

# 基于机器视觉的柔性机械臂振动位移测量

马天兵, 刘健, 杜菲, 陈南南

安徽理工大学机械工程学院, 淮南 232001

**摘要** 针对传统的振动位移测量方法中, 间接测量法误差较大、准确度较低, 而直接测量法虽能达到精度, 但成本较高、实用性较差的问题, 提出一种基于机器视觉的振动位移测量方法。选取电机驱动运动的柔性机械臂作为测量对象, 通过 CCD 相机采集机械臂末端标记点运动图像, 再经过阈值分割、质心检测等视觉处理, 得到机械臂振动位移信息。通过搭建实验平台对该方法进行实验验证, 并与压电材料测量法及仿真法得到的振动位移进行对比, 结果表明, 基于机器视觉的振动位移测量方法能够在不接触工况下, 对柔性机械臂进行准确、实时的振动位移测量, 相比于压电材料测量法, 避免了公式误差等影响, 具有明显的优越性。

**关键词** 振动位移; 柔性机械臂; 机器视觉; 压电材料

柔性机械臂由于阻尼小、刚度低等优点, 在空间机器人、航空航天等领域得到了广泛的应用。但柔性机械臂运动时, 因材料特点导致的振动、形变等问题, 影响其定位精度和操作效率<sup>[1]</sup>。为了对柔性机械臂进行故障监测和振动控制, 需要对机械臂振动位移进行实时测量。现有的振动测量方法种类繁多, 且涉及不同的技术领域。Tian 等<sup>[2]</sup>设计并利用一种压电式加速度传感器对电缆振动进行了振动模态、挠度等分析; 曹丽曼<sup>[3]</sup>利用压电式加速度传感器, 提出一种振动测量方法, 并对压路机进行振动测量, 分析测量信号的时域、频域特征, 探究了其相关振动特性; 袁杰等<sup>[4]</sup>运用陀螺仪和倾角仪同时测量柔性长臂架的倾角、偏转量等信息, 并综合不同测量结果数据, 得到较为准确的臂架的运动特性和振动情况。上述结合传感器的间接测量方法能够方便地实现振动信息的有效提取, 但传感器的时滞产生相应影响, 同时接触式的测量设备上改变被测物的结构特点, 并且涉及对数据的积分、微

分等处理时, 噪声被放大, 带来相应误差。在非接触测量方面, Jiang 等<sup>[5]</sup>提出多自混合干涉算法, 通过功率谱进行振动分析, 可达到纳米级别的振动测量, 并实验验证了算法的可行性和准确性; 张斌等<sup>[6]</sup>利用硅酸铋晶光学衍射效率关系测量振动信息, 并对压电陶瓷进行测试, 验证了其有效性。这些类似于采用光学等精密仪器的直接测量方法, 在不接触的前提下, 得到的信息虽然准确度较高, 但相关设备造价过于昂贵, 实用性不强。针对上述问题, 近年来, 有学者将机器视觉技术运用于振动测量中, 陈若珠等<sup>[7]</sup>利用机器视觉方法, 结合图像处理技术, 通过实验对振动台变形进行测量, 对比分析不同测量方法的测量结果, 验证了视觉测量法可进行非接触测量, 且准确度高, 具有一定的优越性; Xu 等<sup>[8]</sup>针对传统测量方法的不足, 提出一种基于机器视觉的振动测量方法, 并选择大柔性结构作为被测对象, 通过实验进行频谱分析, 对比结构固有特征, 验证了测量方法的准确性。但上述实验中的被测结构为固定结

收稿日期: 2017-11-16; 修回日期: 2018-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51305003); 安徽省博士后基金项目(2017B172); 安徽理工大学国家自然科学基金预研项目(2016YZ004)

作者简介: 马天兵, 教授, 研究方向为振动控制, 电子信箱: dfmtb@163.com

引用格式: 马天兵, 刘健, 杜菲, 等. 基于机器视觉的柔性机械臂振动位移测量[J]. 科技导报, 2018, 36(13): 82-87; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.13.011

构,实验激振情况简单,存在一定局限性。为此,本文以电机驱动运动下的柔性机械臂作为被测对象,研究一种高效、准确的基于机器视觉的振动位移测量方法。

## 1 测量方法及原理

机器视觉技术的实现过程主要是对采集图像进行处理得到有用信息,具有不接触、可视性强等优势,目前在各领域应用广泛<sup>[9]</sup>。本文运用机器视觉技术对柔性机械臂进行振动位移的测量,旨在不接触的前提下,准确获取位移信息,测量方案如下:

- 1) 在柔性机械臂末端,垂直于臂杆的平面上进行标记;
- 2) 柔性机械臂根部布置 CCD 相机,与机械臂同步转动,调整合适焦距,对标记点运动图像进行采集;
- 3) 对每帧图像进行视觉处理得到标记点振动位移;
- 4) 标定相机,得到实际的末端位移。

视觉处理方法是图像像素级层面处理得到有用信息,对单向振动进行测量时,在振动平面的垂直处设置相机即可完成测量;对多维振动进行测量时,可通过增加测量点,结合多处测量值换算为三维坐标系,建立立体位置模型,进而得到各分量的振动位移<sup>[10]</sup>。柔性机械臂的末端振动,属于单向振动,在其末端振动的方向上设置标记点,标记点的相对振动位移即为机械臂振动位移,而为了得到标记点的振动位移,首先需要在背景中分割出标记点(目标)<sup>[11]</sup>,对于此类目标与背景相对独立,且标记点的灰度值远低于背景的图像,选用阈值分割法较为合适<sup>[12]</sup>。根据此类图像灰度直方图成双峰分布的特点,选用基于类间方差的 Otsu 法,取像素灰度值  $t$  作为阈值,将图像分为像素灰度值  $< t$ 、像素灰度值  $\geq t$  的目标与背景两类,两者的类间方差为<sup>[13]</sup>

$$\sigma_b^2 = p_1(t)(\mu_1(t) - \mu)^2 + p_2(t)(\mu_2(t) - \mu)^2 \quad (1)$$

式中,  $p_1(t)$ 、 $p_2(t)$  分别为目标和背景的像素所占比例;  $\mu_1(t)$ 、 $\mu_2(t)$  分别为目标和背景的均值;  $\mu$  为整幅图像的均值。

将像素灰度值  $t$  遍历所有灰度级,取得到最大类间方差  $\sigma_b^2$  的灰度值作为最优分割阈值  $T$ <sup>[14]</sup>。根据分割的结果对图像进行二值化处理,目标区域设为 1。为了得到更为精准的位置坐标,对二值图中的标记点进行质心检测,以质心坐标作为位置信息。对采集的每一帧

图像均进行上述操作,得到第  $i$  帧图像的位置坐标为  $(m_i, n_i)$ ,取第一帧图像的位置坐标作为初始值,得到相对位移,即

$$y_{ij} = (x_i, y_i) = [(m_i - m_1), (n_i - n_1)] \quad (2)$$

相机采集的图像是通过光学成像得到的物体的二维图像,需要对相机进行标定,才能转换为实际的三维信息<sup>[15]</sup>,也就是将相机坐标系下的坐标  $(X_c, Y_c)$  转换为世界坐标系下的坐标  $(X_w, Y_w, Z_w)$ 。根据测量方案可知,相机镜头面与标记点的振动平面近似平行;柔性机械臂振动时的弯曲变形在臂杆方向的坐标变化可忽略;初始点为坐标系的原点,第  $i$  帧的坐标位移  $(x_i, y_i)$  为相对位移。因此,世界坐标系中的  $Z_w$  无需标定,只需将相机坐标系下的一水平线段长度转换为世界坐标系下的实际长度。结合视野的实际矩形范围  $M \times N$  和相机的分辨率  $j \times k$ ,即可得到实际坐标,转换关系为

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M/j & 0 \\ 0 & N/k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $(X_i, Y_i)$  为世界坐标系下对相机坐标系下  $(x_i, y_i)$  的转换,也就是最终柔性机械臂末端振动的实际位移。

上述测量方法中每帧图像均得到一坐标位置,即采样 1 次。根据采样定理可知,此方法适用的测量频率上限为相机帧速率的 0.5 倍<sup>[16]</sup>,对于一般的工业相机而言,测量上限频率在 100 Hz 以下<sup>[17]</sup>,在测量频率范围内,该方法能够在不接触的情况下,无需繁琐换算,直接、准确地对振动位移进行测量。

## 2 实验及结果分析

为了验证基于机器视觉的振动位移测量方法的有效性,选取利用压电材料的间接测量方法与基于机器视觉测量方法进行对比,设计构建了可同时进行两种方法测量的实验装置。该装置以步进电机作为驱动器,带动柔性机械臂作水平运动;将可随机械臂同步转动的支架固定在电机轴上,相机固定在支架上,在机械臂靠近固定端处粘贴压电片,在自由端进行标记;相机采集标记点运动图像的同时,采集卡采集压电片信号。根据测量方案构建的实验装置如图 1 所示。

实验装置中,测量对象为长  $l=300$  mm、截面尺寸  $A=15$  mm $\times$ 1 mm 的不锈钢柔性片条状杆,弹性模量  $E=1.95 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>,密度  $\rho=7.9 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>,自由端粘贴标记点;压电材料为 22 mm $\times$ 19.5 mm 的压电陶瓷单晶片,极板面积为 18 mm $\times$ 18 mm,压电常数  $d_{31}=220 \times 10^{-12}$  C/N;

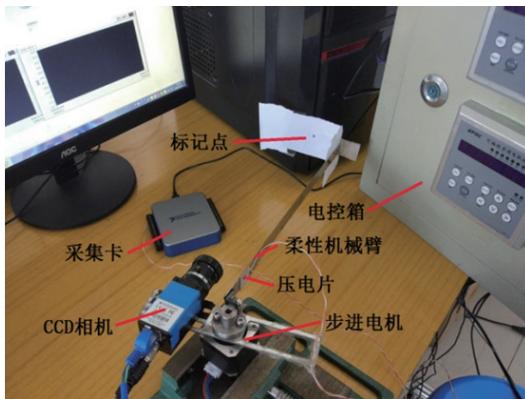


图1 实验装置

Fig. 1 Picture of the physical device

压电片两表面极板间距离  $d=0.2$  mm, 粘贴时压电片极板左侧距离固定端 15 mm。电机为 J-4218HB2403 步进电机, 步距角为  $1.8^\circ$ 。电控箱中有电源以及步进电机的控制器和驱动器, 采集卡为 NI 公司的 NI USB-6003, 相机为 Imaging Source 公司的 DMK33G618 CCD 相机。

实验前, 设置步进电机驱动器为 32 细分, 控制器设置 300 Hz 脉冲频率, 运行步数为 3500; 相机采用  $640 \times 480$  分辨率, 帧速率为 60 帧/s, 采集卡采样频率设为 100 Hz。采集、处理程序采用 LabVIEW 编写, 计算机作为运行平台。实验中, 压电片和相机同时记录数据, 直至实验结束。

由于采集卡测量的压电片上的数据存在周期大于纪录长度的频率成分, 会导致趋势项的影响, 因此首先需要对原信号进行去趋势项处理<sup>[18]</sup>。处理后得到压电片电压数据信号(图2), 可明显看出振动过程为启动—稳定运行—停止衰减3个阶段。

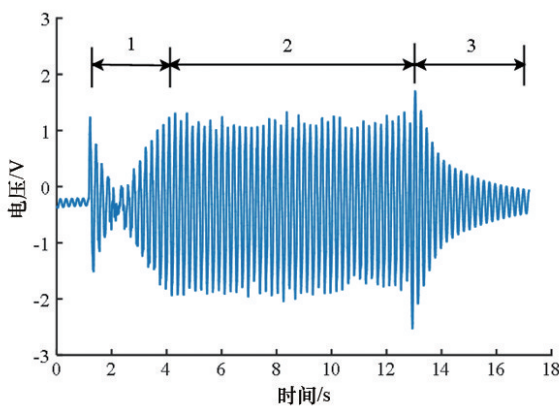


图2 去趋势项后压电片电压信号

Fig. 2 Piezoelectric film voltage signal after removing trend items

对信号进行频谱分析, 得到的结果如图3所示。

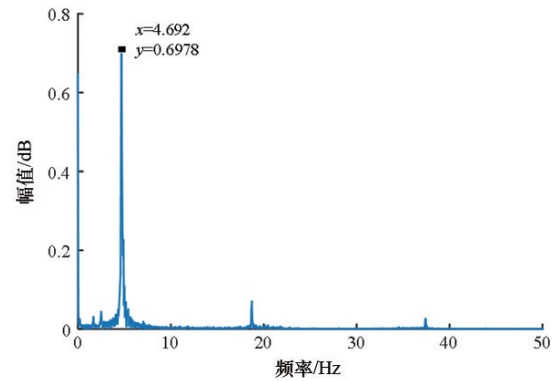


图3 电压信号频谱分析结果

Fig. 3 Spectrum analysis results of voltage signal

从图3可知, 响应频率为 4.692 Hz。根据柔性机械臂一侧约束、另一侧自由的结构特征, 将其等效为悬臂梁进行分析<sup>[19-21]</sup>, 由约束条件可知其频率方程为  $\cos(kl) \cosh(kl) = -1$ , 其中  $l$  为机械臂长度, 则  $i$  阶固有频率为  $\omega_i = k_i^2 (EI/\rho A)^{1/2}$ , 其中  $k_i$  为频率方程第  $i$  个解<sup>[22]</sup>。由柔性机械臂的弯曲方向与相关参数可得到对弯曲中性轴的惯性矩为  $I = 1.25 \times 10^{-11} \text{ m}^4$ , 结合设备的相关参数, 得到前两阶固有频率分别为 4.646 8 Hz 和 20.3474 Hz, 据此可断定, 此时振动 1 阶激励响应最显著。对应的  $i$  阶频率的振型函数为<sup>[23]</sup>

$$Z_i(x) = \cosh(k_i x) - \cos(k_i x) - \frac{[\cosh(k_i l) + \cos(k_i l)][\sinh(k_i x) - \sin(k_i x)]}{\sinh(k_i l) + \sin(k_i l)} \quad (4)$$

根据振型函数, 结合压电片处应变, 可得到柔性机械臂的末端振动位移, 即

$$y_{yd} = \frac{\varepsilon l}{\varepsilon_1} = e \frac{d_{31} l}{d \int_a^b \sqrt{1 + Z'(x)^2} dx - (b-a)} \quad (5)$$

式中,  $\varepsilon$  为压电片的应变, 由压电材料性质可知压电片的应变  $\varepsilon$  与电压  $e$  的关系为  $\varepsilon = e \cdot d_{31}/d$ ;  $\varepsilon_1$  为振型上压电片处的应变;  $a = x_{y1}/l$ 、 $b = x_{y2}/l$  分别为压电片在振型中的比例位置, 其中  $x_{y1} = 15$  mm、 $x_{y2} = 33$  mm 分别为压电片两侧至固定端的距离。

相机采集的是标记点的图像, 首先对采集的第一帧图像进行 Otus 法分割, 最优阈值  $T=43$ 。原图像以及分割后的二值图如图4所示, 图中黑色区域为标记点目标。为了进一步精确标记点位置, 对二值图进行质心的求取, 质心坐标  $(m_1, n_1) = (388.75, 207.63)$ 。按照上述处理过程, 对采集的每帧图像进行处理, 得到第  $i$  帧图

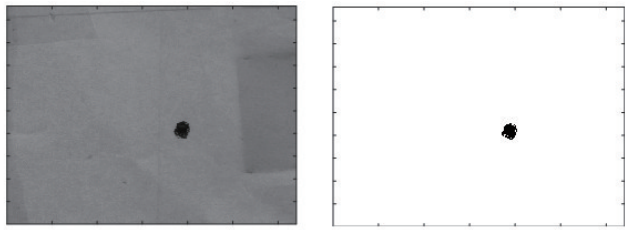


图4 原图像与阈值分割二值图

Fig. 4 Original image and threshold segmentation binary image

像质心坐标 $(m_i, n_i)$ 。根据事先测量结果,相机视野大小为  $62\text{ mm} \times 46\text{ mm}$ ,结合  $640 \times 480$  的分辨率以及公式(2),可得到柔性机械臂水平方向的最终相对振动位移  $y_{sj} = 0.096(m_i - m_1)\text{ mm}$ 。

为了更直观地对比机器视觉测量方法和压电测量方法,将视觉法最终结果与压电法结果绘制于同一坐标系,如图5所示。为进一步比较两者异同,对视觉法得到的振动位移曲线进行频谱分析,结果如图6所示。

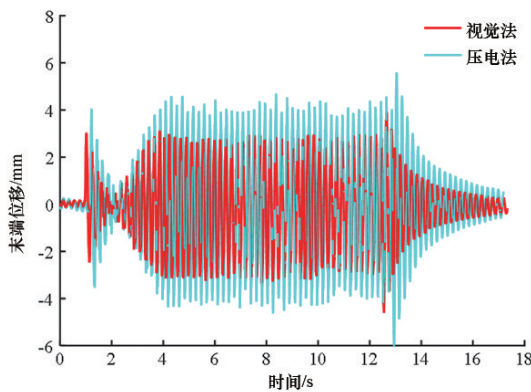


图5 压电法与视觉法测量结果对比

Fig. 5 Measurement contrast chart of piezoelectric and visual methods

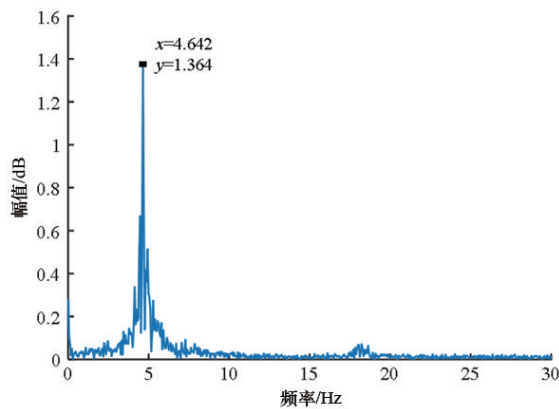


图6 振动位移(视觉法)频谱分析

Fig. 6 Spectrum analysis result of vibration displacement (visual method)

由图5的对比结果可以看出,机器视觉测量方法和压电测量方法均可以测得柔性机械臂的振动位移,并具有相似的波形趋势,能够表现机械臂的振动特征信息。而且,通过图3、图6的频谱分析结果可以看出,压电法与视觉法测量的模态频率分别为  $4.692\text{ Hz}$  和  $4.642\text{ Hz}$ ,也进一步说明了这两种方法均为有效的振动位移测量方法。

为进一步探究机器视觉测量方法和压电测量方法的准确性,对系统进行振动仿真,采用文献[24]的方法在 Simulink 中建立柔性机械臂振动模型,载入本文系统的相关参数,得到机械臂的末端振动位移,并作为标准位移以检验测量方法的准确性,三者稳定运行时的振动曲线如图7所示。

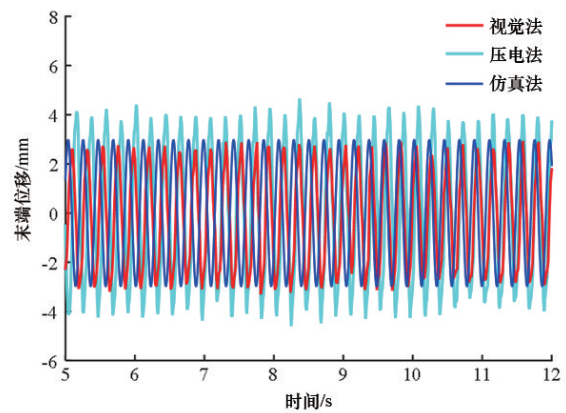


图7 3种方法测量结果对比

Fig. 7 Measurement contrast chart of three methods

由于压电测量方法是通过压电片处的电压信息,结合振型函数进行一系列的公式运算得到的振动位移,公式误差反复叠加,并且公式中的积分、微分等处理,使得信号中的噪声在此过程中放大,特别是低频噪声造成的影响更大<sup>[25]</sup>。由图7可以看出,压电测量方法的最终运算结果与标准位移的误差明显。从图5中可以看出,与机器视觉测量方法相比,压电法在测量上存在一定的时滞,曲线滞后,实时性较差。另外,压电法测量时,压电片的粘贴一定程度上改变了柔性机械臂的结构特征,进一步加大了结果误差,以致最终振动幅值较大,准确性较差。

相比于压电法,机器视觉测量方法是根据实时采集的图像特征直接得到标记点的位置变化,也就是机械臂末端的振动位移,仅进行了相机标定,避免了换算时的大量公式导致的误差叠加,并且非接触式测量,未

改变被测物的结构,总体来说,测量结果的准确性得到了大幅提高。

### 3 结论

基于机器视觉的测量方法,能够根据图像特征准确地测得柔性结构的振动位移,避免了相关换算误差,测量过程直观。与压电测量方法相比,视觉法测得的位移特征表现的更贴近真实情况,实时性更强,并且没有改变被测物结构。两者的测量结果与仿真结果比较也进一步证实了,针对柔性机械臂,在非接触的前提下,基于机器视觉的振动位移测量方法具有更高的准确性和优越性。

#### 参考文献(References)

- [1] 吕宽州, 陈素霞, 黄全振. 柔性机械臂的轨迹跟踪与振动模糊控制[J]. 工程设计学报, 2015(1): 78-83.  
Lü Kuangzhou, Chen Suxia, Huang Quanzhen. Trajectory tracking and vibration fuzzy control of flexible manipulator[J]. Journal of Engineering Design, 2015(1): 78-83.
- [2] Tian B, Liu H, Yang N, et al. Design of a Piezoelectric Accelerometer with High Sensitivity and Low Transverse Effect[J]. Sensors, 2016, 16(10): 1587.
- [3] 曹丽曼. 压电式加速度传感器振动测量应用研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2015(7): 164-166.  
Cao Liman. Application of piezoelectric accelerometer to vibration measurement[J]. Automation and Instrumentation, 2015 (7): 164-166.
- [4] 袁杰, 崔壮平, 罗华, 等. 应用于柔性长臂架的多传感器振动测量系统[J]. 仪表技术与传感器, 2015(11): 71-73.  
Yuan Jie, Cui Zhuangping, Luo Hua, et al. Multi-sensor vibration measurement system for flexible long jib[J]. Instrumentation Technology and Sensor, 2015(11): 71-73.
- [5] Jiang C, Zhang Z, Li C. Vibration measurement based on multiple self-mixing interferometry[J]. Optics Communications, 2016, 367: 227-233.
- [6] 张斌, 冯其波, 由凤玲, 等. 基于BSO晶体的振动测量系统[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 90-94.  
Zhang Bin, Feng Qibo, You Fengling, et al. Oscillation measurement system based on BSO crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 90-94.
- [7] 陈若珠, 赵珊. 基于机器视觉技术的振动台试验变形位移测量方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(6): 56-59.  
Chen Ruozhu, Zhao Shan. Research on deformation and displacement measurement of shaking table test based on machine vision technology[J]. Computer Measurement and Control, 2016, 24(6): 56-59.
- [8] Xu Chao, Zhang Yifan, Han Xiaoming, et al. Measurement of vibration displacement of large flexible structures based on machine vision[J]. Journal of Vibration, Testing and Diagnosis, 2017(4): 781-846.
- [9] Tao X, Xu D, Zhang Z, et al. Vibration measurement in high precision for flexible structure based on microscopic vision[J]. Robotics, 2016, 5(2): 9-13.
- [10] Arfaoui A. Geometric image rectification: A review of most commonly used calibration patterns[J]. International Journal of Signal and Image Processing Issues, 2015(1): 1-8.
- [11] Sładek J, Ostrowska K, Kohut P, et al. Development of a vision based deflection measurement system and its accuracy assessment[J]. Measurement Journal of the International Measurement Confederation, 2013, 46(3): 1237-1249.
- [12] 娄军强, 魏燕定, 杨依领, 等. 智能柔性机械臂的建模和振动主动控制研究[J]. 机器人, 2014(5): 552-559.  
Lou Junqiang, Wei Yanding, Yang Yiling, et al. Modeling and vibration active control of intelligent flexible manipulator [J]. Botman, 2014 (5): 552-559.
- [13] Jia Z, Wang B, Liu W, et al. An improved image acquiring method for machine vision measurement of hot formed parts [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2010, 210(2): 267-271.
- [14] 金守峰, 范荻, 陈蓉, 等. 面向回转类零件圆度的机器视觉测量方法与试验[J]. 机械设计与研究, 2016(4): 117-119.  
Jin Shoufeng, Fan Di, Chen Rong, et al. Machine vision measurement method and experiment for roundness of rotary parts [J]. Mechanical Design and Research, 2016(4): 117-119.
- [15] Ye X W, Yi T H, Dong C Z, et al. Multi-point displacement monitoring of bridges using a vision-based approach[J]. Wind & Structures An International Journal, 2015, 20(2): 315-326.
- [16] Kim S W, Kim N S. Multi-point Displacement response measurement of civil Infrastructures using digital image processing [J]. Procedia Engineering, 2011, 14(2259): 195-203.
- [17] Mazen W A, Caffrey J P, Masri S F. A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating systems[J]. Smart Materials & Structures, 2003, 12(5): 785.
- [18] Sabatini M, Gasbarri P, Monti R, et al. Vibration control of a flexible space manipulator during on orbit operations[J]. Acta Astronautica, 2012, 73(2): 109-121.
- [19] Feng D, Feng M Q, Ozer E, et al. A vision-based sensor for noncontact structural, displacement measurement[J]. Sensors, 2015, 15(7): 16557-16575.
- [20] Liu Y, Li W, Wang Y, et al. Coupling vibration characteristics of a translating flexible robot manipulator with harmonic

- driving motions[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2015, 17(7): 3415–3427.
- [21] Qiu Z, Zhang X. Vision-based vibration measurement and control of flexible structure[J]. *Journal of Vibration Measurement & Diagnosis*, 2012, 32(1): 11–16.
- [22] 万子平, 马丽莎, 陈明, 等. 机器视觉的零件轮廓尺寸测量系统设计[J]. *单片机与嵌入式系统应用*, 2017, 17(12): 32–34.
- Wan Ziping, Ma Lisha, Chen Ming, et al. Design of part contour measurement system for machine vision[J]. *Microcontrollers & Embedded Systems*, 2017, 17(12): 32–34.
- [23] Luhmann T, Fraser C, Maas H G. Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2016, 115: 37–46.
- [24] 谷勇霞, 张玉玲, 赵杰亮, 等. 柔性机械臂动力学建模理论与实验研究进展[J]. *中国机械工程*, 2016, 27(12): 1694–1703.
- Gu Yongxia, Zhang Yuling, Zhao Jieliang, et al. Development of theoretical and experimental research on dynamic modeling of flexible manipulators[J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(12): 1694–1703.
- [25] Sun Q, Hou Y, Tan Q, et al. A planar-dimensions machine vision measurement method based on lens distortion correction[J]. *Scientific World Journal*, 2013, 2013(4): 963621.

## Vibration displacement measurement of flexible manipulator using machine vision

MA Tianbing, LIU Jian, DU Fei, CHEN Nannan

College of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

**Abstract** Of traditional vibration displacement measurement methods, the indirect measurement method has its large error and low accuracy while the direct measurement method can achieve accuracy with high cost and poor utility. So a vibration displacement measurement method using machine vision is proposed. A motor-driven flexible arm is selected as the measurement object. A CCD camera is used to collect the motion image of the marker on the arm's manipulator. After the visual processing such as threshold segmentation and centroid detection, the vibration displacement information of the manipulator is obtained. An experimental platform is built to verify the method. The result is compared with the vibration displacements obtained by piezoelectric material measurement method and the simulation method. It is shown that the machine vision-based vibration displacement measurement method can be well applied to the flexible arm without any contacts. The accurate and real-time vibration displacement measurement of the arm is superior to the piezoelectric material measurement method, avoiding the influence of formula errors and other effects, and has obvious advantages.

**Keywords** vibration displacement; flexible arm; machine vision; piezoelectric material ●



(责任编辑 韩星明)