

## 基于区域立体匹配的单频条纹结构光三维测量

朱新军<sup>1\*</sup>, 孙瑞群<sup>2</sup>, 侯林鹏<sup>2</sup>, 赵海川<sup>1</sup>, 宋丽梅<sup>1,2</sup>, 王红一<sup>1</sup><sup>1</sup>天津工业大学人工智能学院, 天津 300387;<sup>2</sup>天津工业大学控制科学与工程学院, 天津 300387

**摘要** 为克服传统质量导向相位展开方法无法正确展开多孤立物体的局限性,提出一种基于区域分割的立体质量导向相位展开方法。该方法将包裹相位分割为多个区域,并为每个孤立区域通过立体匹配算法确立左右相机多视图相位展开初始点,通过质量导向相位展开算法实现多视图孤立物体相位展开。进一步提出了基于区域双目立体展开相位匹配的单频条纹结构光三维(3D)测量,实现了单个频率包裹相位下的多孤立物体 3D 重建。实验结果表明,所提方法可以实现多孤立物体运动状态的 3D 重建,在四步相移和单幅条纹图条件下重建标准球的直径平均绝对值偏差分别为 0.0135 mm 和 0.0347 mm。

**关键词** 三维重建; 质量导向; 结构光; 立体匹配; 相位展开

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232066

## Single-Frequency Fringe Structured Light 3D Measurement Based on Regional Stereo Matching

Zhu Xinjun<sup>1\*</sup>, Sun Ruiqun<sup>2</sup>, Hou Linpeng<sup>2</sup>, Zhao Haichuan<sup>1</sup>, Song Limei<sup>1,2</sup>, Wang Hongyi<sup>1</sup><sup>1</sup>School of Artificial Intelligence, Tiangong University, Tianjin 300387, China;<sup>2</sup>School of Control Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China

**Abstract** The traditional quality guided phase unwrapping method cannot correctly perform phase unwrapping for multiple objects. To overcome this problem, this study proposes a stereo quality guided phase unwrapping method based on region segmentation. Based on the phase edge of the isolated object, the wrapped phase is divided into several regions, and a stereo matching algorithm establishes the initial point of multi-view binocular phase unwrapping for each isolated region. Furthermore, the quality guided phase unwrapping algorithm realizes the phase unwrapping of multi-view isolated object. A single-frequency fringe structured light three dimensional (3D) measurement based on regional binocular stereo unwrapped phase matching is proposed, which achieves 3D reconstruction of multiple isolated objects under a single-frequency wrapped phase. The experimental results show that the proposed method can achieve a 3D reconstruction of multiple isolated objects in motion. The mean absolute error of diameter for the reconstruction of a standard sphere under four-step phase shifting and single-frame conditions is 0.0135 mm and 0.0347 mm, respectively.

**Key words** 3D reconstruction; quality guide; structured light; stereo matching; phase unwrapping

## 1 引言

在光学 3D 测量领域,条纹结构光 3D 测量方法具有高精度、全场、非接触等特性,已广泛应用于工业产品检测、逆向工程、机器人视觉、实验力学、生物医学等众多领域<sup>[1-5]</sup>。条纹结构光作为结构光 3D 测量的典型方式之一,通过投影仪向被测物体表面投射条纹结构光信息。相机采集的被测物体表面条纹图受到物体

高度的调制,包含了物体的 3D 信息,从而通过相位提取可从条纹图中获得与物体 3D 相关的相位信息。然而,通常提取的相位为包裹相位,需要通过相位展开得到连续的相位才能用于物体的 3D 重建,实现高精度、稠密点云的 3D 测量<sup>[6-9]</sup>。因此,相位展开是条纹结构光 3D 重建的重要环节。

为实现高精度、高速的条纹结构光 3D 重建,相位展开方法得到了持续的研究<sup>[6,10-14]</sup>。通常来说,根据条

收稿日期: 2023-09-07; 修回日期: 2023-10-27; 录用日期: 2023-11-20; 网络首发日期: 2023-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(61905178)

通信作者: \*xinjunzhu@tiangong.edu.cn

纹投影采集图像数量,相位展开方法主要分为基于多幅图的时间相位展开方法和基于单幅图的空间相位展开方法。其中,时间相位展开方法利用多帧包裹相位<sup>[10]</sup>或辅助图像<sup>[11]</sup>实现相位展开,具有较高的鲁棒性和精度,可实现多孤立物体在复杂环境的绝对相位展开。但时间相位展开需要采集多帧图像,容易受物体运动的影响。尽管目前基于多幅图的时间相位展开取得了较大进展,比如基于改进多频外差时间的相位展开方法<sup>[12]</sup>、改进的格雷码相移的相位展开方法<sup>[13-14]</sup>,但仍需要多幅图像实现 3D 重建。

空间相位展开方法只需通过单帧包裹相位对相位图各相邻点的包裹相位值进行分析实现相位展开,此类型的方法包括质量导向相位法、枝切法等<sup>[15-16]</sup>,但无法实现多孤立物体相位展开,具有一定的局限性。质量导向相位展开方法选取初始点相位,通过质量图生成路径,以该点为起点进行全图相位展开。因此,在双目立体结构光测量中,左右相位展开由于初始点选取的不一致会导致左右真实展开相位的不匹配。此外,质量导向相位展开无法实现多孤立物体相位展开。综上,质量导向相位展开不能像多频外差相位展开方法一样应用于双目立体结构光 3D 重建。为解决这一问题,本文采用分区域质量导向相位展开与区域立体匹配方法,提出了

一种基于单频的双目条纹结构光多孤立区域 3D 重建方法。在不需要得到整个相位图的准确全局展开相位情况下,所提方法只需要区域内的展开相位,从单帧双目包裹相位图实现多孤立物体的 3D 重建。

## 2 系统总体流程及原理

提出了一种区域多视图对应相位展开方法,并优化立体匹配算法实现快速视差计算。该方法的核心思想是:基于相位连通区域对图像进行分割,联立多视图分区域对孤立物体区域进行相位展开,实现区域内快速视差匹配,得到被测物体的深度信息,克服目前传统空间相位展开方法如质量导向展开方法等不能用于多孤立物体相位展开与 3D 重建的局限性。

### 2.1 系统总体流程

所提方法流程如图 1 所示。构建双目条纹结构光测量系统采集标定图像及被测物体条纹图像数据。使用投影仪向被测物体投射一幅频率为 16 的正弦条纹图像并触发双目相机采集。采用张正友标定法进行双目相机标定。基于质量导向的区域相位展开,得到左右相机中多个孤立物体的区域相位展开。最后,利用平行双目立体视觉原理对区域展开的相位进行立体匹配并重建点云信息。

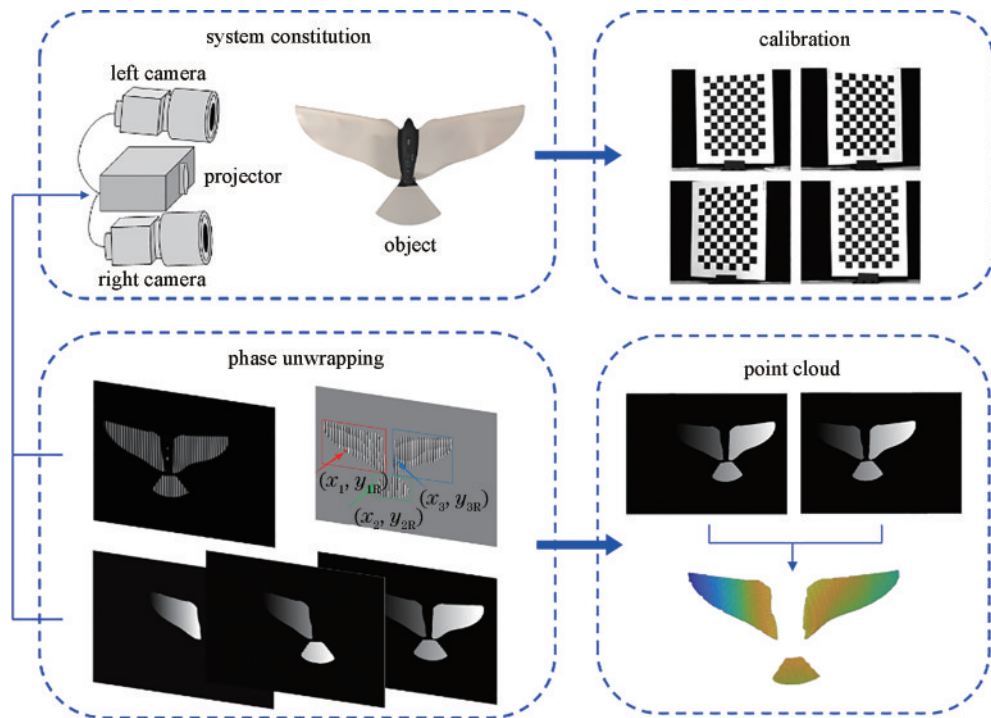


图 1 所提方案的流程

Fig. 1 Flow chart of the proposed scheme

### 2.2 基于分区域的质量导向相位展开

#### 2.2.1 包裹相位物体区域分割

首先通过张正友标定法进行标定,依据标定结果对单幅条纹图像进行极线校正。如图 2 所示,利用条纹图图像分解方法对校正后的条纹图像  $I_L$ 、 $I_R$  进行相

位提取。该方法从条纹图像分离出条纹信息  $F_L$ 、 $F_R$  和背景信息  $B_L$ 、 $B_R$ , 然后对条纹信息使用希尔伯特变换提取包裹相位  $\varphi_L(x, y)$  和  $\varphi_R(x, y)$ <sup>[17]</sup>。依据分离出的背景信息,通过阈值滤波滤除包裹相位中的噪声信息,表达式为

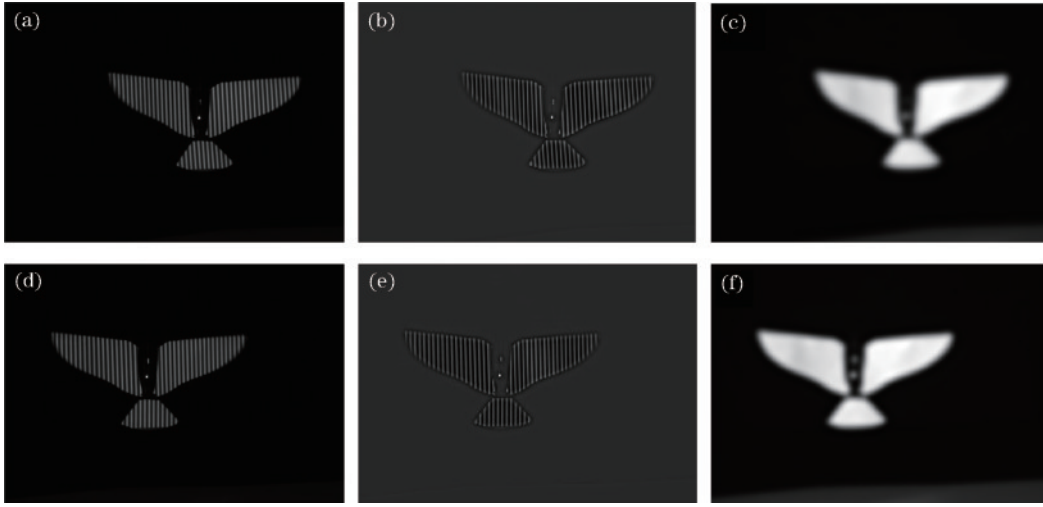


图2 条纹图背景与条纹信息。(a)左视图原始图像;(b)左视图条纹信息;(c)左视图背景信息;(d)右视图原始图像;(e)右视图条纹信息;(f)右视图背景信息

Fig. 2 Fringe background separation. (a) Original left view image; (b) fringe information of left view; (c) background information of left view; (d) original right view image; (e) fringe information of right view; (f) background information of right view

$$\begin{cases} \varphi_L(x, y) = \begin{cases} \varphi_L(x, y), & B_L(x, y) \geq \sigma \\ 0, & B_L(x, y) < \sigma \end{cases} \\ \varphi_R(x, y) = \begin{cases} \varphi_R(x, y), & B_R(x, y) \geq \sigma \\ 0, & B_R(x, y) < \sigma \end{cases} \end{cases}, \quad (1)$$

式中： $\sigma$ 为设立的背景图像阈值。依据背景信息生成

对应右视图的二值模板 $\varphi_B$ ,表达式为

$$\varphi_B = \begin{cases} 1, & B_R(x, y) \geq \sigma \\ 0, & B_R(x, y) < \sigma \end{cases} \quad (2)$$

如图3所示,对应右视图的二值模板 $\varphi_B$ 通过边缘分割算法求得各孤立物体相位边缘信息,将右视图包裹相位分割为多个孤立物体区域。

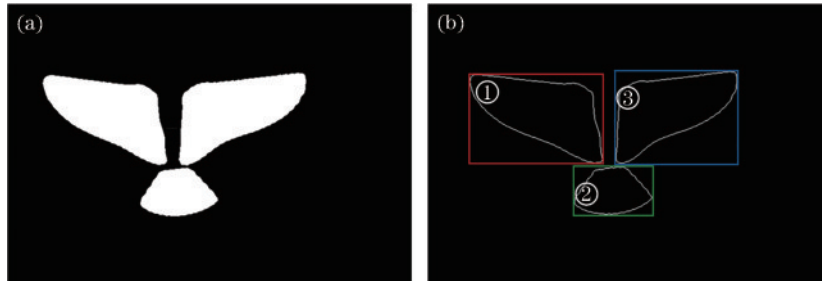


图3 相位分割。(a)右视图二值模板;(b)相位分割

Fig. 3 Phase segmentation. (a) Binary mask of right view; (b) phase division

### 2.2.2 分区域相位展开

区域分割可以得到与右视图相对应的左视图内各孤立物体的边界信息 $x_{nL}^{up}$ 、 $x_{nL}^{down}$ 、 $y_{nL}^{left}$ 和 $y_{nL}^{right}$ 。其中, $x_{nL}^{up}$ 、 $x_{nR}^{up}$ 为左视图第 $n$ 个孤立物体的上边界行坐标值, $x_{nL}^{down}$ 、 $x_{nR}^{down}$ 为左视图第 $n$ 个孤立物体的下边界行坐标值, $y_{nL}^{left}$ 、 $y_{nR}^{left}$ 为左视图第 $n$ 个孤立物体的左侧边界列坐标值, $y_{nL}^{right}$ 、 $y_{nR}^{right}$ 为左视图第 $n$ 个孤立物体的右侧边界列坐标值。

为确保质量导向相位展开左右视图一致,分区域对每个孤立物体均确立一对相位展开初始点。受视角不同的影响,左右相机采集被测对象的条纹图像对应的包裹相位如图4所示,左右视图最左侧相位对应不同的条纹级次。考虑到此特殊情况,本文使用左右联立起始点的方式寻找相位展开初始点,详细相位展开

初始点选取方案如下。

1)对每个孤立物体区域,选取右视图第 $n$ 个孤立物体相位所在区域中间行最左侧边缘坐标 $(\bar{x}^n, \bar{y}_R^n)$ 为左视图展开相位初始点判断起点,其中 $(\bar{x}^n, \bar{y}_R^n)$ 的计算公式为

$$(\bar{x}^n, \bar{y}_R^n) = (\text{round}[(x_{nR}^{up} + x_{nR}^{down})/2], y_{nR}^{left}) \quad (3)$$

2)如图5所示,对右视图包裹相位以点 $(\bar{x}^n, \bar{y}_R^n)$ 为起点,沿 $\bar{x}^n$ 行从左向右遍历,当式(4)为真时,确立右视图包裹相位内第一次包裹相位值跃变的点 $(x^n, y_R^n)$ ,以该对应点为基准选取右移一个像素的相位稳定点作为右视图质量导向相位展开的初始点 $(x^n, y_R^n + 1)$ 。

$$\varphi_R(x^n, y_R^n) - \varphi_R(x^n, y_R^n - 1) > 1.5\pi, \quad (4)$$

式中: $\varphi_R(x^n, y_R^n)$ 为右视图包裹相位中 $(x^n, y_R^n)$ 点的包

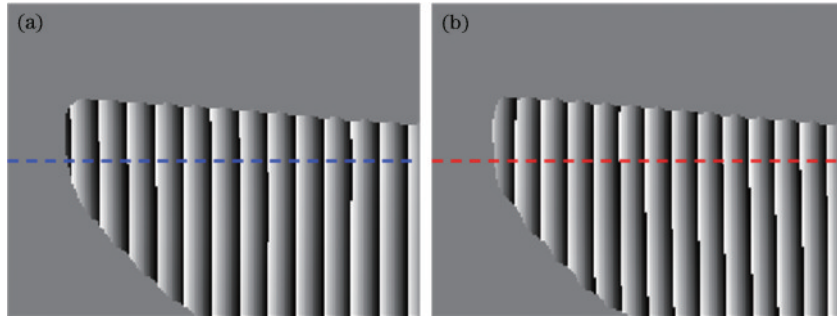


图 4 包裹相位局部图。(a)左视图包裹相位;(b)右视图包裹相位

Fig. 4 Local map of wrapped phase. (a) Wrapped phase of left view; (b) wrapped phase of right view

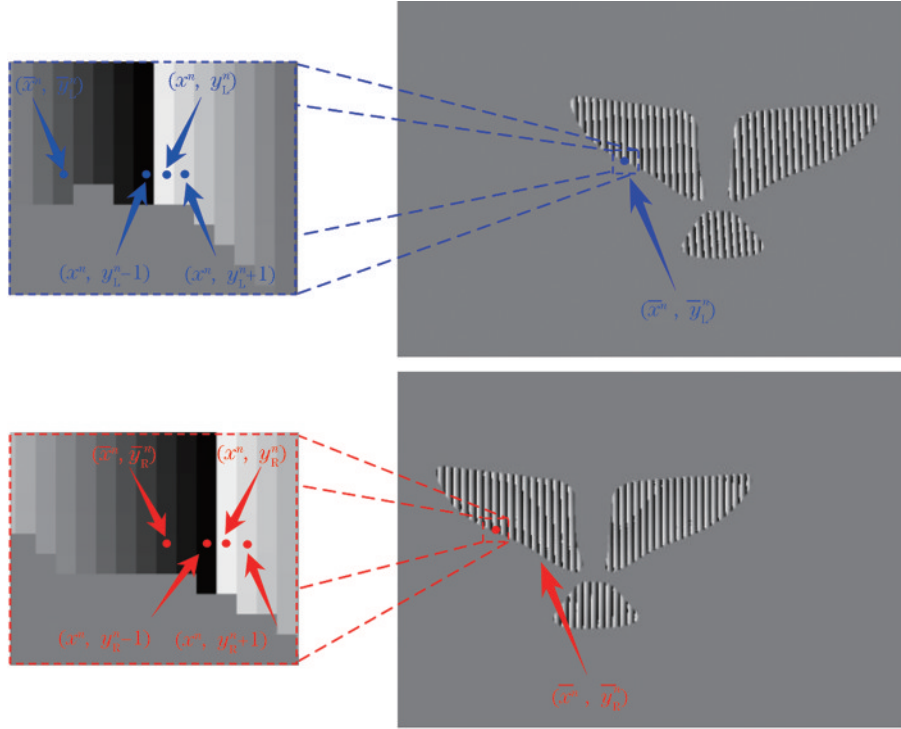


图 5 相位展开初始点判别

Fig. 5 Phase unwrapping initial point discrimination

裹相位值。

3) 选取左视图中对应右视图包裹相位中点  $(x^n, y_R^n - 1)$  的对应点  $(\bar{x}^n, \bar{y}_L^n)$  为左视图展开相位初始点判断起点, 其中  $(\bar{x}^n, \bar{y}_L^n)$  的表达式为

$$(\bar{x}^n, \bar{y}_L^n) = (\text{round}[(x_{nR}^{\text{up}} + x_{nR}^{\text{down}})/2], y_R^n - 1 + d), \quad (5)$$

式中:  $d$  为点  $(\bar{x}^n, \bar{y}_L^n)$  对应的视差。

4) 如图 5 所示, 以点  $(\bar{x}^n, \bar{y}_L^n)$  为起点, 对左视图包裹相位沿  $\bar{x}^n$  行从左向右遍历。当式(6)为真时, 确立左视图包裹相位内第一次包裹相位值跃变的点  $(x^n, y_L^n)$ , 以该对应点为基准选取右移一个像素的相位稳定点作为左视图质量导向相位展开的初始点  $(x^n, y_L^n + 1)$ 。

$$\varphi_L(x^n, y_L^n) - \varphi_L(x^n, y_L^n - 1) > 1.5\pi, \quad (6)$$

式中:  $\varphi_L(x^n, y_L^n)$  为左视图包裹相位中  $(x^n, y_L^n)$  点的包裹相位值。

对左右视图每个孤立物体所在区域按质量图生成方法单独生成该区域的质量图, 使用基于二阶差分的倒数来表征像素点的可靠度, 可以求得包裹相位  $\varphi(x, y)$  分别对应  $x$  方向和  $y$  方向的相位变化率  $dx$  和  $dy$ 。包裹相位  $\varphi(x, y)$  对应的质量值  $M(x, y)$  为

$$M(x, y) = \frac{1}{dx(x, y) + dy(x, y)}. \quad (7)$$

依照该质量图, 以点  $(x^n, y_L^n + 1)$  和点  $(x^n, y_R^n + 1)$  为相位展开初始点计算展开相位  $\phi_L^n(x, y)$  和  $\phi_R^n(x, y)$ , 最终将多个孤立区域展开相位合并成完整的展开相位图  $\phi_L(x, y)$  和  $\phi_R(x, y)$ , 如图 6 所示。

### 2.3 分区域局部立体匹配

为联立左右视图各孤立物体的对应关系, 基于校正后的展开相位信息  $\Phi_L(x, y)$  和  $\Phi_R(x, y)$  中每个孤立物体分区域, 基于 SSD 立体匹配算法确立左右视图边界

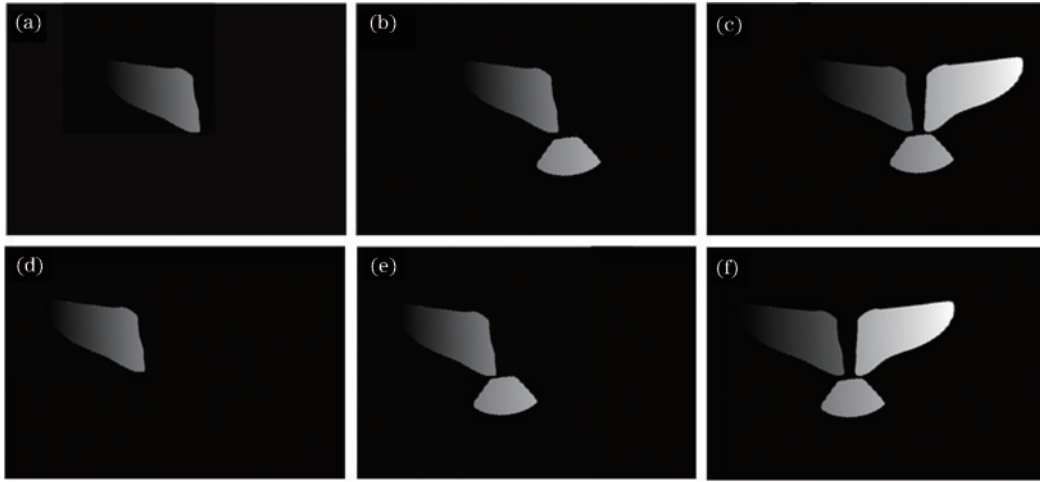


图 6 分区域相位展开。(a)~(c)左视图相位展开过程；(e)~(f)右视图相位展开过程

Fig. 6 Regional phase unwrapping. (a)~(c) Phase unwrapping process of left view; (d)~(f) phase unwrapping process of right view

对应点视差。取以左视图相位边缘待匹配点  $(x, y)$  为中心的  $(2h + 1) \times (2q + 1)$  大小的矩形子图像作为参考子图像, 在  $\Phi_R(x, y)$  中同一极线上视差范围内寻找待匹配点  $(x, y + d^n)$ , 其中  $d^n$  为  $(x, y)$  点对应点的视差。最终求得该待匹配点的匹配代价  $SSD(x, y + d^n)$ , 公式为

$$SSD(x, y + d^n) = \sum_{i=-h}^h \sum_{j=-q}^q [\Phi_L(x + i, y + j) - \Phi_R(x + i, y + j + d^n)]^2, \quad (8)$$

式中: 匹配代价  $SSD(x, y + d^n)$  最小时对应的  $d^n$  即为所求视差值。在相位立体匹配中, 大量的非物体区域的视差计算会降低立体匹配的速度和效率。据此提出基于分区域的立体匹配方法, 经相位分割算法分割出每个孤立物体所在区域后, 每次仅对单个区域进行立体匹配, 略过非物体的冗余区域, 提高了立体匹配的效率。

使用相位分割方法获取滤波后右视图相位区域信

息。对右视图每个孤立物体所在区域均使用 SSD 立体匹配算法计算整数视差, 最终将每个孤立物体区域视差信息合并到一个完整的视差图中, 如图 7 所示。使用二次曲线亚像素差值方法将整像素的视差数据转换为亚像素的视差数据, 以进一步提高视差精度。二次曲线亚像素插值计算公式为

$$D_s(p) = D_{int}(p) - \frac{C_{SSD}(p, d + 1) - C_{SSD}(p, d - 1)}{2[C_{SSD}(p, d + 1) + C_{SSD}(p, d - 1) - 2C_{SSD}(p, d)]}, \quad (9)$$

式中:  $D_s(p)$  和  $D_{int}(p)$  分别为所求的点  $p$  亚像素和整数视差;  $d, d - 1$  和  $d + 1$  分别为点  $p$  对应 SSD 立体匹配代价最小位置, 以及左右相邻的次匹配代价最小位置;  $C_{SSD}(p, d), C_{SSD}(p, d - 1)$  和  $C_{SSD}(p, d + 1)$  分别为点  $p$  在  $d, d - 1$  和  $d + 1$  位置对应的基于 SSD 立体匹配的代价。

使用棋盘格标定板作为标定工具, 依据张正友标

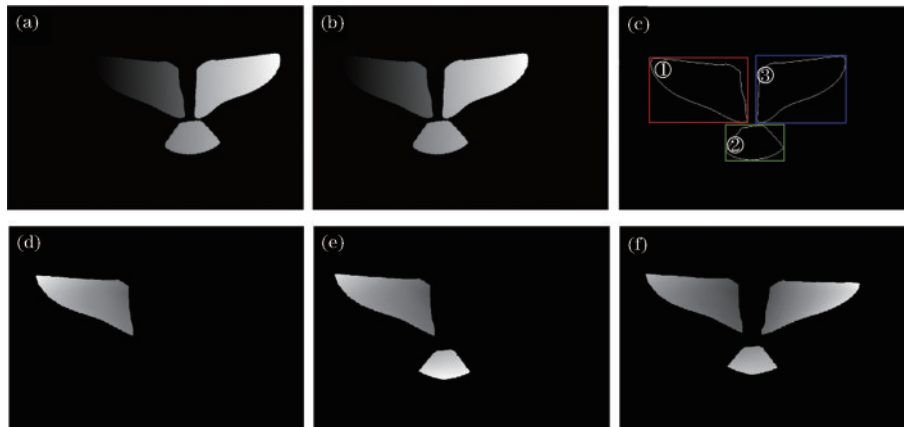


图 7 分区域视差匹配。(a)左视图展开相位；(b)右视图展开相位；(c)孤立物体区域划分；(d)区域 1 视差图；(e)区域 1 和区域 2 视差图；(f)全区域视差图

Fig. 7 Regional disparity matching. (a) Phase unwrapping of left view; (b) phase unwrapping of right view; (c) isolated object region partitioning; (d) disparity map of region 1; (e) disparity map of region 1 and region 2; (f) disparity map of the entire region

定法对双目视觉系统进行标定,以获得双目相机的内、外参数。内参数包含相机的焦距,外参数包含两个相机坐标系之间的旋转和平移矩阵。根据双目视觉理论原理,最终求得被测物体的深度信息 $z=fb/D_s$ ,其中 $f$ 为相机的焦距, $b$ 为两目相机光心的距离。依据相机标定得到的外参 $R$ 、 $T$ 矩阵,将各点从像素坐标系转换到世界坐标系下的坐标 $(x, y, z)$ ,并由此重建出物体的点云信息,完成被测物体 3D 重建。

### 3 实验

#### 3.1 实验装置和方案

搭建的实验装置如图 8 所示,主要包括 2 个工业相机(MV-CA013-21UM,海康威视)和 1 台结构光投影仪(TJ-X20U,腾聚科技)。工业相机分辨率为 $1280 \times 1024$  像素,投影仪分辨率为 $1280 \times 720$  像素。系统使用触发线连接投影仪和相机,以确保投影仪和相机同步,实现相机同时捕捉左右视图条纹图像。

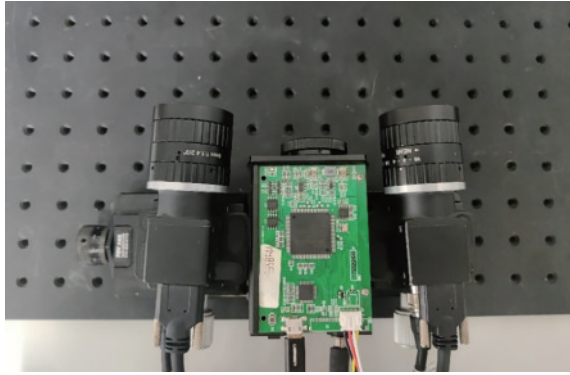


图 8 实验装置图  
Fig. 8 Experimental setup diagram

#### 3.2 标准球测量

采用多频外差法和所提 3D 重建方法重建哑光陶瓷标准球并拟合球体,以评估所提方法的精度。标准球的直径为 38.1118 mm。两个相机的工作距离约为 600 mm,相机视野范围达 $400 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 。投影仪投射条纹频率为 16、18、21 的正弦光栅条纹图并触发相机采集。图 9 为相机采集到的标准球的光栅条纹图像的局部放大图像。其中图 9(a)~(c)分别对应条纹频率为 16、18、21 的条纹图。

图 10 为采用图 9 条纹图计算得到的包裹相位图。其中,图 10(a)(b)和图 10(c)(d)分别为条纹频率为 16 时四步相移方法和单幅图相位提取算法得到的包裹相位图像。

基于包裹相位,计算得到的展开相位如图 11 所示。其中,图 11(a)(b)分别为多频外差方法求得的左右相机包裹相位对应的展开相位,图 11(c)~(f)分别为所提相位展开方法对基于四步相移和单幅图相位提取方法求得的左右相机包裹相位进行相位展开的结果。从

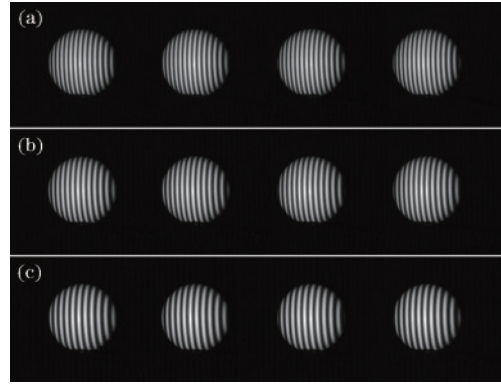


图 9 标准球多频外差条纹图。(a)频率为 16 的正弦条纹;(b)频率为 18 的正弦条纹;(c)频率为 21 的正弦条纹  
Fig. 9 Multi-frequency heterodyne fringe patterns of a standard sphere. (a) Sinusoidal fringe patterns with a frequency of 16; (b) sinusoidal fringe patterns with a frequency of 18; (c) sinusoidal fringe patterns with a frequency of 21

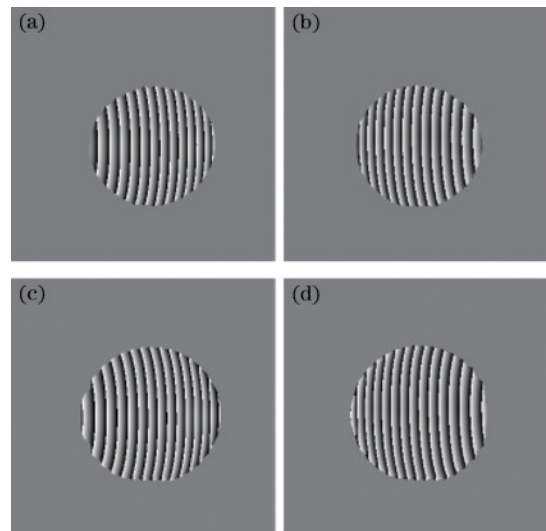


图 10 包裹相位。(a)(b)四步相移方法;(c)(d)单幅图相位提取方法  
Fig. 10 Wrapped phase. (a)(b) Four-step phase shift method; (c)(d) single-frame-based phase retrieval method

图 11(c)(d)和图 11(e)(f)看出,所提方法能够得到左右一致的展开相位,因此可以用于后续立体相位匹配。

图 12 分别为 3 种方法重建结果生成的点云图。从图 12 可以看出,所提区域立体相位匹配的单频 3D 重建方法仅从单个频率的包裹相位数据得到类似多频外差 3D 重建效果的点云数据。如表 1 所示,三种方法测量的直径平均绝对值偏差分别为 0.0197 mm、0.0135 mm 和 0.0347 mm。所提方法采用四步相移相位提取情况下可以达到多频外差方法的精度,所提方法采用单幅图相位提取情况下的精度也可以达 0.0347 mm。

#### 3.3 多孤立物体重建

为验证所提方法在多孤立物体相位展开的适用性,设立了静态与动态多孤立物体的重建实验。

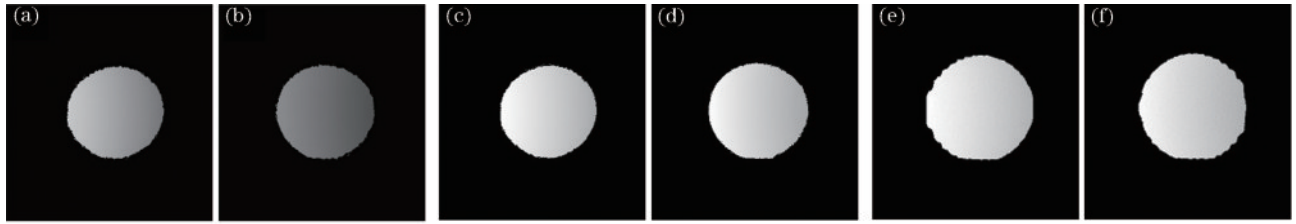


图 11 展开相位。(a)(b)多频外差法相位展开;(c)(d)四步相移的区域相位展开; (e)(f)单幅图相位提取方法的区域相位展开  
Fig. 11 Unwrapped phase. (a)(b) Unwrapped phase of multi-frequency heterodyne; (c)(d) unwrapped phase of four-step phase shifting; (e)(f) unwrapped phase of single-frame-based phase retrieval method

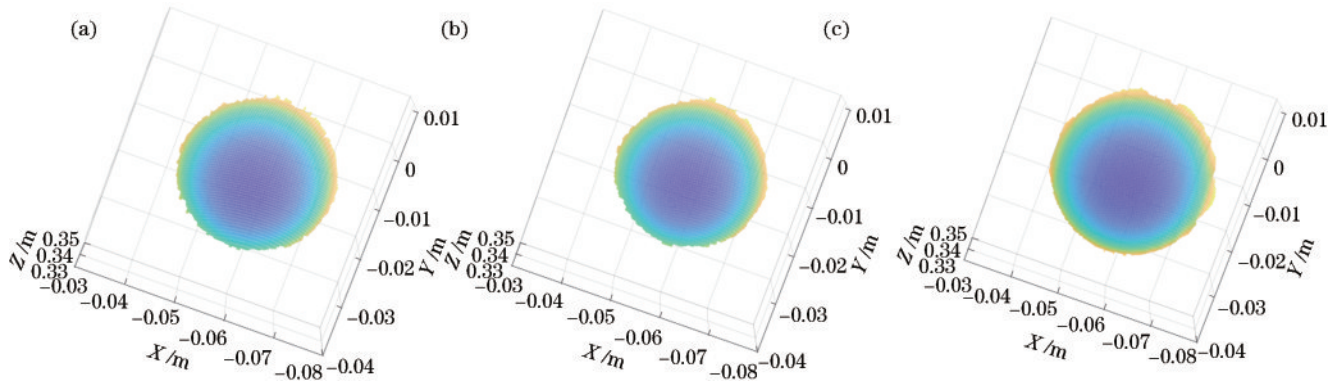


图 12 标准球点云比较。(a)多频外差法;(b)四步相移法;(c)单幅图相位提取法  
Fig. 12 Comparison of standard sphere point clouds. (a) Multi-frequency heterodyne; (b) four-step phase shifting; (c) single-frame-based phase retrieval method

表 1 标准球重建精度

Table 1 Reconstruction accuracy of a standard sphere unit: mm

| Data set  | Multi-frequency | Four-step phase | Single frequency |
|-----------|-----------------|-----------------|------------------|
|           | heterodyne      | shifting        | single step      |
| 1         | 38.1066         | 38.1315         | 38.1520          |
| 2         | 38.1103         | 38.1189         | 38.0538          |
| 3         | 38.0917         | 38.1301         | 38.0916          |
| 4         | 38.0915         | 38.1291         | 38.0782          |
| 5         | 38.1197         | 38.1313         | 38.0599          |
| 6         | 38.1001         | 38.1224         | 38.0947          |
| 7         | 38.0692         | 38.1166         | 38.1109          |
| 8         | 38.0685         | 38.1032         | 38.1059          |
| 9         | 38.0942         | 38.1252         | 38.0470          |
| 10        | 38.0854         | 38.1272         | 38.0572          |
| Avg error | 0.0197          | 0.0135          | 0.0347           |

实验所采集到的静态多孤立物体条纹图如图 13 所示,采用所提算法处理的两组静态孤立物体的包裹相位、展开相位和点云图如图 14 所示。其中,图 14(a)(c)(e)(g)为水平放置物体的左右相机包裹相位与展开相位,图 14(b)(d)(f)(h)为前后放置物体的左右相机包裹相位与展开相位。可以看出,所提算法可以建立左右视图各孤立物体正确对应的展开相位,并生成合理的 3D 点云,即使对于图 14 第二组孤立物体表面突起区域,所提算法也可重建出有效的点云信息。

除了上述静态场景测试,还对运动状态的仿真鸟

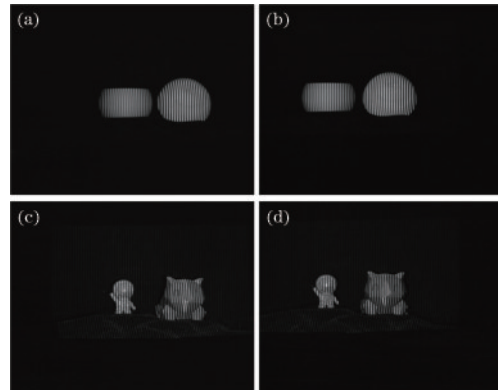


图 13 两组孤立物体原始图。(a)平行放置孤立物体左相机图像;(b)平行放置孤立物体右相机图像;(c)前后放置孤立物体左相机图像;(d)前后放置孤立物体右相机图像  
Fig. 13 Original images of two sets of isolated objects. (a) Parallel placed isolated objects for left camera; (b) parallel placed isolated objects for right camera; (c) front and back placed isolated objects for left camera; (d) front and back placed isolated objects for right camera

进行测试,以验证所提方法在动态 3D 重建方面的性能。投影仪以 60 Hz 的速率向振动翅膀的仿真鸟持续投射正弦条纹图像,并触发相机实时采集。其中左相机采集到的原始图像、通过单幅条纹图得到的包裹相位、所提算法处理的点云如图 15 所示,在 3D 点云图中可以清楚地看到鸟扇动翅膀姿势的变化。结果表明,所提方法可从单幅条纹图获取包裹相位,实现双目包

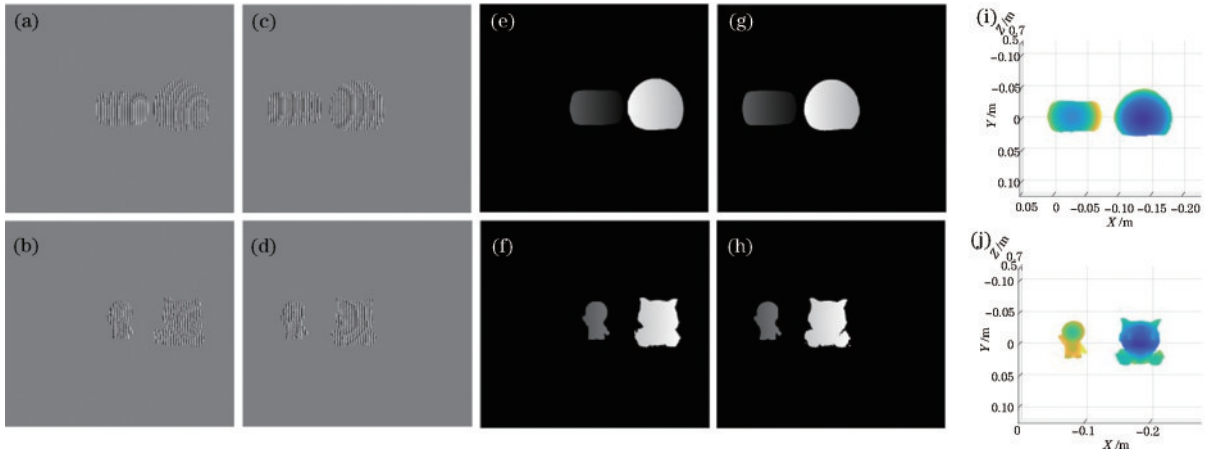


图 14 孤立物体实验结果。(a)(b)包裹相位左相机图像；(c)(d)包裹相位右相机图像；(e)(f)展开相位左相机图像；(g)(h)展开相位右相机图像；(i)(j)重建点云

Fig. 14 Experimental results of isolated objects. (a) (b) Unwrapped phase for left camera; (c) (d) unwrapped phase for right camera; (e) (f) wrapped phase for left camera; (g) (h) wrapped phase for right camera; (i) (j) reconstructed point clouds

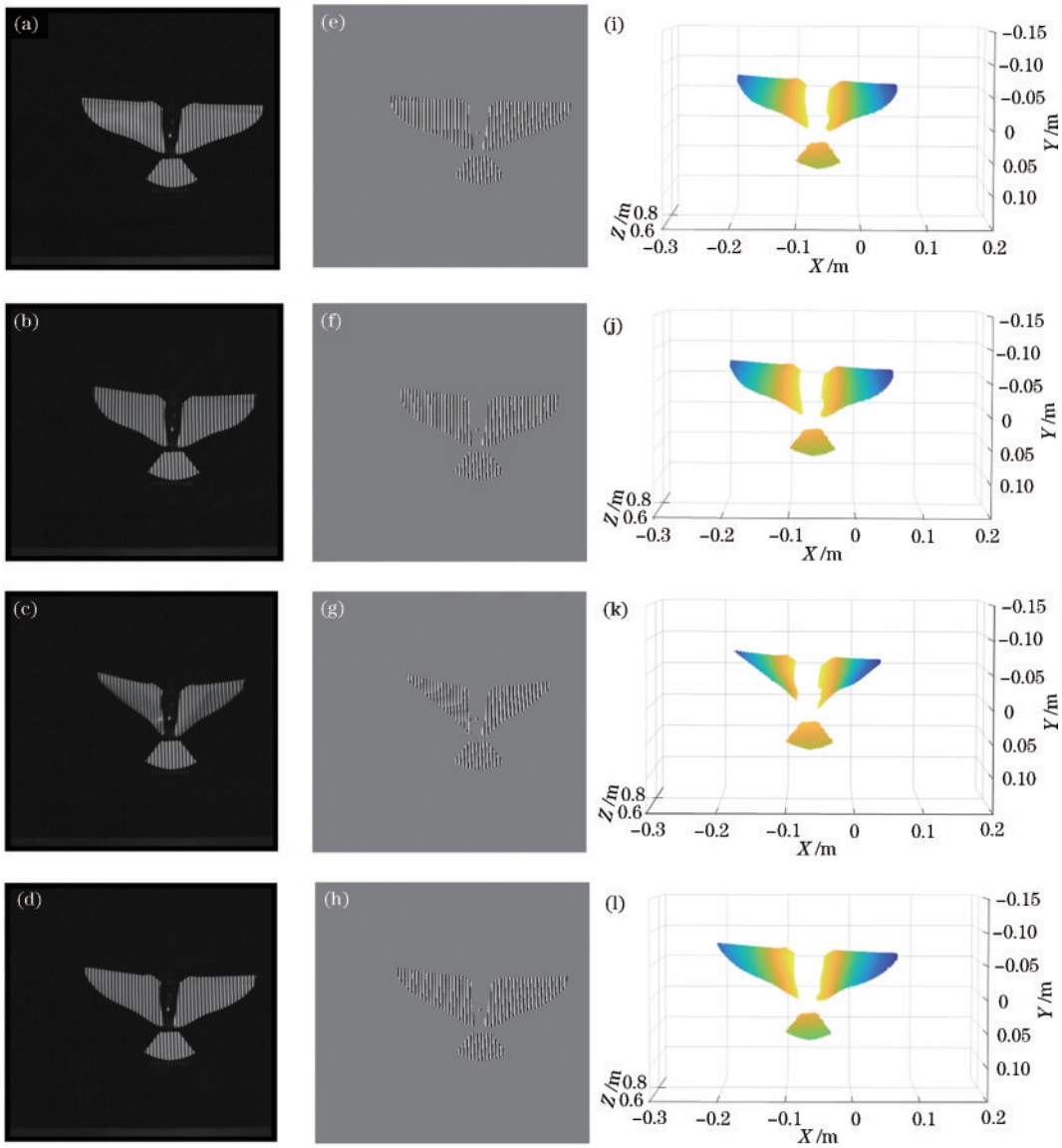


图 15 动态物体 3D 重建。(a)~(d)原始图；(e)~(h)包裹相位；(i)~(l)重建点云

Fig. 15 3D reconstruction of dynamic object. (a)~(d) Original images; (e)~(h) wrapped phases; (i)~(l) reconstructed point clouds



裹相位的多区域相位展开及立体匹配与 3D 重建,能够在物体高速运动下实现动态 3D 重建。

## 4 结 论

提出了一种基于区域的质量导向相位展开方法来解决传统质量导向方法得到的多孤立物体相位展开多视图不对应的问题,并提出基于区域展开相位立体匹配的 3D 重建方法,实现了从单个频率的包裹相位进行动态多孤立物体的 3D 重建。标准球实验结果表明,所提方法在四步相位包裹相位的条件下进行 3D 重建可以达到约 0.0135 mm 的测量精度,在单幅图相位提取的条件下进行 3D 重建可以达到约 0.0347 mm 的测量精度。为了测试所提方法对多孤立物体 3D 重建的能力,分别对静态物体和高速运动物体进行了 3D 重建,所提方法可以实现对多孤立物体多视图对应相位的展开,并可以 60 Hz 的速率实现动态 3D 重建。实验验证了所提方法在单个频率包裹相位进行多孤立物体 3D 重建的有效性,并显示了其在运动物体动态 3D 重建的优势。由于所提方法通过单幅条纹图即可实现 3D 重建,其测量速度上限取决于投影仪投影帧率和相机采集帧率,因此在高速 3D 测量方面具有一定的应用前景。所提方法主要解决单频多个孤立物体在无遮挡情况下的动态 3D 测量问题,在后续将进一步研究多个物体存在遮挡、物体复杂形状等情况下的测量难点问题。

## 参 考 文 献

- [1] 张宗华,于瑾,高楠,等.高反光表面三维形貌测量技术[J].红外与激光工程,2020,49(3):0303006.  
Zhang Z H, Yu J, Gao N, et al. Three-dimensional shape measurement techniques of shiny surfaces[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303006.
- [2] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 133-140.
- [3] Li B W, An Y T, Cappelleri D, et al. High-accuracy, high-speed 3D structured light imaging techniques and potential applications to intelligent robotics[J]. International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 2017, 1(1): 86-103.
- [4] 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.
- [5] Zhang S. Absolute phase retrieval methods for digital fringe projection profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 107: 28-37.
- [6] 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 Z J, Zhang Q C. High-speed 3D topography measurement based on fringe projection: a review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(8): 0811001.

- [7] 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.
- [8] An H H, Cao Y P, Wu H T, et al. Spatial-temporal phase unwrapping algorithm for fringe projection profilometry[J]. Optics Express, 2021, 29(13): 20657-20672.
- [9] 侯艳丽,梁瀚钢,李付谦,等.相位测量轮廓术中时空结合的三频相位展开[J].光学学报,2022,42(1):0112006.  
Hou Y L, Liang H G, Li F Q, et al. Spatial-temporal combined phase unwrapping in phase measurement profilometry[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0112006.
- [10] Song L M, Dong X X, Xi J T, et al. A new phase unwrapping algorithm based on three Wavelength Phase Shift Profilometry method[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 319-329.
- [11] Zhang Q C, Wu Z J. Three-dimensional imaging technique based on Gray-coded structured illumination[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303004.  
张启灿,吴周杰.基于格雷码图案投影的结构光三维成像技术[J].红外与激光工程,2020,49(3):0303004.
- [12] Yin W, Feng S J, Tao T Y, et al. High-speed 3D shape measurement using the optimized composite fringe patterns and stereo-assisted structured light system[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2411-2431.
- [13] 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.
- [14] Villa J, Rodríguez-Reveles G A, Moreno G, et al. Temporal phase-unwrapping in fringe projection profilometry: increasing the accuracy with equidistant long time-steps sampling[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 167: 107591.
- [15] Zhao M, Huang L, Zhang Q C, et al. Quality-guided phase unwrapping technique: comparison of quality maps and guiding strategies[J]. Applied Optics, 2011, 50(33): 6214-6224.
- [16] 游前,翁慧,赵江,等.基于改进 Goldstein 枝切法的傅里叶变换轮廓术[J].光学学报,2023,43(5):0507001.  
You Q, Weng H, Zhao J, et al. Fourier transform profilometry based on improved Goldstein branch-cut algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(5): 0507001.
- [17] Zhu X J, Tang C, Li B Y, et al. Phase retrieval from single frame projection fringe pattern with variational image decomposition[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 59: 25-33.