

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, (?:):??

Citing format

DX ZHENG, YP YE, JP ZHAO, 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, (?:):??

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, 三维重建技术作为其中最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是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的大尺寸、高功率、价格昂贵等缺点限制了其在众多应用中的便利性。因此, 由于微机电系统振镜具有体积小、成本低、帧率高等特点, 越来越多的三维扫描系统中考虑使用它来作为投影仪投影编码结构光。但受限于只能投影单向条纹图案和存在红外激光器的散斑效应带来的噪声, 传统的基于三角测量的方法不适用。因此本文采用了相位-高度模型完成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在选择解相方法上提供参考。

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 **文献标识码** A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20221216001

Phase unwrapping error analysis of multi frequency phase-shifting sinusoidal structured light system based on micro-electro-mechanical system mirror

来稿日期: 2022-12-xx 修回日期: yyyy-mm-dd

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基金(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.

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 Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, 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 (DLP) based projectors to project coded patterns. However, the shortcomings of DLP 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 (MEMS) 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 MEMS mirror. To deal with the noise caused by the speckle effect, anti-noise performance of three time-phase unwrapping algorithms commonly used for MEMS 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 MEMS based 3D scanning systems.

Key words: Micro-electro-mechanical system mirror; Temporal phase unwrapping; Phase height model; three-dimensional reconstruction

Funding: This work is supported in part 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,以及元宇宙^[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的应用,如工业生产、文物保护数字化^[2]、医疗^[3]、影视游戏等领域。三维重建可以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。三维重建方法根据是否向物体发出信号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];而主动式三维重建有飞行时间法^[6,7]、结构光法^[8,9]和莫尔条纹法等。在其中,结构光法以其高精度、实现简单并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 Dkam 系列三维扫描相机就采用了结构光法。

结构光根据投影仪出光模式的不同,分为点结构光、线结构光、面结构光等。根据编码方法的不同,结构光技术可以分为时间编码和空间编码两种类型。时间编码,是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。时间编码方法的重建出的点云数据精度高且稠密,但不能完成实时的重建^[10,11]。常见的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就完成物体的三维点云扫描。因此这种方法的效率高,可以完成实时的动态重建,但付出的代价就是点云稀疏以及精度不够高。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],使得投影仪可以像标定相机一样标定。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，如何选择相位-高度函数要取决于相机与投影仪之间的布置方式。为了提高系统的灵活性，研究者们提出了许多广义相位高度模型^[15, 16]。三角立体模型的优点在于可以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者纵横条纹的能力，对投影设备要求比较高。相位高度模型的优点在于只需要投影仪能投影单向的条纹即可，但是一般的相位高度模型只能获得物体的高度信息，并且扫描范围受到标定范围的影响，离开了标定范围时精度容易降低。因此相位高度模型更适合用于扫描小型物体。

传统的结构光三维重建方法大多数是使用基于数字光处理（Digital Light Processing, DLP）投影仪来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。由于其重建精度高，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、中国天远公司的 FreeScan 系统等。但是数字光处理投影仪存在着体积大、速度慢、可见光对人眼有害等限制因素，在一些场景上不适用。

因此，本文使用了基于微机电系统（Micro-Electro-Mechanical System, MEMS）振镜^[17]的投影模组替代了 DLP 投影仪来搭建系统。MEMS 是将微电子技术与机械工程融合到一起的一种工业技术，它的操作范围在微米尺度内。MEMS 振镜是一种基于 MEMS 技术制作而成的微小可驱动反射镜，镜面直径通常只有几毫米。基于 MEMS 振镜的投影模组的工作原理是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。它相较于 DLP 投影仪，具有重量轻，体积小，帧率高，寿命长，生产成本较低的优点，能极大地缩小投影仪的尺寸，并使得三维扫描系统更容易集成化、使用的灵活性更高。但是基于 MEMS 振镜技术的投影模组存在由于红外激光器的散斑效应产生的噪声以及只能投影单个方向条纹图案的缺点。

目前市面上的 MEMS 结构光三维扫描相机大多数是基于双目结构光系统的，比如微视传感公司的 VS-PDN 深度相机。相比于单目结构光系统，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。因此我们采用了基于多项式的相位-高度模型^[18]替代了传统的三角立体模型来进行三维扫描，该方法对于投影仪和相机的位置没有严格的限制，并且只需要一个相机。而在相位-高度模型中，使用解包裹算法算出的相位精度对最终重建的效果有很大影响。并且由于 MEMS 振镜投影模组中红外激光器的散斑效应，会产生比较大的噪声，使得使用相位解包裹算法展开的绝对相位中产生跳跃性误差。为了减少该误差，通常采用误差补偿和条纹级次校正这两种方法。但是使用这两个方法会降低测量的速度并且建立的误差补偿机制容易受到环境和设备的变化的影响，鲁棒性较差。因此本文通过实验对三种经典的时间相位解包裹算法在 MEMS 振镜的系统中的性能进行了分析，旨在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

在过去的几十年中，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来测量物体的高度。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 是由要标定的参数组成的向量。

典型的相位模型：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，需要使得投影仪和相机的光轴保持平行、两个光轴都要垂直于参考平面，并且保证投影仪和照相机离参考平面的距离相同（如图 1）。在实际应用中存在着难以满足几何约束、在不满足特定条件下测量精度有限以及测量范围受到投影仪和相机共同覆盖的视野的限制等问题，适用范围小。

逆线性相位-高度模型：为了摆脱严格几何约束的限制，研究者提出了一种对系统中相机和投影仪摆放没有严格几何约束要求的灵活的模型^[24, 25]，如图 2。因为该模型中高度的倒数和相位差的倒数之间的关系是线性的，所以称之为逆线性相位-高度模型。在这个模型中，只要使得被测物体可以被投影仪投影到图案和并且由相机采集到，摄像机和投影仪就可以任意摆放。该模型的相位-高度关系可以用以下公式表示

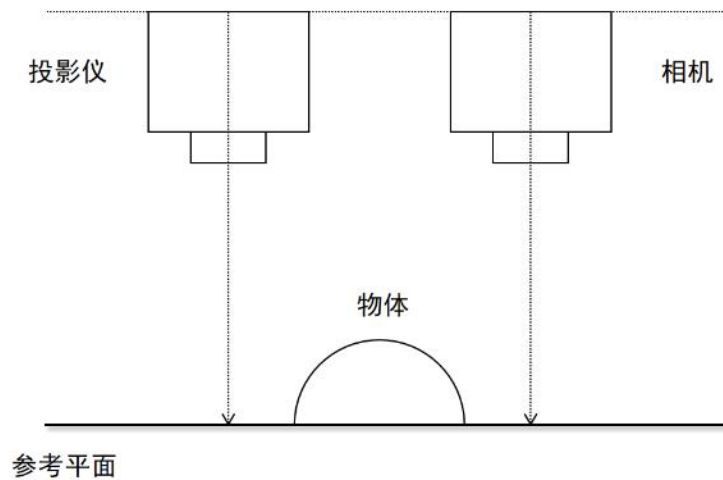


图 1 经典相位-高度模型的示意图，其中相机和投影仪的光轴是平行的

Fig. 1 Schematic diagram of the classical phase height model, where the optical axes of the camera and projector are parallel

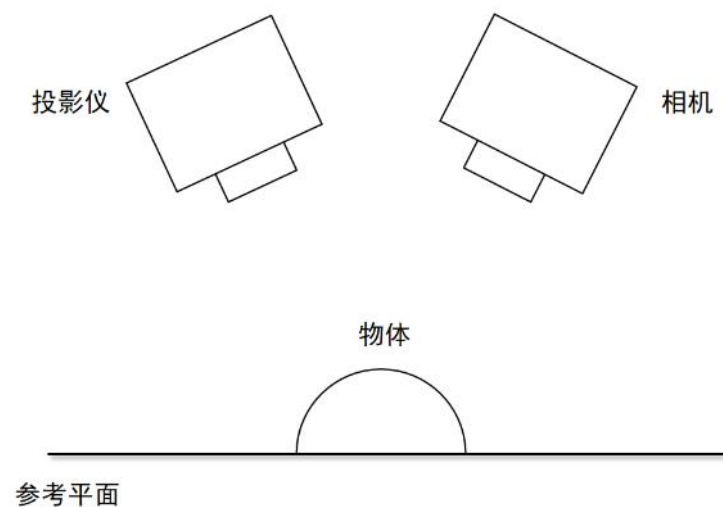


图 2 无严格几何约束的相位-高度模型示意图

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

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

其中 $\Delta\phi(x,y)$ 是相位差, $a(x,y)$ 和 $b(x,y)$ 是要标定的逐像素参数。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 $b(x,y)$ 。

通过对公式(1)重新组合, 也可以得到

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

该方程显示了高度 $h(x,y)$ 和相位差 $\Delta\phi(x,y)$ 之间的非线性关系^[26,27]。因此, 这些参数可以用非线性最小二乘法来估计。但是, 非线性拟合过程的性能取决于 (x,y) 和 $b(x,y)$ 的初始值, 这会影响算法的稳定性。

多项式相位高度模型: 为了解决这个问题, 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种非线性关系^[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, $a_i(x,y)$ 是要标定的逐像素系数。该系数通常在标定后保存, 然后在三维测量时加载。可以通过增加多项式次数来减小透镜畸变对表面重建的影响。

2.2 三维标定方法

上述的相位高度模型标定过程都需要利用精准的平移台或量块来进行, 在实际环境中实现比较复杂且困难, 而且只能获得物体的深度信息, 为了获得物体的 x 、 y 坐标的信息, 本文采用了一种利用表面带有离散圆环标记点的白色标定板来进行三维标定的方法^[28]。通过将平板放置在几个位置上, 就可以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的两种转换, 分别称为深度标定和横向标定。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, 首先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 和 4 个图像径向和切向畸变系数 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 。

深度标定利用上述的几个相位-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比较常用的两个模型。在标定过程中, 将标定板放置在测量体积的几个不同位置来进行标定。在每个位置, 正弦条纹图案被投影到标定板表面上, 通过相位计算得到每个像素的绝对相位信息。各个标记点在像素坐标系中的中心位置 $[u,v]$ 通过圆检测算法得到。得到的每个标记点的中心位置后, 可以确定所有标记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 由下式计算

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

式中, R 是表示三个旋转角度的旋转矩阵, $T = [T_x, T_y, T_z]$ 是表示三个方向线性平移的向量, $[x_w, y_w, z_w]$ 是白板上标记点 P 的坐标向量, $[u, v]$ 是 P 在像素坐标系中的坐标向量, A 是 CCD 相机的内部参数矩阵, s 是任意比例因子以及 $[]^T$ 表示转置。

利用外部参数 R 和 T 得到标定板上每个像素点的世界坐标，从而得到每个像素相对于参考平面的相对深度。因此，每个像素处的绝对相位和深度数据之间的关系可以通过前面的几个相位高度模型来建立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变形，它们之间的关系是非线性的。横向标定需要利用到从投影条纹图案获得的深度信息。因此，在每个像素位置，使用以下两个多项式来给出高精度的关系：

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

其中， a_0 ， b_0 ， c_0 ， a_1 ， b_1 ， c_1 是系统参数的系数集， $[u, v]$ 是一个点在像素坐标系中的坐标向量， x_r ， y_r ， z_r 是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来横向标定像素位置和 x 、 y 坐标之间的关系。利用相邻的离散圆环标记之间的已知间隔和所获得的深度，参考坐标系中所有像素的位置 x_r ， y_r ， z_r 可以在深度标定的过程中获得。每个像素的多项式系数可以由所获得的 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

时间相位展开算法通过使用投影设备投影多组不同频率并且带有相移的条纹，利用相机采集得到图案。利用获得的三维信息的相位初值分别对每个像素逐一进行相位计算展开。这个过程一般分为两个部分：相位主值的计算，相位展开。

3.1 相位主值的计算

只通过一张变形的条纹图像很难得到高精度的相位值，一般采用 N 步相移法来得到准确的相位^[30]。这个方法中，投影的正弦条纹的相位每间隔一个光栅周期的 $\frac{1}{N}$ 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以用以下公式表示：

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

其中， $n \in [0, N-1]$ ， $I_n(x, y)$ 是第 n 副光栅图像的光强分布； A, B 分别是背景和调制的光强度； $\phi(x, y)$ 是点 (x, y) 处的相位主值。相位主值 $\phi(x, y)$ 可以通过以下公式来计算得到：

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

因为在公式(6)中有三个未知数，所以至少需要使用三个图像也就是三步相移算法才能计算出 $\phi(x, y)$ 。这里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

由于是通过反正切函数计算得到相位主值，因此所得的相位主值都是被截断在 $(-\pi, \pi)$ 区间内的截断相位。为了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。这里我们主要选取了三种时间相位展开算法进行介绍^[31]并做了对比实验。

这三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。这两个未包裹的相位图都是通过相移算法（公式(6)）中得到的，范围在 $(-\pi, \pi)$ 。在下文中，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 （ $\lambda_h < \lambda_l$ ；下标 h 和 l 分别表示“高频”和“低频”）。对应于 ϕ_l 和 ϕ_h 的连续相位图分别表示为 Φ_l 和 Φ_h 。很容易证明，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]是由双频外差法发展而来的，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的，后来这个技术被引入到条纹投影轮廓术中，并且被证明了在解决相位不连续问题上是有用的。这种方法是将明确的相位范围扩展到两个接近频率的拍频处的合成波长。由于参考相位是从两个相位函数的包裹差产生的，这种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，

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

产生的结果与在等效波长下进行测量的结果相同

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

其中 λ_{eq} 也称为拍频合成波长。如果 $\lambda_h < \lambda_l < 2\lambda_h$ ，则等于 $\lambda_h < \lambda_l < \lambda_{eq}$ 。当适当选择 λ_h 和 λ_l 并使其间隔紧密时，合成波长可以足够大，从而可以消除相位模糊。然而，双波长算法通过牺牲其信噪比来增加明确的测量范围。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：

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

双频外差时间相位展开方法可以扩展到三个甚至更多波长，从而允许进一步增加等效波长。可以根据优化标准最大化明确的测量范围，从而得到一系列几何波长。

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,其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(因为其值不超过 $[-\pi, \pi]$ 的范围)被用作进一步相位展开的基本信息。其他相位图在原有相位图的基础上,根据它们的频率或条纹数的关系,逐个进行相位图的解包。根据公式(10),相位图(Φ_h 或 Φ_l)和包裹相位图(ϕ_h 或 ϕ_l)之间的关系可以写成

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

其中 k_h 和 k_l 是各自的整数边缘阶。在双频时间相位解包裹中,通过使用一组单位频率模式来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,也就是, $\Phi_l = \phi_l$ 。然后参考公式(10)和公式(14),可以容易地确定每个像素的条纹顺序 k_h :

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

其中, $\text{Round}[\]$ 表示获取最接近的整数值。通过这种方式,高频相位 ϕ_h 可以展开。

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 $t = s, s-1, s-2, s-4, \dots, s/2$,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)和公式(17)计算。为了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 $\phi(x, y)$,公式中均省去了位置坐标 (x, y) 。

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

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

式中: $t' = 1, 2, 4, \dots, 2^v, \dots, s/2$; $v = 0, 1, 2, \dots, \log_2(s/2)$ 。 $U\{ \}$ 代表解包裹运算,其表达式为

$$U\{\phi_1, \phi_2\} = \phi_1 - 2\pi \cdot \text{round} \left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2\pi} \right); \quad \Delta\Phi(t_1, t_2) = \Phi_{t_1} - \Phi_{t_2}。$$

直接通过 $\Delta\phi(t_1, t_2) = \phi_{t_1} - \phi_{t_2}$ 求解 $\Delta\phi(t_1, t_2)$ 会存在大的跳动误差。为了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 $\Delta\phi(t_1, t_2)$ 。采用这种方式就可将 $\Delta\phi(t_1, t_2)$ 限制在 $(-\pi, \pi)$ 这一范围。 $\Delta\phi(t_1, t_2)$ 的表达式为

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

式中: I 表示条纹的光强值, $\Delta I_{kl} = I_k - I_l$ 。利用(16)、(17)进行迭代解相的起始条件为

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

最终的迭代结果为

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

$\Phi(s)$ 为迭代的最终展开相位。为了提高最终展开相位的精度,将中间解包裹得到的结果利用起来,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 的表达式分别为

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

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

4 实验结果与分析

为了测试三种时间相位展开算法的性能，我们搭建了一个条纹投影系统（如图 3），该系统包含一个相机（FLIR Blackfly S BFS-U3-32S4C）和 12mm 的镜头，一个 MEMS 振镜投影模组(Ainsteec BM4HF585X)。相机的分辨率为 1024*768。该投影模组由波长为 854nm 的二极管激光器、鲍威尔透镜和谐振频率为 4000 Hz 的 MEMS 振镜组成，视野为 55°*55°。该系统采用的非平行关系，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。

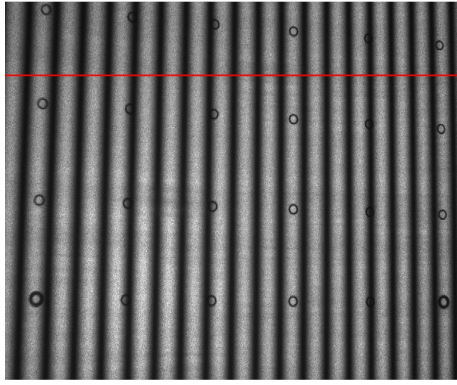
由于 MEMS 振镜投影仪模组的红外激光器散斑效应，相比于 DLP 投影仪的误差比较大。在图 4 中，我们利用相机采集这两种投影仪投影的正弦条纹图案，对比了这两种条纹图案的图像以及其中一行的像素值。可以发现 MEMS 振镜投影仪模组投影出来的图案的正弦性相比于 DLP 投影仪的效果比较差。为了减小噪声对相位计算带来的影响，我们首先对图像使用二维高斯滤波器（公式 23）进行降噪处理。处理后的图像单行像素值如图 5 所示，可以看到正弦性得到了有效的恢复。

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

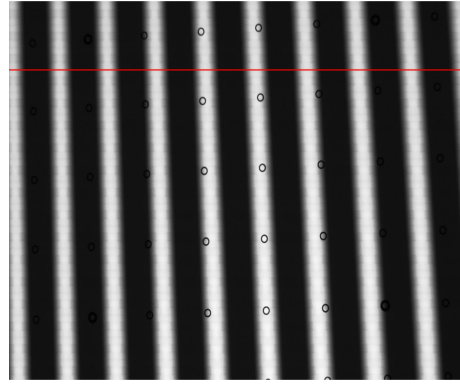


图 3、搭建的基于 MEMS 振镜的结构光三维扫描系统

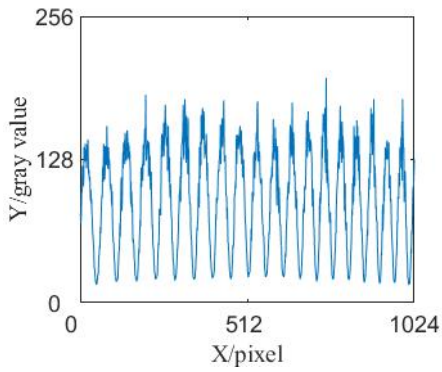
Fig. 3 Structured light 3D scanning system based on MEMS mirror



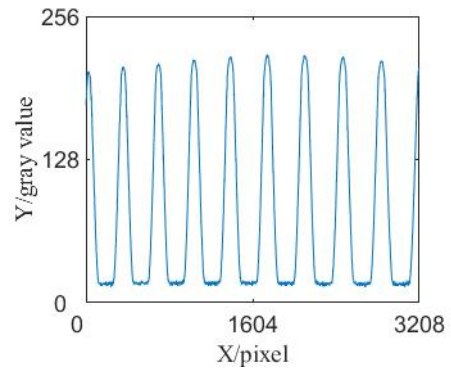
(a)MEMS 投影的正弦条纹图案



(b) DLP 投影的条纹图案



(c)MEMS 投影的正弦条纹图案中红线处像素值



(d) DLP 投影的条纹图案红线处像素值

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

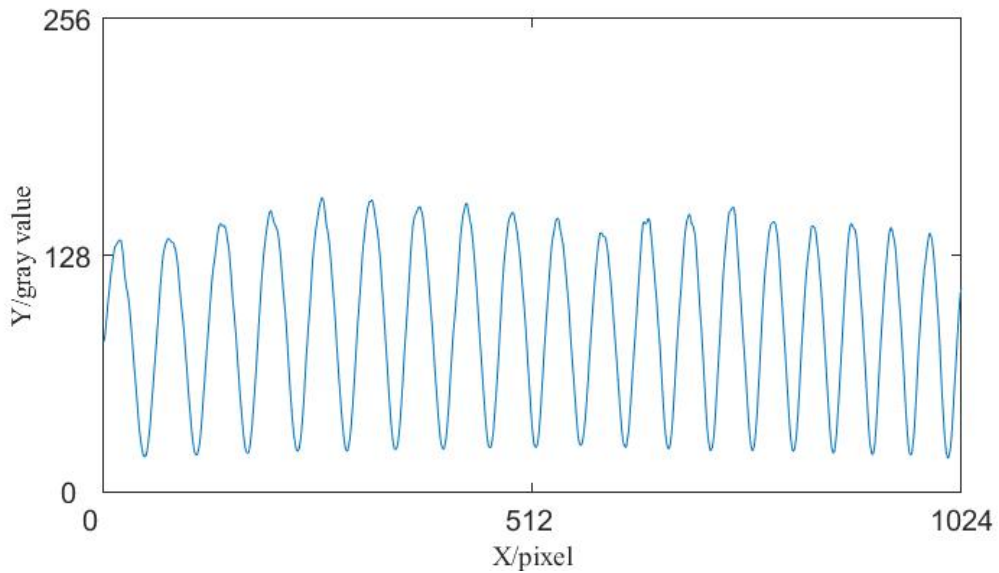


图 5、经过二维高斯滤波后 MEMS 振镜投影模组投影出来的正弦图案某一行的像素值

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

4.1 平面解相位实验分析

为了对比三种时间相位展开算法的性能，由于这三种算法对光栅条纹的频率的要求是不同的，因此设计了 3 套不同光栅条纹来完成投影的工作。多频外差法采用 70、64、59 三个频率；多频层级法采用 1、2、4、8、16、32、64 七个频率；负指数拟合法采用 64、63、62、60、56、48、32 七个频率。三套光栅条纹均采用四步相移法提取相位主值，并且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。

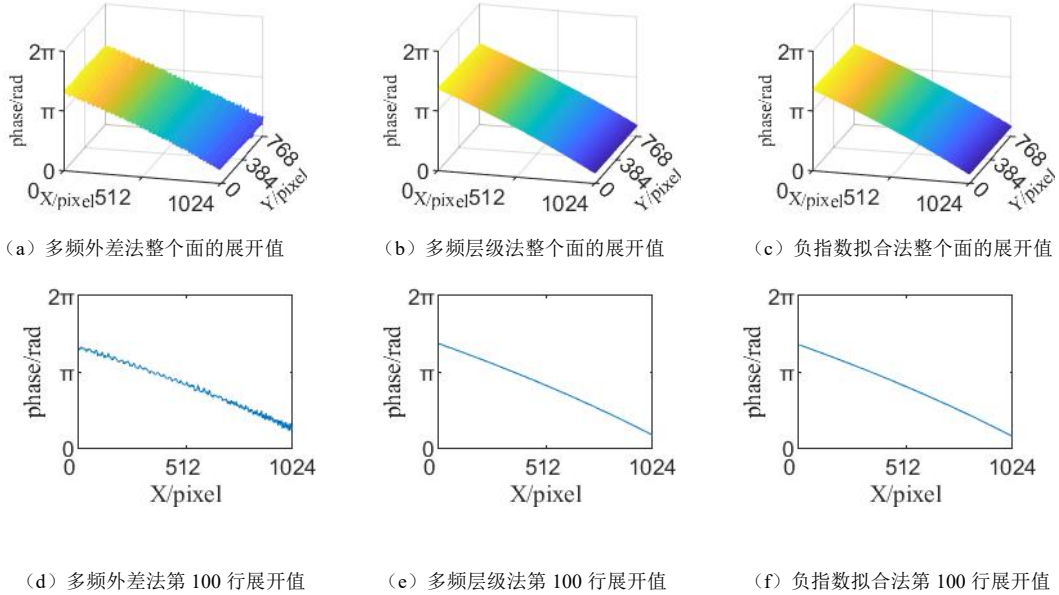


图 6、相位展开值（第一行为整个面的展开值，第二行为整个面中 100 行的展开值）

Fig. 6 Phase unwrapping value (the first line is the unwrapping value of the whole face, and the second line is the unwrapping value of 100 lines in the whole face)

从图 6 所示的相位解包裹的结果可以看出，三种算法都能达到完全解相的目的，其中，多频层级相位展开法和负指数拟合法得到的相位展开结果表面比较平滑，无明显的跳跃性误差，而多波长外差法的相位展开结果有明显的跳跃性误差。为了进一步准确比较 3 种算法的性能，对图 6 中第一行中三个方法整个面的展开值的结果进行平面拟合，得到的拟合结果如表 1 所示。

表 1 三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	0.0508	2026.72	0.9978
多频外差法	0.0718	4050.34	0.9944
负指数拟合法	0.0512	2062.69	0.9977

从表 1 的结果可以看出，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比较小，说明这两个算法的性能比较好。多频层级法和负指数拟合法相比性能接近。而多频外差法的性能较差，有明显的误差。如果需要多频外差法解包裹，需要采用各种误差补偿算法进行补偿，比较复杂。但多频外差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，因此在一些噪声小的场景下可以考虑多频外差法在提高整个系统的扫描速度的同时不降低精度，但是在噪声大的场景下就需要考虑使用多频展开法

和负指数拟合法来保证精度。

这三种方法取得不同效果的根本在于多频外差法使用拍频原理合成新的节距大的虚拟包裹相位,而多频展开法和负指数拟合法方法未使用拍频方式。由此可见,拍频是导致多频外差法容易受噪声影响从而降低精度的原因。

4.2 三维重建实验分析

为了更充分地对比三个算法的性能,本文首先基于相位高度模型完成系统的标定工作,之后采用三个算法扫描物体进行三维重建,比较它们的性能。

在标定过程中,我们设计并制造了一个包含 8x7 个离散圆环标记点的标定板(如图 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 50mm。在进行三维标定前,我们首先利用张正友标定法对系统中的 CCD 相机进行标定。之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,这样做有利于更好的提高标定的精度^[9]。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,但同时也需要花费更多的时间来完成条纹图案数据的采集和处理。本文在距离系统正前方 45cm-60cm 中每间隔约 5mm 的位置放置标定板,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,来进行三维标定。如图 8 为在标定时在某一个位置采集的一组图片。

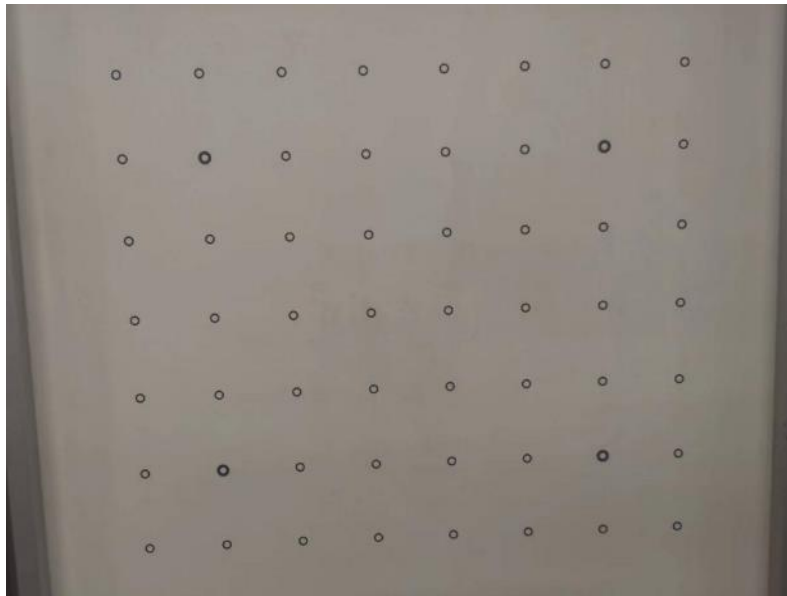


图 7、进行三维标定使用的标定板

Fig. 7 Calibration plate for 3D calibration

对于在同一位置的标定板,我们首先使用圆检测算法来得到每个圆环标记点的圆心在像素坐标系中的位置(如图 9 所示)。得到圆心的位置后,我们代入三维扫描的算法中,进行深度标定和横向标定。

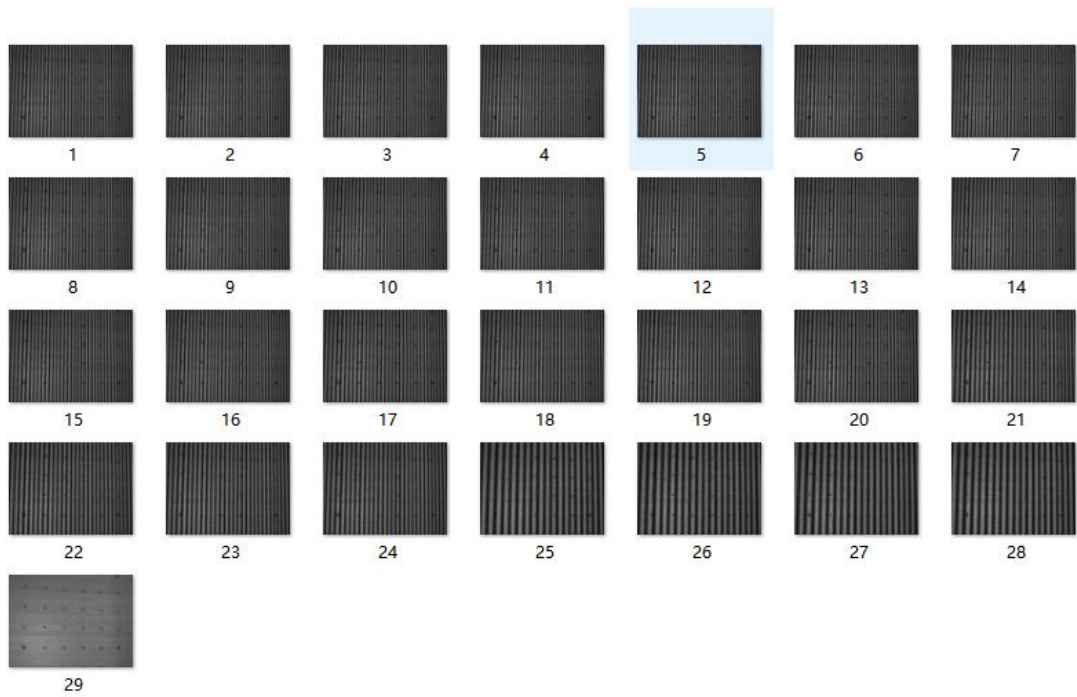


图 8、标定时在某一个位置采集的一组图片

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

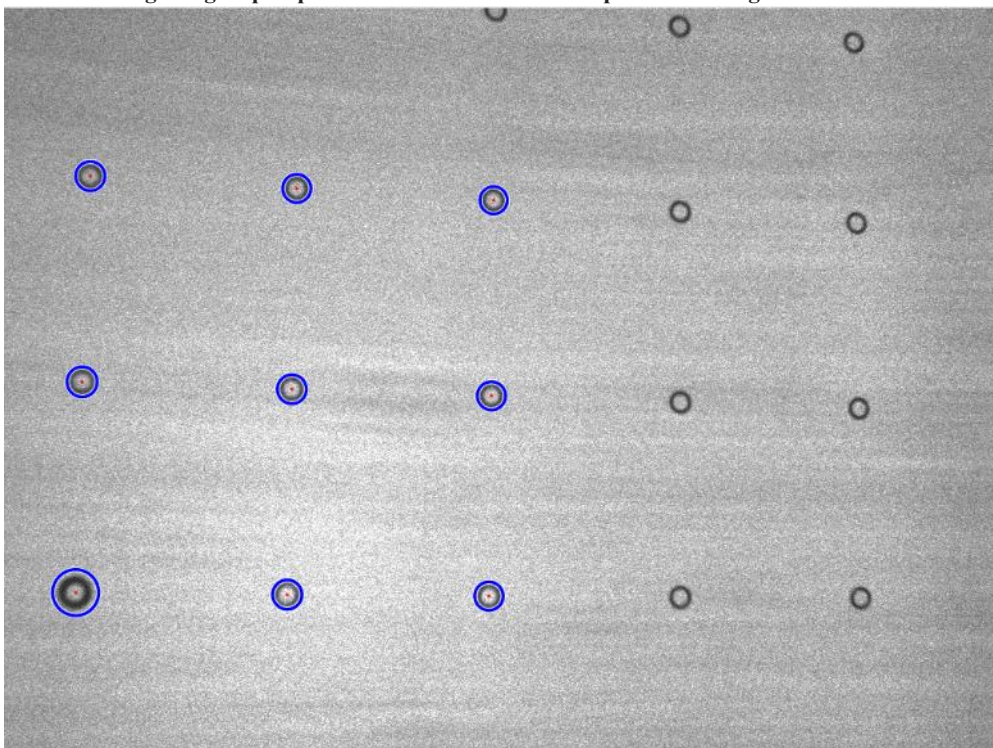


图 9、使用圆检测算法得到圆环标记点的圆心

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

完成标定后，本文分别使用了三种算法对平面进行了扫描（如图 10），同时也使用了 Intel-RealSense-SR305 进行扫描（如图 11），对比两个系统的性能。在图 11 中可以看到，多频外差法的误差过大，重建出来的结果不理想，因此主要就另外两个方法和 SR305 的扫

描平面的精度作了对比分析，如下表 2 中所示。

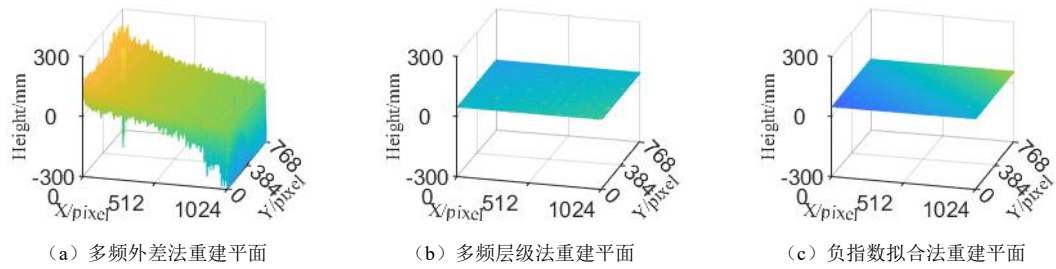


图 10、使用三个方法重建平面的结果

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

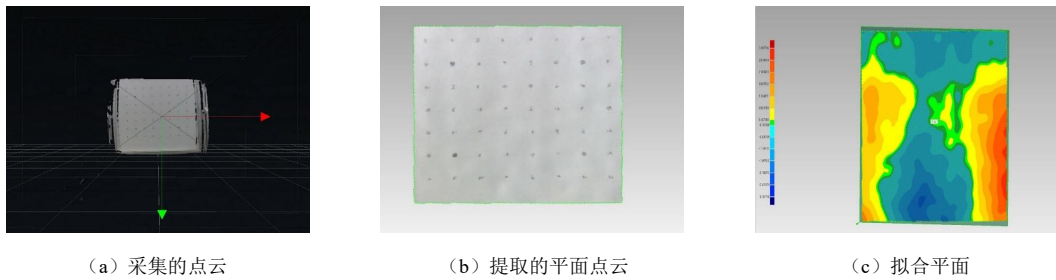


图 11、使用 SR305 扫描的过程

Fig.11 Process using SR305 scanning

表 2 多频展开法、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	0.196445
负指数拟合法	0.168121
SR305	1.004126

从上述的结果可以看出，多频层级法和负指数拟合法以及 SR305 相机均能有效地重建平面，而多频外差法由于受到噪声的影响，重建出的平面误差较大，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，可以知道，在没有采用误差补偿算法的情况下，多频层级法和负指数拟合法重建平面的精度都能达到一个比较高的水平，相比于 SR305 的精度有比较大的提升。

为了更充分地对比三个算法的性能，本文还分别使用三种算法对石膏像表面进行了三维重建，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。

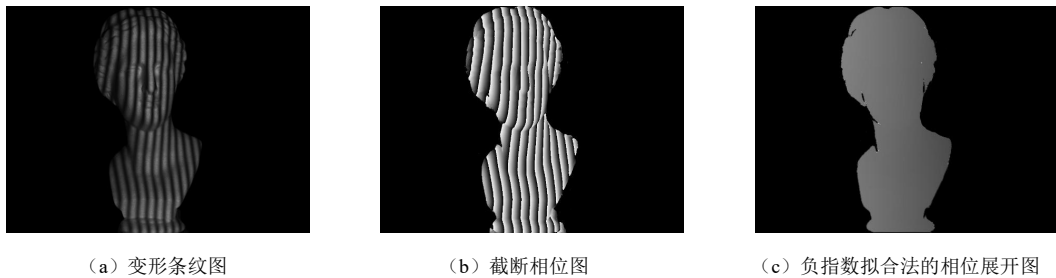


图 12、重建中解相位的过程

Fig.12 The process of phase unwrapping in reconstruction

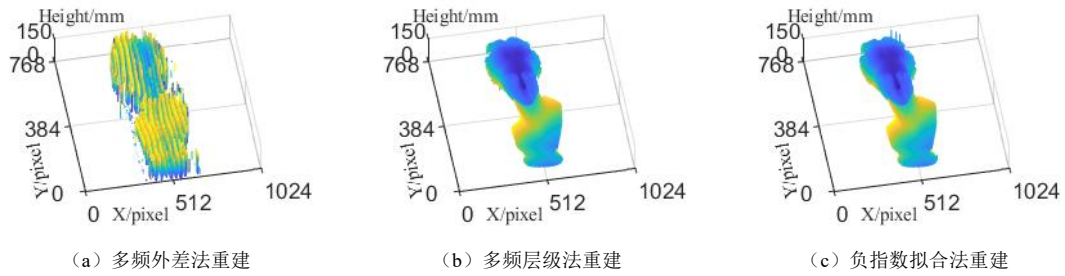


图 13、使用三个方法重建石膏像的深度图结果

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

结果同样表明，在存在噪声的情况下，使用多频外差法重建物体会产生比较大的跳跃性误差，而使用多频层级法和负指数拟合法重建物体没有明显的跳跃性误差，表面比较平滑，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。首先本文针对 MEMS 振镜的散斑效应带来的噪声这一特点，使用二维高斯滤波器进行了去噪，得到了比较好的效果；然后，通过平面解相位实验分析了三种时间相位解包裹算法的性能；最后再通过三维重建物体进一步分析三种时间相位解包裹算法的性能，并且与 Intel-RealSense-SR305 重建平面的结果做了对比。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，精度较低。该研究结果可为研究人员在选择解相方法上提供参考。

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.
Dawei T, Hao L, Xi Z. 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 J, Meng Q, et al. Stereoscopic image quality assessment method based on binocular combination saliency model [J]. Signal Processing, 2016, 125:237-248.

-
- [5] Tian Y, Zhang Q, Ren Z, 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 and Torras C. Lock-in time-of-flight (ToF) cameras: A survey [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(9): 1917-1926.
- [7] Cai Z, Han J, 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 X, Li Z, et al. High-accuracy globally consistent surface reconstruction using fringe projection profilometry [J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 668.
- [11] Yue H, Yu Y, Chen W, 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 Q, Liu X, Wu Y. 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 and Massich J. Plane-based calibration of a projector-camera system [J]. *VIBOT master*, 2008, 9(1): 1-12.
- [15] Lv S, Jiang M, Su C, 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 H, et al. Flexible calibration of phase-to-height conversion in fringe projection profilometry [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(23): 6381-6388.
- [17] Wang D, Watkins C and Xie H. MEMS mirrors for LiDAR: a review [J]. *Micromachines*, 2020, 11(5): 456.
- [18] Zhang Z, Ma H, Zhang S, 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 S, Zuo C, Zhang L, et al. Calibration of fringe projection profilometry: A comparative review [J]. *Optics and lasers in engineering*, 2021, 143 (Aug.):106622.1-106622.18.
- [20] Lv S, Tang D, Zhang X, 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, 141:106573.1-106573.10.

-
- [22] Zhang S. High-resolution, real-time 3-D shape measurement [M]. State University of New York at Stony Brook, 2005.
- [23] Pei X, Liu J, Yang Y, 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 and Su X Y. 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(Dec.):106193.1-106193.14.
- [26] Huang L, Chua P S K and 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 S, et al. Microscopic fringe projection profilometry: A review [J]. *Optics and lasers in engineering*, 2020, 135(Dec.):106192.1-106192.17.
- [28] Zhang Z, Huang S, Meng S, 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 S, 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 M, 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].*Optical Inspection and Metrology for Non-Optics Industries*. 2009, 7432: 185-195.
- [33] Tian J, Peng X, Zhao X, 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 J M and Saldner H O. Error-reduction methods for shape measurement by temporal phase unwrapping [J]. *Journal of the Optical Society of America, A. Optics, image science, and vision*, 1997, 14(12): 3188-3196.