

文章编号: 1002-1582(2026)04-0466-07

基于条纹复用的最佳三条纹动态三维测量方法

王广航, 张宗华*, 付帅, 高楠, 孟召宗
(河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401)

摘 要: 针对传统最佳三条纹相位展开方法需采集12幅相移图才能获得一帧三维重建图、测量效率低下无法适应动态场景测量的问题, 提出一种基于条纹复用的改进最佳三条纹方法。通过对条纹图的重复使用, 使方法每新增一组四步相移图即可多获得一帧三维重建图。实验验证表明, 未改进前可恢复出M帧三维重建图使用此方法后不需额外增加条纹图可恢复3M-2帧三维重建图, 并且对运动误差进行补偿, 对标准球杆进行测量, 球A半径测量的RMSE为0.0259mm, 球B半径测量的RMSE为0.0242mm。

关 键 词: 光学测量; 条纹投影; 条纹复用; 最佳三条纹; 三维重建
中图分类号: TH741 **文献标识码:** A

Dynamic three-dimensional measurement with optimal three-frequency fringe reuse

WANG Guanghang, ZHANG Zonghua*, FU Shuai, GAO Nan, MENG Zhaozong
(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: To address the issue that the traditional optimum three-frequency fringe phase unwrapping method requires 12 phase-shifted images to obtain one frame of 3D reconstruction, resulting in low measurement efficiency and inability to adapt to dynamic scene measurement, an improved optimum three-frequency method based on fringe reuse is proposed. By reusing fringe patterns, the proposed method enables obtaining one additional frame of 3D reconstruction for every newly added set of four-step phase-shifted images. Experimental verification shows that while the unimproved method can recover M frames of 3D reconstruction, the proposed method can recover 3M-2 frames without requiring additional fringe images. Furthermore, motion error is compensated, and measurements of a standard ball bar demonstrate that the RMSE for Ball A radius measurement is 0.0259 mm, and the RMSE for Ball B radius measurement is 0.0242 mm.

Keywords: optics measurement; fringe projection; fringe reuse; optimum three-frequency; 3D reconstruction

0 引 言

条纹投影轮廓术 (Fringe Projection Profilometry, FPP) 因其非接触、高精度、全场测量的优势, 在工业检测、生物医学、智能制造等领域得到广泛应用^[1-4]。根据相位计算方法不同, FPP可分为傅里叶变换轮廓术 (Fourier Transform Pro-

filometry, FTP)^[5]、相移测量轮廓术 (Phase Shifting Profilometry, PSP)^[6]以及基于深度学习的端到端方法^[7,8]。其中, 多频时间相位展开凭借测量精度高、展开范围大、可靠性强等优势, 成为高精度三维测量的主流技术^[9-11]。

然而, 传统多频方法需投射大量条纹图案, 数据采集周期长, 难以满足动态测量需求^[12]。针对

收稿日期: 2026-04-02; 收到修改稿日期: 2026-05-13

基金项目: 国家自然科学基金“叶企孙”联合基金项目

作者简介: 王广航 (2001—), 男, 硕士研究生, 从事光学三维形貌测量研究。Wanggh0719@163.com

张宗华 (1974—), 男, 教授, 博士, 从事光学三维测量、条纹投影轮廓术、相位偏折测量术等方面的研究。

* 通讯作者: zh Zhang@hebut.edu.cn

这一问题,研究者从减少图案数量和优化编码策略两方面开展了大量工作。在减少图案数量方面,Liu等^[13]提出双频法将高频与单位频率正弦分量结合,将图案数由6幅压缩至5幅。Zuo等^[14]提出3+2相移方法,通过共用背景光强减少一幅投影。Wu等^[15]进一步提出高分辨率少图方法,仅需4幅图即可实现相位展开。Zhang等^[16]提出同时确定条纹频率、相移步长和图案序列的新方法,仅用7幅图案完成测量。尽管如此,现有少图方法或在硬件上依赖高频投影仪等特殊设备,或通过缩减测量范围、降低相位展开鲁棒性来换取效率提升,难以在保持高精度与高可靠性的前提下来实现动态测量。

最佳三条纹法通过优化频率组合,在较少条纹数下实现大测量范围,具有精度高、抗噪性好的特点^[17,18]。以四步相移为例,传统最佳三条纹法需投射三个频率各四幅共12幅图,才能重建一帧三维轮廓,数据冗余度高,时间分辨率低。Zeng等^[19]提出自展开相移法,通过特殊相移设计减少对时间相位展开的依赖;An等^[20]提出改进的相移时间相位展开算法,提升了高速测量性能。然而,这些方法多从算法层面修改相位解算流程,并未重新审视已有条纹数据中未被充分利用的条纹信息。换言之,在每轮采集的12幅条纹图中,不同频率、不同相移步之间的图存在复用潜力,若能对已有数据进行重组,则有望在不增加投影数量的前提下提升重建帧率。

为此,本文针对最佳三条纹法条纹利用率低的问题,提出一种基于条纹复用的高效率相位展开方法。该方法不改变投影硬件与相位解算模型,仅通过对采集的条纹序列进行重组与复用,使每新增一组四步相移图即可多获得一帧三维重建图。以两组三频四步相移为例,传统方法得两帧,本文方法可得四帧,且各帧精度与传统方法相当。该方法为动态三维测量提供了更高时间采样密度的技术途径,具有良好的工程应用价值。

1 测量原理

1.1 条纹投影测量原理

条纹投影三维测量系统主要由计算机、投影仪和相机构成。其基本工作流程如下:计算机首先生成一组标准正弦条纹图,经由投影仪投射至被测物体表面;物体表面形貌调制条纹产生畸变,由相机同步采集并传回计算机;通过对畸变条纹图像进行相位解析,并结合预先标定获得的系统参数,最终可重建出物体表面的三维形貌,其原理图如图1所示。

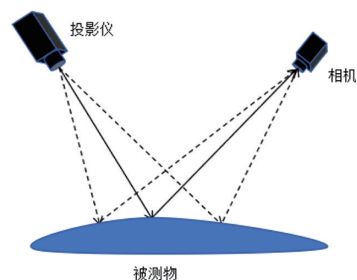


图1 条纹投影原理图

在此过程中,编码相位信息的正弦条纹光强分布可表示为

$$I_i = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) - \delta_i], \quad i = 1, 2, 3 \cdots N \quad (1)$$

式中, N 为相移步数; $\delta_i = 2\pi(i-1)/N$ 代表第 i 帧条纹图像的初始相移值。该算法因其能够实现逐像素相位计算并具备较高的测量精度,在条纹投影轮廓术中应用广泛。

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\sum_{i=0}^N I_i(x, y) \sin(\delta_i)}{\sum_{i=0}^N I_i(x, y) \cos(\delta_i)} \quad (2)$$

由式(2)求得的包裹相位 $\phi(x, y)$ 被约束在 $[-\pi, +\pi]$ 区间。在实验过程中,为了提升相位测量精度,通常需要投射并采集高频条纹图像,导致包裹相位呈周期性 2π 跃变分布。针对此问题,本文采用最佳三条纹展开法对包裹相位进行解算,得到连续分布的绝对相位。在此基础上,通过分别完成相机与系统标定,建立绝对相位与物体深度之间的映射关系,将物体表面的展开相位代入该模型后,即可实现三维形貌重建。

本质上,包裹相位呈现锯齿状的周期性分布特征,必须通过相位展开操作才能提取出包含被测物高度信息的真实绝对相位。其示意图如图2所示。

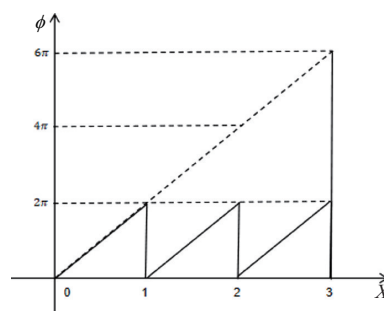


图2 相位展开示意图

图2展示了相位展开的基本原理,其核心是将锯齿状的包裹相位分布转换为连续的绝对相位分布。条纹投影测量系统中,主流的相位展开方法主要分为时间相位展开法与空间相位展开法两类。空间相位展开法通过逐像素相位展开,具有计算效率高、实现简便的特点,但其结果易受噪声和异常点

影响在表面存在陡变或不连续区域时容易失效，且展开过程中的误差会随路径累积，影响最终相位精度。与之相对，时间相位展开法采集不同频率的条纹图像，使每个像素点的相位沿时间维度独立计算，有效避免了空间路径依赖与误差累积问题，适用于梯度变化大或非连续的复杂表面形貌测量。

本研究所采用的相位展开策略基于最佳三条纹选择法。

该方法需投影仪依次投射三幅具有特定条纹数的图像，其条纹数量分别设定为 G 、 $G-1$ 与 $G-\sqrt{G}$ ，其中 G 表示最大条纹数。以 $G=9$ 为例，则其余两幅图像的条纹数分别为 8 和 6。图 3 (a) 到图 3 (c) 呈现了不同条纹数下的折叠相位图，图 3 (d) 展示了经过展开处理后的相位结果。

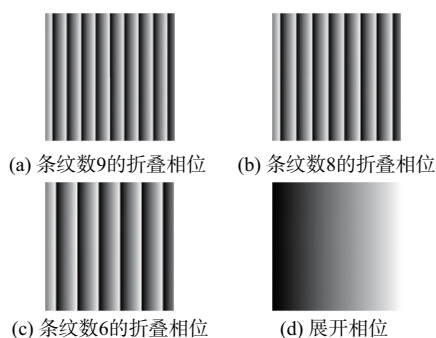


图 3 折叠相位与展开相位

具体实施步骤如下：首先，以条纹数为 9 的图像序列计算得到的折叠相位作为基准相位，将其分别与条纹数为 8 和 6 的图像序列所对应的折叠相位进行差频处理，进而逐像素求解出条纹级次。最后，基于该条纹级次对基准相位进行展开，获得连续的绝对相位分布。

1.2 条纹复用方法

本文在最佳三条纹相位展开方法的基础上，提出条纹复用策略，通过对条纹图案进行重复使用，在不增加投影帧数、不降低相位展开精度与解码速度的前提下，大幅提升有效相位展开图的输出数量，从而增强对动态测量的适应性，有效削弱运动误差对测量结果的影响。

传统最佳三条纹应用逻辑中，以投影两组独立的三条纹序列（即 6 组条纹图）为例，仅能按照“一组三频率条纹对应一幅展开相位图”的固定模式，得到 2 幅完整的相位展开结果，其条纹组合与相位输出的对应关系如图 4 (a) 所示。这种模式下，条纹图的利用率较低，每幅条纹仅参与一次相位解算，当被测物体发生快速运动时，有限的相位展开结果难以覆盖运动过程中的多帧匹配需求，易因帧间运动不匹配引入额外误差。

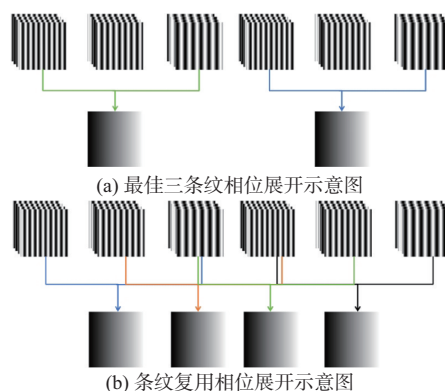


图 4 最佳三条纹与本文方法相位展开示意图

本文提出的条纹复用策略打破了这种固定的组合限制，对投影的两组最佳三条纹进行复用，重新构建出多组有效的解码组合。以频率 9、8、6 的最佳三条纹为例，通过对 6 组投影条纹进行跨组搭配，可从同样数量的投影图案中构建出 4 组满足最佳三条纹解码条件的频率组合，最终输出 4 幅独立的相位展开图，且后续每多增加一组频率的相移图即可得到一帧新的三维重建图，其复用逻辑与输出结果如图 4 (b) 所示。这种复用机制的核心优势在于，条纹图的投影总量保持不变，单幅条纹可参与多组相位解算，同时保留了最佳三条纹法在相位展开精度与解码速度上的固有优势。根据重建原理，传统方法重建 M 帧三维形貌图所需的条纹图使用本文方法可重建出 $3M-2$ 帧。

在动态测量过程中，被测物体在条纹投影期间发生运动，导致相机采集的各帧相移条纹图对应物体不同状态，引入附加相移误差。

针对该问题，本文采用 Guo 等^[21]提出的实时运动误差补偿方法，其核心思想是利用四步相移算法自身的帧间相移特性实现自补偿。该方法将四步相移图像序列 $[I_1', I_2', I_3', I_4']$ 分为两组三帧组合，将四步相移条纹拆分为两组三帧序列 $[I_1', I_2', I_3']$ 和 $[I_2', I_3', I_4']$ 计算包裹相位 ϕ_1' 与 ϕ_2' 。具体公式表示为

$$\phi_1'(x, y) = -\tan^{-1} \left[\frac{I_1'(x, y) + I_3'(x, y) - 2 \times I_2'(x, y)}{I_1'(x, y) - I_3'(x, y)} \right] \quad (3)$$

$$\phi_2'(x, y) = -\tan^{-1} \left[\frac{I_4'(x, y) - I_2'(x, y)}{2 \times I_3'(x, y) - I_4'(x, y) - I_2'(x, y)} \right] \quad (4)$$

由于运动引起的相位误差频率是投影条纹频率的两倍，两组误差的正弦分量幅值近似相等、符号相反，通过平均相位 ϕ 即可实现误差相互抵消，表示为

$$\phi_c(x,y)=[\phi'_1(x,y)+\phi'_2(x,y)]/2 \quad (5)$$

该方法无需额外投影图案或运动估计。将其与本文条纹复用策略相结合,对每新采集到的四帧图像按上述分组方式计算补偿相位,再通过本文方法获得绝对相位,可在提升重建帧数的同时保证动态测量精度。

以144、143、132三组频率的四步相移为例,流程图如图5所示。

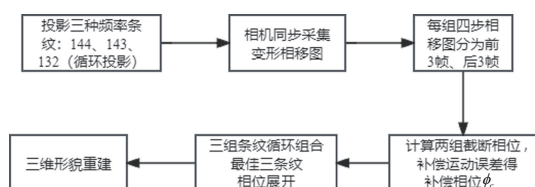


图5 本文方法流程图

第一步、将144、143、132三组四步相移图由投影仪循环投影到被测物体表面。相机同步记录受物体面形调制的变形条纹序列。

第二步、将每组频率的四步相移条纹 $[I_1, I_2, I_3, I_4]$ 按照前三帧和后3帧的分组方式分为两组: $[I_1, I_2, I_3]$ 和 $[I_2, I_3, I_4]$ 。在计算了两个截断相位 ϕ_1 和 ϕ_2 后,最终得到补偿运动相位误差的相位 ϕ_c ,将每个频率的四步相移图都进行如此操作。

第三步、对得到的折叠相位进行最佳三条纹相位展开,以两组条纹图[144、143、132、144、143、132]为例,用[144、143、132]得到第一帧展开相位,[143、132、144]得到第二帧展开相位,[132、144、143]得到第三帧展开相位,[144、143、132]得到第四帧展开相位,此后每得到一帧折叠相位,都可以获得一帧新的展开相位。此方法加快了重建速率。

第四步、根据系统标定结果重建物体的三维形貌。

2 仿真实验

对此方法进行仿真实验,使用matlab生成一半椭球体如图6所示,投影两组频率为[144, 143, 132]的四步相移图,同时从第一幅条纹图增加

0.15rad的额外相移,并且之后每步相移图递增0.15rad,模拟物体连续运动引起的相位变化。

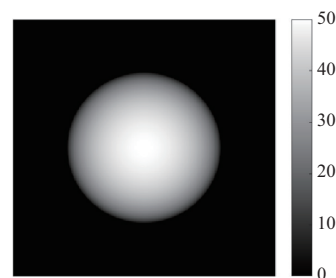


图6 仿真椭球体

图6展示的是仿真结果,图7(a)与(b)分别是未进行运动补偿时使用最佳三条纹法重建的第一帧与第二帧重建结果,并对两帧分别计算相位误差的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)分别为0.0787rad与0.0756rad。图7(c)与(d)分别是进行运动补偿后的第一帧与第二帧重建结果,其RMSE分别为0.0152rad与0.0167rad。

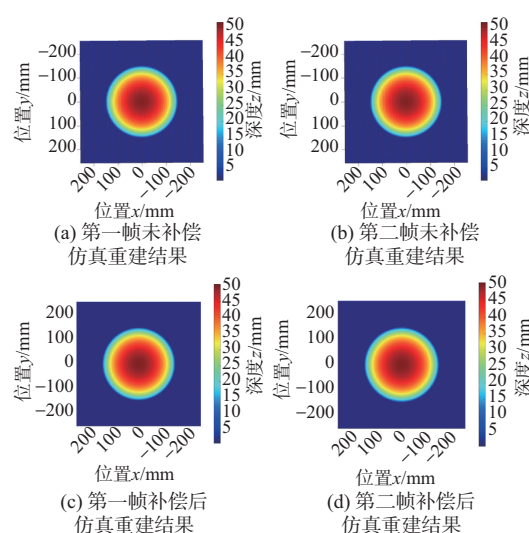
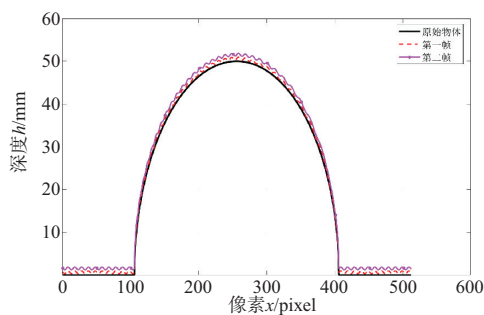
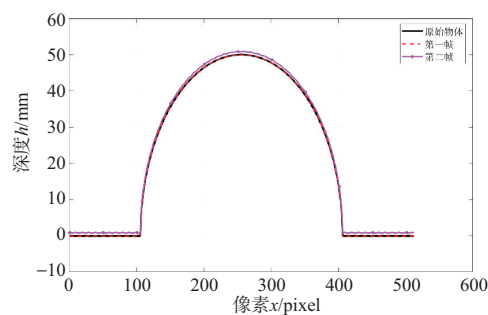


图7 最佳三条纹相位展开仿真结果

接下来对中心高度截面进行分析,结果如图8所示,其中,图8(a)为未进行运动补偿的中心高度截面图,图8(b)为进行运动补偿后的中心高度截面图。如图8可见,进行运动补偿后,运动误差得到了有效补偿,跳变得到有效缓解。



(a) 未补偿传统方法中心高度



(b) 补偿后方法中心高度

图8 最佳三条纹中心高度截面对比图

对同一仿真物体使用提出的最佳三条纹复用的方法对两组三频四步相移图进行三维重建,重建结果如图9所示。图9(a)到(d)分别是使用本文方法重建出的未进行运动补偿的第一帧到第四帧结果,其RMSE分别为0.0787rad, 0.0742rad,

0.0721rad, 0.0756rad。图9(e)到(g)分别是进行运动补偿后的第一帧到第四帧重建结果,其RMSE分别为0.0152rad, 0.0122rad, 0.0136rad, 0.0167rad。与未进行运动补偿相比,其均方根值得到了有效降低。

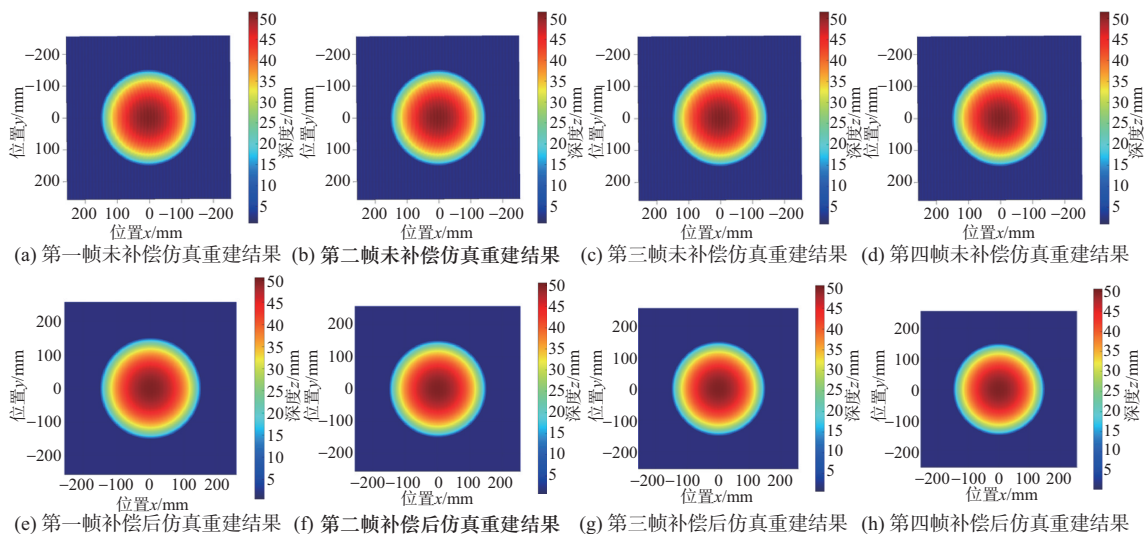


图9 本文方法未进行运动补偿的仿真重建结果

同样对恢复的四帧三维重建图的中心高度截面进行对比,结果如图10所示,图10(a)与(b)分别为补偿前后的中心高度对比。由图可知,对两组最佳三条纹的相移图使用本文方法进行重建得到的第一帧与第四帧的重建结果对应原方法的

第一帧与第二帧重建结果,本文方法的第二帧与第三帧位于原方法第一帧与第二帧中间,由此可知,本文方法可在相同条纹图数量的情况下得到更多的三维重建图,增加了采样密度。且在进行运动误差补偿后,保证重建精度。

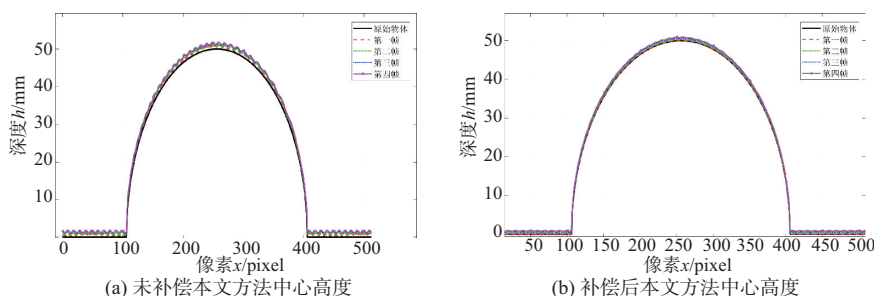


图10 本文方法仿真结果中心高度截面对比图

在动态测量过程中,由于被测物体在条纹投影期间可能发生运动,不同相移条纹对应的物体状态存在差异,从而引入一定的相位误差。对于本文提出的条纹复用方法,由于不同展开相位由连续采集的条纹序列组合得到,理论上可能存在时间不一致带来的误差影响。

然而需要指出的是,本文方法并未增加单组三条纹的采集时间跨度,且各组合均来源于相邻时刻采集的条纹图像,因此附加误差较为有限。同时,条纹复用策略在相同投影数量下可获得更多重建帧,使时间采样更加密集,有助于提高动态过程的描述能力。

在仿真实验中,通过引入逐步变化的相位扰动

以模拟物体连续运动过程,结果表明各重建帧的误差水平基本一致,说明该方法未引入显著的额外运动误差,验证了其在动态测量场景中的可行性。

3 实验验证

搭建的测量系统主要由一台彩色相机、一台彩色投影仪以及一套水平移动平台组成,具体系统如图11所示。

其中,彩色相机型号为SVS-eco 424 CVGE,分辨率为 2448×2050 像素;彩色投影仪型号为DLP® Light Crafter TM 4500,分辨率为 1280×800 像素,水平移动平台型号为GCD-203300M,分辨率为0.001mm。

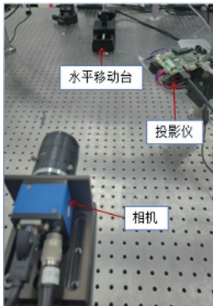


图 11 测量系统图

对一标准球杆进行测量用于精度评价，其中球 A 的半径标准值为 19.0481mm，球 B 的半径标准值为 19.0478mm,如图 12 所示。将标准球杆置于水平移动台，通过电机使水平移动台匀速向靠近相机方向运动，期间投影设备连续投影 2 组频率为 144, 143, 132 的四步相移图并且进行采集。并对其使用本文提出的方法进行三维重建。

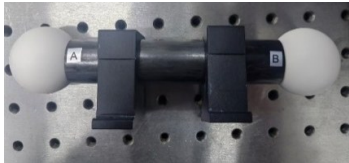


图 12 标准球杆

使用传统最佳三条纹对两组条纹图进行三维重建并且进行补偿，共重建出两帧三维重建图，其重建结果如图 13 所示。图 13 (a) 与 (b) 是补偿前的重建结果，图 13 (c) 与 (d) 为补偿后的重建结果，并且对其重建出的球面进行拟合求取半径值，具体结果如表 1 所示。

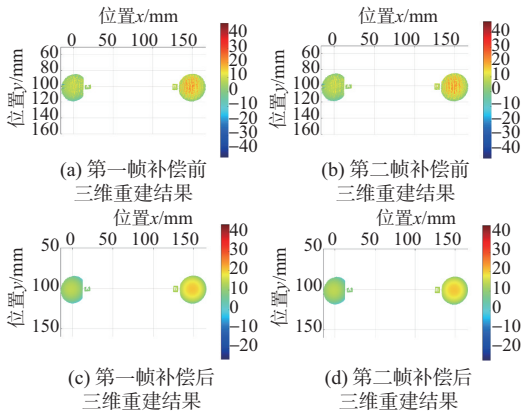


图 13 最佳三条纹法三维重建结果

表 1 传统方法补偿前后拟合半径对比(mm)

测量对象	球 A 半径	球 B 半径
真值	19.0481	19.0478
补偿前第一帧	19.1001	19.1003
补偿后第一帧	19.0739	19.0724
补偿前第二帧	19.0999	19.0903
补偿后第二帧	19.0762	19.0699

经计算，未进行运动补偿前球 A 半径的 RMSE 为 0.0519mm，球 B 半径的 RMSE 为 0.0478mm。进行运动补偿前球 A 半径的 RMSE 为 0.0270mm，球 B 半径的 RMSE 为 0.0234mm。误差显著降低。

使用本文方法并且进行运动误差补偿重建结果如图 14 (a) 到 (d) 所示并且对四帧重建结果进行球面拟合，具体结果如表 2 所示，以标准值作为真值，计算得到球 A 半径测量的 RMSE 为 0.0259mm，球 B 半径测量的 RMSE 为 0.0242mm。此数据表明，在实际测量中本文提出的方法相比于原方法不会引入额外显著误差并且在不增加条纹数量的情况下，增加了重建效率。

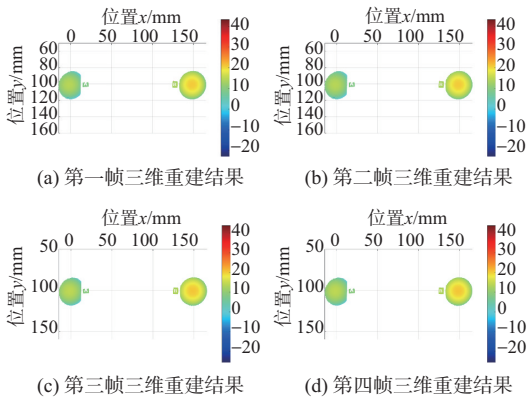


图 14 本文方法重建结果

表 2 本文方法标准球半径测量值(mm)

测量对象	球 A 半径	球 B 半径
真值	19.0481	19.0478
第一帧	19.0739	19.0724
第二帧	19.0741	19.0713
第三帧	19.0711	19.0728
第四帧	19.0762	19.0699

将上述对比实验进行整理，从重建帧数，球 A 与球 B 的半径 RMSE 几个方面进行比较，具体数据如表 3 所示。

表 3 本文方法与传统方法对比

方法	传统方法	本文方法
24 幅条纹图重建帧数	2	4
球 A 半径 RMSE/mm	0.0270	0.0259
球 B 半径 RMSE/mm	0.0234	0.0242

完成对标准球杆的精度评价实验后，接下来对一石膏模型进行重建实验。同样投影两组频率为 144、143、132 的四步相移图，期间被测物在水平移动台上进行 2mm/s 匀速运动。实用本文方法对被测物进行三维重建，结果如图 15 所示。由图可知，重建表面无明显运动误差，表面图案花纹明显。

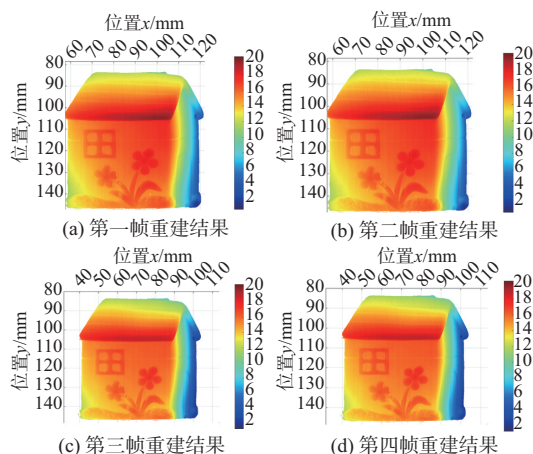


图 15 运动房子测量结果

4 结 论

本文针对传统最佳三条纹相位展开方法测量效率较低的问题,提出了一种基于条纹复用的改进方法。在不增加投影条纹数量的前提下,通过对条纹序列进行重组与复用,构建多组满足最佳三条纹约束条件的解码组合,实现了多帧相位展开结果的获取。理论分析与实验结果表明,所提方法未改变原有相位解算模型,各重建帧的误差水平基本一致,未引入显著额外误差。在相同投影条件下,传统方法可获得 N 帧三维重建结果,而本文方法可获得 $3N-2$ 帧,有效提升了三维重建效率。

通过引入匀速运动条件下的实际测量实验,验证了本文方法在动态场景中的有效性。结果表明,与传统方法相比,本文方法在不增加投影数量的前提下,将两组最佳三条纹相移图的重建帧数由2帧提升至4帧,经过运动误差补偿且测量精度保持在同一水平,证明条纹复用策略能够有效提升动态测量中的时间采样密度,同时避免引入显著额外运动误差。

参考文献:

- [1] Annanth V K, Abinash M, Rao L B. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A case study of siemens industry [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1969 (1): 012019.
- [2] 孙超, 石久烨, 王梅渊, 等. 单目线结构光三维重建系统标定方法研究[J]. 光学技术, 2024, 50(6): 698—705.
Sun Chao, Shi Jiuye, Wang Meiyuan, et al. Research on the calibration method of monocular camera line structured light three-dimensional reconstruction system[J]. Optical Technique, 2024, 50(6): 698—705.
- [3] 赵丽伟, 张宗华, 付帅, 等. 基于调整投影强度的高反光物体三维形貌测量[J]. 光学技术, 2025, 51(04): 504—512.
Zhao Liwei, Zhang Zonghua, Fu Shuai, et al. Three-dimensional shape measurement of highly reflective objects based on adjusted projection intensity[J]. Optical Technique, 2025, 51(04): 504—512.
- [4] 冯维, 汤少靖, 赵晓冬, 等. 基于自适应条纹的高反光表面三维形貌测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 119—127.
Feng Wei, Tang Shaojing, Zhao Xiaodong, et al. Three-

- dimensional shape measurement method of high-reflective surfaces based on adaptive fringe-pattern[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 119—127.
- [5] Han Yonghua, Fu Yanjun, Tian Shiyang, et al. An improved Fourier transform profilometry and phase coding for 3D shape measurement[J]. Optical Review, 2025, 32(3): 1—11.
- [6] 韦建军. 复杂刚性运动物体的高精度三维测量算法[J]. 光学技术, 2022, 48(1): 46—54.
Wei Jianjun. High-precision 3D measurement algorithm for complex rigid moving objects[J]. Optical Technique, 2022, 48 (1): 46—54.
- [7] Liu Hao, Yan Nan, Shao Bing, et al. Deep learning in fringe projection: A review[J]. Neurocomputing, 581: 127493.
- [8] Zuo Chao, Qian Jiaming, Feng Shijie, et al. Deep learning in optical metrology: A review[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(1): 39—39.
- [9] 陈松林, 赵吉宾, 夏仁波. 多频外差原理相位解包裹方法的改进[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 155—165.
Chen Songlin, Zhao Jibin, Xia Renbo. Improved multi-frequency heterodyne phase unwrapping method[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 155—165.
- [10] 韩玉, 杨延竹, 苏雪龙. 一种基于多频外差的相位解包裹方法[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2021, 47(5): 105—110+127.
Han Yu, Yang Yanzhu, Su Xuelong. A phase unwrapping method based on multi-frequency heterodyne[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2021, 47 (5): 105—110+127.
- [11] 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(08): 11—41.
Wu Zhoujie, Zhang Qican. High-speed 3D topography measurement based on fringe projection: A review[J]. Laser Optoelectronics Progress, 2023, 60(08): 11—41.
- [12] 徐珍华, 苏显渝. 一种时间相位展开算法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2008, (03): 537—540.
Xu Zhenhua, Su Xianyu. A temporal phase unwrapping algorithm[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2008, (03): 537—540.
- [13] Liu Kai, Wang Yongchang, Lau D L, et al. Dual-frequency pattern scheme for high-speed 3D shape measurement[J]. Optics Express, 2010, 18(5): 5229—5244.
- [14] Zuo Chao, Chen Qian, Gu Guohua, et al. High-speed three-dimensional profilometry for multiple objects with complex shapes[J]. Optics Express, 2012, 20(17): 19493—19510.
- [15] Wu Guanhao, Wu Yuxiang, Li Li, et al. High-resolution few-pattern method for 3D optical measurement[J]. Optics Letters, 2019, 44(14): 3602—3605.
- [16] Zhang Chunwei, Zhao Hong, Gu Feifei, et al. Phase unwrapping algorithm based on multi-frequency fringe projection and fringe background for fringe projection profilometry[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(4): 045203.
- [17] Towers C E, Towers D P, Jones J. Absolute fringe order calculation using optimised multi-frequency selection in full-field profilometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 43 (7): 788—800.
- [18] Zhang Zonghua, Towers C E, Towers D P. Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency selection[J]. Optics Express, 2006, 14(14): 6444—6455.
- [19] Zeng Janghui, Ma Wenxin, Jia Wei, et al. Self-unwrapping phase-shifting for fast and accurate 3-D shape measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1—12.
- [20] An Hongyu, Cao Yiping, Zhang Yuzhen, et al. Phase-shifting temporal phase unwrapping algorithm for high-speed fringe projection profilometry[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1—9.
- [21] Guo Wenbo, Wu Zhoujie, Zhang Qican, et al. Real-time motion-induced error compensation for 4-step phase-shifting profilometry[J]. Optics Express, 2021, 29(15): 23822—23834.