

文章编号 1004-924X(2019)01-0230-11

线结构光视觉系统标定新法及其振动测控应用

邱志成*, 肖 骏

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 激光视觉是一种在工业检测领域应用广泛的测量方式, 其标定是视觉检测系统搭建的基础。为此, 提出了一种新型线结构光视觉系统标定方法。采用张氏标定法完成相机标定, 通过提取标定板上的激光条纹特征, 根据三面共线条件进行处理完成结构光平面的标定, 并对标准尺寸进行测量以验证标定结果的准确性。接着基于该系统搭建了柔性臂振动测控实验台, 并用其对柔性臂振动进行检测, 设计了一种非线性控制器抑制柔性臂的振动。实验结果表明, 提出的标定方法三维检测精度可达 0.1 mm, 得以应用在柔性臂的振动检测上, 设计的控制器也可在短时间内抑制柔性臂的振动, 以此验证了标定方法的检测效果和振动抑制的有效性。

关键词: 激光视觉; 系统标定; 振动检测控制; 非线性控制

中图分类号: TP212.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192701.0230

New calibration method of line structured light vision system and application for vibration measurement and control

QIU Zhi-cheng*, XIAO Jun

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

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

Abstract: Laser vision is a widely used measurement method in industrial detection, and its calibration is the key in developing visual sensing systems. Thus, a new calibration method of the structured light vision system was proposed. Zhang's calibration method was introduced to accomplish camera calibration. Then, the feature of the laser stripe on the calibration board was extracted, and the calibration of the structured light plane was carried out after processing, based on the collinear condition of three planes. Meanwhile, the standard size was tested to verify the accuracy of the calibration result. Based on this system, an experimental platform for vibration measurement and control of the flexible arm was constructed. The vibration of the flexible arm was measured by this system, and a nonlinear PD controller was designed to suppress the vibration. The experimental results demonstrate that the 3D measurement precision of the proposed calibration method can reach 0.1 mm; thus, this can be successfully applied to measure the vibration of the flexible arm, and the designed controller

收稿日期: 2018-05-15; **修订日期:** 2018-07-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51775190); 机器人学国家重点实验室开放基金资助项目 (No. 2017-O012); 华南理工大学中央高校基本科研业务费资助项目 (No. 2018PY14)

can also suppress this vibration in a short time. Finally, the effectiveness of the calibration method and vibration suppression is verified.

Key words: laser vision; system calibration; vibration measurement and control; nonlinear control

1 引 言

激光视觉系统是指结合激光和工业相机,将激光打在待测物表面,通过相机拍摄表面的光斑并进行相应图像处理以获取对象三维信息的一类系统。其中采用线结构光和单目相机的线结构光视觉检测系统以其非接触、精度高、抗干扰能力强等特点,在三维形貌测量和逆向工程等领域中应用广泛^[1]。而且,在最近兴起的手机 3D 结构光人脸识别技术中正逐渐展现出巨大的应用价值。系统标定是建立三维检测模型的基础,因此标定方法的研究具有重要意义^[2]。

线结构光视觉系统的标定主要包括单目相机模型标定和激光平面标定两部分。目前,相机标定的研究相对成熟,主要包括 Tsai 提出的两步标定法和 Zhang 提出的棋盘格标定法等^[3]。然而,关于激光平面标定的相关研究并不完善,方法也是多种多样,现已成为标定研究的重点。Zhou 等^[4]提出了基于交比不变性的平面靶标标定方法,据此性质求解控制点的摄像机坐标,而后拟合光平面。解则晓等^[5]基于消隐点性质以及各控制点与标记点之间的几何约束,提出了一种采用准一维靶标求解控制点三维坐标进行标定的方法。陈天飞等^[6]提出了一种基于主动视觉的光平面标定方法实现对线结构光传感器的自动标定。以上研究多是采用光条上的标定点或是透视几何的特殊性质来求解光平面参数,而用光条本身拟合光平面的研究目前尚不多见。

如今线结构光视觉系统多用在结构外形的检测上,用以检测柔性结构振动的应用较少。Dai 等^[7]对动态目标的位置和姿态测量问题进行了研究,并建立了基于双目视觉的非接触式振动检测系统。Qiu 等^[8]采用了激光位移传感器检测柔性板的振动,设计了基于径向基神经网络滑模算法的控制器进行抑振。目前的研究多是单独使用机器视觉或激光位移传感器进行振动检测。因此,

结合相机和线结构光各自的优势,搭建激光视觉测量系统的研究具有一定价值。

针对以上问题,提出了一种新型线结构光视觉系统标定方法。其中相机模型的标定采用张氏标定法;而光平面的标定基于这里提出的空间三面共线条件,通过对标定板上的激光条纹特征进行处理来完成。然后利用标定好的系统对标定板的棋盘格尺寸进行测量,以验证标定结果的准确性。另外,基于该视觉系统搭建了一套柔性臂振动测控装置,利用系统对柔性臂的振动进行检测,并且设计了一种非线性 PD 控制器对其振动进行抑制。实验结果同时验证了标定方法的有效性和视觉系统的检测精度,以及振动检测的可行性和振动抑制的有效性。

2 系统模型与标定

2.1 线结构光视觉模型

线结构光视觉模型是系统进行三维检测的基础,其主要包含相机成像模型和激光平面模型两部分。图 1 所示为线结构光视觉系统的成像模型示意图。

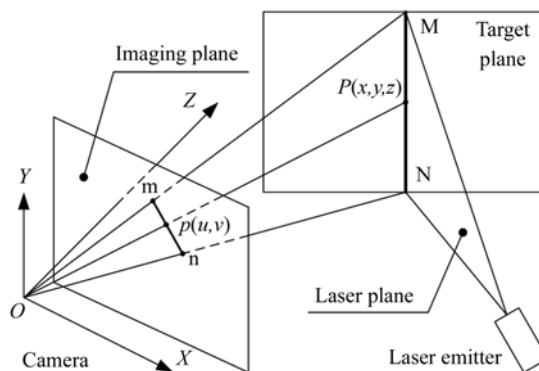


图 1 线结构光视觉系统成像模型

Fig. 1 Imaging model of line structured light vision system

图 1 中 O-XYZ 为相机坐标系。激光发射器打出激光平面,照射在目标平面上形成激光条纹

MN,其反射光透过镜头在相机的感光平面上成像为 mn ,同时光条上的一点 P 的成像为 p ,模型的主要目标便是求解出点 P 的三维坐标,以获取目标平面上被照射区域的三维信息。

对于相机模型,一般假设其为针孔成像模型,于是空间中任意点 P 的世界坐标 (x_w, y_w, z_w) 、相机坐标 (x, y, z) 以及其成像点 p 的像素坐标 (u, v) 之间存在如下转换关系^[9]:

$$\begin{cases} u \\ v \\ 1 \end{cases} = \frac{1}{z} \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} x \\ y \\ z \end{cases},$$

$$\begin{cases} x \\ y \\ z \\ 1 \end{cases} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{cases}, \quad (1)$$

其中: f_u 和 f_v 分别 u 轴和 v 轴上的归一化焦距, (u_0, v_0) 是光心 O 的像素坐标; \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 分别为旋转矩阵和平移矩阵,用以表述相机坐标和世界坐标间的关系。其中 f_u, f_v, u_0, v_0 称为相机内部参数,矩阵 \mathbf{R} 和向量 \mathbf{t} 称为相机外部参数。另外还要考虑镜头畸变的影响,通过畸变校正从而获取成像点 p 的实际像素坐标。

激光平面模型即为其在相机坐标系下的平面方程表达式^[10],假设为:

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (2)$$

式中 A, B, C, D 为待求的方程系数。当相机模型和激光平面模型都确定后,根据相机采集并处理得到的 P 点像素坐标 $p(u, v)$,联立式(1)和式(2)便可解出 $P(x, y, z)$ 的坐标,完成点 P 的三维重建,至此也可完成线结构光视觉系统的搭建。

将式(5)展开可得:

$$\begin{cases} (B_1 D_2 - B_2 D_1) A_3 + (D_1 A_2 - D_2 A_1) B_3 + (A_1 B_2 - A_2 B_1) D_3 = 0 \\ (C_1 D_2 - C_2 D_1) B_3 + (D_1 B_2 - D_2 B_1) C_3 + (B_1 C_2 - B_2 C_1) D_3 = 0 \\ (A_1 D_2 - A_2 D_1) C_3 + (D_1 C_2 - D_2 C_1) A_3 + (C_1 A_2 - C_2 A_1) D_3 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)即为空间中任意三面共线的一般条件;且由上面的讨论可知,方程组的秩为 2,即其中有一个方程冗余。

2.2.2 线结构光平面标定

类比相机标定,线结构光平面的标定首先要先采集多张将激光打在棋盘格标定板上的图

2.2 系统标定

线结构光视觉系统的标定主要包含相机标定和线结构光平面标定两部分。相机模型的标定即为确定相机内外参数和畸变系数的过程,由于针对相机标定的研究已经比较成熟,这里不再赘述,直接使用基于棋盘格标定板的张氏标定法^[11],通过 MATLAB 标定工具箱对相机进行标定。下面着重介绍线结构光平面的标定方法。

2.2.1 三面共线条件

假设空间中任意三个不同平面的表达式为 $\pi_1: A_1 x + B_1 y + C_1 z + D_1 = 0, \pi_2: A_2 x + B_2 y + C_2 z + D_2 = 0$ 和 $\pi_3: A_3 x + B_3 y + C_3 z + D_3 = 0$,且相互之间不平行。若以上三面共线,则线上所有空间点都满足这三个平面方程,即下列方程组有无穷多解:

$$\begin{cases} A_1 x + B_1 y + C_1 z = -D_1 \\ A_2 x + B_2 y + C_2 z = -D_2 \\ A_3 x + B_3 y + C_3 z = -D_3 \end{cases} \quad (3)$$

令 $\mathbf{A} = (A_1, A_2, A_3)^T, \mathbf{B} = (B_1, B_2, B_3)^T, \mathbf{C} = (C_1, C_2, C_3)^T, \mathbf{D} = (-D_1, -D_2, -D_3)^T$,由线性代数的知识可知,线性方程组有解意味着系数矩阵的秩等于增广矩阵的秩,于是 $r(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}) = r(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}) \leq 3$;若 $r(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}) = r(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}) = 1$,则方程组的三个平面方程表达式一致,显然与三个不同平面的假设矛盾;若 $r(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}) = r(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}) = 3$,则方程组有唯一解,不满足无穷多解的要求,因此矩阵的秩满足式(4):

$$r(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}) = r(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}) = 2. \quad (4)$$

视向量 \mathbf{D} 为常向量,从而以下矩阵行列式满足:

$$|\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{D}| = |\mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}| = |\mathbf{A}, \mathbf{C}, \mathbf{D}| = 0. \quad (5)$$

像。对于这些图片,根据图 1 可知,光平面、光反射平面和靶标平面三面共 MN 线,其中光平面参数为待求量。为了利用上节所述三面共线条件,首先需要分别求解每张标定图片中的靶标平面和光反射平面在相机坐标系下的表达式。

在张氏标定法中,靶标平面被假设为世界坐

标系下 $z_w=0$ 的平面,而相机坐标系于世界坐标系的转换关系如式(1)所示。注意到矩阵 \mathbf{R} 为正交矩阵,对式(1)稍作变形可得式(7):

$$\begin{cases} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{cases} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{cases} x \\ y \\ z \\ 1 \end{cases} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} x \\ y \\ z \\ 1 \end{cases}, \quad (7)$$

式中的 \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 可根据张氏标定法求得;将矩阵方程展开,然后利用 $z_w=0$ 条件,很容易得到关于 (x, y, z) 的一次方程,设为:

$$A_1 x + B_1 y + C_1 z + D_1 = 0. \quad (8)$$

由此便可求得靶标平面在相机坐标系下的表达式。

根据相机成像模型,像面上的直线对应空间中的某平面,而光条直线对应的显然是光反射平面。提取靶标平面上的激光条纹,并对其进行直线拟合,可以得到其在像素坐标系下的表达式,设为:

$$au + bv + c = 0. \quad (9)$$

将式(1)代入可得:

$$au + bv + c = (a, b, c) \cdot (u, v, 1)^T = (a, b, c) \cdot \frac{1}{z} \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} x \\ y \\ z \\ 1 \end{cases} = 0, \quad (10)$$

化简式(10),容易得到以下关于 (x, y, z) 的一次方程:

$$A_2 x + B_2 y + C_2 z = 0, \quad (11)$$

其中: $A_2 = af_u, B_2 = bf_v, C_2 = au_0 + bv_0 + c$, 由此便可求得光反射平面在相机坐标系下的表达式。

由于激光平面不通过相机坐标系原点 O , 因此可设式(2)中 $D=1$; 根据上述三面共线条件公式(6), 再结合式(8)、式(11)和式(2)的形式可令式(6)中的 $D_2=0$ 以及 $(A_3, B_3, C_3, D_3) = (A, B, C, 1)$, 从而得到以下关于 (A, B, C) 的方程组:

$$\begin{cases} D_1 B_2 A - D_1 A_2 B = A_1 B_2 - A_2 B_1 \\ D_1 C_2 B - D_1 B_2 C = B_1 C_2 - B_2 C_1 \\ D_1 A_2 C - D_1 C_2 A = C_1 A_2 - C_2 A_1 \end{cases} \quad (12)$$

由于式(12)中的 3 个方程同样有一个冗余, 故取其前两项用以计算; 假设共拍摄了 n 张不同姿态的标定图片, 令 $\mathbf{X} = (A, B, C)^T$, 则可以得到

以下矩阵方程:

$$\mathbf{KX} = \mathbf{Y}, \quad (13)$$

式中:

$$\mathbf{K} = D_1 \begin{bmatrix} B_2^1 & -A_2^1 & 0 \\ 0 & C_2^1 & -B_2^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ B_2^i & -A_2^i & 0 \\ 0 & C_2^i & -B_2^i \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ B_2^n & -A_2^n & 0 \\ 0 & C_2^n & -B_2^n \end{bmatrix}, \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} A_1^1 B_2^1 - A_2^1 B_1^1 \\ B_1^1 C_2^1 - B_2^1 C_1^1 \\ \vdots \\ A_1^i B_2^i - A_2^i B_1^i \\ B_1^i C_2^i - B_2^i C_1^i \\ \vdots \\ A_1^n B_2^n - A_2^n B_1^n \\ B_1^n C_2^n - B_2^n C_1^n \end{bmatrix},$$

其中上标 i 代表第 i 张图的相关参数, 通过最小二乘法求解可得 (A, B, C) 的值:

$$\mathbf{X} = (A, B, C)^T = (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{Y}. \quad (14)$$

由此完成光平面的标定。

2.2.3 标定步骤

(1) 用相机采集 22~28 张线结构光打在标定板上的图片作为标定图片;

(2) 首先采用张氏标定法进行相机标定, 并且利用标定得到的畸变系数获取畸变校正后的标定图像;

(3) 利用校正图像进行光条直线拟合, 求出像素坐标系下的拟合方程;

(4) 将拟合方程反投影到相机坐标系下得到光反射平面方程;

(5) 利用标定板 $z_w=0$ 条件求出相机坐标系下的标定板平面方程;

(6) 利用上述三面共线条件列出光平面方程参数 (A, B, C) 的矩阵方程, 并用最小二乘法求解;

(7) 结合相机模型和光平面方程参数, 得出线结构光视觉模型, 完成标定。

3 柔性臂振动检测控制

3.1 实验系统构成

图 2 所示为实验系统的构成示意图。伺服电机经由减速器减速后, 驱动一端固定在输出轴上的柔性臂旋转; 台座上的激光发射器发出线结构光, 打在柔性臂上形成光条, 通过相机进行图像采集; 另外还有包含计算机、运动控制卡

和伺服驱动器在内的驱动控制部分。柔性臂振动检测和抑制过程如下:将激光打在柔性臂自由端,利用相机采集柔性臂实时振动图像;然后基于标定的线结构光视觉模型和 opencv 库,利用相应的图像处理算法获取图像特征,提取柔性臂的振动位移信息;接着以此作为振动主动控制算法的输入以获取实时抑振信号,经由运动控制卡输出到伺服驱动器中,驱动伺服电机的运转从而抑制柔性臂的振动。整个实验装置便通过这样的负反馈闭环控制实现柔性臂振动控制,其控制算法使用 C++ 编程语言在 VS2010 环境下编写 MFC 界面控制程序实现。

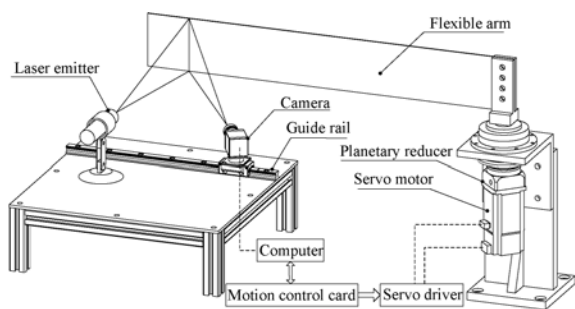


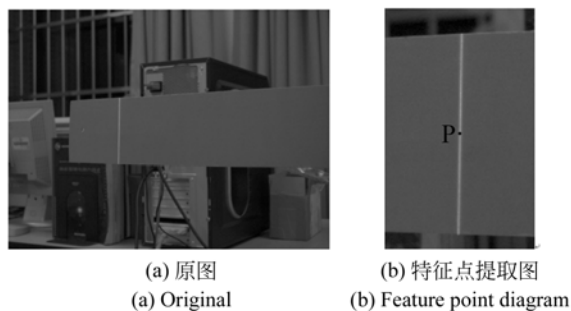
图 2 实验系统构成示意图

Fig. 2 Constitution diagram of experimental system

3.2 振动信号获取

如图 2 所示,将激光平面垂直打在柔性臂的表面,当柔性臂振动时,光条跟随臂前后移动,故而光条的空间位移便包含了臂的振动位移信息。选取光条的中心作为特征点,同时作为振动位移信息的承载对象,于是振动信号的获取主要分为特征点三维重建和振动位移计算两步。

第一步是特征点三维重建。对于实时采集的图像,首先需校正图像畸变,降低像素误差。然后进行图像预处理,包括图像感兴趣区域(ROI)提取、滤波和阈值分割等,以降低图像噪声,突出光条特征,提高处理速度。接着进行边缘检测和提取,并求取其图像矩,以获取光条中心的像素坐标。最后代入式(1)中联立式(2)求出特征点的三维坐标,完成三维重建。图 3 所示为振动过程中采集的图像处理效果图,其中图 3(a)为相机采集的柔性臂初始状态下的含光斑图,图 3(b)为特征点提取效果图。



(a) 原图 (a) Original
(b) 特征点提取图 (b) Feature point diagram

图 3 振动图像处理效果图

Fig. 3 Effect diagram of vibration image processing

采用标定方法优势在于:(1)理论上光平面与标定靶相交为一条直线,而实际激光器产生的光平面交线存在一定宽度,拟合光心直线进行标定相较于现有方法提取交线上所有点进行标定精度更高;(2)光心直线相当于承载了大量标定点的信息,无需大量实验来获取标定点云,运算量小操作简单。

第二步是振动位移计算。柔性臂振动前,首先需要明确臂的初始状态,故在激振前先拍摄 60 帧(1 s)臂的静止状态的图像,依次处理得到光条中心特征点的三维坐标后,取平均值作为特征点 P 的初始世界坐标 $P_0(x_0, y_0, z_0)$,即:

$$x_0 = \sum_{i=1}^{60} \frac{x_{0i}}{60}, y_0 = \sum_{i=1}^{60} \frac{y_{0i}}{60}, z_0 = \sum_{i=1}^{60} \frac{z_{0i}}{60}. \quad (15)$$

激振后,对采集到的 t 时刻的图像进行处理得到特征点 P 的世界坐标 $P(t) = (x(t), y(t), z(t))$,于是向量 $\mathbf{PP}_0 = (x(t) - x_0, y(t) - y_0, z(t) - z_0)$;对于小幅值振动,振动位移 $s(t)$ 可用 $|\mathbf{PP}_0|$ 来衡量;假设垂直于柔性臂表面的向量为 \mathbf{n} (事先将柔性臂向前和向后拨至一定角度,得到的两特征点连线即为向量 \mathbf{n}),则 $s(t)$ 的正负可通过向量 \mathbf{PP}_0 和向量 \mathbf{n} 的点积符号定义,即:

$$s(t) = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{PP}_0}{|\mathbf{n} \cdot \mathbf{PP}_0|} |\mathbf{PP}_0|, \quad (16)$$

由此得到柔性臂的振动信号。

采用线结构光进行柔性臂振动检测,首先进行结构光平面标定,利用三面共线构造约束得到光平面方程,确定结构光视觉模型,然后结合图像处理算法获取柔性臂的末端振动信息,进行振动控制器的设计。

3.3 振动控制器设计

由于文中的实验系统装置会受齿轮间隙和传动摩擦等非线性因素的影响,线性控制器的振动(尤其是平衡点附近的小幅值振动)控制效果不会太理想。因为若采用固定增益 PD,在柔性臂振动幅值较大时,可能会导致控制量饱和,将会引起系统的控制不稳定性;而在小幅值振动时,控制量过小无法通过间隙摩擦等导致的死区,造成小幅值振动难以快速衰减。所以,设计一种非线性 PD 控制算法用于控制柔性臂的振动。

用 $s(k)$ 表示第 k 个采样周期的振动位移,定义振动指标 $S(k) = \sum_{i=1}^n |s(k+i)|$ 用以衡量振动幅值的大小,其中 n 表示柔性臂的一阶振动周期 T_1 内的采样点数;设此刻柔性臂等效振幅为 $A(k)$,其与 $S(k)$ 近似满足如下关系:

$$S(k) = \sum_{i=1}^n |s(k+i)| \approx \frac{n}{T_1} \int_0^{T_1} A \sin \frac{2\pi}{T_1} t dt = \frac{2n}{\pi} A. \quad (17)$$

于是 $A(k) = \frac{\pi}{2n} S(k)$;再定义衰减指标 $\lambda(k) = \log_2 \frac{2A_{\max}}{A(k)}$ 用以衡量振幅的衰减率,其中 A_{\max} 表示柔性臂振动位移的最大可能值。

考虑到普通线性 PD 对柔性臂小幅值非线性振动的控制效果并不理想,设计如下随着振动衰减 PD 系数逐渐增大的非线性 PD 控制率,用以控制电机输出 $u(k)$:

$$u(k) = k_p(k) \cdot s(k) + k_d(k) \cdot \frac{s(k) - s(k-1)}{T}, \quad (18)$$

式中 $k_p(k)$ 和 $k_d(k)$ 分别为 PD 控制的比例和微分系数,其值由如下非线性方程给出:

$$k_p(k) = \begin{cases} k_1 \lambda(k)^{\alpha_1}, & A(k) > A_{\min} \\ 0.96 k_p(k-1) + 0.04 c_1, & A(k) \leq A_{\min} \end{cases},$$

$$k_d(k) = \begin{cases} k_2 \lambda(k)^{\alpha_2}, & A(k) > A_{\min} \\ 0.96 k_d(k-1) + 0.04 c_2, & A(k) \leq A_{\min} \end{cases}, \quad (19)$$

其中: A_{\min} 为人为给定的振幅最小值,用以判别振动是否衰减至足以忽略; k_1 、 k_2 、 α_1 、 α_2 、 c_1 、 c_2 均为常数,其中 k_1 、 k_2 、 α_1 、 α_2 用于计算振幅较大时 $k_p(k)$ 和 $k_d(k)$ 的值, c_1 和 c_2 代表当振幅衰减得足够

小时 $k_p(k)$ 和 $k_d(k)$ 趋于的稳定值。通过合理设定上述系数,可以实现非线性 PD 控制增益的动态根据振动幅值在线调节,以实现振动的快速抑制。

4 实验结果

4.1 实验装置

图 4 所示为实验装置结构示意图,该实验平台由工业相机、激光发射器、柔性臂、三菱伺服组件、行星减速器、运动控制卡和计算机组成。伺服电机额定功率 100 W,以速度模式运行,减速器减速比为 1:25;柔性臂为环氧树脂材料,尺寸 $750 \times 100 \times 2$ mm;运动控制卡为型号 GTS-400-PV-PCI 的固高运动控制器;相机为 Basler 型号 acA1600-60gc 的 GIGE 工业相机,分辨率为 1600×1200 ,帧率为 60 Hz;激光发射器为型号 HW650AB100-16GD 的一字线激光器。

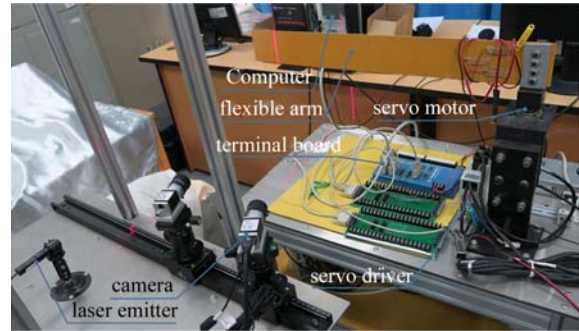


图 4 实验装置结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of experimental device

本实验使用的柔性臂一阶固有频率约为 2 Hz,故而相机 60 Hz 的频率足以达到采样要求;对于二阶以上的高阶频率,由于频率高且振动位移小,这里暂且不讨论。另外计算机对相机实时采集的单张图片的处理耗时约 5 ms,足以在相机 16.6 ms 的采样间隔内完成,进而可以保证实时性的要求。

4.2 线结构光视觉系统标定

4.2.1 标定结果

根据第 2.2 节的描述对本实验的线结构光视觉系统进行标定。采用张氏标定法得到的相机模型参数如表 1 所示。

表 1 相机标定结果

Tab. 1 Camera calibration results

f_u	f_v	u_0/pixel	v_0/pixel
2 691.1	2 691.4	744.4	567.9

采用所提出的光平面标定方法,首先对采集的标定图片做相应处理。图 5 所示为其中一张标定图片及其处理效果图,图 5(a)为原图,图 5(b)为光条直线拟合效果图。

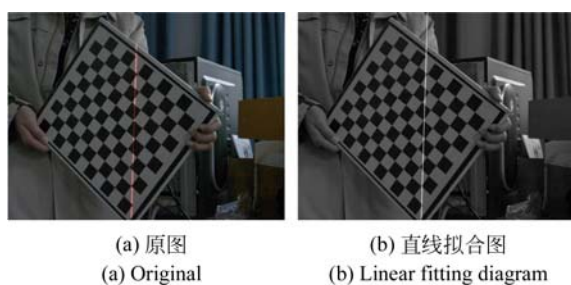


图 5 标定图片处理效果图

Fig. 5 Effect diagram of calibration image processing

对所有图片进行相应处理,然后在 MATLAB 中编写代码执行相关计算后,得到的方程参数 $[A, B, C, D] = [0.002\ 390\ 21, -0.000\ 027\ 870\ 5, -0.001\ 102\ 42, 1]$,于是光平面方程为:

$$2.390\ 21x - 0.027\ 870\ 5y - 1.102\ 42z + 1\ 000 = 0, \quad (20)$$

式中坐标单位为 mm(因为相机标定中平移向量 t 的单位是 mm)。

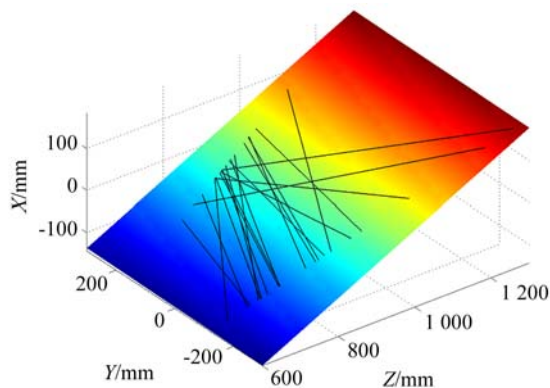


图 6 光平面拟合效果图

Fig. 6 Fitting effect diagram of laser plane

图 6 展示了所得光平面的拟合效果图,图中的黑线代表了每张标定图像中的光条拟合直线转换到相机坐标系下的空间直线方程,而彩色渐变图像代表光平面方程。可以看出拟合直线和激光平面的重合度很高,说明平面方程的拟合效果很好。

根据式(1)和式(2),结合得到的相机模型和光平面方程,可知点 $P(x, y, z)$ 满足如下方程组:

$$\begin{cases} 2\ 691.1x + (744.4 - u)z = 0 \\ 2\ 691.4y + (567.9 - v)z = 0 \\ 2.390\ 21x - 0.027\ 870\ 5y - 1.102\ 42z + 1\ 000 = 0 \end{cases}, \quad (21)$$

式中 (u, v) 为点 P 畸变校正后的像素坐标,此即为线结构光视觉模型的方程组表达式。

4.2.2 测量精度检验

通过测量标准棋盘格标定板的棋盘格尺寸的方式来检验标定的准确性,所采用标定板的单棋盘格尺寸为 $25 \times 25\ \text{mm}$,制造精度为 $0.005\ \text{mm}$ 。将激光打在棋盘格标定板上,并且使光条尽量和棋盘格划分边界平行;然后用相机采集图像,并对畸变校正后的图像进行亚像素级别的角点提取,以获取光条和棋盘格边界的交点亚像素坐标。接着利用标定好的线结构光视觉系统测出交点的三维坐标,并计算交点之间的距离,通过对比测出的距离和棋盘格的标称大小,以验证标定的效果。

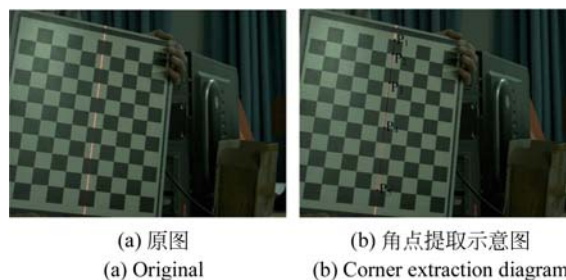


图 7 标定效果检测图

Fig. 7 Detection image of calibration effect

图 7 显示了相机采集的其中一张检测图,图 7(a)为原图,图 7(b)为角点提取示意图,图中的待测线段长度包含 $L_1 = |P_1 P_2|$ 、 $L_2 = |P_2 P_3|$ 、 $L_3 = |P_3 P_4|$ 、 $L_4 = |P_4 P_5|$ 和 $L_5 = |P_1 P_5|$ (标称长度分别为 $25\ \text{mm}$ 、 $50\ \text{mm}$ 、 $75\ \text{mm}$ 、 $100\ \text{mm}$ 和

250 mm),其中的 5 个点为待测线段的端点。对所有采集的 10 张图的棋盘格尺寸进行测量,测量

结果如表 2 和表 3 所示,其中表 2 为角点提取的像素坐标值,表 3 为线段长度的测量结果。

表 2 角点提取坐标

Tab. 2 Extraction coordinates of carner

No.	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
1	(545.4,177.5)	(536.3,258.6)	(517.0,424.0)	(487.1,681.7)	(446.8,1 044.1)
2	(216.4,242.1)	(246.2,339.2)	(302.4,524.4)	(381.1,781.1)	(476.3,1 088.2)
3	(540.2,166.1)	(542.1,252.4)	(545.0,424.6)	(550.0,682.3)	(557.2,1 024.5)
4	(877.7,308.7)	(862.0,356.0)	(830.2,456.9)	(778.4,619.3)	(701.9,862.0)
5	(821.3,329.4)	(803.2,377.9)	(766.1,481.4)	(706.1,651.0)	(615.6,905.2)
6	(534.9,281.4)	(543.1,367.4)	(561.2,536.4)	(585.9,783.8)	(619.1,1 101.1)
7	(741.4,410.2)	(714.8,447.1)	(658.2,526.9)	(563.7,662.8)	(413.8,877.1)
8	(324.4,172.0)	(318.1,268.8)	(307.1,465.6)	(292.0,766.9)	(273.3,1 178.6)
9	(492.7,322.5)	(509.2,407.4)	(542.2,571.2)	(588.2,805.2)	(646.0,1 095.8)
10	(641.2,245.1)	(661.1,316.1)	(699.9,451.6)	(753.6,642.2)	(818.8,873.9)

表 3 线段长度测量结果

Tab. 3 Measurement results of segment length

No.	(mm)				
	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
1	24.962	49.971	75.019	100.022	249.972
2	25.020	49.959	75.004	99.923	249.906
3	25.011	50.014	74.986	99.956	249.965
4	25.007	49.947	74.984	100.029	249.961
5	25.022	49.964	75.034	99.994	250.010
6	24.959	49.997	74.969	100.001	249.920
7	25.011	50.051	74.982	99.991	250.032
8	24.991	50.003	75.006	99.953	249.939
9	24.989	49.979	74.936	100.009	249.911
10	24.956	49.998	75.038	100.064	250.055
AVG	24.992 8	49.988 3	74.995 8	99.994	2249.967 1
RMSE	0.0256	0.0308	0.0310	0.0413	0.0514

由表 3 可知,测量结果和标称值相比绝对误差基本都在 0.1 mm 以内,平均值与标称值的误

差更是在 0.04 mm 以内,表明测量具有较好的重复性;另外均方根误差随着线段长度的增大而增大,但是都在 0.06 mm 以内,说明测量的精度也比较高。考虑到角点提取的亚像素精度极限约为 0.16 pixel^[12],然后拍摄距离约为 500 mm,于是其对应的空间分辨力为 $0.16 \times 500 / f_u = 0.029 7$ mm,此亦即这里建立的视觉系统在上述拍摄距离下所能达到的测量精度极限。对比测量的均方根误差,可以认为搭建的线结构光视觉系统的三维测量精度可达 0.1 mm,基本接近系统的理论测量精度极限。并且,对于柔性臂振动来说,最大振动幅值达 20 mm 多,这个精度对柔性臂的振动测量已经满足要求了,当达到 0.1 mm 振动幅值的时候,柔性臂的振动肉眼已经感觉不到了,振动已经非常小了。如果需要进一步提高测量精度,后续工作可能会考虑采用更高分辨率的相机来提高精度要求。

4.3 柔性臂振动检测控制

保持伺服组件关闭,将柔性臂激振,然后根据第 3.2 节提出的方法对柔性臂的自由振动位移进行检测。振动检测结果及其功率谱(PSD)曲线如图 8 所示。

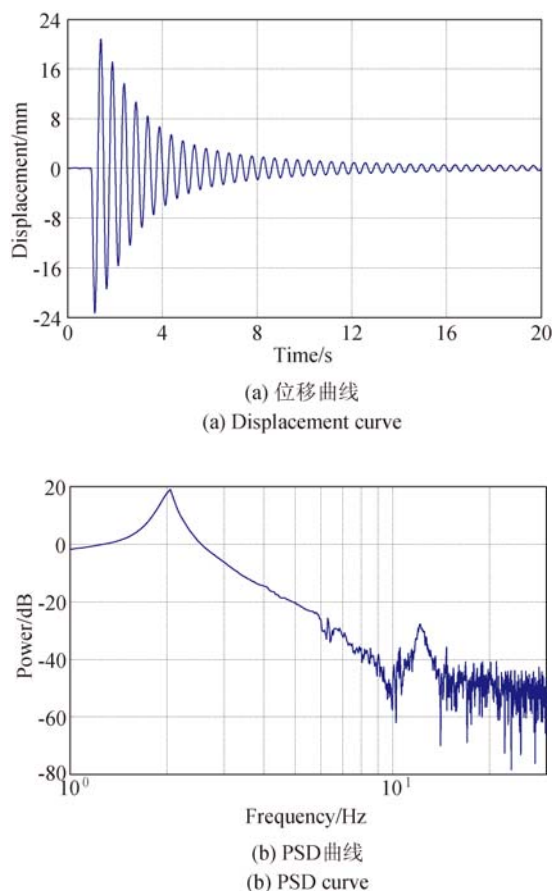


图 8 柔性臂自由振动

Fig. 8 Flexible arm with free vibration

观察图 8 中的曲线变化趋势,图 8(a)中振动位移曲线呈现出良好的周期性并逐渐衰减,且有明显的呈对数衰减的包络线。图 8(b)的 PSD 曲线也可以明显的看出两个峰值,代表了柔性臂振动的前两阶固有频率。以上曲线特性皆反映了柔性臂自由振动的典型特征,故而提出的视觉检测系统可以准确地检测出柔性臂的振动位移。由图 8(a)可知,柔性臂在 1.0 s 处被激振,而后其振动按照衰减的正弦曲线衰减,在约 7.5 s 后才衰减为初始振幅的 10%,并且小幅值振动持续了很长时间依然存在,因而有必要对其振动(尤其是小幅值振动)进行控制;由图 8(b)可知,柔性臂一阶振动频率为 2.0 Hz,结合相机 60 Hz 的采样频率可知,柔性臂一阶振动周期内的采样点数为 30 个。

设计普通 PD 控制器对柔性臂的振动进行控制,PD 参数分别为 $k_p=0.001$ 、 $k_d=0.005$ 。将柔性臂激振,并在振幅约为 24 mm 时施加控制,其

控制效果如图 9 所示。图 9(a)为振动控制位移曲线,可看出柔性臂的大幅值振动在 1.0 s(2 个振动周期)内很快被抑制,但是小幅值振动依然持续了很长时间;图 9(b)为控制电压的变化趋势,其随大幅值振动的衰减而快速减小,因此对大幅值控制效果显著,而在小幅值振动时无法施加良好的控制。由此可见,普通 PD 在有非线性因素干扰时振动(尤其是小幅值振动)控制效果并不理想,与自然衰减的情况差不多,也就是说,控制作用太小,进入系统的死区而没有起到抑制作用。

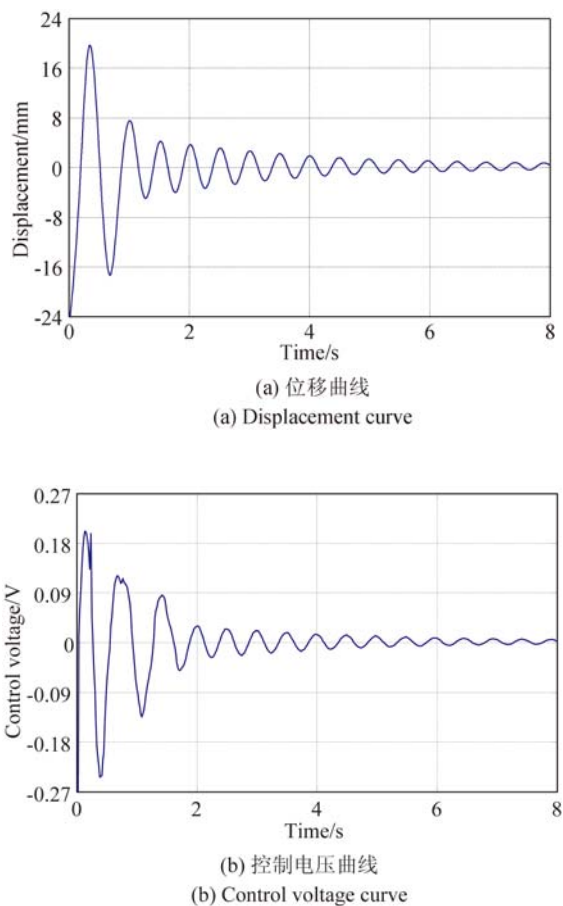


图 9 普通 PD 振动控制

Fig. 9 Normal PD vibration control

根据上面的讨论,结合第 3.3 节提出的非线性 PD 控制率,通过多次实验调整的方法给出各参数的取值: $n=30$ 、 $A_{\max}=64$ mm、 $A_{\min}=0.7$ mm、 $k_1=1$ 、 $k_2=0.08$ 、 $\alpha_1=4/3$ 、 $\alpha_2=2$ 、 $c_1=0.005$ 、 $c_2=0.001$ 。将柔性臂激振,并在振幅约为 24 mm 时施加控制,控制效果如图 10 所示。

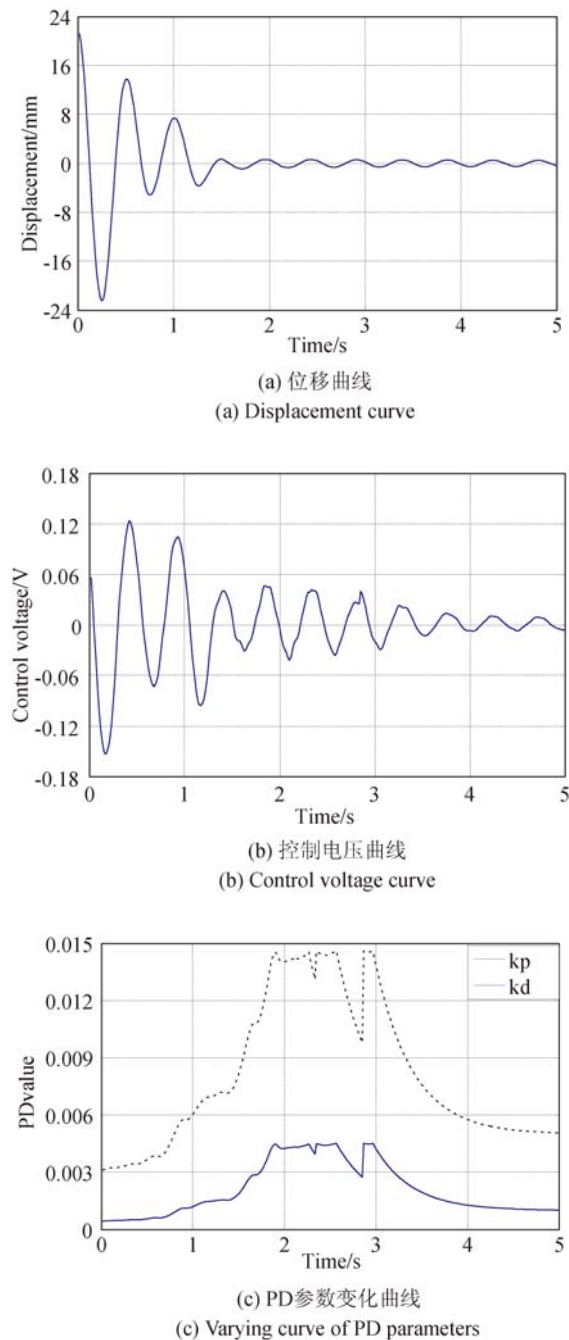


图 10 非线性 PD 振动控制

Fig. 10 Nonlinear PD vibration control

由图 10(a)可知,柔性臂振动可以在施加控制的 2.0 s(4 个振动周期)内衰减至 1 mm 以下,仅为初始振幅的 5%,从而使残余振动得到有效抑制;图 10(b)显示了控制电压的变化趋势,虽然也是随着振动的衰减逐渐减小,但减速明显比普通 PD 缓慢,因而才能保证小幅值振动控制的效果;图 10(c)显示了控制过程中 PD 参数的变化趋势,可见两者都是随着振动衰减而慢慢增大,而当振动衰减至足够小时再逐渐趋减于设定的固定值 0.005 和 0.001。由此可见,相比普通 PD 控制,采用非线性 PD 控制的柔性臂振动抑制效果更显著,尤其是小幅值振动的抑制也很迅速,进而验证了控制方法的有效性。

5 结 论

针对柔性机械臂的振动测量问题,提出了一种新型线结构光视觉系统的标定方法。该方法的光平面标定无需计算标定点的坐标,而是直接对光条图像进行直线拟合,然后根据相机模型反解出其在相机坐标系下的平面方程,接着根据提出的三面共线条件得到光平面参数的方程组,进而用最小二乘法求解完成标定。该方法将光条直线本身作为光平面的拟合特征,操作简单、运算量小且精度易于保证,便于实施应用。另外,利用标定好的系统搭建了一套柔性臂振动测控实验台,用以检测柔性臂振动;然后设计了非线性控制器,通过电机驱动来抑制柔性臂的振动。实验结果表明,该方法的三维测量精度可达 0.1 mm,验证了标定方法的可靠性;而且标定好的系统也在柔性臂的振动检测中得以成功应用,同时设计的算法控制器也能在短时间内有效抑制柔性臂振动。

参考文献:

- [1] 陈新禹,马孜,陈天飞. 线结构光传感器模型的简易标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2345-2352.
CHEN X Y, MA Z, CHEN T F. Calibration model for line structured light vision sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2345-2352. (in

Chinese)

- [2] 张曦,张健. 线结构光标定方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 7-17.
ZHANG X, ZHANG J. Summary on calibration method of line-structured light sensor [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 7-17. (in Chinese)
[3] HORAUD R, HANSARD M, EVANGELIDIS G.

- An overview of depth cameras and range scanners based on time-of-flight technologies [J]. *Machine Vision and Applications*, 2016, 27(7): 1005-1020.
- [4] ZHOU F, ZHANG G. Complete calibration of a structured light stripe vision sensor through planar target of unknown orientations [J]. *Image & Vision Computing*, 2005, 23(1): 59-67.
- [5] 解则晓, 刘静晓. 超大尺度线结构光传感器现场标定技术[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 290-296.
XIE Z X, LIU J X. Calibration technology for line structured light sensor with large scale [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(12): 290-296. (in Chinese)
- [6] 陈天飞, 马孜, 吴翔. 基于主动视觉标定线结构光传感器中的光平面[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 256-263.
CHEN T F, MA Z, WU X. Calibration of light plane in line structured light sensor based on active vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 256-263. (in Chinese)
- [7] DQAI Y, WANG W, DENG S, et al.. Vibration test of a dynamic target based on stereo machine vision [J]. *Proceedings of the Second International Conference on Mechatronics and Automatic Control*, 2015, 16: 625-633.
- [8] QIU Z C, ZHANG S M. Fuzzy fast terminal sliding mode vibration control of a two-connected flexible plate using laser sensors [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 380: 51-77.
- [9] 邹凤娇. 摄像机标定及相关技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
ZOU F J. *Research on Camera Calibration and Related Technique* [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005. (in Chinese)
- [10] GAN Z, TANG Q. *Visual Sensing and its Applications* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2011.
- [11] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [12] 张美静. 亚像素边缘检测技术研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2013.
ZHANG M J. *Research on Sub Pixel Edge Detection Technology* [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2013. (in Chinese)

作者简介:



邱志成(1973—),男,辽宁朝阳人,教授,博士生导师,1995年、1997年于哈尔滨工业大学分别获学士学位、硕士学位,2000年于中国科学院沈阳自动化研究所获博士学位,主要从事柔性结构振动测量和控制研究。E-mail: zhchqiu@scut.edu.cn



肖骏(1993—),男,江西赣州人,硕士研究生,2018年于华南理工大学获硕士学位,主要从事机器视觉和柔性结构振动控制方面的研究。E-mail: 925505693@qq.com