分类号:TP212.6 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253324.3875

CSTR:32169.14.OPE.20253324.3875

Laser vision vibration measurement and adaptive fuzzy sliding mode control of three flexible beams

HU Zhongli, QIU Zhicheng, LI Min*

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology,
Guangzhou 510641, China)

* Corresponding author, E-mail: limin@scut.edu.cn

Abstract: The three-flexible-beam coupled structure is widely used in the aerospace field, such as in space manipulators. To achieve active vibration control of a movable flexible multi-body system composed of three coupled piezoelectric flexible beams, this paper proposed a set of adaptive backstepping fuzzy sliding mode controllers (ABFSMCs). Laser displacement sensors and a line laser-based visual vibration measurement system were employed to achieve high-precision vibration monitoring of the flexible beams. The system consisted of two piezoelectric flexible beams coupled via springs and one independent flexible beam. Dynamic models of the system were established, and the parameters of the state-space equations were optimally identified using a combination of wavelet transform and the rime-ice (RIME) optimization

收稿日期:2025-05-26;修订日期:2025-09-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52175093);广东省基础与应用基础研究基金资助项目(No. 2024A1515012070)

algorithm, resulting in a model that more accurately reflected the actual system dynamics. Based on the proposed ABFSMC controllers, vibration measurement, control simulation, and experimental studies were conducted under two excitation scenarios: fixed-point excitation and trapezoidal trajectory excitation. Experimental results show that the line laser-based visual vibration measurement system achieves high measurement accuracy, with an error of less than 0.1 mm. After fixed-point excitation, the ABFSMC controllers are able to effectively suppress vibrations in the double-flexible-beam coupling system within approximately 9 s, whereas the conventional proportional-derivative (PD) controllers require around 15 s to achieve a similar level of suppression. The ABFSMC controllers also exhibit faster vibration suppression in the double-flexible-beam coupling system after trapezoidal trajectory, as well as in the single beam system under both fixed-point and trapezoidal trajectory excitations. These results indicate that the proposed ABFSMC controllers significantly outperform the traditional large-gain PD controllers in terms of vibration suppression performance, particularly excelling in the attenuation of small-amplitude vibrations.

Key words: laser vision; system identification; active vibration control; three-flexible-beam coupling system; adaptive backstepping fuzzy sliding mode control

1 引 言

近几十年来,柔性机械臂引起了人们的广泛关注^[1]。柔性机械臂以其重量轻、灵活性高、响应速度快、能耗低等优点,在航空航天、机器人等领域发挥了重要作用^[2]。然而,柔性部件容易产生弹性变形,由此产生的弹性振动可能会对系统的跟踪或定位精度产生负面影响,恶化其动态性能,甚至引起运动不稳定^[3]。因此,研究柔性结构的振动控制对于空间机械手等需要多体协作和耦合的系统至关重要。

精确的模型是设计高效控制器的基础。由于空间机械臂的高度非线性,其动力学建模变得更加复杂和具有挑战性^[4]。方虹斌等人^[5]对柔性机械臂的动力学建模方法进行了系统综述,主要包括集中参数系统法、假设模态法以及有限元法。Du等人^[6]基于假设模态法建立了带压电传感器梁的动力学方程。Guo等人^[7]应用哈密顿原理推导出带间隙的双连接夹层梁结构的非线性运动方程,并采用改进的Newmark积分法求解。

反馈控制依赖于精确的测量技术。接触式传感器如压电传感器和加速度传感器,需安装在被测物体表面,会改变系统的动力学特性,增加附加质量。相比之下非接触式传感器利用激光、光学等技术进行测量,无需与被测物体接触,因

此不会对其动力学特性产生影响。马天兵等人^[8]将线结构光技术应用于柔性臂的振动检测,并利用细菌觅食算法优化的PID控制器实现振动抑制。孙猛超等人^[9]针对双目视觉测量三维振动时存在的物理目标附着需求、实时性不足以及特征点假匹配等问题,提出了一种基于特征点的三维振动信息提取方法。陈磊等人^[10]采用非接触式立体视觉三维测量技术,获取试验过程中模型表面关键点的振动变形。

机械臂的主动运动或外部干扰会引起结构的振动,需要采用主动控制方法来抑制这些振动。Qiu等人^[11]设计了模糊回声状态网络控制器和模糊对角递归小波神经网络控制器对三柔性梁耦合系统的振动进行控制。Milovanovic等人^[12]提出了一种基于正交内分泌神经网络和正交内分泌自适应神经网络的模糊推理系统组合的新型控制器。Shang等人^[13]提出了一种基于神经网络辨识的改进滑模控制策略来提高柔性单连杆水下机械臂的控制精度。Hou等人^[14]提出了一种由快速终端滑模控制和基于海马的模糊神经网络组成的智能控制方案。Qiu等人^[15]设计了两种基于生物进化的强化学习控制器对柔性梁的振动进行控制。Sun等人^[16]提出了一种用于压电驱动梁振动抑制的线性自抗扰算法。Yan等人^[17]提出了一种新的自适应Takagi-Sugeno (T-S)模糊控制方法。Zhang等人^[18]提出了一种

基于径向基函数神经网络的位置控制算法。Zhou 等人^[19]研究了双事件触发机制下非线性不确定机器人系统的神经自适应跟踪控制。Yang 等人^[20]提出了一种自适应双神经网络滑模控制方法。邱志成等人^[21]设计了基于最小参数学习法的径向基网络反步滑模控制对多柔性梁耦合系统的振动进行控制。

本文对三柔性梁系统的振动测量和控制进行了研究。对于双柔性梁耦合系统,使用激光位移传感器对柔性梁的振动进行高精度测量,对于单柔性梁系统,搭建了线激光视觉测振系统实现振动测量。通过自适应反步模糊滑模控制器(Adaptive Backstepping Fuzzy Sliding-Mode Controller, ABFSMC)对柔性梁的振动进行主动控制,进一步开展了三柔性耦合梁的振动检测与控制实验研究,实验结果与比例微分控制(Proportional-Derivative control, PD)进行了比较,验证了线激光视觉测振系统和所提出的 ABFSMC 振动控制算法的有效性。

2 实验系统结构与建模

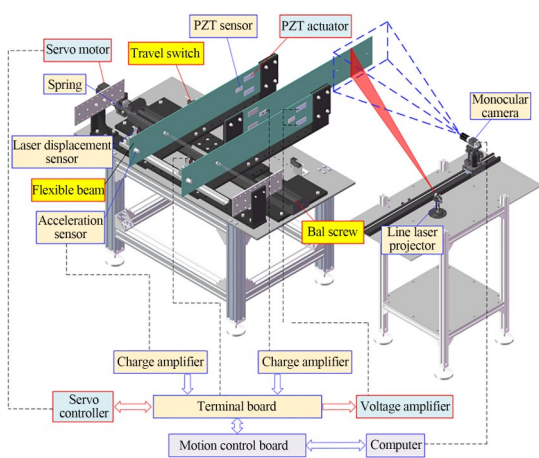
2.1 三柔性梁系统介绍

三柔性梁系统示意图如图 1(a)所示。该系统由三根压电柔性梁和三根线性弹簧组成。两根压电柔性梁和三根线性弹簧布置于一侧,弹簧

固定在柔性梁或刚体的两端,形成双柔性梁耦合系统。第三根压电柔性梁反向布置并与双柔性梁一起安装在刚性滑台上。

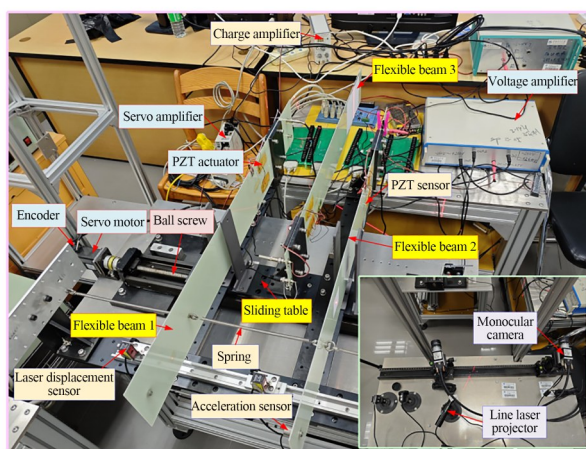
实验台的照片如图 1(b)所示。刚性滑台由配备滚珠丝杠的伺服电机驱动,编码器用于测量电机的角位移和角速度。滚珠丝杠型号为 KR55,导程为 20 mm,行程长度为 980 mm,伺服电机(HC-KFS43)的额定功率为 400 W。在双柔性梁耦合系统中,两个松下激光位移传感器(HGC1100)安装在距离柔性梁 100 mm 的位置,用于测量梁上指定点的振动位移,激光位移传感器的重复精度为 70 μm ,测量范围为 ± 35 mm,输出电压范围为 0~5 V,灵敏度为 14 mm/V。柔性梁 1,柔性梁 2 的振动信号由激光位移传感器获取,柔性梁 3 的振动信号由线激光视觉测振系统测量。基于线激光的视觉测振系统由一个单目相机(acA1600-60gc)和一个线激光投射器构成。双柔性梁耦合系统的每根柔性梁的末端安装有一个加速度传感器,重量为 51.75 g,可用来测量末端的加速度和模拟集中质量。

柔性梁的主动振动控制是通过粘贴在柔性梁根部的 PZT(铅钛酸铅)致动器来实现的。柔性梁和 PZT 传感器以及 PZT 致动器的尺寸如表 1 所示,其材料参数如表 2 所示。运动控制由 Googoltech 公司的 GTS-400-PV-PCI 运动控制卡



(a) 实验系统示意图

(a) Schematic diagram of the experimental system



(b) 实验装置照片

(b) Photograph of the experimental apparatus

图 1 三柔性梁系统示意图及实验装置照片

Fig. 1 Schematic diagram and photograph of the three-flexible-beam experimental system

实现,该卡具有 8 个 A/D 转换通道和 4 个 D/A 转换通道。电压放大器用于放大运动控制卡的输出信号,将其从 $-5\sim 5\text{ V}$ 转换为 $-260\sim 260\text{ V}$,从而有效地驱动压电致动器。

表 1 几何尺寸参数

Tab. 1 Geometric dimension parameters (mm)

Dimensions	Beams	PZT actuators	PZT sensors
Length	800	60	40
Width	150	25	10
Thickness	2	2	1

表 2 材料参数

Tab. 2 Material parameters

Material properties	Beams	PZT actuators	PZT sensors
Density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 980	7 500	7 500
Poisson ratio	0.33	0.36	0.36
Young's modulus/GPa	27.2	56	56

2.2 动力学建模与系统辨识

系统的输出方程可表示为:

$$Y = L_{\text{laser}} \delta, \quad (1)$$

$$Y = L_{\text{camera}} \delta, \quad (2)$$

其中:向量 Y 对应系统的输出,即激光位移传感器或基于线激光的视觉测量系统捕获的实际振动位移; L_{laser} 和 L_{camera} 表示激光位移传感器和基于线激光的视觉测量系统的测量系数。

对于双柔性梁耦合系统,利用哈密顿原理和有限元方法进行系统的动力学建模,柔性梁采用四节点板单元建模,弹簧采用弹簧单元建模,加速度传感器被视为集中质量,粘贴有 PZT 的柔性梁被当作复合梁结构处理,PZT 层的质量、刚度和耦合效应被整合到系统的整体质量矩阵和刚度矩阵中。分析发现,在双柔性梁耦合系统中,第一阶和第二阶弯曲模态的频率较为接近,而其余高阶模态的振动频率更高、阻尼衰减速度更快,因此,本文中仅考虑双柔性梁耦合系统中第一阶和第二阶弯曲模态的影响,得到系统的状态

空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + B_{\text{PZT}}U + B_{\text{motor}}\ddot{z} \\ Y = CX \end{cases}, \quad (3)$$

其中: $X = [\xi \quad \dot{\xi}]^T$,为状态向量,由柔性梁的模态位移和模态速度组成; A 是系统的模态状态矩阵; B_{PZT} 是压电驱动控制矩阵; $U = [V_1 \quad V_2]^T$,是压电驱动器输入的电压; C 是观测矩阵; Y 为柔性梁的振动位移; B_{motor} 为电机驱动矩阵; $\ddot{z} = D_{\text{lead}}\ddot{\phi}$,为滑台的平移加速度,其中 D_{lead} 为丝杠的导程, $\ddot{\phi}$ 为电机轴的旋转加速度。

与双柔性梁耦合系统不同,悬臂梁 3 在固定时作为独立结构,因此在动力学分析中需要单独考虑。由于高阶模态振动频率高,衰减速度快,本文仅考虑单柔性梁的第一阶弯曲模态。针对第三悬臂梁的一阶弯曲模态,建立状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{X}_{1b} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{n1b}^2 & -2\zeta_{1b}\omega_{n1b} \end{bmatrix} X_{1b} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_{1b} \end{bmatrix} U_{1b} + B_{\text{motor}_1b}\ddot{z} \\ Y_{1b} = C_{1b} X_{1b} \end{cases}, \quad (4)$$

其中: $X_{1b} = [\xi_{1b} \quad \dot{\xi}_{1b}]^T$,为状态向量,由柔性梁的模态位移和模态速度组成; ζ_{1b} , ω_{n1b} 分别为第一阶弯曲模态的阻尼比和固有角频率; U_{1b} 是 PZT 驱动器的输入电压; C_{1b} 是观测矩阵; Y_{1b} 为柔性梁 3 的振动位移; B_{motor_1b} 为电机驱动矩阵。

为了获得更加精确的系统模型用于后续的控制设计,采用小波变换和霜冰优化算法对系统的状态空间方程参数进行优化辨识。首先获取柔性梁在外部激励下的自由振动信号,对其进行功率谱分析,得到中心频率,利用小波变换提取出固有频率和阻尼比,从而推导出状态矩阵 A 。对自由振动进行解耦,并利用霜冰优化算法对解耦信号的幅值和相位角进行寻优,通过将仿真的振动信号与实验振动信号拟合,得到观测矩阵 C 。

在确定 A , C 后,以小增益 PD 控制实验的振动信号作为拟合目标,将对应的控制电压作为控制输入,应用霜冰优化算法,通过拟合状态转移得到的仿真曲线与实验曲线,辨识得到压电控制矩阵 B_{PZT} 。同理,电机驱动平台执行梯形速度运动轨迹,使用霜冰优化算法辨识得到伺服电机的

电机驱动矩阵 B_{motor} 。

辨识获得状态空间方程参数为^[15]:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -142.4320 & 0 & -0.1503 & 0 \\ 0 & -171.6955 & 0 & -0.1405 \end{bmatrix},$$

$$A_{\text{lb}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -191.1119 & -0.1257 \end{bmatrix},$$

$$C = 14 \times \begin{bmatrix} 0.9596 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -0.9593 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C_{\text{lb}} = [1 \ 0],$$

$$B_{\text{PZT}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.0007 & 0.0062 \\ 0 & 0 & 0.0155 & -0.0079 \end{bmatrix}^T,$$

$$B_{\text{PZT}_{\text{lb}}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.0254 \end{bmatrix},$$

$$B_{\text{motor}} = [0 \ 0 \ -0.0703 \ 0]^T,$$

$$B_{\text{motor}_{\text{lb}}} = [0 \ 0.6006]^T.$$

3 线激光视觉振动检测

激光位移传感器核心优势在于精度高、部署简便、稳定性好,然而,其缺点也十分明显,其灵活性与扩展性不足。每个传感器仅能测量一个预定点,若要获取多点信息或分析结构的振动模式,则必须线性增加传感器数量,这将大幅提高系统的成本与复杂性。与之相比,本文搭建的线激光视觉测量系统通过相机捕捉投射在柔性梁

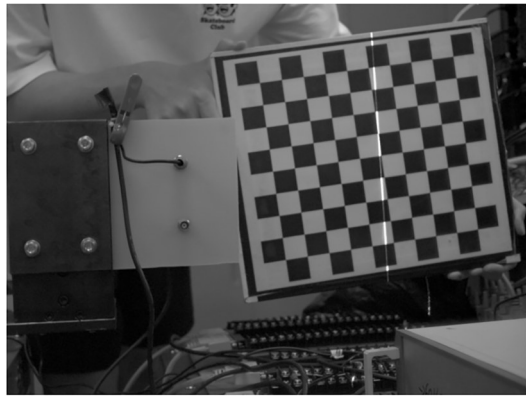
上的整条激光线,一次采样即可获得该线段上所有点的三维坐标信息,这意味着不仅可以分析线上任意一点的振动,更具备了识别梁的弯曲振型、进行多模态分析的能力。

基于线激光的视觉振动测量系统由一个线激光投射器和一个单目相机组成。从捕获的图像中提取光斑轮廓,计算几何矩以确定测量点。利用标定的相机内外参数,确定激光平面参数、目标平面方程和测量点的三维坐标,然后通过计算不同时刻测量点之间的距离差来获得振动信号。

3.1 系统标定

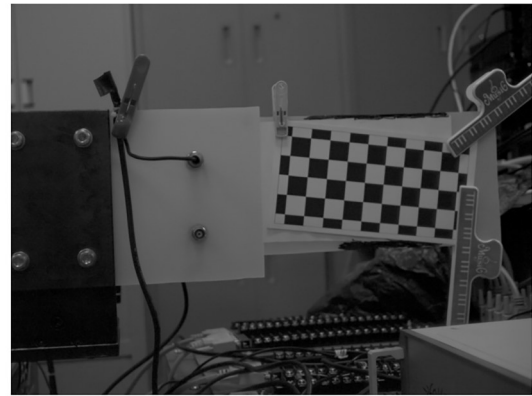
线激光视觉测振系统的标定包括相机的内外参数标定以及靶标平面、激光反射平面、激光平面和梁面法向量的标定。

采用张正友标定法对相机的内外参数进行标定,如图 2(a)所示,拍摄 25 ~ 30 张不同姿态棋盘格的照片,拍摄过程中打开线激光投射器,使得标定的照片能够用于线激光的标定。棋盘格的方格尺寸为 25 mm × 25 mm,精度为 0.005 mm。由于系统测量的是柔性梁在三维空间中的任意运动,因此需要标定其面法向量,以便将三维运动精确地投影到垂直于梁表面的方向,从而分离并计算出真实的振动位移。将特殊的标定板夹在柔性梁上,如图 2(b)所示,将滑台移动至不同部位拍摄 5~10 张照片,通过张正友标定法对标定板的外参进行标定,导出被测梁平面方程,获得所有拍摄图片



(a) 内外参数及激光方程标定

(a) Calibration of intrinsic and extrinsic parameter laser plane



(b) 梁面法向量标定

(b) Calibration of surface normal vector of the beam

图 2 标定照片

Fig. 2 Calibration images

的柔性梁面法向量后,求解最优梁面法向量,优化目标为 $\min \sum_{i=1}^N \theta_i$, 其中 $0^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$, 代表第 i 张图片的法向量与最优法向量之间的夹角。

靶标平面的系数 (A_1, B_1, C_1, D_1) 也可通过张正友标定法标定相机的外部参数,导出标定板的平面方程系数得到。

根据成像原理,拍摄图像中的激光线对应着激光反射平面。通过图像处理,可以提取标定板上的激光直线,并将其拟合为直线方

$$X = \begin{Bmatrix} A_3 \\ B_3 \\ C_3 \end{Bmatrix}, K = \begin{bmatrix} B_2^1 & 0 & \cdots & B_2^i & 0 & \cdots & B_2^n & 0 \\ -A_2^1 & C_2^1 & \cdots & -A_2^i & C_2^i & \cdots & -A_2^n & C_2^n \\ 0 & -B_2^1 & \cdots & 0 & -B_2^i & \cdots & 0 & -B_2^n \end{bmatrix}.$$

在方程中,上标 i 表示从第 i 张标定图像中得出的参数。通过使用最小二乘法求解,可以确定参数 (A_3, B_3, C_3) 的值,从而完成激光平面方程的标定。

3.2 图像处理

在振动测量时,需要对相机获取的图像进行滤波、阈值分割、边缘提取、形态学处理等一系列操作,旨在提取图像中的振动信息。

首先,使用标定好的参数对图像进行畸变校正。为了提高处理速度并确保以采样频率进行准确反馈,设置了一个 ROI 区域来裁剪实时捕获的图像,只保留重要信息所在的区域即可。然后采用高斯滤波技术,克服环境光和其他物体的反射光造成的干扰。边缘提取使用固定阈值分割,由于光斑和背景之间的灰度值差异较高,低阈值的点会被丢弃,只有高阈值的点才会被保留下来,以便进行精确的边界提取。使用 Canny 算子来检测激光光斑的边缘,最终提取出的线激光光斑边缘是矩形的。通过高斯滤波、ROI 设定和阈值分割等一系列图像处理技术的应用,本测量系统能够在典型的实验室光照条件下稳定工作,其测量结果不受轻微环境光波动的干扰,从而确保了振动信号的采集精度和可靠性。

提取边缘轮廓后,根据封闭边缘图形的几何矩计算出重心坐标 (u, v) 。该坐标即被测点在相机坐标系下的二维像素坐标。

3.3 振动检测

从捕获的图像中提取光斑轮廓,计算几何矩

程。激光反射平面可以表示为 $A_2x + B_2y + C_2z = 0$ 。

在得到靶标平面和激光反射平面的方程后,可根据三面共线条件进一步推导出激光平面的方程。设 $D_1 = 1, D_2 = 0$ 和 $D_3 = 1$, 可得:

$$\begin{cases} B_3A_2 - A_2B_3 = A_1B_2 - A_2B_1 \\ C_2B_3 - B_2C_3 = B_1C_2 - B_2C_1 \\ A_2C_3 - C_2A_3 = C_1A_2 - C_2A_1 \end{cases}, \quad (5)$$

其中: $(A_3, B_3, C_3, 1)$ 是激光平面方程的系数,为待求项。上述方程可写成 $KX = Y$, X 和 K 的定义分别为:

$$X = \begin{Bmatrix} A_3 \\ B_3 \\ C_3 \end{Bmatrix}, K = \begin{bmatrix} B_2^1 & 0 & \cdots & B_2^i & 0 & \cdots & B_2^n & 0 \\ -A_2^1 & C_2^1 & \cdots & -A_2^i & C_2^i & \cdots & -A_2^n & C_2^n \\ 0 & -B_2^1 & \cdots & 0 & -B_2^i & \cdots & 0 & -B_2^n \end{bmatrix}.$$

以确定测量点。利用标定好的相机内外参数,确定激光平面方程、靶标平面方程和测量点的三维坐标。然后通过计算不同时刻测量点之间的距离差来获得振动信号。线激光视觉系统的测振原理如图3所示。

相机的内外参数和激光平面方程标定完成后,可得出所拍摄图像的二维像素坐标与三维坐标之间的转换关系如式(6)所示:

$$\begin{cases} f_u x + (u_0 - u)z = 0 \\ f_v x + (v_0 - v)z = 0 \\ Ax + By + Cz + D = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

其中, (x, y, z) 为被测点 P 的世界坐标。

当滑动平台固定时,柔性梁的振动信息可以通过计算被测点的三维坐标的距离差获得,振动量为每个时刻被测点相对于柔性梁静止时的被测点之间的距离。根据相机在柔性梁静止时采集的前 50 帧的图像计算初始被测点的位置 P_0 , t 时刻柔性梁的振动量可以表示为:

$$\text{dis}P_t P_0 = \text{sgn}(z_t - z_0) |P_t P_0| \cos \theta, \quad (7)$$

其中: $|P_t P_0|$ 为 t 时刻被测点和柔性梁静止时的被测点之间的距离; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数,振动量的正负由 t 时刻被测点的 z 坐标相对于初始被测点 z 的位置决定; θ 为激光平面与柔性梁面之间的夹角。

当电机驱动滑动平台移动柔性梁时,由于初始参考柔性梁面的位置会随着滑台的移动而变化,需要通过编码器对初始参考面进行计算。柔性梁上某点的振动位移可由公式(8)

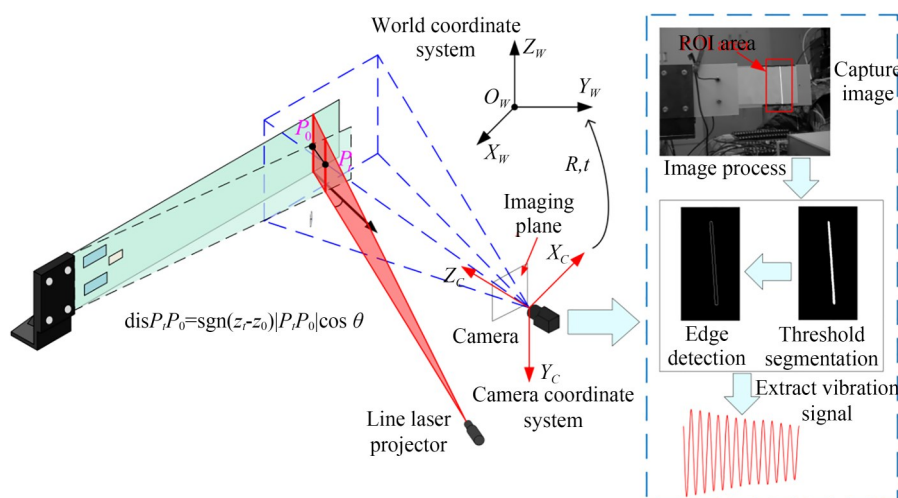


图 3 线激光视觉测振原理图

Fig. 3 Schematic diagram of laser line vision-based vibration measurement principle

得出:

$$|P_0 P'_0| = \frac{D_{\text{lead}}}{\cos\left(\frac{\pi\beta_0}{180}\right)} L_t, \quad (8)$$

其中: D_{lead} 为丝杠的导程; $L_t = \int_0^t v_{\text{motor}} dt$ 为柔性梁的移动距离, 通过对编码器速度进行积分得到; β_0 为梁面法向量与激光平面方向向量之间的夹角。

4 自适应反步模糊滑模控制器设计

将柔性梁的模型表述为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -K_1 x_2 - K_2 x_1 + b_i u \end{cases}, \quad (9)$$

其中: K_1 为阻尼项; K_2 为频率项; b_i 为控制系数, $i = 1, 2, 3$, 分别对应三根柔性梁; u 为控制电压。

考虑到模型的不确定性和外界环境的干扰, 将式(9)表示为:

$$\dot{x}_2 = f(x) + b_i u + H(t), \quad (10)$$

其中: $f(x) = -K_1 x_2 - K_2 x_1$, $H(t) = \Delta A_1 x_2 + \Delta A_2 x_1 + \Delta B u + \eta$, $\Delta A_1, \Delta A_2, \Delta B$ 为柔性梁建模的不确定性, η 为柔性梁的外界干扰。

定义位移误差 $e_1 = x_1 - x_d$, $x_d = 0$ 为参考轨迹。设计虚拟控制力 $\alpha = -c_1 e_1 + \dot{x}_d$, 引入虚拟误差 $e_2 = x_2 - \alpha$, 定义滑模面为 $s = \lambda e_1 + e_2$, λ 为正常数。

采用指数趋近律:

$$\dot{s} = -\rho s - k \operatorname{sgn}(s), \quad (11)$$

其中: ρ, k 为大于 0 的常数; 反推控制律为^[22]:

$$u = -\frac{1}{b_i} \left[\left(\frac{s}{\|s\|^2} (e_1^T e_2 + \phi) + (\lambda + c_1)(e_2 - c_1 e_1) - \ddot{x}_d \right) - H_{\max} - \varphi - \rho s - k \operatorname{sgn}(s) \right], \quad (12)$$

其中: $\phi > 0$ 为鲁棒增益; $H_{\max}$ 为扰动上界; φ 为模糊系统输出, 用来逼近未知非线性项。

采用 N 条模糊规则, 形式为:

$$\begin{aligned} R^i: & \text{if } x_1 \text{ is } \mu_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } \mu_2^i \\ & \text{then } y \text{ is } Y^i \end{aligned}, \quad (13)$$

其中: μ_j^i 为 x_j ($j = 1, 2$) 的高斯隶属函数, 采用高斯隶属函数能获得平滑、连续的控制输出。

$$\mu_j^i(x_j) = \exp\left(-\frac{(x_j - m_j^i)^2}{2(\sigma_j^i)^2}\right), \quad (14)$$

其中: m_j^i 为中心值, σ_j^i 为标准差。

采用单值模糊化和重心法解模糊, 输出为:

$$\varphi = \xi^T(x) \theta, \quad (15)$$

其中: $\xi(x) = [\xi_1(x), \dots, \xi_N(x)]^T$, $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_N]^T$ 为自适应参数; $\xi_i(x) =$

$$\frac{\prod_{j=1}^2 \mu_j^i(x_j)}{\sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^2 \mu_j^i(x_j)}.$$

设计参数自适应律为：

$$\dot{\theta} = \tau \xi(x)s, \tag{16}$$

其中, $\tau > 0$ 为学习率。

反步法搭建了稳定的控制框架,滑模控制在此基础上强化了对外部干扰的抵抗力,模糊逻辑解决了对未知系统动态的依赖问题,而自

适应率则确保了模糊逼近的精确性。这种组合使得 ABFSMC 控制器能够在不依赖精确模型的情况下,实现对柔性梁振动的快速、精确且鲁棒的抑制,从而解决单一控制方法难以应对的复合挑战。ABFSMC 控制器的控制框图如图 4 所示。

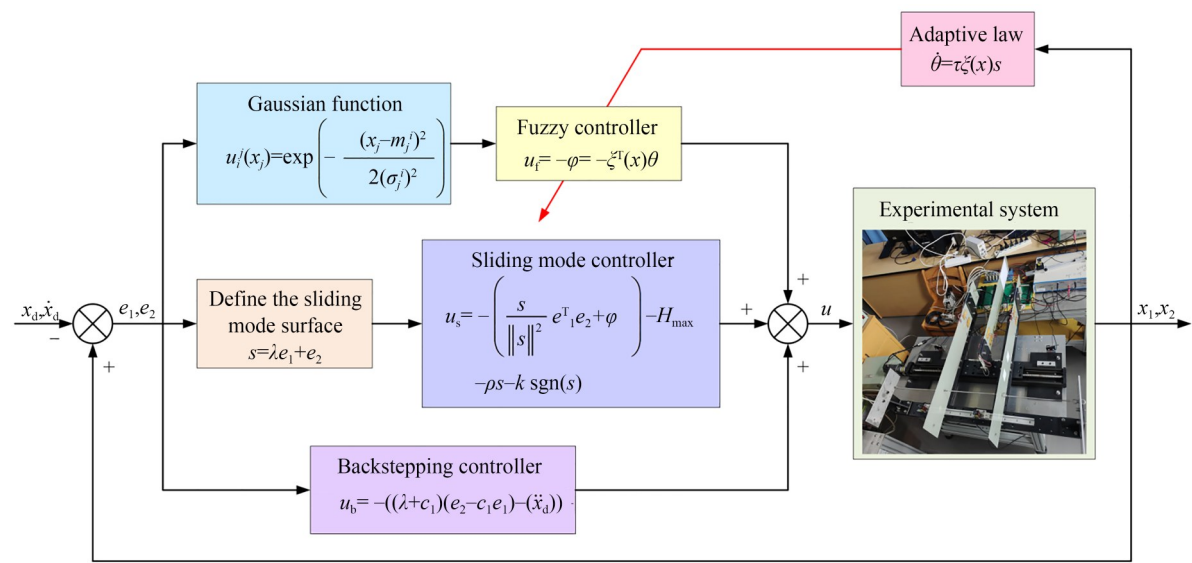


图 4 ABFSMC 控制器的控制框图

Fig. 4 Control block diagram of the ABFSMC controller

5 柔性梁振动控制仿真和实验研究

5.1 标定结果

采用 3.1 的标定方法得到相机内参标定结果,如表 3 所示。相机参数的标定误差如表 4 所示。标定得到线激光平面方程系数为

(-0.002 1, 0.000 3, -0.001 5, 1),梁面法向量为(-0.238 2, 0.013 3, -0.971 1)。

5.2 控制器设计参数

采用优化辨识后的状态空间方程进行振动控制的仿真调参,各类参数的选择原则和整定策略如下：

(1)滑模面参数 λ :该参数决定了系统状态滑到滑模面后的动态品质。较大的 λ 意味着误差收敛更快,但过大会导致系统响应过于剧烈,可能激发未建模的高频动态。因此,通过仿真从小到大调整 λ ,在保证系统平稳性的前提下选取了能提供较快收敛速度的数值。

(2)滑模鲁棒项增益 ρ, k :这两个参数共同决定了滑模控制的鲁棒性强度,其作用是克服系统的不确定性,将系统状态强行驱向滑模面。它们的取值需满足一定的条件以保证李雅普诺夫稳定性。参数取值过小,会导致系统无法到达滑模面;取值过大,则会引起严重的控制输出

表 3 单目相机内参标定结果

Tab. 3 Monocular camera intrinsic calibration results (pixel)

f_x	f_y	u_0	v_0
2 679.521 3	2 680.142 9	743.736 4	575.371 3

表 4 单目相机内参标定误差

Tab. 4 Monocular camera intrinsic calibration error (pixel)

f_x	f_y	u_0	v_0
$\pm 24.001 4$	$\pm 23.914 3$	$\pm 10.960 8$	$\pm 8.055 9$

抖振。

(3)自适应学习率 τ :该参数决定了模糊系统在线调整权重的速度。较大的 τ 能让模糊系统更快地逼近未知非线性项,提升自适应能力;但过大的学习率可能导致参数更新过程不稳定,甚至引起系统振荡。通过观察仿真中自适应参数的收敛曲线,选择了一个既能保证较快学习速度,又确保参数平滑收敛的 τ 值。

(4)模糊隶属度函数参数:包括模糊规则数、中心值和标准差。模糊规则数的选择是为了在

逼近精度和计算复杂度之间取得平衡。中心值的选择应覆盖误差和误差变化率的主要变化范围,使其能有效描述系统的整个动态过程。标准差决定了隶属度函数的“胖瘦”,影响了模糊规则之间的平滑过渡。

这些参数主要根据对系统动态特性的先验知识进行初步设定,并在仿真中微调以获得最佳的非线性逼近效果。图4显示ABFSMC控制器的控制框图。最终确定的ABFSMC控制器的参数如表5所示。

表5 ABFSMC控制器设计参数

Tab. 5 Design parameters of the ABFSMC controllers

	c_1	λ	ρ	k	ϕ	Number of fuzzy rules	Center value of the Gaussian function	Standard deviation of the Gaussian function
Beam 1	0.065	0.35	1	1.25	0.12	25	$m_1^i: -1, -0.5, 0, 0.5, 1$ $m_2^i: -12, -6, 0, 6, -12$	$\sigma_1^i: 0.2$ $\sigma_2^i: 3$
Beam 2	0.065	0.35	1	1.25	0.12	25	$m_1^i: -0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5$ $m_2^i: -6, -3, 0, 3, 6$	$\sigma_1^i: 0.1$ $\sigma_2^i: 1.5$
Beam 3	0.100	0.50	1	2	0.12	25	$m_1^i: -0.6, -0.3, 0, 0.3, 0.6$ $m_2^i: -8, -4, 0, 4, 8$	$\sigma_1^i: 0.2$ $\sigma_2^i: 2.67$

5.3 仿真结果

对于双柔性梁耦合系统,为了更公平地比较所设计的ABFSMC控制器和PD控制器的控制性能,PD控制参数的选择遵循特定的准则,该准则确保在相同的初始激励幅值下,两个控制器的控制电压的饱和周期个数相同,且均不超过4个电压饱和周期。根据这一约束条件并不断优化PD控制器的控制效果,最终确定双柔性梁耦合系统的PD控制参数为: $k_p=10, k_d=0.25$,然后在仿真中使用优化辨识得到的模型来评估比较两种控制方法的控制效果。

为了保证仿真和实验的一致性,采用相同的滤波器参数,设定滤波器的中心频率为1.952 8 Hz,带宽为 10π ,由于系统中存在相位滞后,因此需要对PD控制器调整相位,移相步数设为 $k_{\text{phase}}=6$ 。

对于单柔性梁系统,PD控制增益的选择原则与双柔性梁耦合系统类似,对于第一阶弯曲模态,PD控制参数设置为 $k_p=14.4, k_d=0.36$ 。滤波器中心频率为2.164 3 Hz,带宽为 10π ,移相

步数为 $k_{\text{phase}}=10$ 。

所设计的ABFSMC控制器通过内在的相位补偿能力、非线性建模能力和鲁棒控制策略,可以有效抑制系统的滞后特性和非线性干扰,因此即使不移相也能起到很好的控制效果。

定点激励是指将柔性梁的末端拨动到一个固定位置然后松开,使得柔性梁振动。梯形轨迹激励是指滑台按照梯形速度轨迹进行运动,使得柔性梁振动。定点激励后,梁1在ABFSMC控制器和PD控制器控制下的仿真控制效果比较如图5(a)和(b)所示。在ABFSMC控制器控制下,柔性梁的振动大约在7 s左右被完全抑制,而在PD控制器控制下,柔性梁在15 s左右才能达到相同的控制效果。可以看到,两种控制器的控制电压均饱和4个周期,当柔性梁的振动较小时,ABFSMC控制器仍能输出较大的控制电压,体现了控制器的非线性的特点。

对于单柔性梁系统,定点激励后的ABFSMC控制器和PD控制器的仿真控制效果的比较如图5(c)和图5(d)所示。在ABFSMC控制

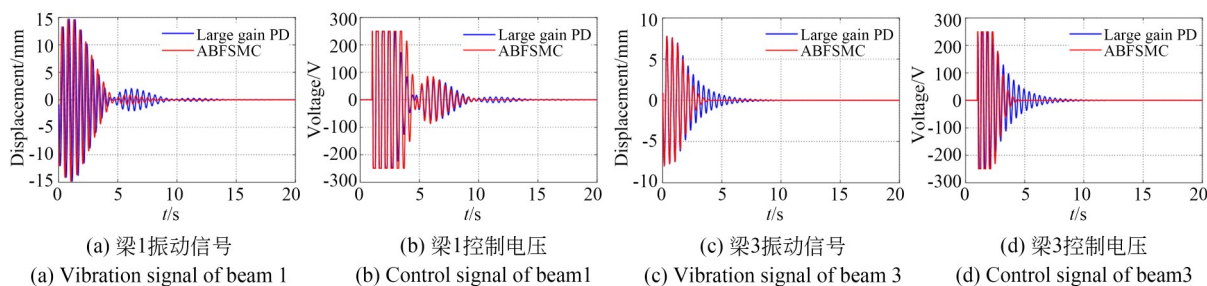


图 5 定点激励后控制仿真结果

Fig. 5 Control simulation results after fixed-point excitation

下,柔性梁的振动在 4 s 左右被完全抑制,而在 PD 控制下,大约需要 10 s 左右才能达到相同的控制效果。

梯形轨迹激励后,梁 1 在 ABFSMC 控制器和 PD 控制器控制下的仿真控制效果的比较如图 6(a)和图 6(b)所示。在 ABFSMC 控制下,柔性梁的振动大约在 6 s 左右被完全抑制,而 PD 控制

需要 15 s 左右才能达到相同的控制效果。

对于单柔性梁系统,梯形轨迹激励后的 ABFSMC 控制器和 PD 控制器的仿真控制效果的比较如图 6(c)和图 6(d)所示。在 ABFSMC 控制下,柔性梁的振动大约在 4 s 左右被完全抑制,而在 PD 控制下,需要 10 s 左右才能达到相同的控制效果。

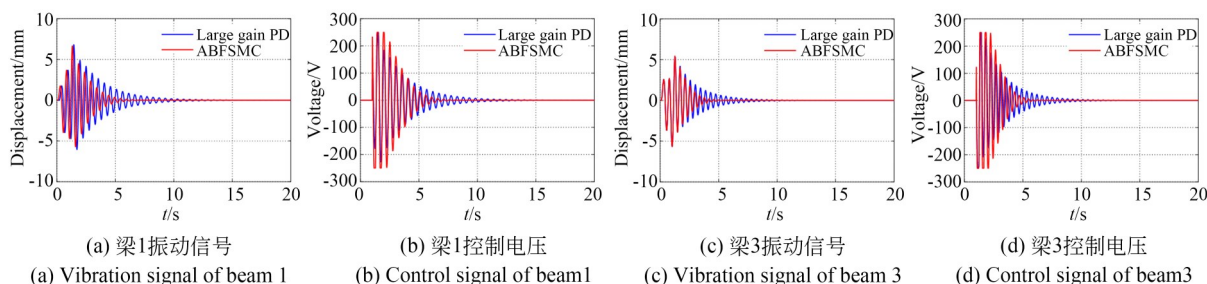


图 6 梯形轨迹激励后控制仿真结果

Fig. 6 Control simulation results after trapezoidal trajectory excitation

5.4 实验结果

通过激光位移传感器对柔性梁 3 的 PZT 信号进行标定,将其从电压信号转换为位移信号。采用 3.1 节的标定方法对相机内外参数及靶标平面、激光反射平面、激光平面以及梁面法向量等进行标定,使用标定后的线激光视觉测振系统和 PZT 传感器同时采集柔性梁的振动信号。如图 7(a)所示,可以看到,在振动幅值较小时,线激光视觉测振系统采集的信号和 PZT 传感器采集的振动信号仍能基本拟合,振动测量精度小于 0.1 mm。线激光视觉测振系统的测量误差主要来源于相机标定、激光平面拟合和图像处理过程中的计算误差。通过采用高质量的棋盘格标定板拍摄 25 张以上不同姿态的图片,利用张正友标

定法保证了相机内外参的准确性;同时,在图像处理中,通过高斯滤波有效抑制了环境光噪声,并利用 canny 算子和几何矩计算保证了光斑中心提取的亚像素级精度,从而将总误差控制在较小范围内。

该测量精度完全满足本研究的实验要求,在本次实验中,梁 3 在开始控制时的振动幅值在 5~10 mm。0.1 mm 的测量误差远小于初始振动位移,足以精确捕捉系统的动态响应特性,为控制器提供可靠的反馈。当振动幅值被控制在 0.1 mm 以内时,即可认为振动已被基本消除,因此该测量精度对验证所提 ABFSMC 控制器的有效性是充分的。

定点激励后,柔性梁 1 和柔性梁 3 的自由振

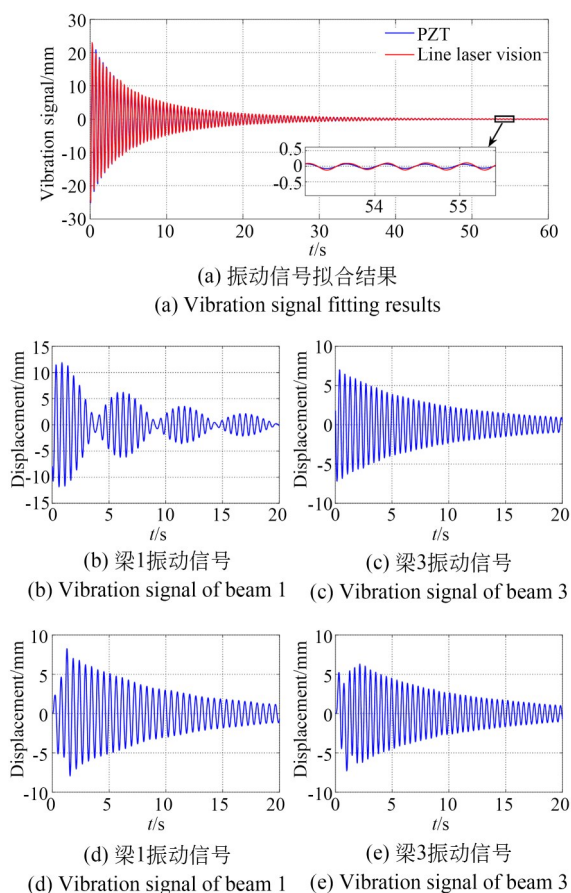


图7 自由振动实验

Fig. 7 Free vibration experiment

动信号如图7(b)和图7(c)所示。梯形轨迹激励后的柔性梁1和柔性梁3的自由振动信号如图7(d)和图7(e)所示。

定点激励后,梁1在ABFSMC控制器和PD控制器控制下的实验结果比较如图8(a)和图8(b)所示。在ABFSMC控制器控制下,柔性梁的振动大约在9 s左右被完全抑制,在PD控制器需要15 s左右才能达到相同的控制效果。对于单柔性梁系统,定点激励后的ABFSMC控制器和PD控制器的实验结果比较如图8(c)和图8(d)所示。在ABFSMC控制下,柔性梁的振动在4 s左右被完全抑制,而在PD控制下,大约需要10 s左右才能达到相同的控制效果。梁3的ABFSMC控制器的自适应参数变化曲线如图8(e)所示,梁3的功率谱密度(PSD)如图8(f)所示。

梯形轨迹激励后,梁1在ABFSMC控制器和PD控制器控制下的实验结果比较如图9(a)和图9(b)所示。在ABFSMC控制下,柔性梁的振

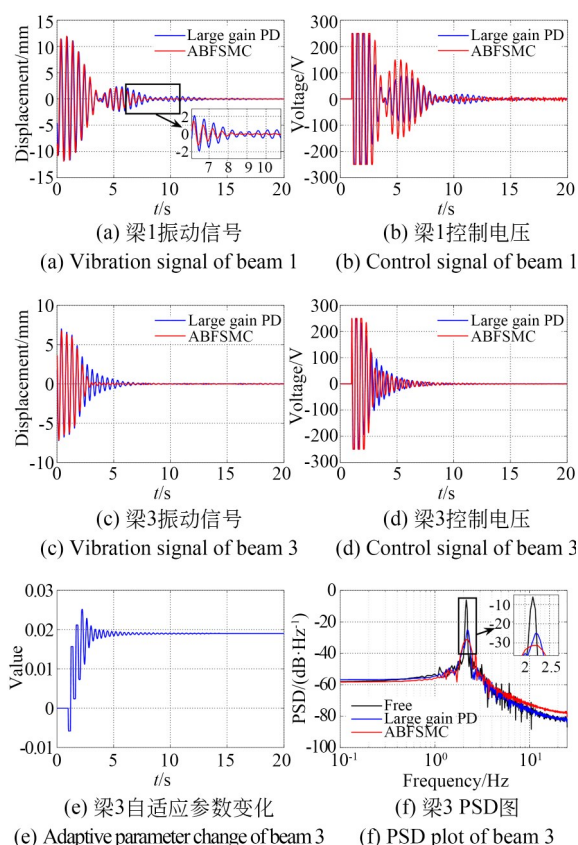


图8 定点激励后控制实验结果

Fig. 8 Control experiment results after fixed-point excitation change of beam 3

动在9 s左右被完全抑制,而PD控制需15 s左右才能达到相同的控制效果。对于单柔性梁系统,梯形轨迹激励后的ABFSMC控制器和PD控制器的实验结果比较如图9(c)和图9(d)所示。在ABFSMC控制下,柔性梁的振动在4 s左右被完全抑制,而在PD控制下,大约需要10 s左右才能达到相同的控制效果。梁3的ABFSMC控制器的自适应参数变化曲线如图9(e)所示。柔性梁3的PSD图如图9(f)所示。

实验结果与仿真结果基本吻合,验证了所辨识模型的准确性。在大幅值振动阶段,两种控制器的性能受限于物理输出饱和,因此表现相近。而在小幅值振动阶段,PD控制器因其线性特性而输出乏力,ABFSMC则凭借滑模控制的非线性切换和自适应模糊系统的非线性补偿能力,依然能保持强劲的输出,从而实现更快速的振动抑制。另外,实验的控制效果相比仿真稍差,且在使用ABFSMC将柔性梁的振动完全抑制后,实

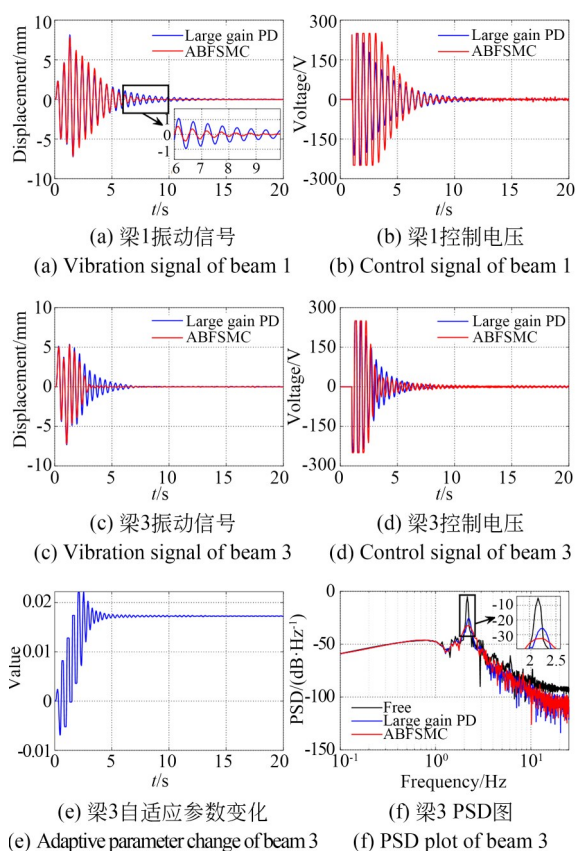


图9 梯形轨迹激励后控制实验结果

Fig. 9 Control experiment results after trapezoidal trajectory excitation change of beam 3

验结果中仍有小的电压毛刺,这些性能差异和电压毛刺的产生是由于实际实验系统中存在的测量噪声、环境干扰、滞后非线性和其他不确定性等造成的。尽管如此,所设计的ABFSMC控制

器仍能快速有效抑制柔性梁的振动,且性能明显优于传统的大增益PD控制。

6 结 论

本文搭建了一个由三根柔性梁组成的耦合多体系统实验平台,并利用哈密顿原理和有限元方法对其进行了动力学建模,结合小波变换和霜冰优化算法对系统的状态空间参数进行辨识。从而获得了更精确的系统模型。通过激光位移传感器和线激光视觉测振系统,实现对柔性梁振动的高精度测量,线激光视觉测振系统的精度在0.1 mm以内。针对柔性梁的主动振动控制问题,设计了ABFSMC控制器,并在定点激励和梯形轨迹激励两种激励方式下,分别与传统的大增益PD控制器的控制效果进行了对比分析,仿真与实验结果表明,所设计的ABFSMC控制器在振动抑制方面明显优于传统的PD控制器,在定点激励实验中,ABFSMC控制器能在9 s左右将双柔性梁耦合系统的振动完全控制下来,而PD控制器需要15 s左右才能达到相同的控制效果。

作者贡献声明:

胡忠礼:控制器设计,软件编程,实验验证,论文构思和撰写,数据管理;

邱志成:测量方法的提出,指导,审核与编辑写作,获取资助,提供资源;

李旻:论文审核与编辑写作。

参考文献:

- [1] YAN Z, LAI X Z, MENG Q X, *et al.* Double-loop frame-based adaptive neural sliding-mode control of single-input 3-DOF flexible-joint manipulator [J]. *International Journal of Systems Science*, 2024, 55(6): 1177-1190.
- [2] ZHAO B Y, YAO X M, ZHENG W X. Fixed-time composite anti-disturbance control for flexible-link manipulators based on disturbance observer[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2024, 71(7): 3390-3400.
- [3] LIANG D, SONG Y M, QI Y, *et al.* Efficient modeling and integrated control for tracking and vibration of a lightweight parallel manipulator including servo motor dynamics [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 153: 107502.
- [4] LIU X C, WANG M H, ZHENG Y H, *et al.* Fuzzy PI vibration suppression control strategy for space double flexible telescopic manipulator with fractional disturbance observer [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2024, 155: 109579.
- [5] 方虹斌, 郑立, 张琦炜, 等. 柔性机械臂动力学建模研究进展 [J]. *动力学与控制学报*, 2023, 21(12): 5-21.

FANG H B, ZHENG L, ZHANG Q W, *et al.* Research progress on dynamics modeling of flexible ro-

- botic arms: a review[J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2023, 21(12): 5-21. (in Chinese)
- [6] DU S J, ZHOU J W, LI F M. Dynamic deformation monitoring of cantilever beams using piezoelectric sensors: Theory and experiment[J]. *Measurement*, 2024, 227: 114305.
- [7] GUO Z K, JIANG S, SHEN Y J, *et al.* Nonlinear dynamic analysis and vibration reduction of two sandwich beams connected by a joint with clearance[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 223: 111828.
- [8] 马天兵, 宫晗, 杜菲, 等. 基于线结构光和优化 PID 的压电柔性机械臂振动控制[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(11): 2661-2671.
- MA T B, GONG H, DU F, *et al.* Piezoelectric flexible manipulator vibration control based on line structured light and optimized PID[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(11): 2661-2671. (in Chinese)
- [9] 孙猛超, 李铁军, 史家浩, 等. 基于双目视觉的三维振动测量方法研究[J]. *传感器与微系统*, 2022, 41(10): 26-29.
- SUN M C, LI T J, SHI J H, *et al.* Research on 3D vibration measurement method based on binocular vision[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2022, 41(10): 26-29. (in Chinese)
- [10] 陈磊, 钟凯, 朱涛, 等. 高超声速风洞试验段环境飞行器颤振的视觉三维测量[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(8): 1811-1821.
- CHEN L, ZHONG K, ZHU T, *et al.* Visual three-dimensional measurement of aircraft flutter in hypersonic wind tunnel tests[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(8): 1811-1821. (in Chinese)
- [11] MILOVANOVIC M B, ANTIC D S, MILOJKOVIC M T, *et al.* Adaptive control of nonlinear MIMO system with orthogonal endocrine intelligent controller[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(2): 1221-1232.
- [12] QIU Z C, HU Z L, ZHANG X M. Fuzzy neural network vibration control of three flexible coupled beams [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2025, 305: 110766.
- [13] SHANG D Y, LI X P, YIN M, *et al.* Dynamic modeling and rotation control for flexible single-link underwater manipulator considering flowing water environment based on modified Morison equation [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 291: 116427.
- [14] HOU S X, QIU Z Y, CHU Y D, *et al.* Hybrid intelligent control using hippocampus-based fuzzy neural networks for active power filter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 39(12): 15924-15942.
- [15] QIU Z C, HU Z L. Biological evolution reinforcement learning vibration control of a three-flexible-beam coupling multi-body system[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 231: 112634.
- [16] SUN X G, CHI W C, WANG Y Q. Linear active disturbance rejection control algorithm for active vibration control of piezo-actuated beams: Theoretical and experimental studies [J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 199: 111782.
- [17] YAN W, ZHAO T, NIU B, *et al.* Adaptive T-S fuzzy control for an unknown structure system with a self-adjusting control accuracy[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, 22: 944-957.
- [18] ZHANG X Y, HAN T, XIAO B, *et al.* Velocity-free prescribed performance control of dual-arm manipulator based on neural networks [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2024, 71(7): 3468-3472.
- [19] ZHOU S Y, CHENG Y H, ZHAO J, *et al.* Neuroadaptive control of robotic systems with intermittent state feedback and triggering adaptation [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2024, 112(24): 22131-22144.
- [20] YANG X H, HAO Z YZ, LI Y T, *et al.* Adaptive neural network control of manipulators with uncertain kinematics and dynamics [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 133: 107935.
- [21] 邱志成, 杨阳. 基于 RBF 反步滑模的多柔性梁耦合系统振动控制[J]. *振动测试与诊断*, 2025, 45(1): 110-115, 203.
- QIU Z C, YANG Y. Vibration control of multi-flexible beam coupling system based on RBF backstepping sliding mode [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2025, 45(1): 110-

- 115, 203. (in Chinese)
- [22] FANG Y M, FEI J T, HU T Y. Adaptive back-stepping fuzzy sliding mode vibration control of

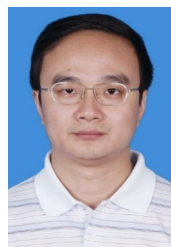
flexible structure [J]. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2018, 37 (4): 1079-1096.

作者简介:



胡忠礼(2002—),男,湖南益阳人,硕士研究生,就读于华南理工大学机械与汽车工程学院,主要从事多柔性梁耦合系统的智能振动控制研究。E-mail:hzl2485806020@163.com

通讯作者:



李 旻(1974—),男,江西南昌人,博士,教授,硕士研究生导师,2003年于上海大学获得博士学位,主要从事机械设计理论与方法、机器人技术与应用方面的研究。E-mail:limin@scut.edu.cn