

基于激光散斑的微振动探测技术研究进展

王晓忠^{1*}, 余睿¹, 郭威¹, 黄学渊¹, 李文臣², 王程³¹厦门大学电子科学与技术学院, 福建 厦门 361005;²西京学院信息工程学院, 陕西 西安 710123;³厦门大学信息学院, 福建 厦门 361005

摘要 基于激光散斑的微振动探测技术具有非接触、系统简单、隐蔽性好、灵敏度高、探测距离远等优点,在医疗、航空、市政、安防、国防等各个领域都有广泛应用需求。按照探测体制的发展顺序,从高速面阵相机、光电二极管、线阵相机、卷帘快门相机四个方面综述了激光散斑微振动探测技术的研究进展,讨论了不同体制的优缺点,总结了所采用的振动信号提取方法,并对该技术的未来发展进行了展望。

关键词 机器视觉; 激光散斑; 微振动探测; 高速面阵相机; 光电二极管; 线阵相机; 卷帘快门相机

中图分类号 TN2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1415005

Research Progress in Microvibration Detection Technology Based on Laser Speckles

Wang Xiaozhong^{1*}, Yu Rui¹, Guo Wei¹, Huang Xueyuan¹, Li Wenchen², Wang Cheng³¹School of Electronics Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;²College of Information Engineering, Xijing University, Xi'an, 710123, Shaanxi, China;³College of Informatics, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China

Abstract Microvibration sensing technology based on laser speckles has several advantages, including noncontact, system compact, invisibility, high sensibility and long sensing distance, and it can be used in medical treatment, aerospace, civil engineering, security, national defense, etc. In this paper, we reviewed the development of microvibration detection using laser speckles according to the developing sequence and detection scheme. Here, we introduced four detecting schemes, including high-speed area array camera, photodetector, line array camera, and rolling shutter camera. Furthermore, we discussed their advantages and disadvantages and summarized the algorithms for extracting vibration signals. Additionally, we provided an outlook on future development trends in laser speckle-based microvibration detection.

Key words machine vision; laser speckle; microvibration detection; high-speed area array camera; photodiode; line array camera; rolling shutter camera

1 引言

光学振动感知技术具有非接触、易部署、灵敏度高、探测距离远的优点,在航天^[1]、工业检测^[2-3]、市政设施^[4]、安防^[5]、军事^[6]方面都有着广泛的应用。当前,主流的光学振动探测技术包括激光多普勒测振^[7]、激光自混合测振^[8-10]等。激光多普勒测振通过物体运动引起的

多普勒频移提取振动信息,具有灵敏度高、应用范围广的优点,但由于采用了干涉仪,系统比较复杂,并且对回波强度有一定的要求。激光自混合测振利用回波引起谐振腔信号的扰动来提取目标的振动信息,灵敏度非常高,但存在稳定工作点随回波强度而改变的缺点,从而影响了其应用^[8]。近年来,随着光电子技术和器件的发展,基于激光散斑高速成像的微振动探测技术^[11]以其

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-04-21; 录用日期: 2022-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(61975167,62175206)、陕西省重点研发计划(2020GY-082)、水声对抗技术国防科技重点实验室(JZX7Y202001SY003401)

通信作者: *wangxz@xmu.edu.cn

非接触、系统简单、隐蔽性好、灵敏度高、探测距离远等优点引起了研究人员的关注,并逐渐得到推广和应用。

激光散斑微振动探测技术,基本上都需要成像设备采集目标物体的运动视频,然后通过算法提取出物体的振动信息,在人工智能、机器视觉方面有潜在的应用价值。按照具体的实施方案,基于激光散斑的微振动探测技术可以分为高速面阵相机成像、光电二极管散斑通量测量、线阵相机成像、卷帘快门相机成像等。

2 高速面阵相机成像

2009年,以色列 Zalevsky^[11]等利用高速面阵相机记录激光散斑,然后通过帧间散斑匹配提取微弱振动,是最早的利用高速成像提取微弱振动信息的报道,其原理如图 1 所示。激光照射被探测物体,被探测物体的粗糙表面使得入射激光发生散射,从而在自由空间中形成激光散斑。对于特定的激光照射区域,激光散斑的统计分布保持不变,被测物体因振动而产生的倾斜,会转换为观测平面上激光散斑的平移。若被测物体因为振动而出现角度为 α 的倾斜,那么自由空间中的散斑图像所产生的位移 δ 可以描述为

$$\delta = Z_2 \tan \alpha, \quad (1)$$

式中: Z_2 为被探测物体到空间中观测平面的距离。根据几何光学中放大倍率的计算,散斑在成像传感器上的位移 Δx 可以描述为

$$\Delta x = \frac{f}{Z_3} \cdot \delta, \quad (2)$$

式中: Z_3 为散斑观测平面与成像系统主平面之间的距离; f 为光学成像镜头的焦距。将式(1)和式(2)合并,成像传感器上散斑位移与被探测物体倾斜角度的关系可以描述为

$$\Delta x = \frac{Z_2}{Z_3} \cdot f \tan \alpha. \quad (3)$$

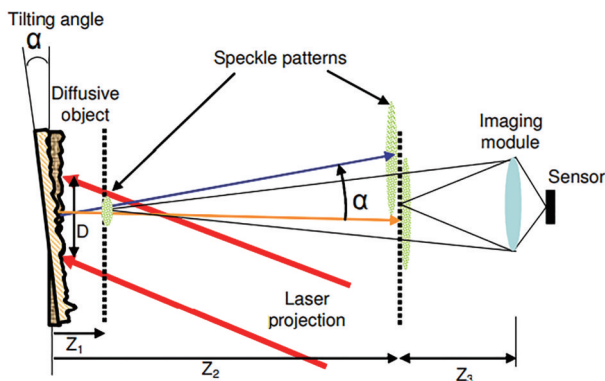


图 1 激光散斑微振动测量原理

Fig. 1 Schematic diagram of laser speckle microvibration measurement

自由空间中的散斑分布被高速成像系统采集和记录,在计算机中通过图像匹配进行处理,提取出位移信息,将位移信息按照时间顺序排列,经归一化、去直等

处理后即可重建被测物体的微振动信息。该课题组使用交叉相关算法对采集到的激光散斑图像进行处理,实现了远程语音信号及心跳信号的复原。2015年,该课题组 Ozana 等^[12]采用可见和近红外高速相机记录经被测物体调制的散斑图像,通过峰值质心算法提取振动信息,在 40 m 的距离成功实现了对猪的实时呼吸、脉搏、心率、血压、血氧等指标的监控,其典型的心跳、呼吸监控结果如图 2 所示。2014年,厦门大学王程教授团队 Chen 等^[13]使用自适应种子点匹配算法,在 10 m 距离上实现了信噪比大于 20 dB 的 1.8 kHz 振动信号的提取,同时验证了系统在 50 m 探测距离上的可行性。该研究所采用的振动信号探测与提取流程如图 3 所示。

2016年,俄罗斯 Tomsk 理工大学 Gubarev 等^[14]对散斑图像处理中的数字图像相关算法进行了测试,系统评价了常用的三类数字图像相关算法对散斑图像处理结果的影响,并给出了能更精确地计算散斑图像的位移的算法:

$$C_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}] \cdot [g(x_i, y_j) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [g(x_i, y_j) - \bar{g}]^2}}, \quad (4)$$

式中: $f(x_i, y_j)$ 、 $g(x_i, y_j)$ 分别是前后两帧图像不同坐标位置的像素灰度; \bar{f} 、 \bar{g} 分别是相应帧的平均像素灰度。式(4)在相关系数计算中能够获得一个明显的主峰,具有较强的抗噪声能力,如图 4(a)所示;同时,所提取位移的平均绝对误差小,如图 4(b)所示。

2020年,日本庆应大学 Wu 等^[15]将光流法应用于振动信号提取,采用帧率为 2300 frame/s 的高速相机,实现了频率为 1 kHz 左右信号的还原。该方法还原的信号具有较高质量且具有实时性,表明了该方法在低频区性能良好。若使用速度更快的成像传感器和更好的优化算法提高系统的采样率,有望使该系统实时复原语音。2021年,中国科学技术大学 Wang 等^[16]对激光散斑测振系统进行了优化研究并指出,对采用的数字图像相关(DIC)算法而言,成像镜头光圈的变化会导致记录的激光散斑的尺寸和数量发生变化,从而产生不同程度的随机误差及系统误差,光圈数在 5.6 时,系统的总误差最小。

2014年,美国麻省理工学院 Davis 等^[17]提出了一种基于复数金字塔算法提取振动信息的视觉麦克风(MIT)方法。该方法直接使用环境光照明,只需一台高速摄像机即可实现语音、音乐等多种声音信号的提取,进一步简化了系统配置。文献[17]虽然并未采用激光照明,但是其提出的基于复数金字塔的图像处理方法,也可以用于激光散斑图像序列的处理,从而提取出振动信息。该方法的流程如图 5 所示,在环境光照

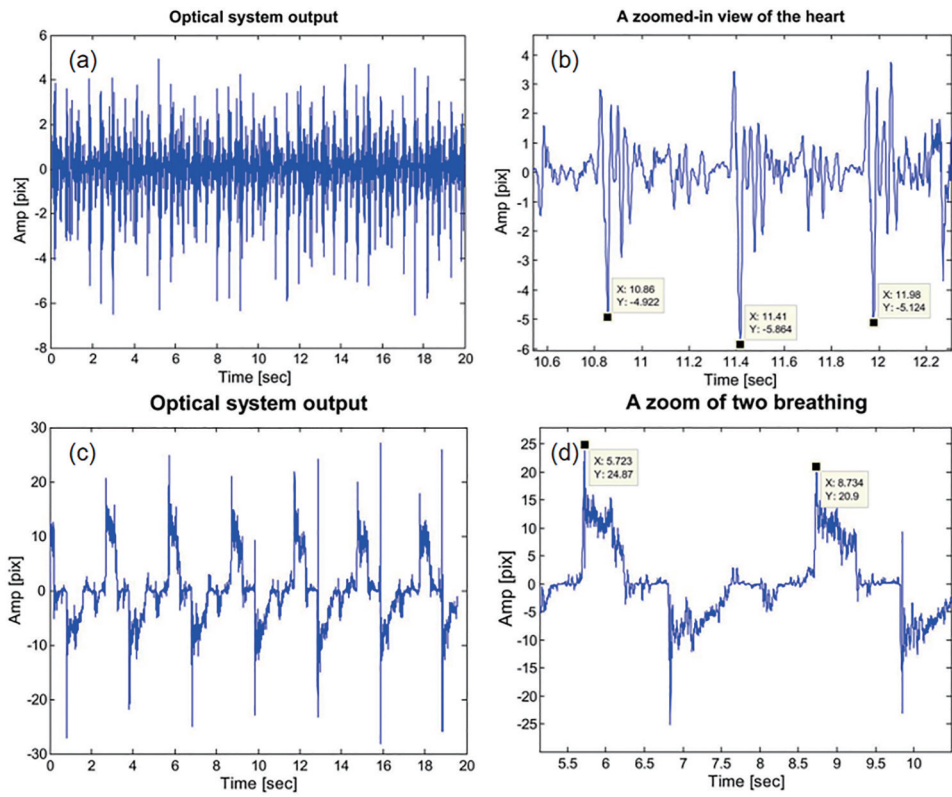


图 2 基于激光散斑远距离高速成像感知猪的心跳、呼吸结果图。(a)提取的心跳信号;(b)心跳信号局部;(c)提取的呼吸信号;(d)提取呼吸信号局部

Fig. 2 Pig heartbeat and respiration signals extraction based on laser speckle. (a) Extracted heartbeat signal; (b) part of extracted heartbeat signal; (c) extracted respiratory signal; (d) part of extracted respiratory signal

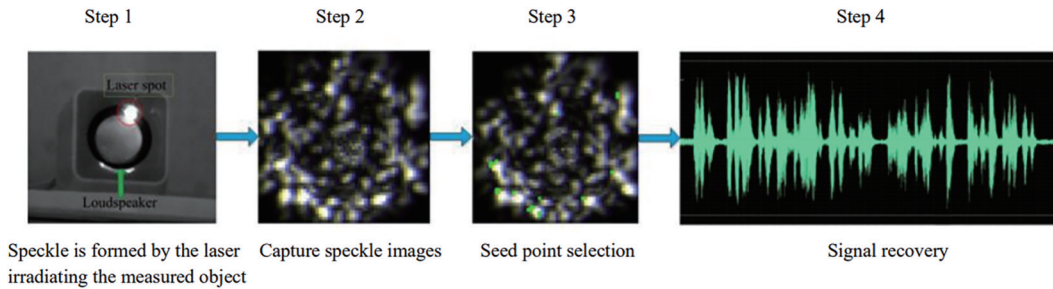


图 3 自适应种子点匹配算法测振流程图

Fig. 3 Flowchart of vibration measurement based on adaptive seed point matching algorithm

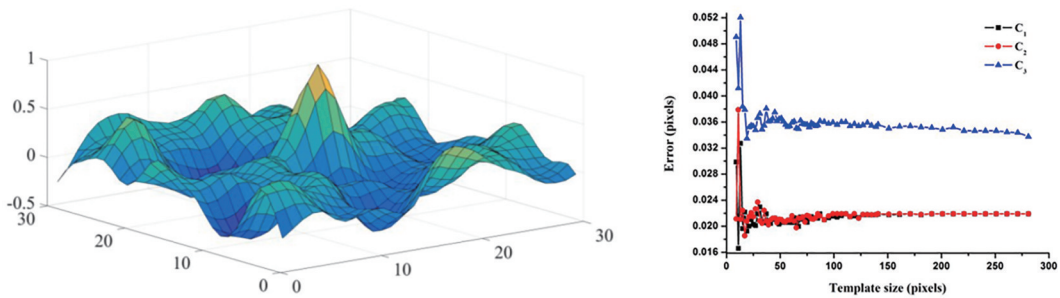


图 4 数字图像相关算法计算结果。(a)相关系数分布;(b)位移的平均绝对误差

Fig. 4 Calculation result of digital image correlation algorithm. (a) Correlation coefficient distribution; (b) mean absolute error of displacement

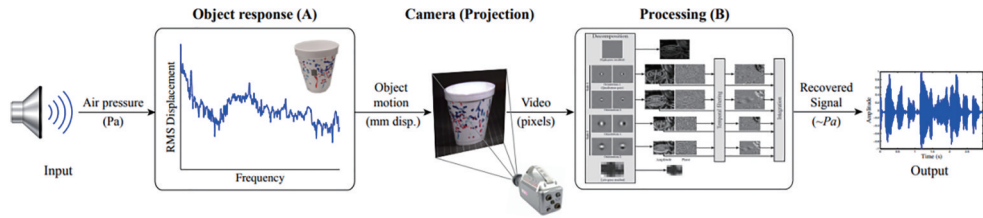


图 5 可视麦克风方案流程图^[17]
Fig. 5 Flowchart of visual microphone scheme^[17]

明下,音箱发出的声音激励被测物体,利用高速相机记录物体振动的视频;然后采用复数可控金字塔算法对视频进行分解,通过相邻帧图像之间的相位关系,提取振动信息。同时,该课题组首次提出了利用卷帘快门相机的果冻效应进行振动探测的方案,并提取到了频率低于 1000 Hz 的音频信号,但是并没有给出详细的算法。MIT 方法的主要缺点是探测距离近,被测物体和摄像机的距离在 2 m 量级,同时计算也比较复杂,不易实现实时测量。2017 年,受美国国防部的委托,一个由多名专家组成的研究团队对 Davis 等^[17]提出的视觉麦克风方案进行了深入研究并指出,该方案需要大的声音才能引起足够强烈的振动从而实现较好的信号提取及复原效果,这制约了该技术在相关领域的进一步实用^[18]。

2014 年,美国天主教大学 Wang 等^[19]采用基于子集的图像相关算法,在 3 min 内处理了超过 4 GB 的 21000 张图片,为可视麦克风方案提供了一种快速算法。然而受限于实验条件,该研究使用的相机帧率仅为 1000 frame/s,最高可探测信号仅为 500 Hz。2016 年,中国科学技术大学郭杰团队 Zhang 等^[20-21]采用奇异值分解(SVD)算法处理 MIT 方法获得的视频,在 1 min 内复原了一段 3.15 s 的语音音频,而且复原语音可懂度达到 0.4 左右。同样受实验条件的限制,该实验中所复原的语音信号,其最大频率仅达到 800 Hz。

3 光电二极管探测散斑通量

高速面阵成像方案需要从相邻帧的图像配准中提取振动信息,所能探测的最高频率受到成像设备最高帧速的限制,而高速面阵相机比较昂贵。同时,面阵图像的数据量比较大,除了不方便存储和传输,也增加了处理时间。为了解决这个问题,研究人员提出了采用光电二极管作为探测器的方案。2011 年,俄罗斯 Veber 等^[22]采用光电二极管与空间光调制器相结合的方案,将散斑的平移转换为入射到光电二极管上通量的变化,实现了高达 5000 Hz 振动信号的探测,如图 6 所示。

2014 年,意大利 Bianchi^[23]对光电二极管方案进行了优化,如图 7 所示。优化结果表明,当成像系统光阑孔径是客观散斑尺寸的 5~6 倍且采集到的散斑个数在几十的量级时,系统输出的信号具有最低谐波

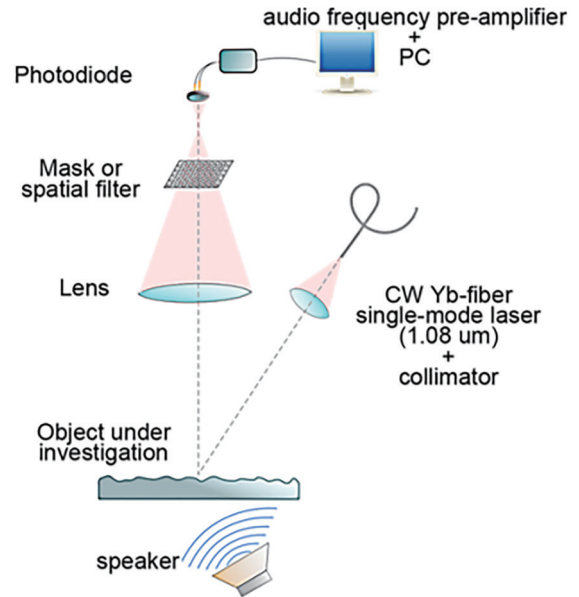


图 6 光电二极管与空间光调制器结合的探测方案
Fig. 6 Combined detection scheme of photodiode and spatial light modulator

噪声。

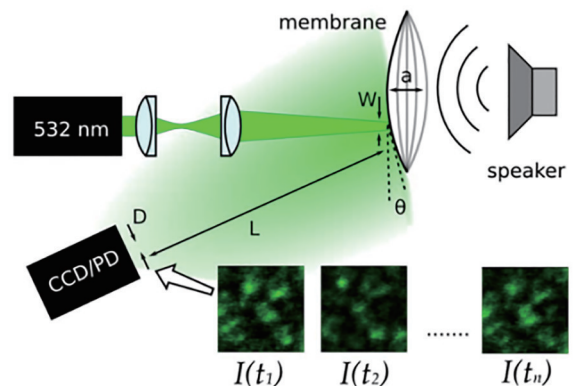


图 7 光电二极管探测方案的优化
Fig. 7 Optimization of photodiode detection scheme

4 线阵相机成像

为了解决高速全局快门面阵相机价格昂贵、数据量大、处理耗时、帧速受限的缺点,研究人员提出了使用线阵相机采集激光散斑图像的方案。2019 年,意大利 Bianchi 等^[24]提出了线阵电荷耦合器件(CCD)方案,

其系统光路如图 8 所示。振动物体散射形成的散斑图像由抛物面镜 ($f_1=800$ mm) 收集, 经准直镜 ($f_2=-100$ mm) 准直后通过圆柱形透镜 ($f_c=50$ mm) 聚焦到线阵 CCD 上, 将二维散斑压缩为一维散斑。采用相关质心算法分析散斑图像获得远程表面振动的角速度, 进而提取出振动频率。二维散斑压缩为一维散斑后, 其光强提升了约 1000 倍, 同时需要处理的数据量也相应减少为原来的 1/1000。通过系统优化, 该方案实现了 300 m 外的语音探测。对一维散斑进行采集与

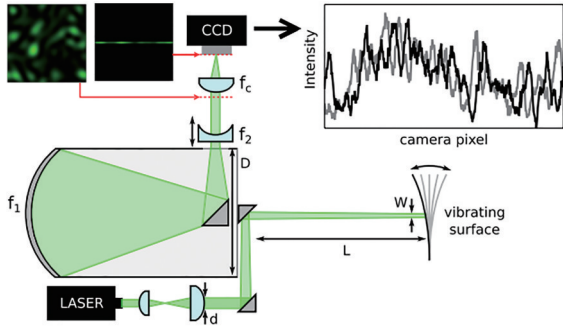


图 8 线阵 CCD 方案实验装置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of experimental setup for line array CCD imaging

处理的方式不仅提高了处理速度, 而且减轻了对内存空间的需求。虽然一维散斑方案无法提取与一维图像正交方向的振动, 但是其可探测频率及探测距离会得到显著提升。

2020 年, 厦门大学 Dai 等^[25]提出了一种基于激光散斑和多通道数据融合的音频信号检测系统, 该系统采用线阵互补金属氧化物半导体 (CMOS) 器件记录散斑图像, 对各像素的灰度值直接处理后提取出的原始信号经过筛选后通过多通道数据融合算法进行增强。[图 9(a)] 为实验装置示意图, 其中的插图为采集到的图像序列, 横轴表示像素, 纵轴为时间轴。对于采集到的图像序列, 首先通过能量评估算法, 挑选出能量最高的 10 个通道; 然后将每个通道转换为语音信号; 接着用多通道信号融合算法对 10 个通道的信号进行融合; 最后通过单通道去噪算法进行去噪, 如 [图 9(b)] 所示。[图 9(c)、(d)、(e)] 分别表示信号源、直接提取的信号、融合信号的波形图和频谱图。从图中可以看出, 多通道融合算法能明显提高复原信号的信噪比。研究结果表明, 多通道数据融合算法对音频类型不敏感且增强效果不随探测距离的增加而降低, 这一特性在遥感方面有潜在应用价值。

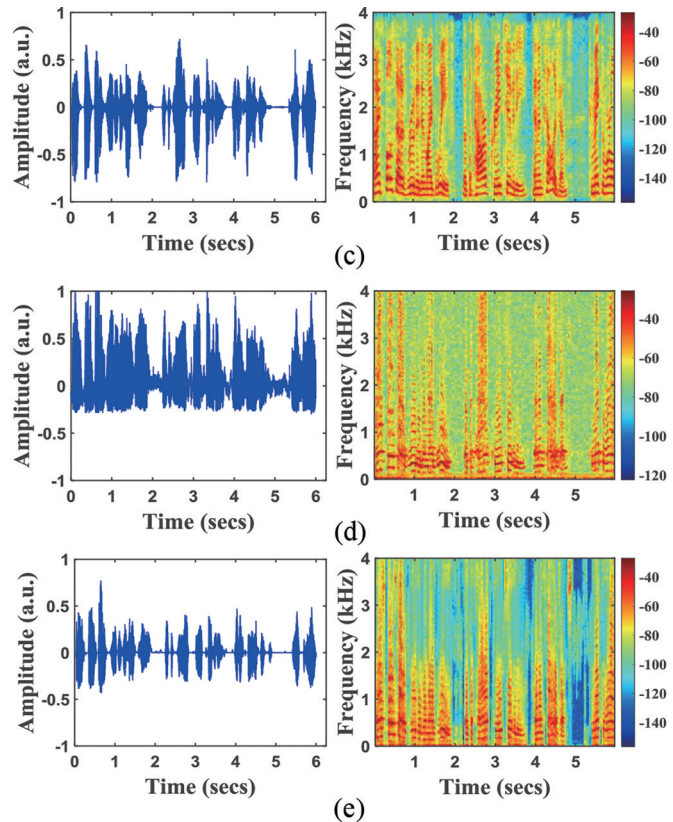
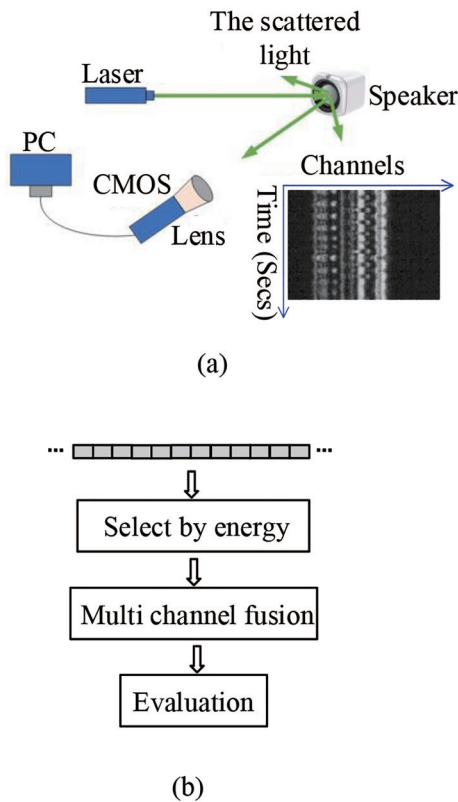


图 9 线阵 CMOS 实验示意图和信号处理流程及语音提取结果^[25]

Fig. 9 Experimental setup, signal processing procedure, and typical results^[25]

2021 年, 日本庆应大学 Wu 等^[26]采用光流法来提取采集到的一维激光散斑图像的位移, 实现了 20 kHz 的采样率且能实时重建高质量的音频信号。实验中,

将一行像素分为许多子块, 使用光流法分别计算各个子块的位移, 随后计算能使整体误差最小的位移值作为位移量。该团队指出子块大小的选择取决于散斑大

小,子块应略大于散斑,若不满足这一条件会使计算的位移值误差变大,不同子块大小引起的位移平均误差如图 10 所示。关于振动方向与像素列方向的角度对复原性能影响的研究表明,该算法在角度为 50° 时仍能较好地复原信号。

2022 年,厦门大学 Huang 等^[27]提出了一种采用相位相关算法对线阵 CMOS 采集的激光散斑图进行振动提取的系统。相位相关算法在图像校准、图像对齐领域性能表现优越,被认为是具有高精度、低绝对误差的算法^[28],故该团队将其应用在振动信号的提取中。该算法首先对采集到的行数据进行傅里叶变换,然后在频域提取相位信息,利用该信息作为相邻行的微位移参量,最后通过时序的排列、归一化、整形,提取出振动信号。由于没有传统的将频域信息再变换到时域的步骤,该算法计算速度快、误差小,能实时、准确提取微振动信息。该团队成功复原出了 300 Hz~20 kHz 的振动信号,如图 11 所示,其中左列为纯净信号,右列为复原信号。复原出的音频信号相比于直接提取法,其

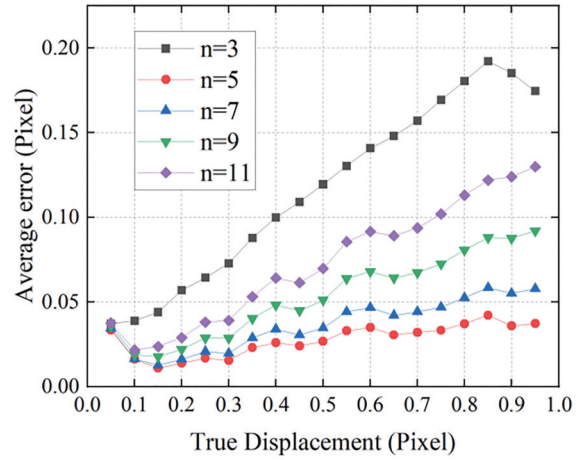


图 10 不同子块大小时的位移平均误差
Fig. 10 Average displacement error for different sub-block sizes
segment signal-to-noise ratio (SegSNR)^[29]提高约 8 dB, normalized sub-band envelope correlation (NSEC)^[30]提高约 6%~10%,对数似然估计(LLR)^[29]提高约 7%以

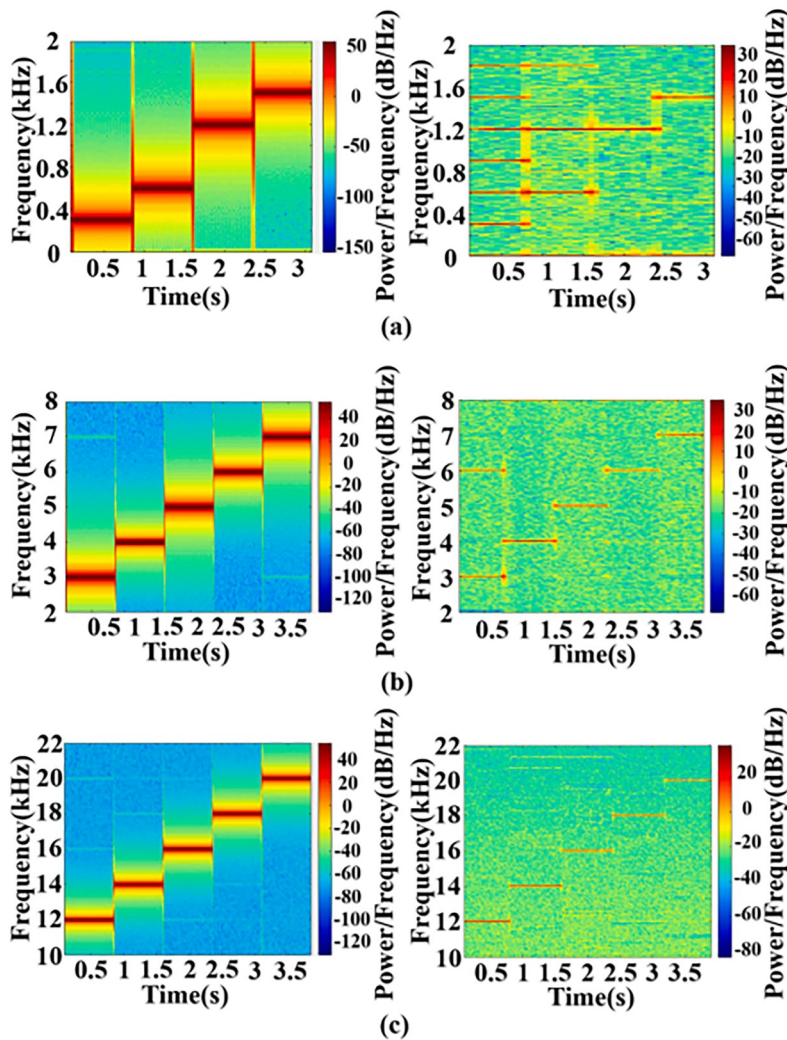


图 11 相位相关法的单频振动信号复原。(a) 300 Hz~1.5 kHz; (b) 3 kHz~7 kHz; (c) 12 kHz~20 kHz
Fig. 11 Restoration of single frequency vibration signal by phase correlation method. (a) 300 Hz~1.5 kHz; (b) 3 kHz~7 kHz; (c) 12 kHz~20 kHz

上,且均方根误差比其他方法小^[27]。

2022年,厦门大学Liu等^[31]提出了一种基于深度神经网络的激光散斑微振动信号提取方法,其网络结构和信号处理流程如图12所示。[图12(a)]为所用的卷积神经网络(CNN),采用融合有散斑噪声的专门准备的训练集对神经网络进行训练,然后用该神经网络对语音信号进行提取和增强。除了卷积神经网络,还采用了广泛用于时间序列处理的循环神经网络变体——门控记忆单元网络(GRU)、非监督学习的典型降噪网络——变分自编码器(VAE)分别处理语音信

号。实验结果表明,在NVIDIA GeForce RTX 3070、10 GB显存、5000训练集、1200测试集、1000个epoch的实验条件下,经过神经网络处理,语音信号的SegSNR提升了3 dB~4 dB,可懂度达到了0.7~0.8(NSEC),取得了比较好的效果。但该神经网络所需训练时间较长,难以实现信号的实时提取。天津大学黄举等^[32]提出了一种基于CNN的非迭代数字散斑图像位移场计算方法,该方法有较高计算效率,且在模拟散斑图像的处理中取得良好的效果,未来或可应用于真实散斑图像的处理。

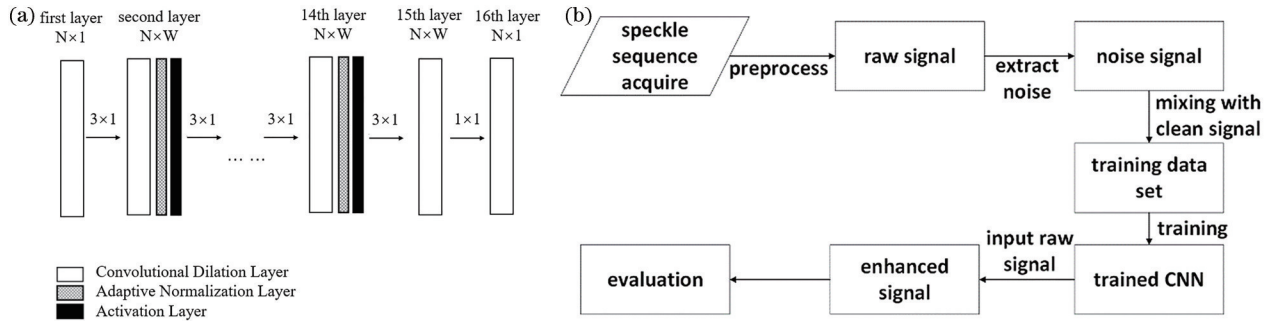


图12 基于深度神经网络的激光散斑微振动信号提取方法。(a)神经网络结构图;(b)数据处理流程图

Fig. 12 Laser speckle microvibration signal extraction method based on deep neural network. (a) Structure of neural network; (b) flowchart of data processing

总体而言,线阵相机由于其实惠的价格、上万赫兹的线采样率、较小的内存空间需求,在基于激光散斑的微振动探测领域有诸多应用。但是,由于线阵相机只有一行像素阵列,对于被测物体振动的方向有一定的要求,那些与像素阵列呈大角度甚至正交的振动信息是难以甚至无法提取的。

5 卷帘快门相机成像

卷帘快门是指CMOS图像传感器中,每帧图像从上到下、逐行曝光和读出的快门,如图13所示。当拍摄对象运动时,会造成成像模糊,称为“果冻”效应。所以以前的研究,主要集中在通过图像处理解决、减小或者消除图像失真。同时也有研究人员利用逐行曝光的机理,通

过对比相邻行图像的变化,将有效采样频率提高到每秒帧数与每帧行数的乘积的量级,提取运动信息^[33-34]。

2014年,美国麻省理工学院的研究人员采用复数金字塔的图像处理算法,从卷帘快门相机记录的图像中提取出了振动信息^[17]。该方案首先通过复数可控金字塔将视频在不同方向和尺度上进行分解,并计算每个像素点、方向和尺度上的局部运动信号^[36-37];然后,通过一系列的平均和对齐操作组合,将局部运动信号合成为一个全局运动信号;最后,使用语音增强算法^[38]对全局运动信号进行降噪,得到复原后的声音。实验结果表明,该方法能从60 frame/s的卷帘快门相机所拍摄的视频中提取1000 Hz以下且具有较高可懂度的音频信号。

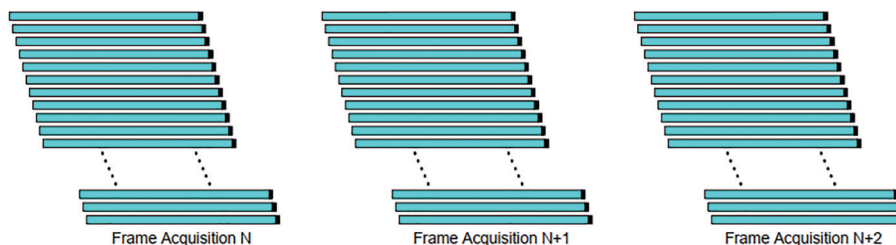


图13 卷帘快门相机的图像曝光和读出示意图^[35]

Fig. 13 Schematic diagram of image exposure and readout of a rolling shutter camera^[35]

2016年,渥太华大学Zhou^[39]提出了Shearlet变换算法,该算法可以从卷帘快门相机采集的图像中提取振动信息,其流程如图14所示。与复数可控金字塔相

比,Shearlet变换算法对于振动信号的提取更加准确,能够有效降低运动估计的噪声。实验结果表明,该算法能从120 frame/s的视频中成功地提取75 Hz~

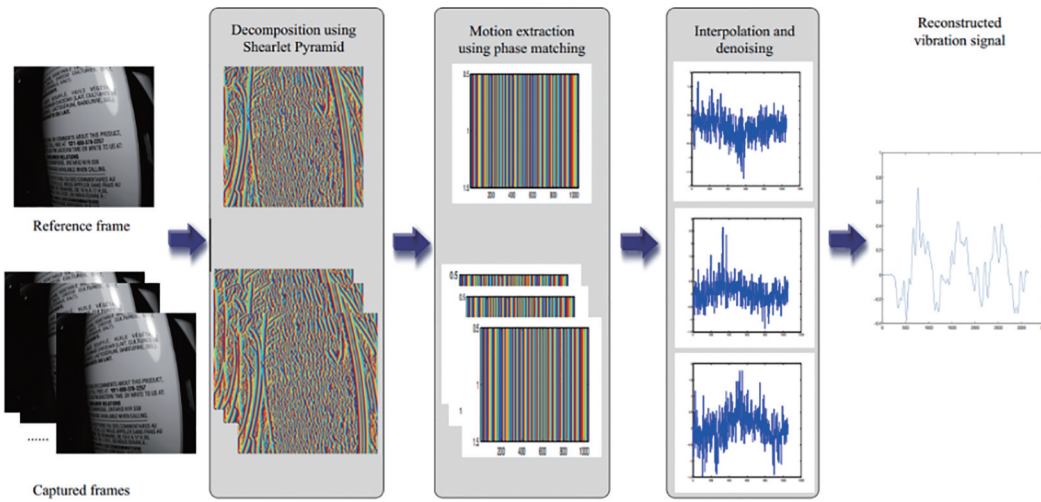


图 14 Shearlet 变换算法信号提取流程图

Fig. 14 Flowchart of signal extraction for Shearlet transform algorithm

325 Hz 的单频信号,并且还还原了一段音频信号。不过,当被测物体的振动频率高于 500 Hz 时,使用该算法所提取信号的信噪比较低。此外,由于该算法使用的是相位匹配而不是相位域减法,对于图像的处理时间会比较长,且匹配算法会受到振动物体表面纹理的影响。

2018 年,河北工业大学 Zhao 等^[40]利用卷帘快门相机采集塑料尺子和空气压缩机的视频,结合图像匹

配和边缘提取的方法,以 14 frame/s 的帧率成功提取了振动频率约为 16 Hz 的塑料尺悬臂梁的振动信号;以同样的帧速,提取出了空气压缩机低于 150 Hz 的振动模态信号,表明了该方案对于复杂振动信号提取的可行性。实验中所测的悬臂梁和空气压缩机如 [图 15(a)、(b)] 所示。该信号提取算法要求相机卷帘方向与物体振动方向平行,仅适用于测量一维振动信号的频率。

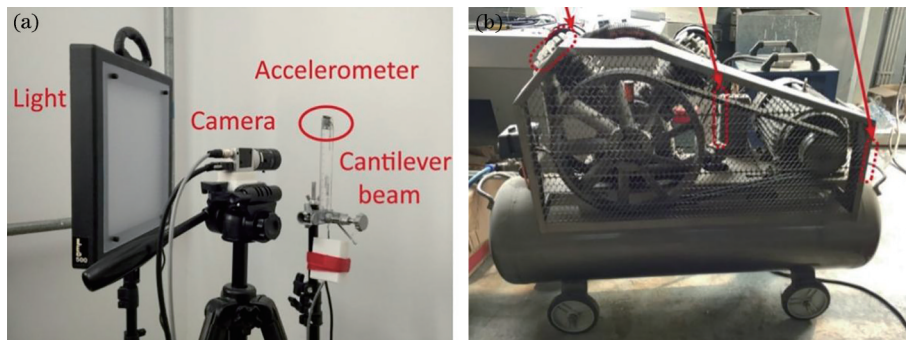


图 15 实验现场图。(a)悬臂梁;(b)空气压缩机

Fig. 15 Photographs of the experiment. (a) Cantilever beam; (b) air compressor

2019 年,日本立命馆大学的 Hiroki 等^[41]探究了利用 CMOS 图像传感器作为成像设备从卷帘快门所拍摄的图像中提取微振动的方法,信号提取流程如图 16 所示。为了减小传感器曝光时间对信号提取性能的影响,设计了基于传感器曝光时间的数字滤波器,用于减小由于图像畸变所引入的低频噪声,该方法能将信噪比提高约 16.8 dB。

以上利用卷帘快门相机进行微振动信号提取的研究大多集中于被动照明条件下,通过分析图像的变化,提取出振动信号。被测物体亮度不够高,采集图像时曝光时间过长,导致有效采样频率低。其次,为了采集

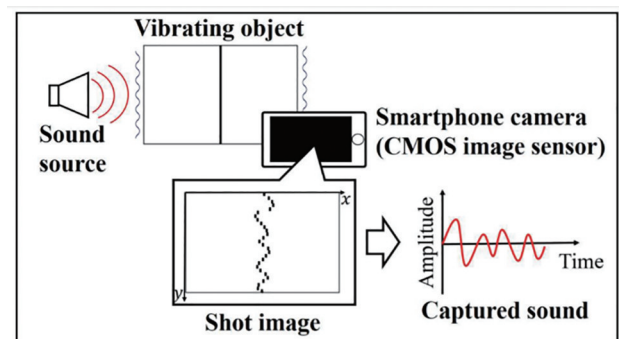


图 16 信号提取流程图

Fig. 16 Flowchart of signal extraction

到被测物体的运动,探测距离都必须非常近,这样才能保证足够大的图像放大倍数。以上研究基本要求卷帘方向与物体运动方向平行,这样才能通过相邻行物体的比对提取运动信息,这也限制了该技术的推广。目前,厦门大学的研究人员利用主动照明的方式,将激光照射到振动物体表面,用卷帘快门相机捕获振动物体表面散射所形成的散斑图像,结合有关图像处理和信号处理的算法,尝试以较低的采集帧率去捕获远高于帧率的振动信号。最新的实验结果表明,可以在 10 m 的探测距离上,以 200 frame/s 的帧频准确提取出 3.5 kHz 的振动信号。

6 探测器的选择

基于激光散斑的微振动测量中,常用的探测器类型如表 1 所示。探测器的选择上,首先要考虑时间分辨率。按照那奎斯特采样定理,正确的采样频率至少是被测信号最高频率的 2 倍,所以如果要从相邻帧/行

的匹配中提取振动信息,采样的帧/行率要在被测频率的 2 倍以上。对于需要探测被测信号波形变化的具体实际应用,采样频率需要是被测频率的 5~10 倍^[12]。

除了时间分辨率,还需要考虑探测的应用场景和激光波段。如果是隐蔽探测,绿光容易被发现,不可见的 1550 nm 近红外激光就是一个比较好的选择,这时探测器也需要选择对应激光波段的探测器。因为眼睛的角膜对 1550 nm 激光有较强的吸收,所以该波长对人眼安全,这是其另外一个优点。同时,空气环境中的近红外波段光比较弱,减小了其对探测信号光的干扰,增加了散斑的对比度。

除此之外,实际应用中需要考虑性能与效率的平衡。高帧速面阵采样,数据量非常大,对数据的传输和存储都提出了更高的要求。同时,大批量数据的快速处理,对计算平台和能力也提出了挑战,通常会需要更多的处理时间。因此,在满足应用需求的前提下,需要综合考虑性能与效率的平衡,寻求最佳的探测方案。

表 1 探测器的选择
Table 1 Selection of detectors

Detection system	Detectors	Maximum frame rate / (frame·s ⁻¹)	Reason analysis	Reference
Global shutter camera imaging	Basler A312f /Pixe LINK A741	400/2480	Cheap	[11]
	Pixe LINK B741F	3800	High frame rate	[13]
	Pixe LINK A741 /EHD-1K1112	2000/1027	High frame rate	[12]
	Phantom V310	500	Performance and efficiency	[19]
	Mode-5KF10M	2500	High frame rate and fast	[20]
	Manta G-145-30 fps	320	Cheap	[42]
	Point Gray GS3U3-32S4C-C	2300	High frame rate	[15]
Photodiode flux measurement	Phantom V10	20000	High frame rate	[17]
	Hamamatsu G8421-03	10000000	High sensibility	[22]
Line scan camera imaging	Thorlabs PDA36A	10000000	High sensibility	[23]
	Teledyne Dalsa Spyder 3	10000	Cheap	[24]
	Basler ral-2048gm	51000	High line rate	[25]
	Photonfocus MV1-L2048-96-G2	20000	Cheap with high line rate	[26]
	Basler ral-2048gm	51000	High line rate	[27]
	Basler ral-2048gm	51000	High line rate	[31]
Rolling shutter camera imaging	Pentax K-01	60	Cheap and Low power consumption	[17]
	Flea3-U3-13S2C	120	High SNR	[39]
	Basler acA3800-14uc	15	Small amount of data	[40]
	Basler acA1300-60gm	200	Commercially available	Unpublished

7 信号处理方法

2020 年,意大利的研究人员对于目前用于激光散斑微振动探测的信号提取算法进行了总结^[43],主要包括微分处理方法、强度均值处理方法、单像素匹配方法、交叉相关方法、机器学习方法及基于复数金字塔的 MIT 方法。表 2 总结了当前激光散斑微振动探测的主

要方案、信号提取方法、主要性能及优缺点。从表 2 可以看出,相关算法及其各种变化由于其优异的性能在激光散斑微振动提取中应用比较广泛。由于散斑特殊的性质,散斑质心的相对变化常被用来计算相邻帧或者相邻行的微位移。其他如光流法、机器学习的方法也有应用,并且取得了不错的效果。

表 2 光学微振动探测方案
Table 2 Optical microvibration detection scheme

Detection system	Advantage	Dis-advantage	Method	Detection frequency /Hz	Detection distance /m	Reference
Global shutter camera imaging	Simple system; Easy to adjust	Expensive; Large amount of data; Time-consuming to process	Cross-correlation	205		[11]
			Seed point matching	1800	50	[13]
			Peak centroid	2000	40	[12]
			Image correlation	500		[19]
			Singular value decomposition	800	<1	[20]
			Compressed sensing	320	0.8	[42]
			Optical flow method	1000	2	[15]
			Complex steerable pyramid	1000	<4	[17]
Photodiode flux measurement	Cheap; Wide frequency range	Difficult to align	Spatial light modulation	5000	50	[22]
			Correlation	800	5	[23]
Line scan camera imaging	High frame rate	Difficulty in long-distance imaging alignment	Cross-correlation centroids	5000	<300	[24]
			Multi-channel fusion	4000	50	[25]
			Optical flow method	10000	2	[26]
			Phase correlation	20000	10	[27]
			Deep learning	4000	50	[31]
Rolling shutter camera imaging	Cost-effective; High detection frequency	Signal extraction is complex	Complex steerable pyramid	1000	<4	[17]
			Shearlet transform	500	<1	[39]
			Image matching	<150	<1	[40]
			Centroid array matching	3500	10	Unpublished

8 总结与展望

高速全局快门面阵成像方案需要从相邻帧的图像匹配中提取振动信息,所能探测的最高频率受到成像设备最高帧速的限制,而高速面阵相机比较昂贵。同时,面阵图像的数据量比较大,除了不方便存储和传输,也增加了处理时间。为了解决这些问题,研究人员相继提出了光电二极管散斑通量探测、线阵相机探测等方案,减小了记录数据量,加快了处理速度,将探测频率提高到 20 kHz、探测距离增加到 300 m,实现了实时的信号提取。在探测距离比较远时,单点和线阵探测器存在不易对准的问题,为此,研究人员提出了卷帘快门相机的方案。卷帘快门利用逐行曝光的机理,通过对比相邻行图像的变化,将有效采样频率提高到每秒帧数与每帧行数的乘积的量级。在卷帘快门相机振动测量方案中,当前存在的主要问题是测量频率低、测量距离近、要求卷帘方向与物体运动方向平行。

除了各个方案的特有问題,基于激光散斑的微振动探测技术还有一些共有问题有待解决:1) 各种探测方案的精度范围不详,对于可以测得的被测目标振动幅度缺少定量研究;2) 各种探测方法的适用条件缺乏

系统的研究,包括最远探测距离、最高探测频率等和对于被测目标表面形状、粗糙程度及环境光线等方面的要求;3) 卷帘式快门相机理论上能够达到的采样率为帧率和行数的乘积,但实际上有效的采样率低于理论值,导致可以测得的最高频率受限,需要对测量系统和信号提取算法进行系统的研究;4) 散斑作为激光微振动探测技术的信息来源,其图像的质量对测量结果的精度影响很大,因此需要建立完备的散斑图像质量评价体系,通过提升散斑图像质量,提高探测系统的精度^[44]。

上述问题的解决,将为基于激光散斑的微振动测量技术在包括医疗、航空、市政^[45]、安防、国防等各个领域的广泛推广奠定基础。由于激光散斑微振动探测技术具有非接触、系统简单、隐蔽性好、灵敏度高、探测距离远等优点,相信在不远的将来,该项技术必定能逐渐得到推广和应用。

参 考 文 献

- [1] 孟光,董瑶海,周徐斌,等.风云四号卫星微振动抑制和试验技术研究[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2019,49(2):74-84.

- Meng G, Dong Y H, Zhou X B, et al. Research on micro-vibration control and testing of FY-4 meteorological satellite[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2019, 49(2): 74-84.
- [2] Henriquez P, Alonso J B, Ferrer M A, et al. Review of automatic fault diagnosis systems using audio and vibration signals[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2014, 44(5): 642-652.
- [3] 赵冉, 洪志伟, 陆菁, 等. 散斑相关理论测量光纤材料离面位移的新方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(17): 1712002.
- Zhao R, Hong Z W, Lu J, et al. A new method of out-of-plane displacement measurement for optical fiber material based on digital speckle correlation method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(17): 1712002.
- [4] Avci O, Abdeljaber O, Kiranyaz S, et al. A review of vibration-based damage detection in civil structures: from traditional methods to machine learning and deep learning applications[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 147: 107077.
- [5] 陆天泽, 李宁, 黄孝龙, 等. 基于幅度调制激光干涉技术的水下声信号测量研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 0912006.
- Lu T Z, Li N, Huang X L, et al. Underwater acoustic signal measurement based on amplitude-modulated laser interference technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 0912006.
- [6] Meng Z, Chen W, Wang J F, et al. Recent progress in fiber-optic hydrophones[J]. *Photonic Sensors*, 2021, 11(1): 109-122.
- [7] Chan A, Mongeau L, Kost K. Vocal fold vibration measurements using laser Doppler vibrometry[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 133(3): 1667-1676.
- [8] Scalise L, Yu Y G, Giuliani G, et al. Self-mixing laser diode velocimetry: application to vibration and velocity measurement[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2004, 53(1): 223-232.
- [9] Xu Z, Li J Y, Zhang S L, et al. Remote eavesdropping at 200 meters distance based on laser feedback interferometry with single-photon sensitivity[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 141(1): 106562.
- [10] Zhao Y Y, Zhu D S, Tu Y R, et al. Coherent laser detection of the femtowatt-level frequency-shifted optical feedback based on a DFB fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(6): 1229-1232.
- [11] Zalevsky Z, Beiderman Y, Margalit I, et al. Simultaneous remote extraction of multiple speech sources and heart beats from secondary speckles pattern[J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21566-21580.
- [12] Ozana N, Margalith I, Beiderman Y, et al. Demonstration of a remote optical measurement configuration that correlates with breathing, heart rate, pulse pressure, blood coagulation, and blood oxygenation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2015, 103(2): 248-262.
- [13] Chen Z Y, Wang C, Huang C H, et al. Audio signal reconstruction based on adaptively selected seed points from laser speckle images[J]. *Optics Communications*, 2014, 331: 6-13.
- [14] Gubarev F, Li L, Klenovskii M, et al. Speckle pattern processing by digital image correlation[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2016, 48: 04003.
- [15] Wu N, Haruyama S. Real-time audio detection and regeneration of moving sound source based on optical flow algorithm of laser speckle images[J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 4475-4488.
- [16] Wang Y, Gao Y, Liu Y, et al. Optimal aperture and digital speckle optimization in digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2021, 61(4): 677-684.
- [17] Davis A, Rubinstein M, Wadhwa N, et al. The visual microphone: passive recovery of sound from video[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2014, 33(4): 7901-7910.
- [18] Mathematics in Industry Reports. Measuring vibrations from video feeds[EB/OL]. (2022-05-31) [2022-06-04]. <https://www.cambridge.org/engage/miir/article-details/60a6b2b8b15239b2dc63a3a7>.
- [19] Wang Z Y, Nguyen H, Quisberth J. Audio extraction from silent high-speed video using an optical technique[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(11): 110502.
- [20] Zhang D S, Guo J, Lei X J, et al. Note: sound recovery from video using SVD-based information extraction[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(8): 086111.
- [21] Zhang D S, Guo J, Jin Y, et al. Efficient subtle motion detection from high-speed video for sound recovery and vibration analysis using singular value decomposition-based approach[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(9): 094105.
- [22] Veber A A, Lyashedko A, Sholokhov E, et al. Laser vibrometry based on analysis of the speckle pattern from a remote object[J]. *Applied Physics B*, 2011, 105(3): 613-617.
- [23] Bianchi S. Vibration detection by observation of speckle patterns[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(5): 931-936.
- [24] Bianchi S, Giacomozzi E. Long-range detection of acoustic vibrations by speckle tracking[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(28): 7805-7809.
- [25] Dai C, Liu C, Wu Y F, et al. Audio signal detection and enhancement based on linear CMOS array and multi-channel data fusion[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 133463-133469.
- [26] Wu N, Haruyama S. The 20 k samples-per-second real time detection of acoustic vibration based on displacement estimation of one-dimensional laser speckle images[J]. *Sensors*, 2021, 21(9): 2938.
- [27] Huang X Y, Guo W, Yu R, et al. Real-time high sensibility vibration detection based on phase correlation of line speckle patterns[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 148: 107759.
- [28] Tong X H, Ye Z, Xu Y S, et al. Image registration with Fourier-based image correlation: a comprehensive review of developments and applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and*

- Remote Sensing, 2019, 12(10): 4062-4081.
- [29] Loizou P C. Speech enhancement: theory and practice [M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [30] Boldt J B, Ellis D P W. A simple correlation-based model of intelligibility for nonlinear speech enhancement and separation[C]//2009 17th European Signal Processing Conference, August 24-28, 2009, Glasgow, UK. New York: IEEE Press, 2009: 1849-1853.
- [31] Liu C, Li L, Huang X Y, et al. Audio signal extraction and enhancement based on CNN from laser speckles[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 14(1): 6807205.
- [32] 黄举, 孙翠茹, 林祥龙. 基于卷积神经网络的散斑图像位移场测量方法[J]. 光学学报, 2021, 41(20): 2012002.
Huang J, Sun C R, Lin X L. Displacement field measurement of speckle images using convolutional neural network[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(20): 2012002.
- [33] Ait-Aider O, Bartoli A, Andreff N. Kinematics from lines in a single rolling shutter image[C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-22, 2007, Minneapolis, MN, USA. New York: IEEE Press, 2007: 9737997.
- [34] 孙伟. 基于卷帘式快门的数字相机速度测量技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
Sun W. Research on speed measurement of rolling shutter digital camera[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.
- [35] Basler Vision Technology. User's manual for GigE cameras[EB/OL]. (2015-06-08) [2022-03-20]. <https://partner.cognex.com/FileLibrary/1e78a000947d4bdda5ed27def0ee3394/ace%20GigE%20Users%20Manual.pdf>.
- [36] Simoncelli E P, Freeman W T, Adelson E H, et al. Shiftable multiscale transforms[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 587-607.
- [37] Gautama T, van Hulle M A. A phase-based approach to the estimation of the optical flow field using spatial filtering[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002, 13(5): 1127-1136.
- [38] Loizou P C. Speech enhancement based on perceptually motivated Bayesian estimators of the magnitude spectrum [J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 2005, 13(5): 857-869.
- [39] Zhou M. Vibration extraction using rolling shutter cameras[D]. Ottawa: University of Ottawa, 2016.
- [40] Zhao Y P, Liu J Y, Guo S J, et al. Measuring frequency of one-dimensional vibration with video camera using electronic rolling shutter[J]. Optical Engineering, 2018, 57(4): 043104.
- [41] Hiroki S, Koichi T, Kenta I, et al. Noise-reducing sound capture based on exposure-time of still camera[C]//23th International Commission for Acoustics, September 9-13, 2019, Aachen, Germany. [S.l.: s.n.], 2019.
- [42] Zhu G, Yao X R, Sun Z B, et al. A high-speed imaging method based on compressive sensing for sound extraction using a low-speed camera[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1524.
- [43] Barcellona C, Halpaap D, Amil P, et al. Remote recovery of audio signals from videos of optical speckle patterns: a comparative study of signal recovery algorithms [J]. Optics Express, 2020, 28(6): 8716-8723.
- [44] 初录, 刘斌, 许亮, 等. 基于灰度共生矩阵的散斑质量评价[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(4): 0410019.
Chu L, Liu B, Xu L, et al. Speckle quality evaluation based on gray level co-occurrence matrix[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(4): 0410019.
- [45] Davis A, Bouman K L, Chen J G, et al. Visual vibrometry: estimating material properties from small motions in video[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(4): 732-745.