

基于条纹投影的高速三维形貌测量技术发展综述

吴周杰, 张启灿*

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 在虚拟现实和增强现实、智能制造检测、材料性能测试等需要对动态场景进行三维建模、对动态过程进行深入分析的领域中, 高速三维形貌测量技术具有重要的科学研究意义和广泛的应用价值。随着高速动态场景测量需求的日趋增长和测量硬件设备的迅速发展, 相应领域的研究热点逐渐从简单静态场景的三维测量转移到复杂动态场景的测量中。以测量任务需求为主线, 综述基于条纹投影的高速三维测量技术在硬件和算法上的研究进展, 随后分类比较已有技术各自的优缺点, 给出不同测量任务下的方法选择建议, 最后总结基于条纹投影的高速三维形貌测量技术所面临的挑战和潜在发展动向。

关键词 三维测量; 条纹投影; 动态三维测量; 高速三维重建

中图分类号 TN206

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223457

High-Speed 3D Topography Measurement Based on Fringe Projection: A Review

Wu Zhoujie, Zhang Qican*

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China

Abstract High-speed 3D topography measurement technology is important for research and application in virtual and augmented reality, intelligent manufacturing testing, material performance testing, and other fields that require 3D modeling and deep analysis for dynamic scenes and processes. With the increasing demand for high-speed dynamic scene measurement and the rapid development of measurement equipment, researchers have gradually shifted their attention from 3D measurements of simple static scenes to measurements of complex dynamic scenes. Based on the requirements of measurement projects, this study reviewed the hardware and algorithmic research progresses of high-speed 3D measurement technology based on fringe projection. Then, it compared the advantages and disadvantages of existing technologies in different categories, suggested method selection under different measurement tasks, and summarized the challenges and potential development trends of high-speed 3D measurement technology based on fringe projection.

Key words three-dimensional measurement; fringe projection; dynamic three-dimensional measurement; high-speed 3D reconstruction

1 引言

第四次工业革命的兴起切实敦促传统制造业进行数字化变革, 向以新一代信息化技术为支撑的智能制造进行转型^[1]。制造业直接体现了一个国家的生产力水平, 而攻克高端装备制造业中的关键核心技术是国家战略的重要目标。目前, 各个工业发达国家均在国

家战略层面进行部署, 快速推进第四次工业革命, 如德国工业 4.0、美国 AMP 及中国制造 2025。国务院发布实施的《中国制造 2025》中明确指出“用信息化和工业化两化深度融合来引领和带动整个制造业的发展”。

光学三维测量(也称光学三维成像, 光学三维传感)技术作为感知真实三维世界的信息获取手段, 其测量过程无需接触物体, 能为高端精密制造业提供完整

收稿日期: 2022-12-31; 修回日期: 2023-02-14; 录用日期: 2023-03-01; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(62075143, 62205226)、博士后创新人才支持计划(BX2021199)、博士后面基金(2022M722290)、江西省重大科技研发专项(20224AAC01011)、四川省重点研发计划(2021YFS0398)、中央高校基本科研业务费专项资金(2022SCU12010)

通信作者: *zqc@scu.edu.cn

全面、准确可靠的三维几何尺寸信息,是智能制造中信息输入的关键环节,也是制造业自动化、智能化、再创造化的起点。该技术为三维建模、三维显示和三维识别提供了物体或场景几何形貌准确详实的基础数据^[2-5]。它将真实世界的立体信息转换为计算机能接收处理的数字信号,在工业、医学、消费娱乐、汽车无人

驾驶、安防、文物保护以及科学研究等领域有广泛的应用^[6-9]。由于基于结构光投影的三维测量技术具有高精度、高分辨率和非接触的优点,在智能制造中备受青睐,正在制造业信息化和工业化变革中发挥着独有的优势和作用^[10-14]。按照所采用的结构光类型,该技术的对应分类和典型应用如图 1 所示。

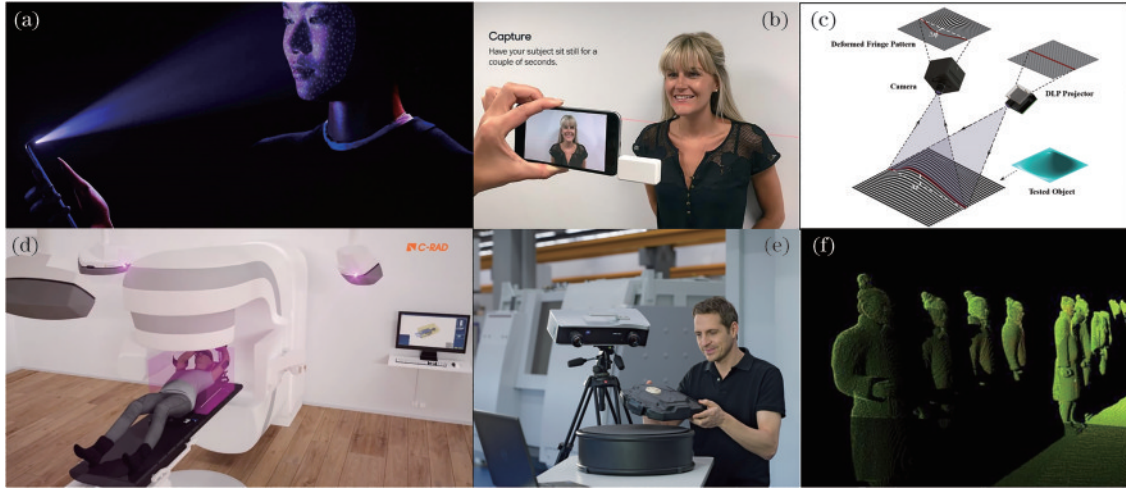


图 1 结构光投影三维形貌测量技术分类与典型应用。(a) 点阵结构光投影^[15]; (b) 线结构光投影^[16]; (c) 面结构光投影^[17]; (d) 医学辅助诊断^[18]; (e) 工业零部件检测^[19]; (f) 文物数字化^[20]

Fig. 1 Classifications and typical applications of 3D shape measurement technique based on structured light projection. (a) Dot matrix structured light projection^[15]; (b) line structured light projection^[16]; (c) planar structured light projection^[17]; (d) medically assisted diagnosis^[18]; (e) industrial component testing^[19]; (f) digitization of cultural relics^[20]

随着应用需求的不断增长,三维测量对象不再局限于静态物体。一方面,在如图 2(a)~(d)所示的运动状态跟踪、振动模式分析、发动机叶片旋转等高速瞬态场景中,亟需获取高速运动状态下物体的瞬态三维形貌信息来实现运动追踪和力学特性分析^[21],对测量的速度提出了更高的要求;另一方面,在如图 2(e)~(h)所示

的关乎国家重大战略和国计民生的军民领域智能制造中^[22-24],也存在对复杂、孤立甚至是飞散场景动态过程进行三维重建的需求,如在工业加工在线检测、汽车碰撞实验或者国防装备性能测试试验中的冲锻压形变检测、航空叶片旋转应力监测和标靶飞行姿态监测等动态场景中,工件对象可能出现破裂飞散,空间上存在明

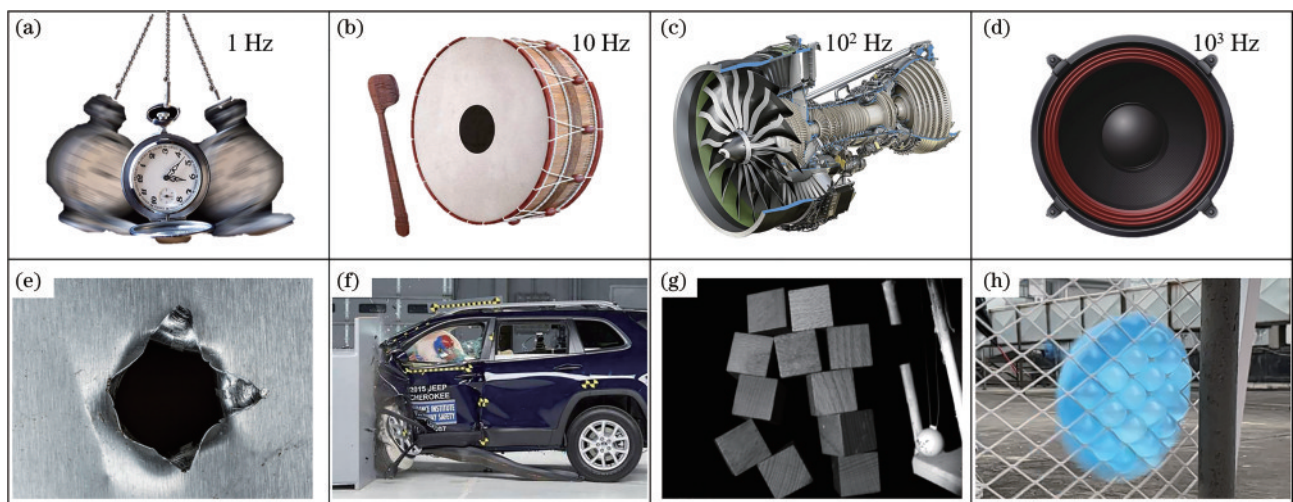


图 2 复杂动态场景测量需求。(a) 怀表摆动; (b) 鼓膜振动; (c) 发动机叶片旋转检测; (d) 扬声器振动; (e) 冲击实验; (f) 汽车碰撞测试; (g) 受力倒塌实验; (h) 瞬态形变分析

Fig. 2 Measurement requirements of complex dynamic scenes. (a) Swing of the pocket watch; (b) vibration of the drum membrane; (c) rotation detection of engine blades; (d) vibration of the loudspeaker; (e) impacting experiment; (f) vehicle crash test; (g) collision experiment under force; (h) transient deformation analysis

显的孤立、突变和不连续分布,这对能适应复杂动态场景的测量方法的性能提出了更高要求。因此,如何测量更快的瞬态场景(测得更快)和如何重建更复杂的变化结构(测得更复杂)是学者们不懈追求的两个目标。

在获取到高端精密制造中复杂结构件(如蜂窝结构^[25-26]、发动机叶片^[27]等航空零部件及机械骨骼、微飞

行器^[28-29]等仿生结构件)在受力过程下的全场动态三维形貌信息后,可以如图 3 所示进一步辅助分析其材料及力学特性,反馈指导智能制造中的材料选择和结构设计,实现智能闭环制造。这些针对复杂动态场景、复杂结构的全场三维形貌测量及力学性能分析工作将有力助推高端装备制造业的智能化转型。

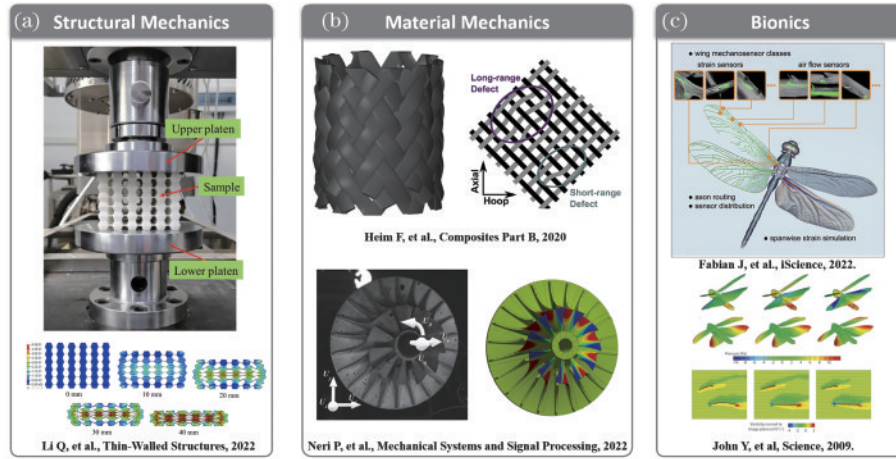


图 3 基于复杂结构三维形貌信息的材料力学特性分析。(a) 结构力学,蜂窝结构受力分析^[30]; (b) 材料力学,复合编织材料性能测试^[31],合金材料旋转应力测试^[32]; (c) 仿生学,昆虫翅膀扇动应变分析^[29]及数值仿真^[28]

Fig. 3 Analysis of material mechanical properties based on three-dimensional shape information of complex structures. (a) Structural mechanics, force analysis of honeycomb structures^[30]; (b) mechanics of materials, performance test of composite braided materials^[31], rotational stress test of alloy materials^[32]; (c) Bionics, strain analysis of insect wing flapping^[29] and its numerical simulation^[28]

随着应用需求的不断增长,基于条纹投影的高速三维形貌测量技术也得到了深入研究和广泛使用。本文将综述分析该技术的基本原理和适用场景。从加快硬件测量速度、提升算法鲁棒性、扩展测量维度等方面分类回顾多种优化实现方案的核心思想、技术手段及研究进展,论述了该技术如何一步步帮助研究人员完成对更快的瞬态场景和更复杂的形变结构的测量的内容;随后对各类已有方法进行横向性能比较,给出了它们对应的最佳应用场景,为读者选择合适的测量技术提供了指引;最后基于本课题组在该领域的研究积累,给出了对该领域面临的挑战和今后发展动向的一点看法,以供参考。

2 基于条纹投影的动态三维测量技术的原理及硬件实现

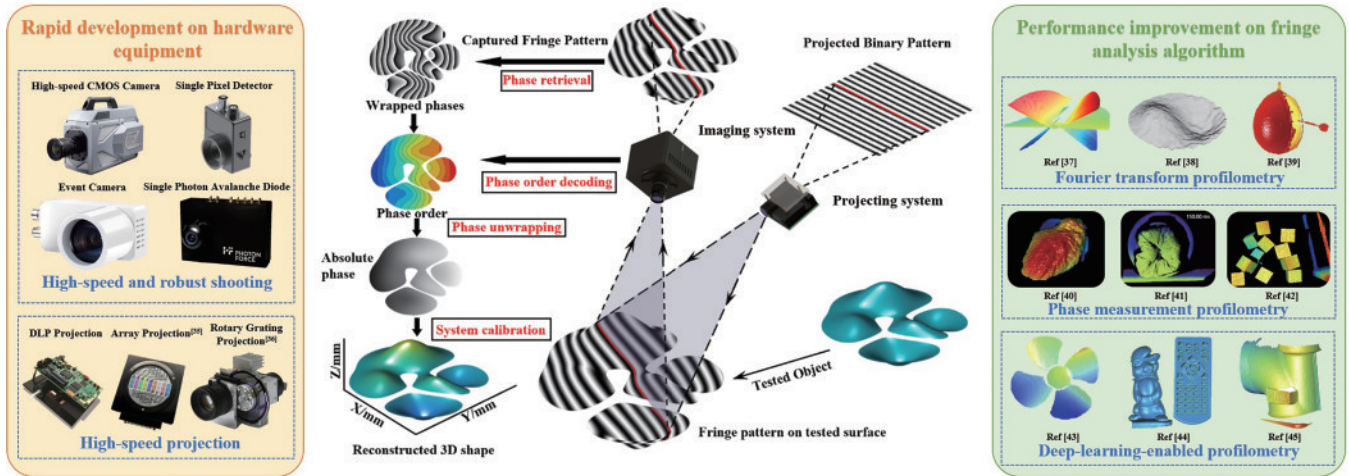
2.1 基于条纹投影的三维测量技术原理

基于条纹投影的三维测量技术的灵感来源于传统的干涉计量^[33]。在干涉计量中,参考面反射的参考光和被侧面反射的物光会聚,产生满足正弦分布的干涉条纹,物体的高度不同导致干涉条纹发生不同程度的变形,通过探测正弦条纹变形前后的强度分布并解算其相位变化,可以反算其表面的形貌分布。由于获取的条纹信息是两束光波发生干涉产生的,该类技术的测量精度可达到光波长的百分之一^[34]。借用干涉计量

中条纹调制解调物体高度的思想,基于条纹投影的三维测量技术逐渐发展起来。图 4 演示了基于条纹投影的三维测量系统的原理,首先利用数字投影仪直接产生并投影周期已知的正弦条纹到被测物体表面,然后相机从垂直于条纹方向的另一角度拍摄受物体高度信息调制的变形条纹图;随后利用条纹分析手段提取截断相位,再经过相位展开、相位-高度映射及系统标定便可得到物体最终的三维面形分布。

干涉测量和条纹投影三维形貌测量都将物体表面的形貌信息调制到了相位中,因此两类测量方法本质上都是研究相位解调(恢复)问题。不同的是,条纹投影三维形貌测量利用投影仪直接投影正弦条纹,代替了干涉计量方法中利用干涉光路产生正弦条纹的过程,属于非相干的几何光学测量方法,因此对测量环境的适应性更强,可以完成漫反射表面测量。类似于干涉计量精度与光波长之间的关系,条纹投影三维形貌测量技术也可以用与投影条纹间距相关的“等效波长”来标称测量精度,即投影条纹变化一个周期所产生的高度变化。受目前投影设备空间带宽积及其投影条纹间距的限制,基于该技术的常规测量系统通常能实现几百分之一等效波长的测量精度。

条纹投影三维形貌测量技术由于精度高、灵活性强及全场测量等特点,已经广泛运用于静态场景的测量中^[46]。为了进一步实现动态场景的高速三维形貌测

图4 基于条纹投影的动态三维形貌测量技术原理及进展^[35-45]Fig. 4 Principle and progresses of dynamic 3D shape measurement technology based on fringe projection^[35-45]

量,研究人员主要从如何开发具有更高探测和投影性能的测量器件以及如何提升条纹分析算法的测量性能2个方面进行探究。

2.2 基于条纹投影的系统硬件基础

随着近些年测量硬件设备包括基于数字光处理器(DLP)的投影仪和高速相机的迅速发展以及人们对高速动态场景测量需求的提升,研究人员的注意力逐渐从静态简单场景的测量转移到复杂动态场景的测量中,使得基于条纹投影技术的高速高精度三维面形测量成为了过去10余年来的研究热点^[47-48]。

2.2.1 高速成像器件及技术

在拍摄成像端,基于电荷耦合器件(CCD)以及互补金属氧化物半导体(CMOS)的数字成像传感器极大地推动了高速摄影的发展,使得高速相机可以实现高达 10^7 frame/s的探测速度^[49]。

近年来,单帧超快光学成像(single-shot ultrafast optical imaging)又将对瞬态二维图像探测的记录速度提升到了一个新的量级($>10^8$ frame/s)^[50-51]。随即发展了基于计算重建算法的被动成像方法,该方法不主动投射额外的标记信息,直接采用计算成像算法(包括全息术^[52]、断层摄影术^[53]、压缩感知^[54-55]等)对探测到的信息进行高帧率二维图像的计算重建。其中具有代表性的技术是Gao等^[54]在2014年提出的基于压缩超快摄影(CUP)的二维动态成像技术,此技术结合了条纹相机成像技术和压缩感知重建算法,以 10^{11} frame/s的拍摄速度记录了一束发生折、反射的光的运动轨迹超快瞬态场景。另一类是基于脉冲探测的主动成像方法,此类技术利用超快脉冲序列去标记瞬态场景,每一个脉冲都是一个唯一的光学标记(脉冲空间位置^[56-57]、角度^[58]、时间波长^[59]及空间频率^[60]),从而在成像端分离高帧率二维图像。其中具有代表性的是Nakagawa等^[59]在2014年提出的sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP)成像技术,此技术对

标记脉冲在时间域上进行展宽并在空间域上进行映射,以 4.4×10^{12} frame/s的成像速度和 $450 \text{ pixel} \times 450 \text{ pixel}$ 的空间分辨率完成了瞬态场景的二维成像。两类典型方法的原理如图5(a)和图5(b)所示。上述新发展的超快二维成像技术为快速捕捉条纹图像提供了新的机遇,与超快投影技术相结合有望为高速三维测量技术带来测量速度上的突破。

除了追求更快的测量速度,在高速三维测量技术中如何减少海量的存储数据以及提高测量系统在极弱光照条件下的表现也是将此技术应用到更多极端、瞬态测量环境下必须要解决的问题。为此,除了常规的二维成像器件外,学者们也尝试将非成像式探测器件引入到条纹投影三维测量技术当中。事件相机(event camera)作为一种生物启发的、完全不同于传统成像模式的二维探测器,一经面世就受到了机器人、计算机视觉领域的广泛关注^[64]。此相机不是以恒定的速率输出强度图像帧的,而是仅输出亮度发生改变的局部像素相关信息,当这些亮度变化(称为事件)超过阈值时,事件相机将输出微秒级时间戳标记的异步事件流。特殊的工作模式为其带来了低数据存储、低延迟、高动态范围等优点。近年来,学者们也开始将其引入到三维测量领域中,来实现对动态场景的低数据量、高动态范围测量^[61, 65-67]。事件相机引入后要想利用传统算法实现三维重建,需要解决的最大问题是如何将获取到的异步事件流转换为可编辑解码的同步编码标记数据,学者们从构建线多线扫描^[65]、散斑标记^[66]以及图5(c)所示的频率抖动^[61]等方面进行了研究,取得了初步成果,但目前此类方法在测量精度、算法成熟度和传统方法相比还存在一些差距,需要进行进一步的研究。最近,Sundar等^[62]还将单光子雪崩二极管(SPAD)阵列(也称为盖革模式PAD、光子计数器、单光子探测器)引入到条纹投影动态测量领域,如图5(d)所示,利用其对低强度信号(低到单个光子)的高灵敏度探测能

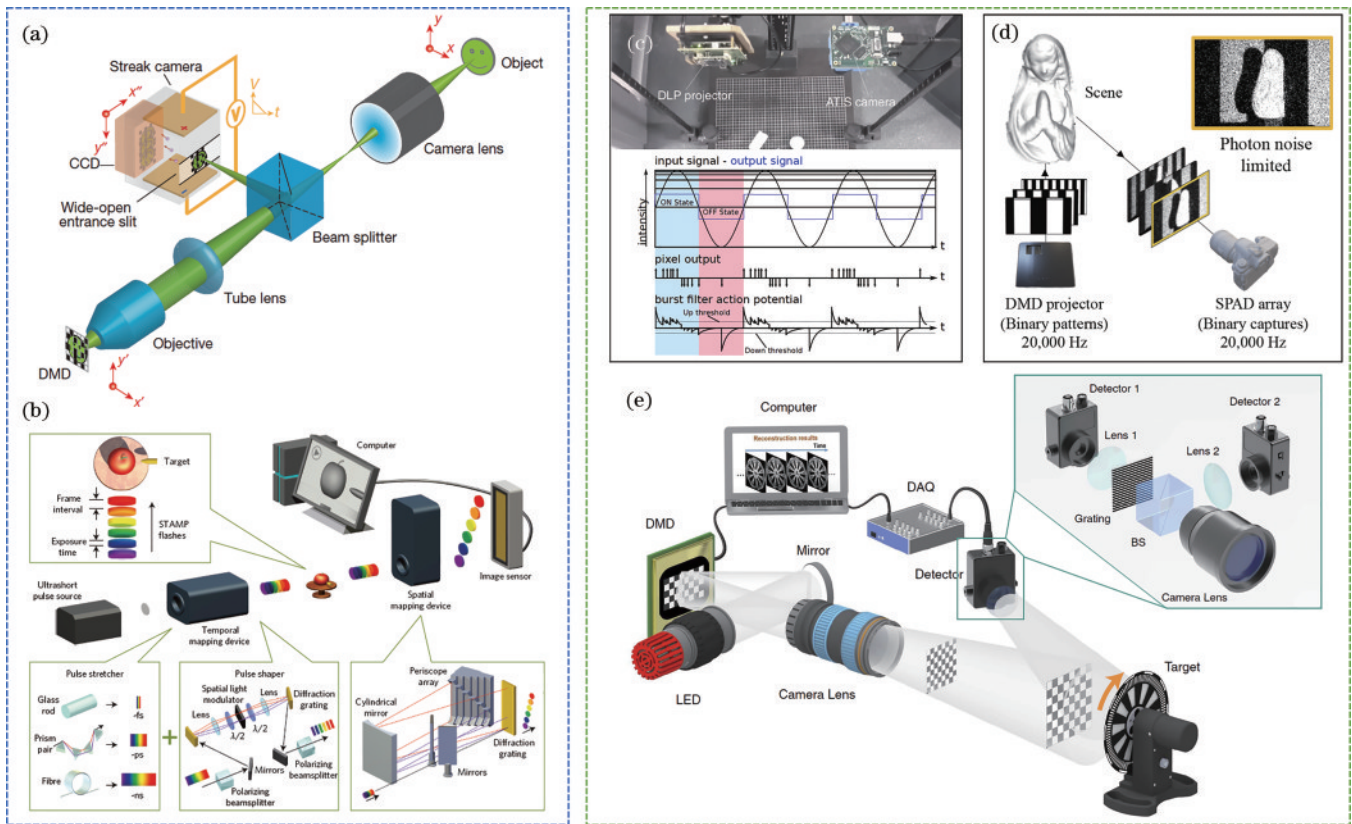


图5 典型的高速成像器件及技术。(a) CUP^[54]; (b) STAMP^[59]; (c) 基于事件相机的三维成像^[61]; (d) 基于单光子雪崩二极管 (SPAD) 的三维成像^[62]; (e) 基于单像素探测器件 (SPD) 的三维成像^[63]

Fig. 5 Typical high-speed imaging devices and techniques. (a) CUP^[54]; (b) STAMP^[59]; (c) 3D imaging based on event camera^[61]; (d) 3D imaging based on SPAD^[62]; (e) 3D imaging based on SPD^[63]

力,完成了在极弱照明条件下的三维形貌重建。此外,基于近年来不断发展完善的单像素关联成像技术^[68-73],学者们逐渐开始利用单像素探测器件 (SPD) 进行三维成像^[74-79]。近期, Jiang 等^[63]提出了一种时间分辨的单像素成像方法 (TRSPI),该方法通过利用时间轴上的重复信息,以 2×10^6 frame/s 的速度完成了对周期性旋转物体的二维和三维成像,如图 5(e) 所示。此类技术只利用不具有空间分辨率的单像素成像器件即可完成对测量场景的三维重建,在红外^[80]、太赫兹^[81-83]、X 射线^[84-86]等缺乏高分辨率面阵探测器的成像波段具有一定的优势,但目前基于单像素成像的三维测量技术在测量效率和测量场景适用性上仍存在较大的局限性,有待进一步深入研究。上述非典型二维成像器件为解决传统条纹投影三维测量技术所面临的难题带来了新的可能,有望在低数据量存储、极端场景测量、特殊波段测量等方面取得新的突破。

2.2.2 高速投影器件及技术

在投影端,德州仪器 (Texas Instruments, TI) 公司的 Larry Hornbeck 博士于 1987 年发明了 DLP 芯片,其核心是一块数字微镜元件 (DMD),集成了 50~130 万个微镜片,每块镜片的尺寸仅为 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$,通过电流来控制微镜的转动方向,不同的转动方向代表着该像素单元投影信号的开和关,因此可以实现很高的

投影切换速度^[87]。基于此器件发展的 DLP 投影仪包括 DLP Discovery、DLP Light Commander 和 DLP LightCrafter 等设备,投影二值条纹的最高速度可以到 20000 Hz 以上。传统条纹投影测量方法需要利用多比特图案积分生成多灰度正弦条纹,不利于快速的图案生成。为了充分利用 DLP 的高速切换性能,实现高速条纹投影三维测量, Lei 等^[88]在 2009 年提出了二值离焦投影 (binary defocusing projection) 技术,利用 DLP 投影仪投影二值的伪正弦图案,通过适当地离焦投影镜头在物体表面产生高质量的正弦条纹,如图 6(a) 所示。

除此之外,基于阵列投影^[35]和机械旋转结构投影^[91-94]的系统也先后被学者们提出并应用到高速测量中,如图 6(b) 和图 6(c) 所示。此类技术通过 LED 阵列光源的快速切换或者电机带动光栅盘片的高速旋转来构造投影图案的变化,从而实现高达 250 kHz (阵列投影)^[35]和 50 kHz (旋转光栅)^[95]的投影图案切换速度。近年来,学者们又提出了基于光子时间伸缩 (photonic time-stretch) 和波长空间转换 (wavelength-to-space conversion) 的超快时间编码照明图像生成方法^[96-98],如图 6(d) 所示。该类技术通过对激光脉冲在时间域或者空间域上进行重新整形来生成投影图案,投影速度取决于脉冲的重复频率,可达到 50 MHz^[90],比 DMD

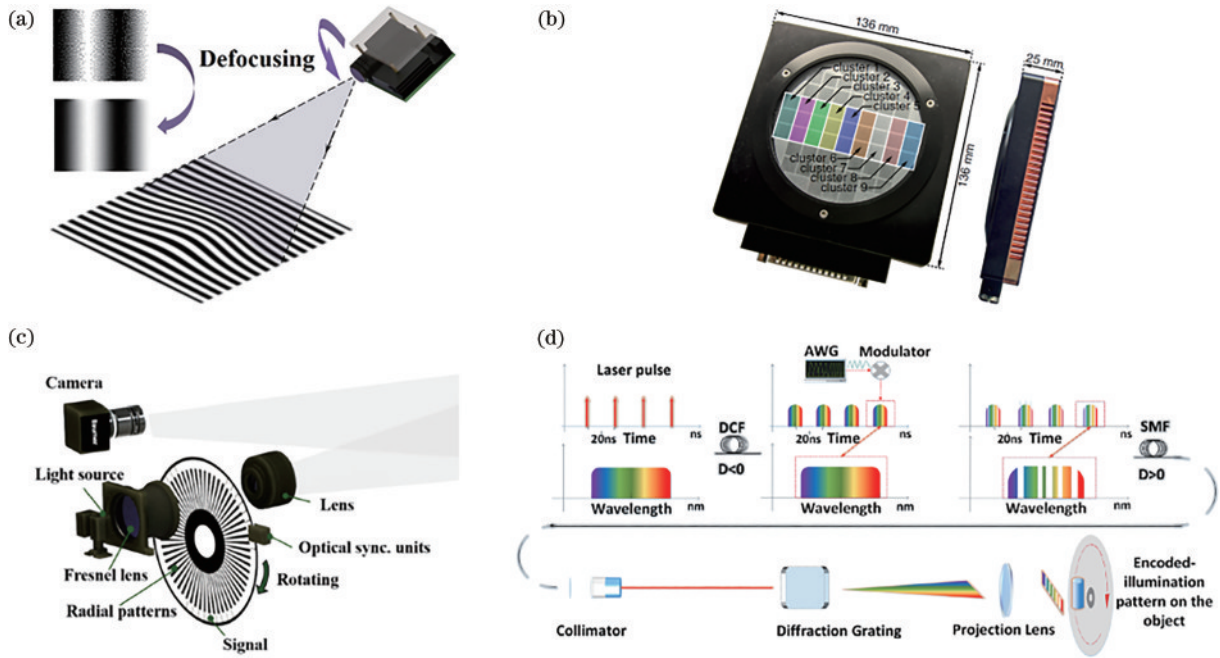


图 6 典型的超快结构光投影系统。(a) 二值离焦投影系统^[88];(b) 阵列投影系统^[35];(c) 旋转光栅投影系统^[89];
(d) 时间编码投影系统^[90]

Fig. 6 Typical ultrafast structured light projection system. (a) Binary defocusing projection system^[88]; (b) array projection system^[35];
(c) rotary grating projection system^[89]; (d) time-encoded projection system^[90]

高 3 个数量级。不过此类技术目前还只能用来产生较为简单的一维分布结构图案。

3 基于条纹投影的动态测量编码算法进展

目前,成像端和投影端都能以足够高的速度对动态场景进行投影和成像,已具备该项任务的硬件设备条件。因此,学者们在这些硬件的基础上,针对不同的应用需求,研究发展了一系列的测量算法来实现对动态场景的三维重建。这些算法大致分为 3 类:以傅里叶变换轮廓术为典型代表的单帧条纹分析方法、以相移测量轮廓术为代表的多帧图案投影技术及基于数据驱动的深度辅助方法。

3.1 傅里叶变换轮廓术

在对高速变化的动态场景进行三维测量的过程中,即使拍摄速度再快,理论上前后帧拍摄到的图案都存在差异变化,因此从原理上来说,基于单帧图案的三维重建算法是最适合动态场景三维测量的。基于二值图案投影的单帧重建方法包括 De Bruijn sequences 方法^[99]、M-arrays 方法^[100]及散斑投影方法^[101]。此类方法的核心思想都是投影设计好的编码图案来唯一标记面内每一个采样点,但需要借助当前点的周围区域像素来辅助实现编码,所以会限制测量的空间分辨率和深度方向上的精度,尤其会明显降低对物体细节信息的感知能力。

基于条纹图案投影的单帧方法投影灰度连续变化的条纹信息,然后在变换域中提取包含物体高度分布

的相位信息,用逐点的相位信息稠密编码标记待测表面,完成三维重建。典型的方法包括傅里叶变换轮廓术(FTP)^[102-104]、窗口傅里叶变换^[105-106]、小波变换(wavelet transform)^[107-108],Lei 等^[109]对这 3 种常见变换域方法进行了详细对比。除此之外,学者们也将数字图像处理中的先进算法引入条纹投影测量领域中,发展了基于图像分解算法^[110]、经验模态分解算法^[111-112]、变分模态分解算法^[113-114]等的条纹分析方法,来提高单帧条纹分析在非理想场景(如雨中物体、非均匀反射率表面、低信噪比环境)的精度。在上述单帧条纹分析方法中,由于傅里叶变换轮廓术具备计算效率高、参数易于选取等特点,在高速三维形貌测量中得到了最广泛的应用。

3.1.1 传统傅里叶变换轮廓术

传统傅里叶变换轮廓术的测量原理如图 7 所示,首先由投影装置投影单一频率的高频正弦条纹至被测表面,成像设备从另一角度捕获受物体高度调制的变形条纹图,可表示为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y)] = a(x, y) + \frac{1}{2} b(x, y) [e^{j\varphi(x, y)} + e^{-j\varphi(x, y)}], \quad (1)$$

式中: $a(x, y)$ 是背景光强; $b(x, y)$ 是条纹对比度; $\varphi(x, y)$ 是包含物体高度信息的相位分布。对 $I(x, y)$ 进行傅里叶变换,并选择大小合适的滤波窗口函数滤出包含物体高度信息的基频分量,再对其进行傅里叶逆变换,可得

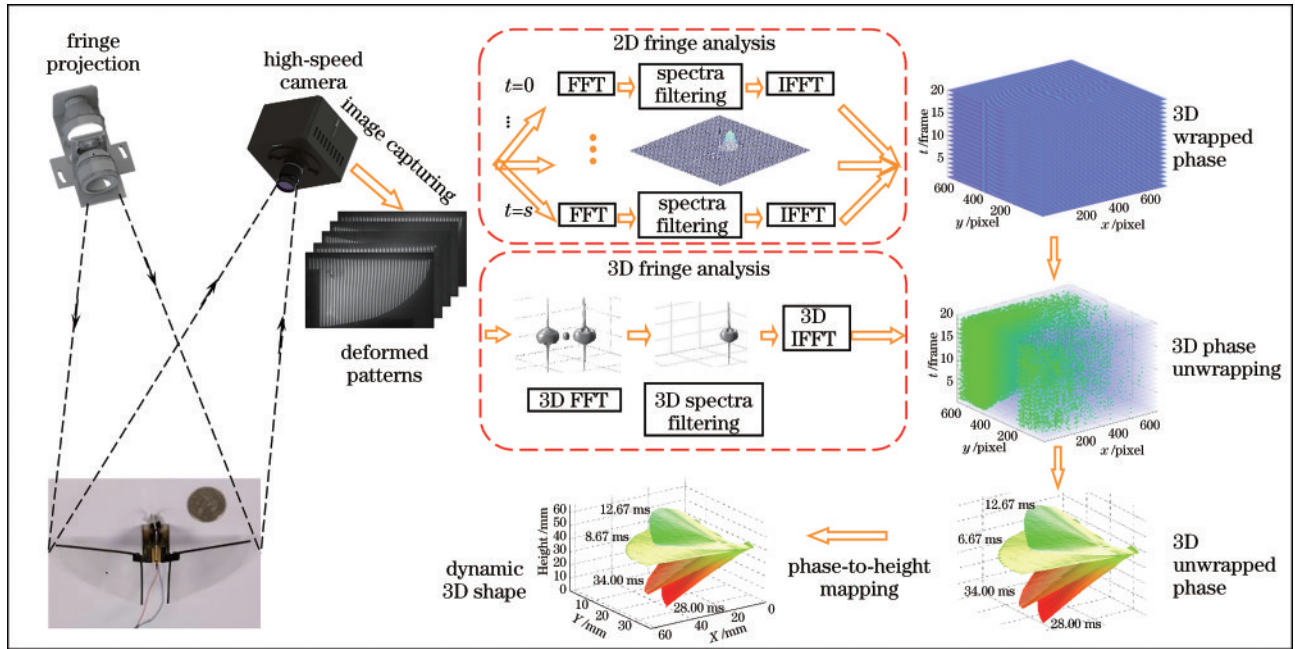


图 7 基于傅里叶变换轮廓测量术的动态三维形貌测量的流程
Fig. 7 Flowchart of dynamic 3D shape measurement based on Fourier transform profilometry

$$\tilde{I}(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) e^{i\varphi(x, y)}, \quad (2)$$

求其相位分布:

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{\text{Im}[\tilde{I}(x, y)]}{\text{Re}[\tilde{I}(x, y)]}, \quad (3)$$

式中: $\arctan[\cdot]$ 表示反正切函数; $\text{Im}[\cdot]$ 和 $\text{Re}[\cdot]$ 分别表示取复数实部和虚部。由于编码条纹的周期性分布特性, 解算得到的结果是一系列截断在 $(-\pi, \pi)$ 的具有周期性歧义的截断相位, 需要进行相位展开。在动态测量中, 可逐帧进行二维傅里叶分析处理, 也可以直接对所有数据进行三维傅里叶分析获取三维截断相位场。对三维相位截断场进行三维展开^[115]后, 保证每个方向上相位的连续性, 通过系统标定(包括投影仪标定和相机标定)就可获得被测场景的真实三维空间坐标分布, 完成动态测量。

由于此方法仅需投影一帧条纹图案即可完成一次测量, 不受投影设备投影速度的限制, 在早期的研究中得到了研究人员们的青睐。Zhang 等^[116]在 2002 年将 FTP 方法应用到了动态场景的测量当中, 测量到了液体漩涡的产生变化过程, 如图 8(a) 所示, 随后又进一步完成了对扬声器振动过程的测量^[117], 如图 8(b) 所示。因为 FTP 方法不需要切换投影图案, 可以将基于物理光栅的投影光路用作系统的照明光路, 而不使用成本更高的 DLP 投影仪或者机械移相装置^[118]。基于此投影系统和相位解算方法, Zhang 等使用频闪光照明完成了对高速旋转扇叶的三维面形测量^[119], 并以 1000 Hz 的重建帧率实现了对振动鼓膜表面的测量^[38], 随后重建了高速扇动微飞行器扑翼的面形变

化^[37], 如图 8(c)~(e) 所示。

尽管学者们已经将 FTP 应用到了动态场景的测量当中, 但受到频谱滤波操作的限制, 传统 FTP 方法受到了频谱混叠、背景光不均匀等因素的影响。学者们提出了一系列改进的 FTP 方法包括 π -shift FTP^[120]、modified FTP^[121]、background-normalized FTP^[39] 来提升此方法的测量精度, 扩大测量的深度范围。此外, 设计自适应的滤波器来提高该技术在动态场景中的适应性也是学者们研究推进的另一个方向^[122-123]。

3.1.2 时间傅里叶变换轮廓术(TFTP)

由于传统 FTP 是在空间域上进行滤波的, 因此会损失物体的高频细节信息, 为了尽可能地保留被测物体的空间细节信息, 完成对陡变物体的动态测量, Zhang 等^[89, 94, 118]提出时间傅里叶变换方法(TFTP), 记录动态过程表面条纹后逐像素进行时间域傅里叶变换, 结果对应重建变化的三维面形, 其测量原理如图 9 所示。

此方法通过投影高速相移的正弦图案至被测表面, 使得被测表面每点的条纹强度随时间成正弦周期性变化, 公式为

$$g(x, y, t) = a(x, y) + \frac{b(x, y)}{2} e^{i2\pi f_0 x} e^{i\varphi(x, y, t)} e^{i2\pi f_i t} + \frac{b(x, y)}{2} e^{-i2\pi f_0 x} e^{-i\varphi(x, y, t)} e^{-i2\pi f_i t}, \quad (4)$$

式中: f_0 为投影条纹的空间频率, 对于空间中任意一点, $e^{i2\pi f_0 x}$ 和 $e^{-i2\pi f_0 x}$ 为常数, 不随时间发生变化; f_i 为条纹在时间轴上变化的频率, 决定了在时间轴上进行傅里叶变换时基频的位置。因此, TFTP 方法在空间上不要求选用高频条纹进行投影, 只需要时序条纹切换速

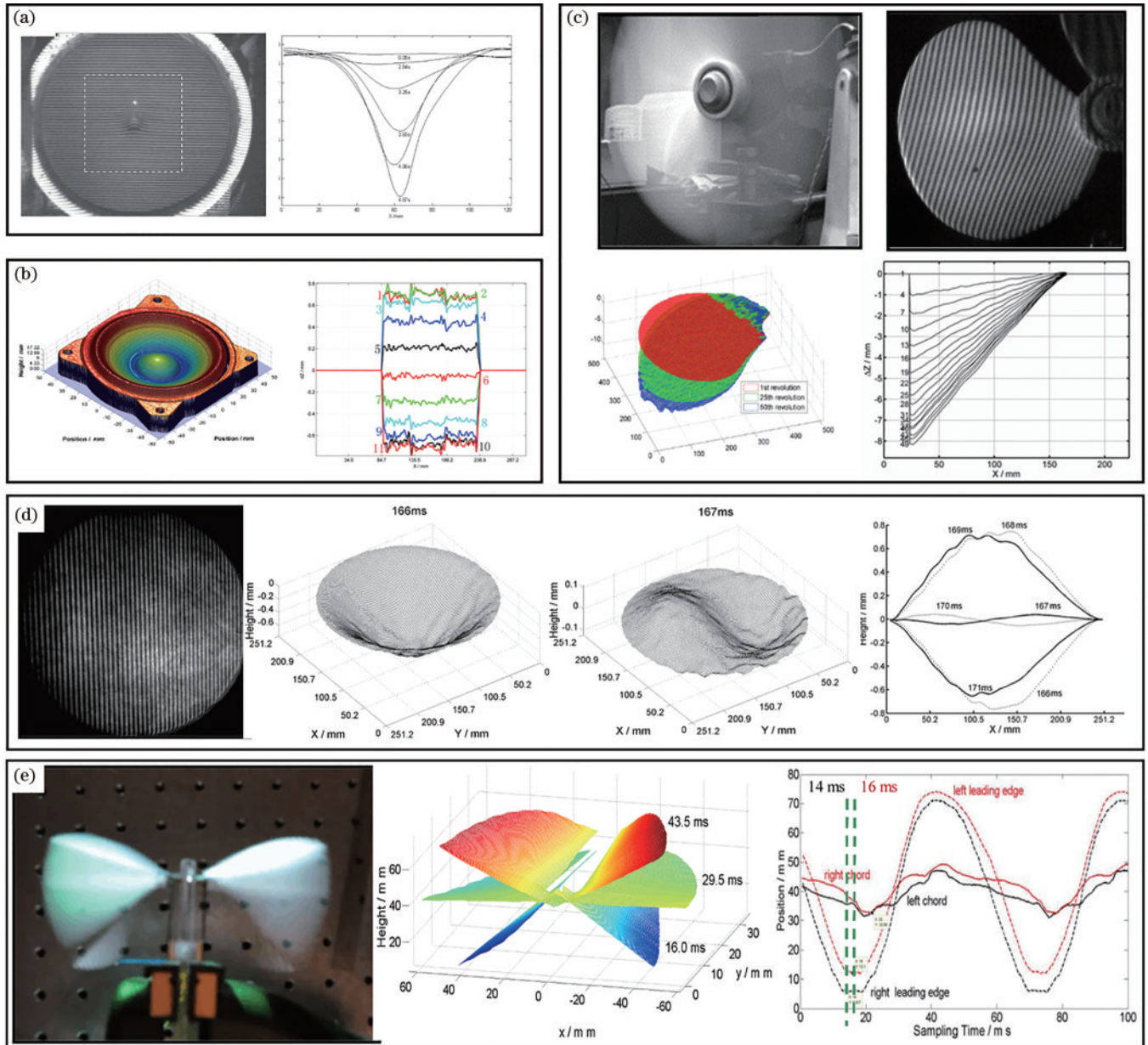


图 8 基于 FTP 的典型动态测量结果。(a) 液体漩涡^[116]; (b) 振动扬声器^[117]; (c) 旋转扇叶^[119]; (d) 振动鼓膜^[38]; (e) 微飞行器扑翼^[37]
 Fig. 8 Typical dynamic measurement results based on FTP. (a) Liquid vortex^[116]; (b) vibrating loudspeaker^[117]; (c) rotating fan blade^[119]; (d) vibrating drum membrane^[38]; (e) flapping wing of microaircraft^[37]

度和相机采集速度配合记录的每个点的一维时域信号满足抽样定理。文献[89]采用了旋转光栅机械投影方式来产生高速切换的相移图案,从而保证足够高的时域频率 f ,如图9(a)所示。对应的数据处理流程如图9(b)所示,在空间上获得一系列受物体调制的正弦相移条纹后,对每一空间点上获取的随时间变化的一维时序信号独立进行一维傅里叶变换,获得的频谱可记为

$$G(x, y, f) = a(x, y) \cdot \delta(f) + \frac{c(x, y)}{2} \varphi(x, y, f + f_i) + \frac{c'(x, y)}{2} \varphi^*[x, y, -(f + f_i)], \quad (5)$$

式中: $c(x, y) = b(x, y)e^{i2\pi f_0 x}$, $c'(x, y) = b(x, y)e^{-i2\pi f_0 x}$ 。通过在时域上进行滤波和傅里叶逆变换,即可提取每

个空间点上调制有物体高度信息的相位 $\varphi(x, y, t)$ 。从 TFTP 方法的数据处理流程可以看出,此方法将传统 FTP 方法中条纹对被测面形高度的空域信息调制转换到了对每一像素点的时域调制,因此它可以用于陡变、不连续动态场景的测量和分析。传统 FTP 技术中,二维空间滤波操作对被测表面的空间连续性要求也对应转换为一维时域滤波对信号时间变化的连续性要求。实际的动态测量场景中,空间不连续表面更易出现,而空间点在时间变化上的连续性容易得到满足,所以相较于 FTP 方法, TFTP 方法更有能力完成对陡变、不连续物体的动态三维测量。

在 TFTP 方法中,因为要对各个空间像素点上的信息进行独立处理,因此要求在动态过程中有一个时

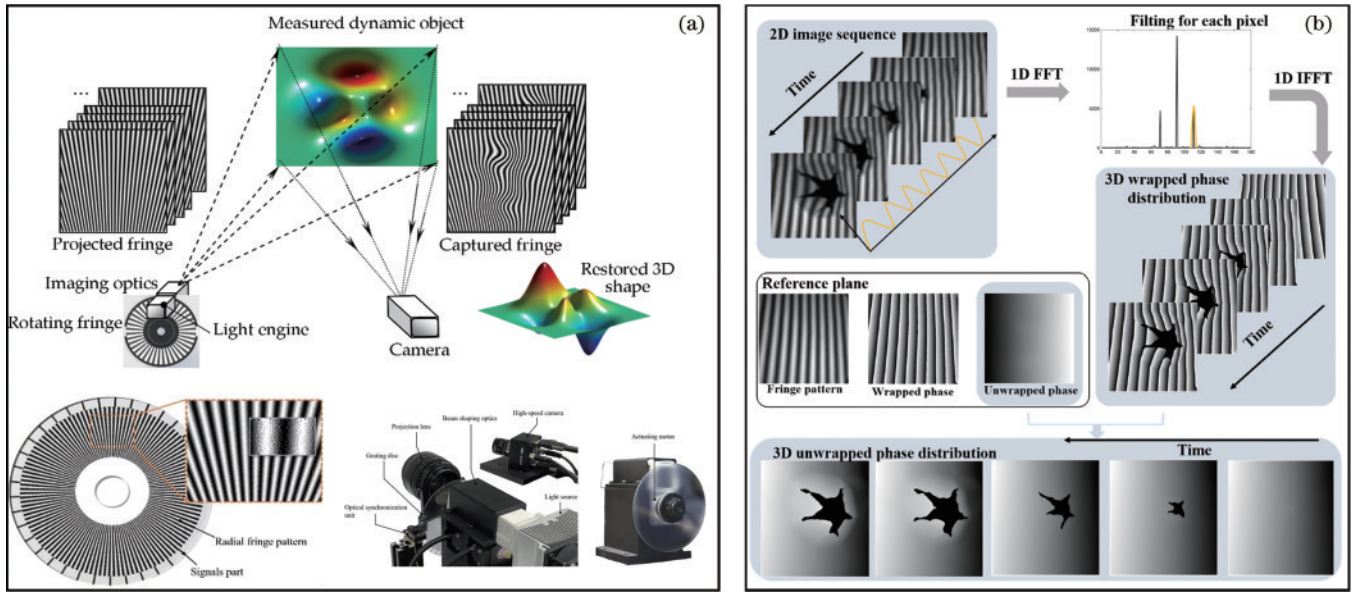


图9 基于时间傅里叶变换轮廓测量术的动态测量方法^[89]。(a) 旋转光栅结构光投影装置;(b) 动态三维形貌重建过程
Fig. 9 Dynamic measurement method based on temporal Fourier transform profilometry^[89]. (a) Rotating grating structured light projection device; (b) dynamic 3D shape reconstruction process

刻的二维空间相位可展,然后将其对应的空域展开相位分布作为初始平面,给各个空间点提供时域相位展开的起始点,以保证相位信息在三维时空域均连续可靠。为了降低此条件的约束,Liu等^[89]引入参考平面辅助的三维相位展开方法,使用标定中获取的参考平面展开相位指导被测物体的初始平面二维相位展开,完成了对冲击、破裂过程的动态重建,如图10(a)所示。此方法降低了对初始平面连续性的要求,但仍需要保证不连续跳变在一定深度范围中。为了彻底消除对初始平面的限定要求,张海花等^[124]提出基于时间三频复合条纹投影的TFTP测量方法,如图10(b)所示。此方法对三种不同频率条纹进行复合,旋转投影后在时序上也产生复合信号,然后通过时序滤波可将三个频率分量信号分别滤出,获取三组不同频率截断相位,再利用三频时间相位展开方法获得绝对、无歧义的三维连续相位信号。利用此改进方法,他们完成了对汽缸推杆往复运动的复杂动态过程的三维重建,如图10(b)所示。从该结果可以看出,空间上的陡变边界信息也得到了很好保留,同时对不含有二维空间可展的复杂测量场景也能完成绝对测量。

TFTP方法的提出克服了传统FTP方法对不连续、陡变物体测量的局限性,同时保留了其单帧测量(TFTP方法对数据在时域进行整体处理,对 N 幅图片可以解算 N 个结果,总体看也可归为“单帧测量”)的测量效率优势,为不连续、瞬态场景的测量提供了一个良好的技术手段。但此方法的局限性在于将被测面形空间连续性假设转换为时序连续性假设,因此,针对冲击飞散等时序信号不连续的动态场景,该方法将不再适用。

3.1.3 微频移傅里叶变换轮廓术(μ FTP)

为了彻底解决FTP方法对孤立、随机变化动态场景的相位展开问题,实现普适的绝对相位展开方法,Zuo等^[39]提出了微频移傅里叶变换轮廓术(μ FTP)。此方法在时序上循环投影3幅频率相近的高频条纹,在相邻两幅条纹中间间隔投影一幅白场,相机对投影图片进行高速同步采集,如图11(a)所示。对于获取到的受调制图案,首先使用背景归一化FTP方法(background-normalized FTP)获取高质量的截断相位分布,获得的条纹图 $I_1(x, y)$ 和白场图 $I_2(x, y)$ 可分别表示为

$$\begin{cases} I_1(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)] \\ I_2(x, y) = 2a(x, y) \\ a(x, y) = b(x, y) \end{cases} \quad (6)$$

利用白场对获取的条纹图同时进行去零频和归一化计算,可得

$$I_d(x, y) = \frac{2I_1 - I_2}{I_2 + \gamma} = \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)], \quad (7)$$

式中: γ 为避免分母为零所设置的小量。然后再对 $I_d(x, y)$ 进行傅里叶变换、滤波和逆变换处理,就可提取最终截断相位。此方法可同时实现去零频,避免了频谱混叠问题,同时减小了消除背景光不均匀对测量结果带来的影响。

在获取到3组高频截断相位后,Zuo等^[39]进一步提出基于最小投影距离的时间相位展开方法(TPU with PDM)。选取3组波长相近的条纹时需满足

$$\text{LCM}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \geq W, \quad (8)$$

式中: $\text{LCM}(\cdot)$ 表示三组波长的最小公倍数。此时可

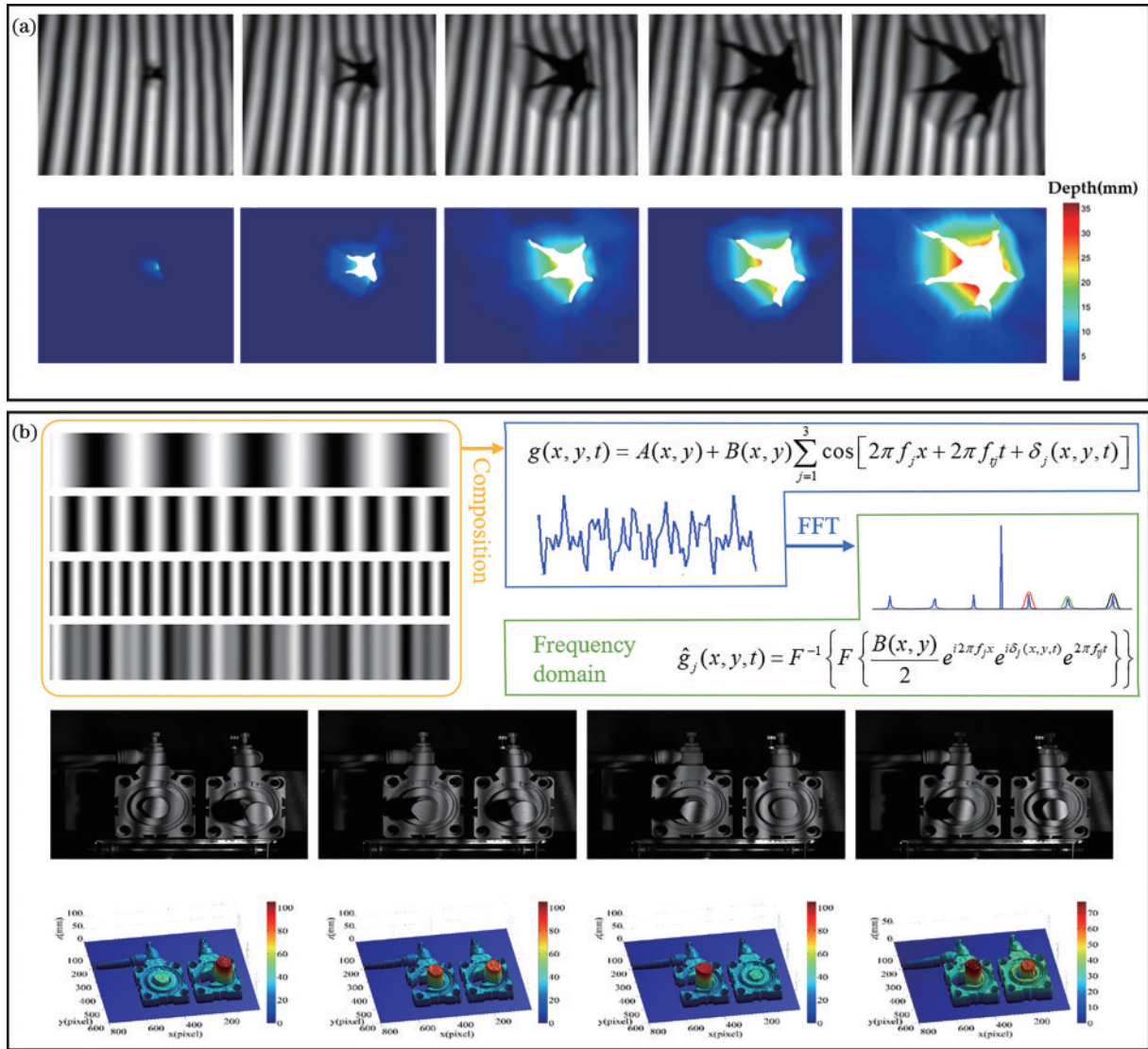


图 10 改进的时间傅里叶变换轮廓测量术的动态测量方法。(a) 基于参考面辅助的 TFTP 方法的测量结果^[89]；(b) 基于三频条纹复合的 TFTP 方法的测量结果^[124]

Fig. 10 Dynamic measurement method of improved temporal Fourier transform profilometry. (a) Measurement results of reference plane assisted TFTP method^[89]; (b) measurement results of three-frequency fringe assisted TFTP method^[124]

唯一确定任意空间位置处的 3 组对应相位级次 k_1 , k_2 , k_3 。然后根据波长 λ 、展开相位 Φ 和投影仪坐标 P 三者的已知关系,可得到如图 11(b)所示的投影曲线,实际解码时只需找到 3 组截断相位级次 k_1 , k_2 , k_3 可能出现的所有组合情况对应的投影点 P ,就可选择出离投影曲线距离 d 最近的投影点,其所对应的相位级次即为解出的正确级次,表达式为

$$d^2 = \|P - \Phi\|^2 = (P - \Phi)^T (P - \Phi), \quad (9)$$

式中: $\|\cdot\|$ 表示求解欧几里得范数。相比传统的多波长相位展开方法,基于最小投影距离的时间相位展开方法具有更大的有效测量深度和更强的抗噪性。利用该方法,作者以高达 10000 frame/s 的重建速率完成了对气枪子弹出膛、气球破裂等复杂瞬态场景的三维重构,如图 12 所示。

μ TFTP 方法通过引入 3 种不同频率的条纹实现了

基于 FTP 测量方法的绝对相位展开,彻底解决了各种随机运动场景下的相位歧义性问题,为复杂、瞬态动态过程的三维形貌测量和运动分析提供了有力的技术手段。但由于该方法引入了白场投影,相比于传统 FTP 测量方法,采集效率将减半。

由于需要在空域或者时域进行滤波操作,上述基于傅里叶变换的方法会平滑掉空域(FTP 和 μ TFTP)或者时域(TFTP)上的陡变高频信息。此外,对于这类变换域方法,都需要谨慎选择变换参数,如滤波窗尺寸和位置或者小波的尺度,在动态场景中,这些参数往往会随着场景一起发生改变,无法事先唯一确定,导致该类方法的测量精度在动态场景应用中很难保持稳定。因此,基于变换域的单帧测量方法通常更多地适用于变化较快但时空上变化比较平缓的动态场景三维重建领域。

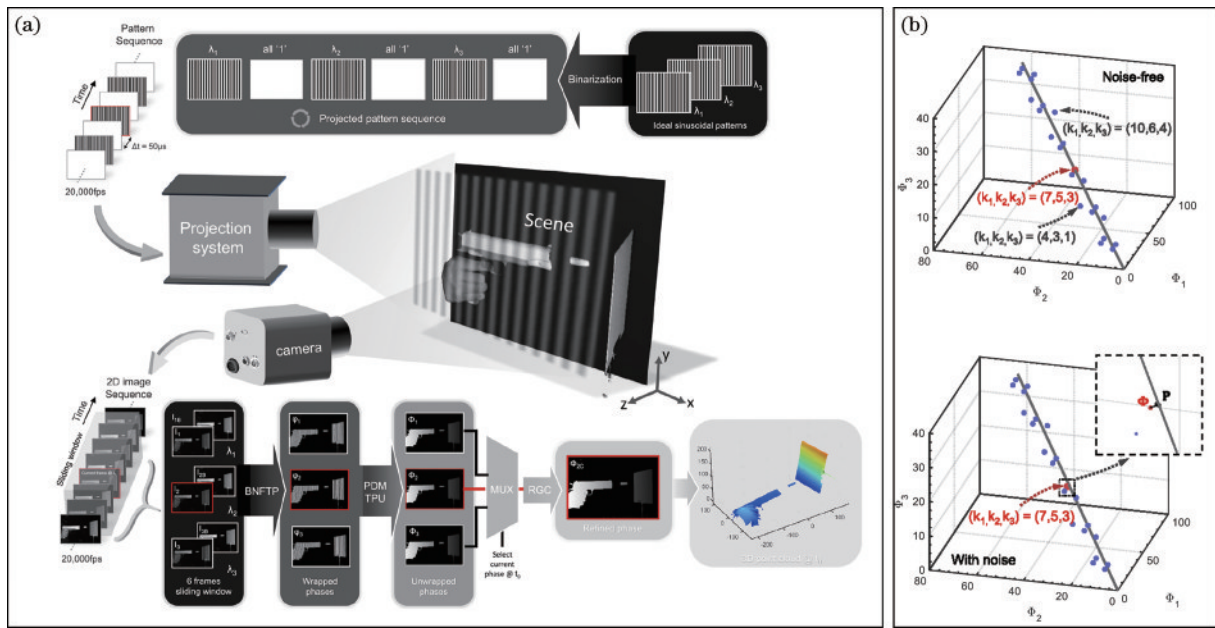


图 11 基于微频移傅里叶变换轮廓测量术(μ FTP)的动态测量方法^[39]。(a) μ FTP方法的测量流程;(b)基于最小投影距离的时间相位展开方法得到的结果

Fig. 11 Dynamic measurement method based on micro Fourier transform profilometry (μ FTP)^[39]. (a) Measurement flow chart of μ FTP method; (b) results obtained by temporal phase unwrapping method based on minimum projection distance

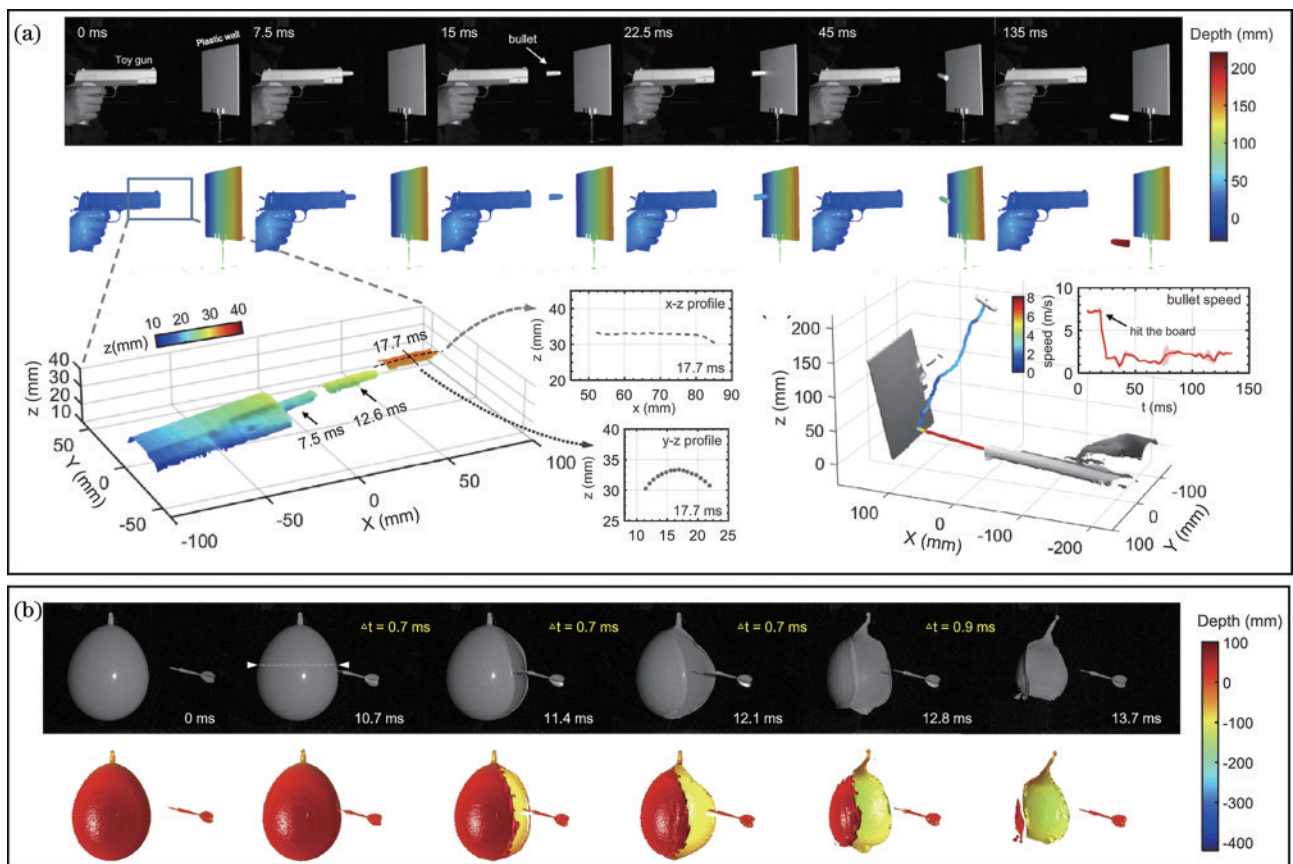


图 12 基于 μ FTP方法的高速三维形貌测量结果^[39]。(a)手枪射击平板;(b)破裂气球

Fig. 12 High-speed 3D shape measurement results based on μ FTP method^[39]. (a) Pistol shot on plates; (b) busted balloon

3.2 相移测量轮廓术

与基于变换域的单帧测量方法相比,基于多帧相移条纹的相位测量轮廓术(PMP)^[125-126]在光学测量领

域拥有更广泛的应用。在此方法中,一系列的相移图案被依次投射到物体表面,每一个点处的相位值可以沿时间轴被独立计算出来。此类方法进行点对点计

算,不需要单帧测量方法的滤波等操作,因此测量精度更高,灵活性更好,不易受物体表面反射率变化和陡变的影响。

众多学者在 PMP 技术基础上研究发展了一系列高速三维形貌测量技术。Zhang 等^[127]在 2006 年提出了第一套基于 PMP 技术的实时动态三维测量系统,实现了速度为 40 frame/s 的实时三维重建。借助图形处理器(GPU)的发展,基于 PMP 技术的实时三维测量系统得到了进一步的发展^[20, 128-135]。实时三维测量系统的重建速率主要受限于投影仪的投影速度,一般在 60 Hz 以下,因此常被用来测量变化速度相对较慢的动态场景。前文提到的二值离焦投影技术^[88]利用 DLP 投影仪投影二值条纹,可以将投影速率提升到 20000 Hz 以上。结合二值离焦投影方法,配合同步拍摄的高速相机,可以将多帧相移技术应用到更高速度的动态场景测量中,真正实现高速、高精度三维测量。

相移法的测量精度随着相移步数的增加而提高,

但在高速动态三维测量场景中,学者们通常选取最小步数 3 步来保证最高的测量效率,高达千甚至万赫兹的投影帧率和拍摄帧率保证了物体在三帧记录条纹之间的运动可以被忽略。因此,将以三步相移为例来介绍相移技术的基本原理。当相移步数取为 3 后,3 幅相移图案可以分别表示为

$$I_1(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y)], \quad (10)$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y) - 2\pi/3], \quad (11)$$

$$I_3(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y) - 4\pi/3]. \quad (12)$$

图 13 为利用三步相移方法进行测量的一个例子,图 13(a)~(c)表示三步初始相位差为 $2\pi/3$ 的相移图案,图 13(d)表示计算得到的截断相位,图 13(e)和图 13(f)则是分别计算提取出的条纹均值 $a(x, y)$ 和调制度 $b(x, y)$ 。

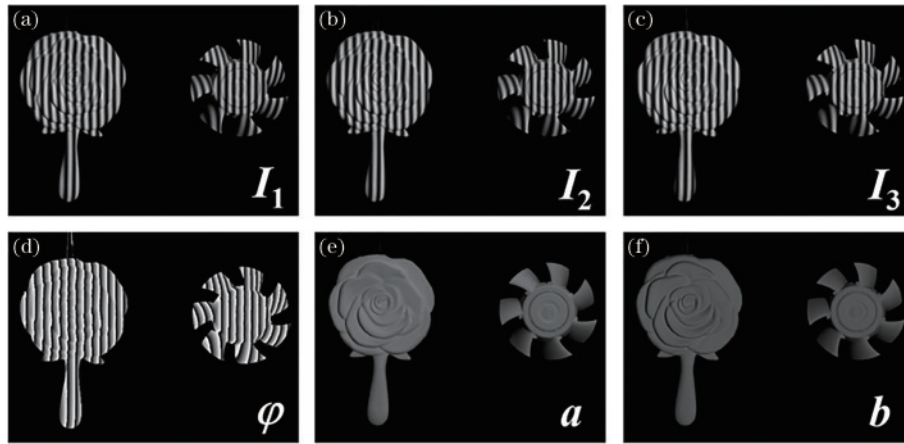


图 13 三步相移方法的测量实例。(a)~(c) 三步相移条纹图;(d) 截断相位图;(e) 条纹均值;(f) 条纹调制度

Fig. 13 Measurement example of three-step phase-shifting method. (a)~(c) Three-step phase-shifting fringe patterns; (d) wrapped phase diagram; (e) mean value of the fringe; (f) modulation of the fringe

和 FTP 技术一样,相移技术同样面临着截断相位歧义性的问题,因此,为了实现动态场景中的绝对测量,学者们从硬件和算法两方面来解决此问题。

3.2.1 双目立体相位匹配

在硬件设备端,受双目立体视觉测量原理的启发,学者们在传统单相机和单投影仪组合的结构光测量系统中再增加一个相机,两路相机构成传统的双目系统,如图 14 所示。左相机将在不同深度上的点 P_1, P_2, P_3 最终成像到了像面上的同一点 P 上,因此单个相机用来判断物体深度产生的歧义性。增加的右相机从另一个角度来观察物体,不同深度上的三点在其靶面上成像为不同的三点 P'_1, P'_2, P'_3 ,投影仪投影结构光,对被测场景进行全场编码以及左右两个相机的几何约束,便可唯一确定每一点的深度位置,从源头上消除重建深度的歧义性。

正确找到物体上同一点在左右相机成像面上的对应点是此方法完成深度重建的核心。从右相机靶面可

以看到,由于左右两个相机和物体摆放无法保证在同一水平面,不同深度位置的成像点也不在像面上的同一行,因此在查找对应点时需要进行二维搜索。为了缩小搜索的范围,极线校正方法^[136]常被用来对左右相机拍摄到的图片进行预处理,校正后的图片等效于两光轴相互平行的相机记录的拍摄结果,像点在左右图像垂直方向上保持一致。因此在后续进行对应点查找匹配时,只需要在同一行搜索即可。极线校正后的结果如图 14 右侧子图所示,可以发现对应点在左右图像的同一行上,它们横坐标的像素差异就是视差,可以直接反映物体与观察点的距离,再通过双目系统的标定便可将视差转换为深度信息。

Jiang 等^[137]利用双目条纹投影测量系统以 1200 frame/s 的三维重建速率完成了如图 15(a)和图 15(b)所示的玻璃杯共振并破碎的动态场景三维重建。

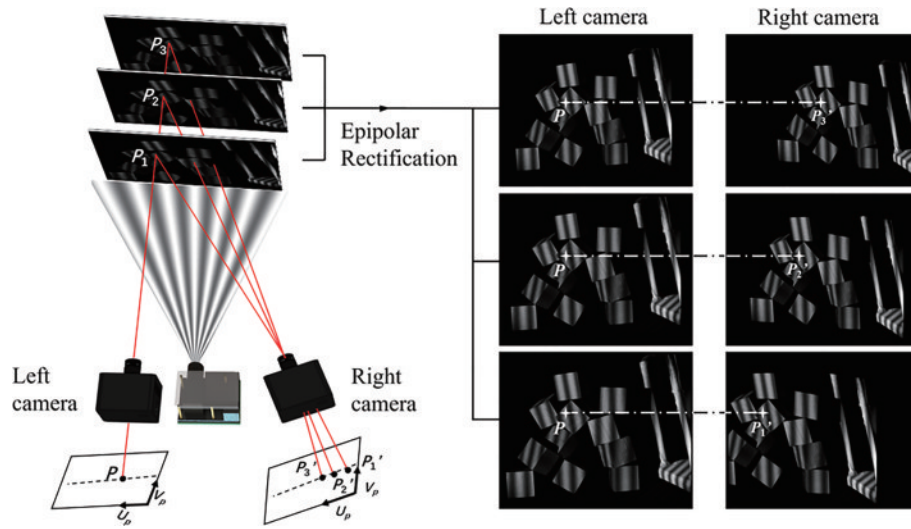


图 14 双目条纹投影测量系统原理示意图

Fig. 14 Schematic of binocular fringe projection measurement system

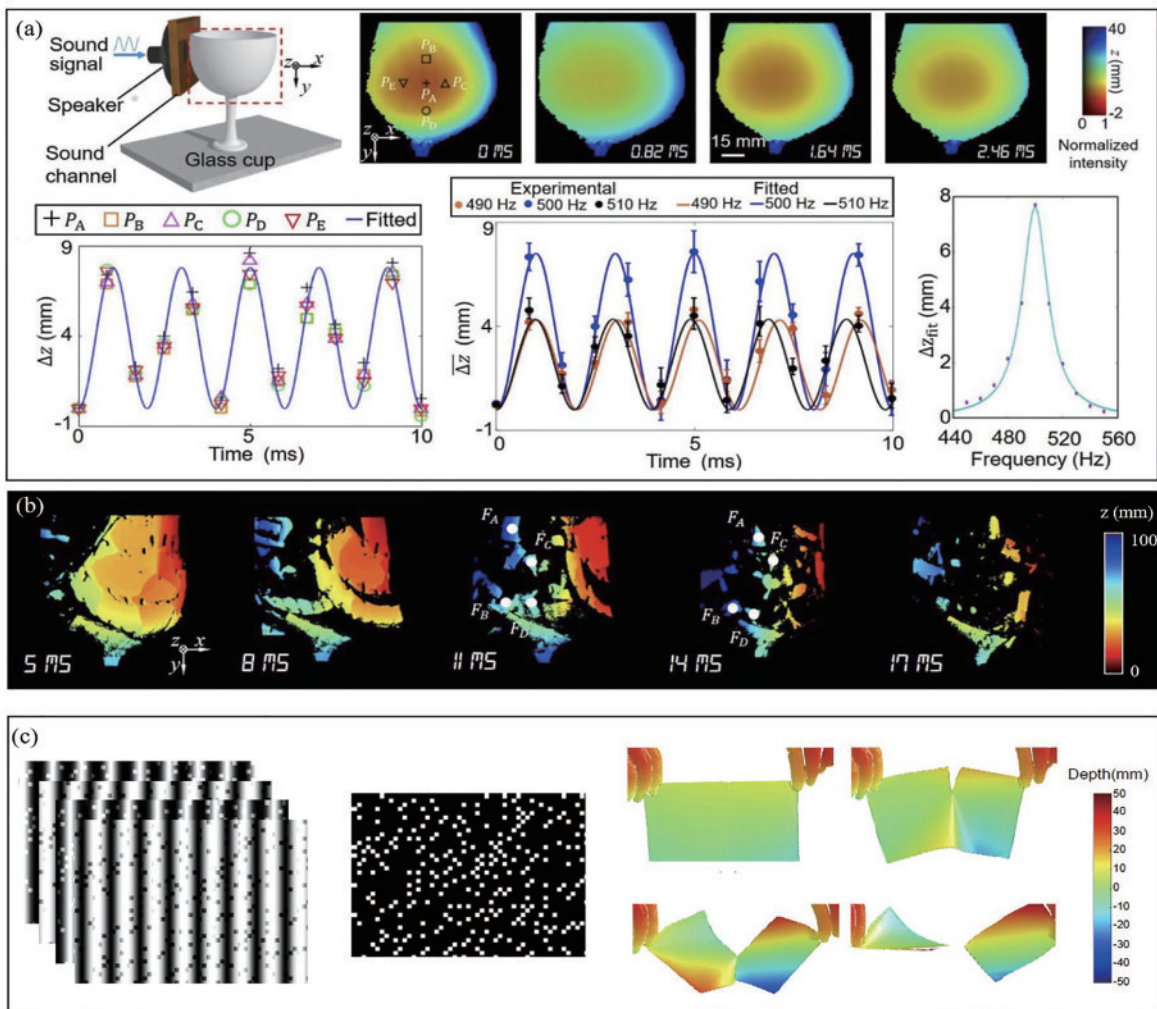


图 15 基于双目条纹投影测量系统的典型动态场景测量结果。(a) 玻璃杯共振^[137]; (b) 玻璃杯破碎^[137]; (c) 纸张撕裂^[138]

Fig. 15 Measurement results of typical dynamic scenes based on binocular fringe projection measurement system.

(a) Glass resonance^[137]; (b) broken glass^[137]; (c) teared paper^[138]

此类方法无需投影额外的级次标记图案,通过左右两个相机进行几何约束可以确定截断相位的相位级

次,消除相位的歧义性^[139-141],因此可以保证高速测量的重建效率,但是额外增加的高速相机会增加系统的

成本,几何约束方法的使用同样也会限制测量的深度范围。为了解决测量深度受限的问题,Yin等^[138]将散斑图案嵌入四步相移条纹中,如图15(c)所示,利用散斑图案对全场进行随机标记,以5000 frame/s的重建帧率完成了对手撕纸张等动态场景的绝对三维测量。

除了利用几何约束方法外,也有学者直接绕过相位的计算和展开,提出非周期正弦条纹投影,利用强度相关算法去帮助左右相机完成双目立体匹配^[35]。此类方法的投影图案仅是一个辅助左右相机进行匹配的标记信息,不直接决定和影响测量结果的精度,因此可以放宽对投影图案准确性的要求,可在其他投影技术辅助下实现更快速率的结构光投影。采用此原理,Heist

等^[35]利用LED阵列投影的方式以3 kHz的投影速率实现了重建帧率大于330 frame/s的三维场景重建,其测量系统如图16(a)所示,典型测量结果如图16(c)所示。随后他们又发展了Goes before optics (GOBO)投影技术,该技术通过将光源透过高速旋转的镂空盘片,再由二值离焦技术来构造非周期正弦条纹结构光投影,以12000 Hz的采集速率实现了重建帧率为1333 frame/s的高速三维重建^[41, 95],其测量系统如图16(b)所示,典型测量结果如图16(d)所示。基于此原理,他们通过增加额外的多光谱相机或红外相机实现了对光谱信息和温度信息等更多维度的成像^[142-143]。

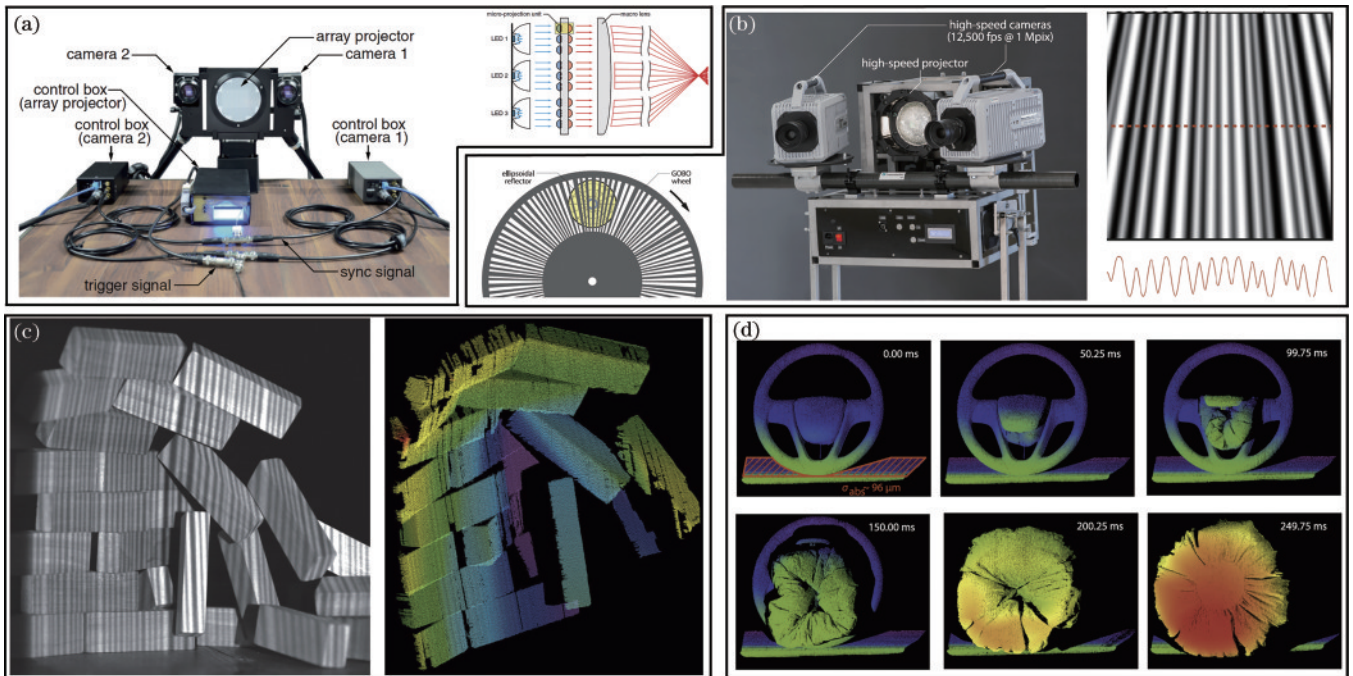


图 16 基于非周期条纹投影的双目结构光系统及典型重建结果。(a) 阵列投影系统^[35]; (b) 旋转光栅投影系统^[41]; (c) 砖块倒塌^[35]; (d) 安全气囊弹出^[41]

Fig. 16 Binocular structured light system based on aperiodic fringe projection and typical reconstruction results. (a) Array projection system^[35]; (b) rotary grating projection system^[41]; (c) brick collapse^[35]; (d) airbag ejection^[41]

硬件设备端支撑的上述测量方案都需要至少2台高速相机,高额的价格会大大增加测量设备的成本,因此更多学者尝试从算法端去解决相位歧义的问题。

3.2.2 双频、多频辅助相移

在相位展开算法端,学者们将时间相位展开方法引入到动态三维测量中,通过在时间轴上建立相位与高度的关系,点对点展开复杂孤立静态场景中的截断相位。典型的时间相位展开方法可以分为两大类:一类是基于多个不同频率相移条纹进行相位展开的方法^[144];另一类是基于格雷码辅助进行相位展开的方法^[145]。

基于多频相移条纹的方法是通过投影额外频率的相移条纹消除相位歧义的,根据消除歧义的原理不同,进一步分成分级法或称多频法(hierarchical)^[146-147]、外

差法或称多波长法(heterodyne)^[148-149]以及数论法(number theoretical)^[150-151]。图17列举了3种双频相移条纹时间相位展开方法的相位展开过程,3种方法分别为双频法(two-frequency method)、数论法(number-theoretical method)以及双波长法(two-wavelength method)。

对于双频方法,低频条纹频率 f_l 始终为1,即 $f_l=1$,高频条纹频率为 f_h ,在本例子中 $f_h=8$ 。低频条纹频率为1,其相位信息不会截断,所以 $\Phi_l=\phi_l$ 。高频截断相位 ϕ_h 可以展开为

$$k_h = \text{Round} \left[\frac{(f_h/f_l)\phi_l - \phi_h}{2\pi} \right] = \text{Round} \left(\frac{f_h\phi_l - f_l\phi_h}{2\pi} \right), \quad (13)$$

$$\Phi_h = \phi_h + 2\pi k_h, \quad (14)$$

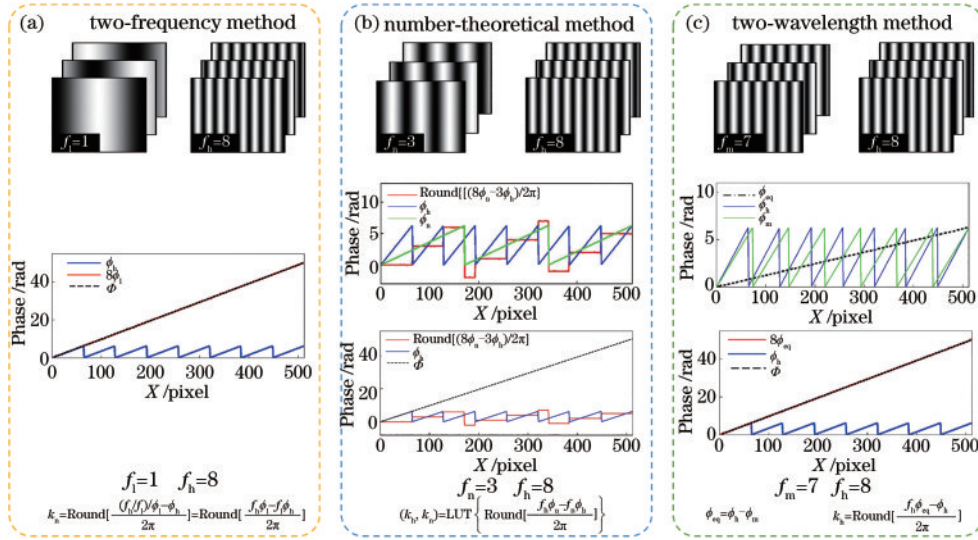


图 17 基于双频相移的时间相位展开方法。(a) 双频方法；(b) 数论方法；(c) 双波长方法

Fig. 17 Typical temporal phase unwrapping approaches based on two-frequency phase shifting. (a) Two-frequency method; (b) number-theoretical method; (c) two-wavelength method

式中： k_h 为高频条纹级次； $\text{Round}(\cdot)$ 为四舍五入取整函数。

对于数论方法，两组条纹频率分别为 f_n 和 f_h ，因为两组频率对应的展开相位 Φ_n 和 Φ_h 满足关系 $\Phi_h = (f_h/f_n)\Phi_n$ ，则有

$$(f_h\phi_n - f_n\phi_h)/2\pi = k_h f_n - k_n f_h. \quad (15)$$

当两组条纹周期宽度的最小公倍数大于或等于投影条纹总宽度时，式(15)等式左边在每一个区域都具有互不相同的唯一值，在本例子中 $f_h=8$ ， $f_n=3$ ，对应条纹周期分别为512/8 pixel以及512/3 pixel，最小公倍数为512 pixel，能够覆盖整幅条纹，因此在图17中，每个区域的值都是唯一的。数论法就是利用该性质，提前造好查找表，利用式(16)去查找两个频率截断相位对应的解码级次 k_h 和 k_n 。

$$(k_h, k_n) = \text{LUT} \left[\text{Round} \left(\frac{f_h\phi_n - f_n\phi_h}{2\pi} \right) \right]. \quad (16)$$

对于双波长方法，两组条纹频率分别为 f_m 和 f_h ，两组条纹频率差需为1，在本例子中， $f_m=7$ 和 $f_h=8$ 。解码时首先将两组截断相位 ϕ_m 和 ϕ_h 作差，构造频率为1的差频相位信息：

$$\phi_{\text{eq}} = \phi_h - \phi_m, \quad (17)$$

然后再计算高频条纹的相位级次：

$$k_h = \text{Round} \left(\frac{f_h\phi_{\text{eq}} - \phi_h}{2\pi} \right) = \text{Round} \left(\frac{f_m\phi_h - f_h\phi_m}{2\pi} \right). \quad (18)$$

利用三频外差方法(多波长方法)，Wang等^[152]以5000 Hz的投影速率投影二值条纹，实现了每秒556 Hz的三维重建，测量结果如图18(a)所示，此方法利用9幅图重建一个结果，测量效率相对较低。他们^[40]后来采用双频方法，用3+3共6幅图案对跳动的

离体兔子心脏完成了表面三维形貌的测量，提高了测量效率，测量结果如图18(b)所示。随后，为了进一步提升测量效率，Zuo等^[153]在数论方法基础上提出Bi-frequency方法，将投影图案减少为5幅(数论法，3+2)，实现了1250 frame/s的重建帧率，测量结果如图18(c)所示。近期，Jiang等^[154]使用双频方法，利用带宽限制(band-limited)投影系统替换掉了常用的DLP投影仪，此系统通过在4f成像系统的频谱面限制信号的带宽来产生高质量正弦条纹。相比于传统的二值离焦方法，此方法具有更大的有效测量范围。他们利用此系统实现了米级的测量视场，完成了对人体运动姿态的测量，其测量系统和测量结果如图18(d)所示。

虽然基于多频相移的方法已经广泛地运用到了动态场景的测量中，但其在进行相位展开时会将噪声信号等比例放大，干扰重建结果；同时将该类方法用于具有高噪声的复杂场景时，还会存在如运动导致相位计算不准确、多频相位展开级次错误等问题。文献[144]详细推导了几种典型的多频相移相位展开方法的抗噪声模型，并比较分析了它们的性能。

3.2.3 格雷码辅助相移

为了实现对高噪声场景下的高鲁棒性测量，学者们引入格雷码来辅助相移技术进行相位展开。格雷码(Gray code)是贝尔实验室的Gray^[155]在1940年代首先提出的，要求在一组数的编码中，任意两个相邻的码字只有一位二进制数不同(即汉明距离为1)。另外由于其编码的最大数与最小数之间也仅一位数不同，即“首尾相连”，因此又称循环码或反射码。由于格雷码是误差最小化的可靠编码方式，因此具有很强的鲁棒性和抗噪性。

格雷码图案的唯一编码特性可以用来很好地消除截断相位的歧义性，图19(a)展示了传统格雷码的解码过程。计算得到的解码级次 $k_c(x, y)$ 为

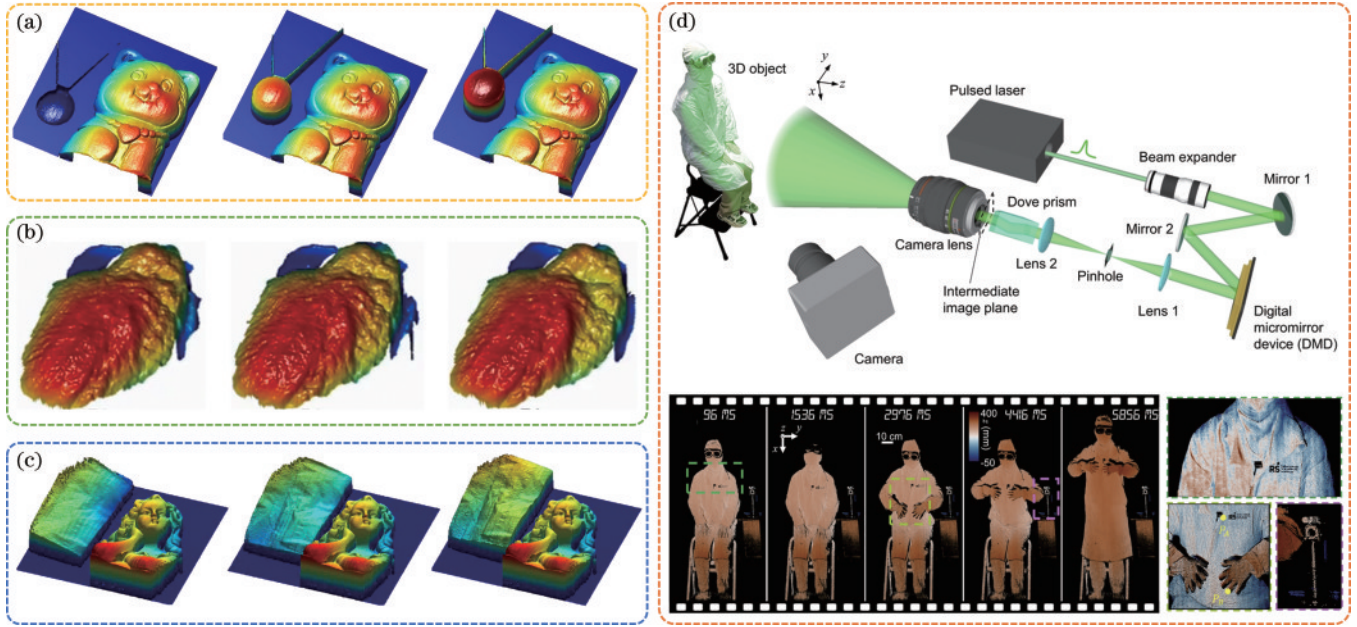


图 18 基于多频相移方法的典型测量结果。(a) 单摆摆动^[152];(b) 离体兔子心脏跳动^[40];(c) 动和静孤立物体^[153];
(d) 人体运动姿态测量^[154]

Fig. 18 Typical measurement results of the multi-frequency phase-shifting method. (a) Simple pendulum swing^[152]; (b) beating of the isolated rabbit's heart^[40]; (c) dynamic and static isolated objects^[153]; (d) measurement of human motion posture^[154]

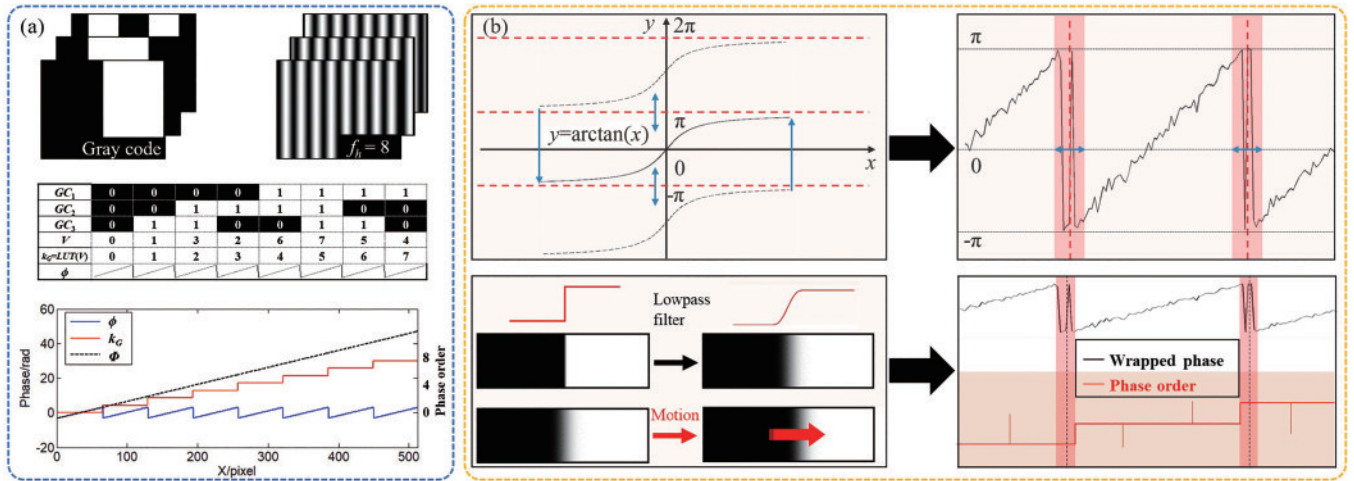


图 19 基于格雷码辅助相移的测量技术。(a)测量原理;(b)相位展开误差来源

Fig. 19 Gray-coded-assisted phase-shifting measurement technology. (a) Measurement principle; (b) source of phase unwrapping error

$$V(x, y) = \sum_{i=1}^M GC_i(x, y) \times 2^{M-i}, \quad (19)$$

$$k_G(x, y) = \text{LUT}[V(x, y)], \quad (20)$$

式中: M 代表格雷码的幅数; $\text{LUT}(\cdot)$ 表示十进制码字 $V(x, y)$ 和级次 $k_G(x, y)$ 之间的对应查找关系。计算得到的级次对截断相位的周期进行了唯一编码,因此,利用式(21)可以将截断相位 $\phi(x, y)$ 展开为连续相位 $\Phi(x, y)$,相位展开的过程如图19(a)所示。

$$\Phi(x, y) = 2\pi k_G(x, y) + \phi(x, y). \quad (21)$$

但是在实际的测量过程中,一方面由于反正切函数在相位截断处极易受到外界噪声的影响,在截断处产生 $\pm\pi$ 之间的上下跳变,因此在截断处附近的相位

并不可靠,如图19(b)所示,在后续的相位展开过程中会导致此区域的相位展开错误;另一方面,由于受到系统噪声和测量系统的低通滤波特性(主要来自投影仪镜头和相机镜头)的影响,拍摄记录的格雷码边沿不是锐利截止,因此需要进行二值化操作。二值化的过程不能准确地定位边沿,会带来额外的判断误差,导致二值化后的格雷码边沿和截断相位截断处产生错位,相位展开出错。因此,上述两个原因最终会导致相位展开结果在相位截断处不再可靠,产生级次跳变误差。除此之外,当被测表面存在高噪声或者在低照度区域时,格雷码解码也会有一定概率出现,会导致离散分布的级次误差,这一类误差称为噪声误差。需要说明的

ϕ_3 在易出错的级次跳变处始终保持连续,所以可以避免级次跳变误差。利用此性质,将每一级的解码级次分为 3 部分,利用式(25)将级次的不同部分用来分别展开对应截断相位的中间连续无跳变部分,可以避免掉级次跳变误差,再补偿回相应的已知初始相位后,就可以无歧义地进行相位展开。从上述原理可以看出,分区间相位展开方法在截断相位和级次错位不超过 $1/3$ 个条纹周期时都可以有效消除级次跳变误差,此条件在使用高速测量设备的情况下能够很容易得到保证。

$$\Phi(x, y) = \begin{cases} \phi_1(x, y) + 2\pi k_1(x, y) - 2\pi/3, & k \in k_1 \\ \phi_2(x, y) + 2\pi k_m(x, y), & k \in k_m \\ \phi_3(x, y) + 2\pi k_h(x, y) + 2\pi/3, & k \in k_h \end{cases} \quad (25)$$

两种提前避免方法可以从源头直接避免级次跳变

错误,因此能够同时适用于静态和动态测量场景的误差消除方面。但此类方法只能消除级次跳变错误,而对噪声误差无能为力。因此,在实际复杂工况下,可以先使用提前避免方法消除级次跳变误差,再利用事后纠正方法修正剩余离散的随机噪声误差。

除相位展开错误外,编码效率低是格雷码辅助相移技术的另一大局限,该局限阻碍了此技术在动态测量中的应用与发展。格雷码的编码方式决定了编码 N 个条纹周期至少需要 $\log_2 N$ 幅格雷码,因此编码 16 周期条纹至少需要投影 3 幅格雷码和 4 幅格雷码图案。为了提升格雷码的编码效率,将此方法应用到动态场景的测量中,学者们从扩展编码容量和提高编码利用率两个方面进行了一系列工作,如图 21 所示。

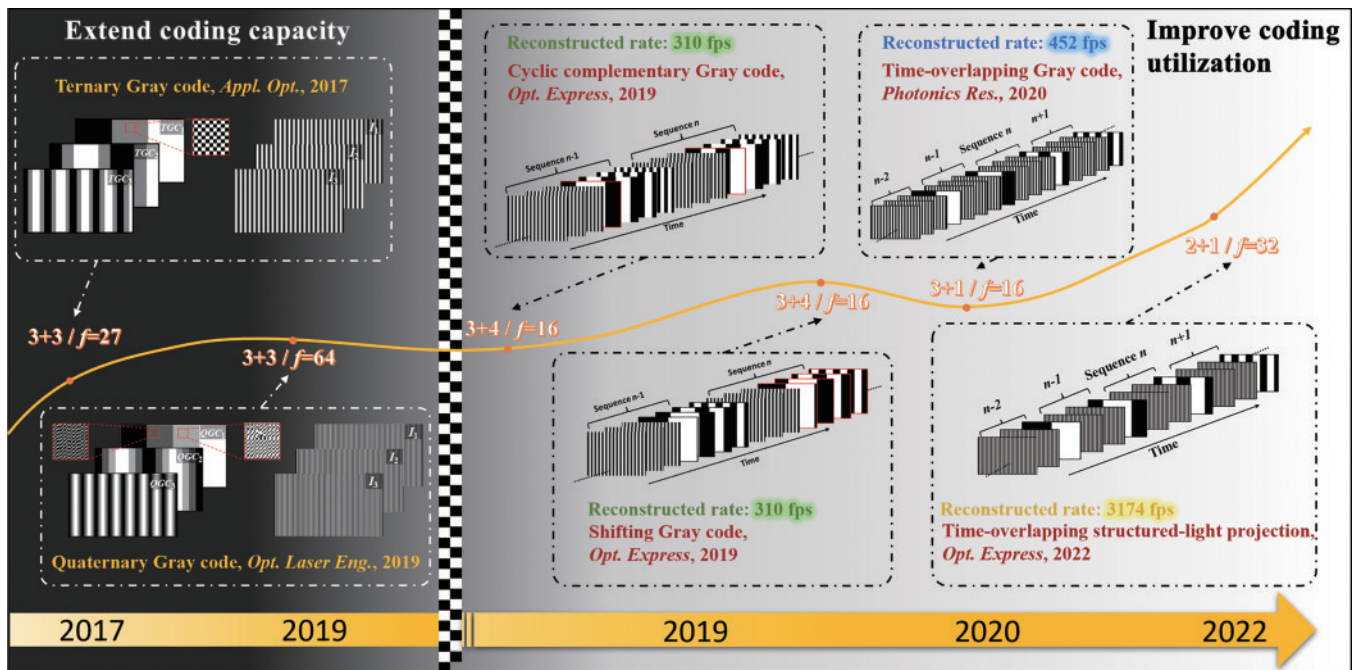


图 21 提升格雷码辅助相移技术编码效率的典型方法

Fig. 21 Typical methods to improve the coding efficiency of Gray-coded-assisted phase-shifting technology

为了提升格雷码编码容量,Zheng 等^[164]在 2017 年提出了三灰度格雷码方法,通过将二值量化技术应用到格雷码图案上,可以将量化后的二值条纹通过离焦产生“0.5”灰度码字,从而增加格雷码的编码灰度级数,通过此方法,对于 M 幅格雷码来说,编码的周期级次数目可以从原来的 2^M 提高到 3^M 。受该思想启发,He 等^[165]对三灰度方法进行改进,提出了四灰度编码方法,进一步提升了编码效率。此类方法可以有效地提高格雷码方法在高速测量过程中的编码效率,但是增加灰度数目是以损失信噪比为代价的,测量结果易受噪声的影响,所以此类方法更适用于低噪声环境等动态场景的测量。

为了不损失格雷码的信噪比,本课题组在提高编码利用率方面进行了持续深入的研究:2019 年,将传

统第二幅格雷码右半部分在时序上构建循环黑白翻转,提出了循环互补格雷码(cyclic complementary Gray code)^[166],通过相邻时序的异或计算构建出未投影的第一幅格雷码(使用 16 个周期条纹完成一次测量需要 $3+4$ 帧图案,文中记为 $3+4$,条纹频率 $f=16$);将偶数格雷码序列在空间上整体移动半个周期,提出移动格雷码(shifting Gray code)^[42],利用传统解码方法即可直接构建出错位互补级次($3+4, f=16$)。两种方法在不额外投影格雷码的前提下,避免了级次跳变错误,结合二值离焦技术实现了 310 frame/s 的三维形貌重建帧率。2020 年,本课题组提出了分区间相位展开方法(tripartite phase unwrapping)^[157],通过移动截断相位而非条纹级次来避免级次跳变错误,此方法只需要获取截断相位和相位级次即可使用,无需利用时序上的

复用关系,即可解决级次跳变误差问题,可直接推广到格雷码编码以外的其他编码方法,具有很强的通用性^[163]。在此方法基础上,利用冗余的时序信息,提出了格雷码复用编码策略(time-overlapping Gray code)^[157],该策略将传统格雷码间隔投影到相移条纹中间,解码时对每组相移条纹都使用最近的相邻 4 幅格雷码进行解码,每幅格雷码被重复使用 4 次,从而大大提升了重建效率($3+1, f=16$),实现了 452 frame/s 的三维形貌重建帧率。2022 年,本课题组进一步提出

了结构光复用编码策略(time-overlapping structured-light projection),对相移条纹图和格雷码图案同时在时间轴上进行复用,最终利用每个序列只投影 3 幅图案实现了对 32 周期条纹的绝对标记($2+1, f=32$),以 3174 frame/s 的重建速率实现了对复杂、高噪声动态场景的三维形貌重建^[167]。利用上述方法,本课题组完成了对牛顿摆撞击、积木坍塌、扇叶旋转、雪花飘落及水球撞击铁网等复杂、高噪声动态场景的三维形貌测量,结果如图 22 所示。

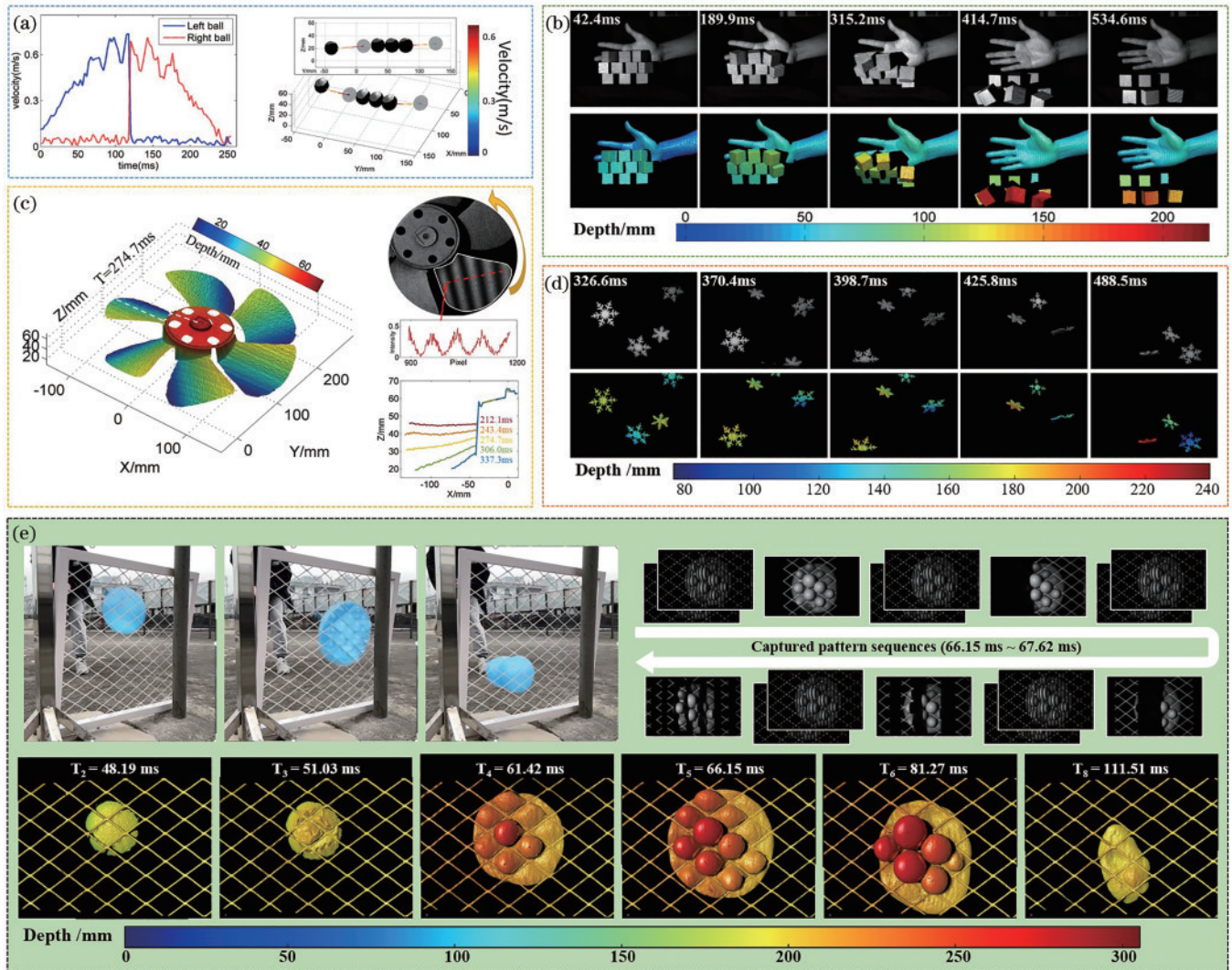


图 22 基于格雷码辅助相移技术的动态场景典型测量结果。(a) 牛顿摆撞击^[166]; (b) 积木坍塌^[157]; (c) 扇叶旋转^[157]; (d) 雪花飘落^[167]; (e) 水球撞击铁网^[167]

Fig. 22 Typical measurement results for dynamic scenes of Gray-coded-assisted phase-shifting technology. (a) Newton's pendulum impact^[166]; (b) block collapse^[157]; (c) blade rotation^[157]; (d) falling snowflake^[167]; (e) water balloons hitting iron mesh^[167]

该方向上的持续研究在保证格雷码辅助相移技术高抗噪性能的前提下,先后解决了级次跳变错误和编码效率低这两大关键问题,将此技术成功应用到了复杂、高噪声动态场景的测量中。相比双频相移方法,格雷码辅助相移技术在抗噪性能和鲁棒性上具有明显优势,但在条纹周期编码能力上不如双频相移方法。因此,格雷码辅助相移技术更适用于测量成功率为首要

考虑的、复杂高噪声工况下的高鲁棒性高速测量,而双频相移方法更适用于测量精度为首要考虑的、良好工况下的高精度高速测量。关于两类技术在动态测量场景下的详细性能比较,可见本课题组撰写发表的综述论文^[168]。

3.3 深度学习辅助方法

学者们已经利用传统条纹投影方法研究发展了一

系列的动态三维形貌测量技术。而近年来深度学习方法的持续突破同样也为条纹投影三维测量领域的发展带来了新的生机^[169]。学者们将基于数据驱动的深度学习方法引入到结构光投影测量领域中,在相位计算精度^[170-171]、重建鲁棒性^[172-174]以及编码效率^[175-177]等方面取得了一系列的进展。传统的单帧变换和多帧相移方法最大的矛盾在于无法兼顾测量效率和测量精度,因此导致单帧测量方法中被测场景高频信息无法得到保留而多帧测量方法无法避免帧间运动误差。Feng 等^[170]在 2019 年提出了基于深度学习的单帧条纹分析方法,如图 23(a)所示,通过事先利用高步相移方法测量获取物体形貌真值与变形条纹图来构建数据集,然后通过两个卷积神经网络(CNN)依次提取条纹背景分量和正、余弦分量,再用反正切运算求解截断相位。实验结果证明,此方法的测量精度远优于传统单帧方法(包括 FTP 和 WFTP),能达传统十二步相移方法的测量精度。此方法解决了传统测量技术中相位提取精度和测量效率之间的矛盾性,因此,在高速高精度动态

测量中有着很好的应用场景。为了提升传统方法进行相位展开时的抗噪性能和鲁棒性,大量的基于深度学习的相位展开方法同时被提出^[174]。Wang 等^[178]通过数据集学习直接建立起了截断相位和展开相位之间的映射关系,完成了对网络未见过相位场的直接相位展开,如图 23(b)所示。Yin 等^[173]则在传统双频时间相位展开方法的基础上通过深度学习大幅度提升了对低频相位的重建质量,利用双频条纹完成了对频率为 64 的高频截断相位的鲁棒相位展开,如图 23(c)所示。深度学习在相位展开环节提升了测量的鲁棒性,为传统条纹投影技术测量复杂、高噪声动态场景带来了新的可能。最后,一部分学者利用网络强大的学习能力实现了单帧绝对测量。Nguyen 等^[175]直接绕过传统测量方法的中间数据处理流程,完成了从条纹到三维重建结果的端对端映射,如图 23(d)所示。Li 等^[176]则是利用三频复合条纹调制物体深度信息,通过改进的 U-Net 网络分别提取高低频相位,从而完成绝对相位展开。基于深度学习的单帧测量方法仅利用一帧条纹便

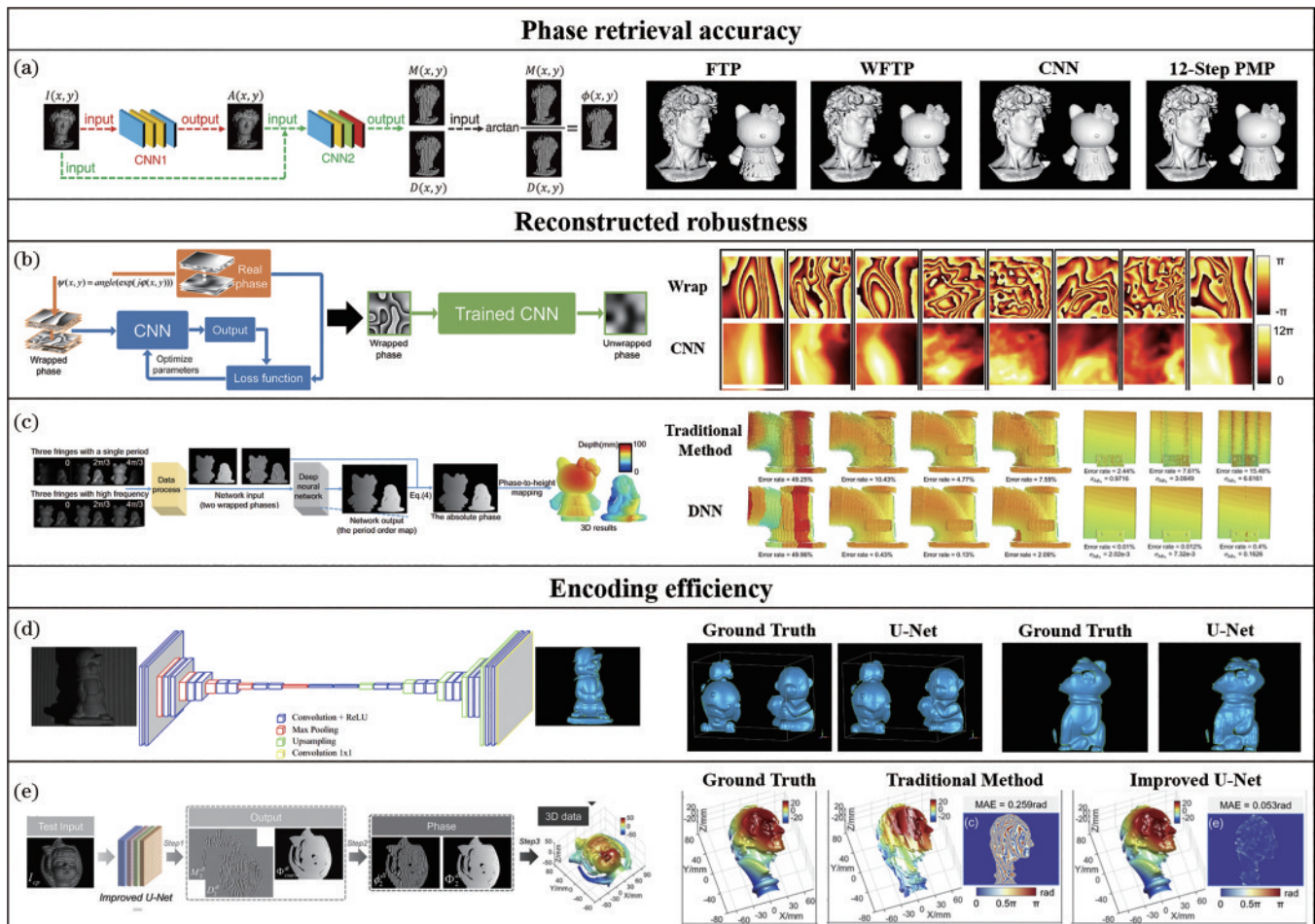


图 23 基于深度学习的条纹投影测量方法。(a) 单帧相位重建^[170]; (b) 一步相位展开^[178]; (c) 时间相位展开^[173]; (d) 端对端三维重建^[175]; (e) 单帧复合条纹三维重建^[176]

Fig. 23 Fringe projection measurement method based on deep learning. (a) Single frame phase reconstruction^[170]; (b) one-step phase unwrapping^[178]; (c) temporal phase unwrapping^[173]; (d) end-to-end 3D reconstruction^[175]; (e) single-frame composite fringe 3D reconstruction^[176]

可完成绝对测量,因此非常适用于瞬态场景下的动态测量。

利用基于深度学习的单帧条纹分析方法,Feng等^[43]进一步提出了基于深度学习的高速三维成像方法(μ DLP),该方法的原理如图 24(a)所示。网络的输入为 3 幅频率相近的高频条纹,网络输出为 3 幅条纹各自对应的正弦分量和余弦分量,通过反正切运算得到各

自截断相位后,再利用 μ FTP方法中的最小投影距离时间相位展开方法,可完成绝对测量。相比 μ FTP方法,此方法能够获得更高的相位重建精度,同时可以省去高频条纹间白场图片的投影,将重建效率提升 1 倍,进一步减小条纹帧间运动对相位展开成功率的影响,如图 24(b)和图 24(c)所示。此方法实现了帧率为 20000 frame/s 的动态三维重建。

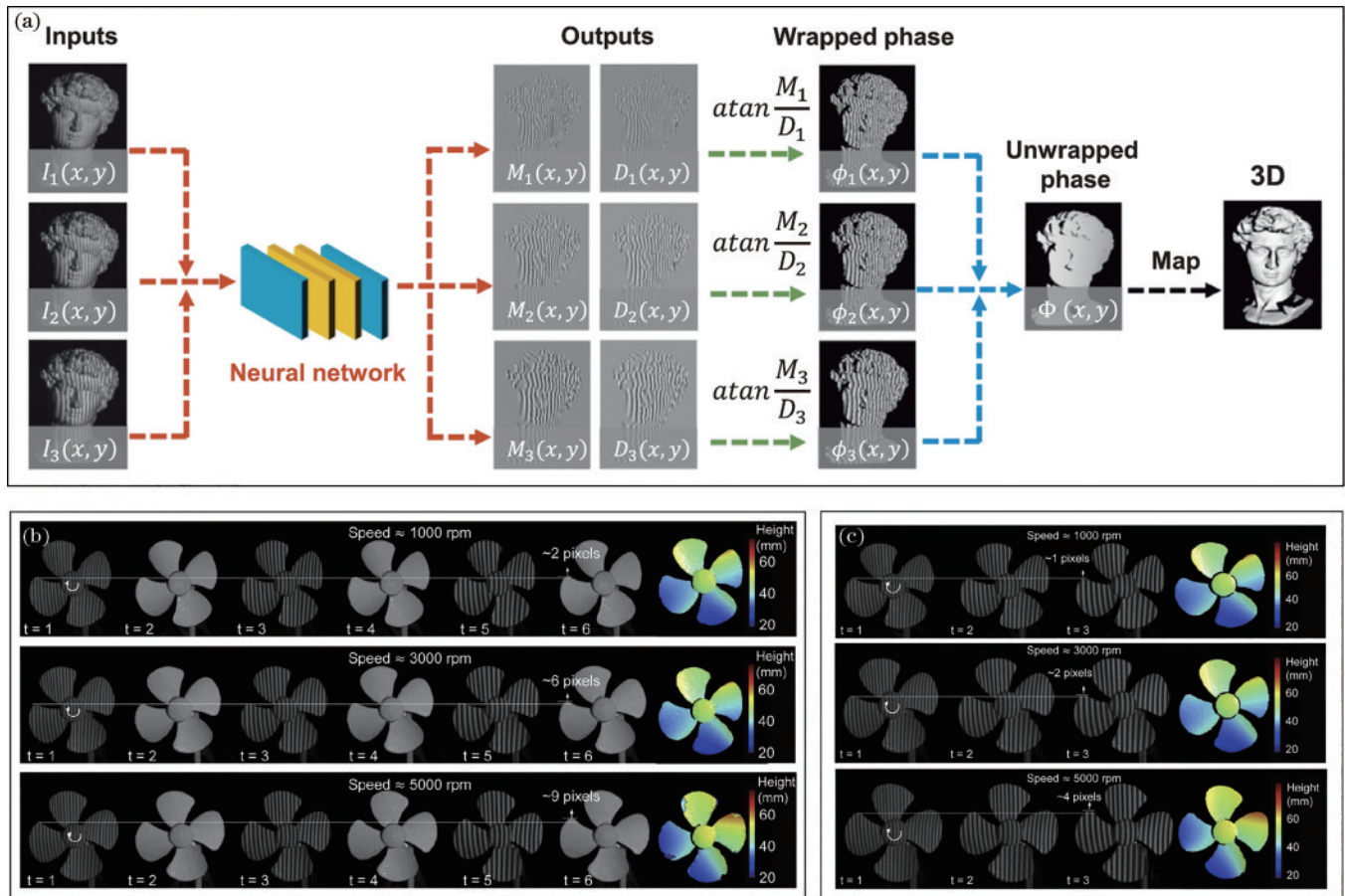


图 24 基于深度学习的高速三维形貌重建^[43]。(a) 方法流程;(b) 基于 μ FTP方法的拍摄条纹及重建结果;(c) 基于 μ DLP方法的拍摄条纹及重建结果

Fig. 24 High-speed 3D shape reconstruction based on deep learning^[43]. (a) Flow chart of the method; (b) captured fringes and reconstruction results based on μ FTP method; (c) captured fringes and reconstruction results based on μ DLP method

近年来,学者们利用深度学习在条纹投影三维重建上所做的尝试已经证明了深度学习作为一种强大的数据分析手段可以帮助传统方法打破其限制的结论,为高速三维测量取得进一步突破提供了新的思路。不过,在目前的研究当中,获取大量的实验训练数据集仍然是网络取得良好结果的先决条件。而高速测量应用场景往往面对的是冲击、碰撞等不可控、不可逆的瞬态过程,因此要想利用传统方法获得的高质量测量结果作为数据集中的真值是研究人员所面临的一大挑战。此外,对于光学测量领域来说,利用深度学习获取的测量结果的可信度也亟需澄清。所以,针对传统测量方法进一步发展样本量少、迁移性强的深度学习方法,同时给出测量结果可信度判断是学者们将持续关注的问题^[179]。

4 基于条纹投影的动态三维形貌测量技术比较

详细综述了基于条纹投影的高速器件和典型算法,为了进一步帮助读者了解各类方法的优缺点以及适用场景,将对涉及到的典型测量技术从每个投影序列投影图案数目、重建效率、抗噪性能、抗运动模糊能力、重建细节保留、硬件成本、计算代价及数据集收集 8 个方面进行横向比较,比较结果如表 1 所示,其中符号“勾”、“半勾”以及“叉”分别表示此项性能优秀、合格以及较差。

对于 FTP 方法,只需投影一帧图案即可完成重建,对投影设备要求低,同时不存在帧间运动模糊问

表 1 基于条纹投影的动态测量方法性能比较

Table 1 Performance comparisons of dynamic measurement methods based on fringe projection

Performance	FTP-based			PMP-based						Deep learning-based		
	FTP	TFTP	μ FTP	Stereo-matching	Two-frequency phase shifting		Gray code-assisted					
Pattern number in each projected sequence	1 ^[38]	N ($N > 4$) ^[94]	6 ^[39]	3 ^[137]	4 ^[138]	3+3 ^[40]	3+2 ^[153]	3+4 ^[158]	3+1 ^[157]	2+1 ^[167]	3 ^[43]	1 ^[175]
Reconstruction efficiency (Projected patterns: Restored result)	1:1	$N:N$	2:1	1:1	6:1	5:1	7:1	4:1	3:1	1:1		
Measuring accuracy	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Anti-noise ability	✓	✓	✓	✓	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓
Tolerance to motion	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Detail preservation	×	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Low hardware cost	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Low computational cost	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×
No dataset collection	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×

题,但由于空域滤波的存在,无法重建物体细节信息,因此FTP方法只适用于变化快速的平缓、连续表面的三维测量。

对于TFTP方法,需要投影一系列相移图案,在时间轴上构建正弦强度变化,并在每个像素进行独立变换求解,因此至少需要重复投影多幅相移的图案(满足时间轴上的采样量化频率),同时重建一幅图时需要使用到时间轴上的所有数据,但总体来看仍属于“单帧”重建方法。相比FTP方法,TFTP方法需要使用到投影图案切换装置,但可以完成空间陡变、不连续的表面的测量,因此TFTP方法适用于空间不连续但时间变化连续表面的高速测量。

对于 μ FTP方法,总共需要间隔投影3幅频率不同的条纹图案和白场图案来完成绝对相位恢复,因此相比FTP方法,此方法可以完成对孤立、飞散物体的测量,但采集效率会减半,同时会引入帧率运动误差。所以,此类方法适用于含有多个孤立物体的瞬态场景。

对于双目立体匹配算法,不需要额外投影条纹进行相位展开,因此在相移方法中具有最高的测量效率以及最优的抗运动模糊能力,但额外高速相机的引入会大大增加测量系统的成本。同时相比单目系统,双目匹配搜索算法会大大增加计算开销。因此,此方法适用于运动硬件设备速度低于测量场景速度的复杂场景。

对于双频相移方法,由于其在展开相位时会将噪声等干扰信号等比例放大,因此对噪声最为敏感,但相比其他两种基于相移的测量方法,其具有更高的条纹周期标记能力,可以获得更高的测量精度。所以,此方法适用于测量环境噪声较小但对测量精度要求较高的动态场景。

对于格雷码辅助测量方法,相比其他传统条纹投影测量方法,其具有最强的抗噪声能力,但由于在动态场景的测量中使用的时间复用格雷码策略会人为增加解码序列长度,因此会降低抗运动模糊能力。所以,此方法适用于测量设备速度高于被测场景速度,测量场景噪声较大的复杂动态场景。

对于基于深度学习的测量方法,大量数据集的学习使得网络具备了超越传统方法的编解码能力,因此其在测量效率、抗噪性能、抗运动模糊能力等方面具有优异表现,但代价是需要额外采集大量的数据集,同时付出额外的算力进行参数优化。所以,此方法适用于测量场景单一固定、测量硬件能力不足的情况。

5 发展趋势和面临的挑战

本文从硬件和算法两个方面概述了基于条纹投影的高速三维形貌测量技术的发展,回顾了不同技术方案的核心原理和研究进展,横向比较了现有典型测量方法的性能,指出了各自适用的应用场景。

从目前蓬勃发展的新兴产业——虚拟现实和增强现实领域中的三维数字建模,到关乎国家重大战略的领域——智能制造加工检测中的工件或试件三维形貌及形变检测,都存在对高速高鲁棒性动态三维形貌测量和形变、应变分析技术的应用需求。基于条纹投影的高速三维传感技术可以为其提供良好的解决方案,能够为我们运动的世界按下暂停键,让我们以更慢的速度和更多的维度去感知不停变化的世界,使我们能拍得更快、看得更真、分析得更透。但同时该技术仍面临着以下的挑战,将是该领域今后研究工作的方向和重点。

1) 如何进一步解决测量精度、速度以及深度之间

的矛盾性,实现高速、高精度、大景深三维形貌测量。在高速条纹投影测量中,离不开二值离焦技术的使用,但二值离焦技术的使用会引入高次谐波误差,导致测量精度下降,同时不同深度的离焦程度不一致也导致仅在有限的深度范围内才能产生高质量正弦条纹。因此传统动态测量方法无法同时兼顾测量精度、速度和深度。为了解决此矛盾,学者们从几个方面进

行考虑:优化选择频率^[180-181]、离焦程度^[182-183]等参数或者重新设计二值离焦投影图案^[184-186]来提高生成条纹的质量;建立误差补偿模型,通过补偿二值离焦误差来提升测量精度^[187-189];叠加使用 1-bit 条纹或者直接利用中间比特数(4 bit 或 6 bit)条纹进行投影^[190-191];更改硬件投影模式,如图 25 所示,从本质上消除有限景深的限制^[192-193]。

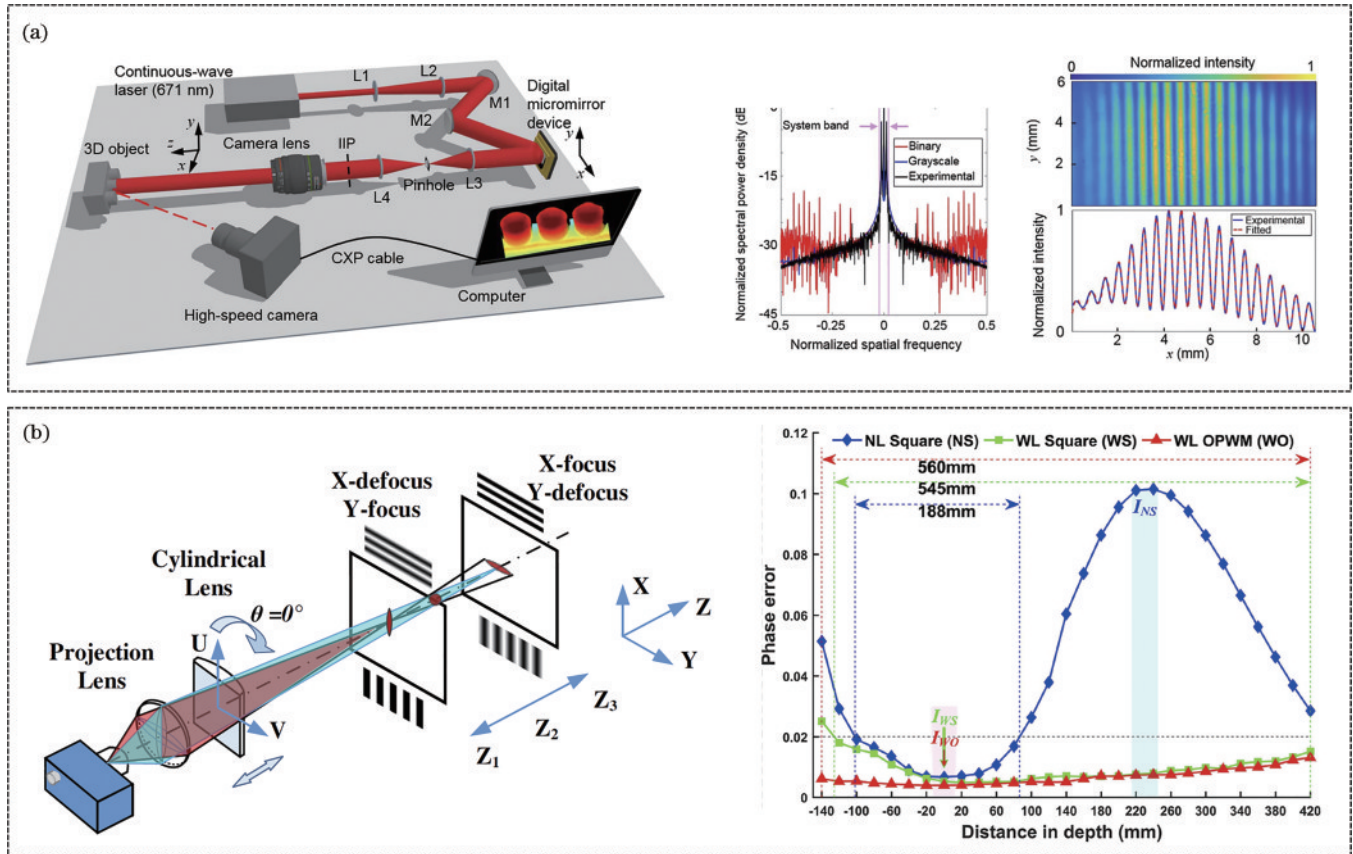


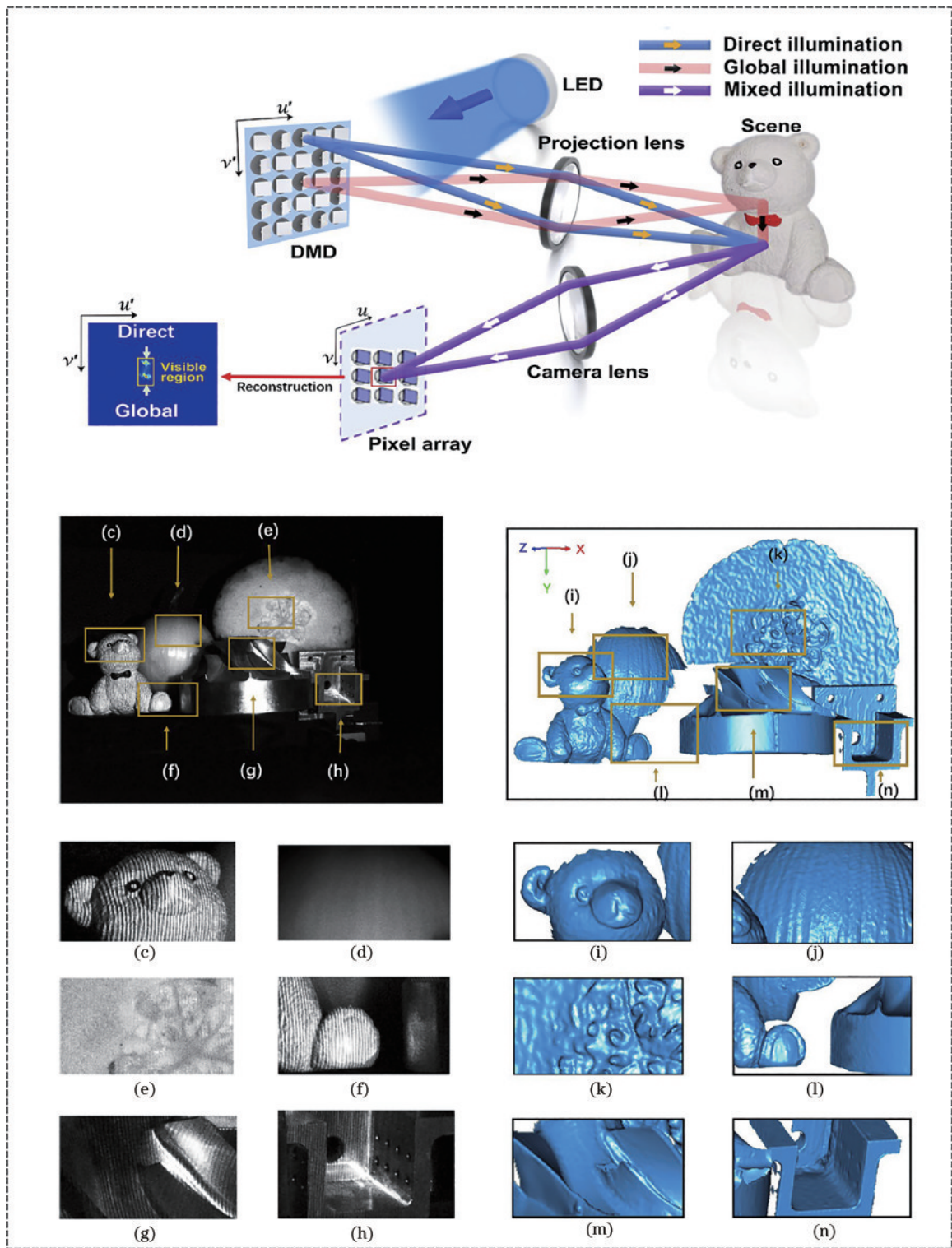
图 25 基于改进投影模式的大景深投影测量系统。(a) 带宽限制投影系统^[192]; (b) 多焦投影系统^[193]

Fig. 25 Large depth-of-field projection measurement systems based on improved projection mode. (a) Band-limited projection system^[192]; (b) multifocal projection system^[193]

2) 如何进一步扩展测量表面类型,解决测量效率和表面类型多样之间的不兼容性,实现高效高动态范围三维形貌测量。传统条纹投影方法适用于测量漫反射表面,但在实际应用需求中存在着高反射表面(金属)、次生反射表面(玉器)等特殊表面,传统方法难以完成测量。对于金属等高反射表面的测量,目前学者们通常利用偏振测量^[194]、HDR 技术^[195-196]、深度学习信号增强^[197-198]等手段进行恢复;针对瓷器、玉器等互反射、二次反射表面,微相移方法^[199]和如图 26 所示的并行单像素^[200]等方法也被陆续提出。已有方法大都需要以牺牲测量效率或者硬件成本为代价,今后如何兼顾测量效率和表面类型是值得学者们持续关注的问题。

3) 如何进一步提升测量维度,解决单套测量系

统在时间维、空间维(二维纹理、三维形貌)、光谱维度以及分析维度(温度、位移、形变、应变)的获取问题,实现多模态高维度信息传感。目前,对基于条纹投影的动态测量技术的研究大部分集中在对三维形貌信息的恢复提取上,但在实际需求中,希望获取更多维度的信息帮助分析物体成分以及运动状态等信息。通过引入高光谱相机、热红外相机,Heist 等^[142-143]实现了 3D 形状与光谱特征或温度场的同时提取,为医学成像和运动分析提供了新的手段。通过引入数字图像相关形变分析方法,本课题组完成了对具有蜂窝结构、编织结构以及层叠结构等的复杂构件的形貌和形变测量以及应变分析,如图 27 所示,所提出的方法为材料力学、结构力学以及仿生学提供了新的分析手段^[201-202]。

图 26 并行单像素三维测量系统^[200]Fig. 26 Parallel single pixel 3D measurement system^[200]

经过多年的发展,基于条纹投影的高速三维测量技术已经在如何提升三维成像速度和如何适应复杂测量环境两方面取得了重要进展,发展出了一系列具备明显的高速高鲁棒性特性、能用于复杂动态场景的高速度、高效率三维重建手段和方法,有力拓展了三

维测量的应用领域和对象,能满足制造业变革和国防装备性能测试中对复杂面形进行动态形变检测的应用需求。未来,新技术的出现和引入将会进一步拓展测量方法的边界,使得这项技术得到进一步的发展和运用。

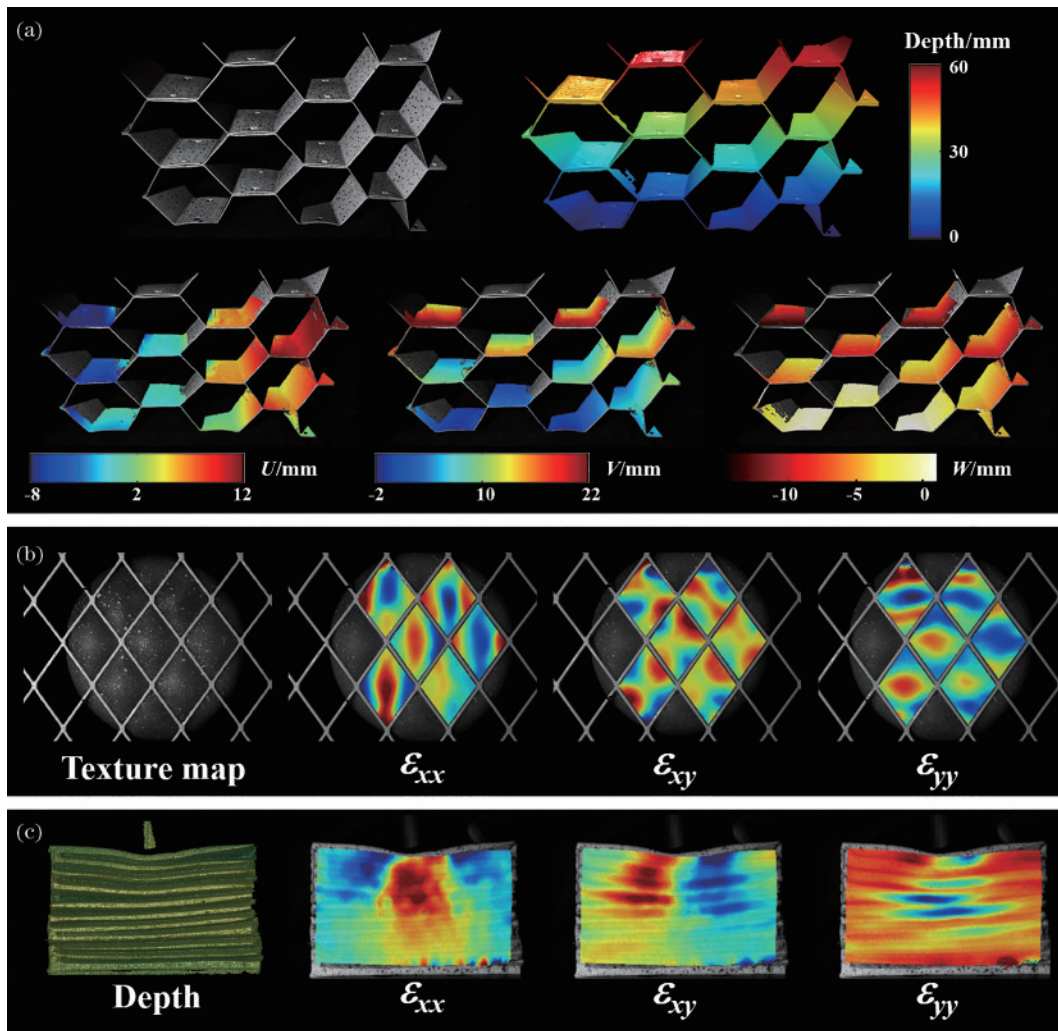


图 27 基于条纹投影测量系统的三维形变测量及应变分析结果。(a) 蜂窝结构^[202]; (b) 多区域变形结构; (c) 层叠结构
Fig. 27 Results of three-dimensional deformation measurement and strain analysis based on fringe projection measurement system.
(a) Honeycomb structure^[202]; (b) multi-zone deformed structure; (c) laminated structure

参 考 文 献

- [1] Zhong R Y, Xu X, Klotz E, et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review[J]. Engineering, 2017, 3(5): 616-630.
- [2] 金国藩, 李景镇. 激光计量学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
Jin G P, Li J Z. Laser metrology [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [3] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Zhang G J. Vision measurement[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [4] 苏显渝, 李继陶, 曹益平, 等. 信息光学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2011.
Su X Y, Li J T, Cao Y P, et al. Information optics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2011.
- [5] Harding K G. Handbook of optical dimensional metrology [M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [6] Chen F, Brown G M, Song M M. Overview of 3-D shape measurement using optical methods[J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 10-22.
- [7] Malamas E N, Petrakis E G M, Zervakis M, et al. A survey on industrial vision systems, applications and tools [J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(2): 171-188.
- [8] Ford K R, Myer G D, Hewett T E. Reliability of landing 3D motion analysis: implications for longitudinal analyses[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 2007, 39(11): 2021-2028.
- [9] Lambers K, Remondino F. Optical 3D measurement techniques in archaeology: recent developments and applications[C]//The Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), April 2-6, 2007, Berlin, Germany. [S.l.: s.n.], 2007.
- [10] Salvi J, Pagès J, Batlle J. Pattern codification strategies in structured light systems[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(4): 827-849.
- [11] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 133-140.
- [12] Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial[J]. Advances in Optics and Photonics, 2011, 3(2): 128-160.
- [13] Xu J, Zhang S. Status, challenges, and future

- perspectives of fringe projection profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 135: 106193.
- [14] Marrugo A G, Gao F, Zhang S. State-of-the-art active optical techniques for three-dimensional surface metrology: a review[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2020, 37(9): B60-B77.
- [15] Apple[EB/OL]. [2022-10-08]. <https://www.apple.com.cn>.
- [16] Bevel turns your smartphone into a 3D camera [EB/OL]. [2022-10-08]. <https://www.kickstarter.com/projects/matterandform/bevel-3d-photography-for-any-smartphone-or-tablet>.
- [17] Wu Z J, Chang M, Shi B W, et al. 3D shape measurement system developed on mobile platform[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10250: 1025015.
- [18] Catalyst-Single camera real-time tracking system[EB/OL]. <https://c-rad.se/catalyst>. 2016.
- [19] ZEISS COMET for measurements in the production area [EB/OL]. [2022-10-08]. https://www.zeiss.com.cn/gongyeceliang/_successstories/basdorf.html.
- [20] 郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(8): 0800001.
Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(8): 0800001.
- [21] Baqersad J, Poozesh P, Niezrecki C, et al. Photogrammetry and optical methods in structural dynamics: a review[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 86: 17-34.
- [22] Everton S K, Hirsch M, Stravroulakis P, et al. Review of *in situ* process monitoring and *in situ* metrology for metal additive manufacturing[J]. *Materials & Design*, 2016, 95: 431-445.
- [23] Zhou J, Li P G, Zhou Y H, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing[J]. *Engineering*, 2018, 4(1): 11-20.
- [24] Leach R K, Bourell D, Carmignato S, et al. Geometrical metrology for metal additive manufacturing[J]. *CIRP Annals*, 2019, 68(2): 677-700.
- [25] Kelkar P U, Kim H S, Cho K H, et al. Cellular auxetic structures for mechanical metamaterials: a review[J]. *Sensors*, 2020, 20(11): 3132.
- [26] Zhang Z K, Wen Q G, Li P J, et al. Application of double arrowhead auxetic honeycomb structure in displacement measurement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 333: 113218.
- [27] Carr J, Baqersad J, Niezrecki C, et al. Full-field dynamic strain on wind turbine blade using digital image correlation techniques and limited sets of measured data from photogrammetric targets[J]. *Experimental Techniques*, 2016, 40(2): 819-831.
- [28] Young J, Walker S M, Bomphrey R J, et al. Details of insect wing design and deformation enhance aerodynamic function and flight efficiency[J]. *Science*, 2009, 325 (5947): 1549-1552.
- [29] Fabian J, Siwanowicz I, Uhrhan M, et al. Systematic characterization of wing mechanosensors that monitor airflow and wing deformations[J]. *iScience*, 2022, 25(4): 104150.
- [30] Li Q Q, Wu L J, Hu L, et al. Axial compression performance of a bamboo-inspired porous lattice structure [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 180: 109803.
- [31] Heim F M, Daspit J T, Holzmond O B, et al. Analysis of tow architecture variability in biaxially braided composite tubes[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 190: 107938.
- [32] Neri P, Paoli A, Razonale A V, et al. Low-speed cameras system for 3D-DIC vibration measurements in the kHz range[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 162: 108040.
- [33] Steel W H, Knight P. *Interferometry*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- [34] Creath K. *V phase-measurement interferometry techniques* [M]//*Progress in optics*. Amsterdam: Elsevier, 1988: 349-393.
- [35] Heist S, Mann A, Kühmstedt P, et al. Array projection of aperiodic sinusoidal fringes for high-speed three-dimensional shape measurement[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(11): 112208.
- [36] Wissmann P, Schmitt R. *Hand guided 3-D scanning*[R]. Aachen: Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement, 2014.
- [37] Zhang Q C, Huang L, Chin Y W, et al. 4D metrology of flapping-wing micro air vehicle based on fringe projection [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8769: 87692Y.
- [38] Zhang Q C, Su X Y. High-speed optical measurement for the drumhead vibration[J]. *Optics Express*, 2005, 13 (8): 3110-3116.
- [39] Zuo C, Tao T Y, Feng S J, et al. Micro Fourier Transform Profilometry (μ FTP): 3D shape measurement at 10, 000 frames per second[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 102: 70-91.
- [40] Wang Y J, Laughner J I, Efimov I R, et al. 3D absolute shape measurement of live rabbit hearts with a superfast two-frequency phase-shifting technique[J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5822-5832.
- [41] Heist S, Lutzke P, Schmidt I, et al. High-speed three-dimensional shape measurement using GOBO projection [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 87: 90-96.
- [42] Wu Z J, Guo W B, Zhang Q C. High-speed three-dimensional shape measurement based on shifting Gray-code light[J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 22631-22644.
- [43] Feng S J, Zuo C, Yin W, et al. Micro deep learning profilometry for high-speed 3D surface imaging[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 121: 416-427.
- [44] Nguyen H, Dunne N, Li H, et al. Real-time 3D shape measurement using 3LCD projection and deep machine learning[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(26): 7100-7109.
- [45] Qian J M, Feng S J, Li Y X, et al. Single-shot absolute 3D shape measurement with deep-learning-based color fringe projection profilometry[J]. *Optics Letters*, 2020,

- 45(7): 1842-1845.
- [46] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 109: 23-59.
- [47] Su X Y, Zhang Q C. Dynamic 3-D shape measurement method: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 191-204.
- [48] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 106: 119-131.
- [49] Kondo Y, Takubo K, Tominaga H, et al. Development of “hypervision HPV-X” high-speed video camera[J]. *Shimadzu Review*, 2012, 69: 285-91.
- [50] Liang J Y, Wang L V. Single-shot ultrafast optical imaging[J]. *Optica*, 2018, 5(9): 1113-1127.
- [51] Qi D L, Zhang S A, Yang C S, et al. Single-shot compressed ultrafast photography: a review[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(1): 014003.
- [52] Kakue T, Yonesaka R, Tahara T, et al. High-speed phase imaging by parallel phase-shifting digital holography [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(21): 4131-4133.
- [53] Matlis N H, Axley A, Leemans W P. Single-shot ultrafast tomographic imaging by spectral multiplexing[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1): 1-8.
- [54] Gao L, Liang J Y, Li C Y, et al. Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second[J]. *Nature*, 2014, 516(7529): 74-77.
- [55] Mochizuki F, Kagawa K, Okihara S I, et al. Single-event transient imaging with an ultra-high-speed temporally compressive multi-aperture CMOS image sensor[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 4155-4176.
- [56] Muybridge J. The horse in motion[J]. *Nature*, 1882, 25 (652): 605.
- [57] Wang X F, Yan L H, Si J H, et al. High-frame-rate observation of single femtosecond laser pulse propagation in fused silica using an echelon and optical polarigraphy technique[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(36): 8395-8399.
- [58] Li Z Y, Zgadzaj R, Wang X M, et al. Single-shot tomographic movies of evolving light-velocity objects[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1-12.
- [59] Nakagawa K, Iwasaki A, Oishi Y, et al. Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP) [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(9): 695-700.
- [60] Ehn A, Bood J, Li Z M, et al. FRAME: femtosecond videography for atomic and molecular dynamics[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(9): e17045.
- [61] Fujimoto Y, Sawabe T, Kanbara M, et al. Structured light of flickering patterns having different frequencies for a projector-event-camera system[C]//2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), March 12-16, 2022, Christchurch, New Zealand. New York: IEEE Press, 2022: 582-588.
- [62] Sundar V, Ma S Z, Sankaranarayanan A C, et al. Single-photon structured light[C]//2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 18-24, 2022, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE Press, 2022: 17844-17854.
- [63] Jiang W J, Yin Y K, Jiao J P, et al. 2, 000, 000 fps 2D and 3D imaging of periodic or reproducible scenes with single-pixel detectors[J]. *Photonics Research*, 2022, 10 (9): 2157-2164.
- [64] Gallego G, Delbrück T, Orchard G, et al. Event-based vision: a survey[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2020, 44(1): 154-180.
- [65] Mangalore A R, Seelamantula C S, Thakur C S. Neuromorphic fringe projection profilometry[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2020, 27: 1510-1514.
- [66] Huang X Y, Zhang Y Y, Xiong Z W. High-speed structured light based 3D scanning using an event camera [J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 35864-35876.
- [67] Muglikar M, Gallego G, Scaramuzza D. ESL: event-based structured light[C]//2021 International Conference on 3D Vision (3DV), December 1-3, 2021, London, United Kingdom. New York: IEEE Press, 2022: 1165-1174.
- [68] Takhar D, Laska J N, Wakin M B, et al. A new compressive imaging camera architecture using optical-domain compression[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6065: 606509.
- [69] Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053840.
- [70] Edgar M P, Gibson G M, Padgett M J. Principles and prospects for single-pixel imaging[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(1): 13-20.
- [71] Gibson G M, Johnson S D, Padgett M J. Single-pixel imaging 12 years on: a review[J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 28190-28208.
- [72] Hahamovich E, Monin S, Hazan Y, et al. Single pixel imaging at megahertz switching rates via cyclic Hadamard masks[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1-6.
- [73] Kilcullen P, Ozaki T, Liang J Y. Compressed ultrahigh-speed single-pixel imaging by swept aggregate patterns [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1-10.
- [74] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors[J]. *Science*, 2013, 340(6134): 844-847.
- [75] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12010.
- [76] Zhang Z B, Zhong J G. Three-dimensional single-pixel imaging with far fewer measurements than effective image pixels[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2497-2500.
- [77] Kilcullen P, Jiang C, Ozaki T, et al. Camera-free three-dimensional dual photography[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29377-29389.
- [78] Ma Y Y, Yin Y K, Jiang S, et al. Single pixel 3D imaging with phase-shifting fringe projection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 140: 106532.
- [79] Sun M J, Zhang J M. Single-pixel imaging and its application in three-dimensional reconstruction: a brief review[J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 732.
- [80] Gibson G M, Sun B Q, Edgar M P, et al. Real-time

- imaging of methane gas leaks using a single-pixel camera [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 2998-3005.
- [81] Shrekenhamer D, Watts C M, Padilla W J. Terahertz single pixel imaging with an optically controlled dynamic spatial light modulator[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12507-12518.
- [82] Watts C M, Shrekenhamer D, Montoya J, et al. Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8): 605-609.
- [83] She R B, Liu W Q, Lu Y F, et al. Fourier single-pixel imaging in the terahertz regime[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(2): 021101.
- [84] Schori A, Shwartz S. X-ray ghost imaging with a laboratory source[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14822-14828.
- [85] Smith T A, Shih Y, Wang Z H, et al. From optical to X-ray ghost imaging[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 935: 173-177.
- [86] Olbinado M P, Paganin D M, Cheng Y, et al. Phase-sensitive X-ray ghost imaging[EB/OL]. (2019-03-20) [2022-10-08]. <https://arxiv.org/abs/1903.08345>.
- [87] Dudley D, Duncan W M, Slaughter J. Emerging digital micromirror device (DMD) applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4985: 14-25.
- [88] Lei S Y, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [89] Liu Y H, Zhang Q C, Zhang H H, et al. Improve temporal Fourier transform profilometry for complex dynamic three-dimensional shape measurement[J]. *Sensors*, 2020, 20(7): 1808.
- [90] Teng J J, Guo Q, Chen M H, et al. Time-encoded single-pixel 3D imaging[J]. *APL Photonics*, 2020, 5(2): 020801.
- [91] Wissmann P, Forster F, Schmitt R. Fast and low-cost structured light pattern sequence projection[J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 24657-24671.
- [92] Wissmann P, Schmitt R. Hand guided 3-D scanning[D]. Aachen: Hochschulbibliothek der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2014.
- [93] Hyun J S, Chiu G T C, Zhang S. High-speed and high-accuracy 3D surface measurement using a mechanical projector[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1474-1487.
- [94] Zhang H H, Zhang Q C, Li Y, et al. High speed 3D shape measurement with temporal Fourier transform profilometry[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(19): 4123.
- [95] Heist S, Dietrich P, Landmann M, et al. GOBO projection for 3D measurements at highest frame rates: a performance analysis[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(1): 1-13.
- [96] Goda K, Tsia K K, Jalali B. Serial time-encoded amplified imaging for real-time observation of fast dynamic phenomena[J]. *Nature*, 2009, 458(7242): 1145-1149.
- [97] Chan A C S, Lau A K S, Wong K K Y, et al. Arbitrary two-dimensional spectrally encoded pattern generation: a new strategy for high-speed patterned illumination imaging[J]. *Optica*, 2015, 2(12): 1037-1044.
- [98] Lei C, Guo B S, Cheng Z Z, et al. Optical time-stretch imaging: principles and applications[J]. *Applied Physics Reviews*, 2016, 3(1): 011102.
- [99] Pagès J, Salvi J, Collewet C, et al. Optimized De Bruijn patterns for one-shot shape acquisition[J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23(8): 707-720.
- [100] Morita H, Yajima K, Sakata S. Reconstruction of surfaces of 3-D objects by M-array pattern projection method[C]//Second International Conference on Computer Vision, December 5-8, 1988, Tampa, FL, USA. New York: IEEE Press, 2002: 468-473.
- [101] Zhou P, Zhu J P, Jing H L. Optical 3-D surface reconstruction with color binary speckle pattern encoding [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 3452-3465.
- [102] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, 72(1): 156-160.
- [103] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 3977.
- [104] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 35(5): 263-284.
- [105] Qian K M. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(13): 2695-2702.
- [106] Qian K M. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: principles, applications and implementations[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(2): 304-317.
- [107] Sandoz P. Wavelet transform as a processing tool in white-light interferometry[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(14): 1065-1067.
- [108] Zhong J G, Weng J W. Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform: wavelet transform profilometry[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(26): 4993-4998.
- [109] Lei H, Qian K M, Bing P, et al. Comparison of Fourier transform, windowed Fourier transform, and wavelet transform methods for phase extraction from a single fringe pattern in fringe projection profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 141-148.
- [110] Hong N, Tang C, Xu M, et al. Phase retrieval for objects in rain based on a combination of variational image decomposition and variational mode decomposition in FPP[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(23): 6704-6713.
- [111] Zhou X, Podoleanu A G, Yang Z Q, et al. Morphological operation-based bi-dimensional empirical mode decomposition for automatic background removal of fringe patterns[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24247-24262.
- [112] Gocłowski P, Cywińska M, Ahmad A, et al. Single-shot fringe pattern phase retrieval using improved period-

- guided bidimensional empirical mode decomposition and Hilbert transform[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 31632-31649.
- [113] Zhao Q, Tang C, Min X, et al. Dynamic shape measurement for objects with patterns by Fourier fringe projection profilometry based on variational decomposition and multi-scale Retinex[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(33): 10322-10331.
- [114] 朱新军, 邓耀辉, 唐晨, 等. 条纹投影三维形貌测量的变分模态分解相位提取[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9): 2318-2324.
Zhu X J, Deng Y H, Tang C, et al. Variational mode decomposition for phase retrieval in fringe projection 3D shape measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(9): 2318-2324.
- [115] Feng Y F, Han Y, Zhang Q C. Two 3D spatial phase unwrapping algorithms for dynamic 3D shape measurement[J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67(19): 1479-1491.
- [116] Zhang Q C, Su X Y. An optical measurement of vortex shape at a free surface[J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, 34(2): 107-113.
- [117] Zhang Q C, Liu Y K, Lehtonen P. Shape measurement and vibration analysis of moving speaker cone[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9234: 92340T.
- [118] 张启灿. 动态过程三维面形测量技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
Zhang Q C. Technical study of three-dimensional shape measurement for dynamic process[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [119] Zhang Q C, Su X Y, Cao Y P, et al. Optical 3-D shape and deformation measurement of rotating blades using stroboscopic structured illumination[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(11): 113601.
- [120] Su X Y, Li J, Guo L R, et al. An improved Fourier transform profilometry[J]. *Proceedings of SPIE*, 1989, 0954: 241-245.
- [121] Guo H, Huang P S. 3-D shape measurement by use of a modified Fourier transform method[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7066: 70660E.
- [122] Li J L, Gao X R, Wang Z Y, et al. Three dimensional detection of rail shape based on self-adaptive filtering[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9282: 928211.
- [123] Li C M, Cao Y P, Wang L, et al. Real-time computer-generated moiré profilometry with adaptive filtering algorithm[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(3): 034102.
- [124] 张海花, 李勇, 张启灿. 基于旋转光栅投影的动态三维面形测量方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(23): 2312005.
Zhang H H, Li Y, Zhang Q C. Dynamic 3D shape measurement based on rotating grating projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(23): 2312005.
- [125] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18): 3105.
- [126] Halioua M, Liu H C. Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1989, 11(3): 185-215.
- [127] Zhang S, Huang P S. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(12): 123601.
- [128] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 149-158.
- [129] van der Jeught S, Dirckx J J J. Real-time structured light profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 87: 18-31.
- [130] Liu K, Wang Y C, Lau D L, et al. Dual-frequency pattern scheme for high-speed 3-D shape measurement[J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 5229-5244.
- [131] Zuo C, Chen Q, Gu G H, et al. High-speed three-dimensional profilometry for multiple objects with complex shapes[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19493-19510.
- [132] Nguyen H, Nguyen D, Wang Z Y, et al. Real-time, high-accuracy 3D imaging and shape measurement[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(1): A9-A17.
- [133] Qian J M, Feng S J, Tao T Y, et al. High-resolution real-time 360° 3D model reconstruction of a handheld object with fringe projection profilometry[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(23): 5751-5754.
- [134] Liu K, Hua W Q, Wei J H, et al. Divide and conquer: high-accuracy and real-time 3D reconstruction of static objects using multiple-phase-shifted structured light illumination[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6995-7007.
- [135] Guo W B, Wu Z J, Li Y Y, et al. Real-time 3D shape measurement with dual-frequency composite grating and motion-induced error reduction[J]. *Optics Express*, 2020, 28(18): 26882-26897.
- [136] Bouguet J. The calibration toolbox for Matlab, example 5: stereo rectification algorithm[EB/OL]. [2022-10-09]. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/htmls/example5.html.
- [137] Jiang C, Kilcullen P, Lai Y, et al. High-speed dual-view band-limited illumination profilometry using temporally interlaced acquisition [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(11): 1808-1817.
- [138] Yin W, Feng S J, Tao T Y, et al. High-speed 3D shape measurement using the optimized composite fringe patterns and stereo-assisted structured light system[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2411-2431.
- [139] Young M, Beeson E, Davis J, et al. Viewpoint-coded structured light[C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-22, 2007, Minneapolis, MN, USA. New York: IEEE Press, 2007.
- [140] Ishiyama R, Sakamoto S, Tajima J, et al. Absolute phase measurements using geometric constraints between multiple cameras and projectors[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(17): 3528-3538.
- [141] Bräuer-Burchardt C, Munkelt C, Heinze M, et al. Phase unwrapping in fringe projection systems using epipolar geometry[M]//Blanc-Talon J, Bourennane S, Philips W, et al. International conference on advanced concepts for intelligent vision systems. Lecture notes in computer science. Heidelberg: Springer, 2008, 5259: 422-432.
- [142] Heist S, Zhang C, Reichwald K, et al. 5D hyperspectral

- imaging: fast and accurate measurement of surface shape and spectral characteristics using structured light[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 23366-23379.
- [143] Landmann M, Heist S, Dietrich P, et al. High-speed 3D thermography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 121: 448-455.
- [144] Zuo C, Huang L, Zhang M L, et al. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 85: 84-103.
- [145] 张启灿, 吴周杰. 基于格雷码图案投影的结构光三维成像技术[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303004.
Zhang Q C, Wu Z J. Three-dimensional imaging technique based on Gray-coded structured illumination[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303004.
- [146] Huntley J M, Saldner H. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. Applied Optics, 1993, 32(17): 3047-3052.
- [147] Saldner H O, Huntley J M. Temporal phase unwrapping: application to surface profiling of discontinuous objects[J]. Applied Optics, 1997, 36(13): 2770-2775.
- [148] Cheng Y Y, Wyant J C. Two-wavelength phase shifting interferometry[J]. Applied Optics, 1984, 23(24): 4539-4543.
- [149] Cheng Y Y, Wyant J C. Multiple-wavelength phase-shifting interferometry[J]. Applied Optics, 1985, 24(6): 804.
- [150] Gushov V I, Solodkin Y N. Automatic processing of fringe patterns in integer interferometers[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1991, 14(4/5): 311-324.
- [151] Zhong J G, Wang M. Phase unwrapping by lookup table method: application to phase map with singular points[J]. Optical Engineering, 1999, 38(12): 2075-2080.
- [152] Wang Y J, Zhang S. Superfast multifrequency phase-shifting technique with optimal pulse width modulation [J]. Optics Express, 2011, 19(6): 5149-5155.
- [153] Zuo C, Chen Q, Gu G H, et al. High-speed three-dimensional shape measurement for dynamic scenes using bi-frequency tripolar pulse-width-modulation fringe projection [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(8): 953-960.
- [154] Jiang C, Kilcullen P, Lai Y M, et al. Multi-scale band-limited illumination profilometry for robust three-dimensional surface imaging at video rate[J]. Optics Express, 2022, 30(11): 19824-19838.
- [155] Gray F. Pulse code communication: US 2632058A[P]. 1953-03-17.
- [156] Zhang Q C, Su X Y, Xiang L Q, et al. 3-D shape measurement based on complementary Gray-code light [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(4): 574-579.
- [157] Wu Z J, Guo W B, Li Y Y, et al. High-speed and high-efficiency three-dimensional shape measurement based on Gray-coded light[J]. Photonics Research, 2020, 8(6): 819-829.
- [158] Zheng D L, Da F P, Qian K M, et al. Phase-shifting profilometry combined with Gray-code patterns projection: unwrapping error removal by an adaptive median filter[J]. Optics Express, 2017, 25(5): 4700-4713.
- [159] Zhang S. Flexible 3D shape measurement using projector defocusing: extended measurement range[J]. Optics Letters, 2010, 35(7): 934-936.
- [160] Huang L, Asundi A K. Phase invalidity identification framework with the temporal phase unwrapping method [J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(3): 035304.
- [161] Feng S J, Chen Q, Zuo C, et al. Automatic identification and removal of outliers for high-speed fringe projection profilometry[J]. Optical Engineering, 2013, 52(1): 013605.
- [162] Zhang Y W, Tong J, Lu L, et al. Fringe order correction for fringe projection profilometry based on robust principal component analysis[J]. IEEE Access, 2021, 9: 23110-23119.
- [163] Wu Z J, Guo W B, Lu L L, et al. Generalized phase unwrapping method that avoids jump errors for fringe projection profilometry[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 27181-27192.
- [164] Zheng D L, Qian K M, Da F P, et al. Ternary Gray code-based phase unwrapping for 3D measurement using binary patterns with projector defocusing[J]. Applied Optics, 2017, 56(13): 3660-3665.
- [165] He X, Zheng D, Kemao Q, et al. Quaternary Gray-code phase unwrapping for binary fringe projection profilometry [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 121: 358-368.
- [166] Wu Z J, Zuo C, Guo W B, et al. High-speed three-dimensional shape measurement based on cyclic complementary Gray-code light[J]. Optics Express, 2019, 27(2): 1283-1297.
- [167] Wu Z J, Guo W B, Zhang Q C, et al. Time-overlapping structured-light projection: high performance on 3D shape measurement for complex dynamic scenes[J]. Optics Express, 2022, 30(13): 22467-22486.
- [168] Wu Z J, Guo W B, Zhang Q C. Two-frequency phase-shifting method vs. Gray-coded-based method in dynamic fringe projection profilometry: a comparative review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 153: 106995.
- [169] Zuo C, Qian J M, Feng S J, et al. Deep learning in optical metrology: a review[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(1): 1-54.
- [170] Feng S J, Chen Q, Gu G H, et al. Fringe pattern analysis using deep learning[J]. Advanced Photonics, 2019, 1(2): 025001.
- [171] Song J W, Liu K, Sowmya A, et al. Super-resolution phase retrieval network for single-pattern structured light 3D imaging[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2022, 32: 537-549.
- [172] Spoorthi G E, Gorthi R K S S, Gorthi S. PhaseNet 2.0: phase unwrapping of noisy data based on deep learning approach[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 4862-4872.
- [173] Yin W, Chen Q, Feng S J, et al. Temporal phase unwrapping using deep learning[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-12.
- [174] Wang K Q, Qian K M, Di J L, et al. Deep learning

- spatial phase unwrapping: a comparative review[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2022, 1(1): 014001.
- [175] Nguyen H, Wang Y Z, Wang Z Y. Single-shot 3D shape reconstruction using structured light and deep convolutional neural networks[J]. *Sensors*, 2020, 20(13): 3718.
- [176] Li Y X, Qian J M, Feng S J, et al. Composite fringe projection deep learning profilometry for single-shot absolute 3D shape measurement[J]. *Optics Express*, 2022, 30(3): 3424-3442.
- [177] Yu H T, Chen X Y, Zhang Z, et al. Dynamic 3-D measurement based on fringe-to-fringe transformation using deep learning[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9405-9418.
- [178] Wang K Q, Li Y, Qian K M, et al. One-step robust deep learning phase unwrapping[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 15100-15115.
- [179] Feng S J, Zuo C, Hu Y, et al. Deep-learning-based fringe-pattern analysis with uncertainty estimation[J]. *Optica*, 2021, 8(12): 1507-1510.
- [180] Zhang J, Luo B, Su X, et al. Depth range enhancement of binary defocusing technique based on multi-frequency phase merging[J]. *Optics Express*, 2019, 27(25): 36717-36730.
- [181] Hu Y, Liu Z, Yang D Z, et al. Online fringe pitch selection for defocusing a binary square pattern projection phase-shifting method[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 30710-30725.
- [182] Han B B, Yang S R, Chen S Y. Determination and adjustment of optimal defocus level for fringe projection systems[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(23): 6300-6307.
- [183] Wang Y F, Zhao H J, Jiang H Z, et al. Defocusing parameter selection strategies based on PSF measurement for square-binary defocusing fringe projection profilometry [J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20351-20367.
- [184] Sun J S, Zuo C, Feng S J, et al. Improved intensity-optimized dithering technique for 3D shape measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 66: 158-164.
- [185] Lu F, Wu C D, Yang J K. Optimized dithering technique for three-dimensional shape measurement with projector defocusing[J]. *Optics Communications*, 2019, 430: 246-255.
- [186] Zhu S J, Cao Y P, Zhang Q C, et al. High-efficiency and robust binary fringe optimization for superfast 3D shape measurement[J]. *Optics Express*, 2022, 30(20): 35539-35553.
- [187] Xu Y, Ekstrand L, Dai J F, et al. Phase error compensation for three-dimensional shape measurement with projector defocusing[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(17): 2572-2581.
- [188] Zheng D L, Da F P, Qian K M, et al. Phase error analysis and compensation for phase shifting profilometry with projector defocusing[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(21): 5721-5728.
- [189] Zhang J R, Zhang Y J, Chen B, et al. Full-field phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase shifting profilometry with projector defocusing[J]. *Optics Communications*, 2019, 430: 467-478.
- [190] Zhu J P, Zhou P, Su X Y, et al. Accurate and fast 3D surface measurement with temporal-spatial binary encoding structured illumination[J]. *Optics Express*, 2016, 24(25): 28549-28560.
- [191] 李训仁, 郭文博, 张启灿, 等. DLP投影任意比特数条纹实现三维面形测量[J]. *光学学报*, 2023, 43(7): 0712003.
Li X R, Guo W B, Zhang Q C, et al. Three-dimensional shape measurement by projecting arbitrary-bit fringe using DLP projector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(7): 0712003.
- [192] Jiang C, Kilcullen P, Liu X L, et al. Real-time high-speed three-dimensional surface imaging using band-limited illumination profilometry with a CoaXPress interface[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(4): 964-967.
- [193] Zhu S J, Wu Z J, Zhang J, et al. Superfast and large-depth-range sinusoidal fringe generation for multi-dimensional information sensing[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(11): 2590-2598.
- [194] Salahieh B, Chen Z Y, Rodriguez J J, et al. Multi-polarization fringe projection imaging for high dynamic range objects[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 10064-10071.
- [195] Zhang S, Yau S T. High dynamic range scanning technique[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(3): 033604.
- [196] Ekstrand L, Zhang S. Autoexposure for three-dimensional shape measurement using a digital-light-processing projector[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(12): 123603.
- [197] Liu X J, Chen W Y, Madhusudanan H, et al. Optical measurement of highly reflective surfaces from a single exposure[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(3): 1882-1891.
- [198] Zhang J, Luo B, Li F Q, et al. Single-exposure optical measurement of highly reflective surfaces via deep sinusoidal prior for complex equipment production[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(2): 2039-2048.
- [199] Gupta M, Nayar S K. Micro phase shifting[C]//2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 16-21, 2012, Providence, RI, USA. New York: IEEE Press, 2012: 813-820.
- [200] Jiang H Z, Li Y X, Zhao H J, et al. Parallel single-pixel imaging: a general method for direct - global separation and 3D shape reconstruction under strong global illumination[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2021, 129(4): 1060-1086.
- [201] Wu Z J, Guo W B, Pan B, et al. A DIC-assisted fringe projection profilometry for high-speed 3D shape, displacement and deformation measurement of textured surfaces[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 142: 106614.
- [202] Wu Z J, Guo W B, Chen Z D, et al. Three-dimensional shape and deformation measurement on complex structure parts[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 1-14.