

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508421

基于等间距二值条纹的十六步相移编码方法*

高泽¹ 向黔怀¹ 吴佩悦¹ 孙成¹ 严飞^{1,2}

(1. 南京信息工程大学自动化学院 南京 210044; 2. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044)

摘要: 结构光三维测量技术广泛应用于工业检测、医疗成像等领域,其测量精度受到投影仪非线性影响而降低。针对传统相移法在非线性环境下的误差问题,特别是在与二值条纹投影技术结合时,通常需要大量条纹图案以保证测量精度,造成数据采集效率低下。围绕如何提高测量精度并减少投影幅数展开研究,提出了一种基于等间距二值条纹的十六步相移编码方法。该方法通过预先生成满足等间距分布的二值条纹图案,并将这些条纹与同一周期内的正弦强度值进行一一映射匹配,进一步采用加权叠加策略重构正弦条纹。这种创新编码方式使得每幅二值条纹不仅能够独立贡献信息,还能在十六步相移解算法中被高效重复利用,从而显著降低所需条纹图案数量,有效提升三维测量效率。在实验环节,将所提出方法与传统十六步相移法、十六步二值离焦法及十六步二进制编码法进行了定量对比。结果显示,该方法在展开相位精度方面取得了显著提升,展开相位精确率较其他3种方法分别提高了71.42%、87.17%和85.29%,表明新方法在提高测量精度和减少投影幅数方面具有显著优势。

关键词: 三维测量;二值条纹;正弦条纹;十六步相移法

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.3060

Sixteen-step phase-shifting encoding method based on equally spaced binary stripes

Gao Ze¹ Xiang Qianhuai¹ Wu Peiyue¹ Sun Cheng¹ Yan Fei^{1,2}

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Structured light 3D measurement technology is widely used in fields such as industrial inspection and medical imaging, but its measurement accuracy is often reduced due to the nonlinearity of the projector. In traditional phase-shifting methods, especially when combined with binary fringe projection techniques, a large number of fringe patterns are typically required to ensure measurement precision, which leads to low data acquisition efficiency. Focusing on how to improve measurement accuracy while reducing the number of projected patterns, this paper proposes a sixteen-step phase-shifting encoding method based on equally spaced binary fringes. The method generates binary fringe patterns with equally spaced distribution in advance, maps these patterns one-to-one to the corresponding sinusoidal intensity values within the same period, and then reconstructs the sinusoidal fringe through a weighted summation strategy. This innovative encoding approach enables each binary fringe to not only contribute information independently but also to be efficiently reused in the sixteen-step phase-shifting algorithm, thus significantly reducing the required number of fringe patterns and effectively improving 3D measurement efficiency. In the experimental section, the proposed method was quantitatively compared with the traditional sixteen-step phase-shifting method, the sixteen-step binary defocusing method, and the sixteen-step binary encoding method. The results show that, in terms of unwrapped phase accuracy, the proposed method achieved significant improvements, with the accuracy rates increasing by 71.42%, 87.17%, and 85.29% respectively compared to the other three methods, demonstrating its remarkable advantages in both enhancing measurement precision and reducing the number of projected patterns.

Keywords: 3D measurement; binary stripe; sinusoidal fringe; sixteen-step phase-shifting method

0 引言

光学三维(3D)形状测量具有非接触、非破坏性等优点,广泛影响了机器人视觉^[1]、工业监控^[2]、精密制造^[3]、生物医学^[4]等相关领域。条纹投影轮廓测量(FPP)作为一种主动三维测量技术,因其卓越的精度和高分辨率,在现有计量技术中受到越来越多的关注^[5]。典型的FPP测量系统由计算机、投影仪和相机组成。在实践中,投影仪会主动将一系列计算机生成的编码条纹图案投射到物体表面。同时,这些由表面轮廓调制的图案被相机捕获为条纹图像。接着依靠条纹解码和解包算法,从被测物体中提取相位信息。FPP中最常用的两种位相检测方法是傅里叶变换轮廓术(Fourier transform profilometry, FTP)^[6]与相移轮廓术(phase shifting profilometry, PSP)^[7]。FTP采用单帧条纹模式来计算相位信息,虽然投影图像幅数较少,但是它存在频谱泄漏问题,导致测量精度降低^[8]。相比之下,PSP不需要滤波,所以其获得的测量精度更高。

早期,PSP使用滑动可以透射正弦光的光栅来产生正弦条纹,并通过机械运动实现相移^[9]。理想正弦条纹图的优点是测量分辨率比较高,但由于需要投影至少3幅条纹图,同时相机需要同步采集至少3幅变形条纹图,为了提高三维重建速度,产生了彩色条纹投影技术^[10]。用红绿蓝3种颜色进行条纹编码,当使用三步相移法时,仅需投影并采集一幅彩色条纹图,即可完成三维形貌测量。但是在结构光测量过程中,条纹图案必须依靠数字投影仪进行投影,而典型的8 bit正弦条纹图案的投影速率受到投影仪最大切换速度的限制^[11]。此外,PSP测量系统中的投影和采集设备具有非线性强度响应,在捕获的图像中引入了不需要的强度变化。因此如果没有对投影设备进行非线性校正,那么很难采集出高质量的正弦条纹。目前已经有关于系统校正的方法,然而在实际测量过程中,所用设备的非线性强度响应可能是时变的;所以在每次测量之前都需要进行校准,在实际应用中过于繁琐复杂。

在相移轮廓测量法中,另一种解决方案是增加相移的数量来抑制非线性引起的误差,该方式不需要事先校准,但是却大大降低了测量效率并限制了高速场景的应用^[12]。为了利用更少步数的PSP实现非线性误差去除,引入多频约束来同时估计系统响应系数和绝对相位^[13]。由于该约束是通过添加不同频率的条纹来提供的,因此它不能灵活地应用于空间或码字辅助相位展开的情况。在不利用额外图案的情况下,Wang等^[14]利用投影仪的散焦特性,从二元条纹生成伪正弦条纹。Wang等^[15]将脉宽调制(PWM)技术引入到这一研究中,优化了经过投

影仪散焦后条纹的正弦性。但是在这种二值离焦投影法中,投影仪的离焦程度对测量精度有很大的影响,具体表现为离焦程度不够时,条纹中可能含有高次谐波,从而对条纹的正弦性产生影响;但是过多的离焦会使条纹对比度和相位分辨率下降,噪声的影响也会相应地增大^[16]。与上述两种方法不同,Zhu等^[17]和Zhao等^[18]将设计好的一组二值条纹以超高帧率依次聚焦和投影,相机采集后将一组二值条纹复合为一幅灰度条纹图像。利用这种二值条纹聚焦技术,可以对物体进行更加精确且快速的测量,但是依旧需要多幅二值条纹来合成一幅正弦条纹,在结合高精度的多步相移法时需要投影的图案数量会成倍增加,不利于快速高精度测量。

因此,本文提出了一种基于二值条纹的十六步相移算法。该方法聚焦投影一组等间距的二值条纹,按顺序采集后经过特定算法合成已被物体调制过的一幅正弦条纹,接着结合十六步相移算法可以进行高精度的三维重建。由于本文方法所用的二值条纹具有一定规律性,可以重复利用来合成不同相移的正弦条纹,因此仅需投影与正弦条纹数量相同的二值条纹即可完成十六步相移。实验证明,与常规的传统相移法相比,该算法投影出的条纹具有很好的正弦性,可极大地提高测量精度。同时由于本文使用的数字投影仪投影二值条纹的速度是投影正弦条纹的几十倍,因此很大程度上提高了投影的效率。

1 基本原理

1.1 二值条纹的合成策略

由于正弦条纹的光强变化具有一定的规律性,本文利用一组等间距的二值条纹来模拟其强度变换,最终合成一幅标准正弦条纹。合成策略如图1所示。

首先对一幅标准归一化的正弦条纹图进行等间隔的强度值取样,取样公式如式(1)所示。

$$Y = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \times \sin\left(\frac{n \times \pi}{M} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (1)$$

式中: Y 代表不同的取样点 n 所对应的正弦值,当横坐标每次增加 π/M 时记录对应的正弦值。由于本文在一个周期内的正弦条纹中等间隔选取16个采样点,所以取 $M=8$,也就是横坐标每次增加 $\pi/8$ 。取样点及其对应强度值如图1(a)所示。考虑到正弦条纹的对称性,只需取前8份强度值即可,这8份强度值如表1所示。

接着投影一幅黑白相间的二值条纹,每个条纹分别占8个像素点值。将该图像每次向左移动一个像素点数,一共需要移动7次,来获得8幅不同的二值条纹图。如图1(b)所示,其中黑色代表光强值为0,白色代表光强值为1,将16个像素长度视为一个周期。每幅二值条纹图像乘以一个系数 K_n ,然后叠加这8幅等间距二值条纹

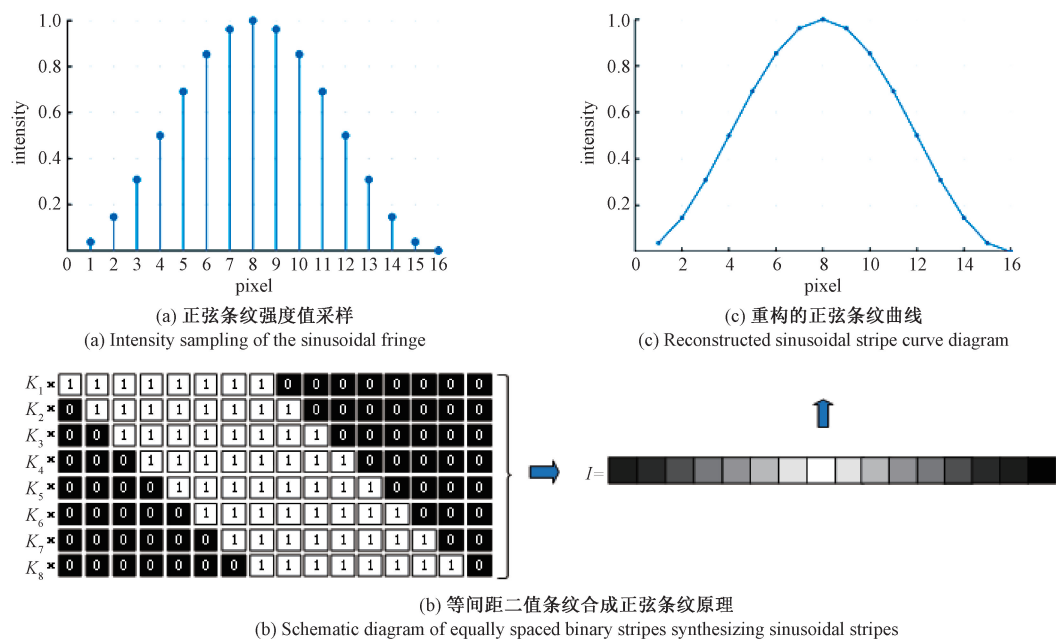


图 1 等间距的二值条纹的合成策略

Fig. 1 Synthesis strategy of equal spacing binary stripes

表 1 前半个周期的正弦条纹等分点对应的强度值

Table 1 Intensity values corresponding to each point after eight equal parts of a half-cycle sinusoidal stripe

等分点	1	2	3	4
强度值	$\frac{1}{2}\left(1+\sin\left(-\frac{3\pi}{8}\right)\right)$	$\frac{1}{2}\left(1+\sin\left(-\frac{2\pi}{8}\right)\right)$	$\frac{1}{2}\left(1+\sin\left(-\frac{\pi}{8}\right)\right)$	$\frac{1}{2}\left(1+\sin\left(\frac{0\pi}{8}\right)\right)$
等分点	5	6	7	8
强度值	$\frac{1}{2}\left(1+\sin\left(\frac{\pi}{8}\right)\right)$	$\frac{1}{2}\left(1+\sin\left(\frac{2\pi}{8}\right)\right)$	$\frac{1}{2}\left(1+\sin\left(\frac{3\pi}{8}\right)\right)$	$\frac{1}{2}\left(1+\sin\left(\frac{4\pi}{8}\right)\right)$

图得到图像 I , 该图像即为合成的正弦条纹, 其强度曲线如图 1(c) 所示。

为了计算出每幅二值图像对应系数 K_n 的具体值, 将得到图像 I 与在正弦条纹中选取的 16 个采样强度值一

一对应, 使用线性方程组的方法计算出未知系数的具体值, 由于正弦条纹的对称性只需前 8 个像素点就可以算出所需的系数, 表示为:

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \\ K_6 \\ K_7 \\ K_8 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \\ p_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\left(\sin\left(-\frac{3\pi}{8}\right) + 1\right) & \frac{1}{2}\left(\sin\left(-\frac{2\pi}{8}\right) + 1\right) & \frac{1}{2}\left(\sin\left(-\frac{\pi}{8}\right) + 1\right) & \frac{1}{2}\left(\sin\left(\frac{0\pi}{8}\right) + 1\right) & \frac{1}{2}\left(\sin\left(\frac{\pi}{8}\right) + 1\right) & \frac{1}{2}\left(\sin\left(\frac{2\pi}{8}\right) + 1\right) & \frac{1}{2}\left(\sin\left(\frac{3\pi}{8}\right) + 1\right) & \frac{1}{2}\left(\sin\left(\frac{4\pi}{8}\right) + 1\right) \end{bmatrix}$$

式 中: K_n 表示每幅图像所需乘的系数; P_n 为 1 行 8 列的矩阵。通过式(2)即可提前求出所需的 8 个系数其值如表 2 所示。

最后将具体的系数值代入式(3), 将 8 幅二值条纹图

像每个像素分别乘以对应的系数然后再相加后得到的图像 I 即为仿正弦条纹图,其中 P_n 表示第 n 幅二值条纹,示意图如图 2 所示。

$$I = \sum_{n=1}^8 K_n \cdot P_n$$

(3)

表 2 所求解 8 个系数对应的值

Table 2 Values corresponding to the 8 coefficients solved

系数	数值	系数	数值
K_1	$\frac{1}{2} \left[\sin \left(-\frac{3\pi}{8} \right) + 1 \right] - \frac{1}{2} \left[\sin \left(-\frac{4\pi}{8} \right) + 1 \right]$	K_5	$\frac{1}{2} \left[\sin \left(\frac{\pi}{8} \right) + 1 \right] - \frac{1}{2} \left[\sin \left(\frac{0\pi}{8} \right) + 1 \right]$
K_2	$\frac{1}{2} \left[\sin \left(-\frac{2\pi}{8} \right) + 1 \right] - \frac{1}{2} \left[\sin \left(-\frac{3\pi}{8} \right) + 1 \right]$	K_6	$\frac{1}{2} \left[\sin \left(\frac{2\pi}{8} \right) + 1 \right] - \frac{1}{2} \left[\sin \left(\frac{\pi}{8} \right) + 1 \right]$
K_3	$\frac{1}{2} \left[\sin \left(-\frac{\pi}{8} \right) + 1 \right] - \frac{1}{2} \left[\sin \left(-\frac{2\pi}{8} \right) + 1 \right]$	K_7	$\frac{1}{2} \left[\sin \left(\frac{3\pi}{8} \right) + 1 \right] - \frac{1}{2} \left[\sin \left(\frac{2\pi}{8} \right) + 1 \right]$
K_4	$\frac{1}{2} \left[\sin \left(\frac{0\pi}{8} \right) + 1 \right] - \frac{1}{2} \left[\sin \left(-\frac{\pi}{8} \right) + 1 \right]$	K_8	$\frac{1}{2} \left[\sin \left(\frac{4\pi}{8} \right) + 1 \right] - \frac{1}{2} \left[\sin \left(\frac{3\pi}{8} \right) + 1 \right]$

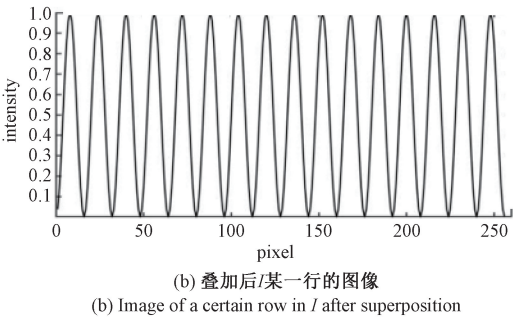
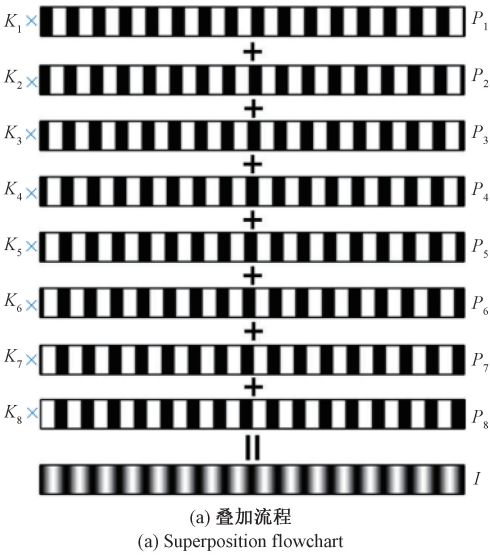


图 2 叠加方法流程

Fig. 2 Flowchart of the superposition method

1.2 等间距二值条纹的复用原理

利用上述等间距的二值条纹进行平移和叠加可以合成无线性误差的正弦条纹,因此本文结合传统多步相移法来进行三维重建。由于在相移法中需要投影不同相移的正弦条纹,而每幅正弦条纹又是通过 8 幅等间距的二值条纹生成,所以 N 步相移需要 $N \times 8$ 幅二值条纹,并且用于投影的等间距二值条纹是通过不断平移像素点来获得。虽然投影的是 1 bit 的图片,相比于直接投影 8 bit 的正弦图投影帧率更快,但是过程稍显繁琐。

经过观察可以发现,投影的黑白条纹是等间距的,即黑色条纹所占像素与白色条纹所占像素都是 8 bit,所以将该条纹平移 16 次后,之后的每一次平移都会重复循环前 16 次的条纹图案。所以本文将这些二值条纹排列成一个圆形,如图 3 所示。用一个半圆框住初始的 8 幅二

值图像,这个半圆里的二值条纹可组合为初始的正弦条纹图。在结合 N 步相移法时,为了获得不同相移的正弦条纹图,需要将半圆往顺时针方向移动 $16/N$ 幅图,一共移动 $N-1$ 次。同时根据上文所提算法组合半圆里的二值条纹就可以生成不同相移的正弦条纹图。又因为每次平移的像素点数应该是 16 的因数,所以 N 可取 4、8、16,即可用于四步、八步和十六步相移。

图 3 以十六步相移为例,前 8 幅经过叠加计算可以生成第一幅正弦条纹图。每次将这个半圆往顺时针方向移动 1 幅图并生成接下来几幅正弦图像,一共移动 15 次即可得到完整的十六步相移正弦条纹图。生成的前 8 幅正弦条纹图横截面如图 4 所示。

在相移法中,相移步数越多最后解出来的结果抗噪声效果越好,并且投影设备的灰度失真对相移的影响越

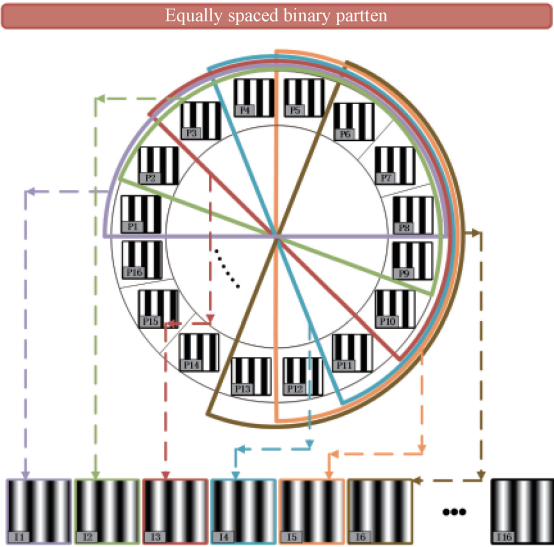


图 3 复用等间距二值条纹生成十六步相移原理

Fig. 3 Schematic diagram of 16-step phase shift generated by using equally spaced binary fringes

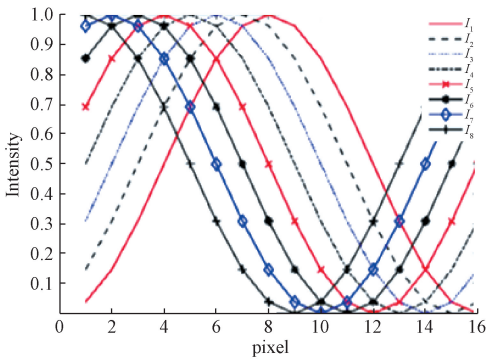


图 4 合成正弦相移的横截面示意图

Fig. 4 Cross-sectional diagram of the resultant sinusoidal phase shift

小。而在十六步相移法中往往需要投影 16 幅正弦条纹图才能计算出包裹相位,虽然解出的结果精度高,但是由于投影的灰度条纹数量太多导致投影速度太慢。经过对等间距二值条纹的重复利用,本文只需投影 16 幅二值条纹就可完成重建效果较好的十六步相移。

1.3 相移法原理

在获取三维空间坐标时,首先要从条纹图中提取出相位信息。相移法在高精度三维测量中得到了广泛的应用,与其他方法相比,它不会受到被测物体的表面形变和断裂的影响,而且可以获得更高的相位测量精度。首先,将一组相位增量相同的标准正弦光栅图像投射到待测量物体上;在此基础上,利用摄像机获取经过被测物面而产生形变的条纹图,并对其进行计算处理,最终得到相位主

值的分布。采集的 4 个相移图像的强度可以表示为:

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= I'(x, y) + I'(x, y) \cos[\varphi(x, y)] \\ I_2(x, y) &= I'(x, y) + I'(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \pi/2] \\ I_3(x, y) &= I'(x, y) + I'(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \pi] \\ I_4(x, y) &= I'(x, y) + I'(x, y) \cos[\varphi(x, y) + 3\pi/2] \end{aligned} \quad (4)$$

联立上述的 4 个方程,于是可以得到其对应相位主值为:

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin(\frac{2n\pi}{N})}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos(\frac{2n\pi}{N})} \quad (5)$$

以本文方法结合四步相移算法为例介绍相移原理,原理如图 5 所示。其中 $P_1 \sim P_{16}$ 为投影的等间距二值条纹,经过上文所提算法合成 4 幅不同相移的正弦条纹,如图 4 中的 $I_1 \sim I_4$ 所示。最后通过式(5)可求得包裹相位。

1.4 互补格雷码解包裹相位

由于使用了反正切函数来计算相位主值,得到的相位被截断在 $(-\pi, \pi]$ 中,因此也被称为截断相位。为了保证全场相位的连续性,需要对截断相位进行展开。格雷码法通过二值化确定相序,具有鲁棒性高、抗噪能力强、对高反射表面适应性强等特点,所以本文使用格雷码条纹进行解码得到条纹阶次进而获得连续相位。但是因为传统格雷码是二值条纹,其相邻两个二进制字的边界有明显的分界,这将在二值化中带来一些误差,导致相位展开失败。针对上述问题,本文利用 Zhang 等^[19]提出的互补格雷码的编码方式,即在传统格雷码编码方法的基础上多投影一幅格雷码。该方法使得码字标记为正弦周期的 1/2,利用传统码字和附加码字的不同来互补边界跳变,所以当边沿错误区域宽度小于半个条纹周期宽度时,可以避免误差。

首先设定的阈值 M ,利用式(6)将格雷码图案二值化为 0 和 1 的码字,其中 $GC_i(x, y)$ 表示第 i 幅二值格雷码图案; m 为格雷码的总幅数。接着通过式(7)计算 m 幅格雷码对应的十进制码字 V ,采用式(8)查找计算十进制码字 V 和解码码字 T 之间的关系,解出前 m 幅格雷码对应的条纹级次 T_1 ,同时额外多投一幅格雷码图案对全部 $m+1$ 幅条纹进行解码,得到对应的条纹级次 T_2 , T_2 和 T_1 级次边沿刚好错开正弦条纹的半个周期。再按照式(9)对包裹相位 $\phi(x, y)$ 进行展开,将其恢复成连续相位 $\phi(x, y)$ 。

$$GC_i(x, y) = \begin{cases} 0, & GC_i(x, y) \leq M \\ 1, & GC_i(x, y) > M \end{cases} \quad (6)$$

$$V(x, y) = \sum_{i=1}^m GC_i(x, y) \times 2^{m-i} \quad (7)$$

$$T(x, y) = i(V(x, y)) \quad (8)$$

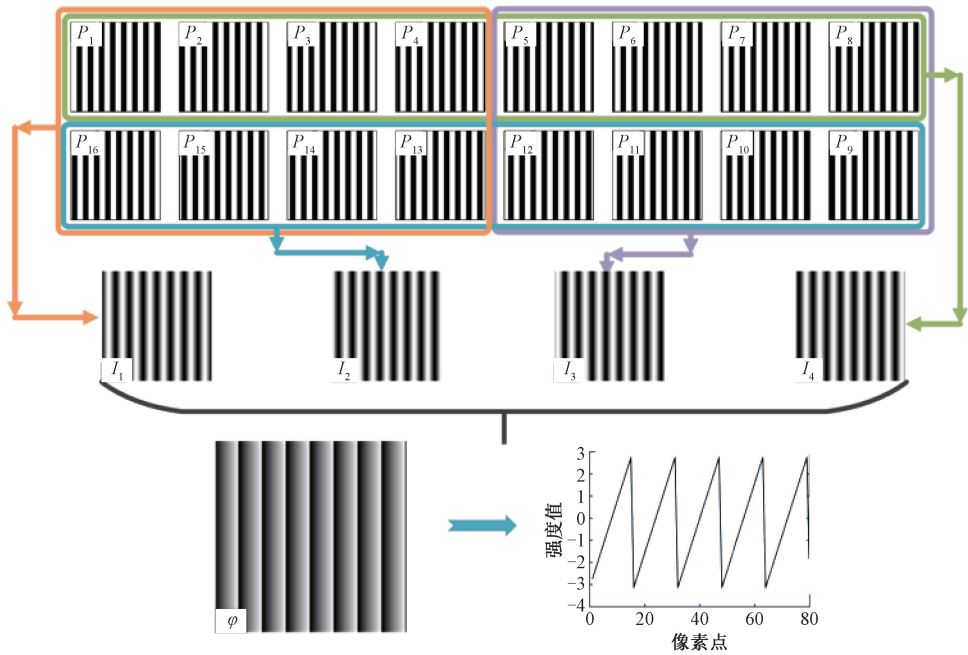


图 5 四步相移求包裹相位原理

Fig. 5 Four-step phase shift to find the wrapped phase schematic.

$$\phi(x,y) = \begin{cases} \varphi(x,y) + 2\pi T_2(x,y), & \varphi(x,y) \leq -\frac{\pi}{2} \\ \varphi(x,y) + 2\pi T_1(x,y), & -\frac{\pi}{2} < \varphi(x,y) \leq \frac{\pi}{2} \\ \varphi(x,y) + 2\pi T_2(x,y), & \frac{\pi}{2} \leq \varphi(x,y) \end{cases} \quad (9)$$

以周期为 64 的正弦条纹为例,在利用互补格雷码解包裹相位时需要 6+1 幅格雷码图片才能解出相位级次,图 6 所示为利用互补格雷码解其包裹相位原理。其中,图 6(a)为用于投影的 7 幅格雷码以及黑白条纹,图 6(b)为上述公式计算出的条纹级次 $T_1、T_2$,图 6(c)为用相移法解出的包裹相位 $\varphi(x,y)$,最后按照式(8)对包裹相位 $\varphi(x,y)$ 进行展开,将其恢复成连续相位 $\varphi(x,y)$,如图 6(d)所示。

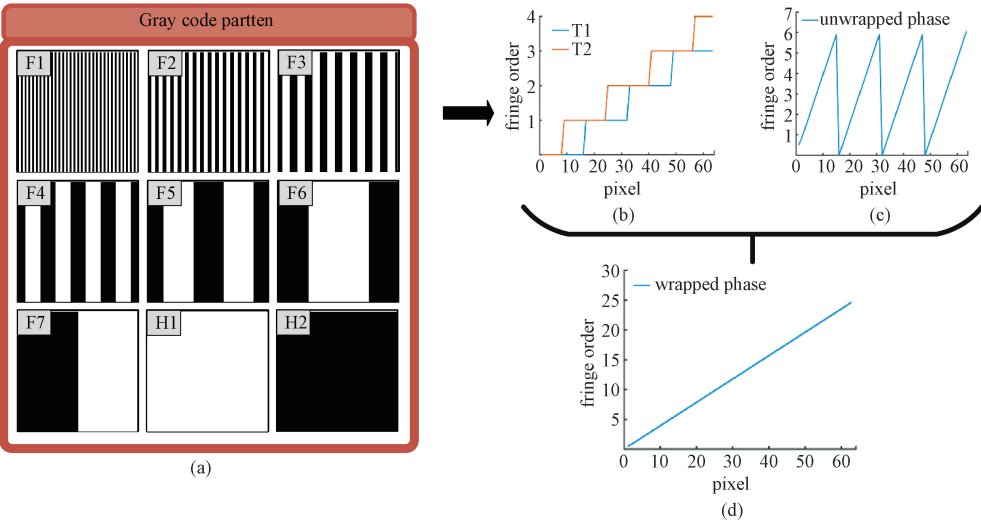


图 6 互补格雷码解相原理

Fig. 6 Schematic diagram of phase unwrapping of complementary Grey codes

2 实验与分析

为了验证本文所提方法的可行性,搭建了一个面结构光的三维测量系统,要包括一个工业相机和一个 DLP 数字投影仪。相机选用 FLIR 公司的 FL3-U3-13Y3M-C 型号的 Point Grey 工业相机,搭载焦距为 8 mm 的镜头;投影仪选用 Texas Instruments Light Crafter 4500 型号的 DLP (digital light processing) 数字投影仪,其参数如表 3、4 所示。实验采用的灰点相机具备 gamma 校正功能,因此所有实验中相机的 gamma 都设置为 1。由于投影仪的非线性校正较为复杂,在实验过程中并未对投影仪进行更改,所有实验均在投影仪相同状态下完成。由于增加相移法步数也可以在一定程度上提高测量的精度,所以将本方法结合十六步相移法^[20]使用,与传统的十六步相移进行比较,进行了相位误差分析和正弦性实验。以本方法结合十六步相移法与传统十六步相移法、二进制编码结合十六步相移法和十六步二值离焦法进行比较,进行了正弦性对比、相位误差分析、标准球精度和复杂物体重建实验。

表 3 相机和镜头的性能参数

Table 3 Performance parameters of camera and lens			
FL3-U3-13Y3M-C 灰点工业相机		康标达 M0814-MP2 工业镜头	
分辨率	1 280×1 024	焦距	8 mm
帧率	150 fps (8 bit)	光圈范围	F1.4~F1.6C
像元尺寸	4.8 μm	工作距离	0.1m~Inf
数据接口	USB3.0	图像最大尺寸	8.8 mm×6.6 mm
镜头接口	C	镜头接口	C

表 4 DLP LightCrafter 4500 主要性能参数

Table 4 Performance parameters of the camera and lens	
指标类型	参数数据
分辨率	912×1 140 pixels
帧率	120FPS@ 8 bit,4225FPS@ 1 bit
亮度	150 lm
存储	32 MB Flash,48Mbit Buffer
数据接口	USB2.0/Trigger

由于本方法叠加成的正弦条纹为 16 个像素一个周期,共 57 个周期,为了使对照更客观、更科学,所有对照实验采用的条纹周期都是 57。所有方法均采用互补格雷码方法进行相位解缠。除此之外,采集的图案亮度也必须基本保持一致,所以本文控制所有实验在黑暗处实

施,并且每次实验都将两种方法的所有投影图片依次投出、依次采集,保持投影强度和拍摄光圈相同,使得获取的条纹图案的光照强度能够基本保持一致。

2.1 正弦性对比实验

为了验证在实际测量中本文方法生成的正弦条纹是否具有很好的正弦性,在实验中本文选取汽车轮毂作为被测对象,在相同测量条件下分别使用本文方法结合十六相移法,传统十六步相移法,二进制编码结合十六步相移法和十六步二值离焦法对该对象进行测量。测量结果如图 7 所示,其中图 7(a)为不同方法的第 1 张相移图像。由于汽车轮毂为反光材质物体,所以在相同光线下相机捕获到的图像中亮度变化较大,在某些部位容易产生饱和现象。对比本文所提方法、二进制编码方法合成的正弦相移图和传统方法与二值离焦方法直接捕获的正弦相移图,可以观察到本文方法和二进制编码方法合成的条纹图整体亮度较低,在光强较大的区域拍摄到的条纹更清晰,出现饱和和光强的区域更少,正弦性更好。

分别在每种方法中选取亮度较低的区域 B1、B2、B3、B4 和较高的区域 W1、W2、W3、W4 的同一行部分像素点进行灰度正弦拟合,拟合结果如图 7(c)所示,误差分析如表 5 所示。本文方法在较暗区域拟合的灰度均方根误差(RMSE)为 0.252 1,灰度误差平方和(SSE)为 9.282 7;在较亮区域拟合的灰度 RMSE 为 1.656 1,灰度误差平方和(SSE)为 266.03。根据像素点的正弦性分布程度和误差分析可以看出本文方法投影图像的正弦性较好于其他 3 种方法,并且在光照强度小幅度变化时该二值条纹具有较好的鲁棒性。

为了更清楚地对比 4 种方法的重建结果,提取传统方法、本文方法、二进制编码方法和二值离焦方法生成的汽车轮毂绝对相位图,并分别选取 4 种方法在绝对相位图中的虚线和实线部分进行对比,如图 8 所示。其中图 8(a)分别为传统方法和本文方法生成的汽车轮毂绝对相位图,其中虚线部分反射较强,实线部分反射较弱。由于相机采集到的两部分亮度不同,所以本文以此来作为光照强度小幅度变化时的情况。图 8(b)和(c)分别为 4 种方法在实线和虚线部位的绝对相位,可以明显看出本文方法和二进制编码方法在亮度较强或较弱时都能够获得更多像素细节,因此本文方法在光照强度小幅度变化时相对于传统方法和二值离焦方法来说具有较好的鲁棒性。

表 5 条纹正弦性拟合误差结果

Table 5 Fringe sinusoidally fitting error results								
方法	传统编码方法		所提方法		二值离焦投影方法		二进制编码方法	
Region	B1	W1	B2	W2	B3	W3	B4	W4
RMSE/(灰度)	0.285 5	4.997 5	0.252 1	1.656 1	0.417 3	2.711 8	0.410 5	10.694
SSE/(灰度)	11.904	2 422.6	9.282 7	266.03	25.427	713.31	24.604	11 093

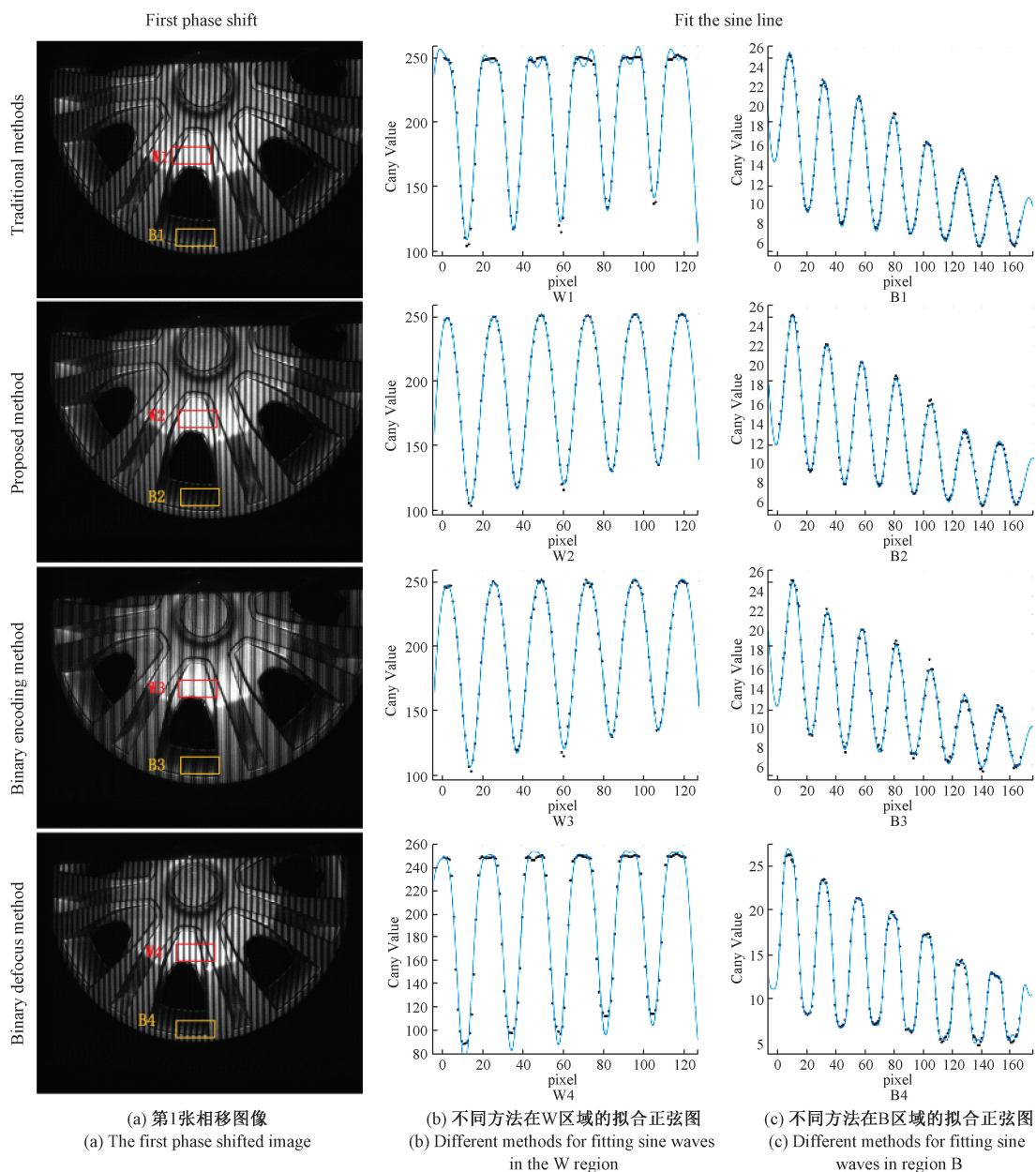


Fig. 7 The sine stripes fitted by different methods in different regions

2.2 相位误差分析实验

将白板看作一个理想的标准平面,在实验中分别采用传统十六步相移方法,十六步二进制编码方法,十六步二值离焦方法和所提出方法对白板进行投影测量,以测试本文方法在实际测量时获取条纹相位质量。重建结果如图9所示,比较4种方法最终的重建结果,可以看出这两种方法产生效果都较为可观。其中本文所提方法和二进制编码方法的第一幅相移图都是由前8幅二值图像叠加生成,由重建结果可知这两种方法均能有较好的重建效果。

接着分析相位误差,在实验中将传统三十二步相移正弦条纹计算出的相位值代替理想的包裹相位,统一由互补格雷码进行相位的解包裹得到绝对相位。取第500行像素点,将传统三十二步相移法得到的绝对相位与传统十六步相移,十六步二进制编码方法,十六步二值离焦方法和所提出方法得到的绝对相位进行比较得到相位误差,如图10所示。可以很容易看出本文方法计算得到的相位误差相小于其他3种方法。接着计算这4种方法的绝对相位的均方根误差,本文方法的均方根误差为0.001 0 rad;传统十六步相移方法得到的均方根误差为

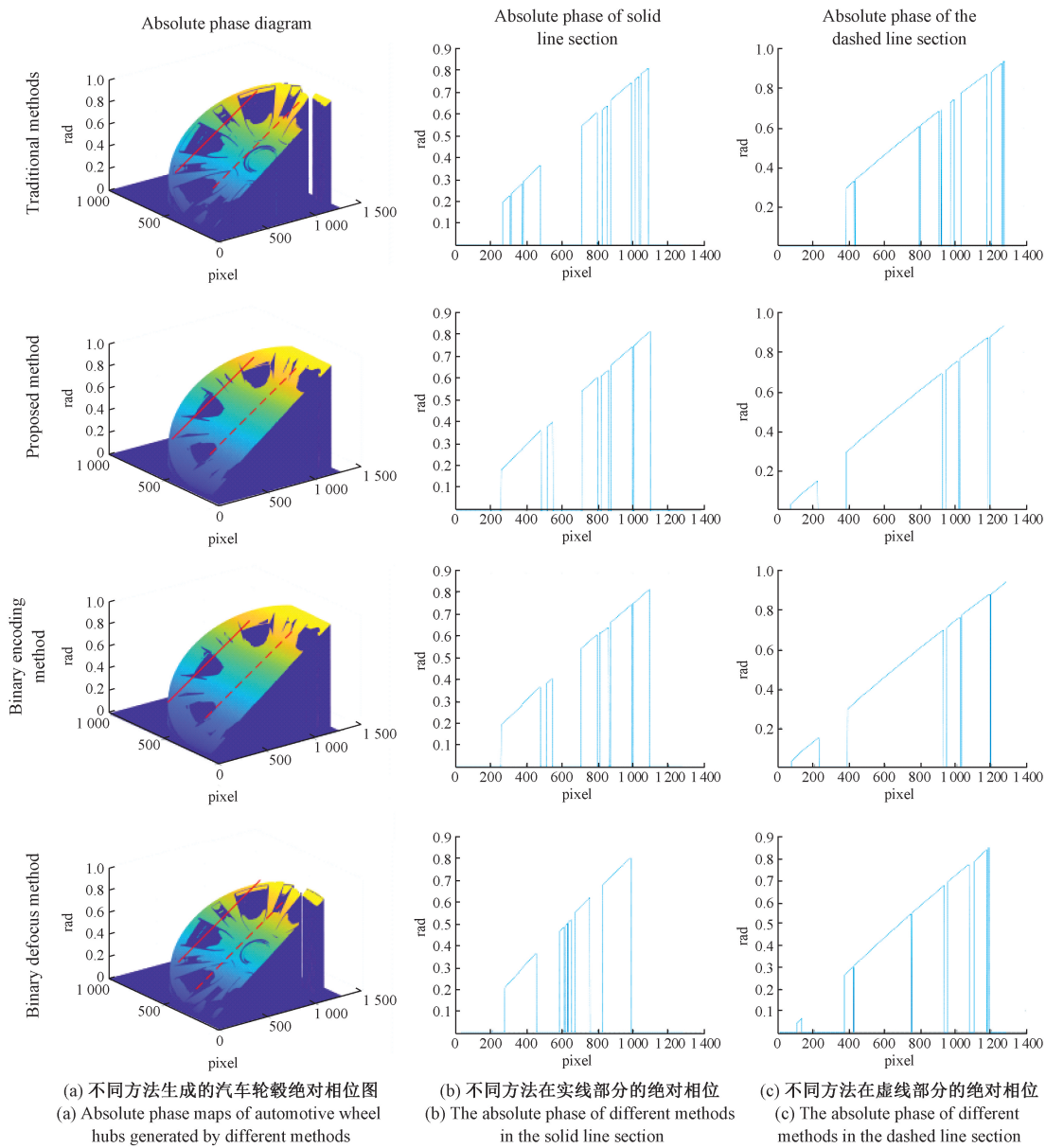


图 8 不同方法生成的汽车轮毂绝对相位图

Fig. 8 Absolute phase maps of car wheel hubs generated by different methods

0.003 5 rad;十六步二进制编码方法得到的均方根误差为 0.006 8 rad;十六步二值离焦方法得到的均方根误差为 0.007 8 rad。与传统相移法相比,本文所提方法得到的绝对相位精确率提高了 71.42%。与二进制编码方法相比,本文所提方法得到的绝对相位精确率提高了 85.29%。与二值离焦方法相比,本文所提方法得到的绝对相位精确率提高了 87.17%。因此由本文方法生成的正弦条纹具有更好的相位质量。

2.3 标准球精度对比试验

为了评估所提方法的测量精度,将本文方法与传统十六步相移法,二进制编码结合十六步相移法和十六步

二值离焦法在相同实验环境下对直径为 50.814 0 mm 的标准小球进行测量实验,对其测量结果进行球面平整度精度评价。图 11(a)分别为不同方法获得的局部点云图像,图 11(b)分别为不同方法的拟合球体,图 11(c)分别为不同方法的标准球重建结果。首先根据所获得的点云数据进行球面拟合,接着分析计算球体的直径、点云数量、标准偏差以及形状误差,精度分析如表 6 所示。所提方法,传统十六步相移法、十六步二进制编码方法及十六步二值离焦方法拟合的标准球直径分别为 50.811 5、50.700 6、50.672 9、50.701 1 mm,所提方法拟合的直径更接近实际值并且所提方法求出的点云数据要多于其他

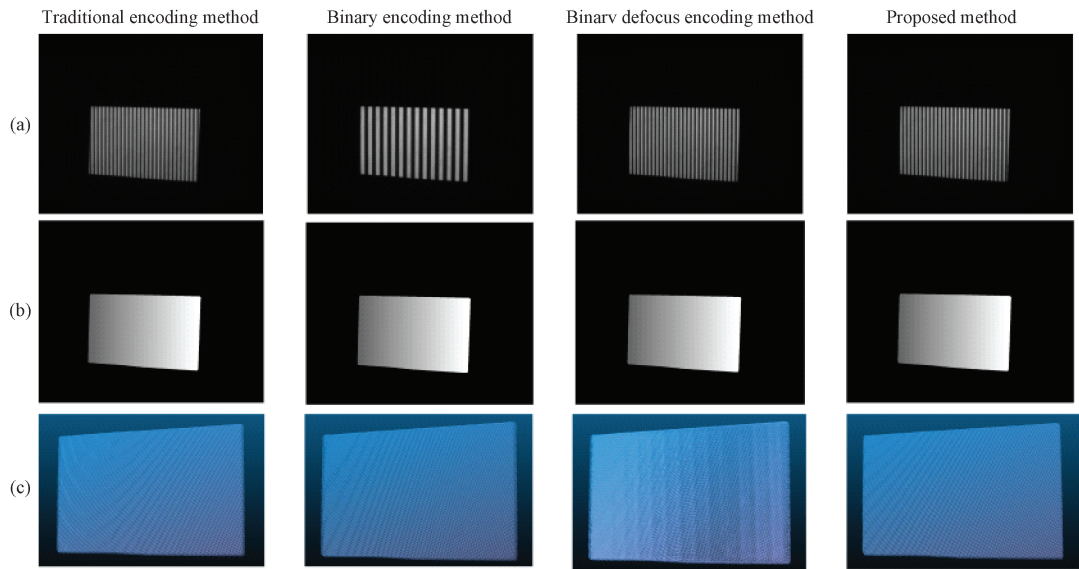


图 9 不同方法的白板重建结果

Fig. 9 Whiteboard reconstruction results of different methods

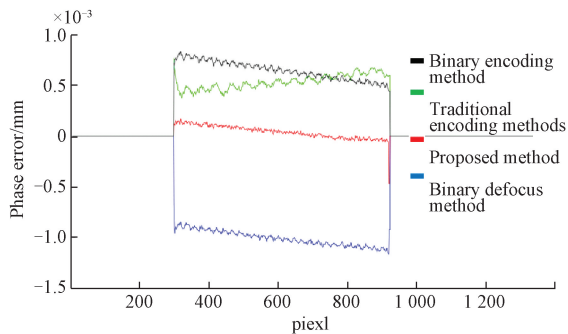


图 10 不同方法计算的绝对相位的误差

Fig. 10 Error of absolute phase calculated by different methods

3 种方法。接着比较标准误差,所提方法的标准偏差要小于其他 3 种方法。最后的形状误差 4 种方法接近。因此,本文提出的方法的测量精度要优于其他 3 种方法。

表 6 标准球拟合误差结果

Table 6 Results of the standard ball fitting error				
方法	直径/ mm	点云数量	标准偏差/ mm	形状偏差/ mm
传统编码方法	50.700 6	146 230	0.064 0	1.008 4
所提方法	50.811 5	151 630	0.061 5	0.924 0
二值离焦投影方法	50.701 1	135 797	0.093 0	1.223 7
二进制编码方法	50.672 9	149 184	0.120 8	0.891 2

为了避免实验的偶然性,本文分别使用传统方法,本文方法,二值离焦方法及二进制编码方法各自对标准小球测量了 10 次,所测的小球直径平均值分别为 50.776 2、

50.807 1、50.784 3、50.678 6 mm。实验结果表明本文提出方法测量精度要优于其他 3 种方法。与传统方法对比,本文方法因避免了投影仪的非线性影响所以其重建出的小球直径更加接近标准值。与二值离焦方法对比,因本文方法为聚焦投影,避免了离焦投影的不确定性,测量结果更优。与二进制编码方法对比,本方法采用等间距二值条纹,大幅度减少了黑白条纹之间的跳变,提高了叠加条纹的正弦性,从而提高了测量精度。

2.4 复杂物体重建试验

为了评估本文方法对复杂物体的重建效果,将其与传统相移法、二进制编码法和二值离焦法所重建的石膏物体进行对比实验。将多个石膏物体前后放置,纵深为 20 cm,增加了物体的空间复杂度。图 12(a)分别为 4 种方法的重建结果,可以发现对于最前面的物体 4 种方法重建质量相似。对于距离中间的物体,传统相移法重建的效果不够平滑明显不如其他 3 种方法。对于距离最远的物体,二值离焦方法重建的比较粗糙。图 12(b)分别为 4 种方法重建效果的放大细节图,观察放大图可知,二进制编码方法和二值离焦方法获取距离较远物体的表面较为粗糙,并且有些复杂的细节部分存在丢失的情况,传统方法在拍摄中距离物体时重建效果不够平滑。相较之下,本文方法重建物体的还原度较高且获得的重建图更加细腻。表 8 为 4 种不同方法完成一次测量所需的投影幅数,传统方法、本文所提方法和二值离焦方法只需 25 幅即可完成一次测量,而二进制编码方法需要 133 幅。本文方法较二进制编码方法大幅度减少了所需的投影幅数,且不损失测量精度。

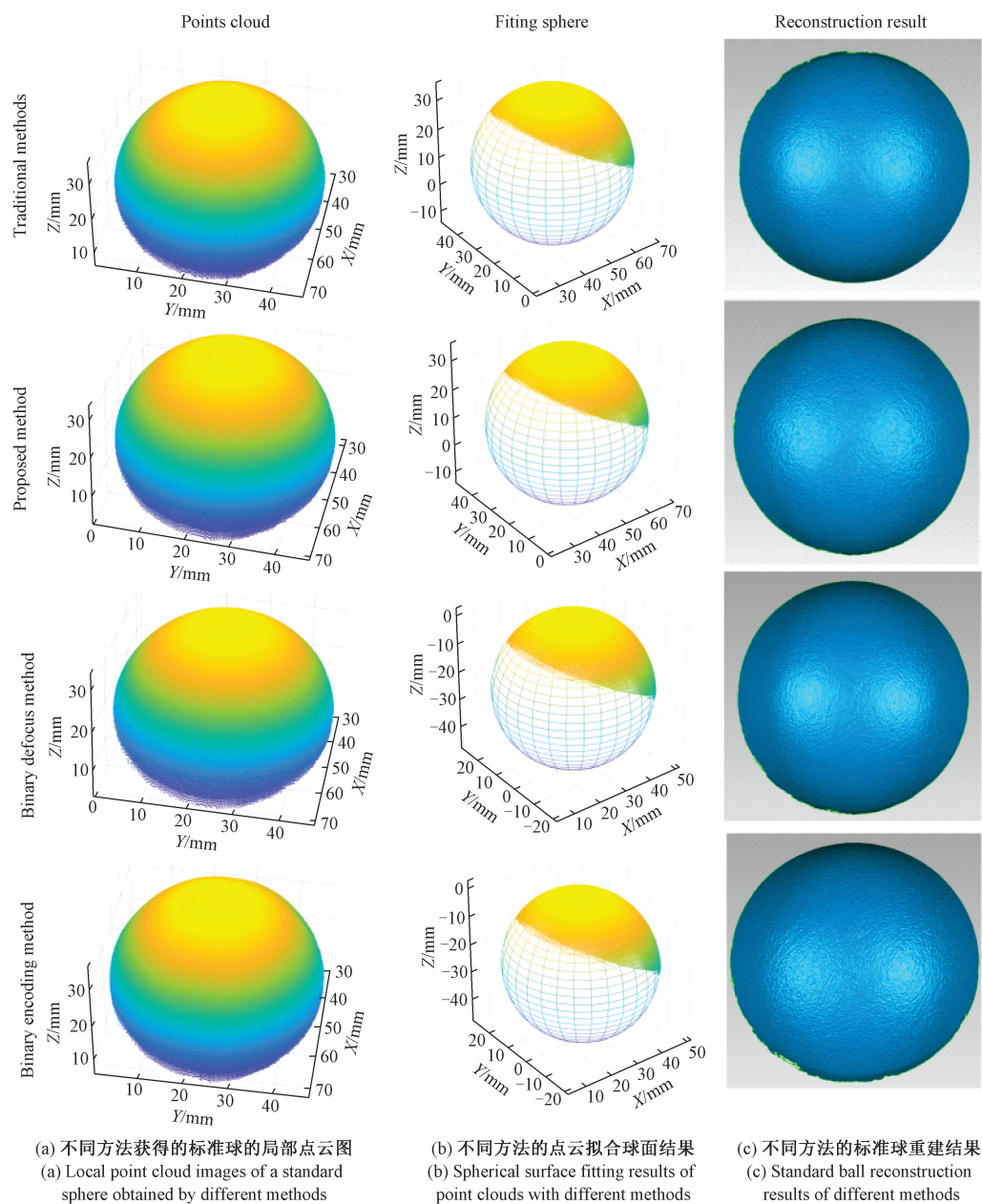


图 11 标准小球重建结果

Fig. 11 Reconstruction results of the standard ball

表 7 标准小球直径测量结果

Table 7 Measurement results of standard ball diameter

(mm)

传统编码方法		所提方法		二值离焦编码方法		二进制编码方法	
测量值	测量误差	测量值	测量误差	测量值	测量误差	测量值	测量误差
50.758 4	-0.055 6	50.811 5	-0.002 5	50.782 6	-0.031 4	50.690 8	-0.123 2
50.763 1	-0.050 9	50.803 6	-0.010 4	50.793 2	-0.020 8	50.669 1	-0.144 9
50.770 6	-0.043 4	50.798 2	-0.015 8	50.801 3	-0.012 7	50.684 5	-0.129 5
50.761 8	-0.052 2	50.808 4	-0.005 6	50.788 9	-0.025 1	50.672 8	-0.141 2
50.749 7	-0.064 3	50.816 7	0.002 7	50.799 8	-0.014 2	50.693 7	-0.120 3
50.762 3	-0.051 7	50.811 2	-0.002 8	50.785 4	-0.028 6	50.664 2	-0.149 8
50.761 0	-0.053 0	50.810 7	-0.003 3	50.794 5	-0.019 5	50.675 3	-0.138 7
50.760 2	-0.053 8	50.795 6	-0.018 4	50.796 7	-0.017 3	50.685 9	-0.128 1
50.764 5	-0.049 5	50.798 2	-0.015 8	50.778 4	-0.035 6	50.666 7	-0.147 3
50.759 9	-0.054 1	50.816 7	0.002 7	50.802 1	-0.011 9	50.682 6	-0.131 4
50.776 2	-0.052 9	50.807 1	-0.006 7	50.784 3	-0.021 7	50.678 6	-0.135 4

平均值

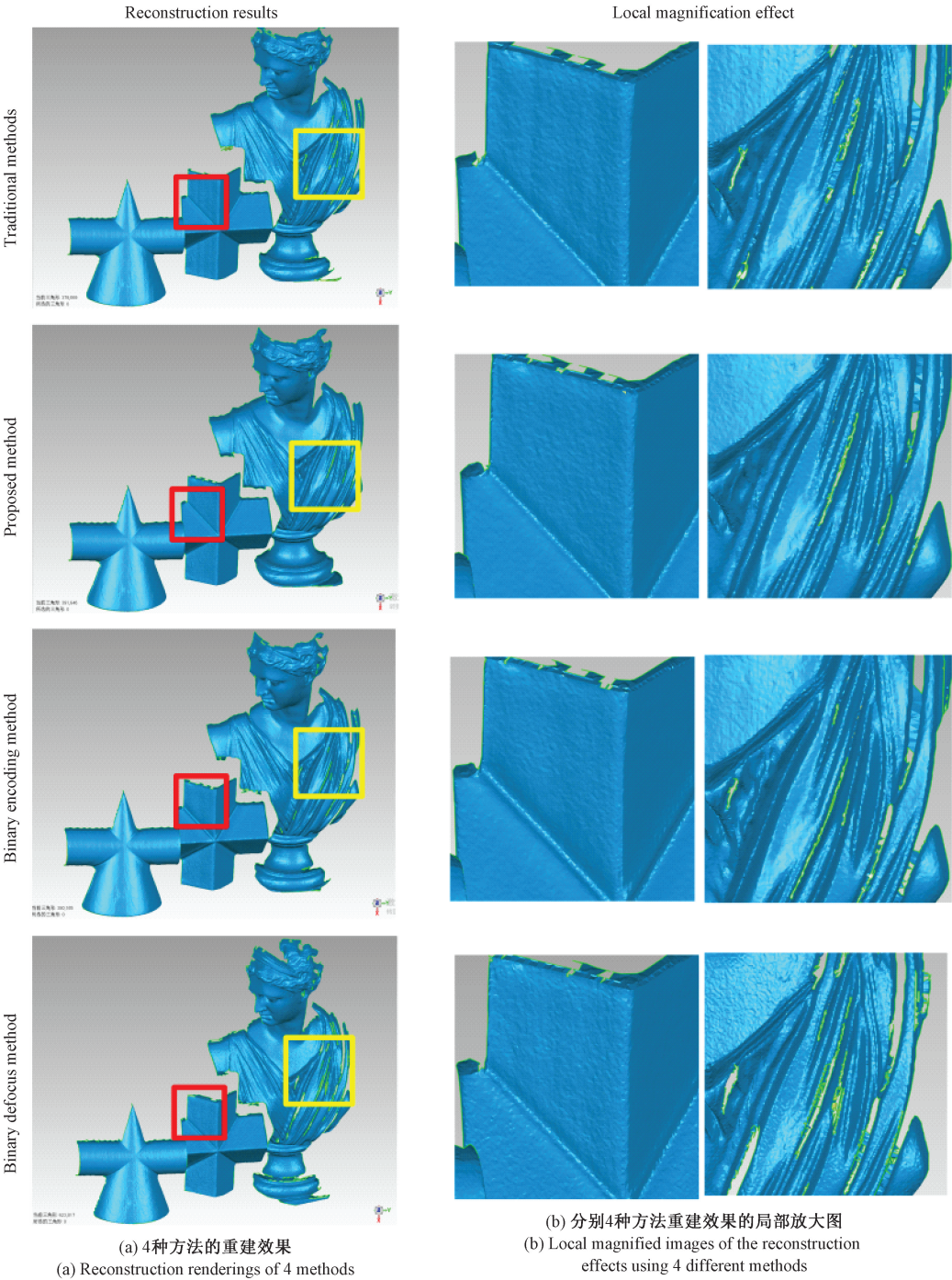


图 12 复杂物体的重建结果

Fig. 12 Reconstruction results of complex objects

表 8 不同方法所需的投影幅数

Table 8 Number of projection images required for different methods

方法	投影幅数
传统编码方法	25
本文方法	25
二值离焦投影方法	25
二进制编码方法	133

3 结 论

本文提出了一种基于等间距二值条纹的十六步相移编码方法。在结合相移法时,该方法利用所提条纹的特性重复利用了相关条纹进而减少投影的条纹幅数。本文利用互补格雷码辅助十六步相移法进行三维重建,仅需

投影 25 幅二值条纹即可完成,很大程度上提高了投影效率,并且不损失测量精度。另外由于全程投影二值条纹,避免了投影仪和摄像机对灰度图像的非线性响应带来的测量误差。本文将该方法与传统十六步相移法进行四种不同的对比实验,其获得条纹的正弦性以及物体的测量精度都优于传统十六步相移。将该方法与十六步二值离焦方法进行对比,此方法为聚焦投影,避免了离焦的不确定性,适用范围更广,且测量精度更高。将该方法与十六步二进制编码方法对比,二进制编码方法需要投影 133 幅图案而本方法只需投影 25 幅,大大降低了所需的投影幅数,且测量精度更高。此外,利用本文所提方法对光强变化不大的物体表面有较强的鲁棒性,对于景深较大的物体能捕获更多的细节。但是由于在本文方法中二值条纹要重新组合为多步相移图像,这一步算法导致处理速度减慢,所以需要进一步研究来降低该算法的繁琐程度。

参考文献

- [1] LI Y X, QIAN J M, FENG S J, et al. Deep-learning-enabled dual-frequency composite fringe projection profilometry for single-shot absolute 3D shape measurement [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2022, 5(5):210021.
- [2] XU J, ZHANG S. Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 135(6):106193.
- [3] 刘今越, 刘佳斌, 郭志红, 等. 一种基于面结构光的刀具三维测量系统 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(12):1884-1891.
LIU J Y, LIU J B, GUO ZH H, et al. A tool 3D measurement system based on surface structured light [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(12): 1884-1891.
- [4] 严飞, 孙成, 吴佩悦, 等. 一种二值编码结合误差扩散算法的三维测量方法 [J]. *光学学报*, 2023, 43(22):2212001.
YAN F, SUN CH, WU P Y, et al. A three-dimensional measurement method based on binary coding combined with error diffusion algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(22):2212001.
- [5] 王建华, 杨延西, 徐鹏, 等. 基于双 2+1 相移法的高动态范围三维测量 [J]. *光学学报*, 2023, 43(20):2012001.
WANG J H, YANG Y X, XU P, et al. High dynamic range 3D measurement based on double 2 + 1 phase shifting method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(20): 2012001.
- [6] LIU Y K, X. SU X Y, ZHANG Q C. A novel encoded-phase technique for phase measuring profilometry [J]. *Optics Express*, 2011, 19(15): 14137 - 14144.
- [7] 郑小钰, 董祉序, 杨赫然, 等. 基于结构光测量技术的 DMD 自适应掩膜生成 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(7):148-155.
ZHENG X Y, DONG ZH X, YANG H R, et al. Adaptive mask generation of DMD based on structured light measurement technology [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37 (7): 148-155.
- [8] CHEN L C, HO H W, NGUYEN X L. Fourier transform profilometry (FTP) using an innovative band-pass filter for accurate 3-D surface reconstruction [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48 (2):182-190.
- [9] KIRSCHNER V, SCHREIBER W, KOWARSCHIK R M, et al. Self-calibrating shape-measuring system based on fringe projection [C]. *SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1997:5-13.
- [10] CHEN K, XI J, YU Y, et al. Three-dimensional measurement of object surfaces with complex shape and color distribution based on projection of color fringe pattern [J]. *Applied Optics*, 2013, 52 (30): 7360-7366.
- [11] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1987, 3: 323-344.
- [12] YANG Y, HOU Q, LI Y, et al. Phase error compensation based on tree-net using deep learning [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 143(1):106628.
- [13] SONG H, KONG L. Mask information-based gamma correction in fringe projection profilometry [J]. *Optics Express*, 2023, 31(12):19478 - 19490.
- [14] WANG Y, ZHANG S. Three-dimensional shape measurement with binary dithered patterns [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(27):6631-6636.
- [15] WANG Y J, ZHANG S. Superfast multifrequency phase-shifting technique with optimal pulse width modulation [J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 5149-5155.
- [16] KANG X, YIN Z, DONG S, et al. Determination of optimal binary defocusing based on digital correlation for fringe projection profilometry [J]. *Optik*, 2023, 272:170263.
- [17] ZHU J, ZHOU P, SU X, et al. Accurate and fast 3D surface measurement with temporal-spatial binary encoding structured illumination [J]. *Optics Express*, 2016, 24(25):28549.
- [18] ZHAO H, DIAO X, JIANG H et al. High-speed triangular pattern phase-shifting 3D measurement based on the motion blur method [J]. *Optics Express*, 2017,

25(8):9171.

[19] 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):78-90.
ZHANG Q C, WU ZH J. Structured light 3D imaging technology based on Gray code pattern projection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3):78-90.

[20] 王中兴. 基于十六步相移技术的高精度三维重建系统[J]. 软件导刊, 2021, 20(5):108-113.
WANG ZH X. Three-dimensional reconstruction system based on 16 step phase-shifting technology[J]. Software Guide, 2021, 20(5):108-113.

作者简介



高泽,2022 年于南京航空航天大学金城学院获得学士学位,现为南京信息工程大学硕士研究生,主要研究方向为结构光三维测量。

E-mail: 1021094786@qq.com

Gao Ze obtained his B. Sc. degree from

Jincheng College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2022. He is now a M. Sc. candidate at Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interest includes structured light 3D measurement.



严飞(通信作者),2013 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为南京信息工程大学副教授,硕士生导师,主要研究方向为三维测量与显示、嵌入式图像处理技术等。

E-mail: fyan@nuist.edu.cn

Yan Fei (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences in 2013. He is now an associate professor and master's supervisor of Nanjing University of Information Engineering. His main research interests include 3D measurement and display, embedded image processing technology, etc.