

文章编号 1004-924X(2025)07-1065-26

MEMS 振镜式结构光三维重建综述

韩 民¹, 张琛萍², 张宗华^{2*}, 李星辉^{1*}

(1. 清华大学 深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055;

2. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401)

摘要: 结构光三维重建是智能系统感知三维现实世界的上游环节, 在工业检测、智能制造、生物医药、智能机器人视觉引导、虚拟现实、具身智能等未来产业展现出很大的应用潜力。本文总结了常见的条纹投影技术, 重点分析了当下主流的 DLP 条纹投影技术和新型 MEMS 振镜式条纹投影技术, 并从工作原理、性能指标及特点等维度进行综合性对比, 展示出 MEMS 振镜式结构光技术的发展潜力。针对 MEMS 结构光的非逆反相机特性导致的标定困难问题, 总结了专门适配 MEMS 结构光系统的具有物理可解释的标定模型。不同于 DLP 结构光技术, 采用激光束扫描方式的 MEMS 结构光具有独特的误差源, 对 MEMS 结构光系统的特有误差源进行了总结和分析, 为进一步提高其测量精度指明方向。最后, 介绍了结构光的具体应用, 并展望了 MEMS 结构光的未来发展趋势。

关键词: 结构光; 三维重建; MEMS 振镜式; 条纹投影轮廓术; 误差源; 系统标定

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253307.1065 **CSTR:** 32169.14.OPE.20253307.1065

Review of MEMS vibration-mirror-based 3D reconstruction of structured light

HAN Min¹, ZHANG Chenping², ZHANG Zonghua^{2*}, LI Xinghui^{1*}

(1. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

* Corresponding author, E-mail: zh Zhang@hebut.edu.cn; li.xinghui@sz.tsinghua.edu.cn

Abstract: Structured light-based 3D reconstruction serves as a fundamental component in the perception of the three-dimensional real world by intelligent systems, exhibiting significant potential across various industrial domains such as industrial inspection, intelligent manufacturing, biomedicine, robotic vision guidance, virtual reality, and embodied intelligence. This study first reviews prevalent fringe projection techniques, emphasizing both the established mainstream DLP fringe projection and the novel MEMS mirror-based fringe projection technologies. A comprehensive comparison is conducted regarding operational principles, performance metrics, and respective advantages and limitations, highlighting the promising developmental trajectory of MEMS mirror-based structured light technology. Subsequently, calibration chal-

收稿日期: 2024-12-16; 修订日期: 2025-01-19.

基金项目: 深圳市自然科学基金基础研究面上项目 (No. JCYJ20240813112003005); 国家自然科学基金资助项目 (No. U2341275, No. 52075147); 河北省教育厅科学研究项目 (No. JZX2024021)

allenges arising from the non-invertible camera characteristics inherent to MEMS structured light are addressed by summarizing several physically interpretable calibration models tailored for MEMS systems. Distinct from DLP structured light, MEMS structured light employs laser beam scanning and introduces unique error sources, which are systematically analyzed to inform future strategies for measurement accuracy enhancement. Finally, the applications of structured light are discussed, and future development trends of MEMS structured light technology are projected.

Key words: structured light; 3D reconstruction; MEMS vibration mirror; fringe projection profilometry; ; error source; system calibration

1 引言

三维重建是指被测物体的三维形貌恢复技术,目前在智能机器人、工业检测、文物复原和医疗成像等领域有着广泛应用^[1-10]。该技术包括被动式的立体视觉法、主动式面结构光法^[11]、激光三角法(即线扫相机)^[12],以及飞行时间法^[13]等。其中,被动式三维测量通常利用多个相机来拍摄被测物体,基于图像间的视差来计算被测物体的深度信息。该方法具有结构简单、低成本的优点,但在表面纹理特征不明显的场景中,其重建精度仍需进一步提升^[14]。与之相比,主动式三维测量技术在纹理特征不明显的区域仍具有较高的重建精度,其额外的结构光光源给被测区域附加一个相位信息,从而提高了被测物体三维形貌数据的精确性和完整性。激光三角法使用三角测距原理而非相位信息来重建^[15],然而由于其线扫特点,在速度上通常低于面结构光法。飞行时间法(Time of Flight, TOF)借助激光在探测器和被测物体之间的飞行时间来推算深度信息,通常应用于百米量级的应用场景中。

得益于面测量、高速度、非接触、高精度等优点,结构光三维重建技术得到了深入的研究。然而,常规的数字投影系统受到投影镜头景深的限制,导致重建系统在深度方向的测量能力有限。在深度范围较大的场景中,投影仪失焦会导致严重的重建误差,不利于结构光重建在机器人先进制造等高精度测量领域的应用。

结构光三维重建通过投影正弦条纹图案来恢复被测物体的三维形貌^[16],因而又被称为条纹投影轮廓术(Fringe Projection Profilometry, FPP)。正弦条纹受被测物体的形貌调制,发生

形变,因而相位与深度有关^[17-18]。通过相位恢复算法从条纹图中提取相位信息,再借助标定好的系统参数将最高频的绝对相位转化为被测物体的深度信息,进而实现三维重建。近年来,李星辉团队分别从基于MEMS振镜的结构光三维重建和基于深度学习的结构光三维重建两个方向展开了研究。在MEMS结构光层面上,该团队研究了MEMS结构光特有误差源的链式传导模型^[19]、延时叠加高分辨条纹投影方法^[20]、抗谐波的高精度内外分层相移法^[21],以及适配于MEMS结构光的标定模型^[22-24]等。在深度学习方面,该团队主要研究了单帧相位恢复技术及关键问题^[25-29]。

针对结构光三维重建流程的各个环节,学者们已经开展了较为全面的综述分析。殷永凯等对FPP系统的标定模型进行了综述,详细阐述了基本原理、系统模型、标定方法和精度评估等方面。当系统模型与系统物理工作机制相符时,它才能将相位精确地映射为高度^[30]。除此之外,不同的系统模型在重建复杂度上存在较大的差异。因此,需要建立合适的系统模型来保证高效的三维重建^[31]。张宗华等对结构光三维重建的相位展开技术进行了综述^[32],分析了各种相位展开技术的特点和适用场景,总结了基于相位信息的全场三维测量研究进展^[33],特别是这些技术进步在高动态测量和复杂环境下测量稳定性方面所面临的挑战。李乐阳等^[34]对相位误差补偿技术进行了综述,分析了各类噪声源引起的相位误差,并介绍了相应的补偿方法。李勇等^[35]对条纹投影动态三维表面成像技术进行了综述,介绍了条纹投影三维成像原理、动态图像获取方法,以及高精度动态相位测量方法,分析了相关算法的优

缺点,通过综合考虑光学设计、传感器特性及软件处理能力来进一步提高动态成像系统的性能。毛翠丽等^[36]对相移条纹投影三维形貌测量技术进行了综述,总结并分析了工作原理、系统组成、条纹投影方法和相位误差补偿技术等,为结构光重建在机器人先进制造等领域的应用提供了技术支持。

多频相移法需要多幅图案来提取相位信息,降低了重建速度。为了进一步优化重建速度^[37],软件算法引入基于深度学习的单帧相位恢复技术^[38]。Li等^[39-40]提出了一种基于深度学习的单频复用条纹分析方法,经过适当训练的神经网络来获取无频谱混叠的相位信息。Da^[41]等提出了多尺度特征融合网络,通过单个边缘模式来获取高精度的绝对相位。2020年,Nguyen比较了3种典型的卷积神经网络,发现UNet性能最佳,然后对分支设计^[42-43]和单元设计^[44-45]进行了改进。Wang等^[43]重新设计了UNet++^[46],然后提出了MSU-Net+,获得了1.17 mm的测量精度。Cai等提出了一种渐进式深度提取器,实现了被测物体的深度预测^[45]。Transformer技术与UNet相结合实现了一种高精度的组合结构^[47-48]。Nguyen等^[49]受UNet的启发,设计了一种基于自动编码器的高级网络,可将单个输入图像转换为四个相移图和一个粗略解包裹相位图,通过这些中间输出可以确定包含深度信息的真实相位分布。一种基于深度学习的单帧双投影三维重建方法采用两个投影仪同时投影,实现了大视场重建^[26]。然而,相机的动态范围是有限的,从一个复合光栅分离出的两个投影仪的光栅分别具有相机的一半动态范围,抗噪能力因此降低到原来的一半。

经历了长时间的发展,结构光三维重建技术逐渐走向成熟。然而,传统的结构光三维重建系统通常采用DLP投影仪^[50]。DLP结构光技术在8比特投影速度、二值离焦下的条纹质量和分辨率具有一定的局限性。为此,有学者提出了一种基于MEMS振镜的结构光重建技术。MEMS结构光技术在投影时无需聚焦透镜,提高了在纵向深度较大领域的测量能力^[22,51],具有小体积、大景深、无焦投影等优点。Hu等提出了一种基于MEMS振镜的多激光条纹扫描轮廓仪,通过投射

出高质量的可移动激光条纹,可以在短时间内实现全视场扫描,不需要移动被测物体或摄像头^[52]。这种可移动的激光条纹通过编程控制激光条纹的亮度、宽度和位置等信息,生成高质量图像,完全消除了机械运动带来的噪声,提高了三维重建的效率和精度。Huang等提出了一种基于高斯滤波的八步相移方法来提高光栅的译码精度^[53],并结合线性逆相高模型进行MEMS微振镜的系统标定。Zhang等提出一种高速全场轮廓测量方法^[54],利用MEMS振镜投射激光条纹,其高精度、高速度的特点可以代替机械运动装置,并采用灰度编码和彩色编码相结合的方法,在减少投影帧数的同时保留线结构光测量的优势。Yang等针对表面反射率变化较大的物体,提出了一种混合三维形状测量的方法^[55],开发了双轴MEMS系统,将FPP算法和激光条纹扫描算法相结合,利用数据融合算法对测量结果进行融合输出,显著提高了测量精度和稳定性。Han等针对具有较大标定误差的像素点,提出基于校准误差的频率分布直方图进行像素分类的像素细化方法^[17],提高了像素点与3D映射的准确度。Ma等通过对相位主值本身的误差设置一个阈值^[56],并比较阈值与计算出的相位主值和理论值之间的差异,对展开相位产生的跳跃误差进行了高精度校正。Liu等利用平面度约束和逆线性方法,解决了单轴MEMS微振镜中传统相位高度模型严格的布局约束问题^[57]。Yang等针对单轴MEMS投影仪提出一种光线模型^[58],通过投影仪照明在测量空间中的分布来参数化,并设计了一种灵活的标定策略。这为采用非反相机模型的条纹投影系统提供了一种合适的标定策略,并有效抑制了投影仪亮度非线性引起的误差。

高性能三维重建的实现不仅依赖于软件算法的优化升级,也依赖于硬件技术的发展。MEMS振镜式投影仪根据微振镜的高速谐振运动特性,对条纹光场的方向和强度进行调制,有望实现高精度、高速度的8比特正弦条纹投影。本文对MEMS振镜式结构光三维重建技术进行了综述,以激发更多关于该项技术的思考和研究,助力实现更高性能的三维重建。

2 条纹投影

在结构光三维重建技术中,条纹投影是整个重建流程中最前端的一个环节。结构光技术通过分析条纹图案来获取物体的深度信息,因此,高精度高分辨高速度的条纹投影是实现高性能三维重建的必要条件。

2.1 条纹投影技术分类与对比

如图 1 所示,按照条纹投影原理分类,结构光三维重建系统分为基于干涉、基于物理光栅、基于数字光处理投影仪(DLP)、基于液晶显示器(LCD),以及基于 MEMS 微振镜 5 种。其中,基于 DLP 的结构光系统是当前的主流,但在投影前端有聚焦镜头,因此投影景深是有限的;而基于 MEMS 微振镜的结构光系统则采用激光束扫描

方式,在投影前端无需聚焦透镜,因此获得了大景深投影的优点。

图 2 给出了 5 种结构光技术在分辨率、速度、景深、尺寸和成本上的性能雷达图,部分数据来源于支撑材料^[59]。表 1 列出了 5 种结构光技术的性能指标。首先,基于干涉的结构光系统能够产生精细的条纹图案,因此,在微小物体的测量场合中具有较高的分辨率和较大的景深^[60]。然而,干涉技术无法编程化设计投影图案,且其系统复杂度高、成本昂贵。

基于物理光栅的结构光系统通过固定的物理光栅来投射条纹图案,适用于高精度的应用场合^[7,59]。但是物理光栅投射的条纹图案是固定的,难以实现图案的编程式灵活调整,因此在灵活性方面受到一定限制。除此之外,基于物理光

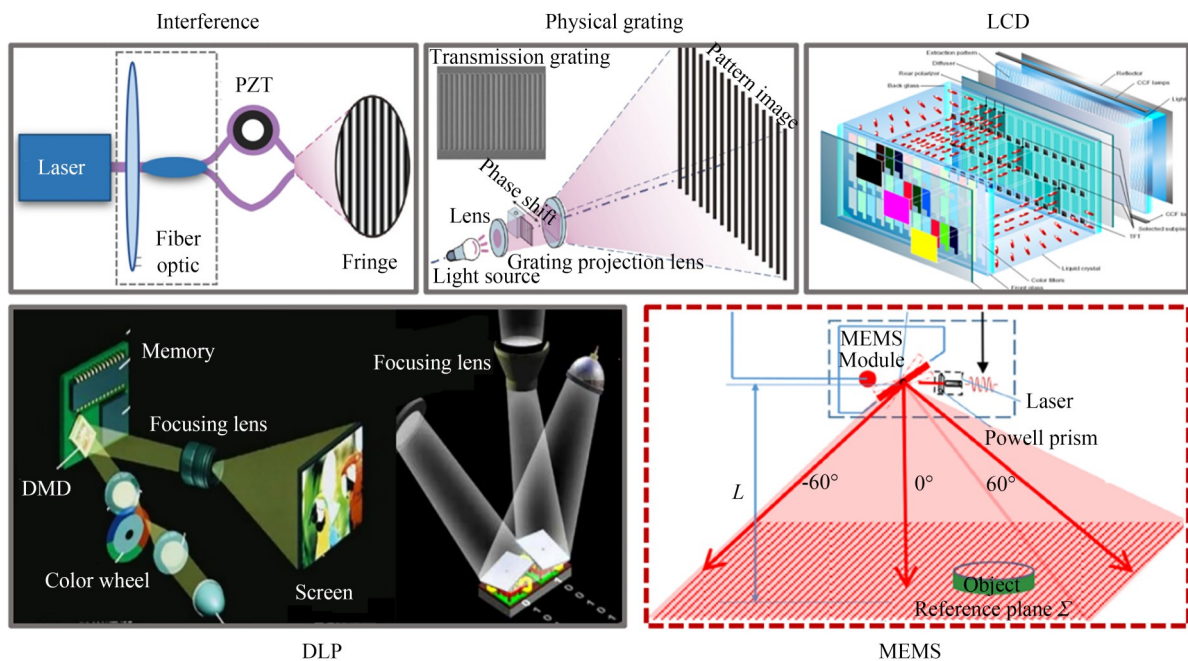


图 1 典型的结构光系统

Fig. 1 Typical structured light systems

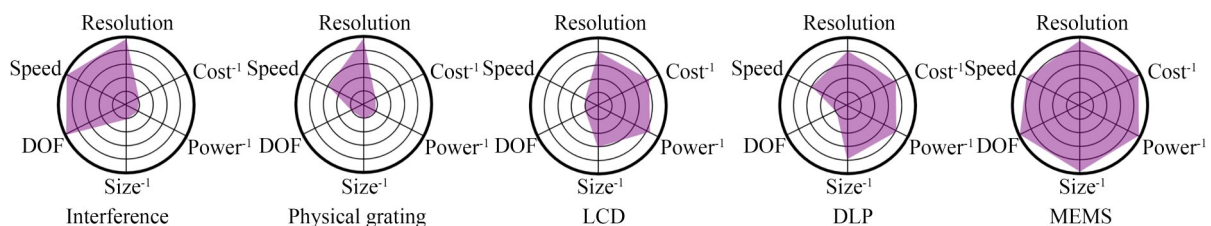


图 2 典型结构光系统的性能雷达图

Fig. 2 Performance radar chart of typical structured light systems

表1 典型结构光系统的性能比较

Tab. 1 Performance comparison of typical structured light systems

Structured light system	Accuracy/mm	Speed/(frame·s ⁻¹)	Depth of field	Resolution	Programmable	Power consumption/W	Cost	Optical efficiency
Interference	10 ⁻¹	/	Large	High	×	~100 W	>\$10 000	Medium
Physical grating	10 ⁻³	~100	Small	High	×	~300 W	>\$10 000	Low
LCD	10 ⁻²	~50	Small	~1 K	✓	~40 W	~\$1 500	Medium
DLP	10 ⁻³	~120	Small	912×1 140(~1 K)	✓	~50 W	~\$2 000	Low
MEMS	10 ⁻³	>1 000	Large	>4 K	✓	~5 W	~\$500	High

栅的投影仪和基于干涉的投影仪均不属于数字投影仪。

基于LCD的结构光系统通过控制液晶单元的透光性生成条纹图案,具有低功耗的优点,在大规模批量化生产时具备较好的成本效益^[61]。然而,LCD的响应速度相对较慢,难以实现高速成像。同时,液晶单元的像素化特性难以满足高精度的测量要求。不过,带有聚焦透镜的投影技术,通常可以通过提高工作距离来获得一个更大的景深。

基于DLP的结构光系统在速度、灵活性和分辨率方面表现良好^[62],因而成为当下结构光研究的主流选择。DLP投影仪的核心部件为数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD),能够以每秒120帧的速度来投影8比特条纹图案。作为一种数字光调制器,DLP系统能够投影任意形状图案。然而,随着对三维数据源需求的不断提高,其投影速度和分辨率也面临着挑战。除此之外,考虑到DMD芯片的成本和复杂的光学设计,DLP系统的成本较高且体积较大。

MEMS振镜式激光束扫描技术是近年来发展起来的条纹投影技术,在速度、分辨率、功率消耗和尺寸上均具有一定的优势。由于MEMS振镜的谐振特性,系统能够实现快速的条纹投射,适用于实时动态的三维重建。此外,MEMS系统的尺寸较小,可以实现高度集成化的结构设计。同时,MEMS投影技术的功率消耗相对较低,整体成本也较为可控。

综上所述,与干涉、物理光栅、LCD和DLP等条纹投影技术相比,MEMS结构光技术在多项性能指标上均具有较强的竞争力,并表现出很大的发展潜力,有望替代DLP结构光技术,成为未来结构光三维重建领域的首选。

2.2 传统条纹投影技术

传统的条纹投影技术主要指以LCD和DLP为代表的投影技术。该技术普遍采用空间光调制器DLP来生成正弦条纹。德州仪器公司的Larry Hornbeck于1987年设计了第一个DLP。DMD是DLP最核心的部件,由阵列式的数字微镜构成。每个数字微镜是一个尺寸为14 μm×14 μm的像元实体,代表一个像素^[63-64]。该阵列通常由上百万个数字微镜组成,微镜个数代表了投影仪的分辨率。数字微镜由电流控制,采用脉冲宽度技术调制数字微镜的开关时间,从而实现灰度的变化。

就正弦条纹的投影速度而言,当工作在8比特模式下时,DLP(型号:4500)的投影速度仅在120 frame/s左右。为了满足高速的结构光三维重建需求,投影仪速度必须要足够快,一些研究采用二值离焦投影技术来提高正弦条纹的投影速度^[65-67]。投影仪工作在1 bit的模式,以每秒上千帧的速度投影二值条纹^[68-69]。投影仪镜头具有离焦效果,可以将二值条纹离焦成为正弦条纹。然而,离焦水平与工作距离有关,当离焦水平不恰当时,会降低条纹投影的质量^[70-71]。如图3所示,DLP投影仪在一定范围内是聚焦的,此时二值条纹无法转化成正弦条纹。当投影仪工作在

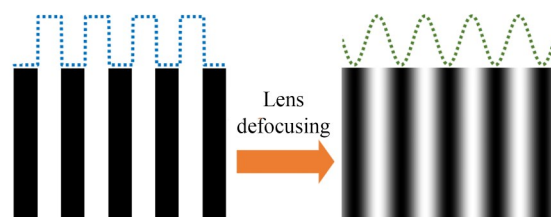


图3 基于二值离焦的正弦条纹投影

Fig. 3 Sinusoidal fringe projection based on binary defocus

聚焦范围之外时,将处于离焦状态。离焦状态下的点扩散函数具有低通滤波器的功能,常表示成高斯函数的形式^[72]:

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi(kR)^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2(kR)^2}\right), \quad (1)$$

其中: k 是一个比例系数, R 是模糊圆的半径,主要与工作距离有关。 kR 表征高斯函数的标准差,也称为扩散参量。假设二值条纹在任意位置处的光强为 $f(x, y)$,离焦后的光强为 $g(x, y)$ 。投影系统可以看成衍射受限非相干线性空不变系统,其离焦前后的光强关系为:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y). \quad (2)$$

对式(2)进行傅里叶变换,则离焦后的光强表达式在频域上为:

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v). \quad (3)$$

由于 $h(x, y)$ 是一个高斯函数,所以其傅里叶变换 $H(u, v)$ 也是一个高斯函数。因此,它具有低通滤波器的特性。滤波器带宽主要与模糊圆的半径有关,而模糊圆半径又与工作距离有关。当工作距离使 R 变大时,滤除的高次谐波就越多。在这种情况下,二值条纹与正弦条纹越相似。然而, R 的变大会使基频分量变小,造成条纹图案对比度和光强调制度的降低,不利于高精度三维重建。

2.3 MEMS 条纹投影技术

2012年,MEMS微振镜首次用于构建结构光系统^[73]。然而,当时的DLP投影技术比MEMS投影技术更加成熟,具有更高的投影质量。直到现在,大多数研究人员仍然主要研究基于DLP的结构光系统,这导致基于MEMS振镜的结构光系统研究更少。近年来,随着MEMS制造工艺的发展,MEMS振镜表现出稳定的谐振特性和精准的扫描角度检测^[74],这提高了广大学者对MEMS结构光技术的研究兴趣^[55, 57, 73, 75-84]。

在结构光三维重建中,基于MEMS微振镜的投影仪通过高速频闪技术来投射二维正弦条纹图案。根据旋转自由度的不同,基于MEMS微振镜的条纹投影可分为基于单轴振镜的条纹投影和基于双轴振镜的条纹投影两类。这两种投影技术的选用依据主要体现在“是否需要正

交投影”和“系统复杂度”两个层面。与单轴振镜相比,双轴振镜可以实现“正交投影”,即能够投影XY两个方向编码的条纹图案。从控制策略的复杂度来看,基于单轴振镜的条纹投影技术更加简单直接,因此复杂度较低,易于系统开发。

2.3.1 基于单轴MEMS微振镜的条纹投影

相关研究已经证明单轴振镜能够稳定投射高质量的条纹图案^[3, 22, 23, 57, 76-78, 80, 84-86]。尽管单轴振镜和双轴振镜在条纹投影策略上有所差异,但其工作原理基本相似。单轴MEMS振镜利用鲍威尔棱镜将点激光转换为横向聚焦、纵向发散的线激光,并依靠其谐振运动特性进行扫描。在扫描过程中,线状光束反射至被测物体上,从而形成二维图案。为了投射二维正弦条纹图案,线激光在时域内被调制。

在时域中,线状激光的功率可以通过中央控制单元(例如FPGA或STM32)进行调制,调制方式包括晶体管-晶体管逻辑(Transistor-Transistor Logic, TTL)调制或模拟调制^[78, 87]。通过模拟调制可以直接投射出正弦条纹图案,该方法无需在投影前端放置聚焦透镜,避免了复杂的光学设计。在TTL调制下,激光可以在低逻辑电平(0 V)与高逻辑电平(通常为5 V)之间快速切换,从而实现激光的快速开关操作。这种调制方式允许激光以特定频率和脉宽发射光脉冲。当线激光在TTL模式下工作时,输出的是矩形波,然而采用脉冲宽度调制技术,可以将矩形波转换为正弦波^[66-69, 71, 88]。

通过对光电探测器发出的角度脉冲信号进行计数,可以获取微振镜的当前扫描角度。根据扫描角度和正弦条纹光强的对应关系,激光器的输出光强被快速调制。单轴微振镜的一维扫描又可以将时域调制的1D线状激光转化为2D条纹图案。条纹图案的空间分辨率与角度间隔有关。随着角度间隔的减小,MEMS投影仪在理论上可以实现比DLP投影仪更高的空间分辨率。图4展示了基于单轴MEMS微振镜的条纹投影原理。当振镜完成固定最小角度间隔的扫描时,振镜的反馈装置会向FPGA发送一个角度脉冲信号。假设FPGA接收到的脉冲数为 n ,则振镜

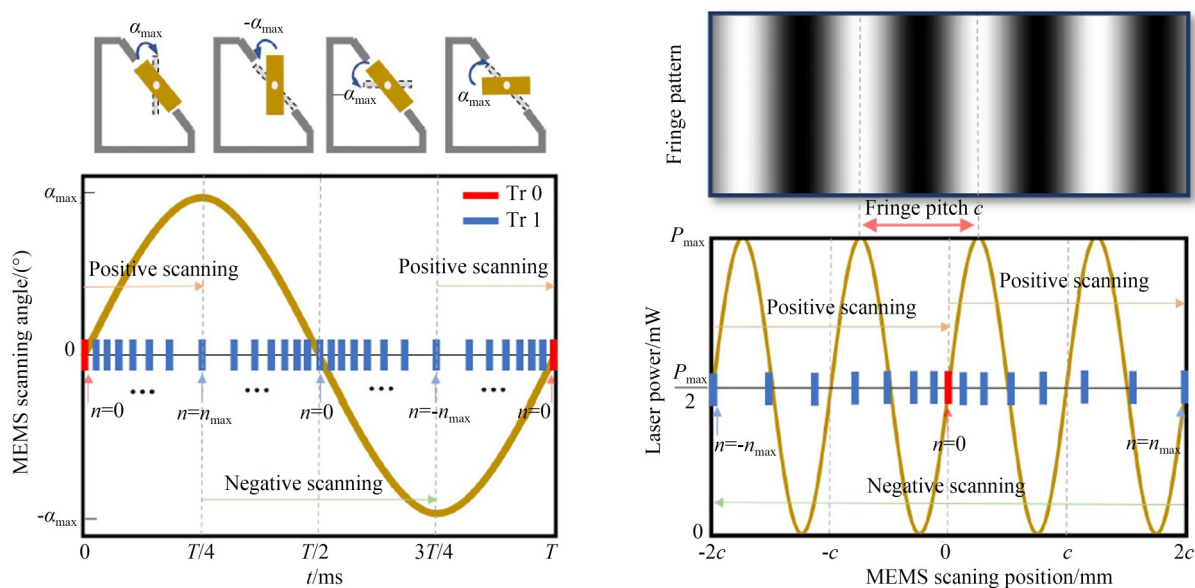


图 4 基于单轴 MEMS 振镜的条纹投影策略

Fig. 4 Fringe projection strategy based on uniaxial MEMS vibration mirror

的当前扫描角度为 $n\delta$ 。根据空间几何关系,激光的扫描角度为振镜扫描角度的两倍:

$$\theta = 2n\delta. \quad (4)$$

假设振镜与参考平面之间的工作距离为 d ,则激光当前的扫描位置为:

$$x = d \cdot \tan(2n\delta). \quad (5)$$

振镜的最大扫描角度为 $\theta_{\max}$ 。假定投射条纹数量为 m ,那么参考平面上的条纹间距为:

$$T = \frac{2d \tan(2\theta_{\max})}{m}. \quad (6)$$

为了在参考平面上形成正弦条纹图案,需要在时域内对激光功率进行调制。联立上述方程,可以推导出激光功率与扫描位置的关系^[17],即:

$$P_{\text{in}} = \frac{P_{\max}}{2} + \frac{P_{\max}}{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi m}{\tan(2\theta_{\max})} \cdot \tan(2n\delta)\right). \quad (7)$$

2.3.2 基于双轴 MEMS 微振镜的条纹投影

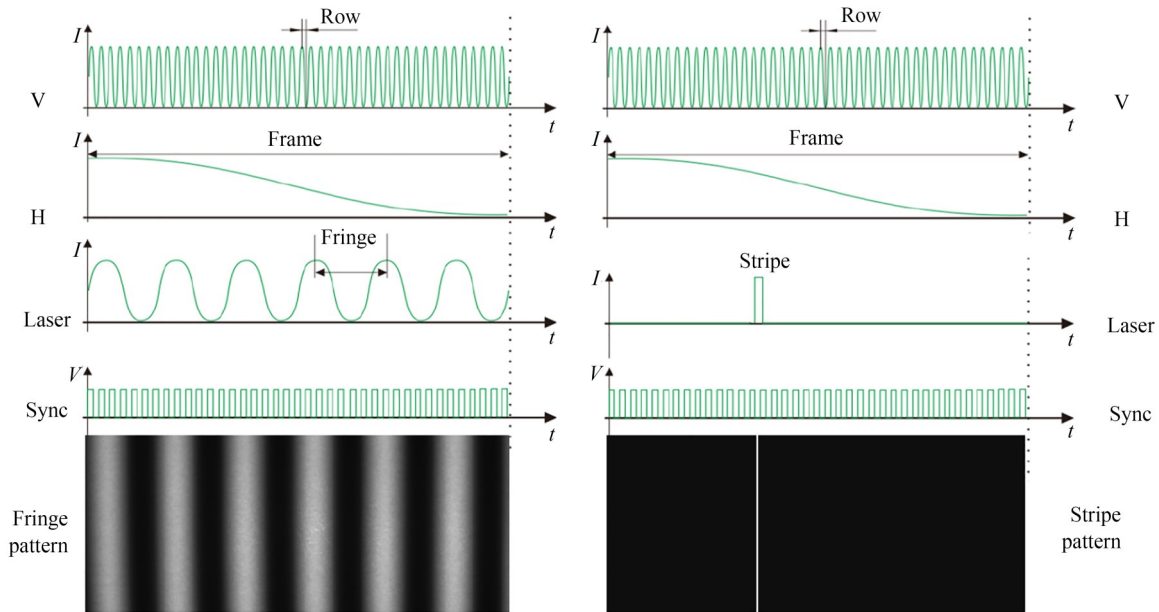
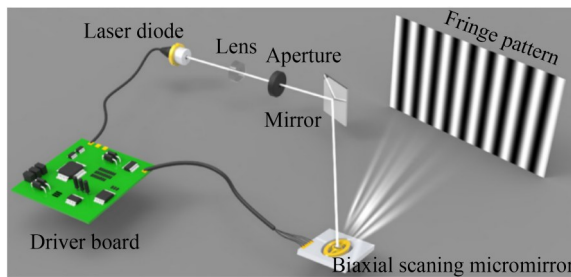
双轴振镜具有两个旋转轴,并通过电流信号驱动。基于双轴 MEMS 微振镜的条纹投影采用点状光源。与使用 Powell 棱镜生成线状光不同,双轴振镜的快速轴沿纵向方向快速扫描,将点状激光转换为线状激光。同时,振镜的慢速轴沿横向方向扫描,从而将线状激光延展成面状激光^[55]。

图 5 展示了基于双轴振镜的条纹投影的信号控制方法。H 和 V 分别代表 MEMS 微振镜的水平和垂直驱动信号,Sync 为行同步信号,Laser 信号用于调节激光二极管的发光强度。在条纹投影过程中,水平和垂直轴均工作在谐振模式下,并且沿着 H 方向和 V 方向的调制均为正弦波。图 6 展示了基于双轴振镜的条纹投影系统。该系统使用单模激光二极管(LD)作为光源,利用一个非球面透镜来优化调整激光束的焦点,并利用光阑来消除杂散光。双轴振镜的快速轴和慢速轴在电流信号的驱动下同步工作,完成双向的激光束扫描。与此同时,激光光强在同步信号的控制下被快速调制。

基于双轴和单轴 MEMS 条纹投影在线状光的生成方式有一定的差异。当 Powell 棱镜存在明显缺陷时,单轴系统生成的条纹图案可能会受到散斑噪声的影响^[89]。相反,如果棱镜具有良好的光学特性,单轴方案由于具有更为简洁的控制和结构设计,可能优于双轴方案。

2.3.3 MEMS 振镜式高分辨条纹投影

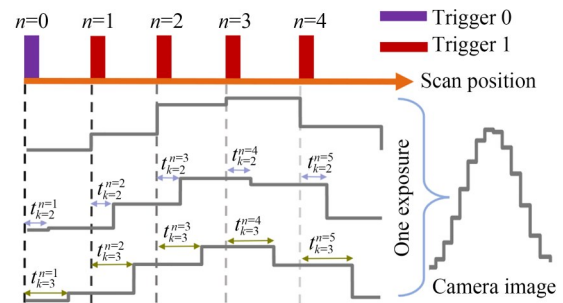
投影仪的像素分辨率决定了投影图案的细腻程度,高像素分辨率有利于增强投影仪的高频条纹投影能力和空间分辨力。为此,一种基于延时叠加策略的 MEMS 高分辨条纹投影方法

图 5 基于双轴振镜的条纹投影的信号控制^[55]Fig. 5 Signal control of fringe projection based on biaxial vibration mirror^[55]图 6 基于双轴 MEMS 微振镜的条纹投影原理^[55]Fig. 6 Principle of fringe projection based on a biaxial MEMS vibration mirror^[55]

被提出^[22]。该方法通过细分扫描角度和延迟调整激光强度,实现了多个低分辨率条纹的投影叠加,最终在相机的单次曝光期间生成高分辨率图像。

图 7 展示了基于延时叠加策略的 MEMS 高分辨条纹投影方法的基本原理。首先, MEMS 振镜的扫描角度由角度传感器实时监测,系统根据角度脉冲信号(即 Trigger 0 和 Trigger 1)来调整激光器的光功率。在相机的一次曝光时间内, MEMS 振镜能快速投影多个低分辨率的条纹图案。一方面,这些低分辨率的图像之间具有一定的“延时错位”;另一方面,相机的曝光功能具有光强累加效果,可以将一次曝光时间内投影的多幅低分辨条纹光场做加法运算。最终, MEMS 投

影仪投影出的低分辨率图案经过相机的一次曝光叠加成一幅高分辨图像。这个过程相当于细化最小角度间隔,完成像素插值,进而成倍地提升 MEMS 投影仪的像素分辨率。

图 7 基于延时叠加的高分辨率条纹投影^[22]Fig. 7 High-resolution fringe projection based on delay superimposition^[22]

延时叠加高分辨投影方法的整体流程可分为两个阶段。在数据加载阶段,该方法需要设定角度间隔的细分数,然后根据设定的细分数计算每个角度脉冲到来时所要执行的延迟时间和对应的光功率。这些数据被预先加载到 MEMS 投影仪中。在投影阶段,首先启动相机曝光, MEMS 投影仪进入第一个扫描周期,第一个扫描周期内所有的延时均为 0。而在其他每个扫描周

期内,控制器在接收到脉冲信号后进行延迟计时,延时结束后根据预加载的数据调整激光光强。最后,相机结束曝光,生成一个由多个投影图案叠加而成的高分辨条纹图案。由于普通相机的帧率远低于MEMS投影仪的帧率,因此,单次曝光时间内投影仪可以投影多次。该方法充分发挥了MEMS投影仪高速投影的优势,在不增加数据采集耗时的情况下,显著提升了MEMS投影仪的像素分辨率。

3 MEMS 结构光系统标定

传统的结构光系统已经演化出很多的高精度标定方法^[90-94]。结构光系统物理机制的差异势必导致其标定模型存在一定差异^[95]。MEMS微振镜的单轴投影特性和无聚焦投影结构,使之不能当成逆相机来标定。因此,以立体视觉三角标定法为代表的传统DLP标定方法不适用于MEMS系统。除此之外,从模型最初设计目标来看,DLP标定方法通常没有考虑MEMS结构光系统振镜扫描式的条纹投影原理。直接采用传统DLP标定方法来标定新型MEMS结构

光系统,会产生可解释性差、标定精度低等问题。

在标定模型设计上,需要着重考虑MEMS微振镜的投影特性^[96-97]。MEMS结构光系统的标定模型目前主要有3种,其中,联合模型是根据MEMS结构光物理工作机制推导出的,因此是一种可解释的、专门适配MEMS结构光系统的高精度标定方法。等相位面模型借助倒数多项式提高了模型拟合自由度,能够应对图像畸变问题,也可以实现高精度系统标定,但需要额外注意多项式过拟合风险。相角模型在不明显降低标定精度的情况下,仅需较少的标定图像就可以完成系统标定,因此适用于快速标定的场景。

3.1 联合模型

MEMS投影仪采用无透镜结构和激光束扫描方式。如图8所示,严格根据MEMS结构光系统的物理特性进行数学建模,可以推导出一种MEMS结构光系统的专用标定模型。由于它是由激光扫描坐标系统和相机坐标系统联合求解,因此,这种标定模型被命名为联合模型^[17,24]。

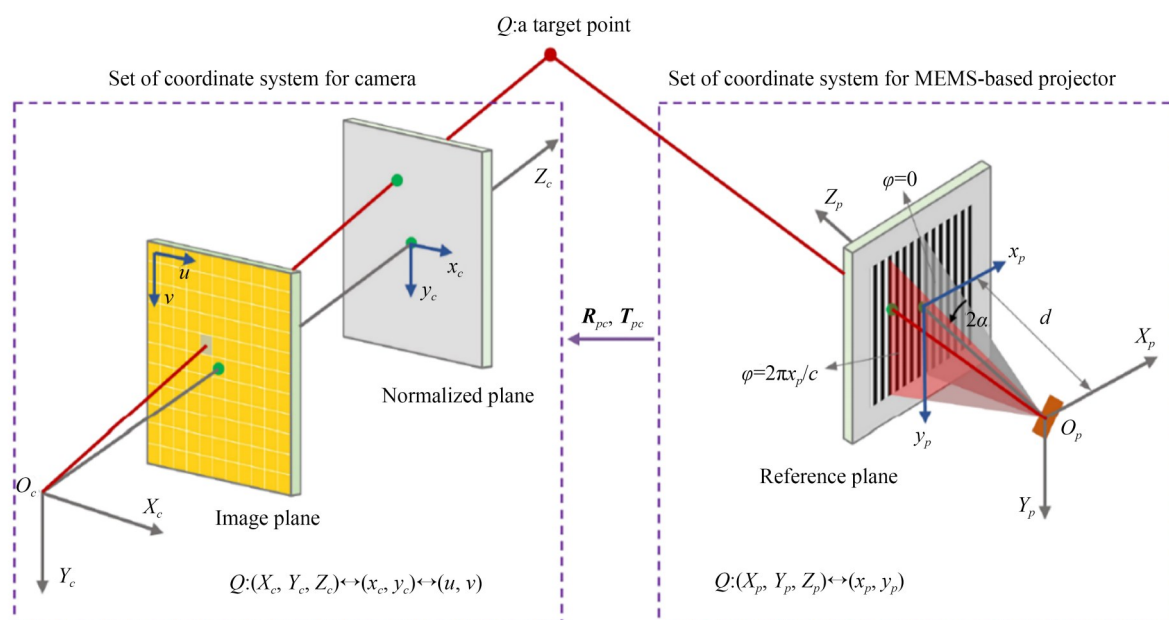


图8 基于微振动镜运动特性的系统建模

Fig. 8 System modeling based on motion characteristics of vibrating mirror

参考平面和投影中心的距离为 d , 且它是一个常数。根据激光束扫描的空间坐标关系可以得出:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \frac{d}{Z_p} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \end{bmatrix}. \quad (8)$$

而相机的针孔模型又满足:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix}. \quad (9)$$

投影仪坐标系经过一个旋转矩阵 $R \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$

和平移矩阵 $T_{pc} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 可以转化成相机坐标系。因此, 投影仪三维坐标 (X_p, Y_p, Z_p) 和相机三维坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 的关系为:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R_{pc} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} + T_{pc}. \quad (10)$$

通过联立式 (8) ~ 式 (10), 消中间变量 $x_p, y_p, X_p, Y_p, Z_p, X_c, Y_c$, 最终推出:

$$Z_c = \frac{(r_{22}r_{33} - r_{23}r_{32})t_1 + (r_{13}r_{32} - r_{12}r_{33})t_2 + (r_{12}r_{23} - r_{13}r_{22})t_3 + ((r_{22}r_{31} - r_{21}r_{32})t_1 + (r_{11}r_{32} - r_{12}r_{31})t_2 + (r_{12}r_{21} - r_{11}r_{22})t_3)x_p/d}{r_{12}r_{23} - r_{13}r_{22} + (r_{22}r_{33} - r_{23}r_{32})x_c + (r_{12}r_{21} - r_{11}r_{22})x_p/d + (r_{22}r_{31} - r_{21}r_{32})x_c x_p/d + (r_{13}r_{32} - r_{12}r_{33})y_c + (r_{11}r_{32} - r_{12}r_{31})y_c x_p/d}. \quad (11)$$

其中: r_i 和 t_i 分别是旋转矩阵和平移矩阵的元素, 这些元素均是未知的常数。每个扫描位置 x_p 对应一个相位 φ , 且 $\varphi = 2\pi x_p/c$ 。在参考平面上的条纹周期 c 是一个预先设置的常数。将 $\varphi = 2\pi x_p/c$ 代入到式 (11) 中, 然后将常数项合并, 进而推导出两种可解释的 MEMS 系统标定模型。第一种是共享同一套系统参数的全局标定模型^[24]:

$$Z_c = \frac{a_1 + a_2 \varphi}{a_3 + a_4 x_c + a_5 \varphi + a_6 x_c \varphi + a_7 y_c + a_8 y_c \varphi}. \quad (12)$$

第二种是不共享同一套标定参数的逐像素标定模型。在逐像素标定模型中, 每个像素都单独有一套标定参数。对于相机的任一像素点, x_c 和 y_c 可以被视为两个固定不变的常数。在全局模型中, 将这两个常数和其他常数项合并, 进而可以推导出逐像素标定模型的表达式^[17]:

$$Z_c = \frac{a'_1 + a'_2 \varphi}{a'_3 + a'_4 \varphi}. \quad (13)$$

在系统标定过程中, 上述两种模型均可以通过恒等变换来消除掉分式, 进而采用齐次方程组的线性最小二乘法来求解未知的标定参数^[90-92]。除此之外, 公式推导中涉及的是理想的图像坐标, 而实际获取到的是畸变的图像坐标。因此, 在标定参数获取中, 需要利用相机标定好的参数将畸变的图像坐标转换成理想的图像坐标。MEMS 投影仪具有无聚焦透镜的结构, 不存在由聚焦透镜引起的投影畸变。

3.2 等相位面模型

为了解决 MEMS 投影仪的标定问题, Miao

等提出了等相位面模型^[3,98]。如图 9 所示, 等相位面是由线激光在一定的扫描角度形成的光平面。相机的光心与被测点在相机像素平面上的像点形成反投影射线。被测点是光平面与反投影射线的交点。光平面方程、反投影射线方程均可以用符号表示。最后, 通过联立相机反投影射线方程与光平面方程, 可以推导出被测点的三维坐标与相位的映射关系:

$$\begin{aligned} X_c &= \frac{1}{\sum_{n=0}^N a_n \Phi^n} + a_x, \\ Y_c &= \frac{1}{\sum_{n=0}^N b_n \Phi^n} + b_y, \\ Z_c &= \frac{1}{\sum_{n=0}^N c_n \Phi^n} + c_z \end{aligned} \quad (14)$$

该方法在标定模型中考虑了图像的畸变, 因此在分母上产生了高阶多项式。多项式的项数

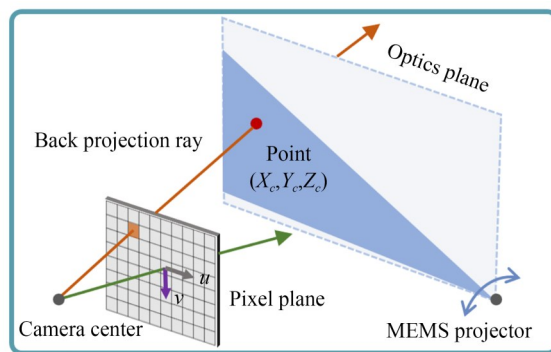


图 9 等相位面模型^[3]

Fig. 9 Isophase plane model^[3]

应当小心选择,避免出现过拟合现象^[91]。为了避免图像畸变对系统标定的影响,目前主要有两类方法。第一类是在标定模型中采用多项式来消除图像畸变的影响;第二类是在标定模型中仍采用理想坐标,而在标定数据获取阶段考虑将畸变坐标转换成理想坐标。这两类方法均可以取得较好的效果,因此两者取其一即可。

3.3 相角模型

如图 10 所示,每个等相位面均对应一个扫描角度,因此 MEMS 结构光系统也可以用相角模型来标定^[25,32]。由于绝对相位的线性变化,不同的光平面对应于不同的相位,并且光平面与相位值具有唯一确定关系。因此,可以根据当前的绝对相位求得等相位面的偏转角度,然后求解等相位面的空间方程系数 A, B, C, D ,最后以辅助求解等相平面上目标点的 3D 坐标:

$$\begin{aligned} X &= \frac{-uD}{uA + vB + C}, \\ Y &= \frac{-vD}{uA + vB + C}, \\ Z &= \frac{-D}{uA + vB + C}. \end{aligned} \quad (15)$$

相角模型只使用两个标定板位置来投影条纹,在维持标定精度不变的情况下减少了需要标定图像的数量。此外,由于相角模型是一种全局的标定模型,所有像素共享同一套标定参数。因此,该方法不需要考虑标定板是否完全覆盖相机视场,就可以实现全视场的三维重建。

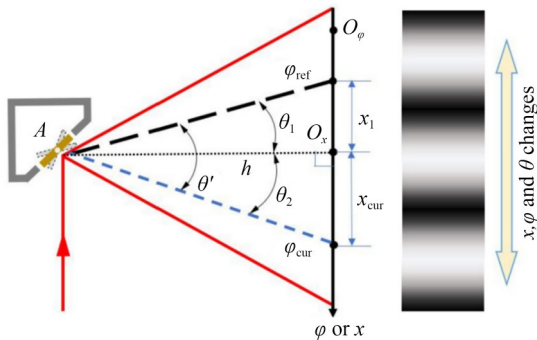


图 10 相角模型^[25]

Fig. 10 Phase-angle model^[25]

4 MEMS 结构光系统的误差源

MEMS 结构光系统与传统的结构光系统具有一些共性的误差源。然而,由于物理机制的不同,MEMS 结构光系统还具有特有的误差源。误差源在三维重建流程中出现的先后顺序依次为条纹投影、图像捕获、相位恢复和点云生成^[35,99-101]。其中,MEMS 结构光系统的误差源包括振镜不稳定运动、线激光非理想线宽^[21]、线激光光源噪声、振镜机械旋转初始相移误差、激光光轴与振镜转轴的不重合^[25]等。

4.1 随机噪声

结构光三维重建涉及条纹投影和图像采集,因而不可避免地耦合一些随机噪声。在 MEMS 结构光系统中,随机噪声源主要包括线激光器光源噪声、相机噪声、振镜不稳定运动引入的噪声等。当图像受到随机噪声影响时,通过标准相移法求解的相位会产生相位误差^[102],其表现形式如图 11 所示。

随机噪声可以被认定为标准差为 σ_n 的加性高斯白噪声。在这种情况下,耦合了随机噪声的相移图案为^[103]:

$$\begin{aligned} I_n &= A + B \cos(\phi - \delta_n) = \\ A_0 + \Delta I + B \cos(\phi - \delta_n), \end{aligned} \quad (16)$$

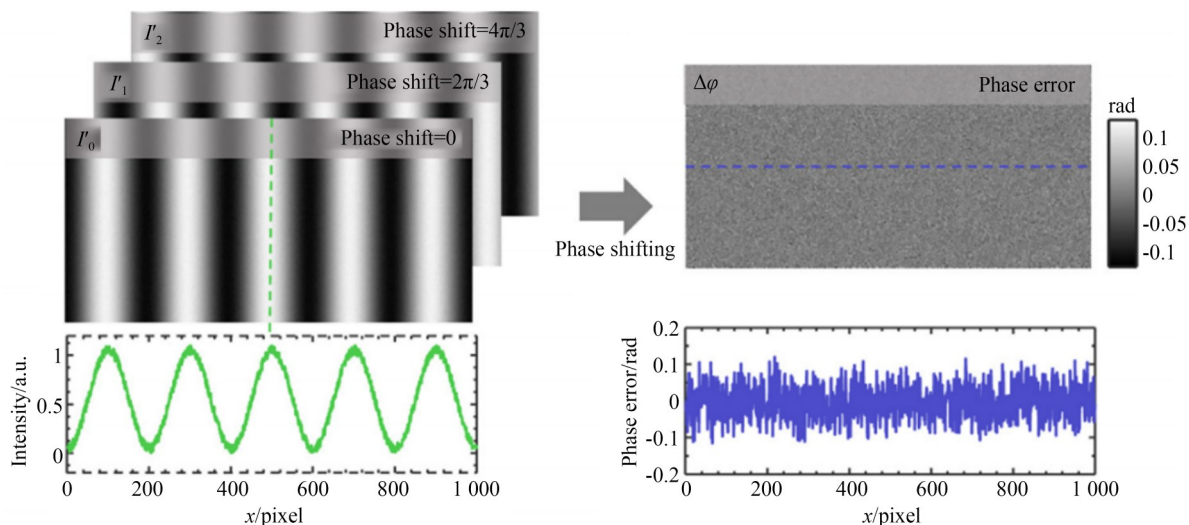
其中: A_0 表示理想情况下的背景光强, ΔI 表示随机噪声, δ_n 为相移量。利用 N 步相移法计算相位,再求解相位对随机噪声的偏导数。进一步,可以推导出相位误差标准差的表达式^[2,103-105]:

$$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \frac{\sigma_n}{B}. \quad (17)$$

如果条纹数目为 f ,那么包裹相位展开后相位范围从 2π 扩展到 $2\pi f$ 。当绝对相位缩放到 $[-\pi, \pi)$ 时,相位误差标准差为:

$$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \frac{\sigma_n}{Bf}. \quad (18)$$

根据式(18),可以考虑三种方式来降低随机噪声对三维重建的影响。第一种方式是增加相移步数,但这会增加数据采集的时间。第二种方式是增大光强调制度 B 。在现实情况下,线激光器发出的线激光并非无限细的。值得注意的是,这里的“线宽”和条纹宽度(即正弦条纹周期)是两个概念。无限细的线宽被称为理想线宽,而

图 11 随机光强噪声造成的相位误差^[2]Fig. 11 Phase error caused by random light intensity noise^[2]

非无限细线宽被称为非理想线宽。如图 12 所示,在 MEMS 结构光系统中,线激光的非理想线宽会以窗口平滑效应的方式降低光强调制度。针对该问题, Han 等通过系统建模的方式提出了线激光非理想线宽的窗口平滑模型^[21],并设计了用来抑制窗口平滑效应的最优条纹数目推荐算法。该方法能确定 MEMS 结构光系统的最优条纹数目,进而获取当前系统配置下的最佳重建精度。第三种方式是通过降低随机噪声水平来降低相

位误差标准差。随着深度学习的不断发展,人们采用卷积神经网络对图像去噪^[106],进而降低随机噪声水平。

4.2 线激光光强波动

标准相移法通常假设不同的相移图在同一个像素位置的背景光强和光强调制度是相等的。然而,在现实测量环境中,受线激光光强波动因素的影响,难以保证这一前提假设。受光强波动影响的相移条纹可以表示为:

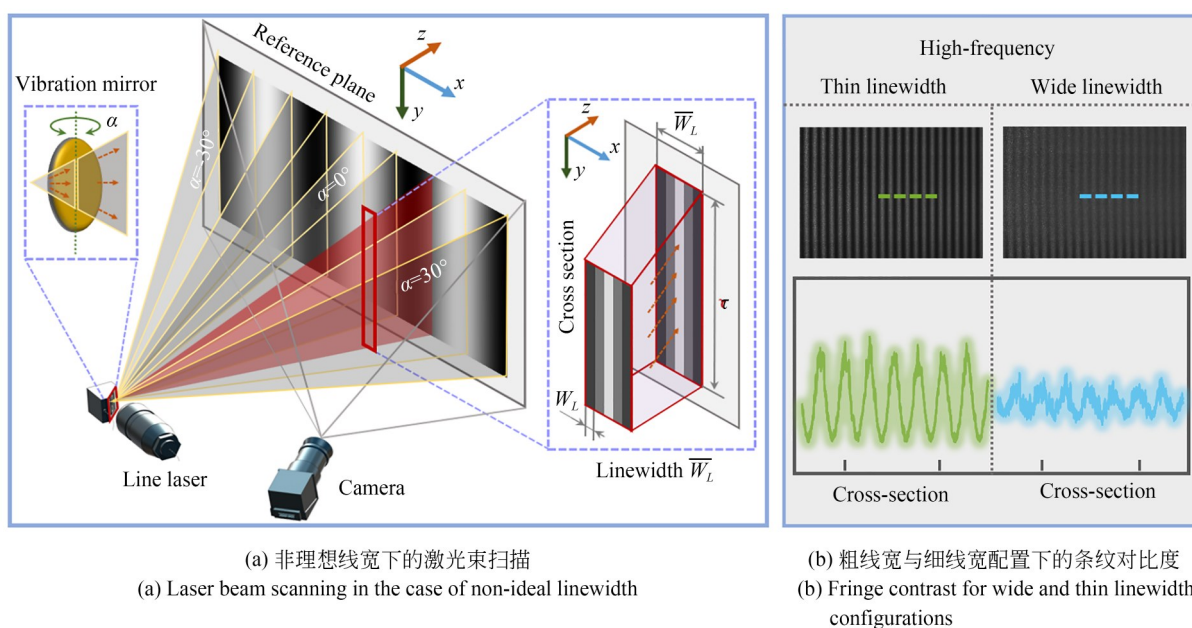


图 12 线激光非理想线宽的窗口平滑效应

Fig. 12 Window smoothing effect of line laser with non-ideal line width

$$I_n = p_n [A + B \cos(\phi - \delta_n)] + q_n, \quad (19)$$

其中: p_n 表示线激光光强波动的比例系数, q_n 表示线激光光强波动的叠加分量。这两项使不同相移图的背景光强或光强调制度发生变化,进而导致相位误差(如图13所示)。将含有偏移背景光强和偏移调制度光强的相移图代入到 N 步相移法表达式中,进而推导出相位误差^[1]:

$$\Delta\phi \approx \frac{2}{NB} \sum_{n=1}^N \frac{(p_n - 1)A + q_n}{p_n} \sin(\delta_n - \phi). \quad (20)$$

为了降低线激光的光源光强波动对三维重建的影响,在硬件上最直接的方法是采用输出稳

定的激光器,在软件上可以通过图像后处理来补偿光源光强波动。Liu等^[107]提出的迭代自校准算法能从条纹图中快速提取相应分量,并对背景光强偏移和光强调制度偏移进行误差补偿。Lu等^[108]借助直方图对每幅相移图进行分割,然后通过建立线性灰度级变换来校正背景强度和光强调制度。Chen等^[109]研究了光源不稳定性,发现随时间变化的相位误差很难用确定性函数唯一地表示,为此提出了两种实时的校正方法。该方法通过建立映射函数来减少随时间变化的相位误差。

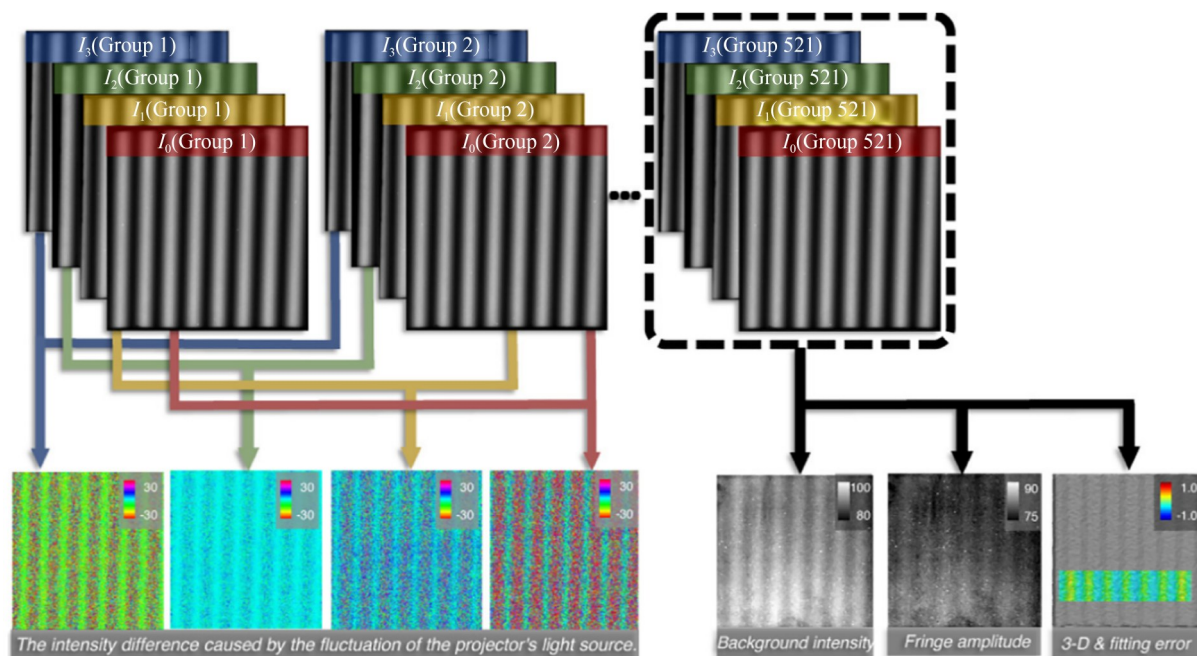


图13 光强波动对相位重建的影响^[1]

Fig. 13 Effect of illumination fluctuation on phase reconstruction^[1]

4.3 高次谐波

在传统结构光系统中, Gamma效应或系统非线性响应会产生高次谐波误差^[110-114]。在基于MEMS振镜的结构光系统中,振镜的机械旋转误差使最终捕获的条纹图案会耦合一些高次谐波。除此之外,当激光器的输入输出曲线没有被精确标定时,高次谐波误差也会产生。采集图像受到高次谐波的污染发生畸变,可以用傅里叶级数来描述畸变图像^[115]。假设第 i 次谐波的幅值为 a_i , 那么耦合高次谐波的畸变图像可以表示为:

$$I_n^c(x, y) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos(i(\phi(x, y) + \varphi_n)). \quad (21)$$

如果利用 N 步相移法来求解相位,那么高次谐波引起的相位误差为^[116-118]:

$$\Delta\phi = \arctan \left[\frac{\sum_{m=1}^{\infty} (a_{mN+1} - a_{mN-1}) \sin(mN\phi(x, y))}{a_1 + \sum_{m=1}^{\infty} (a_{mN+1} - a_{mN-1}) \cos(mN\phi(x, y))} \right]. \quad (22)$$

为了抑制高次谐波对相位精度的影响,可以提高相移步数。然而,所需图像的数量会随之增加,进而降低重建速度^[119]。因此,在不降低重建速度的情况下抑制高次谐波才是最有意义的方

式。高次谐波的抑制方法可分为两类:主动式方法(图案投影前校正)和被动式方法(图案投影后校正)^[120]。Huang等^[121]提出了双三步相移法,Cai等^[115]推导了空间域和HT域的相位误差模型。Zhang等^[122]利用查找表法实现投影仪非线性误差的补偿。Pan等^[123]对非正弦波引起的相位误差进行了理论分析,提出了一种迭代相位补偿算法。Song等^[124]提出了一种基于掩模信息的系统非线性校正方法,借助掩模图像确定高次谐波的系数,然后利用高斯牛顿迭代计算出真实相位。

目前,这些方法的设计主要面向传统DLP结构光^[125-131],而面向MEMS结构光的高次谐波抑

制方法则相对较少。Han等^[132]利用MEMS振镜扫描速度通常高于相机采集速度这一特点,提出了基于移相叠加框架的内外分层相移法。如图14所示,内部相移法在相机的一次曝光时间内投影12步相移图,再利用相机曝光功能将12步相移图案叠加成无谐波污染的相机图像。接着,外部移相法利用这些无谐波污染的相机图像来提取包裹相位。实验结果表明,该方法仅需要3幅相机图像就能达到12步相移法的精度。图15展示了内部相移步数对不同级次谐波的敏感程度。图16展示了传统三步相移法和内3步外12步的分层相移法的三维重建结果。

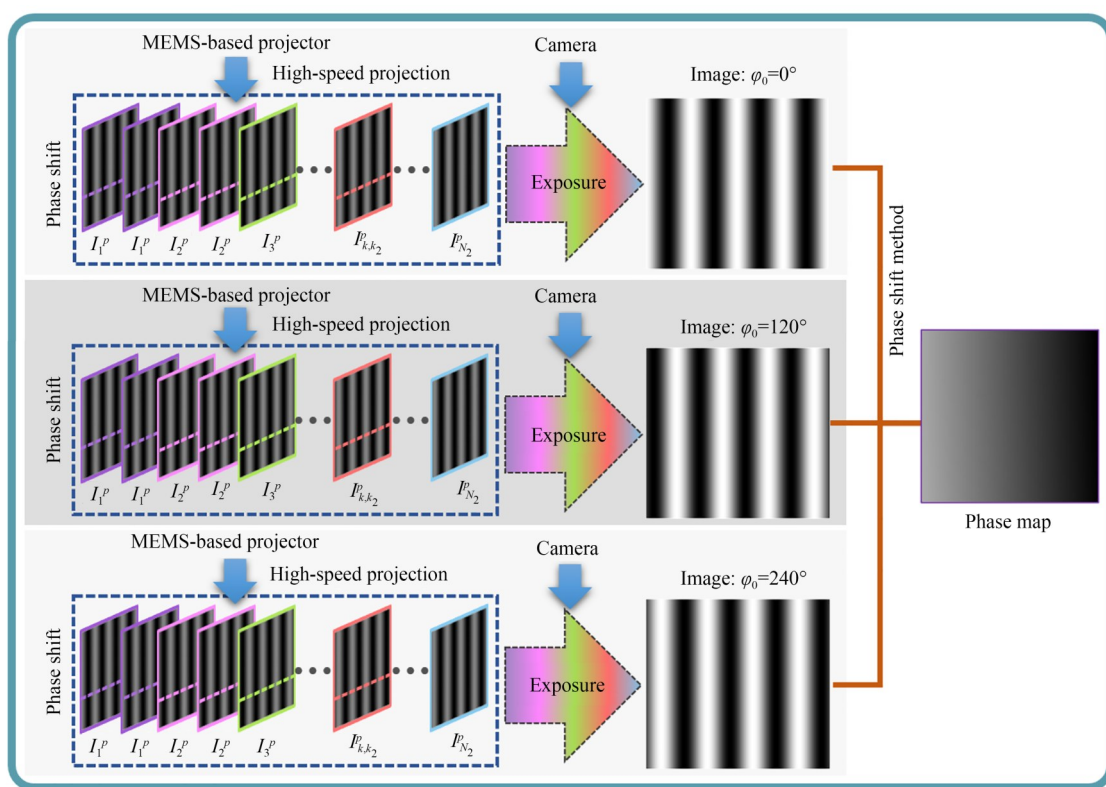


图 14 内外分层相移法的原理

Fig. 14 Principle of internal-external layered phase shift method

4.4 相移误差

在基于MEMS振镜的结构光系统中,振镜机械旋转的相移误差是主要误差源之一。真实

相移量 δ'_n 包含初始相移误差 ϵ_n ,可以表示为:

$$\delta'_n = \delta_n + \epsilon_n. \quad (23)$$

初始相移误差造成的相位误差为^[133]:

$$\Delta\phi = \arctan \left[\frac{\cos(2\phi) \sum_{n=1}^N \sin(2\delta_n + \epsilon_n) - \sin(2\phi) \sum_{n=1}^N \cos(2\delta_n + \epsilon_n) - \sum_{n=1}^N \sin \epsilon_n}{\cos(2\phi) \sum_{n=1}^N \cos(2\delta_n + \epsilon_n) + \sin(2\phi) \sum_{n=1}^N \sin(2\delta_n + \epsilon_n) + \sum_{n=1}^N \cos \epsilon_n} \right]. \quad (24)$$

为了降低相移误差的影响,借助对相移误差

不敏感的 Hariharan 算法^[134]来进行相位恢复。

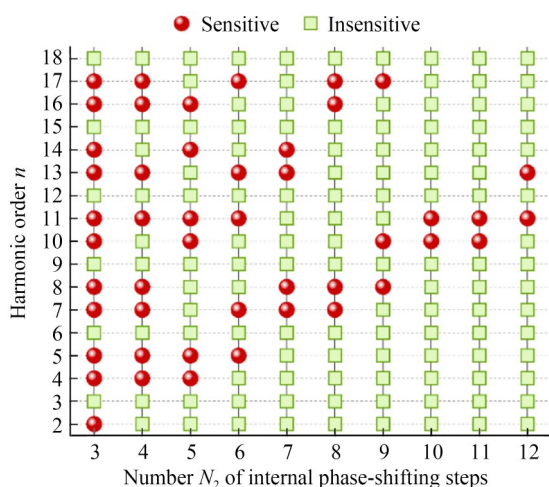


图15 内部相移法对谐波的敏感度

Fig. 15 Sensitivity of internal phase-shifting to harmonics

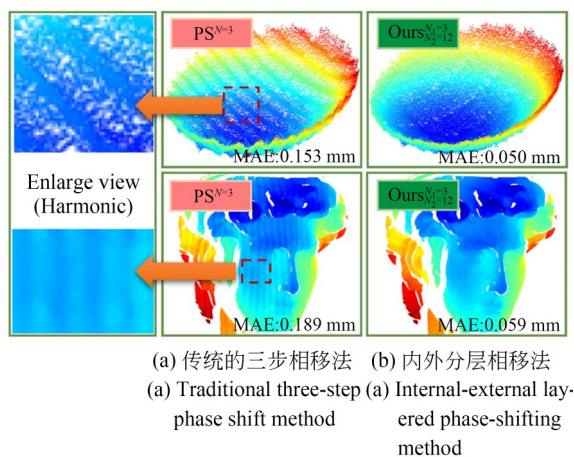


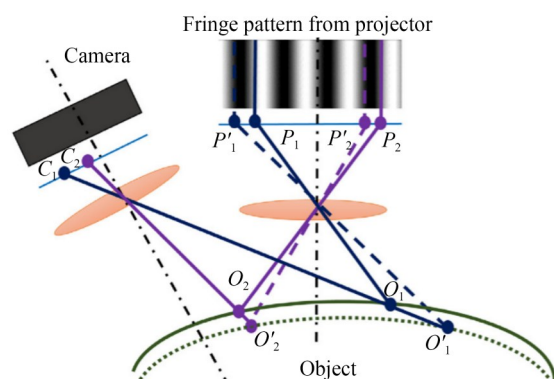
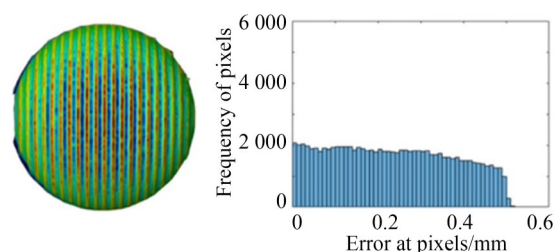
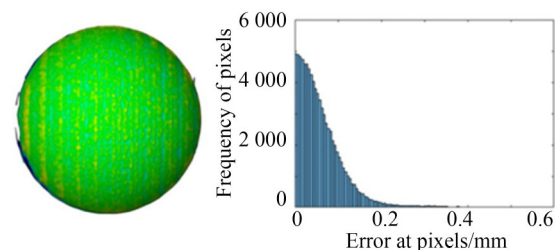
图16 内外嵌套相移法的实验效果

Fig. 16 Experimental effect of nested phase shift method

Lai 等^[135]提出了一种基于扩展卡尔曼滤波器(EKF)的真实相移估计方法,获得了精确相位。

在动态场景中,由于被测运动引起的误差也会导致相移量发生偏差^[136-138]。这种相移误差和振镜产生的相移误差对三维重建的影响是相似的,如图17所示,相机上同一点由于物体运动导致其相位值不同。

为了抑制由被测物体运动引起的相移误差,Guo 等^[139]将四个相移图分为两组以计算出两个包裹相位,通过平均相位可以有效地补偿运动引起的误差。Liu 等^[140]在多个测量序列上计算出三幅相位图,然后基于相位图差异来估计运动引起的相移误差。如图18所示,该方法取得了较好的运动误差补偿效果。

图17 运动引起的误差^[141]Fig. 17 Errors caused by motion^[141](a) 标准相移法的重建结果
(a) Results of the standard phase shift method(b) 运动误差补偿算法的重建结果
(b) Results of motion-error compensation method图18 运动引入误差的校正^[140]Fig. 18 Correction of motion introduction errors^[140]

5 结构光三维重建的应用

表2展示了商用的结构光产品,其中也包括一些MEMS结构光产品。产品的性能与工作距离有关,参数的多样化有利于提高应用场景的适配性。结构光三维重建的典型应用场景如图19所示,具体分为以下几类:

(1)目标识别:当前目标识别技术主要采用二维图像,而三维数据通过提供第三维度的信息,势必将更加准确高效^[142-144]。例如,张宝华等^[145]提出了一种基于计算机视觉的果蔬干旱与

凹面特征识别方法,通过结合近红外线线阵结构光和三维重建技术,实现了苹果果梗和花萼的高效识别。

(2)建筑与文物:结构光在文物遗产保护等场景具有较高的应用价值^[146-152]。例如,Zhang

等^[153]利用结构光技术对遗产进行三维建模。Shi等设计了一种基于结构光照明的三维显微成像系统,应用于桥梁和道路裂缝检查及交通基础设施的故障检测^[154]。此外,在格拉纳达大学皇家医院的建筑复原中,结构光也取得了较好的三维建

表 2 结构光产品
Tab. 2 Structured light products

Brand	Product	Version	Parameter	Appearance
Chipsensing	Projection Module(MEMS)	ZX-L090A-B	FOV:42°×40°	
			Gray scale:256	
ZhiSensor	3D Camera(MEMS)	D33OXS	Work distance:<2.5 m	
			Accuracy:~0.36 mm	
Utech	3D Camera(MEMS)	UFGNRTC1IR00	Work distance:~500 mm	
			Frame rate:~1 Hz	
V-Sensor	3D Camera(MEMS)	PSN3000	Accuracy:~0.35 mm	
			Work distance:~400 mm	
RcalSense	3D Camera	SLM 3DRBP-0231C	Frame rate:<1 Hz	
			Accuracy:~1.4 mm	
SOLOMON	3D Camera	SLM 3DRBP-0231C	Work distance:~2100 mm	
			Frame rate:<110 frame/s	
MECHMIND	4D Camera	Mech-Eye Pro S	Resolution:1920×1080	
			Work distance:<1500 mm	
			Spatial resolution:~1.4 mm	
			Work distance:~1200 mm	
			Frame rate:<4 frame/s	
			Resolution:1920×1200	
			Work distance:~1000 mm	
			Accuracy:0.1 mm	
			Frame rate:~2 frame/s	



图 19 结构光三维重建的典型应用场景
Fig. 19 Typical application scenario of structured light 3D reconstruction

模效果^[155]。

(3)水下探测:光在水下存在散射和吸收效应,这导致了光场的衰减和失真^[156-158]。Fabio等^[159]研究了水下主动光学三维重建技术,实验测试了一种常用于空气中的结构光投影技术,结果表明,即使在高浊度条件下三维重建质量依然可接受。Sarafraz等^[160]开发了一种同时估计水面和水下物体几何形状的结构光重建技术。

(4)智能制造:结构光还常应用于激光加工和视觉引导机器人等领域^[161-162]。例如,Tan等提出了基于偏振结构光成像的焊缝定位方法,有效解决了电弧光干扰和低效率的问题^[163]。Wu等^[164]借助高精度旋转台实现了360°的轨道沟槽重建。此外,结构光还能用于高反射焊缝纹理识别、焊缝定位等。

(5)医疗系统:在微创手术中,目前多数内窥镜只获取单目平面图像^[165-166]。Clancy等提出了一种双模态腹腔镜系统,它利用结构光技术来计算三维形貌,从而来评估血容量和组织功能^[167]。结构光系统可以通过减小照相机和投影仪的尺寸来实现小型化,辅助医生诊断人体内部病灶。

(6)日常生活:结构光三维重建广泛应用于智慧门禁、人脸识别、移动支付和游戏娱乐等领域。夏晨旭等通过近红外编码光栅条纹投射,结合2D纹理图像检测面部特征点,实现了面部3D外观的准确获取^[168]。Chen等比较了主动结构光和多视角立体视觉在面部建模上的应用^[169]。不过,可见光的条纹投影会影响人的视觉观感,可能引起视觉不适,可以通过投射人眼不可见的红外光场。应用于移动终端,主要问题是便携性与小型化,而MEMS微振镜的小尺寸在这方面展现出巨大的潜力。

参考文献:

- [1] ZHAO Y, YU H T, BAIL F, et al. Accurate fringe projection profilometry using instable projection light source[J]. *Optics Communications*, 2022, 507: 127643.
- [2] 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.

6 结论与展望

MEMS投影器件有望从硬件底层突破结构光三维重建的性能瓶颈,从而实现高精度、高速度、高分辨、大景深的目标。其性能提升又会提升器件对应用场景的适应能力和应用范围。目前,小尺寸和低成本是3D相机商业化面临的一项挑战。由于微机电系统轻量化、低功耗的特性,整个投影系统的尺寸很小,可以应用在一些精密仪器中,有利于实现狭小空间内的三维重建。

与此同时,MEMS结构光也面临着一些挑战,如MEMS结构光技术的理论体系尚不完善。如何借鉴成熟DLP结构光的理论来填补新型MEMS结构光的理论空白成为一个需要迫切解决的问题。当前的MEMS结构光系统具有独特的投影原理、系统结构和作用机理,从其硬件架构到算法设计仍具有优化空间。

近年来,基于深度学习的单帧三维重建已取得较大进展^[170-171]。这一技术可与MEMS新型投影器件进行深度融合,从而为高性能三维重建提供强大动力,推动MEMS结构光技术替代当前主流的DLP技术,成为未来结构光条纹投影的第一选择。

作者贡献声明:

韩民:论文构思和撰写,论文修改,文献和数据整理;

张琛萍:引言撰写与修改,相关文献整理;

张宗华:论文审核和指导,项目管理,提供资源;

李星辉:论文构思和指导,论文修改,项目管理。

- [3] MIAO Y, YANG Y, HOU Q, et al. High-efficiency 3D reconstruction with a uniaxial MEMS-based fringe projection profilometry [J]. *Opt Express*, 2021, 29(21): 34243-34257.
- [4] ZHAO J, ZHOU Y, ZHAO J W, et al. Precision position measurement of PMSLM based on ApFFT and temporal sinusoidal fringe pattern phase retrieval [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(12): 7591-7601.
- [5] RAO G, YANG X D, YU H B, et al. Fringe-pro-

- jection-based normal direction measurement and adjustment for robotic drilling[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67 (11): 9560-9570.
- [6] ZHANG S. Absolute phase retrieval methods for digital fringe projection profilometry: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 107: 28-37.
- [7] 左超, 张晓磊, 胡岩, 等. 3D真的来了吗?: 三维结构光传感器漫谈[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49 (3): 9-53.
ZUO CH, ZHANG X L, HU Y, *et al.* Has 3D finally come of age?: an introduction to 3D structured-light sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 9-53. (in Chinese)
- [8] MA R J, LI C, XING Y B, *et al.* Defect focused Harris3D & boundary fine-tuning optimized region growing: Lithium battery pole piece defect segmentation[J]. *Measurement*, 2025, 242: 116147.
- [9] LI J X, ZHOU Q, LI X H, *et al.* An improved low-noise processing methodology combined with PCL for industry inspection based on laser line scanner[J]. *Sensors*, 2019, 19(15): 3398.
- [10] ZHOU Q, QIAO X R, NI K, *et al.* Depth detection in interactive projection system based on one-shot black-and-white stripe pattern [J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5341.
- [11] 陈彦军, 左旺孟, 王宽全, 等. 结构光编码方法综述[J]. *小型微型计算机系统*, 2010, 31(9): 1856-1863.
CHEN Y J, ZUO W M, WANG K Q, *et al.* Survey on structured light pattern codification methods [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2010, 31(9): 1856-1863. (in Chinese)
- [12] SALVI J, PAGÈS J, BATLLE J. Pattern codification strategies in structured light systems [J]. *Pattern Recognition*, 2004, 37(4): 827-849.
- [13] NGUYEN T N, HUYNH H H, MEUNIER J. 3D reconstruction with time-of-flight depth camera and multiple mirrors[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 38106-38114.
- [14] 郑太雄, 黄帅, 李永福, 等. 基于视觉的三维重建关键技术研究综述[J]. *自动化学报*, 2020, 46 (4): 631-652.
ZHENG T X, HUANG SH, LI Y F, *et al.* Key techniques for vision based 3D reconstruction: a review [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(4): 631-652. (in Chinese)
- [15] CHEN R M, LI Y M, XUE G P, *et al.* Laser triangulation measurement system with Scheimpflug calibration based on the Monte Carlo optimization strategy [J]. *Optics Express*, 2022, 30 (14): 25290-25307.
- [16] YU R M, YU H S, LIANG X Q, *et al.* Phase-domain modulated hybrid phase-shifting structured light based efficient 3D measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 172: 107875.
- [17] KIM J, LEE J, PARK Y H. Highly accurate three-dimensional measurement of large structures using multiple stereo vision with improved two-step calibration algorithm [J]. *Measurement*, 2024, 234: 114886.
- [18] ZHOU W B, JIA Y F, FAN L Y, *et al.* A MEMS-based real-time structured light 3-D measuring architecture on FPGA[J]. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2024, 21(3): 98.
- [19] HAN M, JIANG H, LEI F X, *et al.* Modeling window smoothing effect hidden in fringe projection profilometry [J]. *Measurement*, 2025, 242: 115852.
- [20] HAN M, XING Y B, WANG X H, *et al.* Projection superimposition for the generation of high-resolution digital grating[J]. *Optics Letters*, 2024, 49 (15): 4473-4476.
- [21] HAN M, SHI W J, LU S H, *et al.* Internal - external layered phase shifting for phase retrieval[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1-13.
- [22] HAN M, LEI F X, SHI W J, *et al.* Uniaxial MEMS-based 3D reconstruction using pixel refinement[J]. *Optics Express*, 2023, 31(1): 536-554.
- [23] HAN M, LEI F X, TAO Y H, *et al.* A novel calibration method for a uniaxial MEMS-based 3D reconstruction system [C]. *Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology IX. December 5-12, 2022. Online Only, China. SPIE*, 2023.
- [24] LEI F X, HAN M, JIANG H, *et al.* A phase-angle inspired calibration strategy based on MEMS projector for 3D reconstruction with markedly reduced calibration images and parameters[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 176: 108078.
- [25] CHEN M F, LI Y M, LI X H, *et al.* An end-to-end structured light depth prediction approach using

- Mamba networks[C]. *Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology XI. October 12-15, 2024. Nantong, China.* SPIE, 2024: 25.
- [26] LI Y M, LI Z, ZHANG C B, *et al.* Deep learning-driven one-shot dual-view 3-D reconstruction for dual-projector system [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1-14.
- [27] CHEN M F, LI Y M, LI X H, *et al.* Single-frame structured light depth map reconstruction with absolute phase-aided supervision [C]. *Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology XI. October 12-15, 2024. Nantong, China.* SPIE, 2024: 24.
- [28] LI Y M, LI Z N, CHEN W K, *et al.* MSAN: mask semantic attention network for single-frame structured light 3D reconstruction [C]. *Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology XI. October 12-15, 2024. Nantong, China.* SPIE, 2024: 9.
- [29] LI Z N, LI Y M, CHEN W K, *et al.* DSAS-S2APNet: a dual-stage auxiliary supervision network for single-frame to absolute phase prediction [C]. *Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications XI. October 12-15, 2024. Nantong, China.* SPIE, 2024: 36.
- [30] 殷永凯, 张宗华, 刘晓利, 等. 条纹投影轮廓术系统模型与标定综述[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 127-144.
- YIN Y K, ZHANG Z H, LIU X L, *et al.* Review of the system model and calibration for fringe projection profilometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 127-144. (in Chinese)
- [31] LEI F X, MA R J, LI X H. Use of phase-angle model for full-field 3D reconstruction under efficient local calibration [J]. *Sensors*, 2024, 24(8): 2581.
- [32] 张宗华, 李雁玲, 高峰, 等. 面向结构光三维测量的相位展开技术综述(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(8): 23-45.
- ZHANG Z H, LI Y L, GAO F, *et al.* Phase unwrapping technology for structured light three-dimensional measurement: a review(invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(8): 23-45. (in Chinese)
- [33] BAI Y J, ZHANG Z H, FU S, *et al.* Recent progress of full-field three-dimensional shape measurement based on phase information [J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2024, 7(1): 9.
- [34] 李乐阳, 吴周杰, 张启灿. 基于相移条纹分析的相位误差补偿技术发展综述(特邀)[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(2): 0211008.
- LI Y Y, WU Z J, ZHANG Q C. Phase error compensation technique based on phase-shifting fringe analysis: a review (invited) [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(2): 0211008. (in Chinese)
- [35] 李勇, 张广汇, 马利红, 等. 条纹投影动态三维表面成像技术综述[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 91-103.
- LI Y, ZHANG G H, MA L H, *et al.* Review of dynamic three-dimensional surface imaging based on fringe projection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 91-103. (in Chinese)
- [36] 毛翠丽, 卢荣胜, 董敬涛, 等. 相移条纹投影三维形貌测量技术综述[J]. *计量学报*, 2018, 39(5): 628-640.
- MAO C L, LU R SH, DONG J T, *et al.* Overview of the 3D profilometry of phase shifting fringe projection [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, 39(5): 628-640. (in Chinese)
- [37] LIU H Y, YAN N, SHAO B F, *et al.* Deep learning in fringe projection: a review [J]. *Neurocomputing*, 2024, 581: 127493.
- [38] ZHU X J, ZHAO H M, SONG L M, *et al.* Triple-output phase unwrapping network with a physical prior in fringe projection profilometry [J]. *Applied Optics*, 2023, 62(30): 7910.
- [39] LI Y X, QIAN J M, FENG S J, *et al.* Single-shot spatial frequency multiplex fringe pattern for phase unwrapping using deep learning [C]. *Optics Frontier Online 2020: Optics Imaging and Display. June 19-20, 2020. Shanghai, China.* SPIE, 2020: 71.
- [40] LI Y X, QIAN J M, FENG S J, *et al.* End-to-end single-shot composite fringe projection profilometry based on deep learning [C]. *Fourth International Conference on Photonics and Optical Engineering. October 14-17, 2020. Xi'an, China.* SPIE, 2021: 105.
- [41] LI W J, YU J, GAIS Y, *et al.* Absolute phase retrieval for a single-shot fringe projection profilometry based on deep learning [J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(6).
- [42] NGUYEN H, LY K L, TRAN T, *et al.* hNet:

- Single-shot 3D shape reconstruction using structured light and h-shaped global guidance network [J]. *Results in Optics*, 2021, 4: 100104.
- [43] WANG C, ZHOU P, ZHU J P. Deep learning-based end-to-end 3D depth recovery from a single-frame fringe pattern with the MSUNet++ network[J]. *Optics Express*, 2023, 31(20): 33287-33298.
- [44] WANG L L, XUE W K, WANG C Y, *et al.* Depth estimation from a single-shot fringe pattern based on DD-Inceptionv2-UNet[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(34): 9144-9155.
- [45] CAI Y, GUO M Y, WANG C Y, *et al.* TTFD-Net: precise depth estimation from single-frame fringe patterns[J]. *Sensors*, 2024, 24(14): 4733.
- [46] ZHOU Z W, SIDDIQUEE M M R, TAJBAKHS N, *et al.* UNet++: redesigning skip connections to exploit multiscale features in image segmentation[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2020, 39(6): 1856-1867.
- [47] ZHU X J, HAN Z Q, ZHANG Z Z, *et al.* PCT-Net: depth estimation from single structured light image with a parallel CNN-transformer network[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(8): 085402.
- [48] WANG L, LU D Q, TAO J Q, *et al.* Single-shot structured light projection profilometry with Swin-ConvUNet[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61: 114101.
- [49] NGUYEN A H, LY K L, LAM V K, *et al.* Generalized fringe-to-phase framework for single-shot 3D reconstruction integrating structured light with deep learning[J]. *Sensors*, 2023, 23(9): 4209.
- [50] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [51] HU X W, WANG G J, ZHANG Y J, *et al.* Large depth-of-field 3D shape measurement using an electrically tunable lens [J]. *Optics Express*, 2019, 27(21): 29697-29709.
- [52] HU G L, ZHOU X, ZHANG G L, *et al.* Multiple laser stripe scanning profilometry based on microelectromechanical systems scanning mirror projection[J]. *Micromachines*, 2019, 10(1): 57.
- [53] HUANG H M, LIU G H, DUAN K R, *et al.* 3D reconstruction of structured light based on infrared MEMS[J]. *Journal of Laser Applications*, 2021, 33(4): 042035.
- [54] ZHANG G L, ZHOU X, JIN R, *et al.* A high-speed full-field profilometry with coded laser strips projection[C]. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X. Munich, Germany. SPIE*, 2017: 103294W.
- [55] YANG T, ZHANG G L, LI H H, *et al.* Hybrid 3D shape measurement using the MEMS scanning micromirror [J]. *Micromachines*, 2019, 10(1): 47.
- [56] MA Z Q, LU Z S, LI Y L, *et al.* Multi-frequency fringe projection profilometry: phase error suppression based on cycle count adjustment[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(8): 5117.
- [57] LIU Y C, WANG H, LONG Y J, *et al.* Low restriction 3D reconstruction based on uniaxial MEMS fringe projection profilometry [C]. *2022 7th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE). April 15-17, 2022. Beijing, China. IEEE*, 2022: 152-157.
- [58] YANG Y, MIAO Y P, CAI Z W, *et al.* A novel projector ray-model for 3D measurement in fringe projection profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 149: 106818.
- [59] YANG T, GU F F. Overview of modulation techniques for spatially structured-light 3D imaging[J]. *Optics Laser Technology*, 2024, 169: 110037.
- [60] 张力伟, 陈浩博, 孙文卿, *et al.* 移相干涉测量中的抗振技术综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(19): 1900005.
- ZHANG L W, CHEN H B, SUN W Q, *et al.* Review of anti-vibration technology in phase-shifting interferometry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(19): 1900005. (in Chinese)
- [61] 张启灿, 苏显渝. 动态三维面形测量的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 10001.
- ZHANG Q C, SU X Y. Research progress of dynamic three-dimensional shape measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 10001. (in Chinese)
- [62] 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.
- [63] 吴周杰, 张启灿. 基于条纹投影的高速三维形貌测量技术发展综述[J]. *激光与光电子学进展*,

- 2023, 60(8): 0811001.
- WU ZH J, ZHANG Q C. High-speed 3D topography measurement based on fringe projection: a review[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(8): 0811001. (in Chinese)
- [64] 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 arbitrary-bit fringe projection using DLP projector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(7): 0712003. (in Chinese)
- [65] 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.
- [66] LEI S Y, ZHANG S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [67] 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.
- [68] EKSTRAND L, ZHANG S. Three-dimensional profilometry with nearly focused binary phase-shifting algorithms[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(23): 4518-4520.
- [69] WANG Y J, ZHANG S. Three-dimensional shape measurement with binary dithered patterns[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(27): 6631-6636.
- [70] WANG Y J, ZHANG S. Optimal pulse width modulation for sinusoidal fringe generation with projector defocusing[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(24): 4121-4123.
- [71] LI B W, ZHANG S. Microscopic structured light 3D profilometry: binary defocusing technique *vs.* sinusoidal fringe projection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 96: 117-123.
- [72] 高鹏, 李勇, 涂颜帅, 等. 离焦条纹投影三维测量中正弦光栅的二值化方法研究[J]. *光子学报*, 2014, 43(5): 512006.
- GAO P, LI Y, TU Y S, *et al.* Binarization methods of sinusoidal grating in 3D measurement based on defocused fringe projection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(5): 512006. (in Chinese)
- [73] WAKAYAMA T. Compact camera for three-dimensional profilometry incorporating a single MEMS mirror[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1): 013601.
- [74] XIA C F, QIAO D Y, SONG X D, *et al.* A time division capacitive feedback method of electrostatic MEMS mirror driven by PWM signal[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 322: 112631.
- [75] 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.
- [76] YANG D, QIAO D Y, XIA C F, *et al.* Adaptive horizontal scaling method for speckle-assisted fringe projection profilometry[J]. *Optics Express*, 2023, 31(1): 328-343.
- [77] GUO X M, YIN W, ZUO C, *et al.* Fast and high-precision 3D face scanning system based on infrared fringe projection[C]. *OSA Optical Sensors and Sensing Congress 2021 (AIS, FTS, HISE, SENSORS, ES)*. Washington, DC. Optica Publishing Group, 2021: JTh6A. 25.
- [78] SHI W J, LU S H, TAO Y H, *et al.* FPGA-enabled accurate angle-power matching method in MEMS mirrors-based structure light projection system[C]. *Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications IX*. December 5-12, 2022. Online Only, China. SPIE, 2022: 7.
- [79] YANG G W, WANG Y Z. High resolution laser fringe pattern projection based on MEMS micro-vibration mirror scanning for 3D measurement[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 107189.
- [80] QU J S, GAO H X, ZHANG R H, *et al.* High-flexibility and high-accuracy phase delay calibration method for MEMS-based fringe projection systems[J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 1049-1066.
- [81] YANG T, LI H H, ZHOU X, *et al.* A high-performance fringe pattern generation method for fringe projection profilometry[C]. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X*. Munich, Germany. SPIE, 2017: 103294V.
- [82] SASAKI T, KAMADA T, HANE K. High-speed and large-amplitude resonant varifocal mirror[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2020, 32(2): 344-350.
- [83] YANG G W, SUN C K, WANG P, *et al.* High-speed scanning stroboscopic fringe-pattern projection technology for three-dimensional shape precision measurement[J]. *Applied Optics*, 2014, 53

- (2): 174-183.
- [84] TANG H M, ROSOWSKI J, FURLONG C, *et al.* Tympanic membrane shape measurement by miniaturized high-speed fringe projection shape measurement using MEMS scanning mirror [C]. *Advancements in Optical Methods, Digital Image Correlation & Micro-and Nanomechanics, Volume 4*. Cham: Springer International Publishing, 2023: 25-29.
- [85] YANG G W, WANG Y Z. High resolution laser fringe pattern projection based on MEMS micro-vibration mirror scanning for 3D measurement [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 107189.
- [86] TANG H M, PSOTA P, ROSOWSKI J J, *et al.* Ultra-high speed holographic shape and displacement measurements in the hearing sciences [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(2): 1.
- [87] CHEN Z, HU T L, HAO Y Y, *et al.* High-speed phase structured light integrated architecture on FPGA [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(1): 1017-1027.
- [88] ZHENG Y J, GAO Z S, ZUO C L. Complementary double pulse-width-modulation for 3D shape measurement of complex surfaces [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 167: 109765.
- [89] YANG T, LI H H, ZHOU X, *et al.* A high-performance fringe pattern generation method for fringe projection profilometry [C]. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X*. Munich, Germany. SPIE, 2017: 103294V.
- [90] ZHANG Z H, MA H Y, ZHANG S X, *et al.* Simple calibration of a phase-based 3D imaging system based on uneven fringe projection [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 627-629.
- [91] FENG S J, ZUO C, ZHANG L, *et al.* Calibration of fringe projection profilometry: a comparative review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 143: 106622.
- [92] ZHAO W J, SU X Y, CHEN W J. Discussion on accurate phase-height mapping in fringe projection profilometry [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(10): 1.
- [93] PEI X H, LIU J Y, YANG Y S, *et al.* Phase-to-coordinates calibration for fringe projection profilometry using Gaussian process regression [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation Measurement*, 2022, 71: 3162275.
- [94] YIN Y K, ZHANG Z H, LIU X L, *et al.* Review of the system model and calibration for fringe projection profilometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 303008.
- [95] YANG D, QIAO D Y, XIA C F. Curved light surface model for calibration of a structured light 3D modeling system based on striped patterns [J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 33240-33253.
- [96] YANG S C, YANG T, WU G X, *et al.* Flexible and fast calibration method for uni-directional multi-line structured light system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 164: 107525.
- [97] ZHANG S. Flexible and high-accuracy method for uni-directional structured light system calibration [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 143: 106637.
- [98] YANG Y, MIAO Y P, LIU X L, *et al.* Intrinsic parameter-free calibration of FPP using a ray phase mapping model [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(14): 3564-3567.
- [99] SHANG W, LIU S, WANG J Z, *et al.* Analysis and reduction of error caused by tested object using fringe projection technique with wavelet transform [J]. *Optik*, 2020, 221: 165372.
- [100] WU Y X, CAI X J, ZHU J J, *et al.* Analysis and reduction of the phase error caused by the non-impulse system psf in fringe projection profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 127: 105987.
- [101] YANG S R, LIU M, SONG J H, *et al.* Projector distortion residual compensation in fringe projection system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 114: 104-110.
- [102] 刘锦涛, 徐鹏, 王建华, 等. 噪声干扰的相位误差与相位展开可靠性研究 [J]. *激光技术*, 2024, 48(2): 240-248.
- LIU J T, XU P, WANG J H, *et al.* Research on phase error and phase unwrapping reliability of noise interference [J]. *Laser Technology*, 2024, 48(2): 240-248. (in Chinese)
- [103] LI J L, HASSEBROOK L G, GUAN C. Optimized two-frequency phase-measuring-profilometry light-sensor temporal-noise sensitivity [J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2003, 20(1): 106-115.
- [104] ZUO C, HUANG L, ZHANG M L, *et al.* Tem-

- poral phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 85: 84-103.
- [105] HAN M, WANG X H, LI X H. Fast and accurate fringe projection based on a MEMS microvibration mirror[C]. *Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications XI. October 12-15, 2024. Nantong, China.* SPIE, 2024: 2.
- [106] YAN K T, YU Y J, HUANG C T, *et al.* Fringe pattern denoising based on deep learning [J]. *Optics Communications*, 2019, 437: 148-152.
- [107] LIU Q, WANG Y, HE J G, *et al.* Phase shift extraction and wavefront retrieval from interferograms with background and contrast fluctuations [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(2): 025704.
- [108] LU Y Y, ZHANG R H, GUO H W. Correction of illumination fluctuations in phase-shifting technique by use of fringe histograms[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(1): 184-197.
- [109] CHEN C, WAN Y Y, CAO Y P. Instability of projection light source and real-time phase error correction method for phase-shifting profilometry [J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4258-4270.
- [110] ZHU H J, GUO H W. Alternate iterative least-squares algorithm based on nonuniform phase shifting for suppressing nonlinearity errors in fringe projection profilometry[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-13.
- [111] ZHENG Z J, GAO J, MO J H, *et al.* A fast self-correction method for nonlinear sinusoidal fringe images in 3-D measurement[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-9.
- [112] SUN Z, DUAN M H, ZHENG Y B, *et al.* Intensity diffusion: a concealed cause of fringe distortion in fringe projection profilometry[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(5): 1210.
- [113] 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.
- [114] MO J H, GAO J, ZHENG Z J, *et al.* Robust composite sine-trapezoidal phase-shifting algorithm for nonlinear intensity [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128: 106048.
- [115] CAI Z W, LIU X L, JIANG H, *et al.* Flexible phase error compensation based on Hilbert transform in phase shifting profilometry[J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 25171-25181.
- [116] WANG Y W, CAI J X, ZHANG D S, *et al.* Nonlinear correction for fringe projection profilometry with shifted-phase histogram equalization[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 3145361.
- [117] ZHANG W, YU L D, LI W S, *et al.* Black-box phase error compensation for digital phase-shifting profilometry [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66 (10) : 2755-2761.
- [118] WANG Y W, XU H Z, ZHU H J, *et al.* Nonlinear high-order harmonics correction for phase measuring profilometry[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 170: 110248.
- [119] WANG J H, YANG Y X. Triple N-step phase shift algorithm for phase error compensation in fringe projection profilometry[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-9.
- [120] ZHANG S. Comparative study on passive and active projector nonlinear gamma calibration [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(13): 3834.
- [121] HUANG P S, HU Q J, CHIANG F P. Double three-step phase-shifting algorithm [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(22): 4503-4509.
- [122] ZHANG S, YAU S T. Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(1): 36-43.
- [123] BING P, QIAN K M, LEI H, *et al.* Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry [J]. *Optics Letters*, 2009, 34 (4) : 416-418.
- [124] SONG H X, KONG L B. Mask information-based gamma correction in fringe projection profilometry [J]. *Optics Express*, 2023, 31 (12) : 19478-19490.
- [125] WANG J, WU Z X, HUANG Y Y, *et al.* A rapid and accurate gamma compensation method based on double response curve fitting for high-quality fringe pattern generation[J]. *Optics & La-*

- ser Technology*, 2023, 160: 109084.
- [126] MUÑOZ A, FLORES J L, PARRA-ESCAMILLA G, *et al.* Least-squares gamma estimation in fringe projection profilometry[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(5): 1137-1142.
- [127] YU X, LIU Y K, LIU N Y, *et al.* Flexible gamma calculation algorithm based on probability distribution function in digital fringe projection system[J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 32047-32057.
- [128] CAI S A, CUI J, LI W, *et al.* Flexible nonlinear error correction method based on support vector regression in fringe projection profilometry[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022: 1.
- [129] LI Z W, LI Y F. Gamma-distorted fringe image modeling and accurate gamma correction for fast phase measuring profilometry[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(2): 154-156.
- [130] HOANG T, PAN B, NGUYEN D, *et al.* Generic gamma correction for accuracy enhancement in fringe-projection profilometry[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(12): 1992-1994.
- [131] 孙进, 马煜中, 杨晗, 等. 结构光三维测量非线性相位误差主动校正法[J]. *仪表技术与传感器*, 2019(10): 117-121, 126.
- SUN J, MA Y ZH, YANG H, *et al.* Active correction of nonlinear phase error for structural light three-dimensional measurement[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019(10): 117-121, 126. (in Chinese)
- [132] HAN M, SHI W J, LU S H, *et al.* Internal-external layered phase shifting for phase retrieval[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation Measurement*, 2024, 73: 3338721.
- [133] SCHWIDER J, BUROW R, ELSSNER K E, *et al.* Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(21): 3421.
- [134] HARIHARAN P, OREB B F, EIJU T. Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(13): 2504-2506.
- [135] LAI X, LI Y Y, ZHANG Q C. Background-extracted extended Kalman filter-based phase shift estimation algorithm for phase shifting profilometry system[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 170: 110270.
- [136] 周星灿. 相移条纹投影动态三维测量中相位误差补偿方法研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2020.
- ZHOU X C. *Study on Phase Error Compensation Method in Phase Shift Fringe Projection Dynamic 3d Measurement*[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2020. (in Chinese)
- [137] 朱进进. 结构光三维成像技术动态测量中相位提取方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- ZHU J J. *Research on Phase Extraction Method in Dynamic Measurement of Structured Light 3d Imaging Technology*[D]. Xi'an: Xidian University, 2022. (in Chinese)
- [138] 曹智睿. 基于相移条纹投影的动态3D测量误差补偿技术[J]. *中国光学(中英文)*, 2023(1): 184-192.
- CAO ZH R. Dynamic 3D measurement error compensation technology based on phase-shifting and fringe projection[J]. *Chinese Optics*, 2023(1): 184-192. (in Chinese)
- [139] GUO W B, WU Z J, ZHANG Q C, *et al.* Real-time motion-induced error compensation for 4-step phase-shifting profilometry[J]. *Optics Express*, 2021, 29(15): 23822-23834.
- [140] 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.
- [141] 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.
- [142] NGUYEN T T, SLAUGHTER D C, MAX N, *et al.* Structured light-based 3D reconstruction system for plants[J]. *Sensors*, 2015, 15(8): 18587-18612.
- [143] WANG Z R, LI B, ZHOU Y B. Fast 3D reconstruction of tool wear based on monocular vision and multi-color structured light illuminator[C]. *International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014: Image Processing and Pattern Recognition*. Beijing, China. SPIE, 2014: 93011D.
- [144] FU B, YANG R G. Robust near-infrared structured light scanning for 3D human model recon-

- struction[C]. *Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VI*. San Francisco, California, USA. SPIE, 2014: 89790A.
- [145] ZHANG B H, HUANG W Q, WANG C P, *et al.* Computer vision recognition of stem and calyx in apples using near-infrared linear-array structured light and 3D reconstruction[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 139: 25-34.
- [146] SONG L M, LI X Y, YANG Y G, *et al.* Structured-light based 3D reconstruction system for cultural relic packaging[J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 2981.
- [147] WU F F, LI J, YANG H M, *et al.* Research of pavement topography based on NURBS reconstruction for 3D structured light[J]. *Optik*, 2019, 194: 163074.
- [148] ZHENG S, ZHOU Y, HUANG R, *et al.* A method of 3d measurement and reconstruction for cultural relics in museums[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, XXXIX-B5: 145-149.
- [149] GARCÍA-MOLINA D F, LÓPEZ-LAGO S, HIDALGO-FERNANDEZ R E, *et al.* Digitalization and 3D documentation techniques applied to two pieces of Visigothic sculptural heritage in Merida through structured light scanning [J]. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 2021, 14(4): 1-19.
- [150] CHEN Z J, ZHANG C X, TANG Z Y, *et al.* Three-dimensional reconstruction and deformation identification of slope models based on structured light method[J]. *Sensors*, 2024, 24(3): 794.
- [151] MONTUSIEWICZ J, MIŁOSZ M, KĘSIK J, *et al.* Structured-light 3D scanning of exhibited historical clothing: a first-ever methodical trial and its results [J]. *Heritage Science*, 2021, 9(1): 74.
- [152] QIU S, CAO C Y, ZHANG B, *et al.* Feasibility study of remote sensing using structured light for 3D damage assessments after natural disasters [C]. *Proceedings of the Conference on Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Remote Sensing Technology, Techniques and Applications V*, Beijing, PEOPLES R CHINA, F Oct 14-16, 2014.
- [153] ZHANG K, HU Q W, WANG S H. A fast 3D construction of heritage based on rotating structured light [C]. *International Symposium on Lidar and Radar Mapping 2011: Technologies and Applications*. Nanjing, China. SPIE, 2011: 82861Z.
- [154] SHI T C, QI Y, ZHU C, *et al.* Three-dimensional microscopic image reconstruction based on structured light illumination [J]. *Sensors*, 2021, 21(18): 6097.
- [155] ROBLES C L, GORDO J F R, SANJUÁN J M. Structured light in the digital reconstruction of architecture details [J]. *Ega-Revista De Experiencia Grafica Arquitectonica*, 2018, (32): 198-207.
- [156] QIAN J, DANG S-P, ZHOU X, *et al.* Fast structured illumination three-dimensional color microscopic imaging method based on Hilbert-transform [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(12): 128701.
- [157] FAN J F, OU Y M, LI X, *et al.* Structured light vision based pipeline tracking and 3D reconstruction method for underwater vehicle [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2024, 9(2): 3372-3383.
- [158] MASSOT-CAMPOS M, OLIVER-CODINA G. Underwater laser-based structured light system for one-shot 3D reconstruction [C]. *IEEE SENSORS 2014 Proceedings. November 2-5, 2014. Valencia, Spain*. IEEE, 2014: 1138-1141.
- [159] BRUNO F, BIANCO G, MUZZUPAPPA M, *et al.* Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(4): 508-518.
- [160] SARAFAZ A, HAUS B K. A structured light method for underwater surface reconstruction [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 114: 40-52.
- [161] LI B Z, XU Z J, GAO F, *et al.* 3D reconstruction of high reflective welding surface based on binocular structured light stereo vision [J]. *Machines*, 2022, 10(2): 159.
- [162] RODRIGUES M, KORMANN M, SCHUHLER C, *et al.* Structured light techniques for 3D surface reconstruction in robotic tasks [C]. *Proceed-*

- ings of the 8th International Conference on Computer Recognition Systems CORES 2013. Heidelberg: Springer International Publishing, 2013: 805-814.
- [163] TAN Z Y, ZHAO B L, JI Y, *et al.* A welding seam positioning method based on polarization 3D reconstruction and linear structured light imaging[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 151: 108046.
- [164] WU Q H, LI W, WU W J, *et al.* 3D reconstruction and simulation for raceway groove of bearings based on structured light[C]. *2nd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment*. Xian, China. SPIE, 2006: 61502O.
- [165] SCHMALZ C, FORSTER F, SCHICK A, *et al.* An endoscopic 3D scanner based on structured light[J]. *Medical Image Analysis*, 2012, 16(5): 1063-1072.
- [166] TRAN T N, YAMAMOTO K, NAMITA T, *et al.* 3D reconstruction of internal structure of animal body using near-infrared light[C]. *Biomedical Applications of Light Scattering VIII*. San Francisco, California, USA. SPIE, 2014: 89521A.
- [167] CLANCY N T, LIN J Y, ARYA S, *et al.* Dual multispectral and 3D structured light laparoscope[C]. *Multimodal Biomedical Imaging X*. San Francisco, California, USA. SPIE, 2015: 93160C.
- [168] 夏晨旭, 郝群, 张一鸣, 等. 基于结构光投影三维重建的人脸特征检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(22): 2211004.
- XIA CH X, HAO Q, ZHANG Y M, *et al.* Face feature detection based on structured light projection three-dimensional reconstruction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(22): 2211004. (in Chinese)
- [169] CHEN H, CUI W. A comparative analysis between active structured light and multi-view stereo vision technique for 3D reconstruction of face model surface[J]. *Optik*, 2020, 206: 164190.
- [170] ZHANG T, CAO Y. Improved lightweight deep learning algorithm in 3D reconstruction[J]. *Computers, Materials & Continua*, 2022, 72(3): 5315-5325.
- [171] NGUYEN A H, SUN B, LI C Q, *et al.* Different structured-light patterns in single-shot 2D-to-3D image conversion using deep learning[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(34): 10105-10115.

作者简介:



韩 民(1994—),男,山东菏泽人,博士研究生,2018年于北京林业大学获得硕士学位,主要从事结构光三维重建、智能三维感知和机器视觉等方面的研究。E-mail: hanm21@mails. tsinghua. edu. cn

通讯作者:



张宗华(1974—),男,江苏徐州人,博士,教授,1996、1998、2000年于天津大学分别获得学士、硕士和博士学位,2001-2002年在天津大学机械学院进行博士后研究,目前研究方向包括光学三维精密测量、基于相位计算的三维测量和漫反射/镜面复杂面型三维测量。E-mail: zhzhong@hebut. edu. cn

通讯作者:



李星辉(1985—),男,河南洛阳人,副教授,2008年于武汉大学获得学士学位,2011年于西安交通大学获得硕士学位,2014年于日本东北大学获得博士学位,目前研究兴趣包括智能仪器精密测量、计算机视觉和机器视觉。E-mail: li. xinghui@sz. tsinghua. edu. cn