

文章编号 1004-924X(2023)22-3245-11

双柔性梁振动激光视觉测量与自适应协同控制

邱志成, 胡骏飞, 李 旻*

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 双柔性梁耦合结构常用于航天领域, 如太阳翼伸展结构、太阳能电池阵等。针对双柔性耦合梁系统振动非接触测量和控制问题, 构建了基于点激光结构光视觉系统的测控实验平台, 进行了点激光视觉振动测量研究和振动控制算法设计。对点激光视觉系统进行标定, 通过图像处理结合几何方法提取了柔性梁的振动信号。建立了系统动力学模型, 采用小波变换和优化方法辨识状态空间方程参数。设计了直接自适应模糊协同控制器(Direct Adaptive Fuzzy Cooperative Controller, DAFC)进行双柔性梁系统的振动主动控制, 采用羚羊优化算法基于辨识模型优化控制器参数。在双柔性耦合梁系统固定和平移运动两种情况下, 进行了振动视觉检测和控制实验研究。实验结果表明: 所设计的点激光视觉传感器有较好的振动测量精度, DAFC 控制器相比于 PD 控制器有更好的控制效果, 可以更加快速地抑制双柔性耦合梁的振动。

关键词: 激光视觉; 双柔性耦合梁; 自适应模糊协同控制; 羚羊优化算法

中图分类号: TP212.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233122.3245

Laser vision measurement and adaptive cooperative vibration control of double flexible beams

QIU Zhicheng, HU Junfei, 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: Double-flexible-beam-coupling structures are widely used in the aerospace field, such as in solar-wing-extension structures and solar-cell arrays. However, non-contact vibration measurements and system control are some issues associated with double-flexible-coupled-beam systems. To address these, herein, a measurement and control experimental platform based on a point-laser-structured-light-vision system was constructed, and point-laser-visual-vibration-measurement research and vibration-control-algorithm design were conducted. The point-laser-vision system was calibrated, and the vibration signal of the flexible beam was extracted via image processing combined with a geometric method. The system-dynamics model was established, and the parameters of the state-space equation were identified using a wavelet transform and optimization method. A direct adaptive fuzzy cooperative (DAFC) controller was designed to actively control the vibration of the double-flexible-beam system, and the Gazelle optimization algorithm was used to optimize the controller parameters based on the identification model. Visual-vibration detec-

收稿日期: 2023-06-12; 修订日期: 2023-08-03.

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (No. 2019A1515011901); 广州市科技计划资助项目 (No. 202002030113); 国家自然科学基金资助项目 (No. 52175093)

tion and control experiments were conducted under fixed and translational motions of the double-flexible-coupled-beam system. The experimental results revealed that the designed point-laser-vision sensor demonstrated an improved vibration-measurement accuracy, and the DAFC controller exhibited a better control effect than the proportional derivative controller, as the former could suppress the vibrations of the double-flexible-coupling beam more rapidly.

Key words: laser vision; double flexible coupled beams; adaptive fuzzy cooperative control; gazelle optimization algorithm

1 引言

柔性结构在航天器中得到了应用,如空间机械手、太阳帆部件等^[1]。由于重量轻、阻尼小,常常引起长时间的振动^[2]。尤其是对于多柔性体耦合的系统,如太阳翼伸展装置^[3]、航天器太阳能电池阵等^[4],具有复杂的结构、强耦合动力学和非线性因素。因此,研究多柔性体系统的振动控制具有重要意义。

振动控制通常基于振动信号的反馈控制,精准测量振动信号直接决定了控制效果。振动测量的方法可分为接触式测量和非接触式测量。接触式测量需要传感器接触柔性结构,包括压电传感器、加速度传感器等。这类传感器会对柔性结构增加额外负载,改变柔性结构的物理特性。非接触式传感器不外加额外负载,并且测量区间更大。视觉传感器、激光位移传感器等都属于非接触式传感器。Sun 等人^[5]提出了一种基于视觉和深度学习的三维结构位移测量方法,具有较好的识别精度。Neri 等人^[6]采用低速相机测量频率为千赫兹级别的振动。陈磊等人^[7]通过立体视觉三维测量技术测量风洞实验中飞行器的颤振数据。相比于双目视觉振动检测传感器,点激光视觉传感器无需粘贴标志点,并且受环境光影响小,抗干扰性能好。

常见的控制器包括基于模型的控制器和无模型的控制器。基于模型的控制器利用模型知识,控制器设计包含被控对象的数学模型。Long 等人^[8]提出了一种基于模型的滑模和强化学习控制器。Liu 等人^[9]采用哈密顿原理建立模型,设计了一种柔性板自适应控制策略。刘宝等人^[10]基于生物生长激素的调节原理,提出了一种协同控制器,并采用优化方法设计控制器参数。无模型控制基于与期望状态的偏差进行控制。Du 等

人^[11]采用无模型预测控制方法进行柔性臂振动控制。Boscariol 等人^[12]提出了一种无模型的非线性柔性连杆振动控制器。马天兵等人^[13]采用机器视觉方法测量机械臂振动,采用改进 PID 进行振动抑制。王立新等人^[14]提出一种直接自适应模糊控制器,构建了控制的模糊逻辑系统。

本文对双柔性耦合梁结构的振动测量与控制进行了研究。提出了一种点激光视觉振动测量方法,采用直接自适应模糊协同控制方法进行柔性梁振动主动控制,进行了双柔性耦合梁振动检测与控制实验研究,验证了点激光视觉测量方法和振动控制算法的有效性。

2 实验系统结构与建模

2.1 双柔性梁耦合系统介绍

移动双柔性梁耦合系统的实验台如图 1 所示。系统由两根柔性压电梁和三根线性弹簧组成,分别固定在柔性梁或刚体的两端,形成一个刚柔耦合的运动系统,它们一起安装在刚性的滑动台上。刚性滑动台由一个带滚珠丝杠的伺服电机驱动,丝杠的型号为 KR55,其导程和行程分别为 20 mm 和 980 mm,定位精度为 ± 0.01 mm,

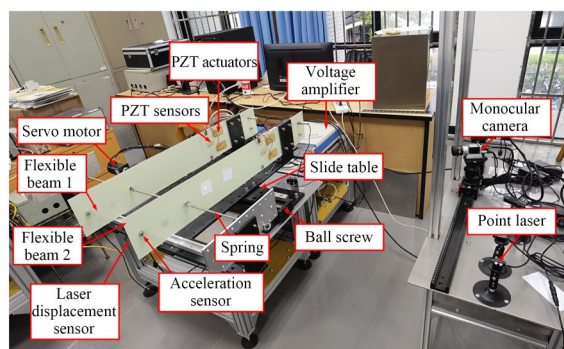


图 1 双柔性梁耦合系统

Fig. 1 Double flexible beam coupling system

编码器读取电机的角位移和角速度。两个激光位移传感器被固定在距离柔性梁 100 mm 的地方,用来测量柔性梁测量点的振动位移,激光位移传感器的测量精度为 30 μm 。柔性梁 1 的振动信号由激光位移传感器获取,柔性梁 2 的振动信息由点激光视觉振动检测系统测量。点激光视觉检测系统包括 1 台 Basler 相机和一个点激光发射器。两根柔性梁的末端各安装一个质量为 51.75 g 的加速度传感器,可用来测量末端的加速度和模拟集中质量,在本系统中主要作末端负载使用,该研究并没有用加速度传感器进行振动测量。系统采用 Googoltech 公司的多通道运动控制卡进行振动控制。双通道压电放大器用于将运动控制卡的输出信号从 $-5\sim 5\text{ V}$ 放大到 $-260\sim 260\text{ V}$ 以驱动压电执行器。

柔性梁的主动振动控制是通过采用粘贴在梁根部固定端表面的 PZT(锆钛酸铅)驱动器实现的。梁和 PZT 驱动器的尺寸参数和材料参数列于表 1。

表 1 梁和 PZT 执行器的尺寸参数和材料参数^[15]

Tab.1 Dimensions and material parameters of flexible beams and PZT patches^[15]

Parameter	Flexible Beam	PZT
Dimensions/(mm $\times$ mm $\times$ mm)	800 $\times$ 150 $\times$ 2	60 $\times$ 25 $\times$ 2
Density/(kg $\cdot\text{m}^{-3}$)	1 980	7 500
Poisson's ratio	0.33	0.36
Young's modulus/GPa	27.2	56
Permittivity/(F $\cdot\text{m}^{-1}$)	—	3 200
d31/(m $\cdot\text{V}^{-1}$)	—	$-275\times(-10)^{-12}$

2.2 动力学建模与参数辨识

采用哈密顿原理和有限元方法进行系统动力学建模^[16],得到系统状态空间方程

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + B_{\text{PZT}}U, \\ Y = CX \end{cases} \quad (1)$$

其中: $X = [\delta \quad \dot{\delta}]^T$ 为状态向量, A 为模态状态矩阵, B_{PZT} 为 PZT 控制矩阵, $U = [V_1 \quad V_2]^T$ 为 PZT 驱动器的输入电压向量, C 为观测矩阵。

采用小波辨识方法^[17]和优化方法辨识获得

状态空间方程参数为:

$$\begin{aligned} \hat{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -141.3377 & 0 & -0.1300 & 0 \\ 0 & -170.2451 & 0 & -0.1195 \end{bmatrix}, \\ \hat{C} &= \begin{bmatrix} 0.9492 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -0.9484 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \hat{B}_{\text{PZT}} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.0059 & 0.0047 \\ 0 & 0 & 0.0095 & -0.0106 \end{bmatrix}^T. \end{aligned}$$

系统模型中饱和双柔性耦合梁系统的前两阶振动模式,分别是双柔性梁第一阶同向振动模式和第二阶反向振动模式,从辨识矩阵参数可以看出柔性梁存在耦合关系。

3 点激光视觉振动检测

点激光视觉可以通过单目相机加激光的方式进行柔性梁的振动测量。采用点激光视觉传感器进行移动柔性梁的振动测试方案,对相机标定、图像处理、振动量计算等方面进行了分析。

3.1 点激光视觉检测系统

视觉检测系统主要由点激光投射器,单目工业相机构成,其中单目相机有效像素为 200 万,其系统原理图如图 2 所示。点激光投射圆形光斑至柔性梁面,相机实时拍摄激光点,通过激光方程,柔性梁面法向量与相机内外参,求解出激光点的三维位置信息,从而得到柔性梁的横向振动信号。

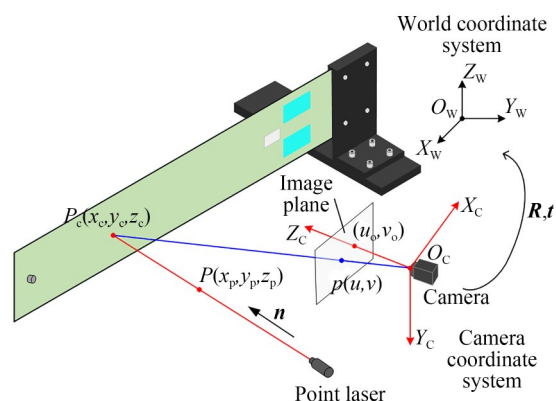


图 2 视觉测量系统原理图

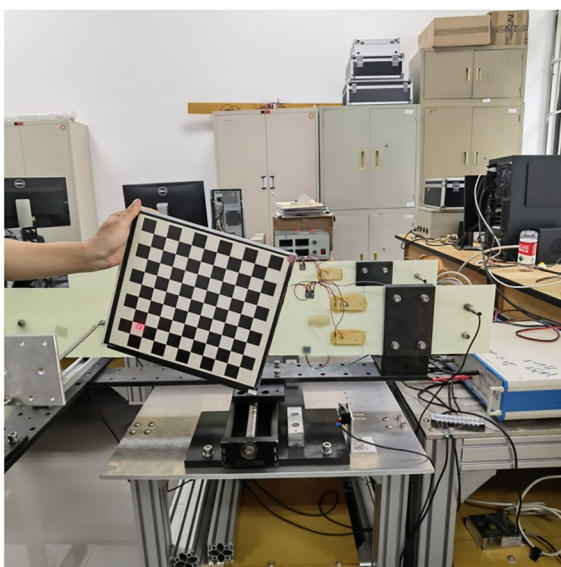
Fig. 2 Schematic diagram of vision measurement system

3.2 系统标定

3.2.1 相机标定

采用张正友标定法^[18]进行相机参数标定。如图 3(a)所示,拍摄多张不同角度的棋盘格图片,包括激光发射器投射点,拍摄的照片还可用于点激光标定,进行相机内外参标定。

根据相机的成像理论,相机成像可以写作如



(a) 内外参及激光线标定

(a) Calibration of internal and external parameters and laser line



(b) 梁的法向量标定

(b) Calibration of normal vector of beam

图 3 相机标定图片

Fig. 3 Camera calibration pictures

式(2)和式(3)^[18]:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_o & 0 \\ 0 & f_y & v_o & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} f_x & 0 & u_o & 0 \\ 0 & f_y & v_o & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中:\$(u, v)\$为相机拍摄图像坐标系下的坐标;\$(x_w, y_w, z_w)\$为世界坐标系下的三维坐标;\$(x_c, y_c, z_c)\$为相机坐标系下的三维坐标;\$f_x, f_y\$分别为\$u\$和\$v\$轴的焦距;\$(u_o, v_o)\$为光心坐标,以上为相机的内部参数,一般出厂就已经固定,矩阵\$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_o \\ 0 & f_y & v_o \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\$即为相机的内参矩阵。\$R\$和\$t\$分别为

旋转矩阵和平移矩阵,组成了描述相机坐标系和世界坐标系的关系相机的外部参数,\$[r_1 \ r_2 \ t]\$即为相机的外参矩阵。

3.2.2 点激光标定

激光方程的标定包括激光线在空间的方向向量以及激光线上某一点\$P\$的三维坐标。因激光点在标定板平面上所以\$z_w = 0\$,有:

$$A_i^c \cdot x_{ci} + B_i^c \cdot y_{ci} + C_i^c \cdot z_{ci} + D_i^c = 0, \quad (4)$$

其中:\$(A_i^c, B_i^c, C_i^c, D_i^c)\$为第\$i\$张相机拍摄的带有激光点标定板图片的标定板面方程系数;\$(x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})\$为第\$i\$张标定板图片上激光点在相机坐标系下的三维坐标,该坐标可通过求解以下方程获得:

$$\begin{bmatrix} f_x & 0 & u_o - u_i \\ 0 & f_y & v_o - v_i \\ A_i^c & B_i^c & C_i^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \\ z_{ci} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -D_i^c \end{bmatrix}. \quad (5)$$

获得所有拍摄图片的激光点三维坐标后,进行直线拟合获得激光方程。拟合目标为:

$$\min \sum_{i=1}^N d_i^2, \quad (6)$$

其中:\$d_i\$为每个激光点到拟合激光线的距离。直线上一点\$P\$的坐标为取标定板不同位置和姿态时,标定板上投射的激光点坐标的平均值。

激光线方程可以表示为:

$$\frac{x_c - x_p}{n_x} = \frac{y_c - y_p}{n_y} = \frac{z_c - z_p}{n_z} = K, \quad (7)$$

其中: (x_p, y_p, z_p) 为激光线上一点 P 的坐标; (n_x, n_y, n_z) 为激光直线的方向向量; K 为中间变量。

3.2.3 梁面法向量标定

柔性梁面的法向量标定需要采用粘贴在梁上的标定板,如图 3(b)所示。将滑台移动至丝杠不同位置采用单目相机拍摄图片,对标定板外参进行标定。导出标定板平面方程,获得所有拍摄图片的柔性梁面法向量后,求解最优梁面法向量,优化目标为:

$$\min \sum_{i=1}^N \theta_i, 0^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ, \quad (8)$$

其中, θ_i 为第 i 个法向量与最终求解法向量的夹角。

3.3 图像处理

在标定过程和振动检测过程中都需要对拍摄图像进行处理,从所拍摄图像中提取有价值信息,这里主要采用 OpenCV 库对激光点进行图像处理,如图 4 所示。

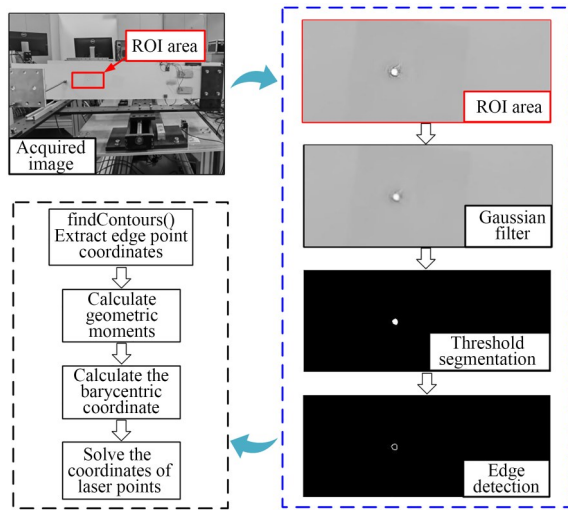


图 4 图像处理过程

Fig. 4 Process of image processing

为了提高处理速度,设置 ROI (Region of Interest) 区域对实时采集图像进行裁剪,ROI 的选取原则为:在柔性梁平移运动和振动时,激光点均在 ROI 范围内,同时 ROI 选取范围越小越好。

在本系统中图片的像素大小为 $1\,600 \times 1\,200$, 设置的 ROI 像素范围为以 $(200, 500)$ 为起点,向右下长宽为 $800, 300$ 像素的矩形范围。后续只对该区域进行图像处理。

采用高斯滤波处理图像噪点,采用 Canny 算子对激光点进行阈值分割获得激光点的外轮廓线,采用 findContours 函数提取边缘点集,通过计算图像的几何矩计算边缘轮廓的重心坐标。

柔性梁的振动检测包括滑台固定时的定点振动检测和滑台移动时的实时振动检测。由式 (5) 可以得到激光点在相机坐标系下坐标 (x_c, y_c, z_c) 和二维投影点坐标 (u, v) 满足:

$$\begin{cases} f_x \cdot x_c + (u - u_o) \cdot z_c = 0 \\ f_y \cdot y_c + (v - v_o) \cdot z_c = 0 \end{cases} \quad (9)$$

代入式 (7) 有:

$$\begin{bmatrix} f_x n_x - (u - u_o) \cdot n_z \\ f_y n_y - (v - v_o) \cdot n_z \end{bmatrix} \cdot \mathbf{K} = \begin{bmatrix} (u - u_o) \cdot z_p - f_x x_p \\ (v - v_o) \cdot z_p - f_y y_p \end{bmatrix} \quad (10)$$

最小二乘法计算中间变量 $\mathbf{K}$ 代入式 (10) 可得相机坐标系下激光点三维坐标:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} + \frac{a_1 b_1 + a_2 b_2}{a_1^2 + a_2^2} \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中: $a_1 = f_x n_x - (u - u_o) \cdot n_z$; $a_2 = f_y n_y - (v - v_o) \cdot n_z$; $b_1 = (u - u_o) \cdot z_p - f_x x_p$; $b_2 = (v - v_o) \cdot z_p - f_y y_p$ 。

取滑台固定时 50 帧柔性梁静止时的图像,计算出初始激光点三维位置 P_0 , 则 t 时刻的振动量为

$$\text{dis } P_t P_0 = \text{sgn}(z_t - z_o) \cdot |P_t P_0|, \quad (12)$$

其中: $|P_t P_0|$ 为两点距离的绝对值;sgn 为符号函数,在建立的相机坐标系中,振动量的正负可以由 t 时刻激光点 z 坐标相对于初始激光点的 z 坐标的位置确定。

当电机驱动滑台进行移动时,柔性梁面的初始参考位置发生改变,根据电机编码器速度信息对初始参考点坐标进行修正。

如图 5 所示,滑台在柔性梁面法向量方向移动,移动距离由电机编码器速度信息积分获得,由 3.2.3 节标定的柔性梁法向量与 3.2.2 节标定的激光法向量可计算出初始参考点沿激光线方

向移动的距离:

$$|P_t P_0'| = \frac{20}{\cos\left(\frac{\pi\alpha_0}{180}\right)} \cdot L_t, \quad (13)$$

其中:20为丝杠的导程,单位mm; $L_t = \int_0^t v_{\text{motor}} dt$ 为柔性梁平移的距离, v_{motor} 为编码器速度读数,单位r/s; α_0 为梁面法向量与激光方向向量夹角,单位rad。

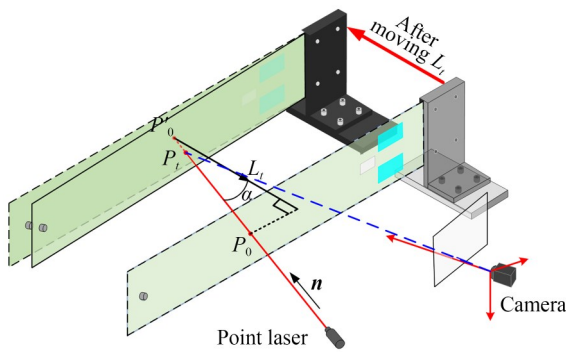


图5 柔性梁移动时振动检测示意图

Fig. 5 Schematic diagram of vibration detection when the flexible beam is moving

将该线段分别投影至相机坐标系的三个坐标轴上获得移动后的初始参考点坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_0' \\ y_0' \\ z_0' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \frac{L_t}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \cdot \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}. \quad (14)$$

在移动过程中 t 时刻柔性梁面的振动量为:

$$\text{dis } P_t P_0' = \text{sgn}(z_t - z_0') \cdot |P_t P_0'|. \quad (15)$$

3.4 测量校正

为了保证两柔性梁测得的振动量统一,采用与检测柔性梁1一致的激光位移传感器校正点激光视觉传感器。采用激光位移传感器和视觉传感器分别采集柔性梁2自由振动的信息,通过优化算法搜索点激光视觉传感器的幅值校正系数和校正相位。幅值校正是校正点激光视觉和激光位移传感器检测振动幅值信息,相位校正是因为图片的处理耗时使得视觉检测系统检测振动测量会滞后于激光位移传感器。

4 直接自适应模糊协同控制器设计

直接自适应模糊协同控制器包括直接自适

应模糊控制器和智能协同控制器两部分。其中直接自适应模糊控制为主要控制律,基于模糊规则进行反馈,对外界环境或实验系统存在的不确定性或干扰有较好的鲁棒性;协同控制器利用生物激素分泌的知识对控制量进行增强或抑制的补偿,从而获得一个较好的控制效果。

4.1 模糊控制器设计

直接自适应模糊控制器为^[14]:

$$u_D = (x|\theta) = \theta^T \xi(x), \quad (16)$$

其中: $\xi(x)$ 为 $\prod_{i=1}^n m_i$ 维向量,其第 $l_1, l_2, \dots, l_n$ 个元素为^[14]:

$$\xi_{l_1, \dots, l_n}(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{\lambda_i}^{l_i}(x_i)}{\sum_{l_1=1}^{m_1} \dots \sum_{l_n=1}^{m_n} (\prod_{i=1}^n \mu_{\lambda_i}^{l_i}(x_i))}. \quad (17)$$

由式(16)得:

$$e^{(n)} = -K^T e + b[u^* - u_D(x|\theta)]. \quad (18)$$

根据系统的双梁结构,令:

$$\Lambda^i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_{i1} & -k_{i2} \end{bmatrix}, b^i = \begin{bmatrix} 0 \\ b_i \end{bmatrix}, \quad (19)$$

其中: $i=1, 2$ 分别对应两根柔性梁。

式(31)可以写成:

$$\dot{e} = \Lambda^i e + b[u^* - u_D(x|\theta)]. \quad (20)$$

定义最优参数为:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta \in R^n} [\sup_{x \in R^n} |u_D(x|\theta) - u^*|]. \quad (21)$$

定义最小逼近误差为:

$$\omega = u_D(x|\theta^*) - u^*. \quad (22)$$

自适应律为^[14]:

$$\dot{\theta} = \gamma e^T p_n \xi(x). \quad (23)$$

4.2 协同控制器设计

协同控制器^[10]是基于人体生长激素双向调节机制设计的一种智能控制器。控制器原理如图6所示。设计包含增强控制单元和抑制控制单元的融合控制方法对直接自适应模糊控制律 u_D 进行优化。仿照人的激素调节规律,当偏差大小发生变化时,增强和抑制控制单元分别输出对应的控制补偿量。

设增强控制单元的输出量为:

$$u_+(t) = \alpha \cdot f_+[e(t), \dot{e}(t)], \quad (24)$$

其中: $f_+(\cdot)$ 为增强控制单元控制律, $\alpha > 1$ 为增强因子。

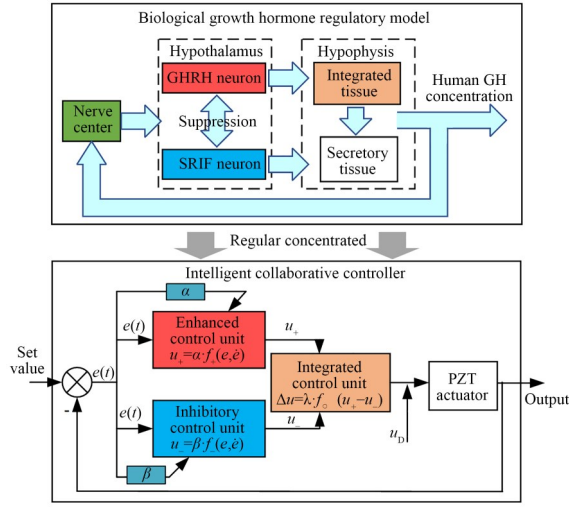


图 6 智能协同控制器原理图

Fig. 6 Schematic diagram of intelligent collaborative controller

设抑制控制单元的输出量为:

$$u_{-}(t) = \beta \cdot f_{-}[e(t), \dot{e}(t)], \quad (25)$$

其中: $f_{-}(\cdot)$ 为抑制控制单元控制律, $\beta > 0$ 为抑制因子。

设融合控制单元的输出量为:

$$\Delta u(t) = \lambda \cdot [u_{+}(t) - u_{-}(t)], \quad (26)$$

其中, λ 为正数。

根据人体 GHRH 和 SRIF 激素分泌机理^[19-20], 对协同控制器增强因子和抑制因子进行设计:

$$\alpha^i = A_{i1} \cdot \frac{|e^i(t)|^{n_1}}{A_{i2} + |e^i(t)|^{n_1}} + A_{i3}, \quad (27)$$

$$\beta^i = \delta \cdot \left(B_{i1} \cdot \frac{1}{B_{i2} + |e^i(t)|^{n_2}} + B_{i3} \right), \quad (28)$$

其中: $i = 1, 2$ 分别对应两根柔性梁, $|e^i(t)|$ 为偏差绝对值; $A_{i1 \sim i3}, B_{i1 \sim i3}$ 和 $n_{1 \sim 2}$ 为大于零实数, δ 为失效因子, 当 $J_M \geq \varepsilon$ 时 (阈值 ε 为正实数, $J_M = \sqrt{\delta^2 + \left(\frac{\dot{\delta}}{\omega_{ni}}\right)^2}$ 为柔性梁振动模态指标), $\delta = 0$, 反之 $\delta = 1$ 。

4.3 控制器参数优化

羚羊优化算法^[21]模拟了瞪羚逃避捕食者的行为, 对多维参数优化有高效的性能。采用该优化器对直接自适应模糊协同控制器的参数进行优化, 优化对象为双梁对应的 $\mathbf{A}_{1,2}$ 矩阵参数 $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}$ 以及双梁的增强抑制因子参数

$A_{11 \sim 13}, A_{21 \sim 23}, B_{11 \sim 13}, B_{21 \sim 23}$, 参数优化的目标为在目标函数的指导下, 保持和对照 PD 实验相同的初始控制饱和周期, 并且实现更快的振动抑制。

设置优化的适应度函数:

$$J = \int_0^{t_{\text{end}}} (g_1 \cdot \text{sum}(|e(t)|) + g_2 \cdot \text{sum}(u(t)^2) dt + g_3 \cdot t_{\text{end}}, \quad (29)$$

其中: $g_{1 \sim 3}$ 为权重系数; $\text{sum}(\cdot)$ 为对两根柔性梁的偏差绝对值与控制电压平方值求和; t_{end} 为振动停止时间, 设置当双梁的位置误差和速度误差值均小于 0.001 时振动停止。优化的适应度函数为: $f_{\text{fitness}} = 1/J$ 。直接自适应模糊协同控制器的控制律为 $u_{\text{DAFC}} = u_D + \Delta u$ 。

5 柔性梁振动控制实验研究

5.1 标定结果

采集 30 张标定图片, 采用 3.2 节的标定方法得到相机内参标定结果, 如表 2 所示。

表 2 单目相机内参标定结果

Tab. 2 Monocular camera internal reference calibration results

f_x/mm	f_y/mm	u_o/pixel	v_o/pixel
2 684.338 2	2 684.588 1	798.560 7	546.591 9

点激光方程为: $(x_c + 142.466\ 9)/0.318\ 8 = (y_c - 29.037\ 9)/-0.074\ 02 = (z_c - 928.325\ 4)/0.944\ 9$ 。

梁面法向量为 $(-0.309\ 5, 0.075\ 5, -0.947\ 9)$ 。则激光线与梁面法方向夹角 $\alpha_0 = 0.568\ 3^\circ$ 。标定后, 分别用点激光视觉振动检测系统和激光位移传感器同时测量柔性梁 2 的振动信息, 进行比较可知, 点激光结构光的振动测量精度小于 0.1 mm, 满足该实验系统的振动测量要求。

5.2 控制器优化结果

采用辨识后的状态空间模型进行振动控制的仿真优化。设置直接自适应模糊控制部分的

参数 $\gamma=12$;隶属度函数为:

$$\begin{cases} \mu_1=1/\{1+\exp[5(x+2)]\} \\ \mu_2=\exp[-(x+1.5)^2] \\ \mu_3=\exp[-(x+0.5)^2] \\ \mu_4=\exp[-(x-0.5)^2] \\ \mu_5=\exp[-(x-1.5)^2] \\ \mu_6=1/\{1+\exp[-5(x-2)]\} \end{cases},$$

取矩阵 $Q^1=Q^2=\begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$;协同控制器部分的

增强抑制单元控制律为直接自适应模糊控制律;适应度函数权重系数 $g_1=0.999\,6$, $g_2=0.000\,4$, $g_3=200$; $n_1=n_2=1$; $\epsilon=0.17$;参数优化范围设置为:

$$\begin{cases} k_{ij}\in[0,20](i,j=1,2) \\ A_{i1}\in[0,10](i=1,2) \\ B_{i1}\in[0,10](i=1,2) \\ A_{ij}\in[0,5](i=1,2,j=2,3) \\ B_{ij}\in[0,5](i=1,2,j=2,3) \end{cases}.$$

优化结果如表 3 所示。

表 3 控制器参数优化结果

Tab. 3 Controller parameter optimization results

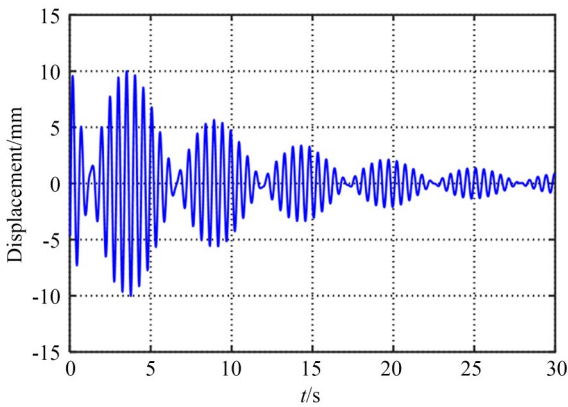
Control parameters	k_{11}	k_{12}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{21}	A_{22}	A_{23}
Value	-2.423 5	-18.093 2	0.001 0	0.771 2	0.004 0	0.004 8	0.321 4	0.536 3
Control parameters	k_{21}	k_{22}	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{21}	B_{22}	B_{23}
Value	-4.660 4	-17.316 5	0.001 0	1.826 7	0.000 5	0.001 1	0.022 9	0.006 6

5.3 实验结果

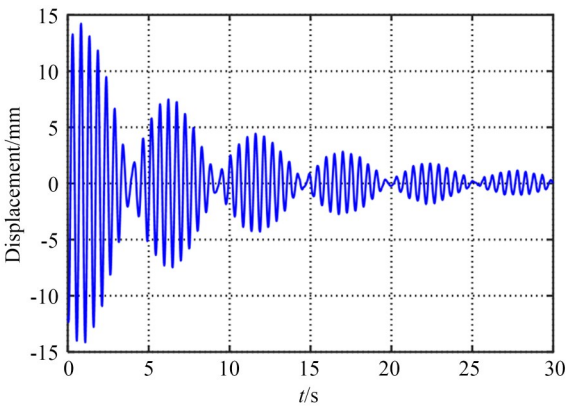
为了验证点激光视觉传感器的检测和 DAFC 控制器的控制效果,采用大增益 PD 控制作为对比。PD 控制参数选择原则是:在初始激励幅值相同的条件下,与 DAFC 控制器保持一致的饱和控制周期。PD 参数选取为 $k_p=10$, $k_d=0.25$;采样频率为 50 Hz;所有实验采用相同的滤波器参数,为了补偿滤波器带来的相位滞后,PD 控制中对信号进行 6 个采样周期的相位补偿,

DAFC 为非线性控制器,鲁棒性较高无需补偿。分别进行滑台固定和移动时的柔性梁系统振动控制实验。

图 7 为滑台固定时柔性梁耦合系统单梁激励下的自由振动信号。柔性梁系统受激后产生了难以快速衰减的振动信号,振动过程存在明显的拍频现象,说明双柔性梁系统具有前二阶振动模态耦合关系。



(a) 梁1振动位移
(a) Vibration signal of beam 1



(b) 梁2振动位移
(b) Vibration signal of beam 2

图 7 自由振动实验

Fig. 7 Free vibration experiment

图 8 为滑台固定时的 DAFC 和 PD 控制实验对比。图 8(a) 和图 8(b) 分别为柔性双梁的振动信号。柔性梁系统在激励柔性梁 2 产生耦合振动后,在 DAFC 控制器开始控制后约 9 s 振动被完全抑制。而在大增益 PD 控制开始 13 s 后,小振幅振动仍然存在。图 8(c) 和图 8(d) 分别为双梁的两种控制方法的控制电压信号对比。从实验

结果可知 DAFC 控制器的控制电压具有非线性特性,在开始控制初期一直保持大的控制量,在大幅值振动被快速抑制,小振幅振动也被迅速抑制。大增益 PD 控制对大值振动抑制效果较好,但进入小振幅振动状态时很难快速抑制,这是因为线性控制器小幅值振动对应小幅值线性控制量。

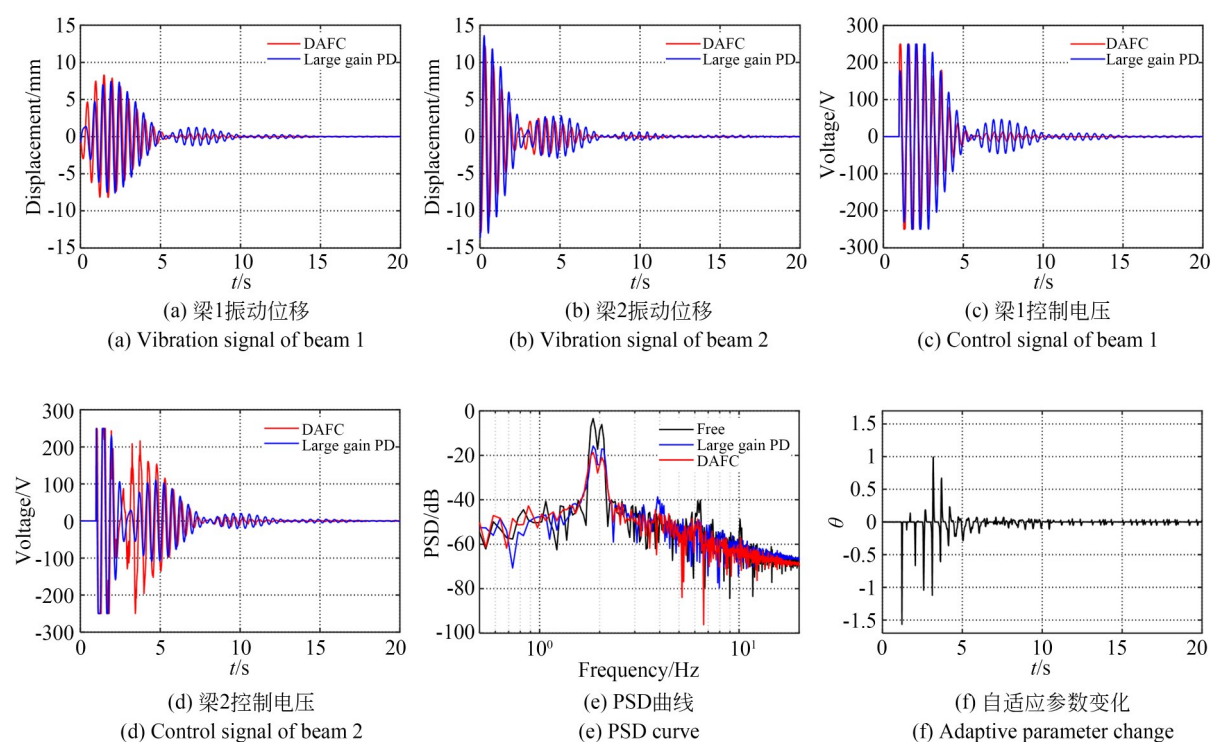


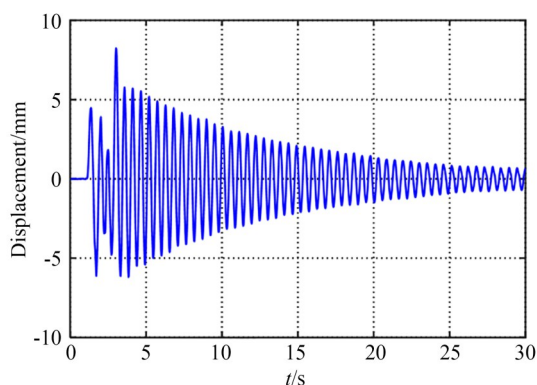
图 8 滑台固定时振动控制实验

Fig. 8 Vibration control experiment when sliding table is fixed

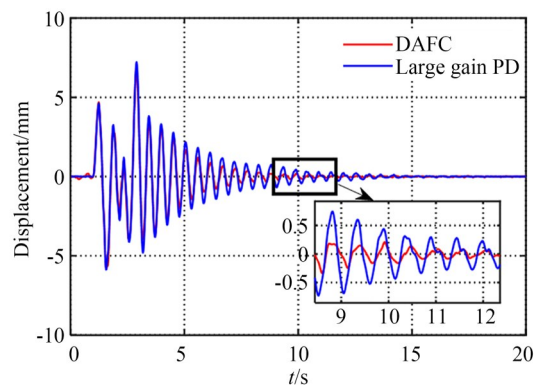
图 8(e) 所示为前 20 s 振动信号的功率谱密度(PSD)图,振动信号的功率谱密度表示了信号中不同频率成分的功率的大小,图中峰值点对应的频率值即为该信号的主要频率成分。在 1.892 0 Hz 和 2.076 5 Hz 位置出现的双峰对应着双柔性梁系统的第一阶同向振动模态和第二阶反向振动模态。可以看出 DAFC 控制下 PSD 峰值低于 PD 控制,并且两种控制的峰值都低于自由振动,验证了 DAFC 算法可以更好地抑制两个主频率上的振动能量,实现更好的控制效果。图 8(f) 为 DAFC 自适应律 θ 的部分参数变化趋势,

随着振动被逐渐控制,自适应参数变化也逐渐趋近稳定。

在系统进行梯形轨迹平移运动时,双柔性梁主要激励第一阶同向弯曲振动模态,如图 9(a) 所示。图 9(b) 为梯形轨迹运动时同时进行压电主动控制下的一阶弯曲模态振动信号。一阶弯曲模态振动在 DAFC 控制器开始控制后约 11 s 振动被完全抑制,而在大增益 PD 控制开始 14 s 后振动才被完全抑制,DAFC 控制器抑振效果更加明显快速。



(a) 自由振动一阶弯曲模态的振动信号
(a) Vibration signal of free vibration first-order bending mode



(b) 控制下一阶弯曲模态的振动信号
(b) First bending modal vibration signal under control

图 9 梯形轨迹移动下的模态振动曲线

Fig. 9 Modal vibration curves under trapezoidal trajectory movement

6 结 论

本文建立了一套基于点激光视觉进行双柔性梁耦合结构振动检测和控制系统。通过有限元和动力学方程建立系统状态空间方程,并采用小波函数和优化方法校正了模型参数。

提出了一种基于点激光视觉的标定、图像

处理和振动测量方法。针对系统中存在的不确定性和非线性因素,为了实现快速振动抑制,采用直接自适应模糊协同控制方法进行振动控制实验研究。实验结果验证了点激光视觉振动测量方法可以达到反馈控制的要求,直接自适应模糊协同控制器在 10 s 左右可以完全抑制振动。

参考文献:

- [1] HU W, XU M, SONG J, *et al.* Coupling dynamic behaviors of flexible stretching hub-beam system [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 151: 107389.
- [2] DWIVEDY S K, EBERHARD P. Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2006, 41 (7): 749-777.
- [3] 赵春娟. 基于耦合动力学分析的挠性太阳翼结构优化设计[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2022.
ZHAO CH J. *Optimization Design on the Structure of Flexible Solar Arrays Based on Coupling Dynamics Analysis*[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)
- [4] 张威. 航天器太阳能电池阵多体系统动力学建模与振动控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2021.
ZHANG W. *Research on Multi-body Dynamics and Vibration Control of Spacecraft Solar Array System*[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021. (in Chinese)
- [5] SUN C, GU D, LU X. Three-dimensional structural displacement measurement using monocular vision and deep learning based pose estimation [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 190: 110141.
- [6] NERI P, PAOLI A, RAZIONALE AV, *et al.* Low-speed cameras system for 3D-DIC vibration measurements in the kHz range[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 162: 108040.
- [7] 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)
- [8] LONG T, LI E, HU Y Q, *et al.* A vibration control method for hybrid-structured flexible manipulator based on sliding mode control and reinforcement learning [J]. *IEEE Transactions on Neural Net-*

- works and Learning Systems*, 2021, 32 (2) : 841-852.
- [9] LIU Z J, HAN Z J, ZHAO Z J, *et al.* Modeling and adaptive control for a spatial flexible spacecraft with unknown actuator failures [J]. *Science China Information Sciences*, 2021, 64(5): 152208.
- [10] 刘宝, 王君红, 丁永生. 一种基于生长激素调节原理的智能协同控制器 [J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(1): 107-110.
LIU B, WANG J H, DING Y S. Intelligent collaborative controller based on growth hormone modulation [J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(1): 107-110. (in Chinese)
- [11] DU Q J, SONG C M, DING W, *et al.* Vibration suppression method of humanoid flexible arm based on model-free predictive control [J]. *Advanced Robotics*, 2021, 35(7): 450-458.
- [12] BOSCARIOL P, SCALERA L, GASPARETTO A. Nonlinear control of multibody flexible mechanisms: a model-free approach [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(3): 1082.
- [13] 马天兵, 周青, 杜菲, 等. 基于机器视觉和改进PID的压电柔性机械臂振动控制 [J]. *光学精密工程*, 2020, 28(1): 141-150.
MA T B, ZHOU Q, DU F, *et al.* Piezoelectric flexible manipulator vibration control based on machine vision and improved PID [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(1): 141-150. (in Chinese)
- [14] 王立新. 自适应模糊系统与控制: 设计与稳定性分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
WANG L X. *Adaptive Fuzzy System and Control: Design and Stability Analysis* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [15] QIU Z C, CHEN S W. Vibration control of a translational coupled double flexible beam system using sliding mode neural network fuzzy control [J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2022, 44(11): 2264-2288.
- [16] 蒋建平, 李东旭. 带挠性附件航天器刚柔耦合动力学 [J]. *上海航天*, 2005, 22(5): 24-27.
JIANG J P, LI D X. Study on rigid-flexible coupling dynamics of spacecraft with flexible appendage [J]. *Aerospace Shanghai*, 2005, 22(5): 24-27. (in Chinese)
- [17] STASZEWSKI WJ. Identification of damping in mdof systems using time-scale decomposition [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, 203(2): 283-305.
- [18] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [19] ZHENG J C, GUO G X, WANG Y Y. Feedforward decoupling control design for dual-actuator system in hard disk drives [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004, 40(4): 2080-2082.
- [20] DING Y S, LIU B, REN L H. A Decoupling Controller Based on the Inverse Control and the Bi-Regulation Principle of Growth Hormone [C]. *Computational Intelligence Methods and Applications*, 2005 ICSC Congress on. IEEE. 2007, 14b(5): 679-694.
- [21] AGUSHAKA J O, EZUGWU A E, ABUALIGAH L. Gazelle optimization algorithm: a novel nature-inspired metaheuristic optimizer [J]. *Neural Computing and Applications*, 2023, 35(5): 4099-4131.

作者简介:



邱志成(1973—),男,辽宁朝阳人,博士,教授,博士生导师,分别于1995年和1997年在哈尔滨工业大学获学士学位和硕士学位,2000年于中国科学院沈阳自动化研究所获工学博士学位,2000年8月~2003年4月在中国空间技术研究院北京控制工程研究所博士后流动站。主要从事基于视觉的柔性结构振动测试、柔性机器人精密控制、空间柔性结构的建模及振动主动控制等方面的研究。E-mail: zhchqiu@scut.edu.cn

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