

引文格式:

郑东鑫, 叶于平, 赵娟, 等. 基于微机电系统振镜的多频相移正弦结构光系统相位展开误差分析 [J]. 集成技术, 2023, 12(4): 91-104.

Zheng DX, Ye YP, Zhao J, et al. Phase unwrapping error analysis of multi frequency phase-shifting sinusoidal structured light system based on micro-electro-mechanical system mirror [J]. Journal of Integration Technology, 2023, 12(4): 91-104.

基于微机电系统振镜的多频相移正弦结构光系统相位 展开误差分析

郑东鑫^{1,2} 叶于平¹ 赵娟¹ 宋展^{1,3*}

¹(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

²(中国科学院大学 北京 100049)

³(粤港澳人机智能协同系统联合实验室 深圳 518055)

摘要 随着增强现实和虚拟现实技术的发展, 以及元宇宙概念的兴起, 三维重建技术作为重要的内容获取手段得到了广泛的应用。其中, 结构光重建技术以其高精度且不受物体表面材质纹理影响的特点, 得到了研究者的重点关注。传统的结构光三维重建主要使用基于数字光处理的投影仪来投影编码图案, 然而, 数字光处理投影仪存在尺寸大、功率高、价格昂贵等缺点, 限制了其在众多应用中的便利性。因此, 微机电系统振镜因其体积小、成本低、帧率高等特点, 在越来越多的三维扫描系统中, 被考虑作为投影仪投影编码结构光。但限于只能投影单向条纹图案和存在红外激光器散斑效应带来的噪声的缺点, 传统的基于三角测量方法并不适用。因此, 该文采用相位-高度模型, 搭建了基于微机电系统振镜的三维扫描系统。针对散斑效应引起的噪声, 本文通过实验对比了基于微机电系统振镜常用的 3 种时间相位解包裹算法的抗噪性能。结果表明, 多频层级法和负指数拟合法的抗噪性能较好, 精度较高, 而多频外差法的抗噪性能较差。该研究结果可为研究人员选择解相方法提供参考。

关键词 微机电系统振镜; 时间相位解包裹; 相位-高度模型; 三维重建

中图分类号 TP 391 **文献标志码** A **doi:** 10.12146/j.issn.2095-3135.20221216001

收稿日期: 2022-12-16 修回日期: 2023-02-23

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B010149002); 广东省基础与应用基础研究项目(2021A1515011802); 深圳市技术攻关重点项目(JSGG20220831092801003)

作者简介: 郑东鑫, 硕士研究生, 研究方向为计算机 3D 视觉; 叶于平, 博士, 研究方向为 3D 机器视觉; 赵娟, 硕士研究生导师, 研究方向为图像处理; 宋展(通讯作者), 博士研究生导师, 研究方向为计算机 3D 视觉, E-mail: zhan.song@siat.ac.cn。

Phase Unwrapping Error Analysis of Multi Frequency Phase-Shifting Sinusoidal Structured Light System Based on Micro-Electro-Mechanical System Mirror

ZHENG Dongxin^{1,2} YE Yuping¹ ZHAO Juan¹ SONG Zhan^{1,3*}

¹(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

³(Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory of Human-Machine Intelligence-Synergy Systems, Shenzhen 518055, China)

*Corresponding Author: zhan.song@siat.ac.cn

Abstract In augmented reality, virtual reality and the metaverse, three dimensional (3D) reconstruction technologies play important roles in acquiring the content information. Among them, the structured light method has been widely used due to the advantages of high precision and not being affected by the texture of the surface material on the object. Traditional structured light 3D reconstruction mainly uses digital light processing based projectors to project coded patterns. However, the shortcomings of digital light processing projectors such as large size, high power, and high price limit their applications. Therefore, more 3D scanning systems start to use a micro-electro-mechanical system mirror as a structured light projector, which has small size, low cost, and high frame rate. In this paper, the phase-height model is proposed to complete the 3D scanning system based on micro-electro-mechanical system mirror. To deal with the noise caused by the speckle effect, anti-noise performance of three time-phase unwrapping algorithms commonly used for micro-electro-mechanical system mirror are experimentally compared. Results show that the multi-frequency hierarchical method and the negative exponential fitting method show better anti-noise capability and higher precision, while the multi-frequency heterodyne method shows poor anti-noise performance. This study provides a guide in choosing proper phase resolution method for micro-electro-mechanical system based 3D scanning systems.

Keywords micro-electro-mechanical system mirror; temporal phase unwrapping; phase-height model; three-dimensional reconstruction

Funding This work is supported by Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province (2019B010149002), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2021A1515011802), Shenzhen Science and Technology Program (JSGG20220831092801003)

1 引言

随着增强现实和虚拟现实技术的发展，元宇宙^[1]概念的兴起，三维重建技术作为其中最重要的内容获取手段得到了广泛应用，如在工业生产、文物保护数字化^[2]、医疗^[3]、影视游戏等领域

域。三维重建可通过扫描获取物体的三维模型，实现对现实世界的虚拟化、数字化。根据是否向物体发出信号，可将三维重建方法分为被动式和主动式两大类。被动式三维重建主要包括双目视觉和多视角立体视觉等方法^[4-5]；主动式三维重建主要包括飞行时间法^[6-7]、结构光法^[8-9]和莫尔

条纹法等。其中, 结构光法以其高精度、实现简单且不受物体表面材质纹理影响的特点, 得到了广泛应用, 如知微传感的 Dcam 系列三维扫描相机就采用了结构光法。

根据投影仪出光模式的不同, 结构光可分为点结构光、线结构光、面结构光等; 根据编码方法的不同, 结构光技术可分为时间编码和空间编码两种类型。时间编码指在一定时间内向被测物体投射出多幅结构光, 通过相机采集后完成编解码工作。时间编码方法重建出的点云数据精度高且稠密, 但不能完成实时重建^[10-11]。常见的时间编码方法有格雷码二值条纹编码和正弦编码。而空间编码只投影一幅编码图案即可完成物体的三维点云扫描。该方法效率较高, 可完成实时的动态重建, 但点云稀疏、精度较低。常见的空间编码方法主要有 De Bruijn 序列、伪随机序列以及 M-Array 等^[12-13]。

结构光三维扫描系统的标定模型主要分为三角立体模型和相位-高度模型两种。在三角立体模型中, 通过将投影仪视为逆相机(将投影的图案当作投影仪成像的图案)^[14], 可使投影仪如标定相机一样标定。通过匹配相机、投影仪的相位对应点, 利用三角测距法进行重建。而在相位-高度模型中, 对象的高度是相对于参考平面测量的, 高度是相位的函数。一般来说, 相位-高度函数的选择取决于相机与投影仪之间的布置方式。为提高系统的灵活性, 研究者提出了许多广义相位-高度模型^[15-16]。三角立体模型可直接得到扫描物体的三维信息, 但在标定投影仪时需要投影仪具有投影棋盘格或横纵条纹的能力, 对投影设备要求较高。相位-高度模型只需要投影仪能投影单向的条纹即可, 但一般的相位-高度模型仅能获得物体的高度信息, 且扫描范围受标定范围的影响, 离开标定范围时, 扫描精度容易降低。因此, 相位-高度模型更适用于扫描小型物体。

传统的结构光三维重建方法大多基于数字光处理(digital light processing, DLP)投影仪完成编码图案的投影, 再利用三角立体模型完成系统的标定。由于使用 DLP 的重建精度高, 许多公司推出了相应的产品: 如德国 GOM 公司的 ATOS 系列、美国 Hexagon 公司的 CongiTens 系列、北京天远三维科技股份有限公司的 FreeScan 系统等。但数字光处理投影仪存在体积大、速度慢、可见光对人眼有害等限制因素, 不适用于部分场景。

本文使用基于微机电系统(micro-electromechanical system, MEMS)振镜^[17]的投影模组替代 DLP 投影仪搭建系统。MEMS 融合了微电子技术与机械工程, 操作精度较高。MEMS 振镜是一种基于 MEMS 技术的微小可驱动反射镜, 镜面直径仅几毫米, 分为单轴和双轴两种。基于 MEMS 振镜的投影模组工作原理为点激光器通过光学模组后产生线激光束, 再经过高速振动的 MEMS 扫描镜反射, 在投影区域按照水平的轨迹进行扫描, 投影出正弦光栅。与 DLP 投影仪相比, 基于 MEMS 振镜的投影模组具有重量轻、体积小、帧率高、寿命长、生产成本较低的优点, 可极大地缩小投影仪的尺寸, 使三维扫描系统更容易集成化, 使用灵活性更高。目前, 基于单轴 MEMS 振镜的投影模组得到了广泛的发展, 国内许多公司都开发了相应的产品。但基于单轴 MEMS 振镜技术的投影模组存在激光器散斑效应的噪声影响的缺点, 以及只能投影单个方向条纹图案的局限性。

目前, 市面上的 MEMS 结构光三维扫描相机大多基于双目结构光系统, 如微视传感科技有限公司的 VS-PDN 深度相机。与单目结构光系统相比, 双目结构光系统实时性差且需要两个相机使得系统体积变大。对此, 本文采用基于多项式的相位-高度模型^[18]替代传统的三角立体模型进行三维扫描, 该方法对于投影仪和相机的位置没

有严格限制，且仅需一个相机。但在相位-高度模型中，使用解包裹算法得到的相位精度，对重建效果有较大影响，且由于激光器的散斑效应，MEMS 振镜投影模组会产生较大的噪声，导致基于相位解包裹算法展开的绝对相位中产生跳跃性误差。为减少该误差，通常采用误差补偿和条纹级次校正的方法，但会降低测量的速度。此外，建立的误差补偿机制易受到环境和设备变化的影响，鲁棒性较差。因此，本文通过实验对 3 种经典的时间相位解包裹算法在 MEMS 振镜系统中的性能进行分析，旨在择选出性能较好的解包裹算法，以避免进行复杂的误差补偿。

2 基于相位-高度模型的三维扫描原理

2.1 相位-高度模型

有研究提出了各种基于相位-高度模型的标定方法^[19-20]。在相位-高度模型中，相位直接影响高度，标定时需要一个高度 $h(x,y)=0$ 的参考平面，然后相对于参考平面的位置平移平面测量物体的高度。高度是相位差的函数，相位差是物体的相位和参考平面的相位之间的差，即 $h(x,y)=f(x,y,\Delta\phi,\theta)$ 。其中， θ 是由标定的参数组成的向量。

典型的相位-高度模型：在早期的典型相位-高度模型^[21]和线性相位-高度模型^[22-23]中，投影仪和相机的光轴需保持平行并垂直于参考平面，且投影仪和照相机离参考平面的距离相同(图 1)。但在实际应用中，存在难以满足几何约束，不满足特定条件下测量精度有限以及测量范围受投影仪和相机共同覆盖视野的限制等问题，适用范围较小。

逆线性相位-高度模型：为摆脱严格几何约束的限制，研究者提出一种对系统中相机和投影仪摆放位置无严格几何约束要求的灵活模型^[24-25]，如图 2 所示。该模型中高度的倒数和相位差的倒

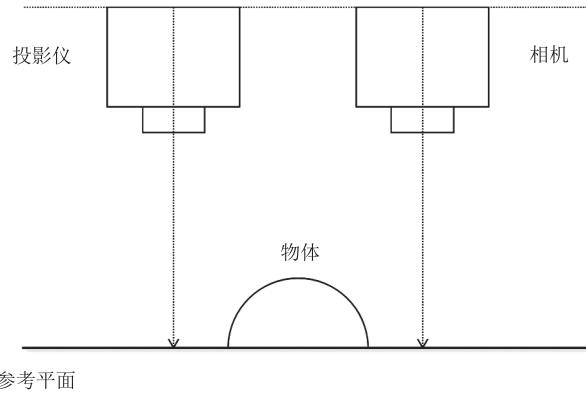


图 1 经典相位-高度模型的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the classical phase-height model

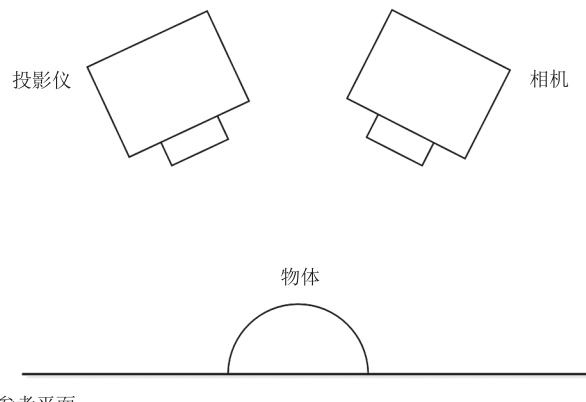


图 2 无严格几何约束的相位-高度模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of phase-height model without strict geometric constraints

数线性相关，所以称之为逆线性相位-高度模型。在该模型中，只要被测物体可以被投影仪投影到图案且能被相机采集到，摄像机和投影仪就可以任意摆放。该模型的相位-高度关系可用公式(1)表示。

$$\frac{1}{h(x,y)} = a(x,y) + b(x,y) \frac{1}{\Delta\phi(x,y)} \quad (1)$$

其中， $\Delta\phi(x,y)$ 为相位差； $a(x,y)$ 和 $b(x,y)$ 为标定的逐像素参数。通过最小二乘法，在几个已知高度测量的参考平面可用于拟合参数 $a(x,y)$ 和 $b(x,y)$ 。

对公式(1)重新组合，可得到公式(2)。

$$h(x,y) = \frac{\Delta\phi(x,y)}{a(x,y)\Delta\phi(x,y)+b(x,y)} \quad (2)$$

公式(2)展示了高度 $h(x,y)$ 和相位差 $\Delta\phi(x,y)$ 之间的非线性关系^[26-27]。因此公式参数可以用非线性最小二乘法估计, 但非线性拟合过程的性能取决于 $a(x,y)$ 和 $b(x,y)$ 的初始值, 影响算法的稳定性。

多项式相位-高度模型: 为解决算法的稳定性问题, 研究者提出了多项式相位-高度模型, 该模型利用多项式拟合方法来近似这一非线性关系^[18], 得到以下公式。

$$h(x,y) = \sum_{i=0}^n a_i(x,y) \Delta\phi(x,y)^i \quad (3)$$

其中, $a_i(x,y)$ 为标定的逐像素系数。该系数通常在标定后保存, 然后在三维测量时加载, 可通过增加多项式次数减小透镜畸变对表面重建的影响。

2.2 三维标定方法

上述相位-高度模型标定过程都需要利用精准的平移台或量块, 但在实际环境中, 实现较为复杂困难, 此外, 通过该方法仅能获得物体的深度信息。为获得物体的 x 、 y 坐标信息, 本文采用一种利用表面带有离散圆环标记点的白色标定板进行三维标定的方法^[28]。通过将平板放置在几个位置上, 即可在确定绝对相位与深度关系的同时, 确定像素位置和 x 、 y 坐标的关系。

该三维标定方法包含从相位到深度和从像素到坐标两种转换, 分别称为深度标定和横向标定。其中, 深度标定建立了绝对相位与深度数据之间的关系, 横向标定建立了像素位置与 x 、 y 坐标之间的关系。在进行三维标定前, 需要从多个随机位置采集标定板图片, 利用张正友标定法^[29]得到电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)相机的 8 个内部参数, 包含两个焦距 F_u 和 F_v , 两个主点坐标 P_u 和 P_v , 以及 4 个图像径向与切向畸变系数(K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4)。

深度标定利用上述几个相位-高度模型建立绝对相位和深度之间的关系。其中, 多项式相位-高度模型和基于控制方程的相位-高度模型是较为常用的两个模型。在标定过程中, 将标定板放置在测量范围内的几个不同位置进行标定。在每个位置, 正弦条纹图案被投影到标定板表面, 通过相位计算得到每个像素点的绝对相位信息。各个标记点在像素坐标系中的中心位置 $[u,v]$ 可通过圆检测算法得到。得到每个标记点的中心位置后, 可确定所有标记点在像素坐标系中不同位置的坐标。标定板相对于 CCD 相机的外部参数 R 和 T 的计算公式如下。

$$s[u \ v \ 1]^T = A[R \ T][x_w \ y_w \ z_w \ 1]^T \quad (4)$$

其中, R 为 3 个旋转角度的旋转矩阵; $T = [T_x, T_y, T_z]$ 为 3 个方向线性平移的向量; $[x_w, y_w, z_w]$ 为白板上标记点 P 的坐标向量; $[u, v]$ 为点 P 在像素坐标系中的坐标向量; A 为 CCD 相机的内部参数矩阵; s 为任意比例因子; $[]^T$ 为矩阵的转置。

基于外部参数 R 和 T , 可得到标定板上每个像素点的世界坐标, 进而得到每个像素点相对于参考平面的相对深度。因此, 每个像素点的绝对相位和深度数据之间的关系可通过前面几个相位-高度模型进行准确的深度标定。

横向标定是确定像素坐标和 x 、 y 坐标之间的关系。对于实际的成像系统, 由于光学成像和投射透镜的畸变, 这种关系是非线性的。横向标定需要利用从投影条纹图案获得的深度信息, 因此, 在每个像素位置, 可使用公式(5)表示高精度的关系。

$$\begin{cases} x_r = a_0(u, v)z_r^2 + b_0(u, v)z_r + c_0 \\ y_r = a_1(u, v)z_r^2 + b_1(u, v)z_r + c_1 \end{cases} \quad (5)$$

其中, a_0 、 b_0 、 c_0 、 a_1 、 b_1 、 c_1 为系统参数的系数集; $[u, v]$ 为一个点在像素坐标系中的坐标向量; x_r 、 y_r 、 z_r 为标定板上同一个点在参考坐标系中的坐标。

本文利用同样的一块标定板横向标定像素位置和 x 、 y 坐标之间的关系。在已知相邻离散圆

环标记之间的间隔和所得到的深度的情况下，即可在深度标定的过程中获得参考坐标系中所有像素的位置 x_r, y_r, z_r ；每个像素点的多项式系数可由 x_r, y_r, z_r 和白板上所有点的像素坐标 (u, v) 确定。

3 时间相位展开算法的原理

时间相位展开算法基于投影设备投影多组不同频率且带有相移的条纹，通过相机采集得到图案。利用获得的三维信息的相位初值，逐一对像素进行相位计算展开，该过程一般分为相位主值的计算和相位展开两个部分。

3.1 相位主值的计算

仅通过一张变形的条纹图像很难得到高精度的相位值，因此，一般采用 N 步相移法得到准确的相位^[30]。该方法中，投影的正弦条纹的相位每

间隔 $\frac{1}{N}$ 个光栅周期移动一次，并产生相应的光强函数 $I_n(x, y)$ 。

相机采集的条纹图像图案可用公式(6)表示。

$$\begin{aligned} I_n(x, y) = & \\ A(x, y) + B(x, y) \cos [\phi(x, y) - 2\pi n/N] \end{aligned} \quad (6)$$

其中， $I_n(x, y)$ 为第 n 副光栅图像的光强分布， $n \in [0, N-1]$ ； A 为背景的光强度； B 为调制的光强度； $\phi(x, y)$ 为点 (x, y) 处的相位主值。相位主值计算公式如公式(7)所示。

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \cos(2\pi n/N)} \quad (7)$$

公式(6)中有 3 个未知数，因此，至少需要使用 3 个图像即三步相移算法才能计算出 $\phi(x, y)$ 。

本文以四步相移算法为例，每次的相移增量为 $\frac{\pi}{2}$ ，则有：

$$\begin{cases} I_1(x, y) = R(x, y)[A(x, y) + B(x, y)\cos\phi(x, y)] \\ I_2(x, y) = R(x, y)[A(x, y) - B(x, y)\sin\phi(x, y)] \\ I_3(x, y) = R(x, y)[A(x, y) - B(x, y)\cos\phi(x, y)] \\ I_4(x, y) = R(x, y)[A(x, y) + B(x, y)\sin\phi(x, y)] \end{cases} \quad (8)$$

由公式(7)可以进一步得到四步相移算法的 $\phi(x, y)$ 为：

$$\phi(x, y) = \arctan \left(\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right) \quad (9)$$

3.2 3 种时间相位展开算法的原理

由于相位主值是通过反正切函数计算得到的，因此，所得的相位主值均是被截断在 $(-\pi, \pi)$ 区间内的截断相位。为得到连续的相位分布，需要进行相位展开。相位展开算法主要分为空间相位展开算法和时间相位展开算法。本文选取 3 种时间相位展开算法进行介绍^[31]，并作对比实验。

3 种算法的共同思想是借助一个（或多个）具有不同条纹周期的附加包裹相位图来展开相位。未包裹的相位图可通过相移算法（公式(6)）得到，范围为 $(-\pi, \pi)$ 。在第 3.2.1 节和第 3.2.2 节中，两个包裹的相位图表示为 ϕ_l 和 ϕ_h ，条纹波长分别为 λ_l 和 λ_h ($\lambda_h < \lambda_l$ ； h 和 l 分别表示“高频”和“低频”）。 ϕ_l 和 ϕ_h 的连续相位图分别为 Φ_l 和 Φ_h 。两个连续相位图具有以下关系：

$$\Phi_h(x, y) = (\lambda_l / \lambda_h) \Phi_l(x, y) \quad (10)$$

3.2.1 多频外差法

多频外差法^[32]由双频外差法发展而来，而双频外差法又是从 20 世纪 70 年代早期的全场相移干涉术和双波长全息术结合发展而来，后来该技术被引入条纹投影轮廓术中，并进一步被证明可有效解决相位不连续问题。该方法将明确的相位范围扩展到两个接近频率拍频处的合成波长。由于参考相位是由两个相位函数的包裹差产生的，因此，时间相位展开方法也被称为相位差算法。双频外差算法包括减去在每个波长获得的相位测量值，其计算公式如公式(11)所示。

$$\phi_{eq}(x,y) = \phi_h(x,y) - \phi_l(x,y) \quad (11)$$

通过双频外差法得到的结果与在等效拍频合成波长下的结果相同, 等效拍频合成波长可通过下式计算得到。

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_l \lambda_h}{\lambda_l - \lambda_h} \quad (12)$$

其中, λ_{eq} 为拍频合成波长。若 $\lambda_h < \lambda_l < 2\lambda_h$, 那么等价于 $\lambda_h < \lambda_l < \lambda_{eq}$ 。选择适当的 λ_h 和 λ_l , 并使其间隔紧密时, 合成波长可以足够大, 进而消除相位模糊。双频外差法通过牺牲其信噪比以增加确定的测量范围。因此, 合成相位图 ϕ_{eq} 通常仅用作参考相位, 以协助相位展开。合成波长与较小原始波长的比值定义了一个比例因子, 该因子应用于拍频的相位, 以确定更灵敏波长的条纹阶数, 其计算公式如公式(13)所示。

$$k_h(x,y) = \text{Round} \left[\frac{(\lambda_{eq}/\lambda_h)\phi_{eq}(x,y) - \phi_h(x,y)}{2\pi} \right] \quad (13)$$

双频外差时间相位展开方法可扩展到 3 个甚至更多波长, 从而允许进一步增加等效波长。

3.2.2 多频层级法

多频层级相位展开法^[33]是一种层层递进的相位解包裹方法。该方法利用节距覆盖全场的低频率光栅条纹对高频率光栅条纹一步步展开, 得到高频率光栅条纹的绝对相位。在该算法中, 投影具有不同条纹密度的条纹图, 且最粗的条纹图中只有一个条纹, 其中没有任何“包裹”的相位(范围为 $[-\pi, \pi]$)被用作进一步相位展开的基本信息。在原有相位图的基础上, 其他相位图根据各自频率或条纹数的关系, 逐个进行相位图的解包。基于公式(10), 相位图(Φ_h 或 Φ_l)和包裹相位图(ϕ_h 或 ϕ_l)之间的关系可表示如公式(14)所示。

$$\begin{cases} \Phi_h(x,y) = \phi_h(x,y) + 2\pi k_h(x,y) \\ \Phi_l(x,y) = \phi_l(x,y) + 2\pi k_l(x,y) \end{cases} \quad (14)$$

其中, k_h 为高频率条纹的整数边缘阶; k_l 为低频

率条纹的整数边缘阶。在双频时间相位解包裹中, 仅使用一组单位频率模式检索低分辨率相位分布 ϕ_l , 因此, 不需要对 ϕ_l 进行相位解包裹, 即 $\Phi_l = \phi_l$ 。参考公式(10)和(14), 可推出每个像素的条纹顺序 k_h 如公式(15)所示。

$$k_h(x,y) = \text{Round} \left[\frac{(\lambda_l/\lambda_h)\phi_l(x,y) - \phi_h(x,y)}{2\pi} \right] \quad (15)$$

其中, Round[] 为最接近的整数值。

3.2.3 负指数拟合法

负指数拟合法通过选择投射图像的最大条纹数为 $t=s, s-1, s-2, s-4, \dots, s/2$, 使条纹的数目呈负指数递减^[34], 相邻两套投射条纹之间的相位差可通过公式(16)~(17)计算。为方便表示不同频率条纹图的展开相位 $\Phi(x,y)$ 以及包裹相位 $\phi(x,y)$, 公式中均略去了位置坐标 (x,y) 。

$$\Delta\Phi(s-t', s-2t') = U\{\Delta\phi(s-t', s-2t'), \Delta\Phi(s, s-t')\} \quad (16)$$

$$\Delta\Phi(s, s-2t') = \Delta\Phi(s-t', s-2t') + \Delta\Phi(s, s-t') \quad (17)$$

其中, $t'=1, 2, 4, \dots, 2^v, \dots, s/2$; $v=0, 1, 2, \dots, \log_2(s/2)$; $U\{\}$ 为解包裹运算, 其表达式为 $U\{\phi_1, \phi_2\} = \phi_1 - 2\pi \cdot \text{Round}\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2\pi}\right)$; $\Delta\Phi(t_1, t_2) = \Phi_{t_1} - \Phi_{t_2}$ 。

直接通过 $\Delta\phi(t_1, t_2) = \phi_{t_1} - \phi_{t_2}$ 求解 $\Delta\phi(t_1, t_2)$, 会产生较大的跳动误差。为避免这一误差对解包裹过程的影响, 在采用四步相移法提取包裹相位时, 直接提取相邻两套条纹的包裹相位差 $\Delta\phi(t_1, t_2)$ 。该方式可将 $\Delta\phi(t_1, t_2)$ 限制在 $(-\pi, \pi)$ 这一范围。 $\Delta\phi(t_1, t_2)$ 的表达式如公式(18)所示。

$$\Delta\phi(t_1, t_2) = \arctan \left[\frac{\Delta I_{42}(t_1)\Delta I_{13}(t_2) - \Delta I_{42}(t_2)\Delta I_{13}(t_1)}{\Delta I_{13}(t_1)\Delta I_{13}(t_2) + \Delta I_{42}(t_1)\Delta I_{42}(t_2)} \right] \quad (18)$$

其中, I 为条纹的光强值, $\Delta I_{kl} = I_k - I_l$ 。利用公式(16)~(17)进行迭代解相的起始条件如公式(19)

所示。

$$\Delta\Phi(s,s-1)=\Delta\phi(s,s-1) \quad (19)$$

最终的迭代结果如公式(20)所示。

$$\Delta\Phi(s,0)=\Phi(s) \quad (20)$$

其中, $\Phi(s)$ 为迭代的最终展开相位。为提高最终展开相位的精度, 将中间解包裹得到的结果加以利用, 通过最小二乘法拟合得到斜率 r , 拟合后得到的最终展开相位为 Φ 。 r 和 Φ 的表达式如公式(21)~(22)所示。

$$r=\frac{s\Phi(s)+\sum_{v=0}^{\log_2(s-1)}(s-2^v)\Phi(s-2^v)}{s^2+\sum_{v=0}^{\log_2(s-1)}(s-2^v)^2} \quad (21)$$

$$\Phi=s \cdot r \quad (22)$$

4 实验结果与分析

为测试3种时间相位展开算法的性能, 本文搭建了一个条纹投影系统(图3), 该系统包含一个相机(FLIR Blackfly S BFS-U3-32S4C)和12 mm的镜头, 一个MEMS振镜投影模组(Ainstec BM4HF585X)。其中, 相机的分辨率为1 024×768; 投影模组由波长为854 nm的二极

管激光器、鲍威尔透镜和谐振频率为4 000 Hz的MEMS振镜组成, 视野为55°×55°。该系统采用非平行关系, 通过串口通信给MEMS投影模组发送信号, 使其投影一组图案, 同时硬触发相机同步采集图案。

由于MEMS振镜投影仪模组的红外激光器会产生散斑效应, 因此, 与DLP投影仪相比, MEMS振镜投影仪模组的误差较大。如图4所示, 本文利用相机采集两种投影仪投影的正弦条纹图案, 并对比了这两种条纹图案的图像以及其中一行的像素值。由图4可知, 与DLP投影仪相比, MEMS振镜投影仪模组投影出图案的正弦性效果较差。为减小噪声对相位计算的影响, 本文首先使用二维高斯滤波器(公式(23))对图像进行降噪处理。处理后的图像单行像素值如图5所示, 由图5可知, 图案的正弦性得到了有效恢复。

$$f(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (23)$$

4.1 平面解相位实验分析

为对比3种时间相位展开算法的性能, 根据3种算法对光栅条纹频率的要求不同, 本文设计了3套不同的光栅条纹来完成投影的工作。多频

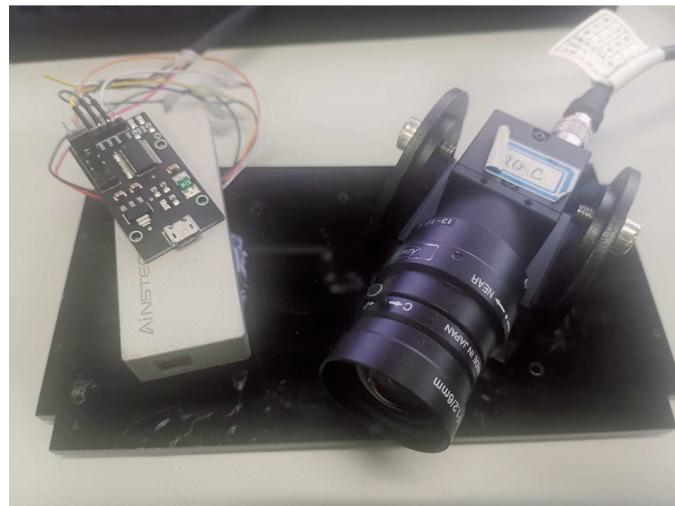


图3 搭建的基于MEMS振镜的结构光三维扫描系统

Fig. 3 Structured light 3D scanning system based on MEMS mirror

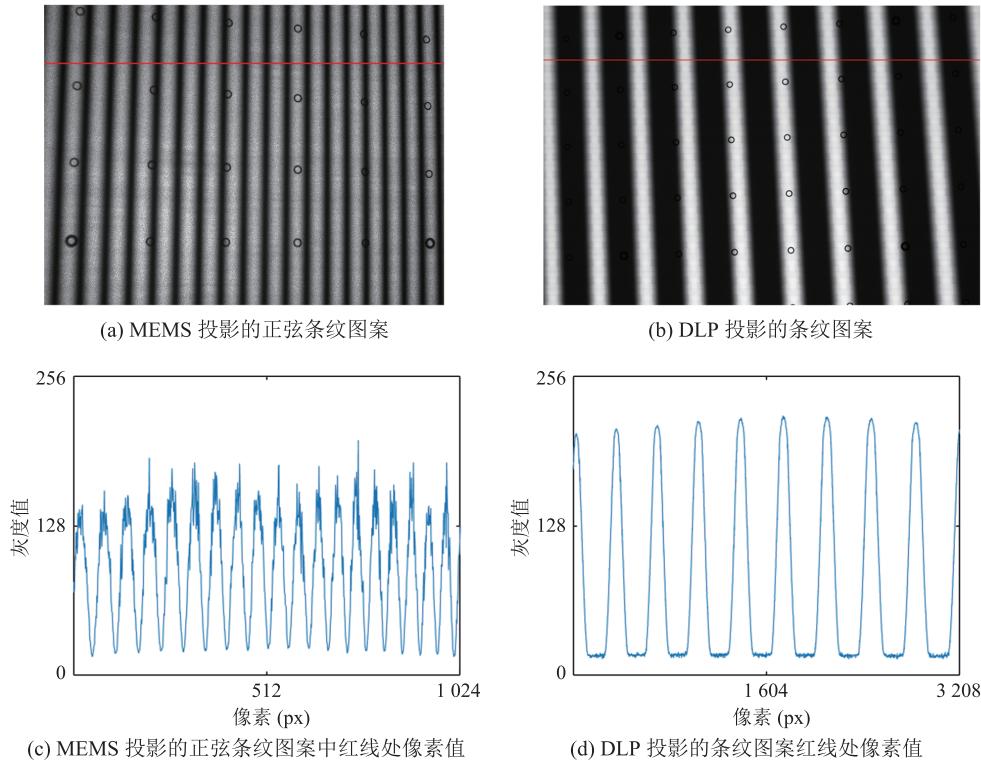


图 4 MEMS 振镜投影模组和 DLP 投影仪投影出来的正弦图案和红线处的像素值

Fig. 4 Sine pattern and pixel value at red line projected by MEMS mirror projection module and DLP projector

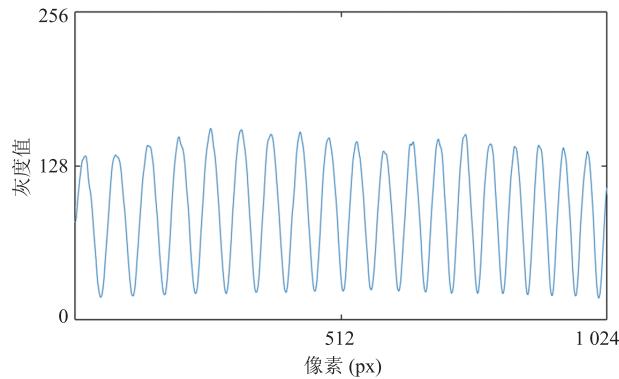


图 5 经过二维高斯滤波后 MEMS 振镜投影模组投影出来的正弦图案某一行的像素值

Fig. 5 Pixel value of a line of sine pattern projected by MEMS mirror projection module after two-dimensional Gaussian filtering

外差法采用的频率为 70、64、59；多频层级法采用的频率为 1、2、4、8、16、32、64；负指数拟合法采用的频率为 64、63、62、60、56、48、32。3 套光栅条纹均采用四步相移法提取相位主

值，并使用对应的时间相位展开算法进行解包裹。本实验所扫描的平面为一个表面光滑平面度高的标定板。

由图 6 所示的相位解包裹结果可知，3 种算法均能达到完全解相的目的，其中，多频层级法和负指数拟合法得到的相位展开结果表面较为平滑，无明显跳跃性误差，而多频外差法的相位展开结果有明显的跳跃性误差。为进一步比较 3 种算法的性能，本文对图 6 中第 1 行的 3 个方法整个面展开值的结果进行平面拟合，拟合结果如表 1 所示。

由表 1 可知，多频层级法和负指数拟合法的误差平方和和均方根误差都较小，表明这两个算法的性能较好。多频层级法和负指数拟合法性能接近，而多频外差法的性能较差，有明显的误差。若使用多频外差法解包裹，那么需要采用各种误差补偿算法进行补偿，较为复杂。多频外差

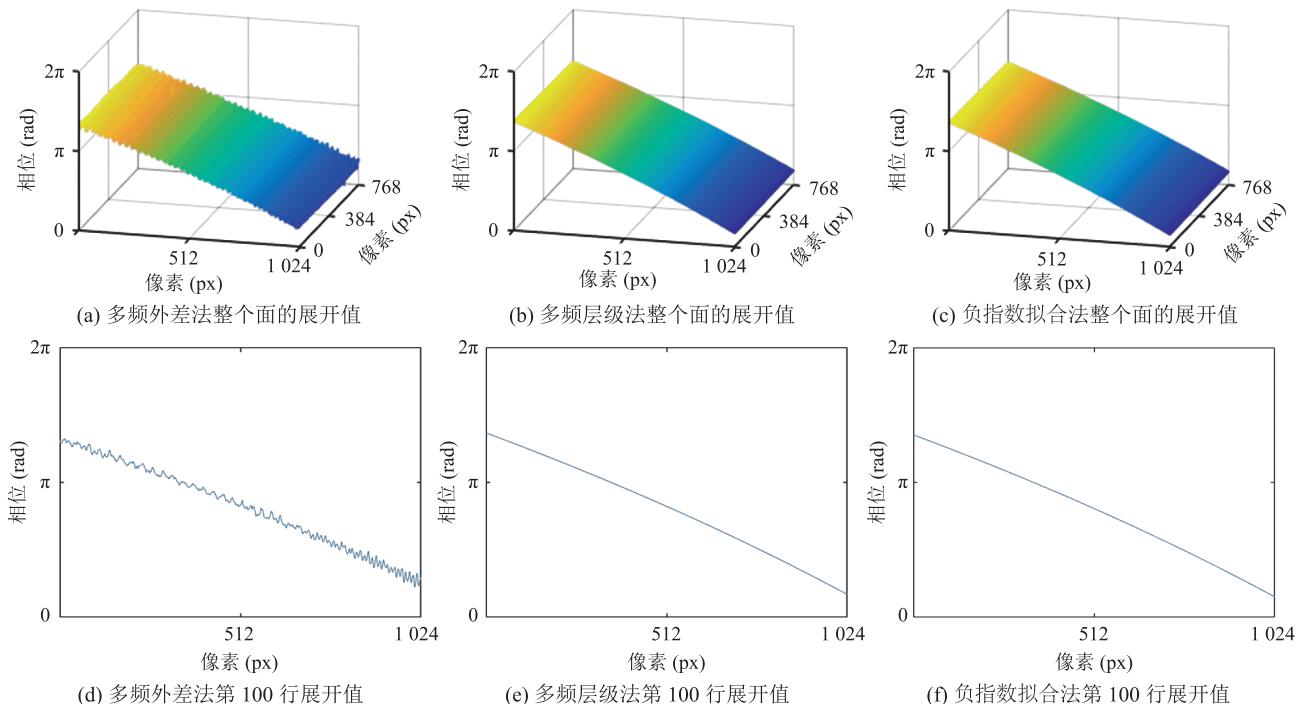


图 6 相位展开值

Fig. 6 Phase unwrapping value

表 1 3 种时间相位展开算法的误差对比

Table 1 Error comparison of three temporal phase unwrapping algorithms

时间相位展开算法	均方根误差 (rad)	误差平方和 (rad)	平面拟合的确定系数
多频层级法	0.050 8	2 026.72	0.997 8
多频外差法	0.071 8	4 050.34	0.994 4
负指数拟合法	0.051 2	2 062.69	0.997 7

法需要投影的频率只有 3 组，而多频层级法和负指数拟合法一般需要 6~7 组。因此，在一些噪声较小的场景下，可以考虑使用多频外差法，可在提高整个系统扫描速度的同时不降低精度；在噪声较大的场景下，需要使用多频层级法和负指数拟合法来保证精度。

这 3 种方法取得不同效果的根本在于：多频外差法基于拍频原理合成新的节距大的虚拟包裹相位，而多频层级法和负指数拟合法未使用拍频方式。由此可见，拍频是多频外差法容易受噪声影响、精度降低的原因。

4.2 三维重建实验分析

为更充分地对比 3 种算法的性能，本文首先

基于相位-高度模型完成系统的标定工作，然后采用 3 种算法扫描物体进行三维重建，比较性能。

在标定过程中，本实验设计并制造了一个包含 8×7 个离散圆环标记点的标定板（图 7）用于三维标定。该标定板相邻标记沿行和列方向的间隔相同，均为 50 mm。在进行三维标定前，首先利用张正友标定法对系统中的 CCD 相机进行标定；然后在三维标定过程中，将标定板尽量均匀分布在测量范围内，以提高标定的精度^[19]。在测量范围内，尽量多地采集不同位置的标定板也有利于精度的提高，但同时需要花费更多的时间完成条纹图案数据的采集和处理。本文在距离系统正前方 45~60 cm 的位置，每间隔约 5 mm 放置

标定板, 一共选择了 31 个不同的位置放置。在每个位置, 投影并采集一组相移条纹图案, 获得相位后, 进行三维标定。图 8 为标定时在某一个位置采集的一组图片。

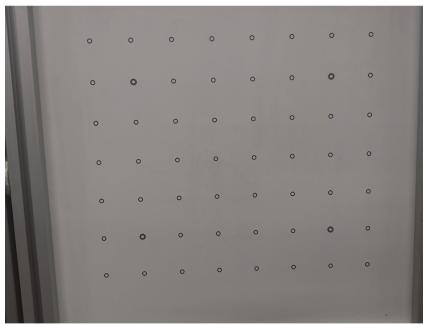


图 7 进行三维标定使用的标定板

Fig. 7 Calibration plate for 3D calibration

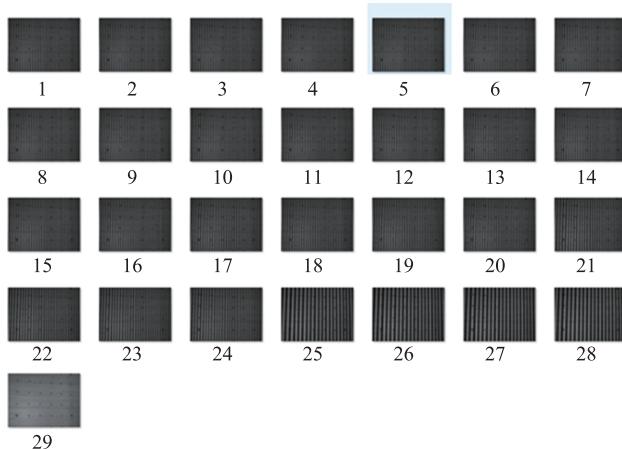


图 8 标定时在某一个位置采集的一组图片

Fig. 8 A group of pictures collected at a certain position during calibration

对于同一位置的标定板, 本文首先使用圆检测算法得到每个圆环标记点的圆心在像素坐标系中的位置(图 9), 然后, 代入三维扫描的算法中, 进行深度标定和横向标定。

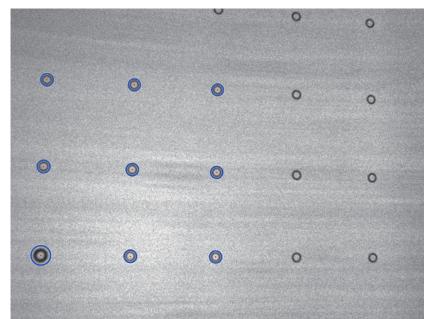


图 9 使用圆检测算法得到圆环标记点的圆心

Fig. 9 Using circle detection algorithm to get the center of a circle mark point

完成标定后, 本文分别使用 3 种算法对平面进行扫描(图 10), 同时使用 Intel-RealSense-SR305 进行扫描(图 11), 以对比两个系统的性能。由图 11 可知, 多频外差法的误差较大, 重建结果不理想。因此, 本文主要就另外两个方法和 SR305 扫描平面的精度进行对比分析, 如表 2 所示。

由图 10 ~11 可知, 多频层级法和负指数拟合法及 SR305 相机均能有效重建平面, 而多频外差法由于噪声的影响, 重建的平面误差较大, 不能良好地表现出平面的三维轮廓。通过进一步的平面拟合分析可知, 在没有采用复杂的误差补偿

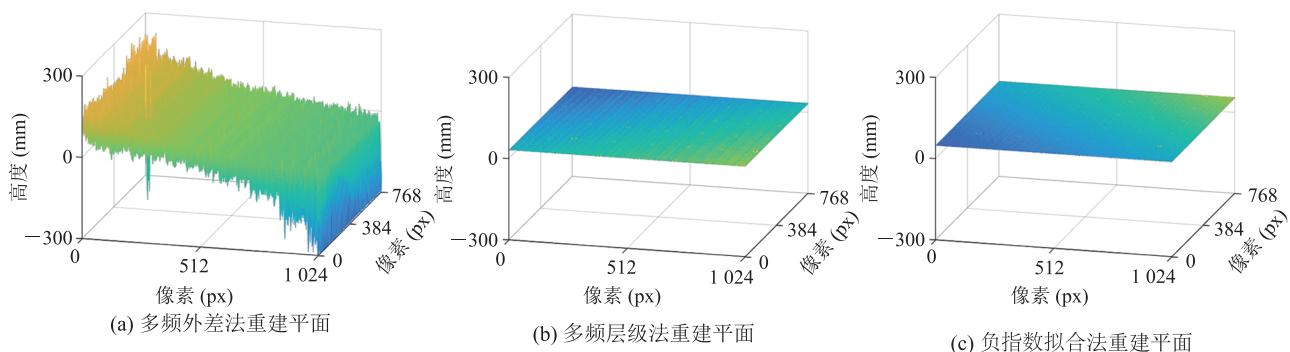


图 10 使用 3 种方法重建平面的结果

Fig. 10 The result of reconstructing the plane using three methods

表 2 多频层级法、负指数拟合法和 SR305 扫描平面的精度对比

Table 2 Precision comparison of multifrequency expansion, negative exponential fitting and SR305 scanning plane

时间相位展开算法	扫描平面标准差 (mm)
多频层级法	0.196 445
负指数拟合法	0.168 121
SR305	1.004 126

算法的情况下，多频层级法和负指数拟合法重建平面的精度均能达到一个较高的水平，较 SR305 的精度有较大的提升。

为更充分地对比 3 种算法的性能，本文还分别使用 3 种算法对石膏像表面进行三维重建，重建中解相位的过程如图 12 所示，重建的石膏像表面深度图结果如图 13 所示。

重建结果表明，在存在噪声的情况下，使用

多频外差法重建物体会产生较大的跳跃性误差，使用多频层级法和负指数拟合法重建物体则没有明显的跳跃性误差，表面较为平滑，能较好地重建出物体的三维轮廓。

5 结 论

本文搭建了基于 MEMS 振镜的结构光三维扫描系统。首先，针对 MEMS 振镜的散斑效应带来噪声的特点，本文使用二维高斯滤波器进行去噪，得到了较好的效果；然后，通过平面解相位实验，对 3 种时间相位解包裹算法的性能进行分析；最后，通过三维重建物体，进一步分析了 3 种时间相位解包裹算法的性能，并且与 Intel-RealSense-SR305 重建平面的结果进行对比。结果表明，多频层级法和负指数拟合法的抗噪音性

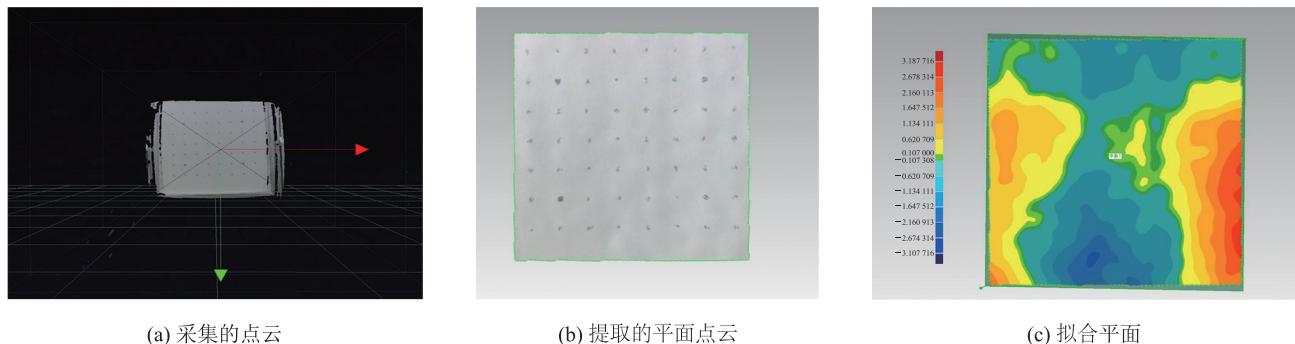


图 11 使用 SR305 扫描的过程

Fig. 11 Process using SR305 scanning

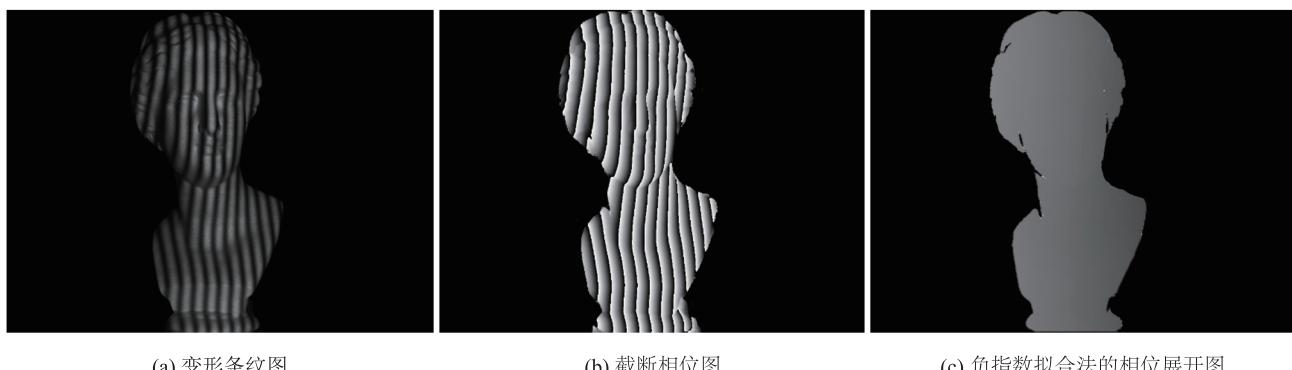


图 12 重建中解相位的过程

Fig. 12 The process of phase unwrapping in reconstruction

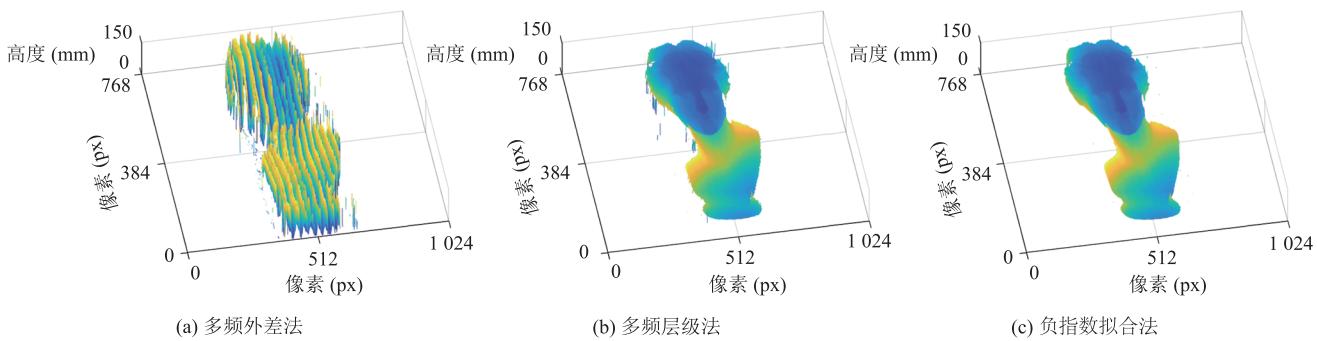


图 13 使用 3 种方法重建石膏像的深度图结果

Fig. 13 Depth map results for reconstructing plaster casts using three methods

能较好、精度较高, 而多频外差法的抗噪性能较差、精度较低。该研究结果可为研究人员解相方法的选择提供参考。

参 考 文 献

- [1] Mystakidis S. Metaverse [J]. Encyclopedia, 2022, 2(1): 486-497.
- [2] 屠大维, 兰浩, 张曦. 文物数字化三维重建技术研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 188-194.
Tu DW, Lan H, Zhang X. Digital three-dimensional reconstruction technology of cultural relics [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 188-194.
- [3] 郭俊广, 谷飞飞, 叶于平, 等. 基于双目内窥镜的散斑三维重建系统研究 [J]. 集成技术, 2022, 11(1): 13-26.
Guo JG, Gu FF, Ye YP, et al. A speckle 3D reconstruction system based on binocular endoscope [J]. Journal of Integration Technology, 2022, 11(1): 13-26.
- [4] Liu Y, Yang JC, Meng QG, et al. Stereoscopic image quality assessment method based on binocular combination saliency model [J]. Signal Processing, 2016, 125: 237-248.
- [5] Tian YL, Zhang QS, Ren ZL, et al. Multi-scale dilated convolution network based depth estimation in intelligent transportation systems [J]. IEEE Access, 2019, 7: 185179-185188.
- [6] Foix S, Alenya G, Torras C. Lock-in time-of-flight (ToF) cameras: a survey [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(9): 1917-1926.
- [7] Cai ZY, Han JG, Liu L, et al. RGB-D datasets using microsoft kinect or similar sensors: a survey [J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(3): 4313-4355.
- [8] 蒋斌, 赵子龙, 宋展, 等. 低成本微型结构光动态三维重建系统研究 [J]. 集成技术, 2020, 9(3): 1-14.
Jiang B, Zhao ZL, Song Z, et al. Low-cost and miniature structured light system for 3D dynamic reconstruction [J]. Journal of Integration Technology, 2020, 9(3): 1-14.
- [9] Carfagni M, Furferi R, Governi L, et al. Metrological and critical characterization of the Intel D415 stereo depth camera [J]. Sensors, 2019, 19(3): 489.
- [10] Cheng X, Liu XJ, Li ZW, et al. High-accuracy globally consistent surface reconstruction using fringe projection profilometry [J]. Sensors, 2019, 19(3): 668.
- [11] Yue HS, Yu Y, Chen WH, et al. Accurate three dimensional body scanning system based on structured light [J]. Optics Express, 2018, 26(22): 28544-28559.
- [12] 汤其剑, 刘欣运, 吴禹, 等. 数字散斑三维重建中散斑特性分析 [J]. 中国激光, 2018, 45(10): 174-181.
Tang QJ, Liu XY, Wu Y, et al. Analysis of speckle characteristics in three-dimensional reconstruction based on digital speckle [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 174-181.
- [13] Vo M, Narasimhan SG, Sheikh Y. Texture

- illumination separation for single-shot structured light reconstruction [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 38(2): 390-404.
- [14] Falcao G, Hurtos N, Massich J. Plane-based calibration of a projector-camera system [J]. *VIBOT Master*, 2008, 9(1): 1-12.
- [15] Lv SS, Jiang MS, Su CH, et al. Flexible calibration method of an FPP system based on a geometrical model and NLSM with fewer parameters [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): A7-A12.
- [16] Lu J, Mo R, Sun HB, et al. Flexible calibration of phase-to-height conversion in fringe projection profilometry [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(23): 6381-6388.
- [17] Wang DK, Watkins C, Xie HK. MEMS mirrors for LiDAR: a review [J]. *Micromachines*, 2020, 11(5): 456.
- [18] Zhang ZH, Ma HY, Zhang SX, et al. Simple calibration of a phase-based 3D imaging system based on uneven fringe projection [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 627-629.
- [19] Feng SJ, Zuo C, Zhang L, et al. Calibration of fringe projection profilometry: a comparative review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 143: 106622.
- [20] Lv SS, Tang DW, Zhang XJ, et al. Fringe projection profilometry method with high efficiency, precision, and convenience: theoretical analysis and development [J]. *Optics Express*, 2022, 30(19): 33515-33537.
- [21] 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.
- [22] Zhang S. High-resolution, real-time 3-D shape measurement [M]. New York: State University of New York at Stony Brook, 2005.
- [23] Pei XH, Liu JY, Yang YS, et al. Phase-to-coordinates calibration for fringe projection profilometry using gaussian process regression [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-12.
- [24] Zhou WS, Su XY. A direct mapping algorithm for phase-measuring profilometry [J]. *Journal of Modern Optics*, 1994, 41(1): 89-94.
- [25] Xu J, Zhang S. Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 135: 106193.
- [26] Huang L, Chua PSK, Asundi A. Least-squares calibration method for fringe projection profilometry considering camera lens distortion [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(9): 1539-1548.
- [27] Hu Y, Chen Q, Feng SJ, et al. Microscopic fringe projection profilometry: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 135: 106192.
- [28] Zhang ZH, Huang SJ, Meng SS, et al. A simple, flexible and automatic 3D calibration method for a phase calculation-based fringe projection imaging system [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12218-12227.
- [29] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [30] Zuo C, Feng SJ, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 109: 23-59.
- [31] Zuo C, Huang L, Zhang ML, et al. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 85: 84-103.
- [32] Zhang S. Digital multiple wavelength phase shifting algorithm [C] // Proceedings of the Optical Inspection and Metrology for Non-Optics Industries, 2009: 185-195.
- [33] Tian JD, Peng X, Zhao XB, et al. A generalized temporal phase unwrapping algorithm for three-dimensional profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(4): 336-342.
- [34] Huntley JM, Saldner HO. Error-reduction methods for shape measurement by temporal phase unwrapping [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(12): 3188-3196.