

# 光学学报

## 面向高反光区域的自适应结构光

詹瑜<sup>1</sup>, 胡丹<sup>2\*</sup>, 刘凯<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;

<sup>2</sup>四川省产品质量监督检验检测院, 四川 成都 610100

**摘要** 在结构光三维成像中,待测场景的高反光区域会在相机成像阵列上出现饱和,这会影相移法结构光的相位准确度。针对这一问题,提出一种自适应相移结构光测量方法。首先,投射若干幅均匀灰度图像,并检测高反光区域和饱和程度,逐像素点确定最优投影光强。然后,根据目标特性降低投影强度实现坐标映射,生成一组高动态范围的自适应调制条纹。最后,对于饱和程度较大的区域,结合坐标映射的相位进行相位融合。实验结果表明,相比于传统方法,所提方法能够更加准确地对投影光强进行调整,相位的最大均方根误差(RMSE)和饱和区域 RMSE 分别减小了 99.43% 和 92.48%,有效地提高了高反光区域的形貌测量精度。

**关键词** 测量; 光强饱和; 相移结构光; 最优投影光强; 自适应条纹; 相位融合

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1612001

## Adaptive Structured Light for High-Reflective Areas

Zhan Yu<sup>1</sup>, Hu Dan<sup>2\*</sup>, Liu Kai<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

<sup>2</sup>Sichuan Institute of Product Quality Supervision & Inspection, Chengdu 610100, Sichuan, China

**Abstract** In three-dimensional imaging of structured light, the high-reflective areas of scenes to be measured will be saturated on camera imaging arrays, which affects the phase accuracy of phase-shift structured light. Therefore, an adaptive phase-shift structured light measurement method is proposed. First, several uniformly-grayscaled images are projected onto an object, the high-reflective areas and their saturation degrees are detected, and the optimal projected light intensity is determined pixel by pixel. Then, according to the object properties, the projected light intensity is reduced to realize coordinate mapping, and a group of adaptive fringes with a high dynamic range is automatically generated. Finally, the phases over the highly saturated area are fused with the phases of coordinate mapping. The experimental results reveal that the proposed method can accurately adjust the projected light intensity. Compared with the traditional method, the proposed method reduces the maximum root mean square error (RMSE) and the RMSE of the saturated areas by 99.43% and 92.48%, respectively, and it effectively improves the morphological measurement accuracy of the high-reflective areas.

**Key words** measurement; light intensity saturation; phase-shift structured light; optimal projection light intensity; adaptive fringe; phase fusion

## 1 引言

以相位测量轮廓术(PMP)<sup>[1]</sup>为代表的主动非接触式<sup>[2]</sup>结构光三维成像技术因精度、速度和成本等<sup>[3-4]</sup>多方面的优势,已在诸多领域中得到了广泛应用。PMP对于漫反射材质的简单几何形貌的被测对象,具有优异的三维重建精度<sup>[5-6]</sup>,而对于表面反射率较大的

区域(金属表面和类镜面等)或因复杂的几何形状受到多路径效应<sup>[7-8]</sup>干扰时,易产生光照饱和误差<sup>[9]</sup>,从而降低了测量精度。饱和误差是由相机镜头采集的光强值超过其量化范围,导致信号被限制在最大量程上<sup>[10]</sup>,造成编码图案信息的局部缺失<sup>[11]</sup>,进而无法正确进行解码造成的。针对高反光问题,近年来研究人员提出了多种方法,主要包括硬件改进<sup>[12-15]</sup>、图像融合<sup>[9,16-18]</sup>和条

收稿日期: 2022-01-21; 修回日期: 2022-02-23; 录用日期: 2022-03-10

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2022YFG0233, 2020YFG0029)、四川大学理科特色方向培育计划(2020SCUNL204)

通信作者: \*demyd03@163.com; \*\*kailiu@scu.edu.cn

纹图案强度调整<sup>[11,19-22]</sup>等。

改进硬件方法不仅增加了额外的硬件成本,还提高了系统设置的难度。陈超文等<sup>[13]</sup>对三维点进行多视系统匹配,可有效测量高反射率物体,但需要额外增加多个相机,同时还需要进行多视数据融合。Zhu等<sup>[14]</sup>在系统中引入偏振器,通过计算线偏振度来生成增强条纹图案,但需要使用偏振光学器件,同时在低对比度区域中效果不佳。图像融合方法虽然精度较高,但是需要在不同条件下进行多次测量,最终可融合形成一幅高动态范围的图像,所需时间成本和空间成本都较大。李兆杰等<sup>[17]</sup>通过拟合相机相应曲线,自动计算多个不同的曝光时间,再将投射条纹图进行图像融合,提高了曝光精度,但这种方法仍需要特定条件下的多组投影条纹。Zhang等<sup>[18]</sup>通过光强响应函数和最小二乘法求解像素点的信息,并使用多组条纹图进行相位融合。然而,该方法只考虑了反射率区间的全局特性,容易在区间内反射率相对较低的位置处产生误差。调整条纹图案强度法逐像素点对投影图案进行调整,虽然只需投影一组条纹图案进行测量,但是确定最优投影光强和实现相机-投影机平面映射较为困难。张景瑜等<sup>[11]</sup>对过曝缺失相位进行线性插值,并建立了映射关系,借助双向反射分布函数预测灰度调制分布以生成自适应条纹。该方案虽然提高了测量速度,但是对高反光区域物体的形貌有所局限,同时对系统硬件的要求较高。彭广泽等<sup>[19]</sup>通过引入卷积神经网络进行训练,达到了对光强饱和区域进行光强修复的目的,但这种方法迭代训练过程的时间成本较大。冯维等<sup>[21]</sup>基于掩膜图像和插值预测的方法求取了最优投影灰度值,但该方法是将投影图案和捕获图像进行线性建模的,未考虑实际中的非线性问题。

为克服现有改进方法在精度上的不足,实现对高反光区域的自适应重建,本文从PMP系统的成像特性出发,提出一种针对物体高反光区域的自适应条纹重建方法。首先,该方法通过投射若干幅灰度值均匀分布的图像来测定各饱和像素点的最优投影灰度区间,并根据物体表面反射率和环境光信息确定该点的最优投影光强值。然后,根据被测物体特性选取不发生饱和的绝对相位进行相机-投影机的映射。最后,将自适应条纹获取的相位与坐标映射获取的相位进行融合。实验结果表明,相比于传统方法和现有改进算法,所提方法能够在保证信噪比的同时,实现对待测物体的高动态范围测量,进而实现对高反光区域的自适应三维重建。

## 2 基本原理

### 2.1 相位测量轮廓术与饱和误差分析

如图1所示,一个PMP系统的硬件主要包括相机、投影机和计算机。先由计算机生成一组具有不同空间频率的带相移的正弦波编码图案,通过投影机将该图案投射到对象表面后利用相机捕获到带有形变信息的图像,最后利用计算机解码相位和计算点云实现

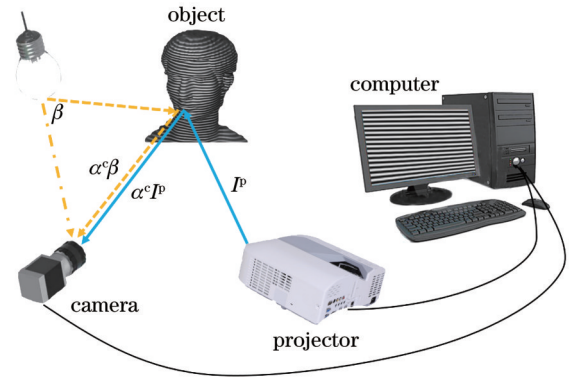


图 1 PMP 系统构成

Fig. 1 PMP system composition

三维重建。

在传统PMP方法中,投影机向扫描目标投射一组正弦条纹,相机同步捕获经目标调制后的图像。在理想情况下,捕获到的光强值<sup>[23-24]</sup>可以表示为

$$I_n^c = A^c + B^c \cos\left(\varphi - \frac{2\pi n}{N}\right) = \alpha^c(I_n^p + \beta) + \beta, \quad (1)$$

式中: $\alpha^c$ 是扫描目标表面的反射率; $I_n^p$ 是编码光栅的光强分布; $\beta$ 是环境光的强度; $I_n^c$ 是捕获到的形变光栅的光强分布; $n$ 是相移步数; $N$ 是投射编码图案的总数; $A^c$ 是平均光强; $B^c$ 是光强调制; $\varphi$ 是包裹相位。以上各变量为表达简便均略去了相机平面的坐标。对于捕获的光栅图案,平均光强 $A^c$ 、光强调制 $B^c$ 和包裹相位 $\varphi$ <sup>[25-26]</sup>的表达式为

$$\begin{cases} A^c = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_n^c \\ B^c = \frac{2}{N} \sqrt{\left[ \sum_{n=0}^{N-1} I_n^c \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right]^2 + \left[ \sum_{n=0}^{N-1} I_n^c \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right]^2} \\ \varphi = \arctan \left[ \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^c \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^c \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)} \right] \end{cases} \quad (2)$$

饱和误差产生的原因是相机存在最大量化值,光强值超过最大量化值的部分像素点会产生“钳位”的效果,进而未能准确记录这些像素点的光强值。上述现象对于光强值的影响可以表示为

$$\Delta I_n^c = I_n^c - \hat{I}_n^c = \begin{cases} 0, & I_n^c \leq R \\ I_n^c - R, & I_n^c > R \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $\Delta I_n^c$ 为光强误差; $\hat{I}_n^c$ 为相机捕获的实际光强值; $R$ 为相机的最大量化值。结合式(2)和式(3)可导出因光强饱和引起的相位误差<sup>[10]</sup>,即

$$\Delta \varphi \approx \left| \frac{2}{NB^c} \sum_{n=1}^N \left[ \sin(\varphi - \varphi_n) \Delta I_n^c \right] \right|, \quad (4)$$

式中: $\varphi_n = 2\pi n/N$ 。由式(4)可以看出,光强误差 $\Delta I_n^c$ 是导致相位误差的直接因素。分析式(2)可知:当出现光

强饱和时, 调制光强  $B^c$  会降低; 使用较大的条纹数量  $N$  可以降低相位误差, 但是会增加扫描时间和降低测量速度。然而, 调制光强  $B^c$  对 PMP 有直接影响, 因此在未产生光强饱和的前提下, 需要尽可能使用具有较高信噪比的投影光强值来进行扫描, 以获取尽可能大的  $B^c$  值。

### 2.2 确定像素点最优投影光强值

本节通过投影具有不同灰度值的图像组的方法来确定最优投影光强值的范围, 结合 PMP 成像原理估算最优投影光强值。具体求解流程如下。

1) 生成  $K + 1$  幅具有不同均匀灰度值的图像组  $M_k = R - kS$ , 其中:  $k = 0, 1, 2, 3, \dots, K$  为图像的编号; 对于 8 位的灰度相机,  $R$  取 255;  $S$  为图像组中相邻两幅投影图像灰度变化的大小, 一般取为固定常数。将图像组  $M_k$  投影至被测物体表面上, 并通过相机捕获在不同投影灰度下的光强  $I_k^c$ 。

2) 受噪声的影响, 可以设定一个饱和光强阈值使  $I_k^c$  中饱和像素与非饱和像素二值化, 即

$$N_k(x^c, y^c) = \begin{cases} 0, & I_k^c(x^c, y^c) < T_{\text{sat}} \\ 1, & I_k^c(x^c, y^c) \geq T_{\text{sat}} \end{cases}, \quad (5)$$

式中:  $N_k$  为根据设定的饱和光强  $T_{\text{sat}}$  进行二值化后像素点组成的连通域组。后续为表达简便均略去相机平面的坐标。对第  $k$  张图像的连通域组  $N_k$  与第  $k + 1$  张图像的连通域组  $N_{k+1}$  进行处理后可确定高反光区域中像素的饱和程度, 得到投影机最优投影光强值在  $[M_{k+1}, M_k]$  区间中的像素集合  $H_k$ , 即

$$H_k = \begin{cases} N_k \oplus N_{k+1}, & k = 0, 1, 2, \dots, K - 1 \\ N_k, & k = K \end{cases}, \quad (6)$$

式中:  $\oplus$  表示异或运算。在一般情况下, 当  $k$  取足够大的某一个值  $k^*$  时, 即投影光强足够低时, 投影该投影光强下的均匀灰度图像不会产生饱和像素点, 令此时的灰度值为  $M_{k^*}$ , 有

$$M_{k^*} = \begin{cases} R - k^*S, & \text{card}(N_{k^*}) = 0 \text{ and } k^* \in [0, K - 1] \\ R - KS, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (7)$$

式中:  $\text{card}(\cdot)$  函数的作用是提取集合中的元素个数。

3) 投影一幅灰度值为 0 的图像至被测物体表面上, 将通过相机捕获到的图像记为  $I_b^c$ , 由式(1)可知, 当  $I^p = 0$  时, 有

$$I_b^c = (\alpha^c + 1)\beta_0. \quad (8)$$

上文中已经确定了饱和像素点  $(x_{\text{sat}}^c, y_{\text{sat}}^c)$  的最优投影光强值区间  $[M_{k+1}, M_k]$ , 考虑投影机 Gamma 效应对光强值的影响, 当投影光强值为  $M_{k+1}$  时, 在  $(x_{\text{sat}}^c, y_{\text{sat}}^c)$  处捕获的光强值  $I_{k+1}^c(x_{\text{sat}}^c, y_{\text{sat}}^c)$  未饱和, 且具有最高的信噪比, 结合式(1)和式(8)有

$$I^c = \alpha^c \text{gamma}(I^p) + I_b^c, \quad (9)$$

式中:  $\text{gamma}(\cdot)$  表示理想投影光强值受 Gamma 效应影响后的实际投影光强值。Gamma 值可以事先对系统进行测定, 即可计算出反射率

$$\alpha^c = \frac{I_{k+1}^c - I_b^c}{\text{gamma}(M_{k+1})}, \quad (10)$$

从而在保留一定余量的条件下, 计算得到饱和像素点的最优投影光强值

$$I_{\text{opt}}^p = \text{gamma}^{-1}\left(\frac{255 - 7 - I_b^c}{\alpha^c}\right), \quad (11)$$

式中:  $\text{gamma}^{-1}(\cdot)$  为  $\text{gamma}(\cdot)$  的逆运算。在考虑环境噪声等因素的影响下, 对最优投影光强值  $I_{\text{opt}}^p$  进行限制, 即

$$I_{\text{opt}}^p = \begin{cases} I_{\text{opt}}^p, & I_{\text{opt}}^p \in [M_{k+1}, M_k] \text{ and } k = 0, 1, 2, \dots, K - 1 \\ M_{k+1}, & I_{\text{opt}}^p \notin [M_{k+1}, M_k] \text{ and } k = 0, 1, 2, \dots, K - 1 \end{cases} \quad (12)$$

综上所述, 确定饱和像素点最优投影光强值的流程图如图 2 所示。

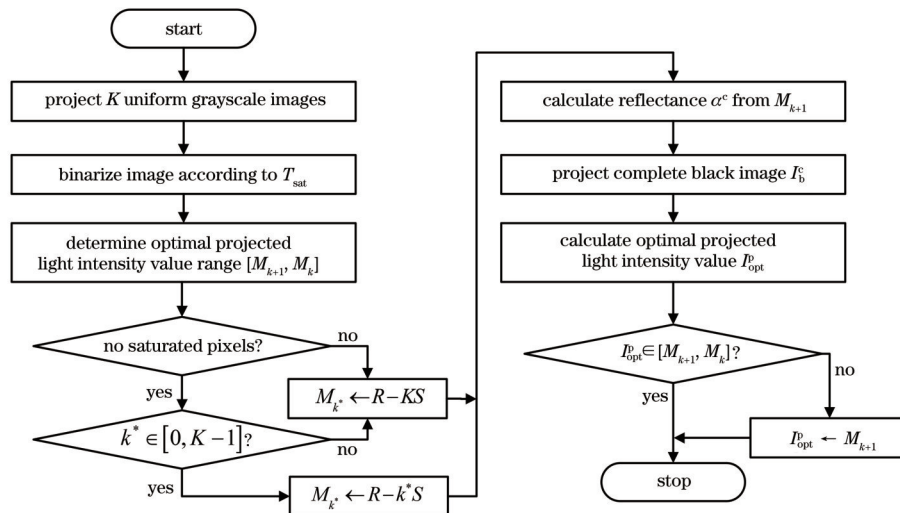


图 2 确定最优投影光强值的流程图

Fig. 2 Flow chart of determining optimal projected light intensity value

### 2.3 相机-投影机平面映射关系

确定了相机各饱和像素点的最优投影光强值后,需要建立相机-投影机坐标映射关系,现有效果较好的方法<sup>[21-22, 27]</sup>均是通过在较低投影强度下双方向扫描获取绝对相位来建立一一对应关系的。高反光影响区域的准确相位不容易获取,若选取的投影光强较低或较高,由式(4)可知,均容易造成坐标映射错误。以相机与投影机上下摆放的布置模式为例,使用垂直方向移动的条纹进行扫描可获得最高的相位精度<sup>[28]</sup>。

基于Chen等<sup>[29]</sup>提出的绝对相位坐标映射的方法,为了确保坐标计算的准确度,依据测定的 $M_k$ ,分别在双方向投影两组最大灰度分别为 $M_k$ 和 $(M_k + 255)/2$ 的条纹图案,并通过多频法<sup>[30]</sup>解包裹相位获得绝对相位 $\phi_{x_1}^*$ 、 $\phi_{x_2}^*$ 和 $\phi_{y_1}^*$ 、 $\phi_{y_2}^*$ ,从而计算出 $(x_0^c, y_0^c)$ 在投影机平面对应的 $(x_0^p, y_0^p)$ ,即

$$x_0^p = \begin{cases} \frac{H\phi_{x_1}^*(x_0^c, y_0^c)}{2\pi}, & I_{\text{opt}}^p(x_0^c, y_0^c) \in \left[ M_k, \frac{255 + M_k}{2} \right], \\ \frac{H\phi_{x_2}^*(x_0^c, y_0^c)}{2\pi}, & I_{\text{opt}}^p(x_0^c, y_0^c) \in \left[ \frac{255 + M_k}{2}, 255 \right], \end{cases} \quad (13)$$

$$y_0^p = \begin{cases} \frac{W\phi_{y_1}^*(x_0^c, y_0^c)}{2\pi}, & I_{\text{opt}}^p(x_0^c, y_0^c) \in \left[ M_k, \frac{255 + M_k}{2} \right], \\ \frac{W\phi_{y_2}^*(x_0^c, y_0^c)}{2\pi}, & I_{\text{opt}}^p(x_0^c, y_0^c) \in \left[ \frac{255 + M_k}{2}, 255 \right], \end{cases} \quad (14)$$

式中: $H$ 和 $W$ 分别为投影条纹图案的高度和宽度。由于相机分辨率与投影机分辨率间存在差异,相机平面的饱和像素连通区域映射到投影机平面的连通域内可能存在有少量孤立的像素点,因此在根据式(13)和式(14)确定各饱和像素点在投影机平面的对应坐标后,取这些特殊点周边点的强度均值来进行平滑填补,即

$$M_{\text{opt}}^p(x^p, y^p) = \begin{cases} \frac{\text{neighbor}[M_{\text{opt}}^p(x^p, y^p)]}{N_{\text{nei}}}, & M_{\text{opt}}^p(x^p, y^p) = 255 \text{ and } \text{neighbor}[M_{\text{opt}}^p(x^p, y^p)] < \epsilon_{\text{spe}}, \\ M_{\text{opt}}^p(x^p, y^p), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $M_{\text{opt}}^p$ 为经坐标映射后最优投影光强的分布; $\text{neighbor}(\cdot)$ 为邻域强度信息统计函数,其表达式为

$$\text{neighbor}[M_{\text{opt}}^p(x^p, y^p)] = \frac{\text{sum}[M_{\text{opt}}^p(i, j)]}{255},$$

$$0 < \sqrt{(i - x^p)^2 + (j - y^p)^2} \leq T_{\text{dis}}, \quad (16)$$

式中: $(i, j)$ 为最优投影光强分布掩膜中的坐标; $N_{\text{nei}}$ 为覆盖的邻域像素点个数; $\epsilon_{\text{spe}}$ 为判断阈值; $\text{sum}(\cdot)$ 为求和函数; $T_{\text{dis}}$ 为邻域半径。判断阈值和邻域半径可根据系统特性进行设定,从而可根据 $M_{\text{opt}}^p$ 生成自适应条纹。

### 2.4 自适应条纹补偿方法

所提自适应条纹方法的基本思想是通过逐像素调整投影条纹的光强值,使其适应扫描目标的反射率和环境光强的特性。所提方法不需要增加额外的硬件,也不需要获取多组扫描条纹来进行融合处理,使用单目结构光设备和一组自适应条纹即可对高反光区域进行形貌测量。

通过预先投影的具有不同均匀灰度值的图像确定饱和像素点对应的最优投影光强值,并生成一组自适应条纹对高反光物体表面进行扫描,使得各点处不发生饱和且具有较高的信噪比。由于环境光的影响和通过式(10)计算的反射率在低投影灰度下受噪声的影响较大,故对该部分相位可以利用确定坐标映射所使用的低灰度条纹进行相位融合,从而可实现对高反光区域的高精度测量。

综上所述,所提自适应条纹方法的具体步骤:

1) 投影 $K + 1$ 幅具有不同均匀灰度值的图像组,

确定各饱和像素点的最优投影光强值范围 $[M_{k+1}, M_k]$ 和所有像素点均未产生饱和的投影灰度 $M_k$ ;

2) 根据Liu等<sup>[30]</sup>提出的方法,测定系统的Gamma全局参数;

3) 投影一幅全黑的图像至被测物体表面上并利用相机捕获,计算出饱和像素点处的反射率和环境光的影响,进而求解饱和点的最优投影光强值;

4) 在双方向投影最大灰度分别为 $M_k$ 、 $(255 + M_k)/2$ 的条纹图案,并利用相机捕获,确定相机平面中饱和像素点与投影机平面的映射关系;

5) 根据式(15)和式(16)判断并平滑异常数据,生成一组自适应条纹图案,对被测目标进行扫描;

6) 使用步骤4)中水平方向扫描最大灰度为 $M_k$ 的条纹图案计算得到的相位与自适应条纹计算得到的相位进行相位融合,结合系统标定矩阵进行三维重建。

## 3 实验与讨论

为了验证所提方法的有效性,本文搭建了如图3所示的PMP三维重建系统,包含一台Prosilica GC650C型摄像机(分辨率为640 pixel×480 pixel)、一台CASIO DLP投影机(分辨率为800 pixel×600 pixel)和一台普通电脑。Liu等<sup>[31]</sup>的实验结果表明,使用投影条纹的数量越多、空间频率越大,抑制系统非线性误差和随机噪声的效果越好。选取一块如图3所示的钢板作为实验对象,钢板表面相对平整,两侧略微高于中部,有少量的脏污、划痕和锈迹。

投影48幅具有不同均匀灰度值的图像,最大强度

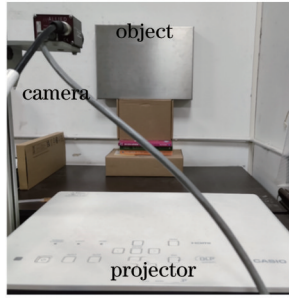


图 3 实验装置和实验对象

Fig. 3 Experimental device and object

自 255 依次递减 5 直至 20, 根据式(5)和式(6)计算出各饱和像素点的最优投影光强值区间  $[M_{k+1}, M_k]$ , 以及所有像素点未产生饱和的投影灰度 ( $M_k = 25$ )。根据文献[31]的方法测定投影机的全局 Gamma 值约为 2.3, 投影一幅全黑的图像至被测物体表面上, 根据式(9)~(11)求出各饱和像素点的最优投影光强值, 如图 4 所示。

在双方向上投影最大强度为 25 和 140 的条纹图案, 通过式(13)和式(14)确定饱和像素点  $(x_0^c, y_0^c)$  在投影机平面上的对应点  $(x_0^p, y_0^p)$ , 取  $T_{dis} = 1, \epsilon_{spe} = 3$  生成

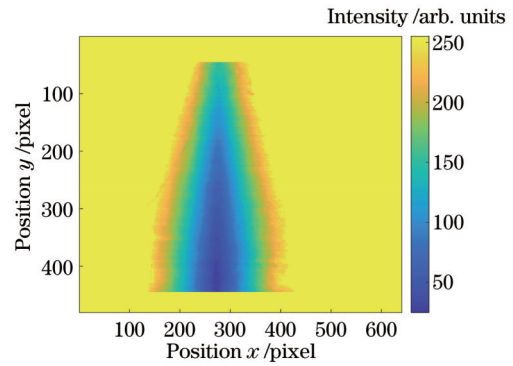


图 4 最优投影光强值分布

Fig. 4 Distribution of optimal projection light intensity

一组自适应编码条纹图案。使用自适应条纹对钢板进行扫描, 扫描条纹的频率分别 1, 4, 16, 32, 每种频率条纹的数量为 8, 可以尽量避免其他误差对本文实验结果的影响。图 5 为使用传统 PMP 方法和所提方法进行扫描的其中一帧图像, 可以看出, 在钢板中部出现了较大的光强饱和。图 6 选取第 271 列处的光强变化进行对比, 可以发现, 使用传统 PMP 方法进行扫描时在较多像素点处出现了光强饱和, 而使用所提方法进行扫描能够在光强不饱和的同时保持较高的信噪比。

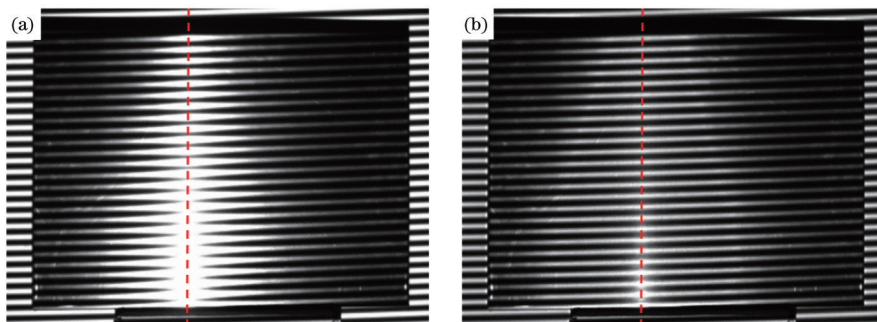


图 5 条纹投影效果对比。(a) PMP 方法; (b) 所提方法

Fig. 5 Comparison of fringe projection effects. (a) PMP method; (b) proposed method

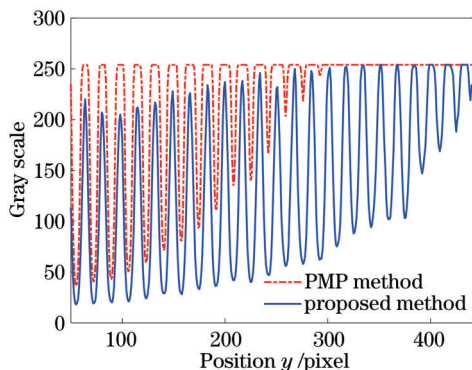


图 6 第 271 列处两种方法获取的光强值对比

Fig. 6 Comparison of light intensity at 271th column obtained by two methods

图 7 分别利用传统 PMP 方法、文献[21]中的方法、文献[18]中的方法和所提方法对钢板进行三维重建, 并选取其中的有效点云区域进行分析, 由于钢板表

面不是绝对平整的且实验中的摆放位置也未能完全平行于墙面, 故点云形貌会在小范围内呈现出小弧度的变化。重点对虚线框所示的饱和较严重的区域进行放大对比。图 7(a)中出现的大幅度不规则跳变的区域为因饱和误差较大引起的重建错误区域。图 7(b)中的虚线框中饱和较为严重的区域存在少量重建误差较大的位置, 其与周边点对比较为明显, 体现为类似条状区域的变化。图 7(c)中的虚线框中存在大范围的重建误差区域, 其与周边点对比变化较为平缓, 体现为整体重建效果较为粗糙。所提方法能够避免上述两种方法的不足, 在受高反光影响的区域中获得更好的效果, 使得三维重建效果更加精确, 如图 7(d)所示。

为了更加直观地展现各方法的重建效果, 采用相同频率下最大投影灰度间隔为 5 的 32 步相移条纹图案组进行相位融合并作为真值, 图 8 选取第 271 列的 45~443 行相位误差进行比较。在将均匀灰度图像记为 1 组投影图片的设定下, 对不同方法的均方根误差

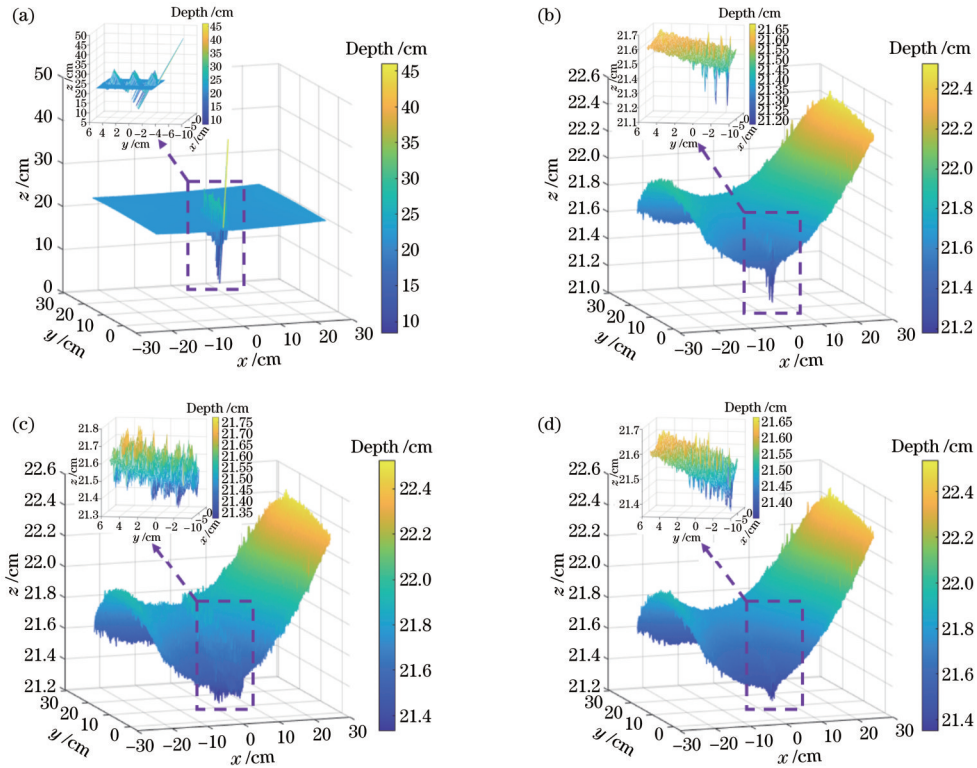


图 7 不同方法对实验钢板的三维重建效果。(a)PMP方法;(b)文献[21]中方法;(c)文献[18]中方法;(d)所提方法  
Fig. 7 Three-dimensional reconstruction effects of different methods on experimental steel plate. (a) PMP method; (b) method in Ref. [21]; (c) method in Ref. [18]; (d) proposed method

(RMSE)、所需的投影条纹组数在表 1 中进行了比较。可以看出,与传统 PMP 方法相比,其他方法均能有效降低相位的 RMSE, 其中所提方法能够使最大 RMSE、光强饱和和误差最大的一列 RMSE、饱和区域

RMSE 分别减小 99.43%, 98.65%, 92.48%。然而,从投影条纹组数来看,为了实现更精确的坐标映射,所提方法需要更多的条纹组,这在一定程度上会影响测量速度。

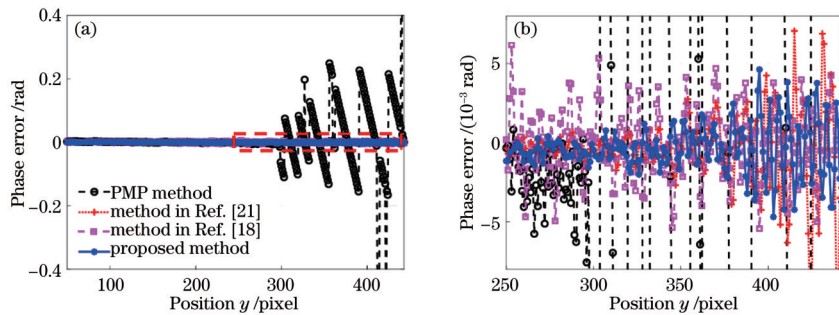


图 8 不同方法下第 271 列的相位误差比较。(a)整体趋势;(b)局部放大  
Fig. 8 Comparison of phase error at 271th column under different methods. (a) Overall trend; (b) local magnification

表 1 不同方法的比较  
Table 1 Comparison of different methods

Index	PMP method	Method in Ref. [21]	Method in Ref. [18]	Proposed method
RMSE of 271th column / ( $10^{-3}$ rad)	87.3746	1.7760	1.9331	1.1820
RMSE of saturated area / ( $10^{-3}$ rad)	13.8325	1.9661	1.6161	1.0399
Maximum value of RMSE / ( $10^{-3}$ rad)	820.0057	13.1208	6.1866	4.6926
Number of pattern groups	1	4	5	6

综合实验结果不难发现,冯维等<sup>[21]</sup>的方法采用多幅掩膜图像融合,基于线性模型对相机-投影机灰度响应进行建模,并借助插值预测求解最优投影光强值,由于忽视了系统的非线性问题,未能充分考虑到像素点的特性,在低灰度级投影时受噪声影响较为严重,故计算出的最佳投影灰度值与实际值相比会存在较大误差。除此之外,该方法采用低灰度条纹图案进行坐标映射容易在部分像素点处造成映射偏差,影响自适应条纹部分像素点特别是在饱和程度较大处的准确度,进而造成较大重建误差。Zhang 等<sup>[18]</sup>的方法通过拟合出被测对象各点处的反射率与环境光信息,根据反射率划分若干区间,选取区间内均不饱和的投影条纹进行相位融合,虽然形貌上能够实现高反光影响区域的重建,但是只考虑到了整体饱和的抑制,难以使得反射率区间内的所有像素点均具有较高的信噪比。同时,划分区间大小常依赖于统计数据并需要进行人工设定,自动化程度不高,拟合计算出的反射率和环境光信息也存在有较大的误差,体现在图 8 中的现象为相位误差变化整体较为平缓,但靠近反射率交界位置和

饱和程度较大的位置处会出现突变。可以发现,相比于前述方法,所提方法综合考虑了系统成像的特性,在保持信噪比较高的情况下,逐像素点确定最优投影光强值,并可更准确地映射到投影机平面上,能够更大程度上降低相位误差,对于抑制高反光区域的光强饱和和对相位的影响具有更优的性能,从而可以获取更加精确的重建效果。

为了验证所提方法的适用范围,本文选取如图 9 (a)所示的陶瓷茶叶罐作为扫描对象,罐体表面平整光滑,使用传统方法、文献[21]中的方法、文献[18]中的方法和所提方法进行三维重建,结果如图 9(b)~(e)所示。在传统方法得到的结果中,在正对投影机和相机的位置处存在着光强饱和区域,从而会导致这些部分的点云数据存在较大的重建误差。改进方法均能在一定程度上有效地抑制高反光区域光强饱和引起的重建误差,进而可以获得更加完整的点云数据。所提方法相比于其他改进方法能够更大程度地抑制高反光区域的误差,对于罐体表面的细节处能够获得更加平滑准确的重建效果。

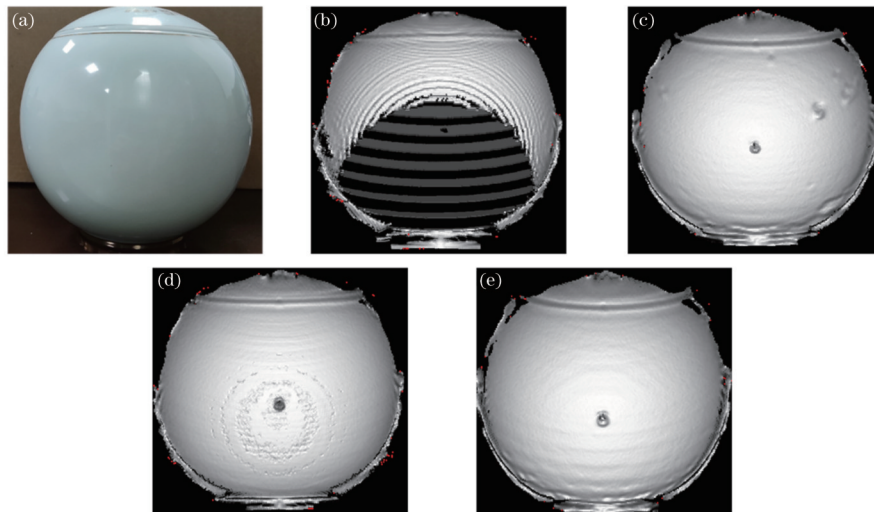


图 9 不同方法对陶瓷茶叶罐的重建效果。(a)陶瓷茶叶罐实物图;(b)PMP方法;(c)文献[21]中的方法;(d)文献[18]中的方法;(e)所提方法

Fig. 9 Reconstruction results of ceramic tea caddy by different methods. (a) Physical picture of ceramic tea caddy; (b) PMP method; (c) method in Ref. [21]; (d) method in Ref. [18]; (e) proposed method

## 4 结 论

针对PMP中,对高反光物体的重建会因局部反射率较大而产生饱和误差的问题,提出一种自适应条纹方法。与现有方法相比,所提方法在不增加额外硬件的情况下,能充分考虑系统特性,逐像素点确定最优投影光强值,更为精确地建立相机-投影机平面的映射关系,实现自适应的高反光区域重建,抑制光强超过相机量化值的区域的饱和误差。实验结果表明,所提方法不仅能够有效抑制光强饱和,还能保持较高的信噪比,避免饱和误差对PMP的影响,获得更好的三维重建效果。在搭建的钢板测试场景中,所提方法使得最大RMSE、饱和区域RMSE相比于传统方法分别减小了

99.43%、92.48%。与其他方法相比,所提方法能够在更大程度上抑制相位误差,提高三维重建的精度。在后续的研究中,将着重于在保证精度的前提下提升方法的测量速度,减少所需测量的条纹组数,并扩展算法的通用性。

## 参 考 文 献

- [1] Halioua M, Liu H C. Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1989, 11(3): 185-215.
- [2] 田懿, 包国琦, 刘凯. 估计系统点扩展函数以降低相位测量轮廓术误差[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0504003. Tian Y, Bao G Q, Liu K. Estimation of system point spread function to reduce errors in phase measuring

- profilometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0504003.
- [3] 郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0800001.
- Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0800001.
- [4] 王潇, 刘育梁, 李丽艳. 光栅结构光系统测量误差与拟合精度研究[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0604004.
- Wang X, Liu Y L, Li L Y. Measurement error and fitting accuracy of fringe structured light system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0604004.
- [5] 刘飞, 何春桥, 申爱民, 等. 结构光饱和区域分区投射优化补偿方法[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0612001.
- Liu F, He C Q, Shen A M, et al. Optimized compensation method of divisional projection for saturated region of structured light[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0612001.
- [6] 张宗华, 刘小红, 郭志南, 等. 基于结构光的镜面/漫反射复合表面形貌测量[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303015.
- Zhang Z H, Liu X H, Guo Z N, et al. Shape measurement of specular/diffuse complex surface based on structured light[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303015.
- [7] Zhang Y, Lau D L, Yu Y. Causes and corrections for bimodal multi-path scanning with structured light[C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 15-20, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 4426-4434.
- [8] Zhang Y, Lau D L, Wipf D. Sparse multi-path corrections in fringe projection profilometry[C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 20-25, 2021, Nashville, TN, USA. New York: IEEE Press, 2021: 13339-13348.
- [9] 王道川. 高反光物体表面的三维重建方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- Wang D C. Research on 3D reconstruction method for highly reflective surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [10] 郑宏博, Yo-Sung Ho, 刘凯. 高反光对象表面的结构光三维成像方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 051202.
- Zheng H B, Yo-Sung H, Liu K. Three-dimensional imaging method of high-reflective objects based on structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 051202.
- [11] 张景瑜, 任杰骥, 李霏, 等. 基于双向反射分布函数模型的结构光投影自适应调制方法[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0912001.
- Zhang J Y, Ren J J, Li F, et al. Adaptive structured light projection modulation method based on BRDF model[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0912001.
- [12] Zhang L, Chen Q, Zuo C, et al. Real-time high dynamic range 3D measurement using fringe projection[J]. Optics Express, 2020, 28(17): 24363-24378.
- [13] 陈超文, 薛俊鹏, 张启灿, 等. 基于多视方程的高反光物体表面三维形貌测量[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2212002.
- Chen C W, Xue J P, Zhang Q C, et al. Three-dimensional shape measurement of shiny surface based on multi-view equation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2212002.
- [14] Zhu Z M, You D D, Zhou F Q, et al. Rapid 3D reconstruction method based on the polarization-enhanced fringe pattern of an HDR object[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 2162-2171.
- [15] Suresh V, Wang Y J, Li B W. High-dynamic-range 3D shape measurement utilizing the transitioning state of digital micromirror device[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 107: 176-181.
- [16] Zhang S, Yau S T. High dynamic range scanning technique[J]. Optical Engineering, 2009, 48(3): 033604.
- [17] 李兆杰, 崔海华, 刘长毅, 等. 一种基于自动多次曝光面结构光的形貌测量方法[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1112004.
- Li Z J, Cui H H, Liu C Y, et al. A shape measurement method based on automatic multiple exposure surface structured light[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1112004.
- [18] Zhang L, Chen Q, Zuo C, et al. High dynamic range 3D shape measurement based on the intensity response function of a camera[J]. Applied Optics, 2018, 57(6): 1378-1386.
- [19] 彭广泽, 陈文静. 基于卷积神经网络去噪正则化的条纹图修复[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1810002.
- Peng G Z, Chen W J. Fringe pattern inpainting based on convolutional neural network denoising regularization[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1810002.
- [20] Chen C, Gao N, Wang X J, et al. Adaptive projection intensity adjustment for avoiding saturation in three-dimensional shape measurement[J]. Optics Communications, 2018, 410: 694-702.
- [21] 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.
- 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.
- [22] 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): 1912001.
- Wang J H, Lu R S, Liu D M. Adaptive fringe projection measurement method for high dynamic range surface[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1912001.
- [23] Liu K, Hua W Q, Wei J H, et al. Divide and conquer: high-accuracy and real-time 3D reconstruction of static objects using multiple-phase-shifted structured light illumination[J]. Optics Express, 2020, 28(5): 6995-7007.
- [24] 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.



- [25] 王前慧, 刘凯. 相位测量轮廓术中校正量化误差算法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(5): 1326-1330.  
Wang Q H, Liu K. Correcting quantization error for phase measuring profilometry[J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(5): 1326-1330.
- [26] Song J W, Lau D L, Ho Y S, et al. Automatic look-up table based real-time phase unwrapping for phase measuring profilometry and optimal reference frequency selection[J]. Optics Express, 2019, 27(9): 13357-13371.
- [27] 王柳, 陈超, 高楠, 等. 基于自适应条纹投影的高反光物体三维面形测量[J]. 应用光学, 2018, 39(3): 373-378.  
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.
- [28] Zhang R H, Guo H W, Asundi A K. Geometric analysis of influence of fringe directions on phase sensitivities in fringe projection profilometry[J]. Applied Optics, 2016, 55(27): 7675-7687.
- [29] Chen C, Gao N, Wang X J, et al. Adaptive pixel-to-pixel projection intensity adjustment for measuring a shiny surface using orthogonal color fringe pattern projection[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(5): 055203.
- [30] Liu K, Wang Y C, Lau D L, et al. Gamma model and its analysis for phase measuring profilometry[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(3): 553-562.
- [31] 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.