

基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述

郭文博, 张启灿*, 吴周杰

四川大学电子信息学院光电科学技术系, 四川 成都 610065

摘要 近年来,客观世界和场景三维信息需求量的陡增,促使结构光三维测量技术快速发展。基于条纹投影和相移条纹分析的三维成像技术具有较好的精度和鲁棒性,在众多的技术方法中脱颖而出,被广泛地应用于工业检测、文物数字化、生物医学检测领域。而在人机交互、虚拟现实、在线检测、远程手术等具有时效性要求的应用场景中,实现实时三维测量具有重要意义和明显价值。首先简要介绍了基于相移条纹分析的三维成像技术基本原理,随后分类讨论了实时三维成像的多种优化实现方向,回顾了各类方向中不同的技术方案。最后,总结了基于相移条纹分析的实时三维成像技术所面临的挑战及有潜力的研究方向。

关键词 图像处理; 三维成像; 条纹投影; 结构光照明; 相移条纹分析; 实时三维重建

中图分类号 TN206

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0800001

Real-Time Three-Dimensional Imaging Technique Based on Phase-Shift Fringe Analysis: A Review

Guo Wenbo, Zhang Qican*, Wu Zhoujie

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

Abstract In recent years, the demand for three-dimensional (3D) information of the objective world and scene has increased sharply and drives the rapid development of 3D measurement techniques based on structured light illumination. The 3D imaging technique based on fringe projection and phase-shift fringe analysis has high accuracy and robustness, standing out among many techniques, and is widely used in industrial inspection, digitalization of antique, biomedicine detection, and so on. In the application scenarios with timeliness requirements such as human-computer interaction, virtual reality, online detection, and remote surgery, realizing real-time 3D measurement is of great significance and obvious value. In this paper, the basic theory of 3D imaging technique based on phase-shift fringe analysis was introduced. Several optimization directions for real-time 3D imaging were discussed, and different methods in various optimization directions were reviewed. Finally, the challenges and potential research directions of real-time 3D imaging technique based on phase-shift fringe analysis were summarized.

Key words image processing; 3D imaging; fringe projection; structured light illumination; phase-shift fringe analysis; real-time 3D measurement

OCIS codes 100.6890; 120.5050; 050.5080; 200.4960

1 引言

随着微软公司的 Kinect 产品将三维体感游戏

带入人们的生活,Apple 公司的 iPhone X、各大公司的人脸支付终端设备等也纷纷利用三维人脸数据提升操作便捷性和安全性。眼下,日趋增多的基于三

收稿日期: 2021-03-24; 修回日期: 2021-04-07; 录用日期: 2021-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(61675141, 62075143)

* E-mail: zqc@scu.edu.cn

维成像(传感)技术的 VR、AR 应用丰富着我们的世界,三维传感技术已经逐渐被大众所熟悉和追捧。以智能手机为例,越来越多的旗舰机型在摄像模组上不断优化,不仅要满足人们拍摄 2D 场景时更远更清晰的要求,还要搭载 3D 成像模组以满足人们对于支付安全、生活乐趣等方面的需求,这也仅仅是众多基于三维传感技术研发设备中的一类。实际上,三维传感技术在追求精度质量控制的工业界也已广泛应用。光学三维传感(又称三维成像、三维测量)技术是指一种利用光学手段获取场景物体表面各点三维坐标及其他表面特性(如反射率)的技术^[1-4],因具有非接触的特点,已经被广泛运用于机械工程、生物识别、机器视觉、智能制造等领域。

在众多的光学三维传感方法中,结构光三维成像技术由于具有精度高和灵活性好等特点,一直是行业内的研究热点之一,包括消费级的 Kinect 等设备也都是采用结构光三维成像技术。结构光三维成像技术通常利用投影器件将结构光场投影到被测场景物体表面,利用成像器件拍摄并记录变形光场,通过解调光场信息,最终获取物体的三维形貌信息。Kinect 为代表的消费级三维传感设备由于功耗、体积及成本的限制,大多采用基于强度调制的散斑结构光投影技术。散斑结构光投影技术虽然能够满足大众生活中娱乐消费等生活需求,但往往不能满足工业级质量检测的高精度要求。因此,另一种基于相位调制的条纹投影结构光技术有了更多的关注。与此同时,随着如高速相机、数字光处理(DLP)投影仪、图形处理器(GPU)等硬件设备的高速发展,较高精度的高速三维测量^[5-6]及实时三维测量^[7]逐渐成为了主流研究方向和推广应用的核心。

基于相位调制的条纹投影结构光技术被称为条纹投影轮廓术(FPP),具有非接触、精度高、全场测量、成本低等优点,一直是众多学者关注和研究的对象。根据相位分析方法的不同,FPP 可简单分为两大类,即相移法和变换域法。前者是相位测量轮廓术(PMP),亦或相移轮廓术(PSP)^[7-8],需要多幅(通常至少三幅)相移条纹图案,在时域上通过点对点分析相位变化来重建被测场景物体的三维面形。后一种方法通常将采集到的 2D 图像变换到频域^[6,9]或小波域^[10],获取其相位值,从一幅或者两幅少量的条纹中即可对应重建一个三维结果。傅里叶变换轮廓术(FTP)^[11-12]是其中有较多应用的一种方法。该技术通过向待成像场景投影一幅足够稠密的条纹,确保变形条纹图像的频谱不发生混迭。在频域采用

适当的带通滤波器,FTP 就能从单帧高频条纹图中提取相位重建结果,但它通常要求测量场景表面连续缓变。与 FTP 相比,PMP 具有更高的测量精度,且对不均匀的表面反射率具有更强的鲁棒性,对应用场景的要求更为宽泛。随着高帧率图像传感器、高速数字投影技术、高性能处理器的快速发展,基于相移条纹分析的三维成像技术逐渐能够满足动态场景的实时三维重建要求,进而越来越多地能被应用到动态场景的实时三维形状测量中。

紧扣实时三维成像(传感)技术,本文主要涉及基于相移条纹分析的实时三维成像技术,介绍它的基本技术原理;从加快硬件测量速度、减少投影图形数量、补偿相位误差、加速数据处理等方面分类回顾了多种优化实现方案的基本原理、技术方案及研究进展;最后基于笔者在该领域多年的研究积累,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 基于相移条纹分析的三维成像技术

在触及应用于动态场景的实时三维成像技术之前,首先应该了解基于相移条纹分析的三维成像传统技术是如何面对静态场景的应用需求来一步步完成三维重建的。基于相移条纹分析的三维成像技术的测量原理如图 1 所示,测量系统主要由投影设备和成像设备组成。投影设备与成像设备存在固定的基线距离,满足三角测量原理。条纹图通过投影仪依次投影到被测物体表面,相机同步拍摄受物面形调制的变形条纹。计算得到变形条纹的相位信息后,进行相位展开,获得反映被测场景物体面形的连续分布相位信息,最后依据测量系统的标定参数完成被测物体面形的三维重建,用于后续三维渲染建模后的直接使用。简单来讲,基于相移条纹分析的三维成像技术可以分为 4 个步骤:相移条纹的投影和获取、截断相位计算、相位展开、三维映射(系统标定)。

通过投影设备,将相移条纹投影到被测物体表面,相移条纹在 2π 周期内均匀移动 $N(N \geq 3)$ 次,每次相移量为 $2\pi/N$ 。相移条纹的图案可以表示为

$$I_n^p(x, y) = A^p(x, y) + B^p(x, y) \cos(2\pi f y^p + 2\pi n/N), \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中: I_n^p 为投影仪中一个像素点的光强; A^p 为背景强度; B^p 为条纹的调制量; f 为正弦条纹的频率; n 对应相移条纹的序号; N 为相移总步数。相移条纹将待测高度信息调制带入到其相位分布中,另一个

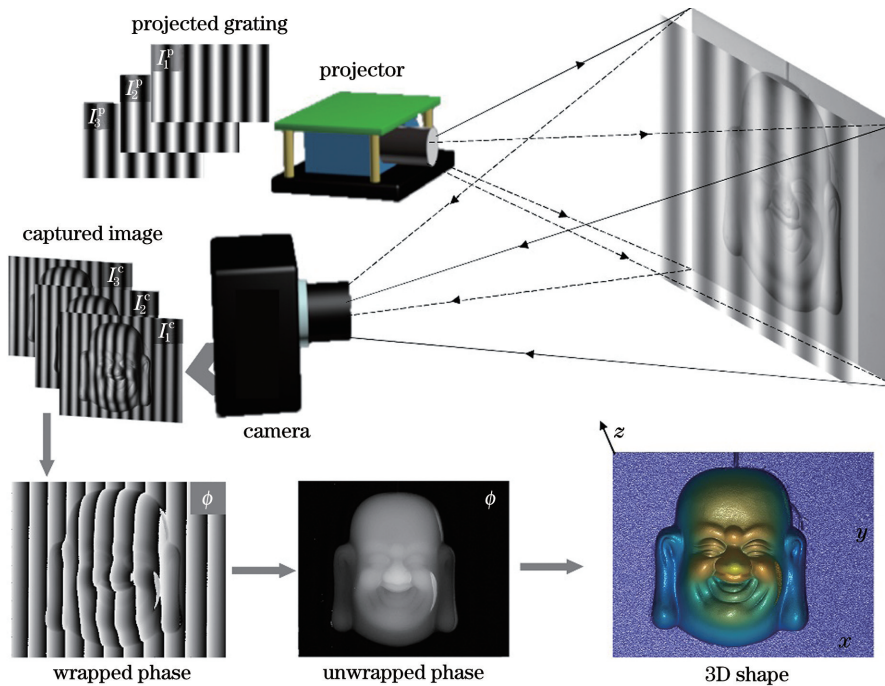


图 1 基于相移条纹分析的三维成像技术原理

Fig. 1 Schematic of 3D imaging technique based on phase-shift fringe analysis

角度上的相机记录的对应变形条纹的光强可以表示为

$$I_n^c(x, y) = A^c(x, y) + B^c(x, y) \cos[\phi(x, y) + 2\pi n/N], \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

式中: I_n^c 为相机中一个像素点的光强; A^c 为相机拍摄的背景强度; B^c 为相机拍摄条纹的调制量; 相位函数 ϕ 反映被测物体表面的三维面形分布, 逐点解调后可重建获得高精度三维面形。

根据相机获取的变形相移条纹, 可以计算出每个像素的相位。截断相位 ϕ 的表达式为

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^c(x, y) \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^c(x, y) \cos(2\pi n/N)}. \quad (3)$$

由于反正切运算, 相位 ϕ 会截断在 $(-\pi, +\pi]$ 之间, 需要对截断相位 ϕ 进行相位展开, 得到的展开相位为

$$\Phi(x, y) = \phi(x, y) + 2\pi k(x, y), \quad (4)$$

式中: $k(x, y)$ 为该点的条纹级次。

相位展开算法分为空间相位展开和时间相位展开两类。空间相位展开假设相位图的各像素点间均为连通区域, 往往只需要一幅相位图, 依靠相邻像素值进行相位展开^[13-18]。但对于孤立或表面不连续的物体, 因不满足假设前提, 空间相位展开无法实现可靠的相位展开。时间相位展开通过辅助的相位分

布^[19-20]或级次编码图案^[21]来指导相位展开。沿时间轴获得对应条纹级次信息, 相互独立地展开各个像素, 无需在空间参考周围像素的相位级次, 因此对于孤立或表面不连续的物体, 时间相位展开也能够正确进行相位展开。常用的时间相位展开算法包括多频相位展开^[22-24]、多波长相位展开^[25-26]、格雷码辅助相位展开^[27]、相位编码相位展开^[21]。

当相位展开完成后, 需要将像素坐标系下的相位信息通过系统标定转换为世界坐标系下的物体三维信息。基于相移条纹分析的三维成像技术常用的系统标定方法主要分为两大类: 投影仪逆向标定法^[28-29]和隐式标定法^[29-30]。基于二维数字微镜器件(DMD)的DLP投影仪常被用于结构光投影中, 对于此类三维测量系统, Zhang等^[28]提出一种投影仪逆向标定法, 该方法将投影仪看作一个逆向相机, 以投影条纹的相位信息为桥梁, 建立投影靶面和成像靶面的对应关系, 实现对逆向相机(投影仪)的标定, 完成对结构光测量系统的标定。之后再行相位匹配和视差计算, 将相位信息转换为被测物体的三维信息。隐式标定法^[30]通过借助精密移动装置建立高度和相位变化量之间的关系, 得到相位-高度映射关系式。将被测场景物体的展开相位代入映射关系式, 得到对应高度数据, 依据高度数据, 通过相机标定^[29]参数将像素坐标系的数据转换为世界坐标系的三维数据。

至此,具备了基于相移条纹分析方法的三维成像技术整体流程中的 4 个关键步骤,可以实现复杂场景物体的三维重建。而实时三维成像技术作为它适应实际需求发展出来的一个技术分支,为了追求实时三维重建,需要优化实时三维成像技术测量整体流程中各步骤的算法复杂度和计算效率,从而实现动态场景的实时三维重建。

3 实时三维测量发展

早期基于相移条纹分析的三维成像技术多是对静态场景进行三维测量。对于静态物体,在不考虑数据获取时间效率的前提下,相移方法结合相应的相位展开算法能够较好地重建静态物体的三维面形。相移条纹分析方法用于动态场景的三维测量时,本身与多帧相移算法需要保证物体静止的条件相悖,因此需要尽可能快速、准确地获得三维重建所

需的多幅相移条纹图像。

面对更高效率要求、追求实效性的实时三维测量,相移条纹分析方法需要研究的内容还有很多。需要从测量硬件端和计算重建端两方面共同优化实时三维成像技术:1)为满足动态场景的测量条件,测量硬件端的主要改进方向为加快重建所需图片的获取速度,而加快重建所需图片获取速度的途径主要包括使用更高帧率的硬件设备和减少投影图形数量;2)为实现动态场景的实时三维重建,需要计算重建端满足计算快、重建精度高的要求,期望加速三维重建的计算过程(达到每秒 25 Hz 以上的三维重建速度)。另外,由于动态场景会引入运动误差,为满足高精度三维测量的要求,需要在测量结果中对动态运动误差进行修正。图 2 为实时三维测量技术实现途径的主要优化思路,本综述也将按照此优化途径进行介绍。

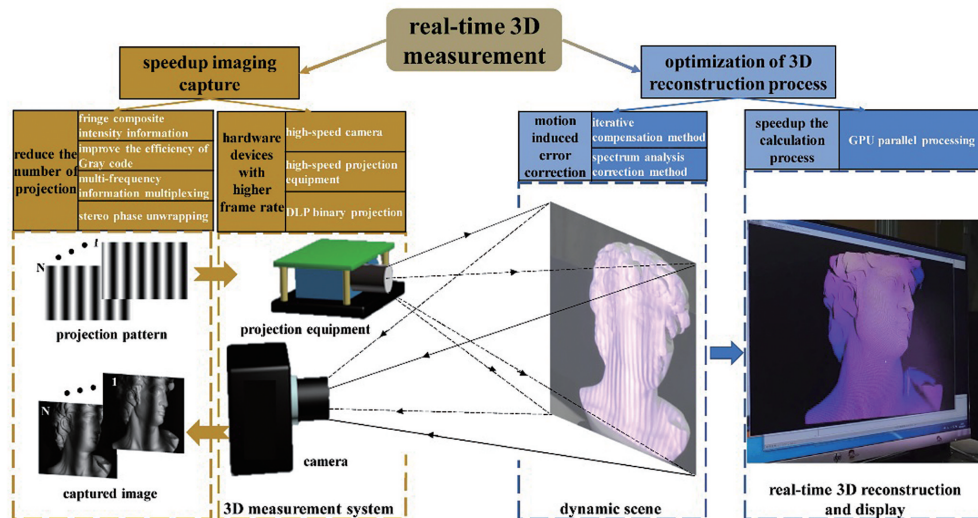


图 2 实时三维测量的主要优化途径

Fig. 2 Main optimization approaches of real-time 3D measurement

3.1 加快重建所需图像的获取速度

基于相移条纹分析的动态场景三维重建中,由于被测场景运动在相移过程中引入了额外的相移量,相移方法计算的相位会出错,进而导致重建面形错误。基于相移条纹分析的三维测量系统加快重建所需图像的获取速度,当系统的测量速度远大于动态场景的运动速度时,可以将动态场景看成静态或准静态场景进行三维测量。

3.1.1 更高帧率的硬件设备

基于相移条纹分析的三维测量设备主要包含投影设备和成像设备。实际上,目前成像设备的拍摄速度足以配套投影设备的投影速度,本文不为此多加叙述,将主要回顾众多学者在如何提升和突破投

影速度上限上所做的努力。

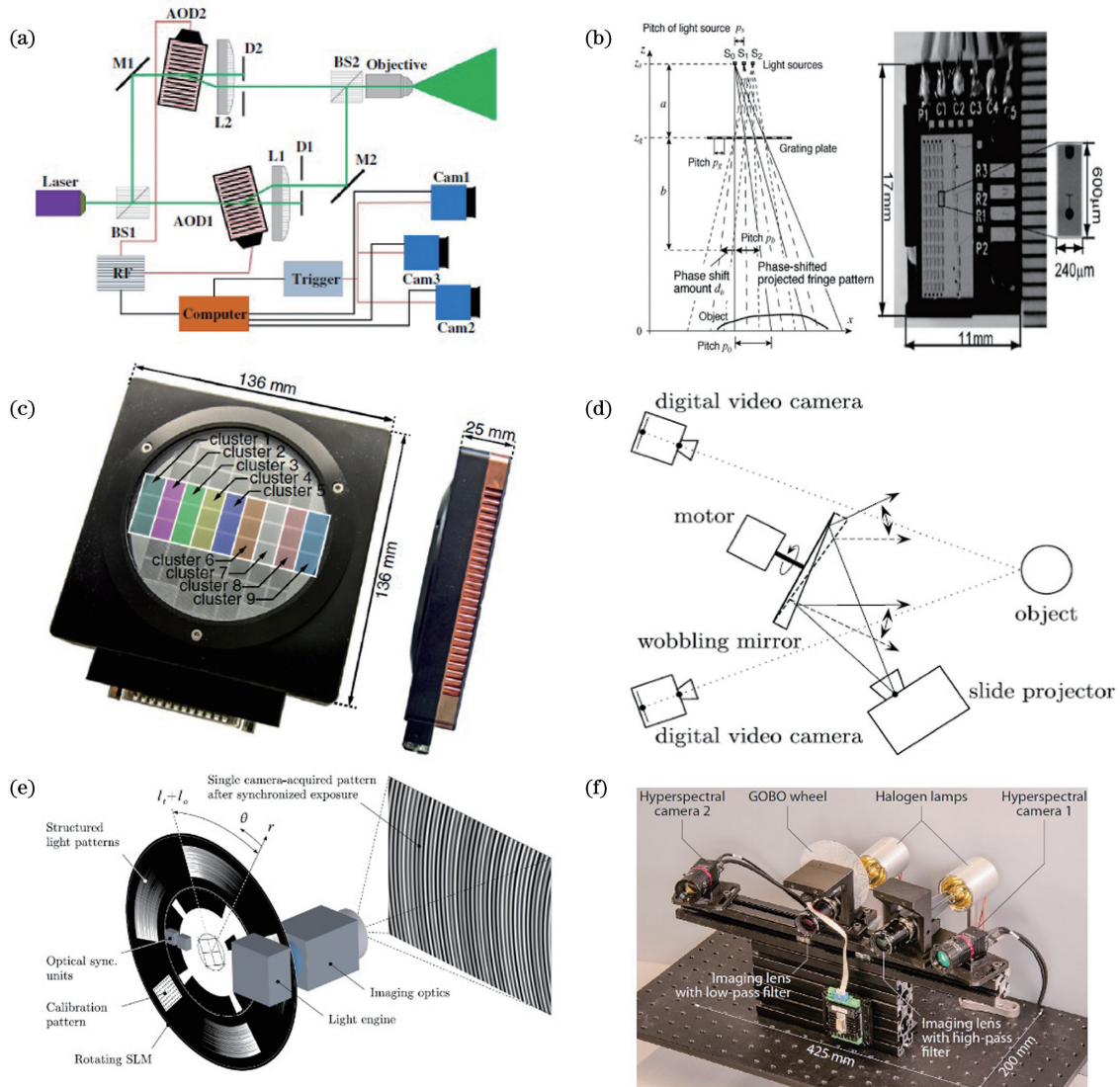
3.1.1.1 投影装置加快测量速度

早期,Su 等^[31-32]提出一种通过适当离焦投影镜头,得到受光学系统的低通滤波效应影响的二值方波信号正弦光强分布的方法,此方法为通过物理光栅投影系统加快投影速度开启了新的思路。Guan 等^[33]采用激光干涉技术产生正弦条纹,该技术可以实现高达 50 MHz 的条纹刷新速度。Fujigaki 等^[34]开发了一种基于光源步进法(LSSM)的线性 LED 器件,实现快速条纹投影,但该方案需配合全空间建表法(WSTM)以修正光源步进相移导致的相位偏差,实现快速、高精度的三维重建。Heist 等^[35]开发了一种由 27 个 LED 构成的阵列投影仪,3 个一组,

共可投射 9 种非周期正弦条纹图案,以 3 kHz 的投影速率实现了大于 330 Hz 的三维场景重建。Grosse 等^[36-37]通过转镜的高速旋转,将投影图案以不同角度入射到物表面,利用立体视觉法实现投影速率高于 700 Hz 的三维测量。Wissmann 等^[38]提出旋转投影方法,实现快速、低成本的结构光序列投影。Heist 等^[39]进而提出 Goes Before Optics (GOBO)投影方法,并采用利用一种镂空条纹盘片的高旋转实现非周期条纹投影的方法,配合两个高速相机,此系统以 12000 Hz 的采集速率实现了 1333 Hz 的三维测量。该课题组^[40-41]随后利用 GOBO 投影技术和高光谱相机实现了 5D 高光谱三维成像,利用 GOBO 投影技术和高速红外相机实现了三维热成像,通过附加的高光谱相机和高速红外相机,有效地扩展了信息获取的维度。Zhang 等^[42-43]对均匀角度的径向条纹进行旋转投影,摄像

机在旋转周期内以固定时间间隔采样,实现了快速相移的三维测量方法。Hyun 等^[44]采用高速阵列投影机投射非周期条纹,实现了几十 kHz 的投影速度。基于 Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) 振镜扫描的投影机对强度随时间变化的线光进行一维扫描,实现快速条纹投影。该投影机采用红外激光二极管作为光源,实现隐秘性的快速三维表面成像^[45]。

上述文献中实现的高速投影装置大都需要定制,制作难度相对较大;同时这些投影装置中无论是转镜还是旋转盘片,都需要保证条纹相移间距的精度。这些对投影系统的控制精度提出了较高要求。为了保证三维重建精度,其中多数设备采用双目相机进行相位匹配来减小相位误差的影响,这将进一步提升系统的成本。图 3 为上述部分工作的装置图。



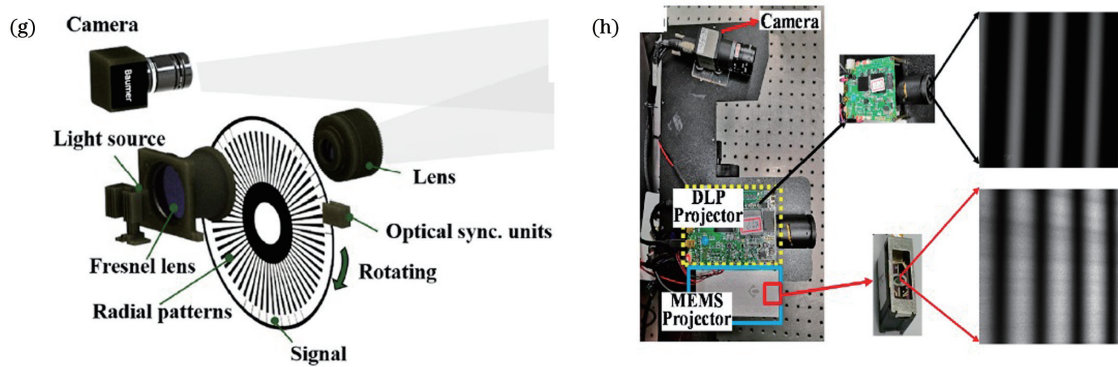


图 3 快速投影设备装置图。(a) 激光干涉条纹测量系统^[33]；(b) 光源步进法相移投影设备^[34]；(c) 阵列投影设备^[35]；(d) 转镜投影测量系统^[36]；(e) 旋转结构光序列投影设备^[38]；(f) 5D 高光谱成像系统^[40]；(g) 旋转投影测量系统^[43]；(h) MEMS 振镜扫描投影测量系统^[45]

Fig. 3 Installation diagram of fast projection equipment. (a) Laser interference fringe measurement system^[33]; (b) light source stepping method phase shift projection equipment^[34]; (c) array projection equipment^[35]; (d) rotating projection measurement system^[36]; (e) rotating structured light sequence projection equipment^[38]; (f) 5D hyperspectral imaging system^[40]; (g) rotating projection measurement system^[43]; (h) MEMS galvanometer scanning projection measurement system^[45]

3.1.1.2 二值离焦投影加快测量速度

由于独立开发投影装置的成本和难度较高,且基于 DMD 的 DLP 数字投影仪(包括 DLP Discovery、DLP Light Commander、DLP Light Crafter 等)具有优异的投影性能,同时可以直接购买,二次开发后整合集成进系统使用,众多学者开始在投影模式上进行研究和开发。基于 DMD 芯片的 DLP 数字投影仪在投影 8 bit 正弦条纹时,投影速度只能达到 120 Hz,而在投影 1 bit 的二值条纹时,可以达到 kHz 的投影速度^[46]。这是因为 DMD 是一种二元器件,多灰度的正弦条纹是由 1 bit 的光强

通过时间积分实现的。

Lei 等^[47-48]利用投影仪离焦投影二值条纹的方法来实现快速的正弦条纹投影。为了优化投影仪二值离焦条纹的正弦性,一维正弦脉宽调制^[49-51]及二维面积调制^[32,52-55]等技术也先后提出。以上方法均是为了改善二值投影图案,使投影仪在离焦位置得到正弦性较好的条纹分布,详细对比介绍可以参考 Li 等^[56]的综述文章。通过二值离焦投影技术,可使用具有 DLP 投影仪的三维测量设备将成像速度提升至 kHz^[57-58]。图 4 为上述二值离焦方法的部分结果展示,分别为二值方波离焦方法、脉宽调制离焦方

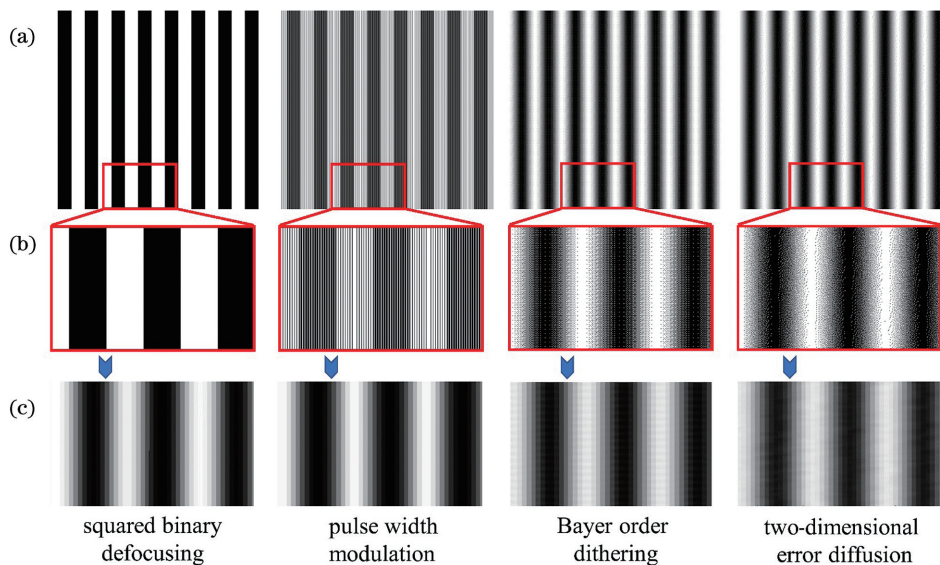


图 4 条纹二值化。(a) 二值条纹；(b) 局部放大图；(c) 二值条纹离焦效果

Fig. 4 Fringe binarization. (a) Binary fringes; (b) local magnification; (c) binary fringe defocusing effect

法、Bayer 抖动离焦方法及二维误差扩散离焦方法。

总体而言,在较好的离焦效果下,得到的正弦条纹质量主要和条纹频率有关,在条纹频率较高时,建议使用二值方波离焦方法和脉宽调制离焦方法。这两种优化离焦技术沿垂直条纹的一维方向对二值图案进行优化,能在不同程度上抑制高次谐波带来的相位误差。基于一维优化的策略在条纹频率较高时比较有效,但当投影条纹频率较低时,对谐波的抑制效应不明显;在条纹频率较低时,Bayer 抖动离焦方法和二维误差扩散离焦方法的效果较好。上述的二维优化技术因为在两个方向上对二值图案进行优化,因此比一维优化方法拥有更好的抑制高次谐波的能力。但二维优化方法在量化一个周期的条纹时需要较多的像素,所以在条纹频率较低时效果较好。

3.1.2 减少投影图形数量

加快系统的测量速度后,可以将动态场景近似看成静态或准静态场景,虽然获取一个三维测量结果的单位时间缩短,但实质上是以较高的硬件成本为代价的。而减少三维重建所需的图片数量不仅能够进一步提升三维测量系统的效率,而且有利于在较低成本的三维测量系统硬件基础上实现实时动态场景的三维测量。一些学者因此开展了关于减少三维测量所需图形数量的研究。

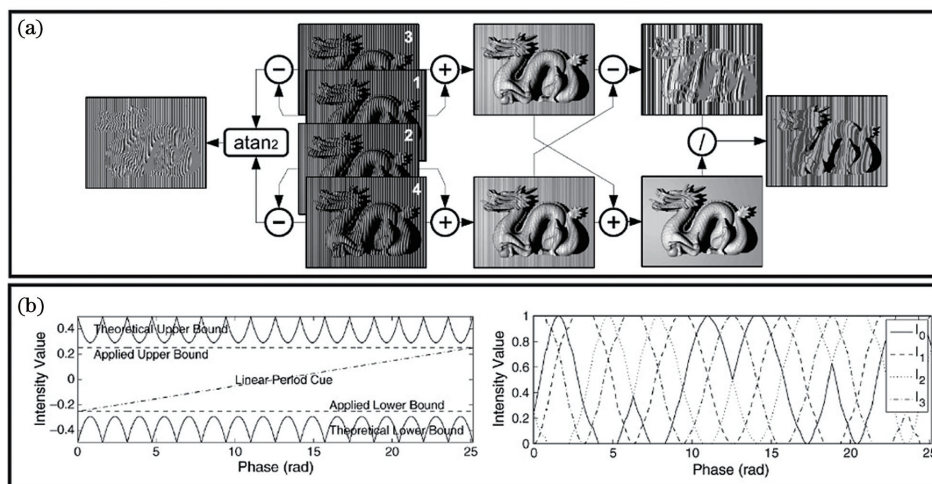
采用截断相位的空间相位展开无需额外的辅助图案作为指导,仅需一组相移图片即可实现三维重建。所以这里所提及的减少投影图形数量的应用场景主要围绕基于相移条纹分析和时间相位展开的三维测量方法。常见的辅助时间相位展开的额外编码方式包括 De Bruijn 编码^[59-61]、格雷码^[27,62-63]、散斑^[64-65]、多相位展开^[66],投影图形数量减少的常用途径主要从嵌入辅助信息形成复合条纹、提升格雷码效率、多频条纹信息复用、立体相位展开 4 个方向开展。

3.1.2.1 条纹嵌入辅助信息

辅助时间相位展开中 De Bruijn 编码和散斑编码等编码方式依据编码图案的空间强度信息指导相位展开,正弦相移条纹在其幅值分布范围上存在优化利用的空间,因此众多学者开始将指导相位展开的辅助信息嵌入到相移条纹中,形成复合条纹,以减少重建需要的图形数量。

Wissmann 等^[67]将编码相移(CPS)算法嵌入二进制 De Bruijn 序列,扩展了传统的四步相移算法,该嵌入信号可用于解决不连续或孤立表面对应的相位歧义问题,辅助相位展开过程。Wang 等^[68]提出周期编码相移(PCPS)算法,该算法通过巧妙地设计嵌入信号,在不影响原始正弦波分量幅度的情况下,将额外的周期信号嵌入到标准四步相移条纹中来解决相位级次展开问题。Zhang 等^[69]将固定的散斑信号嵌入到三步相移正弦条纹中,因为条纹中的直流强度不影响相位计算过程,同时强度平均后,正弦条纹被消除,仅留下背景和嵌入的散斑信号用以辅助相位展开过程。Tao 等^[70]将三角波嵌入原始的三步相移条纹中,通过组合三角波信息和几何约束,可以消除高频截断相位的歧义。Wang 等^[21]提出了一种基于相位编码的绝对相位展开方法,该方法通过将 N 阶码字嵌入相移条纹的相位分量中,指导对应截断相位的展开。Wu 等^[71]提出了一种光栅复合方法,可以从 4 幅图形中同时提取光栅的截断相位及其对应的相位编码阶数,该方法充分利用相位域的稳定特点,给相移条纹的相位展开方法提供新的思路。

上述方法在不降低相移条纹强度分布的基础上,充分利用正弦条纹光强分布,嵌入相位展开辅助信息,有效地减少投影推按数量。图 5 为上述部分工作的嵌入解码原理图。



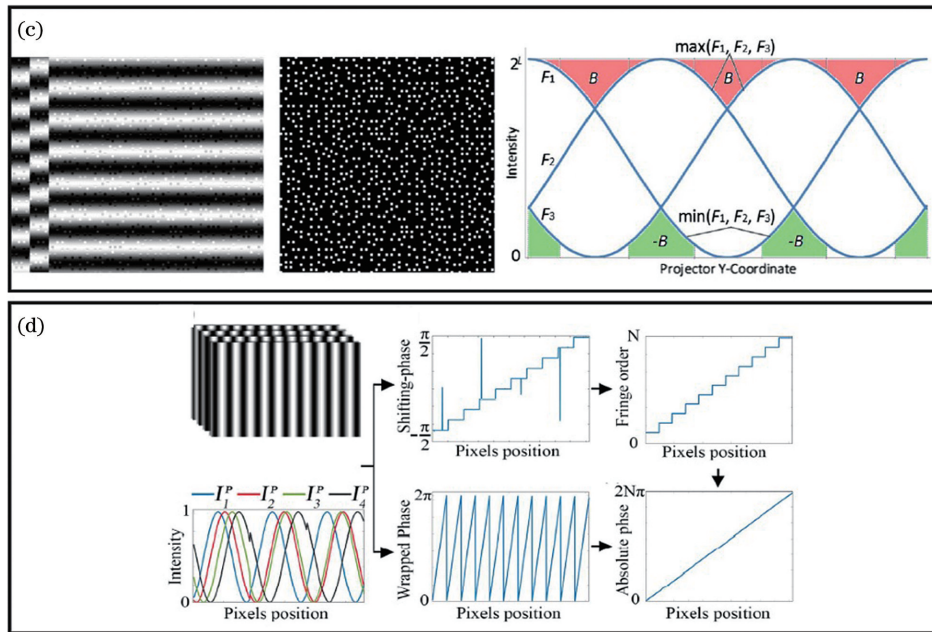


图 5 条纹嵌入辅助信息指导相位展开的原理图。(a) De Bruijn 序列嵌入四步相移条纹^[67]; (b) 周期信号嵌入四步相移条纹^[68]; (c) 散斑信号嵌入三步相移条纹^[69]; (d) 相位编码嵌入四步相移条纹^[21]

Fig. 5 Schematic of phase unwrapping guided by fringe embedding auxiliary information. (a) De Bruijn sequence embedding four-step phase shift fringes^[67]; (b) periodic signal embedding four-step phase shift fringes^[68]; (c) speckle signal embedding three-step phase shift fringes^[69]; (d) phase encoding embedding four-step phase shift fringes^[21]

3.1.2.2 提高格雷码效率

格雷码结合相移技术的三维面形测量方法作为一种典型的结构光编码技术, 由于具有环境适应性好、测量鲁棒性强等优点, 已经被广泛运用到了对静态场景进行检测的工业高精度测量行业中。格雷码是指在一组编码中, 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)的编码。由于格雷码使用误差最小化的可靠编码方式, 它也被众多学者运用到了结构光三维成像技术当中^[72]。

图 6 以三步相移、具有 16 个周期的正弦条纹为例, 共需要 4 幅格雷码($\log_2 16 = 4$)去标记条纹级次, 并辅助截断相位进行相位展开。且在实际的测量过程中, 一方面反正切函数计算相位信息时, 在相位截断处极易受到外界噪声的影响, 容易对应产生相位跳变; 另一方面, 受到系统噪声和测量系统的低通滤波特性(主要来自于投影仪镜头和相机镜头)影响, 格雷码边沿不是锐利截止, 无法准确指导相位展开。为了解决上述问题, Zhang 等^[73]提出一种基于互补格雷码的编码方法, 从源头上避免了级次跳变误差的产生。尽管互补格雷码使得相位展开具有较好的环境适应性和较高的测量鲁棒性, 但互补格雷码方法会额外增加格雷

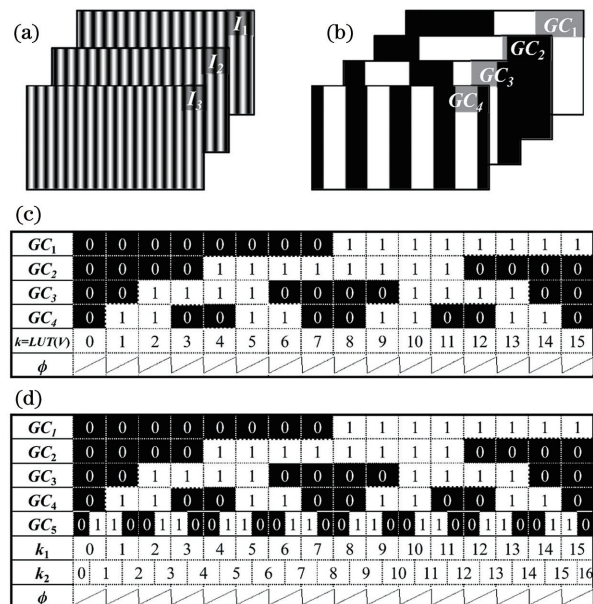


图 6 格雷码辅助相移技术^[72-73]。(a) 投影相移条纹; (b) 投影格雷码条纹; (c) 格雷码解码过程; (d) 互补格雷码解码过程

Fig. 6 Gray code aided phase shift technique^[72-73]. (a) Projected phase shift fringes; (b) projected Gray code fringes; (c) decoding process of the Gray codes; (d) decoding process of the complementary Gray codes

码图片数目 ($\log_2 16 + 1 = 5$), 不利于动态场景的三维测量。

为了提升格雷码的编码效率, Wu 等^[74-75]通过在时间和空间域上重新编码格雷码序列, 设计出循环互补格雷码及移动格雷码, 无需互补格雷码, 就避免了边沿误差, 减少了一幅格雷码图片。然后, Wu 等^[76]提出分区间相位展开方法和格雷码复用编码策略, 进一步提高了格雷码的编码效率。Zheng

等^[77]提出一种三灰度格雷码方法, 该方法增加了格雷码的编码灰度级数, 提升了格雷码的编码效率, 对于条纹频率为 f 的正弦条纹, 格雷码编码图片数目从 $\log_2 f$ 减少至 $\log_3 f$ 。受该思想启发, He 等^[78]将三灰度方法延伸到了四灰度编码, 进一步提升编码效率, 对条纹频率为 f 的正弦条纹, 格雷码编码图片数目减少至 $\log_4 f$ 。图 7 为上述部分减少格雷码数量工作的原理图。

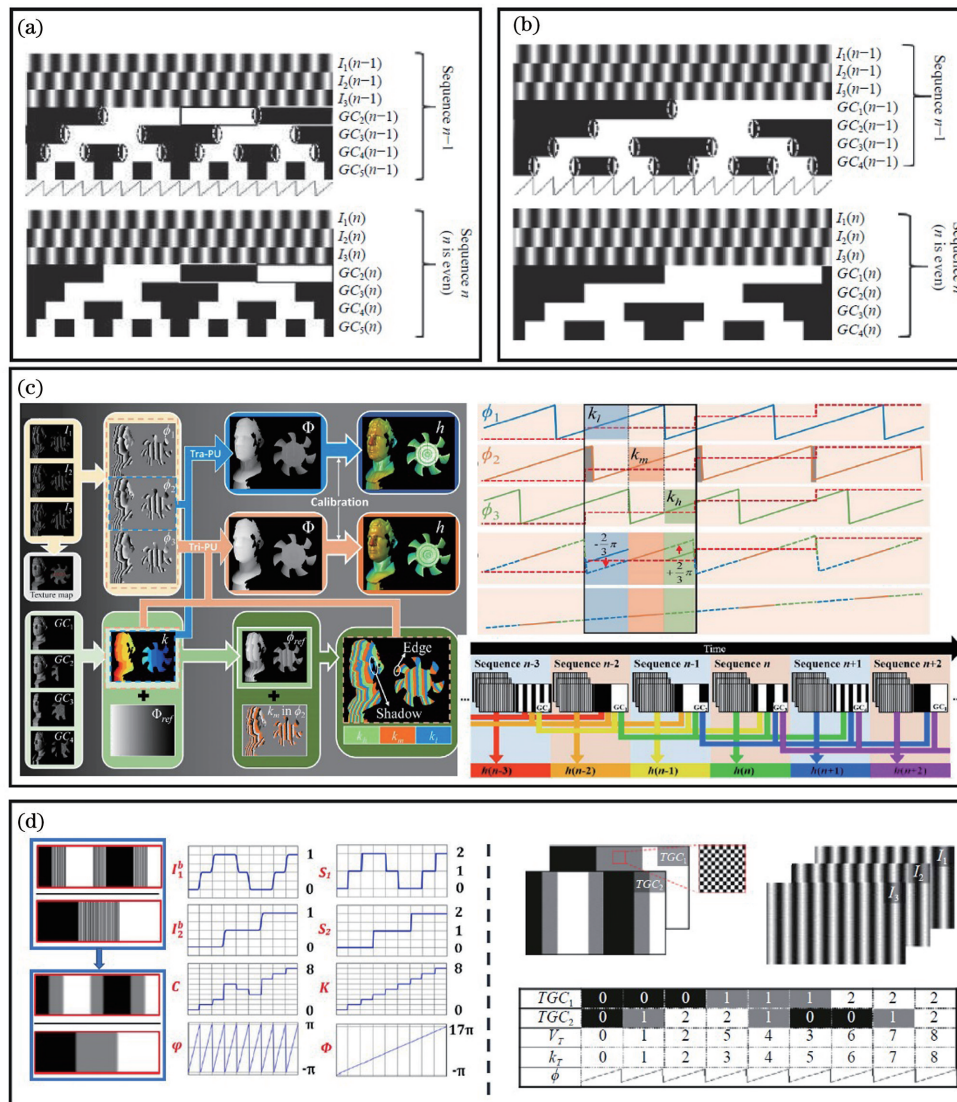


图 7 提升格雷码效率的原理图。(a) 循环互补格雷码辅助相移方法^[74]; (b) 移动格雷码辅助相移方法^[75]; (c) 分区间相位展开方法和格雷码复用编码策略^[76]; (d) 三灰度格雷码辅助相移方法^[77]

Fig. 7 Schematic of improving Gray code efficiency. (a) Cyclic complementary Gray code aided phase shift method^[74]; (b) shifting Gray code aided phase shift method^[75]; (c) regional division phase unwrapping method and Gray code multiplexing coding strategy^[76]; (d) ternary Gray code aided phase shift method^[77]

3.1.2.3 多频条纹信息复用

时间相位展开的额外编码方式中除了依据空间强度唯一性编码的 De Bruijn 编码, 散斑、时域唯一性编码的格雷码外, 双频相位展开也是一种有较多

应用的时间相位展开算法。以三步相移为例, 双频相位展开所需的条纹图数目为 6 (即 3+3)。然而对于不同频率的相移条纹, (2) 式中背景强度 A^c 是相同的。针对这种可以重复利用的信息, 学者开始研

究如何多次利用多频相移条纹中的重复信息,以减少相位展开所需的图片数目。

Liu 等^[79]提出了一种新的双频模式,将两个频率的条纹复合到一幅图案中,通过不同的相移步距分离两个频率的相位,该模式将双频相位展开的图案数量从 6 幅减少至 5 幅。Zuo 等^[80]提出了一种基于 3+2 相移的时间相位展开算法,假设条纹的

背景光强在测量过程中不变,两组相移条纹共用同一背景光强,该算法能减少一幅条纹图,实现了高速动态三维测量。随后 Zuo 等^[81]又提出了一种基于 2+2 相移的时间相位展开算法,使用两幅 π 相移条纹图和两幅线性斜率变化的强度分布图来得到高频截断相位和单位相位。图 8 为上述工作的原理图。

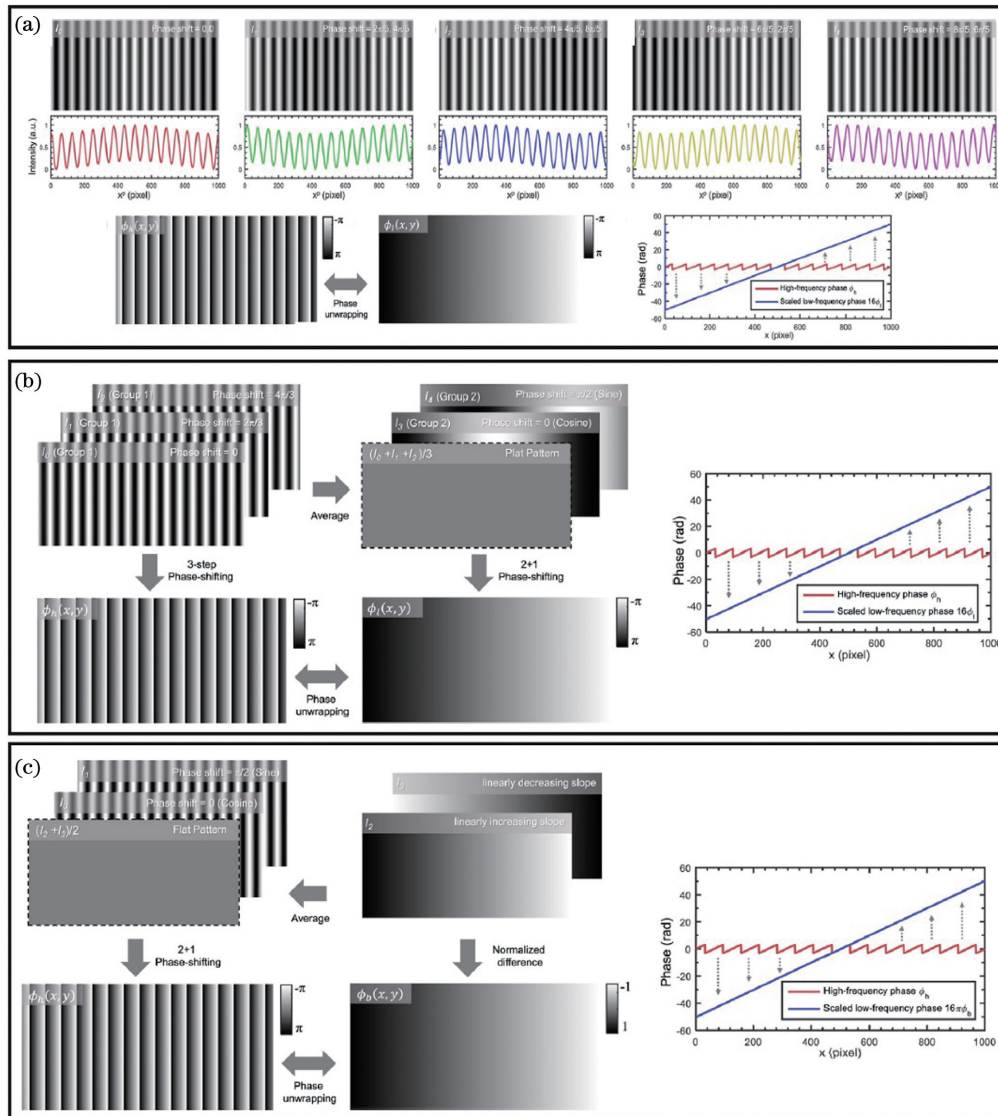


图 8 多频条纹信息复用的原理图。(a) 双频复合相移方法^[79,8]; (b) 3+2 相移方法^[80,8]; (c) 2+2 相移方法^[81,8]

Fig. 8 Schematic of multi-frequency fringes information multiplexing. (a) Dual-frequency composite phase shift method^[79,8]; (b) 3+2 phase shift method^[80,8]; (c) 2+2 phase shift method^[81,8]

3.1.2.4 立体相位展开

在摄影测量学中,多图像匹配常利用视角间的空间几何约束关系提升匹配点匹配的效率和准确性。Weise 等^[82]通过立体相位展开实现了复杂场景下高频截断相位的展开。Li 等^[83]将多视角极线约束作为条件,利用额外的相机作为视角约束,进行

相位展开。An 等^[84]提出了一种基于几何约束的相位展开方法,通过虚拟参考相位,对单相机和投影仪组成的三维测量系统进行逐像素的展开相位。Tao 等^[70,85]提出一种基于立体相位展开技术的四目实时三维成像系统,该系统可实现实时彩色三维重建。图 9 为多视角立体相位展开原理图。通过立体相位

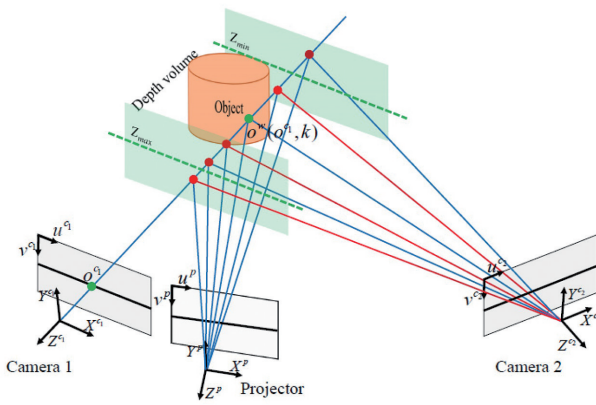


图 9 多视立体相位展开和深度约束原理图^[85]

Fig. 9 Schematic of multi-view stereo phase unwrapping and depth constraint^[85]

展开的多视角约束,此类方法无需投影额外的辅助图片,但需要额外的相机来提供视角约束,增加了系统成本。

3.2 三维重建过程优化

当测量硬件端的硬件性能满足动态测量的需求,能高速记录实时重建必需的图像信息后,基于相移条纹分析的实时三维重建还需要对三维重建过程进行优化,使其满足三维重建精度高、重建速度快的要求。对三维重建的计算过程进行加速,期望重建一个三维面形的全部计算时间在 40 ms 以内,即达到每秒 25 Hz 以上的三维重建速度。

另一方面,三维重建结果精度与较多因素有关,如投影仪非线性、系统标定精度等,本文仅讨论实时三维重建中的运动引入测量误差,即动态误差修正。

3.2.1 动态误差修正

对于动态场景的实时三维重建,无论是加快测量速度或是减少图像数量都是为了将动态场景近似看成静态或准静态场景,这么做的目的是为了减小运动物体的帧间相移误差,进而减小运动导致的相位运动误差。上述途径能部分减小相位运动误差,但是在动态场景运动相对较快,或者对精度要求较高的测量需求下,为了进一步减小误差,获得高精度的动态三维数据,众多学者开展了关于相位运动误差修正的研究^[86]。这些研究把运动误差修正分为迭代补偿运动误差和频谱分析修正运动误差两类。

3.2.1.1 迭代补偿运动误差

Zhang 等^[87]提出了一种改进的 2+1 相移算法来减小运动引起的误差,该方法通过改变相位计算方法,进一步缩小相移过程中的相对运动来减小运动误差。Weise 等^[82]利用泰勒展开求解并补偿运动相位误差,通过运动估计和位置偏移补偿运动误

差。Lu 等^[88-90]通过提出一种基于标记和尺度不变特征变换(SIFT)的方法来补偿刚体运动引起的测量误差。Feng 等^[91]提出了一种假设单个分割对象内相移误差均匀的方法。Wang 等^[92]使用 Hilbert 变换计算附加相位图,然后使用原始相位图和附加相位图的平均相位图进行三维重建,通过平均相位可有效地减小运动误差。Liu 等^[93]提出了一种通过计算三个相邻相位图之间的差来估计未知相位偏移的方法,该方法能够实现实时运动误差补偿。Wang 等^[94]提出了一种利用附加时间采样的运动诱导误差减小方法,该方法能够较好地利用高速相机和二值投影仪的性能,成功重建了匀速动态场景的三维面形。Liu 等^[95]通过两帧 3D 数据间的差异来估计物体运动,进而估计像素偏移导致的运动误差,进行运动误差补偿。此类方法大多对运动场景进行限制,当测量物体进行非均匀运动时,可能无法有效地补偿运动误差。更多评论和对比实验可以参考 Lu 等^[86]的综述文章。

3.2.1.2 频谱分析修正运动误差

考虑到相位误差补偿算法的有效性和 FTP 的单帧重建特性^[6],Cong 等^[96]提出了一种利用计算连续捕获条纹图像的相位分布差来估计相移误差的方法。Li 等^[97-98]提出了一种结合 FTP 和 PSP 的混合方法来减小运动引起的误差。Qian 等^[99]提出了一种基于相位像素运动检测的融合 FTP 和 PSP 的表面重建方法。Guo 等^[100]提出了一种基于动态三维形貌测量的实时运动误差消除方法。基于双频复合光栅获取的高低频截断相位,该方法采用虚拟高频法识别运动区域,根据物体的运动状态将相移分析得到的相位和傅里叶分析得到的相位合并;最后,根据图像排序方法和相应的相位展开方法,实现了相移算法下每新增一幅相移图即可重建一帧三维的结果。该方法在保证系统能延续静态物体重建精度的同时,消除运动误差,实时重建动态物体的三维形貌。图 10 为该方法的框架图。基于频谱分析的运动误差修正方法可有效应用于随机运动场景,但是受 FTP 方法的限制,会平滑重建结果,对于复杂物体的运动误差修正效果有待提升。

3.2.2 计算过程加速实时重建

前面讨论的加快图像获取速度、减少重建所需图像数量的方法有效减少了在测量硬件端获取条纹信息的时间,而为了追求较高的三维重建精度,这些方法会有更多的数据处理量、更高的算法复杂度,这给实时三维重建算法带来了更高的挑战。

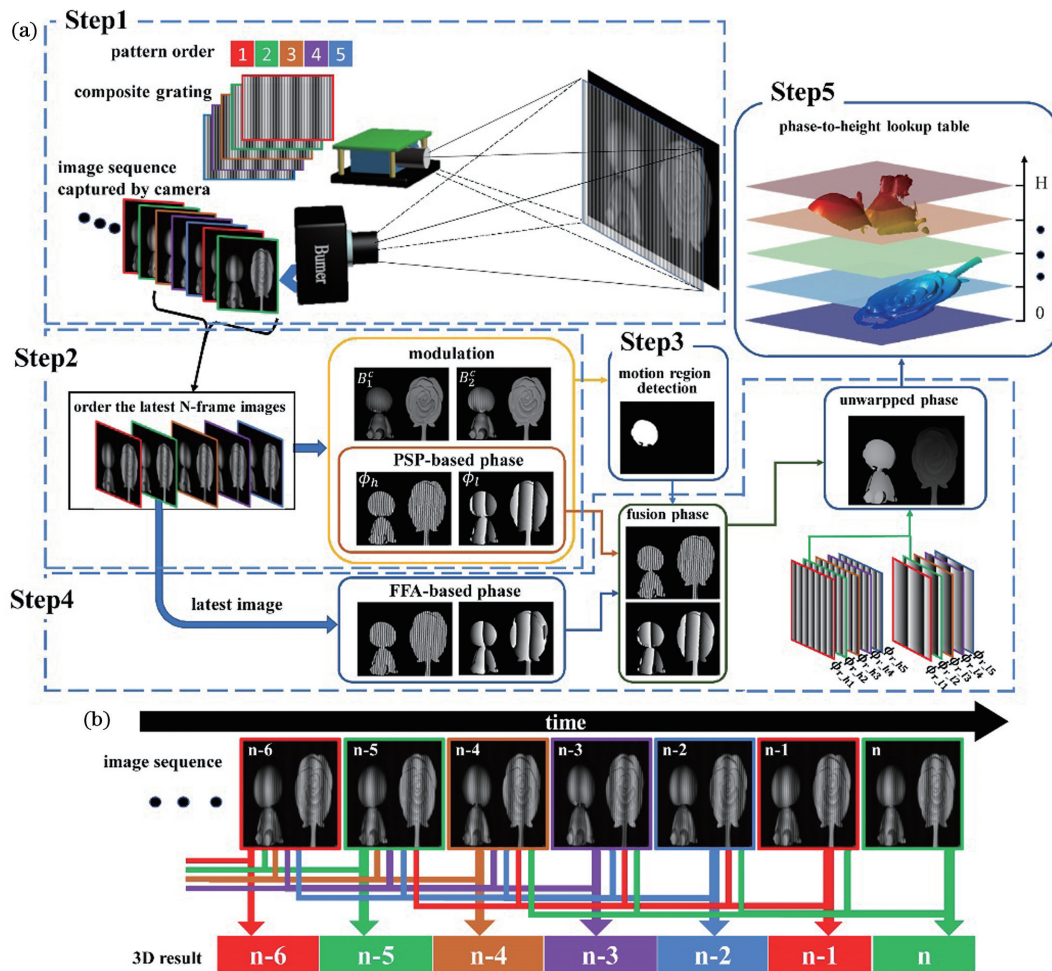


图 10 实时三维形貌测量及运动误差消除方法^[100]。(a)流程图;(b)三维重建序列

Fig. 10 Real-time 3D shape measurement and motion error elimination method^[100]. (a) Processing flow;

(b) 3D reconstruction sequence

基于相移条纹分析的三维重建方法以图像像素为数据单元,使得并行计算可以用来加速三维重建过程^[79, 81, 101-105],并且可以通过优化数据处理过程^[79]等途径实现实时三维重建^[7]。在实现实时三维重建过程中,应用较多的并行处理单元是GPU,其在处理和显示图形方面的表现非常好,它的高速并行结构能够加速三维重建过程,同时结合 OpenGL 后能够直接利用其图形渲染功能将三维数据可视化。图 11 为实时三维重建的一些结果展示图。

分别从加快硬件测量速度、减少投影图形数量、相位误差补偿及数据处理加速 4 个主要方面回顾了实现实时三维重建的多种优化方案及研究进展,诚然,除此之外肯定还有其他的实时三维重建技术实现方案,限于笔者学识和本文篇幅,未能一一穷尽。可以看出,基于相移条纹分析的实时三维成像技术是一门包含了光学、信号处理、硬件控制及计算机编

程的综合类技术,如何从这些方向着手进一步优化实时三维成像技术是一项非常值得深入的研究的工作。

4 发展趋势和面临的挑战

概述了基于相移条纹分析的实时三维成像技术,回顾了实时三维成像的主要优化途径以及相应的研究进展。基于相移条纹分析的实时三维成像技术能够快速、高精度地重建动态场景的三维形貌信息,在工业零部件检测、虚拟现实、增材制造、医学监测等关键检测领域有广泛的应用前景。实时三维测量的发展趋势是其技术特点和应用领域的相应检测需求融合,促使实时三维测量的结果为这些应用提供后续加工、显示及时有效的数据,真正实现闭环的检测控制和实时的交互显示。尽管实时三维成像技术已经被大量学者研究,但随着新需求的不断提出和技术的持续发展,要适应不确定噪声干扰、表面反

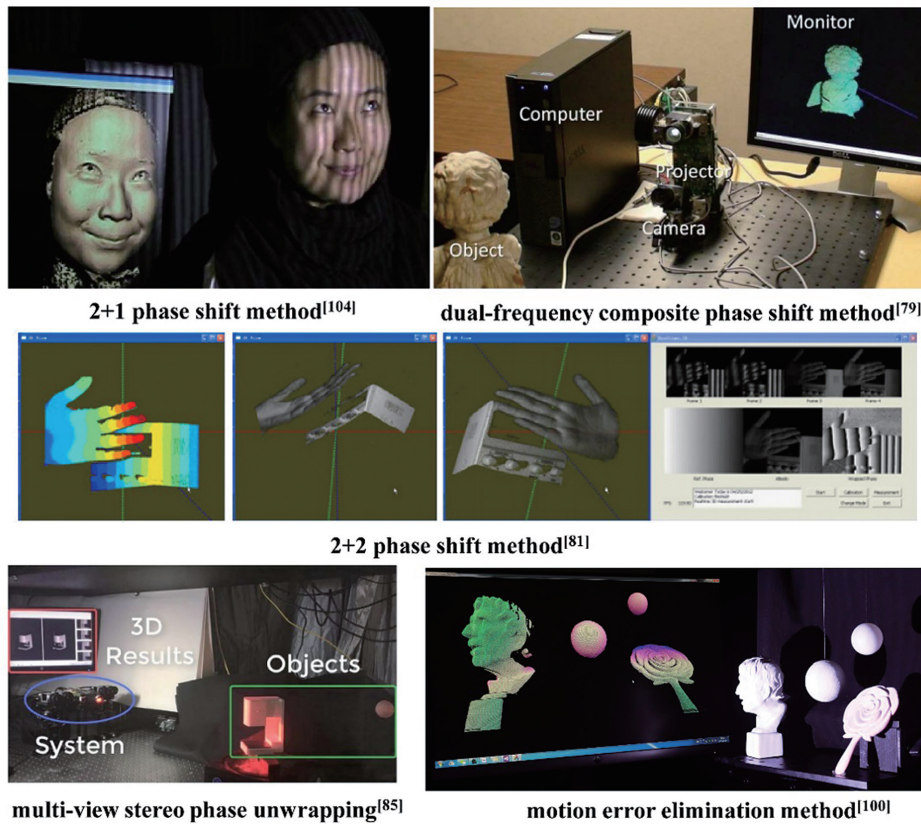


图 11 实时三维重建的结果展示图

Fig. 11 Some results of real-time 3D reconstruction

射率不均匀或具有高光区域等复杂应用环境,实现高抗噪性、高稳定性(适应性)、高效率的实时三维形貌测量仍面临着一些挑战,但可以将新兴的深度学习技术应用于条纹分析^[106-108]、三维重建^[109-110]领域,会取得较好的效果。基于笔者在此领域多年的研究积累,给出个人对该领域中今后工作的一些可能研究方向和重点的看法。

1) 实时三维建模。目前基于单投影仪加单相机的三维测量设备每次只能获得被测物体单视角下的面形信息,要获得被测物体完整的三维点云数据,需要从被测物体的多个角度进行测量。常用的方法多需要使用多相机测量系统^[111]、转台^[112]、机械臂^[113],通过转台或机械臂提供的位置变化信息作为粗配准依据。随后再借助点云配准算法(如迭代最近点算法)迭代实现点云数据的精配准。这不仅需要外部位移装置,增加了系统的复杂性,而且点云配准算法是较为复杂耗时的,很难实现实时的三维数据建模。Qian 等^[114]利用 SIFT 方法提供粗配准变换矩阵,该方法对于手动旋转对象能够实现实时的点云配准。另外平面镜反射原理也有利于实现实时的三维建模^[74]。利用平面镜反射物体背面的变形条纹,实现被测物体 360°的三维数据

建模。借鉴此类思路,可实现鲁棒、高效的实时三维建模。

2) 更高的效率。进一步提高条纹编码效率或改善二值离焦方法的条纹质量^[115]。实时三维重建技术的三维成像的编码效率比频域分析方法低,限制了基于相移条纹分析的实时三维成像技术在高速超高速动态过程三维成像中的表现。因此,如何进一步提高编码效率,扩大其在动态实时过程中的应用仍是学者们面临的一个挑战。该问题的解决可从时序复用、时空编码等思路进行。

3) 更广的适用性。在实际的测量环境中,被测物体表面大多不是理想的漫反射表面,常会出现反射率不均匀,甚至存在高光区域的问题,学者提出了多种高动态范围(HDR)条纹投影技术来解决高光问题^[116-123]。但高动态范围条纹投影技术多采用设备调节方案,且大多会增加所需拍摄的图像数量,不利于实现实时三维测量。因此,在保证方法具有高动态范围测量表现的同时,提升测量的效率是今后需要迎接的一个挑战。为了保证高精度的三维重建结果,还需考虑被测物体表面颜色和彩色纹理贴图对重建精度的影响。对于应用于低信噪比环境下的实时三维重建技术,还需提升算法的鲁棒性及适

用性。

4) 更多维度的信息获取。结构光三维成像技术大都被应用到三维形貌测量中,但在不同的测量环境中,常常需要获取更多维度的信息,如三维形变场、温度变化、光谱成分等。如 Heist 等^[39]利用 GOBO 投影方法,配合高光谱相机实现宏观物体的 3D 形状、光谱特征、时间变化的 5D 高光谱三维成像^[40];该课题组^[41]进而通过 GOBO 投影技术和附加的高速红外相机实现了三维热成像,为医学成像、精密农业或光学分类等领域提供重要的测量数据。Wu 等^[124]对于具有丰富纹理的表面,通过采用数字图像相关(DIC)技术辅助相移条纹分析方法来实现复杂动态场景的三维形貌、位移及形变测量,该技术可以应用于冲撞过程中的形变检测、受力塌陷实验、旋转应力监测等方面。

作为一项服务于工业检测、生产生活的应用技术,三维成像技术有着强劲的发展势头,而随着智能制造、AR/VR 等应用领域的推广,必然会对实时三维成像技术提出新的要求和挑战。随着这些要求和挑战的变化,实时三维成像技术也将会进一步得到完善和发展。

参 考 文 献

- [1] Chen F, Brown G M, Song M M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 10-22.
- [2] Blais F O. Review of 20 years of range sensor development [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 231-243.
- [3] Salvi J, Fernandez S, Pribanic T, et al. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry[J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(8): 2666-2680.
- [4] Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 128-160.
- [5] Zhang Z H. Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(8): 1097-1106.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 35(5): 263-284.
- [13] Su X Y, Chen W J. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 42(3): 245-261.
- [14] Gutmann B, Weber H. Phase unwrapping with the branch-cut method: role of phase-field direction [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(26): 4802-4816.
- [15] Zappa E, Busca G. Comparison of eight unwrapping algorithms applied to Fourier-transform profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(2): 106-116.
- [16] Ghiglia D C, Romero L A. Minimum L^p -norm two-dimensional phase unwrapping [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(10): 1999-2013.
- [17] Trounev E, Nicolas J M, Maitre H. Improving phase unwrapping techniques by the use of local frequency estimates[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(6): 1963-1972.
- [18] Zebker H A, Lu Y P. Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut, least-squares, and synthesis algorithms[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, 15(3): 586-598.
- [19] Huntley J M, Saldner H. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(17): 3047-3052.
- [20] Ding Y, Xi J T, Yu Y G, et al. Recovering the absolute phase maps of two fringe patterns with selected frequencies [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2518-2520.
- [21] Wang Y J, Zhang S. Novel phase-coding method for

- absolute phase retrieval[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 2067-2069.
- [22] Nguyen H, Nguyen D, Wang Z, et al. Real-time, high-accuracy 3D imaging and shape measurement [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(1): A9-A17.
- [23] Lei Z K, Wang C L, Zhou C L. Multi-frequency inverse-phase fringe projection profilometry for nonlinear phase error compensation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 66: 249-257.
- [24] Jiang C, Jia S H, Dong J, et al. Multi-frequency color-marked fringe projection profilometry for fast 3D shape measurement of complex objects[J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 24152-24162.
- [25] Cheng Y Y, Wyant J C. Multiple-wavelength phase-shifting interferometry[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(6): 804.
- [26] Creath K, Cheng Y Y, Wyant J C. Contouring aspheric surfaces using two-wavelength phase-shifting interferometry [J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1985, 32(12): 1455-1464.
- [27] Sansoni G, Carocci M, Rodella R. Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(31): 6565-6573.
- [28] Zhang S, Huang P S. Novel method for structured light system calibration [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(8): 083601.
- [29] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [30] Li W S, Su X Y, Liu Z B. Large-scale three-dimensional object measurement: a practical coordinate mapping and image data-patching method [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(20): 3326-3333.
- [31] Su X Y, Zhou W S, von Bally G, et al. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating [J]. *Optics Communications*, 1992, 94(6): 561-573.
- [32] Xian T, Su X Y. Area modulation grating for sinusoidal structure illumination on phase-measuring profilometry [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(8): 1201-1206.
- [33] Guan Y J, Yin Y K, Li A, et al. Dynamic 3D imaging based on acousto-optic heterodyne fringe interferometry[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3678-3681.
- [34] Fujigaki M, Sakaguchi T, Murata Y. Development of a compact 3D shape measurement unit using the light-source-stepping method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 85: 9-17.
- [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] Grosse M. Fast data acquisition for three-dimensional shape measurement using fixed-pattern projection and temporal coding[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(10): 100503.
- [37] Schaffer M, Grosse M, Harendt B, et al. Statistical patterns: an approach for high-speed and high-accuracy shape measurements [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(11): 112205.
- [38] Wissmann P, Forster F, Schmitt R. Fast and low-cost structured light pattern sequence projection[J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 24657-24671.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Landmann M, Heist S, Dietrich P, et al. High-speed 3D thermography [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 121: 448-455.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] Xue J P, Zhang Q C, Li C H, et al. 3D face profilometry based on galvanometer scanner with infrared fringe projection in high speed [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(7): 1458.
- [46] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 106: 119-131.
- [47] Lei S Y, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [48] Zhang S. Flexible 3D shape measurement using

- projector defocusing: extended measurement range [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(7): 934-936.
- [49] Ayubi G A, Ayubi J A, Di Martino J M, et al. Pulse-width modulation in defocused three-dimensional fringe projection [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3682-3684.
- [50] Wang Y J, Zhang S. Optimal pulse width modulation for sinusoidal fringe generation with projector defocusing[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(24): 4121-4123.
- [51] Zuo C, Chen Q, Feng S, et al. Optimized pulse width modulation pattern strategy for three-dimensional profilometry with projector defocusing [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(19): 4477-4490.
- [52] Lohry W, Zhang S. 3D shape measurement with 2D area modulated binary patterns[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(7): 917-921.
- [53] Wang Y J, Zhang S. Three-dimensional shape measurement with binary dithered patterns [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(27): 6631-6636.
- [54] Dai J F, Zhang S. Phase-optimized dithering technique for high-quality 3D shape measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(6): 790-795.
- [55] 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.
- [56] Li B W, Wang Y J, Dai J F, et al. Some recent advances on superfast 3D shape measurement with digital binary defocusing techniques [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 54: 236-246.
- [57] Zhang S, van der Weide D, Oliver J. Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement [J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9684-9689.
- [58] 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.
- [59] Boyer K L, Kak A C. Color-encoded structured light for rapid active ranging [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987, 9(1): 14-28.
- [60] Pagès J, Salvi J, Collewet C, et al. Optimised De Bruijn patterns for one-shot shape acquisition [J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23(8): 707-720.
- [61] Mac Williams F J, Sloane N J A. Pseudo-random sequences and arrays [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1976, 64(12): 1715-1729.
- [62] Sansoni G, Corini S, Lazzari S, et al. Three-dimensional imaging based on Gray-code light projection: characterization of the measuring algorithm and development of a measuring system for industrial applications [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(19): 4463-4472.
- [63] Inokuchi S, Sato K, Matsuda F. Range imaging system for 3-D object recognition [EB/OL]. [2021-03-23]. https://www.researchgate.net/publication/243766657_Range_imaging_system_for_3-d_object_recognition.
- [64] Pan B, Qian K M, Xie H M, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(6): 062001.
- [65] Lohry W, Zhang S. High-speed absolute three-dimensional shape measurement using three binary dithered patterns [J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26752-26762.
- [66] 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.
- [67] Wissmann P, Schmitt R, Forster F. Fast and accurate 3D scanning using coded phase shifting and high speed pattern projection [C]//2011 International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission, May 16-19, 2011, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2011: 108-115.
- [68] Wang Y C, Liu K, Hao Q, et al. Period coded phase shifting strategy for real-time 3-D structured light illumination [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(11): 3001-3013.
- [69] Zhang Y Y, Xiong Z W, Wu F. Unambiguous 3D measurement from speckle-embedded fringe [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(32): 7797-7805.
- [70] Tao T Y, Chen Q, Da J, et al. Real-time 3-D shape measurement with composite phase-shifting fringes and multi-view system [J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20253-20269.
- [71] Wu G, Wu Y, Li L, et al. High-resolution few-pattern method for 3D optical measurement [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(14): 3602-3605.
- [72] 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.
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.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] 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.
- [77] Zheng D, Kemao Q, Da F, 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.
- [78] He X Y, Zheng D L, Qian K M, et al. Quaternary gray-code phase unwrapping for binary fringe projection profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 121: 358-368.
- [79] 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.
- [80] 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.
- [81] 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.
- [82] Weise T, Leibe B, van Gool L. Fast 3D scanning with automatic motion compensation[C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-22, 2007, Minneapolis, MN, USA. New York: IEEE Press, 2007.
- [83] Li Z W, Zhong K, Li Y F, et al. Multiview phase shifting: a full-resolution and high-speed 3D measurement framework for arbitrary shape dynamic objects[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1389-1391.
- [84] An Y T, Hyun J S, Zhang S. Pixel-wise absolute phase unwrapping using geometric constraints of structured light system[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18445-18459.
- [85] Tao T Y, Chen Q, Feng S J, et al. High-speed real-time 3D shape measurement based on adaptive depth constraint[J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 22440-22456.
- [86] Lu L, Suresh V, Zheng Y, et al. Motion induced error reduction methods for phase shifting profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 141: 106573.
- [87] Zhang S, Yau S T. High-speed three-dimensional shape measurement system using a modified two-plus-one phase-shifting algorithm[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(11): 113603.
- [88] Lu L, Xi J T, Yu Y G, et al. New approach to improve the accuracy of 3-D shape measurement of moving object using phase shifting profilometry[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30610-30622.
- [89] Lu L, Xi J T, Yu Y G, et al. New approach to improve the performance of fringe pattern profilometry using multiple triangular patterns for the measurement of objects in motion[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(11): 112211.
- [90] Lu L, Ding Y, Luan Y S, et al. Automated approach for the surface profile measurement of moving objects based on PSP[J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 32120-32131.
- [91] Feng S J, Zuo C, Tao T Y, et al. Robust dynamic 3-D measurements with motion-compensated phase-shifting profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 103: 127-138.
- [92] Wang Y, Liu Z, Jiang C, et al. Motion induced phase error reduction using a Hilbert transform[J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34224-34235.
- [93] Liu X R, Tao T Y, Wan Y Y, et al. Real-time motion-induced-error compensation in 3D surface-shape measurement[J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25265-25279.
- [94] Wang Y J, Suresh V, Li B W. Motion-induced error reduction for binary defocusing profilometry via additional temporal sampling[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 23948-23958.
- [95] Liu Z P, Zibley P C, Zhang S. Motion-induced error compensation for phase shifting profilometry[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12632-12637.
- [96] Cong P Y, Xiong Z W, Zhang Y Y, et al. Accurate dynamic 3D sensing with Fourier-assisted phase shifting[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2015, 9(3): 396-408.
- [97] Li B W, Zhang S. Superfast high-resolution absolute 3D recovery of a stabilized flapping flight process[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27270-27282.
- [98] Li B W, Liu Z P, Zhang S. Motion-induced error reduction by combining Fourier transform

- profilometry with phase-shifting profilometry [J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 23289-23303.
- [99] Qian J M, Tao T Y, Feng S J, et al. Motion-artifact-free dynamic 3D shape measurement with hybrid Fourier-transform phase-shifting profilometry [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2713-2731.
- [100] 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.
- [101] Gao W J, Qian K M. Parallel computing in experimental mechanics and optical measurement: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(4): 608-617.
- [102] Wang T Y, Qian K M. Parallel computing in experimental mechanics and optical measurement: a review (II) [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 104: 181-191.
- [103] Karpinsky N L, Hoke M, Chen V, et al. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement on graphics processing unit[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(2): 024105.
- [104] Zhang S, Royer D, Yau S T. GPU-assisted high-resolution, real-time 3-D shape measurement [J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9120-9129.
- [105] Zhan G M, Tang H W, Zhong K, et al. High-speed FPGA-based phase measuring profilometry architecture [J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10553-10564.
- [106] 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.
- [107] Spoorthi G E, Gorthi S, Gorthi R K S S. PhaseNet: a deep convolutional neural network for two-dimensional phase unwrapping [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2019, 26(1): 54-58.
- [108] Feng S J, Chen Q, Gu G H, et al. Fringe pattern analysis using deep learning [J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(2): 025001.
- [109] van der Jeught S, Dirckx J J J. Deep neural networks for single shot structured light profilometry [J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): 17091-17101.
- [110] 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.
- [111] Wang P, Zhang Y J, Sun C K, et al. Multi-camera three-dimensional measurement system using an image stitching method based on flexible calibration target positioning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0412003.
- 王鹏, 张颖杰, 孙长库, 等. 基于柔性靶标定实现图像拼接的多相机三维测量系统 [J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0412003.
- [112] Liu X L, Peng X, Chen H L, et al. Strategy for automatic and complete three-dimensional optical digitization [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(15): 3126-3128.
- [113] Nießner M, Zollhöfer M, Izadi S, et al. Real-time 3D reconstruction at scale using voxel hashing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(6): 1-11.
- [114] 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.
- [115] Cai N, Chen Z B, Lin B, et al. High-quality three-dimensional shape measurement based on binary particle swarm dithering optimization [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1004003.
- 蔡宁, 陈浙泊, 林斌, 等. 基于离散粒子群抖动优化的高质量三维形貌测量 [J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1004003.
- [116] Mariottini G L, Scheggi S, Morbidi F, et al. Planar mirrors for image-based robot localization and 3-D reconstruction [J]. *Mechatronics*, 2012, 22(4): 398-409.
- [117] Waddington C, Kofman J. Modified sinusoidal fringe-pattern projection for variable illuminance in phase-shifting three-dimensional surface-shape metrology [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(8): 084109.
- [118] Zhang S, Yau S T. High dynamic range scanning technique [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(3): 033604.
- [119] Ri S, Fujigaki M, Morimoto Y. Intensity range extension method for three-dimensional shape measurement in phase-measuring profilometry using a digital micromirror device camera [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(29): 5400-5407.
- [120] Feng S J, Zhang Y Z, Chen Q, et al. General solution for high dynamic range three-dimensional shape measurement using the fringe projection technique [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 59: 56-71.
- [121] Feng S J, Zhang L, Zuo C, et al. High dynamic range 3D measurements with fringe projection profilometry: a review [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29: 122001.
- [122] Guo Z N, Liu X H, Zhang Z H. Simulation and verification of three-dimensional shape measurement method for composite surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19):

191202.

郭志南, 刘小红, 张宗华. 复合表面三维形貌测量方法的仿真与验证[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 191202.

- [123] Feng W, Tang S J, Zhao X D, et al. Three-dimensional shape measurement method of high-reflective surfaces based on adaptive fringe-pattern [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0512003.

冯维, 汤少靖, 赵晓冬, 等. 基于自适应条纹的高反光表面三维面形测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0512003.

- [124] 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.