

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311679

# 基于虚拟视野的结构光条纹投影像素精准映射方法\*

李茂月, 张明垒, 吕虹毓, 徐敬之

(哈尔滨理工大学先进制造智能化技术教育部重点实验室 哈尔滨 150080)

**摘要:**针对像素尺寸差异、相位误差等导致相机与投影仪同名点像素坐标匹配错误、有效像素点缺失问题,提出一种基于虚拟视野的改进包裹相位-坐标映射方法。首先,对不同重叠视场下的条纹信息进行分析,确定较优投影模式;其次,设计两组高低频率的横纵条纹,提取低频相位极值计算虚拟投影视野、高频周期对真实和虚拟视野逐级编号,实现视野小范围匹配;最后,改进包裹相位坐标映射方法和相位差阈值判别准则,逐编号求解投影像素坐标,获得像素间的精准映射关系。实验结果表明,相位中相同像素区间的包裹相位均方根误差,相较于连续相位降低了78.6%。在平面和复杂表面实验中,有效像素数量相较于传统匹配增长了9.21倍和9.43倍,像素误匹配坐标比例由传统相位匹配的80.55%、59.4%降低至14.26%、12.56%,为自适应条纹测量技术中像素同名点匹配提供了可行的解决方案。

**关键词:** 虚拟视野; 光学测量; 正弦条纹; 包裹相位; 像素映射

中图分类号: TH741 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4040

## Research on the pixel accurate mapping method of structured light fringe projection based on virtual field of vision

Li Maoyue, Zhang Minglei, Lyu Hongyu, Xu Jingzhi

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Intelligent Technology, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** To solve the problem of pixel coordinate mismatch and effective pixel missing caused by pixel size difference and phase error between camera and projector, an improved wrapping phase-coordinate mapping method based on virtual field of view is proposed. Firstly, the fringe phase under different overlapping field of view is analyzed to determine the optimal projection mode. Secondly, two sets of horizontal and vertical fringes with high and low frequencies are designed, and the low frequency phase extremum is extracted to calculate the virtual projection field of view. The high frequency period numbered the real and virtual field of view step by step to realize the coarse matching between the small field of view. Finally, by using the improved wrapping phase coordinate mapping method and the criterion of phase difference threshold, the projection pixel coordinates are numbered to obtain the accurate mapping relationship between pixels. Experimental results show that the enveloping phase root mean square error in the same pixel interval is reduced by 78.6% compared with the continuous phase. In planar and complex surface experiments, the number of effective pixels increases by 9.21 times and 9.43 times compared with traditional matching. The proportion of pixel mismatched coordinates decreases from 80.55% and 59.4% of traditional phase matching to 14.26% and 12.56%. It provides a feasible solution for pixel matching with the same name in adaptive fringe measurement technology.

**Keywords:** virtual field of vision; optical measurement; sinusoidal fringe; wrapping phase; pixel mapping

## 0 引 言

近年来,非接触式三维检测技术获得了快速发展并

且应用广泛,在机器视觉、计算机辅助设计、工业质量检测等领域中发挥着不可或缺的作用<sup>[1]</sup>。在光学检测方法中,以条纹投影轮廓术为代表的结构光法以其测量精度、测量效率和体积小的优势,被认为是提取物体三

维数据的最可靠技术之一<sup>[2]</sup>。然而,对于反射率较大的物体进行检测时,并不能保证采集的条纹图像具有良好的正弦性<sup>[3]</sup>,局部的图像饱和将导致三维重建结果中出现数据空洞。传统的解决方案是在待测表面喷涂粉末,以使光线出现漫反射现象。但是喷涂的过程是费时费力的,且喷涂厚度和均匀性也会影响检测精度<sup>[4]</sup>。为寻找较优的高反光物体光学检测方案,国内外众多学者提出了自适应条纹投影的概念,通过改变投影亮度来消除相机像素的过饱和问题<sup>[5]</sup>。自适应的过程主要是根据相机采集图像的饱和和像素信息,反馈调节投影像素的灰度,保证相机采集到最佳的调制条纹图案。其实现的前提在于如何确定采集图像像素点与投影图像像素点间的对应关系。

相机-投影仪像素间的精准映射关系是衡量自适应条纹检测精度的核心指标之一。Huang等<sup>[6]</sup>提出一种建立在颜色编码的空间结构光图案调整技术,来优化估计投影仪-相机参数和对应坐标。Waddington等<sup>[7]</sup>提出修正最大输入灰度级(maximum input gray level, MIGL)投影条纹图案的技术。整体降低投影强度获取非饱和图像,但不足的是降低了低反射区域的重建质量。Li等<sup>[8]</sup>对多组不同MIGL相移图像融合,等价于局部调整投影条纹,消除了饱和信息,但增加了条纹投影和采集数量,效率较低。Feng等<sup>[9]</sup>使用插值预测搜索算法获取最优相位,使用绝对相位完成了相机像素向投影像素坐标系映射的过程,使用校准参数纠正了映射误差。李乾等<sup>[10]</sup>对CAD数据和点云信息进行配准,结合相机标定参数,获取投影与成像间的映射关系,但需要提前获取模型数据,存在较大的局限性。Wang等<sup>[11]</sup>利用横纵方向上条纹相位相等的原则,建立投影像素与相机像素间的映射关系,但并未考虑到像素数量不一致的映射关系。汪锦航等<sup>[12]</sup>提出一种改进的相位映射技术,采用上下取整函数改进相位到坐标的计算,保证相机中的有效像素完整映射在投影像素坐标内。刘今越等<sup>[13]</sup>为提高相机-投影仪系统间标定精度,提出同时使用50%灰度棋盘格和黑白棋盘格计算角点信息,获取标定参数,有效提高了金属刀具重构精度。Sun等<sup>[14]</sup>在考虑硬件分辨率差异问题上,采用连续相位滤波对未匹配的投影仪像素点进行处理,获得准确的坐标对应。翼红彬等<sup>[15]</sup>利用图像中标定板圆心在投影像素中的坐标,生成虚拟的投影图像,建立了像素映射关系,但并不适用于无特殊标志点的物体。Zhang等<sup>[16]</sup>根据虚拟相位搜索策略,获得了超过子视图分辨率的相位信息,并根据双视图间的像素匹配获得了最佳3D坐标。Guan等<sup>[17]</sup>提出一种复合条纹映射方法,利用正交复合条纹在横纵方向上的相位分离,建立相机与投影仪间的像素对应关系,有效提高了映射效率。Wang等<sup>[18]</sup>对双相机和投影仪间的重叠视野进行分析,

使用重叠区域的刚性变换矩阵建立相机与投影像素映射关系,提高了匹配精度,但预先对重叠区域的处理增加了匹配算法的复杂度。

综上所述,本文从结构光自适应反馈测量的需求出发,提出一种基于虚拟视野的结构光条纹投影像素精确映射方法。通过对条纹投影测量基本原理和相机与投影仪间视场效应的分析,创建虚拟投影视野,利用改进包裹相位-像素坐标映射方法和相位差阈值判断准则,获取像素间的精准映射关系。

## 1 结构光检测技术及视场效应

### 1.1 相移法检测原理

基于结构光的三维单目测量系统包含相机、投影仪、计算机等。如图1所示,通过计算机编码含有相位信息的正弦条纹图案,控制投影仪将编码图案投影到物体表面,相机采集经物体高度调制的变形条纹,并对采集的变形条纹进行解码,获取相位信息,经相位-高度标定模型计算点云数据,实现三维重建。

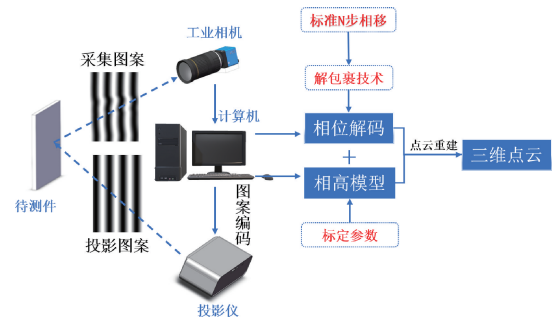


图1 单目三维结构光测量系统原理

Fig. 1 Principle of the monocular 3D structured light measuring system

在结构光条纹投影技术中,相位解算是结构光技术的核心内容之一,其准确性直接决定了三维信息的重构精度。以标准 $N$ 步相移法为代表实现相移测量,投影仪投射正弦条纹到被测物体表面上,相机采集到的变形条纹图的强度分布可以表示为:

$$I_i(x, y) = I_a + I_b \cos[\varphi(x, y) - 2\pi i/N] \quad (1)$$

式中: $I_i(x, y)$ 表示第 $i$ 幅采集图像任意像素点的光强; $I_a$ 和 $I_b$ 分别表示背景调制光强; $\varphi(x, y)$ 表示在像素 $(x, y)$ 处经物体高度调制的相位; $i=0, 1, 2, \dots, N-1$ 表示相移索引值, $N$ 表示相移步数。为了保证正弦条纹的调制度, $I_a$ 和 $I_b$ 一般设置为最高灰度级的1/2,考虑到灰度级不可能存在小数的情况,取 $I_a=128, I_b=127$ 。

根据相移原理,通过式(2)求解调制条纹的相位信息。

$$\varphi(x, y) = \arctan \left[ \frac{\sum_{i=1}^N I_i(x, y) \sin(2\pi i/N)}{\sum_{i=1}^N I_i(x, y) \cos(2\pi i/N)} \right] \quad (2)$$

由于相位解算中使用反正切计算相位信息,相位被包裹在 $[-\pi, \pi]$ 区间内,故被称为包裹相位。包裹相位在单周期内存在唯一性,但在整体相位图中多存在关于 $2\pi$ 的相位跃迁,条纹顺序信息丢失,进而无法准确地映射高度信息。因此,需要利用条纹级次信息对包裹相位进行展开,即在包裹相位上加上或减去 $2\pi$ 的整数倍,获得无歧义连续相位。

相位解包裹的本质在于寻找正确的条纹级次顺序,大致分为空间相位展开<sup>[19]</sup>和时间相位展开<sup>[20]</sup>两种。空间相位展开是指沿着固定的空间路径对一帧包裹相位图进行处理,通过去除相位中关于 $2\pi$ 的周期阶跃来获取连续相位信息;时间相位展开则对多帧包裹相位的同名像素点随采集时间方向进行展开,条纹级次顺序多通过额外的编码图像参与计算。时间相位展开虽降低了测量速度,但对复杂场景的适应性更强,对复杂工件的检测精度更高,因此在工业测量中使用频率较高。以双频时间相位展开为例,通过投影两组不同频率的相移条纹图,使用相移法解算包裹相位后,进一步的展开过程表达式如下:

$$\begin{cases} k(x, y) = \text{round} \left[ \frac{R\phi_L(x, y) - \varphi_H(x, y)}{2\pi} \right] \\ \phi_H(x, y) = 2\pi \times k(x, y) + \varphi_H(x, y) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k(x, y)$ 表示相位级次的级别值; $\text{round}[\cdot]$ 表示取整函数; $R$ 为高频和低频条纹的频率比值; $\phi_H(x, y)$ 、 $\phi_L(x, y)$ 、 $\varphi_H(x, y)$ 、 $\varphi_L(x, y)$ 分别表示高频连续相位、低频连续相位、高频包裹相位、低频包裹相位。在低频包裹相位 $\varphi_L(x, y)$ 中,其频率为1,即等价于连续相位 $\varphi_L(x, y)$ ;双频时间相位展开中,主要将低频相位作为标尺,实现对高频条纹相位的展开。相位精度多取决于取整函数中的级次计算,为获得正确的连续相位,在级次取整函数中需要满足式(4)的要求。

$$R\phi_L(x, y) - \varphi_H(x, y) < (2k + 1)\pi \quad (4)$$

另一方面,考虑到相位误差的传递,相位展开中的乘法运算会进一步放大相位误差,相位准确性降低。例如,在获取高频连续相位 $\phi_H$ 时,低频连续相位 $\phi_L$ 与频率比值 $R$ 的相乘运算,会导致相位误差等比例扩大。因此,在双频时间相位展开技术中,条纹频率比值越大,连续相位的准确性将反向降低。

## 1.2 结构光光学检测中的视场效应

在条纹投影测量技术中,相位信息被广泛用于建立相机与投影仪像素间的映射关系。在相位信息的获取中,相

位分布状况与相机和投影仪间的视野范围密切相关。由于硬件参数的限制及安装位置的差异,相机与投影仪的重叠视野范围可分为3种类型,如图2(a)~(c)所示,主要分为投影视野等于相机视野、投影视野大于相机视野、投影视野小于相机视野。由于不同视野下相机采集投影条纹的完整性是不同的,相位信息也随之改变。

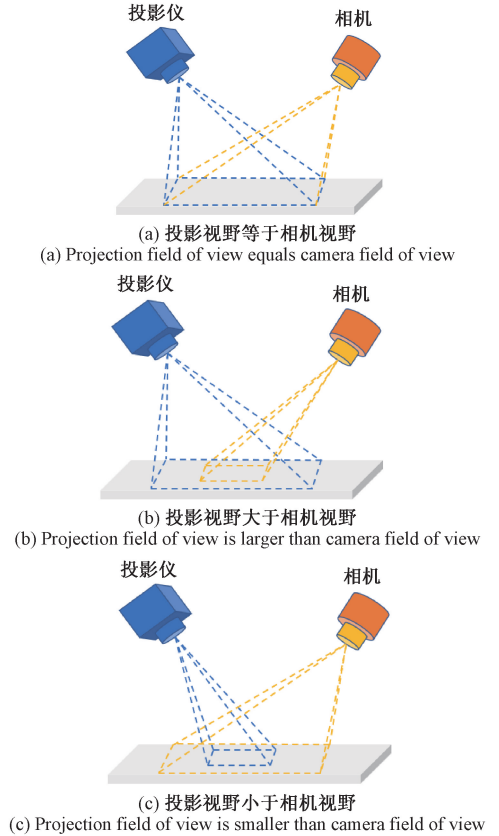
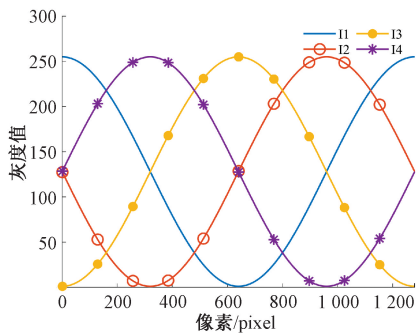


图 2 相机-投影仪间视场示意图

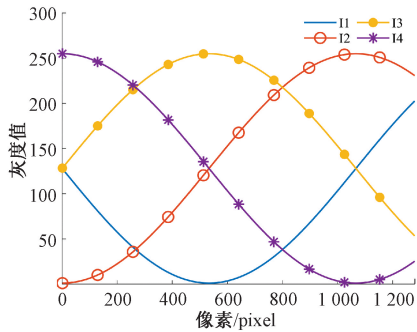
Fig. 2 Diagram of field of view between camera and projector

为保证根据相位信息建立像素映射关系的有效性,通过仿真实验分析了不同视野类型下的条纹采集情况和相位分布情况。在仿真实验中,编码单周期正弦条纹作为投影图案,同时控制相机采集图像中的条纹周期值,模拟不同视野下的测量场景。如图3(a)~(c)所示,分别为3种不同视场下采集图像包含的条纹信息, $\Pi \sim 14$ 分别表示初始相位为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 的条纹曲线。图3(a)和(c)为在相机采集视野等于或大于投影视野时的条纹信息,采集图像中包含了投影条纹的完整周期。其差异之处为图3(c)中含有大量背景类信息,图像中非正弦特性的像素灰度值是固定的,仿真中将背景类像素灰度值设置为130。图3(b)为测量中常见的投影视野大于采集视野的情况,采集的投影条纹存在部分缺失,但在整个区域内呈现明显的正弦特性,不存在与测量过程无关的背景类像素点。



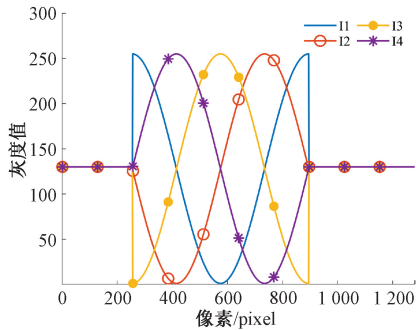
(a) 投影视野等于采集视野的条纹

(a) The fringe of projected field of view equals camera field of view



(b) 投影视野大于相机视野的条纹

(b) The fringe of projection field of view is larger than camera field of view



(c) 投影视野小于相机视野的条纹

(c) The fringe of projection field of view is smaller than camera field of view

图3 不同视场情况下采集图像信息曲线

Fig. 3 Curve graph of image information collected under different field of view

通过式(2)提取采集条纹的相位,不同视场场景下的相位曲线如图4所示。图4中a、b、c分别表示投影视野等于、大于、小于相机采集视野时的相位曲线。在投影视野不大于采集视野时,相位曲线a和c的极值点分别为0和 $2\pi$ ,并在两极值点间呈现单调连续递增的规律。不同之处在于相位曲线c的解算中,背景类像素导致相位提取时存在大量0/0的情况,仿真中设置其计算结果为0。但真实场景下,复杂的测量环境无法保证采集图像的背景类像素灰度固定不变,进而产生大量的歧义相位,影响测量精度。投影视野大于采集视野时,图4中,相位曲线b虽然依旧保持单调递增的规律,但相位值域范围缩小,相位极值点发生改变。

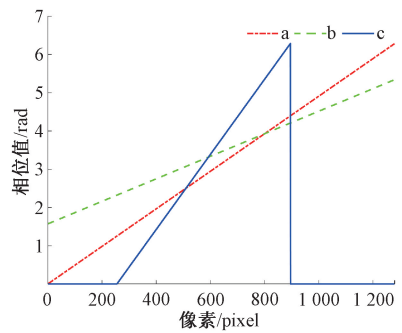


图4 不同视场情况下调制条纹相位曲线

Fig. 4 Phase curves of modulated fringe under different field of view

根据正弦条纹单方向相移原理,其相位值域变化与缺失的条纹周期信息之间存在一定的比例关系。通过对相位解算过程的分析,相位信息与条纹周期之间的联系如下:

$$\Delta\phi = \phi_{\max} - \phi_{\min} = 2\pi T \quad (5)$$

式中: $\Delta\phi$ 表示相位值域大小; $\phi_{\max}$ 、 $\phi_{\min}$ 分别表示相位极大值和极小值; $T$ 表示采集条纹的周期。在结构光条纹投影测量中,相位信息与条纹周期有着明显的线性关系。

综上所述,在相机-投影仪间视场效应的仿真分析中,投影与采集视野一致是测量系统最理想的情况,但在真实的检测场景下,硬件多处于非同轴的安装方式,现有检测设备都无法保证两者视野范围的一致性。此外,投影视野小于相机采集视野的方式对投影仪与待测物体间的距离要求存在较大的局限性,且后期较多歧义相位严重影响测量精度。投影视野涵盖采集视野的方式对位置布置要求宽泛,背景类无关像素较少,适合狭窄加工环境进行检测。本文采用该种布置方式,根据其相位分布特点,完成后述相机与投影像素间的精确坐标映射。

## 2 相机-投影仪精确坐标映射方法

### 2.1 条纹周期粗匹配

目前,为满足高精度测量的需求,数百万级像素的工业相机已成为高精度测量设备的必需品,如何高效精确地建立像素间映射关系,进而根据相机像素反馈调节投影像素,已成为投影测量技术中必须要解决的问题。研究发现,由于相机和投影仪像素尺寸差异,两者像素间的映射并非是一对一的单独匹配。如图5所示,在由相机像素向投影仪像素映射中多存在一对一映射和多对一映射两种模式。因此,本文提出一种基于条纹周期特性的虚拟视野范围匹配方法。首先,根据单周期无歧义相位特性,快速构建虚拟投影视野;然后,使用高频条纹周期

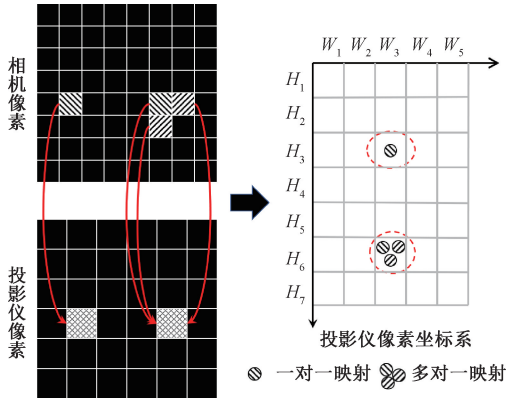


图 5 非等值像素尺寸所产生的映射模式

Fig. 5 Mapping patterns generated by non-equivalent pixel

对虚拟投影视野逐级编号,预先对虚拟和真实投影视野内局部范围进行粗匹配。粗匹配的主要作用是提前界定像素映射范围,提高计算效率。另一方面,使用条纹周期作为特征划分视野范围,也为后续包裹相位到像素坐标的计算奠定基础。

在粗匹配过程中,根据相位值域与周期间的线性关系,反向使用相位信息,计算在相机像素尺寸下包含完整投影条纹的视野大小,即虚拟建立以相机像素尺寸为最小单位,且与投影视野范围一致的虚拟投影仪视野。实现虚拟投影仪视野建立过程的计算原理如图 6 所示。投影的低频条纹为单周期正弦条纹,使用相移法快速提取连续无歧义的相位信息,并根据纵横相位极值点反向建立采集完整条纹时的视野大小。

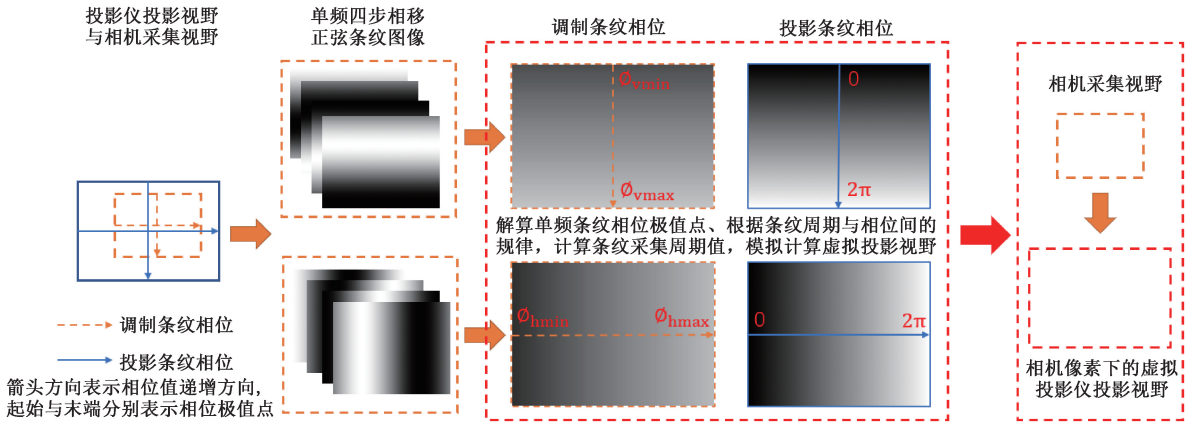


图 6 虚拟投影仪视野计算原理

Fig. 6 Visual field calculation principle of virtual projector

根据式(5)的相位与条纹周期间的线性关系,使用纵横两个方向的条纹信息,来分别确定虚拟投影视野的高度和宽度。利用解算的采集条纹周期,反向计算完整周期下虚拟投影视野尺寸:

$$\begin{cases} W_{cp} = \frac{2\pi \times W_c}{\phi_{vmax} - \phi_{vmin}} \\ H_{cp} = \frac{2\pi \times H_c}{\phi_{hmax} - \phi_{hmin}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\phi_{vmax}$ 、 $\phi_{vmin}$ 、 $\phi_{hmax}$ 、 $\phi_{hmin}$  表示采集的纵横条纹相位极值; $W_c$ 和 $H_c$ 为采集图像的真实尺寸; $W_{cp}$ 和 $H_{cp}$ 是以相机像素大小为单位建立的虚拟投影仪视野,其物理尺寸与投影仪视野范围一致。

在获取虚拟投影仪视野范围后,进一步利用多频条纹的周期相位将视野区域划分成相应的小区域,并建立虚拟投影仪视野与真实的投影仪视野间小范围的粗映射关系。如图 7 所示,对包裹相位图像中的相位周期进行逐级编号,由于真实和虚拟投影仪的视野是完全重合的,相位周期编号的等级是一一对应的。利用虚拟视野下像

素区域的周期编号,寻找对应的真实投影仪像素坐标下的等值编号,实现周期视野范围的粗匹配。通过粗匹配流程,像素间映射的范围缩小到单一周期中,减少了像素错误匹配的机率,并在后续的处理中,对多组已匹配范围内的逐像素点映射算法进行并行运算,进一步提高了像素匹配的效率。

### 2.2 像素坐标精匹配

经过粗匹配过程界定相机像素与投影仪像素间的映射范围后,如何确立像素间精确对应,是精匹配过程中必须要解决的问题。传统建立单一像素间匹配关系的方法,多使用纵横连续相位构成坐标 $(\phi_v, \phi_h)$ 来求解对应像素坐标 $(x_p, y_p)$ :

$$\begin{cases} x_p = \text{round} \left[ \frac{\phi_v(x_c, y_c) W_p}{2\pi f_v} \right] \\ y_p = \text{round} \left[ \frac{\phi_h(x_c, y_c) H_p}{2\pi f_h} \right] \end{cases} \quad (7)$$

式中: $(x_p, y_p)$ 为相机像素坐标 $(x_c, y_c)$ 所对应的投影仪像素坐标位置; $W_p$ 和 $H_p$ 表示投影仪投影图像的宽和高;

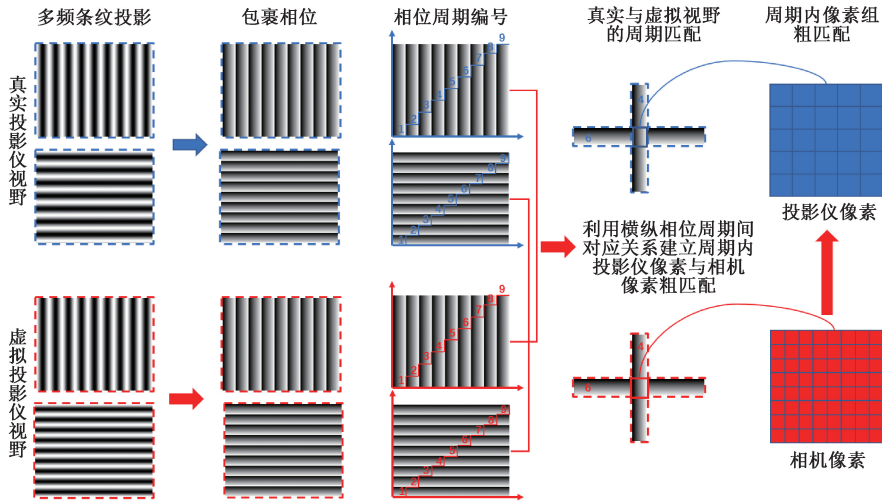


图7 条纹周期匹配示意图

Fig. 7 Diagram of fringe period matching

$f_v, f_h$  为投影横纵条纹的频率;  $\varphi_v(x_c, y_c)$  和  $\varphi_h(x_c, y_c)$  表示  $(x_c, y_c)$  处的连续相位值。

传统像素映射方法中, 相位展开的准确性直接影响像素坐标间映射的精度。另一方面, 由相位到像素坐标的运算过程中, 取整运算同样会导致匹配错误。针对上述问题, 本文在粗匹配周期对应的情况下, 考虑到预先界定范围中的像素相位与像素坐标间同样具备线性关系, 因此提出使用精确度更高的包裹相位建立像素映射的新方法, 并根据行列相位差阈值来判断匹配像素点的邻域像素是否同样具备匹配的特征。

使用包裹相位中单周期的相位值建立像素坐标的映射, 改进映射方法的数学表达式为:

$$\begin{cases} x_p = \frac{W_p}{T_v} \times (j - 1) + \text{round} \left[ \frac{(\varphi_v(x_c, y_c) + \pi) W_{pj}}{2\pi} \right] \\ y_p = \frac{W_p}{T_h} \times (j - 1) + \text{round} \left[ \frac{(\varphi_h(x_c, y_c) + \pi) H_{pj}}{2\pi} \right] \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $T_v$  和  $T_h$  为横纵条纹的周期;  $j=1, 2, \dots$  表示在图像像素  $(x_c, y_c)$  对应的周期编号;  $\varphi_v(x_c, y_c)$  和  $\varphi_h(x_c, y_c)$  为条纹横纵方向的相对相位值;  $W_{pj}$  和  $H_{pj}$  分别表示在第  $j$  周期中投影图像的宽度和高度。

利用改进的包裹相位计算相机-投影仪像素间映射关系时, 对取整运算导致的多像素点映射错误的问题, 使用相位差阈值进行判别, 计算原理如式(9)所示, 主要根据条纹的周期、像素数量计算相位图像的行列间相位差值。

$$\begin{cases} \Delta\varphi_v = \frac{2\pi T_v}{H_c} \\ \Delta\varphi_h = \frac{2\pi T_h}{W_c} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $W_c$  和  $H_c$  为采集条纹图像的宽和高。根据条纹图案编码分析可知, 相位图像中相邻像素相位的差值是固定的。例如, 当设定编码周期为 64, 宽度为 1 920 个像素的纵向条纹图案时, 在解码的相位图像中, 相位值域为  $0 \sim 2\pi$ , 故相邻两像素间的相位差约为 0.21, 即相邻像素点相位差小于 0.21, 则表明相邻像素间具备相同匹配点特征, 若相反, 则需要对邻域像素的匹配关系进行单独分析。

相位差阈值主要判别多相机像素对应投影像素的准确性, 以保证投影仪中有效像素点最大限度地与相机像素建立映射关系。相位差阈值的分配使用准则, 如图 8 所示。为此, 结合阈值完成的精匹配步骤如下。

1) 根据式(8)建立对应周期范围内的相机像素坐标向投影仪像素坐标的转换关系, 根据包裹相位信息生成匹配的像素坐标数组。

2) 根据式(9)计算在相位图像中相邻行列间的相位差值, 并设置为阈值。

3) 遍历步骤 1) 中获取的像素坐标数组, 对数组中重复出现的坐标值, 提取生成该坐标值的所有像素坐标和相位信息, 并记录在新的数组中。

4) 对步骤 3) 中获取的重复坐标值的所有像素坐标进行排序, 以像素坐标最小值作为初始匹配点, 计算剩余像素与匹配点间的相位差值, 若小于阈值, 则表示具备与匹配点相同的特征; 相反, 则表明该像素点对应的投影仪坐标应在匹配点对应像素坐标值的邻域内。

5) 不断循环步骤 4) 直到步骤 3) 中的所有重复坐标值所包含的像素点均进行了阈值判别, 多像素映射模式的像素坐标均参与调整, 完成精匹配。

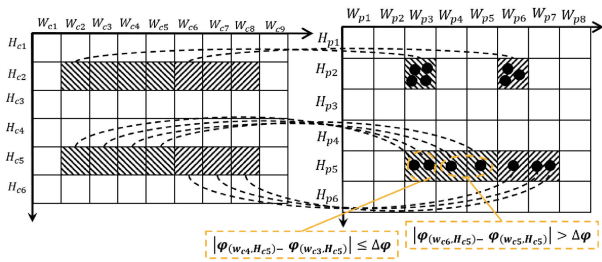


图 8 使用相位差阈值判断坐标匹配示意图

Fig. 8 Diagram of using phase difference threshold to judge coordinate matching

本文方法的整体流程如下:首先,编码投影两组不同频率的正弦条纹图案,提取低频横纵条纹相位值计算虚拟视野尺寸;然后,进一步利用高频条纹周期划分虚拟视野区域,编号建立虚拟与真实视野间小尺寸映射关系;最后,使用改进包裹相位-坐标映射方法,建立小尺寸区域间像素映射关系,并根据相邻相位差阈值实现像素间精确映射。

### 3 实验与分析

为了验证所提方法的有效性,本文搭建了一套结构光三维检测平台如图 9 所示。系统主要由微型投影仪 M1S、大恒水星相机 MER-130-30UM-L、VST 变焦镜头等组成。硬件设备主要参数如表 1 所示,相关控制算法在 AMD Ryzen 7 5800H 3.2 GHz CPU、16 GB RAM 的计算机上实现。

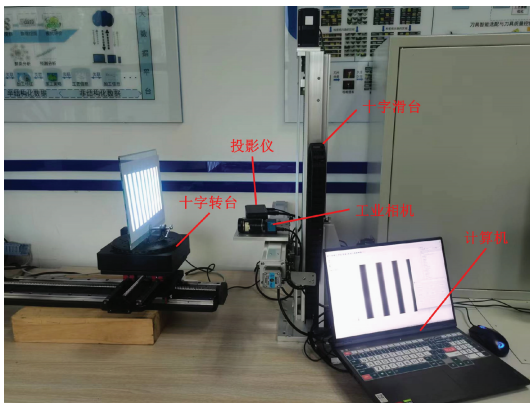


图 9 结构光三维检测平台

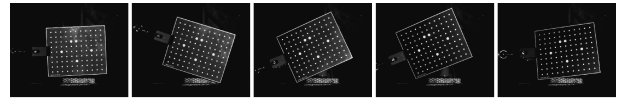
Fig. 9 Structured light 3D detection platform

在使用平台检测时,使用精度为 0.01 mm 的 GRB120-11×9 标准圆心标定板对相机-投影仪系统进行了标定。为降低投影仪 gamma 非线性响应的误差,通过调整投影光强,弱化了投影条纹非正弦性的影响<sup>[3]</sup>。如图 10 所示,对 5 种不同姿态图像的标定,获取标定参数,参数信息如表 2 所示。

表 1 硬件设备主要参数

Table 1 Main parameters of hardware devices

设备名称	性能参数	参考值
相机	传感器类型	CMOS
	分辨率/pixel	1 280×1 024
	像素尺寸/μm	5.2×5.2
镜头	焦距/mm	8~50
投影仪	分辨率/pixel	1 920×1 080
	像素尺寸/μm	5.8×5.8



(a) 图像1 (a) Image 1 (b) 图像2 (b) Image 2 (c) 图像3 (c) Image 3 (d) 图像4 (d) Image 4 (e) 图像5 (e) Image 5

图 10 不同姿态的标定图像

Fig. 10 Calibration images of different poses

表 2 相机标定参数

Table 2 Camera calibration parameters

参数	参考值
内参矩阵	$\begin{bmatrix} 2\ 778.673\ 340 & 0 & 669.645\ 447 \\ 0 & 2\ 779.233\ 643 & 486.462\ 921 \\ 0 & 0 & 1.000\ 000 \end{bmatrix}$
畸变系数	$[-0.223\ 534\ 0.581\ 067\ -0.000\ 586\ -0.000\ 010]$

标定完成之后,根据相移条纹原理,利用计算机编码频率分别为 1 和 9 的横纵正弦条纹图案,如图 11(a)、(b)、(e)、(f)所示,分辨率为 1 920×1 080。实验中待测面为较为平整的平面,相机同步采集经待测物体表面调制的变形条纹,如图 11(c)、(d)、(g)、(h)所示,采集图像分辨率为 1 280×1 024。

通过式(2)和(3)分别提取相机采集的变形条纹包裹相位和连续相位信息。图 11(d)、(h)中横纵变形条纹的包裹相位图和连续相位图如图 12(a)~(d)所示。

为进一步验证包裹相位误差小于连续相位的准确性,利用 MATLAB 提取图 12(c)、(d)中相位数据,与标准相位数据进行偏差分析。包裹相位单周期曲线和标准相位曲线如图 13(a)所示,计算其均方根误差为 1.212 3。同时,对图 12(d)中连续相位进行误差分析,相位曲线分布如图 13(b)、(c)所示,图 13(c)为(b)中黑色虚线框内局部像素的相位曲线分布,其与图 13(a)中提取的包裹相位的像素区间一致。误差分析表明,整体连续相位曲线与标准相位的均方根误差为 1.699 9,局部范围中像素相位曲线的均方根误差为 2.165。综上所述,包裹相位在相位展开时,在相同相位图像的像素区间中,相位均方根误差增大了 78.6%,存在较大的二次误差。

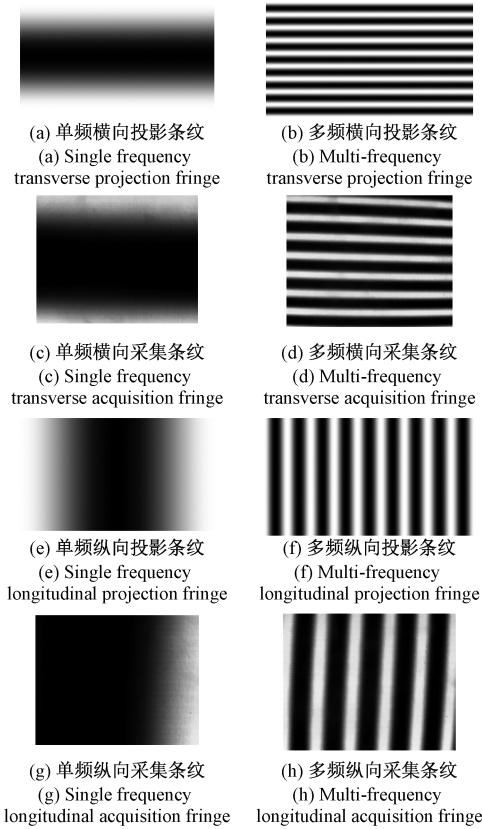


图 11 投影和采集的横纵条纹

Fig. 11 Projection and acquisition of transverse and longitudinal fringe images

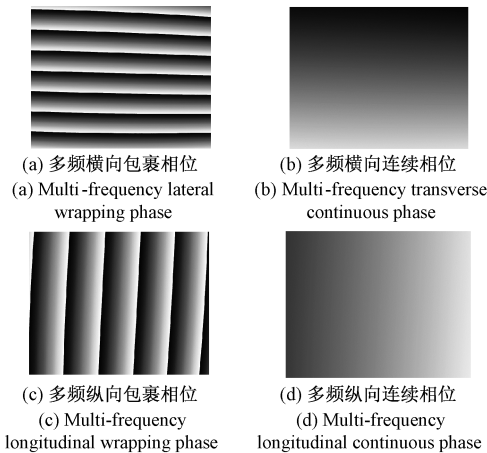


图 12 多频横纵条纹的解码相位图

Fig. 12 Decoded phase diagram of multifrequency horizontal and vertical fringes

根据相位偏差分析结果,使用包裹相位替代连续相位建立相机-投影间像素映射关系,可有效提高像素映射质量。为突出本文方法的优越性,分别使用传统横纵相位匹配<sup>[9]</sup>、向上向下取整匹配<sup>[12]</sup>和本文匹配方法进行实验,像素匹配效果如图 14 所示。

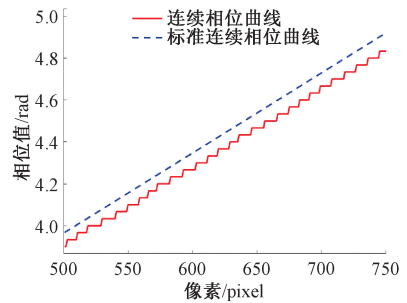
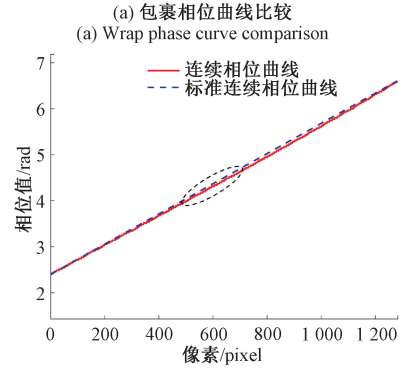
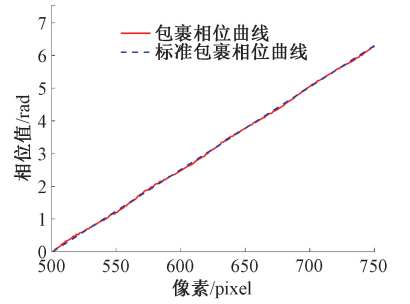


图 13 相位曲线与标准曲线分布

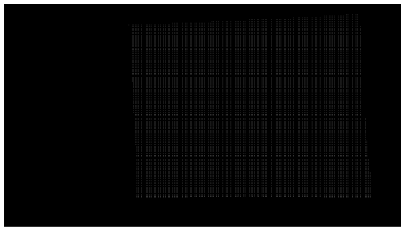
Fig. 13 Phase curve and standard curve distribution diagram

为量化评价相机-投影间像素映射准确度,提出有效投影像素点匹配数量和坐标误匹配比例作为衡量精确度的评价指标。有效像素点匹配数量表征了在投影像素平面上,建立匹配关系的像素数量。像素坐标误匹配比例表示经相机采集图像中相位突变、坐标取整运算导致的坐标错误匹配数量与匹配像素总数量的比值。参与匹配的像素总数量取决于相机采集图像中有效相位像素点,即假设像素坐标误匹配比例为  $K$ ,参与匹配的像素总数量为  $\beta$ ,像素坐标误匹配数量为  $\alpha$ ,像素坐标误匹配比例的表达式如下:

$$K = \frac{\alpha}{\beta} \times 100\% \quad (10)$$

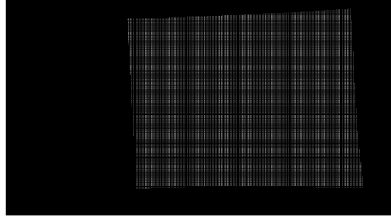
在相机-投影像素映射中,期望的是相机有效像素点尽可能多地寻找到对应的投影像素,即有效匹配点数量越多越好。另一方面,相机像素应当尽可能少地错误匹





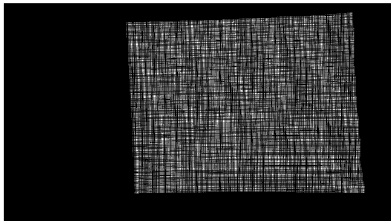
(a) 传统纵横相位匹配<sup>[9]</sup>

(a) Traditional horizontal and vertical phase matching<sup>[9]</sup>



(b) 向上向下取整匹配<sup>[12]</sup>

(b) Round up and round down matching<sup>[12]</sup>



(c) 本文匹配方法

(c) Matching method in this article

图 14 基于平面模型的 3 种不同匹配方法效果

Fig. 14 Effect of three different matching methods based on the plane model

配投影像素,即误匹配几率越低,相机-投影像素映射精确度越高,匹配效果越好。通过对图 14 中有效像素和相位-坐标过程中产生坐标突变的像素搜索,3 种不同匹配方法的效果如表 3 所示。

表 3 基于平面模型的 3 种不同匹配方法量化分析

Table 3 Quantitative analysis of three different matching methods based on the plane model

相机-投影仪映射方法	有效像素点匹配数量	像素坐标误匹配比例/%
传统纵横相位匹配 <sup>[9]</sup>	30 257	80.55
向上向下取整匹配 <sup>[12]</sup>	113 811	45.66
本文方法	278 537	14.26

实验结果表明,本文提出的方法明显提高了相机-投影像素映射精度,有效像素点匹配数量相较于传统匹配方法<sup>[9]</sup>和向上向下取整匹配方法<sup>[12]</sup>分别提高了 9.21 倍和 2.45 倍,像素坐标误匹配比例降低至 14.26%。

为进一步评测本文方法的有效性,对具有复杂形貌的人脸模型进行实验验证。图 15 为实验待测件,实验提取的相位图像如图 16 所示。



图 15 实验待测件

Fig. 15 Test parts



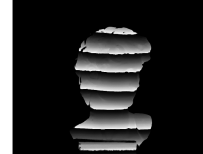
(a) 单频横向连续相位

(a) Single frequency transverse continuous phase



(b) 单频纵向连续相位

(b) Single frequency longitudinal continuous phase



(c) 多频横向包裹相位

(c) Multi-frequency transverse wrapping phase



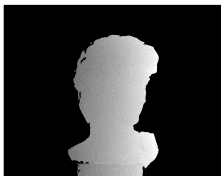
(d) 多频横向连续相位

(d) Multi-frequency transverse continuous phase



(e) 多频纵向包裹相位

(e) Multi-frequency longitudinal wrapping phase



(f) 多频纵向连续相位

(f) Multi-frequency longitudinal continuous phase

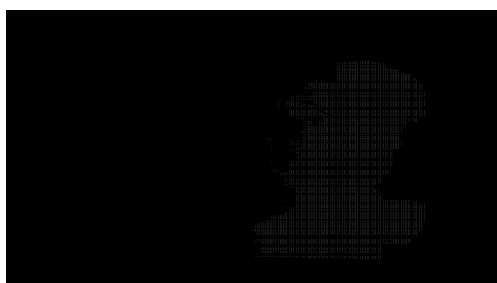
图 16 人脸模型的实验相位图

Fig. 16 Experimental phase diagram of the face model

使用图 16(d)、(f) 的连续相位,实现传统纵横相位匹配<sup>[9]</sup>和向上向下取整匹配方法<sup>[12]</sup>。使用图 16(a)、(b) 的单频横纵条纹相位信息建立虚拟投影仪视野,使用图 16(c)、(e) 的包裹相位信息实现本文所提的匹配方法,像素匹配效果如图 17 所示,评价结果如表 4 所示。

表 4 基于人脸模型的 3 种不同匹配方法量化分析  
Table 4 Quantitative analysis based on three different matching methods of the face model

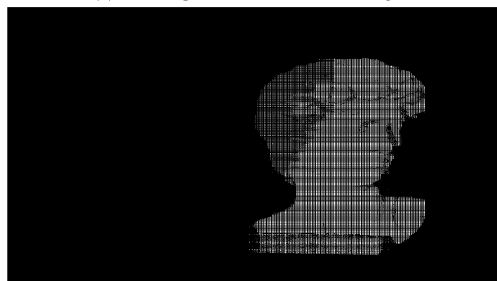
相机-投影仪映射方法	有效像素点匹配数量	像素坐标误匹配比例/%
传统纵横相位匹配 <sup>[9]</sup>	4 841	59.40
向上向下取整匹配 <sup>[12]</sup>	16 903	34.67
本文方法	45 698	12.56



(a) 传统纵横相位匹配<sup>[9]</sup>  
(a) Traditional horizontal and vertical phase matching<sup>[9]</sup>



(b) 向上向下取整匹配<sup>[12]</sup>  
(b) Round up and round down matching<sup>[12]</sup>



(c) 本文匹配方法  
(c) Matching method in this article

图 17 基于人脸模型的 3 种不同匹配方法效果

Fig. 17 Effect of three different matching methods based on the face model

通过对表面平整度变化较大的人脸模型实验结果分析表明,本文所建立的相机-投影像素的映射匹配方法优于另外两种方法,对具有复杂表面的待测物体依旧保持良好的匹配效果。对 3 种匹配方法进一步分析,传统纵横相位匹配中,相邻像素间相位差值较小,在取整中多导致像素错误映射在同一坐标值上,导致大量有效投影像素点缺失。上下取整的方法虽改进了取整运算的方式,增加了有效像素数量,但像素误匹配的几率也有所增加,降低了像素映射精度。本文方法通过构建虚拟视野,使用可靠性更高的包裹相位和相位差阈值计算像素坐标,有效提高了像素映射精度。

## 4 结 论

针对结构光条纹投影检测中,相机与投影仪间的像素尺寸差异、相位误差等因素导致成像与投影平面间映

射精度较低的问题,本文基于条纹相位分布特点提出一种构造虚拟视野、使用包裹相位实现相机-投影像素精准映射的方法。

首先,通过对相移解相原理分析,推理得到相位展开过程中存在二次误差,实验结果表明,在相同相位图像的像素区间中,展开相位均方根误差增大了 78.6%,验证了包裹相位相较于连续相位更加准确。此外,通过对相机-投影仪工作视野的仿真分析,总结了 3 种不同视场下的条纹和相位分布状况,确定了相位与条纹周期间存在的线性关系。

然后,在相位与采集条纹周期间线性关系的基础上,利用低频相位反向构建虚拟投影仪视野,得到以相机像素尺寸为基本单元的虚拟视野,其整体尺寸与真实的投影仪视野一致。利用高频相位周期对虚拟视野局部区域逐级编号,实现真实与虚拟视野局部区域间的粗匹配。

最后,提出一种使用包裹相位来计算粗匹配区域中的像素映射方法,并使用行列间相位差阈值对映射像素进行精准判别。本文方法与传统相位匹配方法相比,无需解算条纹连续相位,仅采用改进的包裹相位即可建立相机-投影仪像素间的映射关系。实验结果表明,本文所提匹配方法的有效像素点匹配数量显著提高,有效降低了像素坐标的误匹配比例。

条纹投影测量技术在光学检测行业中具有极大的市场需求。后续将根据映射关系进一步研究相机像素对投影像素的反馈调节,自适应生成非等值系数光强条纹,提高具有光泽表面的高反射物体测量精度,保证条纹测量技术在复杂检测环境下的适用性。

## 参考文献

- [1] XU J, ZHANG S. Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, DOI: 10.1016/j.optlaeng.2020.106193.
- [2] 白雪飞, 张宗华. 基于彩色条纹投影术的三维形貌测量[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(8): 1912-1925.  
BAI X F, ZHANG Z H. Three-dimensional morphology measurement based on color fringe projection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(8): 1912-1925.
- [3] 李茂月, 马康盛, 许勇浩, 等. 基于单目结构光的形貌测量误差补偿方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(5): 19-31.  
LI M Y, MA K SH, XU Y H, et al. Research on error compensation method of morphological measurement based on monocular structured light [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(5): 19-31.
- [4] PALOUSEK D, OMASTA M, KOUTNY D, et al. Effect

- of matte coating on 3D optical measurement accuracy[J]. *Optical Materials*, 2015, 40: 1-9.
- [ 5 ] ZHU Z, LI M, XIE Y, et al. The optimal projection intensities determination strategy for robust strip-edge detection in adaptive fringe pattern measurement [J]. *Optik*, 2022, DOI: 10.1016/j.ijleo.2022.168771.
- [ 6 ] HUANG B Y, TANG Y, OZDEMIR S, et al. A fast and flexible projector-camera calibration system [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2020, DOI:10.1109/TASE.2020.2994223.
- [ 7 ] WADDINGTON C, KOFMAN J. Analysis of measurement sensitivity to illuminance and fringe-pattern gray levels for fringe-pattern projection adaptive to ambient lighting [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 251-256.
- [ 8 ] LI D, KOFMAN J. Adaptive fringe-pattern projection for image saturation avoidance in 3D surface-shape measurement [J]. *Optics Express*, 2014, DOI: 10.1364/OE.22.009887.
- [ 9 ] FENG W, TANG S J, ZHAO X D, et al. Adaptive fringe projection for 3D shape measurement with large reflectivity variations by using image fusion and predicted search[J]. *International Journal of Optics*, 2020, 76: 1-14.
- [ 10 ] 李乾, 薛俊鹏, 张启灿, 等. 利用相机响应曲线实现高反光元件三维面形测量 [J]. *光学学报*, 2022, 42(7): 140-151.  
LI Q, XUE J P, ZHANG Q C, et al. Measurement of 3D surface shape of highly reflective element using camera response curve [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 140-151.
- [ 11 ] WANG L, CHEN C, GAO N, et al. Three-dimensional shape measurement of high reflective objects based on adaptive fringe-pattern projection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(3): 373-378.
- [ 12 ] 汪锦航, 卢荣胜, 刘端茂. 高动态范围表面自适应条纹投影测量方法 [J]. *光学学报*, 2021, 41(19): 145-154.  
WANG J H, LU R SH, LIU D M. Adaptive fringe projection measurement for high dynamic range surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(19): 145-154.
- [ 13 ] 刘今越, 刘佳斌, 郭志红, 等. 一种基于面结构光的刀具三维测量系统[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(12): 1884-1891.  
LIU J Y, LIU J B, GUO ZH H, et al. A three-dimensional tool measurement system based on surface structured light [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(12): 1884-1891.
- [ 14 ] SUN J, ZHANG Q. A 3D shape measurement method for high-reflective surface based on accurate adaptive fringe projection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 153: 106-994.
- [ 15 ] 冀红彬, 张慧博, 范京京, 等. 单周期条纹双四步相移投影仪的标定方法[J]. *光子学报*, 2017, 46(1): 108-115.  
JI H B, ZHANG H B, FAN J J, et al. Calibration method of single-period fringe double-four-step phase shift projector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(1): 108-115.
- [ 16 ] ZHANG Z J, WU Q F, JIANG Y F, et al. Structured-light-field 3D imaging system with coaxial projection[J]. *Progress in Laser and Optoelectronics*, 2023, 60(8): 8-17.
- [ 17 ] GUAN X M, QU X H, NIU B, et al. Pixel-level mapping method in high dynamic range imaging system based on DMD modulation[J]. *Optics Communications*, 2021, 499: 127-278.
- [ 18 ] WANG D, HE K, SUI C, et al. Highly reflective surface measurement based on dual stereo monocular structured light system fusion [C]. 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2019: 1762-1768.
- [ 19 ] HE X Y, QIAN K M. A comparative study on temporal phase unwrapping methods in high-speed fringe projection profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, DOI: 10.1016/j.optlaseng.2021.106613.
- [ 20 ] ZUO C, HUANG L, ZHANG M, et al. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: A comparative review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 85: 84-103.

## 作者简介



李茂月(通信作者),2004年于南京林业大学获得学士学位,2007年于长安大学获得硕士学位,2012年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为哈尔滨理工大学教授、博士生导师,主要研究方向为智能加工与光学检测技术。

E-mail: lmy0500@163.com

**Li Maoyue** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing Forestry University in 2004, M. Sc. degree from Chang'an University in 2007, and Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2012. He is currently a professor and a Ph. D. supervisor at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include intelligent machining and optical detection technology.