

基于视频的机械装备全场振动测量研究

陈立群, 杨天智

Full-field video-based vibration measurement of mechanical equipment

CHEN Liqun and YANG Tianzhi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/1000-0992-21-012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

密集颗粒体系的颗粒运动及结构测量技术

Measurement techniques of grain motion and inter-grain structures in dense granular materials

力学进展. 2018, 48(1): 1812

冰区航行中船舶结构冰载荷的现场测量与反演方法研究进展

Research progress of field measurements and inversion methods of ice loads on ship structure during ice navigation

力学进展. 2020, 50(1): 202003

海洋柔性结构涡激振动的流固耦合机理和响应

Review on fluid-solid coupling and dynamic response of vortex-induced vibration of slender ocean cylinders

力学进展. 2017, 47(1): 25-91

基于大偏差理论的随机动力学研究

The researches on the stochastic dynamics based on the large deviation theory

力学进展. 2020, 50(1): 202010

空化水动力学非定常特性研究进展及展望

Research progresses and prospects of unsteady hydrodynamics characteristics for cavitation

力学进展. 2019, 49(1): 201906



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

基于视频的机械装备全场振动测量研究

陈立群^{1,*} 杨天智²

¹ 哈尔滨工业大学(深圳)理学院力学系, 广东深圳 518055

² 东北大学机械学院, 沈阳 110819

摘 要 本文概述了基于视频的机械装备全场振动测量的研究动态和应用前景. 重点讨论了该技术在两个场景中的独特优势: 大尺寸和处于运动叠加中的装备的振动测量问题, 总结了近几年的最新进展和挑战, 最后简述了该方向的发展趋势.

关键词 非接触全场振动测量, 大尺寸装备, 运动叠加

中图分类号: O313.2 文献标识码: A DOI: [10.6052/1000-0992-21-012](https://doi.org/10.6052/1000-0992-21-012)

收稿日期: 2021-03-20; 录用日期: 2021-06-08; 在线出版日期: 2021-06-18

* E-mail: chenliqun@hit.edu.cn

引用方式: 陈立群, 杨天智. 基于视频的机械装备全场振动测量研究. 力学进展, 2021, 51(2): 376-381

Chen L Q, Yang T Z. Full-field video-based vibration measurement of mechanical equipment.

Advances in Mechanics, 2021, 51(2): 376-381

© 2021 《力学进展》版权所有



图 1

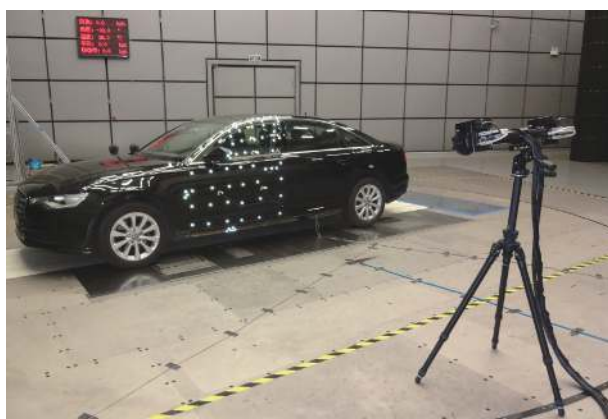
机器人辅助激光扫描测振平台

1 引言

结构的振动、冲击等动态性能测试, 需要使用接触式或非接触式传感器. 接触式传感器需要粘贴或安装于装备表面, 常用的传感器包括加速度计、位移计、倾角仪、应变片等. 非接触式的测量仪器有激光测振仪、电涡流传感器、微波传感器、光电子传感器等. 这些传感器以“单点”的方式进行测量. 若对机械装备表面进行全场测量, 则需要在装备表面大量安装传感器. 实验人员长时间重复劳动, 安装条件的一致性难以保证. 这导致实验准备时间长且增加了冗余质量. 虽然激光测振仪等可用内置“振镜”来实现多点连续扫描, 提高了测量效率和精度, 但异形三维曲面需要设计专门机构来辅助扫描. 例如, 图 1 为德国 Polytec 公司的机器人辅助激光扫描测振平台, 由两套机器人手臂来辅助扫描式激光测振仪完成车身的全场振动测试. 该系统的硬件搭建较为复杂、昂贵, 校准较难且测量过程耗时多. 相比于传统的接触式传感器测量方法, 基于视频的测量技术可与其互相补充、相互验证并进一步对全局动力学行为进行可视化演示. 而相比于激光测量设备 (如激光多普勒原理), 其全场测量速度有较大优势.

2 原理与研究进展概述

成功应用于机械故障诊断、流体力学、智能控制等领域的机器视觉和人工智能等技术, 为装备全场测量提供新的手段, 实现了“所见即所得”的直观效果. 其技术特色在于其全场的快速测量和诊断, 可视化的结果帮助科研人员加深了机械运行机理、故障定位的全局理解. 而随着千万级超高像素光学元器件的发展, 其测量精度已可达微米级, 与接触式传感器相近. 基于视频的全

**图 2**

德国 Polytec 公司的机器人扫描测振平台

场振动测量的其核心概念是基于 Gibson 在 1950 年提出的“光流”理论 (Gibson 1950). 空间物体的运动信息可在视频中找到“时间-光场强度变化”的对应关系. 通过相机的初始参数标定, 利用相机帧率等数据可准确推算出装备的振动位移、速度、加速度和频率等信息. 近几年, 美国、英国、德国、日本、中国等国家都对基于机器视觉的全场测量技术加大了投入, 国内许多高校和研究所也在该技术领域取得突破, 如清华大学、北京航空航天大学、天津大学、东南大学、国防科技大学、中国科技大学、西安交通大学、南京航空航天大学、北京强度与环境研究所、中国航空工业沈阳飞机设计研究所等. 同时, 可视化技术正在与人工智能、深度学习等技术深度融合, 为高精度的装备故障诊断、定位和损伤识别提供了新的技术手段 (Yang Y C et al. 2020, Yang R et al. 2020, Sun 2020, Xu 2018). 值得注意的是, 这一领域已有许多专家学者发表了很全面的综述, 如英国拉夫堡大学的 Rothberg 等 (2017) 对近几年的基于激光多普勒原理和高速成像原理的振动测量技术做了详细的介绍. 限于篇幅, 本文仅对传统接触式测量方法受限、但视频振动测量技术有独特优势的特殊场景进行简要评述和展望.

场景 1: 大尺寸机械装备的全场动态测量

大尺寸机械装备、建筑结构的振动测量技术瓶颈是测量效率低和传感器布置复杂. 基于视频的测量技术对解决这类问题有测量速度上的优势. 由于目前 CMOS 成像技术的进步, 千万像素级的感光元件可同时对结构进行整体测量. 如 Chen 等 (2018) 用高速相机对朴次茅斯市的战争纪念桥进行了全场振动测量. Polytec 公司也对基于视频测量技术进行探索和革新, 如图 2 所示, 所研制的 PONTOS Live 三维动态运动跟踪系统采用双目相机对车身表面的标记点进行了连续振动测量 (风致振动). 此方法在德国大众汽车公司的实验中得到验证, 随后被越来越多的汽车公司应用于评估汽车风洞的噪声、振动与声振粗糙度. Molina-Viedma 等 (2018) 利用数字图像相关技术结合相位放大原理实现了对飞行器进行全尺寸的高精度振动测量, 他们采用了双目高速相机, 从而获得了飞行器的三维振动信息. 更多的视觉测量技术在大尺寸结构中的应用可参见综

述 (Zona 2021).

场景 2: 处于运动叠加中的机械装备的振动测量

除了自身振动以外, 大量的机械装备的工作状态处于叠加运动中 (如处于平动和转动), 即在“大运动中叠加着小运动”. 如车辆在运行中的振动测量、整流罩分离时的振动测试都是该类问题. 这类问题需要在大的刚体运动中分离和准确测量出小量级的机械振动, 信号分离难度很大, 甚至噪声强度大于信号强度 (Durand-Texte 2019). 传统的接触式传感器因布线限制, 难以应用于该场景. 典型的例子是高速转动中的风机叶片振动监测, Polytec 公司为了实现叶片运动跟踪, 制造了回旋跟踪器来锁定叶尖位置, 并利用自动跟踪技术对叶尖进行振动测量. 德国的 Fraunhofer 光电子研究所利用回转云台来操纵激光头以实现叶尖的跟踪测量. 美国麻省大学的 Sarrafi 等 (2018) 仅利用高速相机和光流跟踪算法成功实现了对转动中的叶片进行实时振动测量. 这一方法的思路比自动控制的回转机构更加简单直接, 且成本较低, 为利用视频技术测量运动叠加中的装备提供了新的思路.

当然, 基于机器视觉的全场测量技术也有其缺点和应用限制, 如工业环境中复杂光场对测量信号有较大的干扰, 对现场测量条件提出了更严苛的要求; 基于视频的测量技术需要使用单台或多台高速相机进行测量, 这导致成本较高. 在实际结构测试中, 该技术可与传统方法相互融合使用, 各取所长. 未来几年, 机器视觉技术将会随着人工智能技术的发展得到长足进步, 可以预见其在力学多个学科如 MEMS、航空航天、生物力学等领域将会有越来越多的应用.

3 结论与展望

不同于接触式传感器和激光测振仪等, 机器视觉技术可方便地对大尺寸、运动中的装备同时进行全场测量和检测, 可融合快速发展的人工智能和图像处理技术对装备进行长期健康监测和损伤识别. 机器视觉技术设备便携、结果准确、多场景适应, 为动力学领域的精确测量提供了新的契机. 如何通过动力学的基础理论完善基于视频的振动测量和信号分析技术, 也对动力学与控制的学科发展提出了新的挑战.

致谢 国家自然科学基金资助项目 (11772181).

参考文献

- Chen J G, Adams T M, Sun H, et al. 2018. Camera-based vibration measurement of the World War I Memorial Bridge in Portsmouth, New Hampshire. *Journal of Structural Engineering*, **144**: 04018207.
- Durand-Texte T, Simonetto E, Durand S, et al. 2019. Vibration measurement using a pseudo-stereo system, target tracking and vision methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **118**: 30-40.
- Gibson J J, 1950. *The Perception of the Visual World*. Houghton Mifflin.
- Molina-Viedma Á J, López-Alba E, Felipe-Sesé L, et al. 2018. Modal parameters evaluation in a full-scale aircraft demonstrator under different environmental conditions using HS 3D-DIC. *Materials*, **11**: 230.
- Rothberg S J, Allen M S, Castellini P, et al. 2017. An international review of laser Doppler vibrometry: Making light work of vibration measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, **99**: 11-22.

- Sarrafi A, Mao Z, Niezrecki C, et al. 2018. Vibration-based damage detection in wind turbine blades using phase-based motion estimation and motion magnification. *Journal of Sound and Vibration*, **421**: 300-318.
- Sun K H, Huh H, Tama B A, et al. 2020. Vision-based fault diagnostics using explainable deep learning with class activation maps. *IEEE Access*, **8**: 129169-129179.
- Xu Y, Brownjohn J M W. 2018. Review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures. *J Civil Struct Health Monit*, **8**: 91-110.
- Yang Y C, Dorn C, Farrar C, et al. 2020. Blind, simultaneous identification of full-field vibration modes and large rigid-body motion of output-only structures from digital video measurements. *Engineering Structures*, **207**: 110183.
- Yang R, Singh S K, Tavakkoli M, et al. 2020. CNN-LSTM deep learning architecture for computer vision-based modal frequency detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **144**: 106885.
- Zona A. 2021. Vision-based vibration monitoring of structures and infrastructures: An overview of recent applications. *Infrastructures*, **6**: 4.

(责任编辑: 丁千)

Full-field video-based vibration measurement of mechanical equipment

CHEN Liqun^{1,*} YANG Tianzhi²

¹ School of Science, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China

² School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract This paper summarizes the trends and application of full-field vibration measurement based on video-based methodology. It focuses on the unique advantages of the two scenarios: vibration measurement of large-size and moving equipment. We summarize the latest progress and challenges in recent years, and finally, briefly present the outlook in this field.

Keywords non-contact full-field vibration measurement, large-scale equipment, motion overlapping



陈立群, 哈尔滨工业大学(深圳)理学院力学系教授, 博士生导师. 从事工程结构的非线性设计与调控、轴向运动连续体振动分析与控制等研究. 曾获国家自然科学奖二等奖, 入选国家杰出青年科学基金、教育部长江学者特聘教授和国家“万人计划”教学名师等人才计划. 享受政府特殊贡献津贴, 被表彰为全国优秀博士后、全国模范教授和全国先进工作者.

Received: 20 March 2021; accepted: 8 June 2021; online: 18 June 2021

* E-mail: chenliqun@hit.edu.cn

© 2021 *Advances in Mechanics*.