

基于分段阶梯相位编码的三维形貌测量方法

汪俊霖, 张启灿*, 吴周杰

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 为了解决基于相位编码的三维形貌测量方法在对高频条纹截断相位进行相位展开时易出现误码的问题, 提出了一种分段阶梯相位编码方法。用一级阶梯码字对另一级分段阶梯码字的分段数进行编码, 投影两组相位编码条纹分别获取两级码字后, 再投影额外的两帧错位格雷码, 分别获取与这两级码字错位半个阶梯的码字。利用错位码字与原码字易出现误码位置的不同, 选用不同的码字进行互补解码, 从而获得更加可靠的条纹级次重建三维结果。实验结果表明, 所提方法的码字重建结果不易出错。在使用相同数量辅助图案情况下, 所提方法能比互补格雷码编码方法标记更多的投影条纹周期, 可以辅助更高频率正弦条纹实现对复杂物体形貌的准确三维面形测量。

关键词 三维形貌测量; 条纹投影; 相位编码; 格雷码; 相位展开

中图分类号 TP319 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1415012

Three-Dimensional Shape Measurement Based on Piecewise Step Phase Coding

Wang Junlin, Zhang Qican*, Wu Zhoujie

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China

Abstract In this paper, we proposed a piecewise step phase coding method to solve the error codes occurring in the three-dimensional (3D) shape measurement method using the phase coding technique in the phase unwrapping for the wrapped phase of high-frequency fringe. The first step codewords were used to encode the order of the second step codewords. After two groups of phase coding fringes were projected for the recovery of two sets of codewords, two extra misaligned Gray code patterns were projected to obtain two codewords shifted by half period from the two sets of codewords, respectively. By taking advantage of the mismatch between the misaligned and original codewords, we selected different codewords for complementary decoding. Therefore, more reliable fringe orders were obtained for 3D reconstruction. Experimental results reveal that the proposed method is robust in decoding codewords and can label more fringe periods than the complementary Gray code method using the same number of projected auxiliary patterns. Furthermore, the proposed method accurately reconstructs 3D shapes of complex objects with denser high-frequency sinusoidal fringes.

Key words 3D shape measurement; fringe projection; phase coding; Gray code; phase unwrapping

1 引言

随着科技的发展, 光机电一体化光学三维测量方法得到了广泛应用, 已经在产品设计、机械工程、工业检测和生物医学等领域扮演起了重要的角色^[1-2]。条纹投影轮廓术^[3-5]具有快速、高精度、全场和非接触测量的优势, 是重建物体三维形貌最可靠的方法之一, 其主要原理是利用投影到物体表面、受物体高度调制的条纹信息来提取相位信息从而解算对应三维信息。傅里叶变换轮廓术^[6-7]和相位测量轮廓术^[8-9]是其中最

常用的两种方法, 但在相位计算求解过程中均使用了反三角函数运算, 会引起相位截断, 因此需要把截断相位展开恢复成连续的绝对相位。

相位展开分为空间相位展开^[10-12]和时间相位展开^[13-19]两大类。空间相位展开利用空间中相邻像素点间的截断相位关系, 通过对各像素点的截断相位进行加减整数倍个 2π 来获取绝对相位。常用的空间相位展开方法有最小二乘法^[10]、洪水算法^[11]和基于极点的路径导向法^[12]等。在测量复杂物体时, 空间相位展开方法容易出现错误并引起误差传播。时间相位展开通

收稿日期: 2022-04-09; 修回日期: 2022-05-19; 录用日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(62075143)

通信作者: *zqc@scu.edu.cn

过投影额外的图案,构建截断相位在时间轴上的关联分布,沿时间轴对截断相位进行逐像素展开。这种点对点的运算处理避免了误差的空间传播,鲁棒性强,更适合测量孤立物体和复杂表面。常用的时间相位展开方法有多频法^[13-14]、外差法^[15]、格雷码辅助相移法^[16-18]和相位编码法^[19]等。

2012年,Wang等^[19]首次提出了一种将码字嵌入投影条纹相位域而不是强度域的相位编码法,该方法对表面对比度、环境光和摄像机噪声不敏感,具有很强的鲁棒性,并且只需要3帧条纹图像就能生成8个以上的唯一码字,在编码效率上要优于格雷码,在高速测量和表面对比度不均匀物体测量等场景具有很大的优势。然而,在条纹频率增加时,该方法所需的嵌入码字也对应增加,编码的阶梯相位跳变间隔变小,在投影仪非线性、摄像机离焦、环境光及欠采样等因素的影响下,码字恢复容易出错。同时,即便使用低频条纹,相位编码法的条纹级次也难以与截断相位对齐,导致在两相邻码字的边缘易出现误码。为了解决这类误码问题,Zheng等^[20]投影了两套相位编码条纹来减少编码码字,并使用自校正方法修正了级次边缘的跳变。Li等^[21]提出了一种条纹周期校正方法,投影出周期均匀的正弦条纹和相位编码条纹,完成级次修正。Xing等^[22]考虑了系统的非线性,对编码相位进行了误差补偿。这些方法在一定程度上降低了误码率,但仍无法完全避免条纹级次的误码问题,依然需要采用中值滤波^[23]等操作进行后续修正。基于格雷码图案投影的三维成像技术采用二值编码,是一种误差最小化的编码方式,具有很好的鲁棒性和抗噪性,且不易受系统非线性的影响,在抗噪性上要优于相位编码方法,非常适用于有不确定噪声干扰的场景,然而,在使用格雷码辅助相移条纹进行三维测量时也会存在着和相位编码方法类似的级次边缘误码问题。孙学真等^[24]提出了一种互补格雷码方法,通过投影一帧额外的互补格雷码图案,获得两组不同的解码结果,最终避免了级次边界的跳变错误。

本文提出了一种基于分段阶梯相位编码的相位展开方法,用于实现三维形貌的测量重建。所提方法利用分级编码方式对投影条纹的周期进行两级相位编码,通过分段编码方式减少编码的码字长度;然后用另一组相位编码条纹对分段数进行二级编码,同样避免了码字过多引起的相邻阶梯相位跳变不明显和解码字出错的问题;同时,利用额外投影的两帧格雷码解决了条纹级次边缘的误码问题。错位格雷码码字与相位编码原码字易出现误码位置的不同,它们之间的联合使用和互补解码能够保证获得更加准确可靠的条纹级次。多个三维形貌测量实验和对比分析结果证实了所提方法的有效性。

2 基本原理

利用所提基于分段阶梯相位编码的三维形貌测量

方法,基于三步相移算法完成一次测量,共需投影9帧图案。其中3帧相移正弦条纹用于获取被测场景对应的截断相位和背景光强,通过背景光强分布及4帧相位编码条纹获取两级码字,利用2帧错位格雷码获取两级相位编码的互补码字,经两类码字的互补解码得到准确的条纹级次。条纹级次指导截断相位正确展开后得到绝对相位分布,可成功重建被测场景的三维形貌结果。所提方法主要的编解码数据处理流程如图1所示。

2.1 三步相移算法

相移算法因具有高精度、高效率和高鲁棒性特点,在光学计量中得到了广泛的应用。选取所需投影相移条纹图案数量最少的三步相移算法为例,阐述所提方法的原理,当然所提编码方法也同样适用于其他任意相移步数的测量方法。三步相移正弦条纹图像中各像素点光强值的表达式为

$$\begin{cases} I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \left[\cos \varphi(x, y) - \frac{2\pi}{3} \right] \\ I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \varphi(x, y) \\ I_3(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \left[\cos \varphi(x, y) + \frac{2\pi}{3} \right] \end{cases}, (1)$$

式中: $I_1(x, y)$ 、 $I_2(x, y)$ 和 $I_3(x, y)$ 表示三步相移正弦条纹图像的光强值; $A(x, y)$ 是背景光强; $B(x, y)$ 是调制光强。根据三幅正弦条纹图像的光强信息,可由式(1)得到 $A(x, y)$ 和截断相位 $\varphi(x, y)$,表达式分别为

$$A(x, y) = \frac{1}{3} [I_1(x, y) + I_2(x, y) + I_3(x, y)], (2)$$

$$\varphi(x, y) = \arctan \left\{ \frac{\sqrt{3} [I_1(x, y) - I_3(x, y)]}{2I_2(x, y) - I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right\}. (3)$$

$\varphi(x, y)$ 的一行数据分布如图2(a)所示。因为使用反三角函数参与计算,式(3)中得到的相位信息被截断在范围 $(-\pi, \pi]$,要获得其对应连续分布的绝对相位用于三维形貌重建,需要对该截断相位进行展开。

2.2 相位编码算法

图2为解码过程原理图。

在传统的相位编码方法^[16]中,码字按照升序均匀嵌入到条纹相位 $-\pi$ 到 π 之间,一个码字对应一级正弦条纹。当正弦条纹的频率增加时,需要将编码相位设置为更高的量化级别,但由于系统的非线性和离焦等因素引起的误差,当相邻阶梯编码相位码值之间的差异太小时,无法保证码字的正确识别。为了保证相邻阶梯编码相位之间的明显差异,所提方法使用两级码字,采用两个阶梯相位函数分别将两级码字嵌入到编码相位 $\varphi_{s1}(x, y)$ 和 $\varphi_{s2}(x, y)$ 中:

$$\begin{cases} \varphi_{s1}(x, y) = -\pi + \text{floor} \left[\frac{\text{mod}(x, m \times p)}{p} \right] \times \frac{2\pi}{m} \\ \varphi_{s2}(x, y) = -\pi + \text{floor} \left(\frac{x}{m \times p} \right) \times \frac{2\pi}{n} \end{cases}, (4)$$

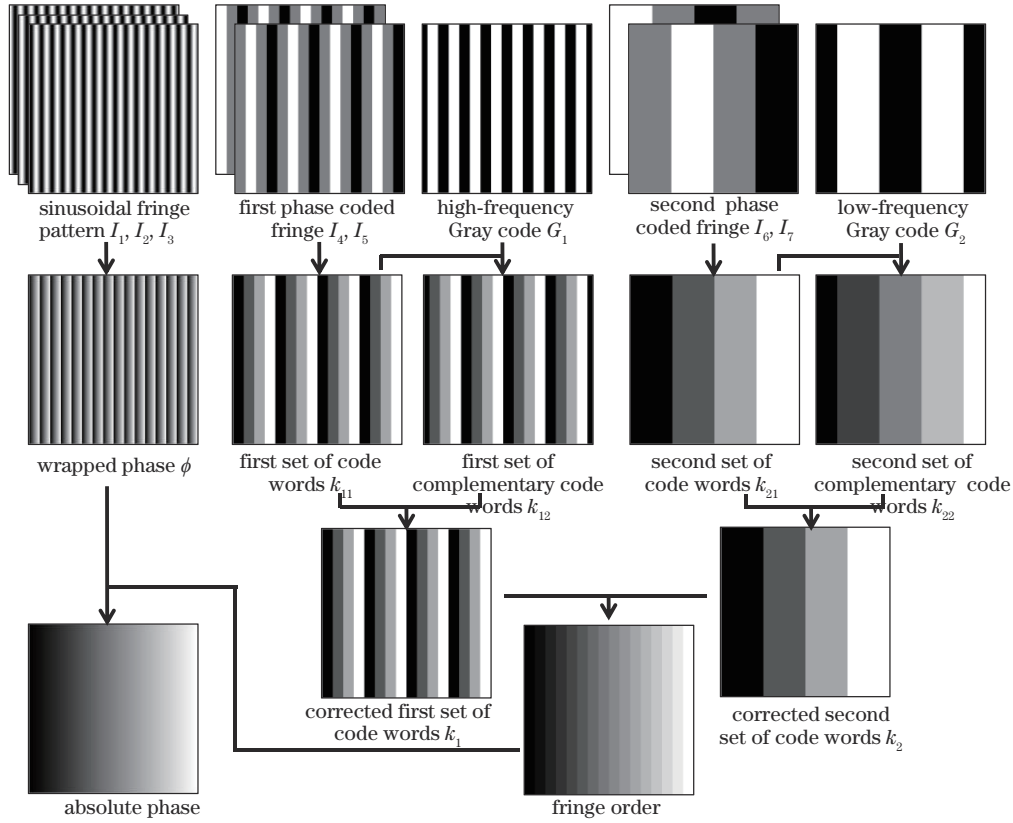


图 1 所提方法的数据处理流程
Fig. 1 Data processing flow of the proposed method

式中: $\text{floor}(\cdot)$ 表示不大于 x 的最大整数; $\text{mod}(\cdot)$ 表示取余数操作; m 表示第一级编码相位的码字数, 也就是分段阶梯编码相位的每段阶梯数; p 为一个正弦条纹周期的像素数; n 是第二级编码相位的码字数, 也就是分段编码相位的分段数; f 表示正弦条纹的周期数。在所提方法中, 为了后续生成互补码字, m 需为偶数, m 、 n 和 f 三个参数应该满足关系 $f = m \times n$ 。 m 和 n 的值应相近, 使得两级码字的阶梯高度也相近, 用来保证解码时可能出现的误差被最大程度分摊到两级编码中。所提方法适用于高频条纹, 但为了在坐标轴中清楚地展示各参数, 使用条纹周期数为 16 的正弦条纹来叙述原理, m 和 n 均取 4, 后续实验中主要使用周期数为 64 的高频条纹。

为了减少所需投影条纹帧数, 每级码字投影两帧对应的相位编码条纹, 其各像素点的光强值的表达式为

$$\begin{cases} I_4(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \varphi_{s1}(x, y) \\ I_5(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \sin \varphi_{s1}(x, y) \\ I_6(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \varphi_{s2}(x, y) \\ I_7(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \sin \varphi_{s2}(x, y) \end{cases} \quad (5)$$

利用以上相位编码条纹及背景光强, 解出编码相位, 表达式为

$$\begin{cases} \varphi_{s1}(x, y) = \arctan \left[\frac{I_5(x, y) - A(x, y)}{I_4(x, y) - A(x, y)} \right] \\ \varphi_{s2}(x, y) = \arctan \left[\frac{I_7(x, y) - A(x, y)}{I_6(x, y) - A(x, y)} \right] \end{cases} \quad (6)$$

将两个编码相位解出的码字记为 $k_{11}(x, y)$ 和 $k_{21}(x, y)$:

$$\begin{cases} k_{11}(x, y) = \text{round} \left[m \times \frac{\varphi_{s1} + \pi}{2\pi} \right] \\ k_{21}(x, y) = \text{round} \left[n \times \frac{\varphi_{s2} + \pi}{2\pi} \right] \end{cases} \quad (7)$$

它们的单行分布分别如图 2(b) 和图 2(f) 所示。额外投影的两帧格雷码图案 $G_1(x, y)$ 和 $G_2(x, y)$ 为

$$\begin{cases} G_1(x, y) = \text{mod} \left[\text{floor} \left(\frac{x + \frac{p}{2}}{p} \right), 2 \right] \\ G_2(x, y) = \text{mod} \left[\text{floor} \left(\frac{x + \frac{m \times p}{2}}{m \times p} \right), 2 \right] \end{cases} \quad (8)$$

它们的单行分布分别如图 2(c) 和图 2(g) 所示。将式(2) 计算得到的背景光强 $A(x, y)$ 作为阈值, 将采集得到的

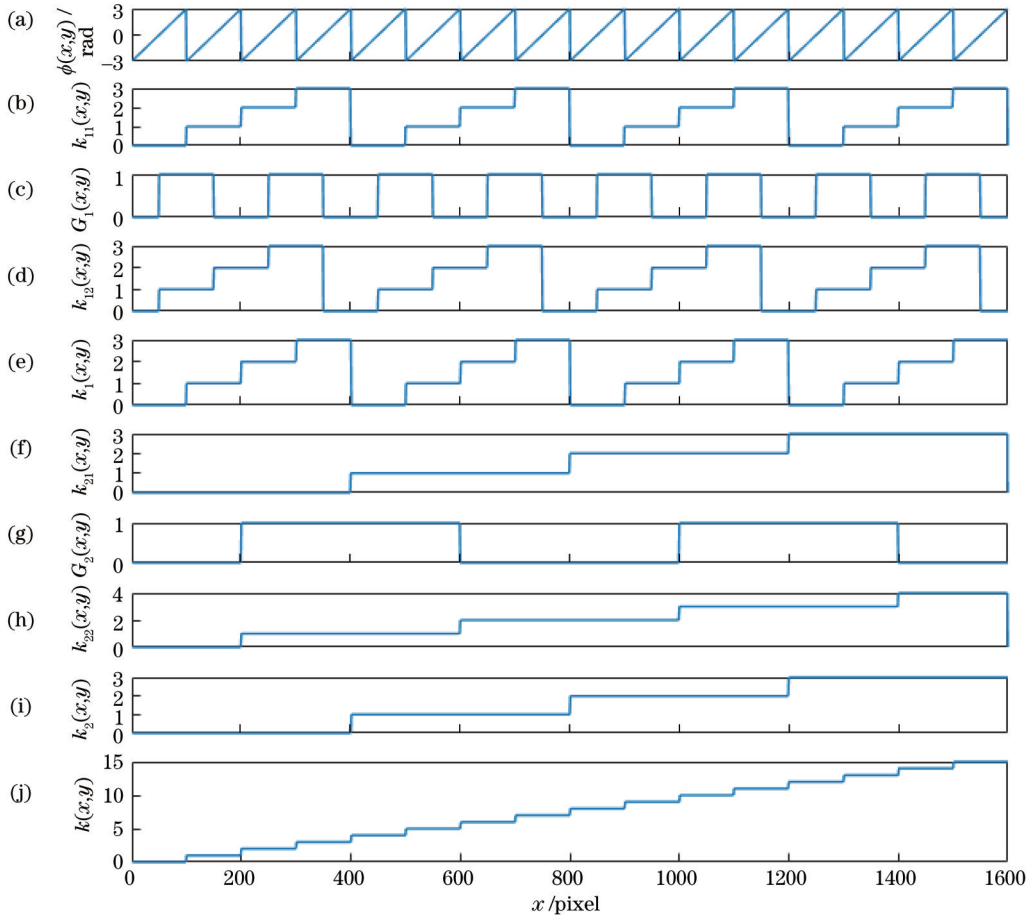


图2 解码过程原理图。(a)截断相位;(b)第一级码字;(c)高频错位格雷码;(d)第一级错位码字;(e)校正后的第一级码字;(f)第二级码字;(g)低频错位格雷码;(h)第二级错位码字;(i)校正后的第二级码字;(j)最终条纹级次

Fig. 2 Schematic of decoding process. (a) Wrapped phase; (b) the first order of codeword; (c) high-frequency discolation Gray code; (d) the first order of discolation codeword; (e) corrected first order of codeword; (f) the second order of codeword; (g) low-frequency discolation Gray code; (h) the second order of discolation codeword; (i) corrected second order of codeword; (j) final fringe order

格雷码图案 $G_1(x, y)$ 和 $G_2(x, y)$ 二值化, 得到与 $k_{11}(x, y)$ 错位半个条纹周期的格雷码码字 $k_{12}(x, y)$ 和与 $k_{21}(x, y)$ 错位 $m/2$ 个条纹周期的格雷码码字 $k_{22}(x, y)$, 表达式为

$$k_{12}(x, y) = \begin{cases} k_{11}(x, y) + G_1(x, y), \text{ mod}[k_{11}(x, y), 2] = 0 \\ k_{11}(x, y) + 1 - G_1(x, y), \text{ mod}[k_{11}(x, y), 2] = 1 \end{cases}, \quad (9)$$

$$k_{22}(x, y) = \begin{cases} k_{21}(x, y) + G_2(x, y), \text{ mod}[k_{21}(x, y), 2] = 0 \\ k_{21}(x, y) + 1 - G_2(x, y), \text{ mod}[k_{21}(x, y), 2] = 1 \end{cases}, \quad (10)$$

在用式(9)计算得到 $k_{12}(x, y)$ 后, 要将所有 $k_{12}(x, y)$ 为 m 的值修正为 0, 两个错位格雷码码值单行分布分别如图 2(d) 和图 2(h) 所示。依据截断相位的取值, 将每个周期划分为 3 个区域, 在 $k_{11}(x, y)$ 较易发生跳变的边缘区域使用 $k_{12}(x, y)$ 的值来展开相位, 反之仍使用 $k_{11}(x, y)$ 的值, 这样得到的码字 $k_1(x, y)$ 在相邻阶梯分界处就能很

好地与截断相位的级次边缘对齐。计算 $k_1(x, y)$ 的公式为

$$k_1(x, y) = \begin{cases} k_{12}(x, y), & -\pi \leq k_1(x, y) < -\frac{\pi}{2} \\ k_{11}(x, y), & -\frac{\pi}{2} \leq k_1(x, y) \leq \frac{\pi}{2} \\ k_{12}(x, y) - 1, & \frac{\pi}{2} < k_1(x, y) \leq \pi \end{cases}, \quad (11)$$

计算得到 $k_1(x, y)$ 后, 要将所有 $k_1(x, y)$ 为 -1 的值修正为 $m-1$, 单行分布的 $k_1(x, y)$ 如图 2(e) 所示。同理, 根据第一级码字 $k_1(x, y)$ 的取值划分区域, 通过 $k_{21}(x, y)$ 和 $k_{22}(x, y)$ 互补解码得到第二级码字 $k_2(x, y)$, 表达式为

$$k_2(x, y) = \begin{cases} k_{22}(x, y), & 0 \leq k_1(x, y) < -\frac{m-1}{4} \\ k_{21}(x, y), & -\frac{m-1}{4} \leq k_1(x, y) \leq \frac{3 \times (m-1)}{4} \\ k_{22}(x, y) - 1, & \frac{3 \times (m-1)}{4} < k_1(x, y) \leq m-1 \end{cases}, \quad (12)$$

单行分布的 $k_2(x, y)$ 如图 2(i) 所示。通过两级码字计算出条纹级次 $k(x, y)$ ：

$$k(x, y) = k_1(x, y) + m \times k_2(x, y), \quad (13)$$

其单行的剖面分布如图 2(j) 所示。获得正确条纹级次 $k(x, y)$ 后, 将截断相位 $\phi(x, y)$ 展开为连续分布的绝对相位 $\varphi(x, y)$ ：

$$\varphi(x, y) = \phi(x, y) + 2k(x, y)\pi. \quad (14)$$

测量系统经过标定得到对应参数后, 通过相位高度映射, 将相位信息转换为被测物体表面的高度信息, 最终得到物体形貌的三维重建结果。

3 实验与结果分析

3.1 计算机仿真

为了检验所提方法的抗噪性, 进行计算机仿真, 用周期数为 64 的正弦条纹对一个大小为 1280 pixel × 1280 pixel 的 peaks 函数进行了模拟测量, 在条纹中分别加入了 5%, 10%, 15% 的随机噪声, 并与传统的相位编码方法进行对比。实验结果如图 3 所示: 随着噪声的增加, 所提方法恢复的物体表面未出现明显跳变, 条纹级次解算并未出现错误; 相位编码方法的跳变点随着噪声的增加变得越来越多, 条纹级次的对应错误率分别为 3.13%, 33.16%, 51.91%。

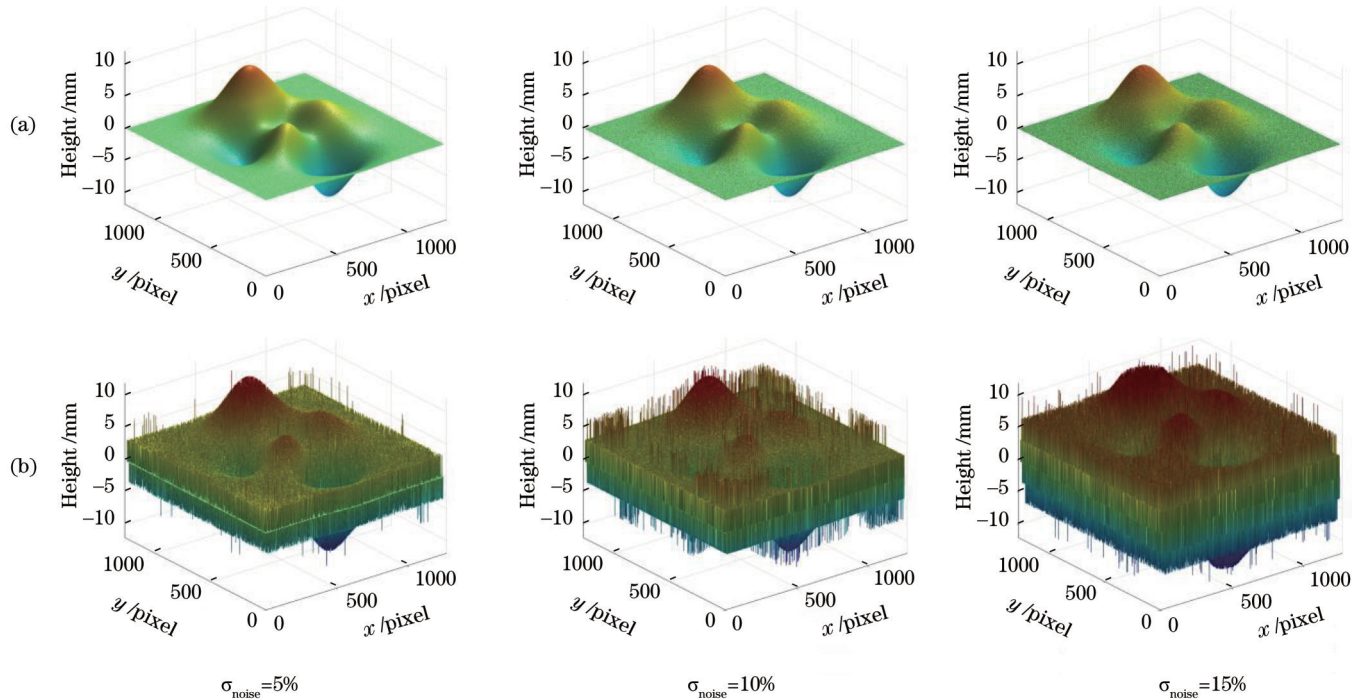


图 3 不同方法的仿真实验结果。(a)所提方法;(b)传统相位编码方法

Fig. 3 Simulation results of different methods. (a) Proposed method; (b) traditional phase coding method

为了验证所提方法的有效性, 搭建了图 4 所示的三维测量系统。该系统由分辨率为 800 pixel × 1280 pixel 的投影仪 (PDC-03)、分辨率为 1200 pixel × 1600 pixel 的照相机 (UI-2500SE-M-GL)、焦距为 12 mm 的成像

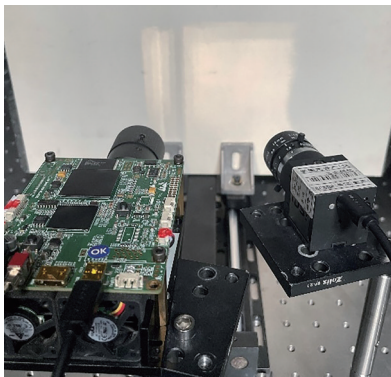


图 4 实验装置

Fig. 4 Experimental setup

镜头 (FL-HC1214-2M) 和计算机组成。实验中使用周期数为 64 的正弦条纹, 参数 m 和 n 均取 8。

3.2 简单物体测量

首先, 对一个葫芦模型进行了测量, 采集得到的第一帧正弦相移条纹图、第一帧分段阶梯相位编码条纹图、第一帧阶梯相位编码条纹图、两帧格雷码图案分别如图 5(a)~(e) 所示。利用调制度模板确定测量物面的有效区域, 计算所得到的截断相位 $\phi(x, y)$ 、第一级码字 $k_1(x, y)$ 、第二级码字 $k_2(x, y)$ 、条纹级次 $k(x, y)$ 和绝对相位 $\varphi(x, y)$ 分别如图 6(a)~(e) 所示。

为了验证所提方法的有效性, 同时与传统相位编码方法和传统格雷码方法进行对比分析。使用同一组周期数为 64 的正弦条纹, 用不同方法在同一个测量系统下分别进行了三维测量重建。三种方法所得到的重建结果如图 7(a)~(c) 所示。可见: 在传统相位编码方法中, 由于使用的是高频条纹, 码字恢复易出错, 出现

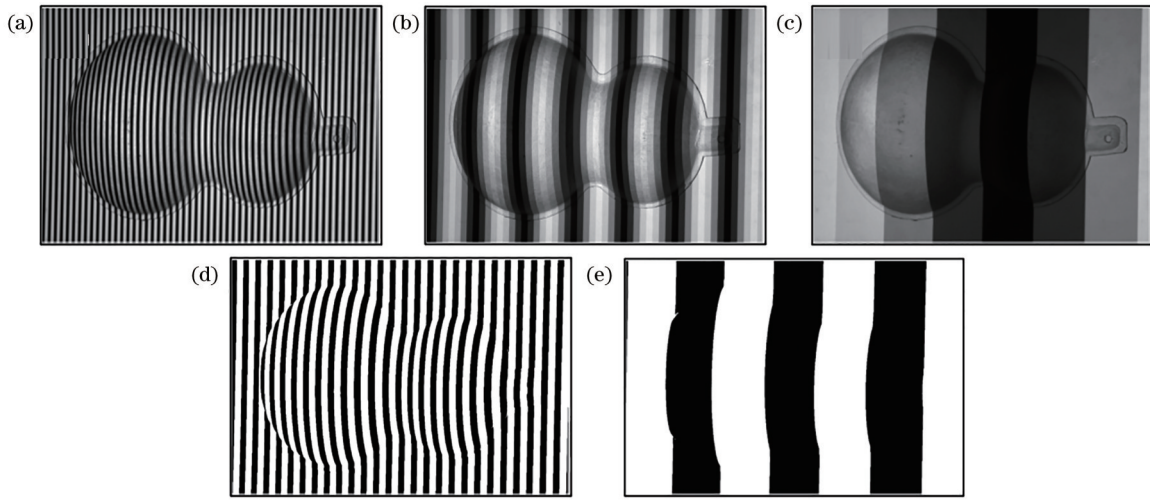


图 5 实验中拍摄的部分图片。(a) 第一帧正弦相移条纹图;(b) 第一帧分段阶梯相位编码条纹图;(c) 第一帧阶梯相位编码条纹图;(d) 高频格雷码图;(e) 低频格雷码图

Fig. 5 Parts of captured images in the experiment. (a) First frame of sinusoidal phase shifting fringe pattern; (b) first frame of piecewise step phase coding fringe pattern; (c) first frame of step phase coding fringe pattern; (d) high-frequency Gray code pattern; (e) low-frequency Gray code pattern

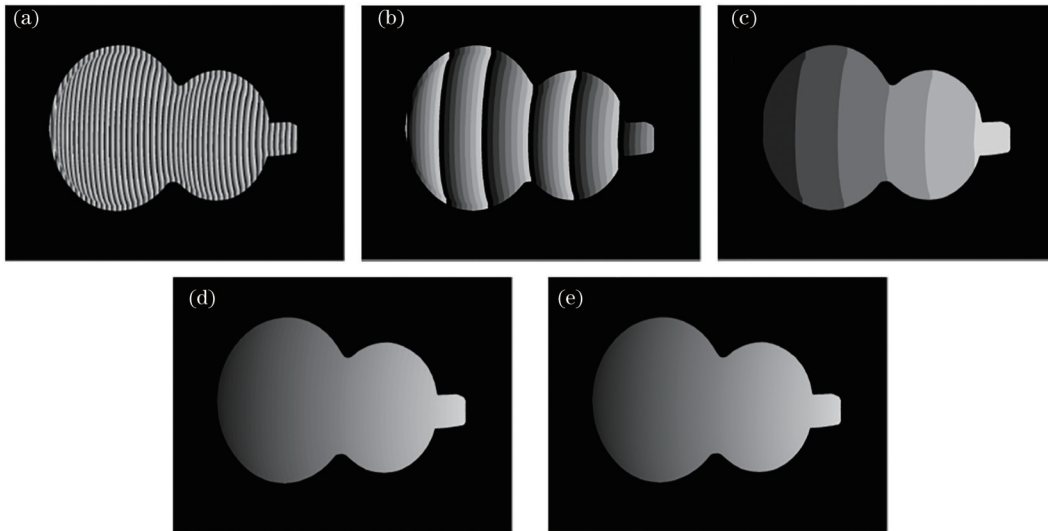


图 6 测量实验数据处理流程。(a) 截断相位 $\phi(x,y)$; (b) 第一级码字 $k_1(x,y)$; (c) 第二级码字 $k_2(x,y)$; (d) 条纹级次 $k(x,y)$; (e) 绝对相位 $\varphi(x,y)$

Fig. 6 Process of measured data. (a) Wrapped phase $\phi(x,y)$; (b) first order of codewords $k_1(x,y)$; (c) second order of codewords $k_2(x,y)$; (d) fringe order $k(x,y)$; (e) absolute phase $\varphi(x,y)$

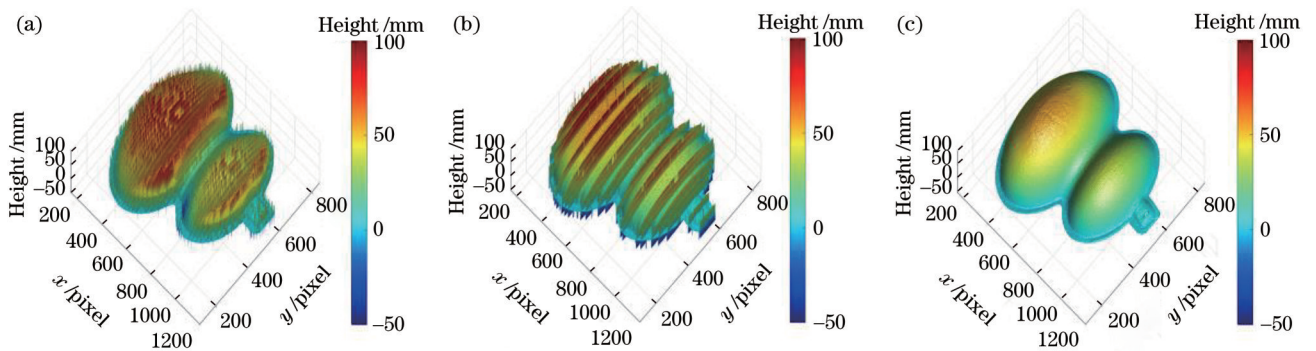


图 7 三种方法的重建结果。(a) 传统相位编码方法;(b) 传统格雷码方法;(c) 所提方法

Fig. 7 Reconstructed results of three methods. (a) Traditional phase coding method; (b) traditional Gray code method; (c) the proposed method

了数量较多的严重跳变;在传统格雷码方法中,大部分区域恢复较好,但在条纹级次边缘处出现了较多的跳变;所提方法恢复结果较好,未出现级次跳变,将该实验对象连续缓变的正确条纹级次作为真值。传统的相位编码方法和格雷码编码方法对条纹级次的错误率分别为 19.60% 和 4.96%。

在此基础上,为了考察所提方法对更高频率投影条纹进行编码,获得正确条纹级次的能力,用 6 幅辅助

图案对周期数为 100 的相移正弦条纹进行标记,完成该葫芦模型的三维形貌测量。采集得到的其中一帧正弦条纹及其最终的重建结果分别如图 8(a)和图 8(b)所示。对于传统的格雷码辅助相移条纹方法,100 个周期至少需要 7 幅格雷码才能完成每个周期的唯一编码标记,而且还容易在周期边沿出现解码错误。所提方法可以便捷地使用到周期数更多的投影条纹,同时不会增加编码图案数量。

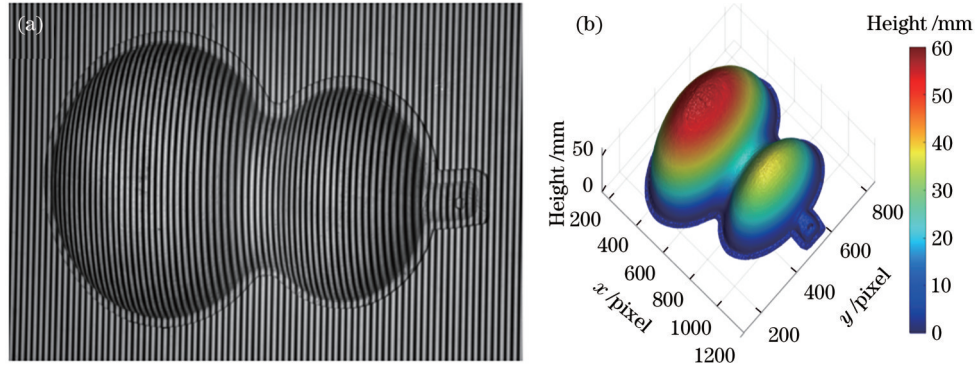


图 8 投影周期数为 100 的相移条纹三维测量实验。(a) 一帧正弦条纹图;(b) 三维重建结果

Fig. 8 Three dimensional measurement experiment of phase shift fringe with projection period of 100. (a) A frame of sinusoidal fringe pattern; (b) reconstructed result

3.3 复杂物体测量

为了验证所提方法对复杂物体的三维测量性能,对一个面形较复杂的面具进行了测量,采集图案中的

第一帧正弦相移条纹图、第一帧分段阶梯相位编码条纹图、第一帧阶梯相位编码条纹图及两帧格雷码,分别如图 9(a)~(e)所示,最终的重建结果如图 9(f)所

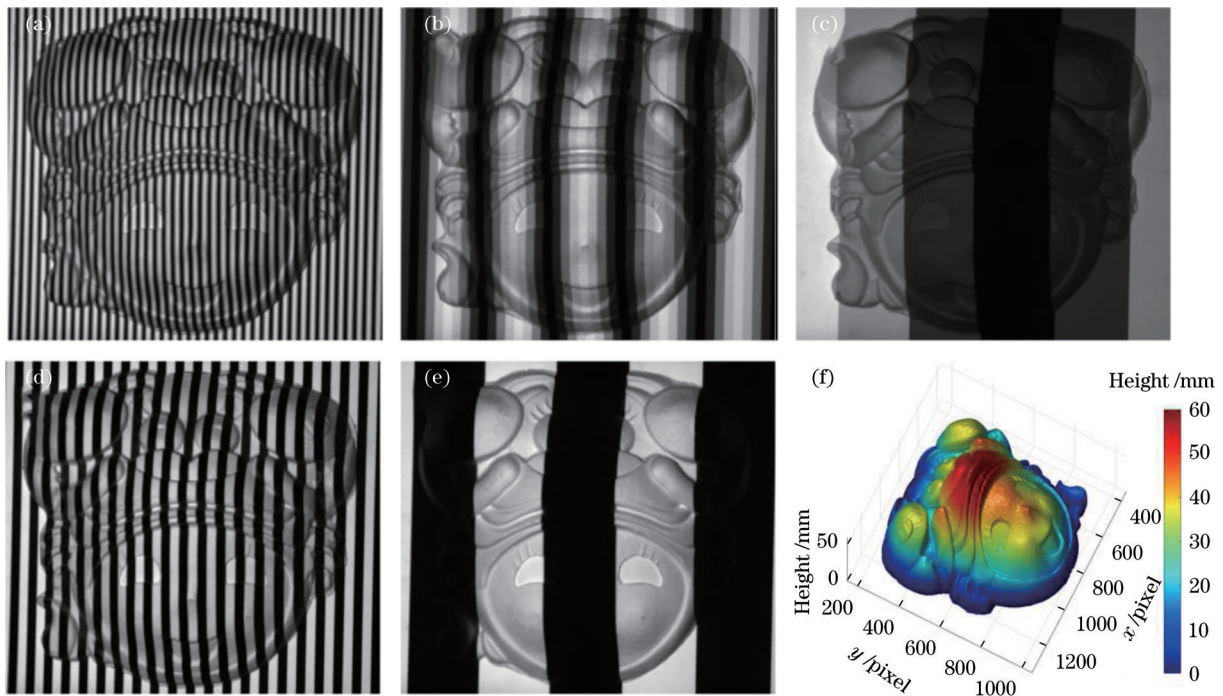


图 9 复杂面具测量实验。(a)第一帧正弦相移条纹图;(b)第一帧分段阶梯相位编码条纹图;(c)第一帧阶梯相位编码条纹图;(d)高频格雷码图;(e)低频格雷码图;(f)重建结果

Fig. 9 Measurement experiment on a complex mask. (a) First frame of sinusoidal phase shifting fringe pattern; (b) first frame of piecewise step phase coding fringe pattern; (c) first frame of step phase coding fringe pattern; (d) high-frequency Gray code pattern; (e) low-frequency Gray code pattern; (f) reconstructed result

示。可以看出,所提方法能正确地恢复面形复杂物体。

3.4 标准件测量

为了定量评估所提方法的测量精度,对一个每台阶高度差为 30 mm 的标准件进行了测量,最终的重建结果如图 10(a)所示,其中第 600 行的高度分布如

图 10(b)所示。第一个台阶面高度的均值为 45.08 mm,第二个台阶面高度的均值为 75.13 mm,将两个台阶面的高度均值相减得到的高度差为 30.05 mm,将台阶面的拟合平面视为真值,算得第一个台阶面的均方根误差(RMSE)为 0.044 mm,第二个台阶面的 RMSE 为 0.041 mm。

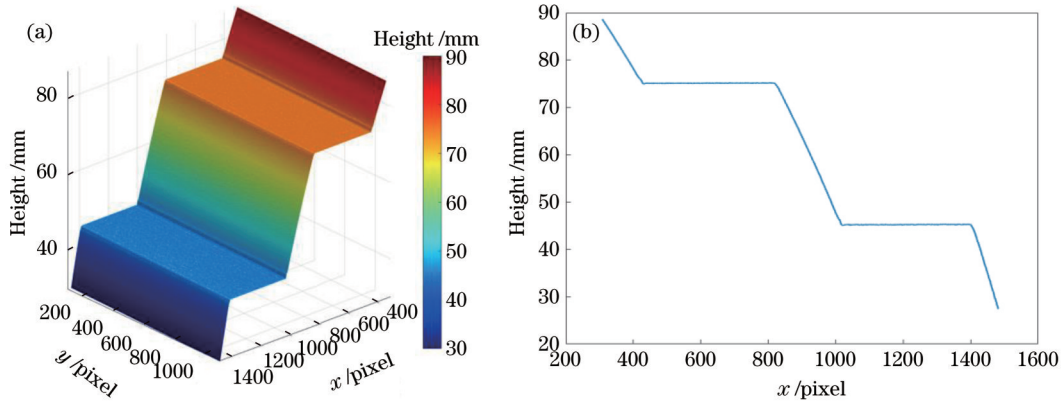


图 10 标准阶梯测量实验。(a) 重建结果;(b) 第 600 行的高度分布

Fig. 10 Measurement experiment on a standard ladder. (a) Reconstructed result; (b) height distribution along 600th line

4 结 论

提出了一种基于分段阶梯相位编码的相位展开方法,用于完成基于高频相移条纹的三维形貌测量。详细介绍了该方法的原理,该方法利用相移正弦条纹(以三帧为例)图像获取截断相位,通过投影 4 帧相位编码条纹获取两级码字,并投影两帧错位格雷码校正码字以获取准确、无跳变错误的条纹级次重建三维结果。实验结果表明,所提方法的码字不易出错,解决了相位编码方法中的误码问题。相比于其他相位展开方法,多频法^[25]在使用高频相移条纹信息重建结果时对误差具有较大的放大作用,容易导致相位展开出错;基于几何约束的方法^[26]虽然测量效率较高,但测量的深度会受限;中值滤波等后纠正方法^[23]难以处理本身具有陡变的复杂物体;传统格雷码编码方法^[24]虽然抗噪性更强,但当条纹的周期数大于 64 时,所需投影格雷码数目会超过 6 幅;所提方法具有更高的编码效率,可以使用相同数量(6 幅)的辅助图案标记更多周期的高频正弦条纹,实现更高精度的三维形貌测量。因此,综上所述,所提方法在编码周期数较大时,能够同时满足高效率以及高鲁棒性的要求,在对测量精度要求较高的测量场景中具有优势。

参 考 文 献

- [1] Marrugo A G, Gao F, Zhang S. State-of-the-art active optical techniques for three-dimensional surface metrology: a review[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2020, 37(9): B60-B77.
- [2] 左超, 张晓磊, 胡岩, 等. 3D 真的来了吗?: 三维结构光传感器漫谈[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 0303001.
- [3] Zuo C, Zhang X L, Hu Y, et al. Has 3D finally come of age?: an introduction to 3D structured-light sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303001.
- [4] Salas L. Profilometry by fringe projection[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(11): 3307-3314.
- [5] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 106: 119-131.
- [6] 张启灿, 苏显渝. 动态三维形貌测量的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 010001.
- [7] Zhang Q C, Su X Y. Research progress of dynamic three-dimensional shape measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010001.
- [8] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [9] 杨凌辉, 杨金成, 廖瑞颖, 等. 基于线阵图像傅里叶与灰度匹配算法的三维测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(20): 2012001.
- [10] Yang L H, Yang J C, Liao R Y, et al. Three-dimensional measurement based on line-scan image Fourier and grayscale matching algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(20): 2012001.
- [11] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [12] 郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(8): 0800001.
- [13] Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review[J]. *Laser & Optoelectronics*

- Progress, 2021, 58(8): 0800001.
- [10] Strand J, Taxt T, Jain A K. Two-dimensional phase unwrapping using a block least-squares method[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(3): 375-386.
- [11] Su X Y. Phase unwrapping techniques for 3D shape measurement[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2866: 460-465.
- [12] Su X Y, von Bally G, Vukicevic D. Phase-stepping grating profilometry: utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation[J]. Optics Communications, 1993, 98(1/2/3): 141-150.
- [13] Servin M, Padilla J M, Gonzalez A, et al. Temporal phase-unwrapping of static surfaces with 2-sensitivity fringe-patterns[J]. Optics Express, 2015, 23(12): 15806-15815.
- [14] 师力力, 刘卫国, 田爱玲, 等. 时间相位解包裹算法的抗噪性能对比研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12): 1212006.
Shi L L, Liu W G, Tian A L, et al. Comparison on noise resistance of temporal phase unwrapping algorithms [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(12): 1212006.
- [15] 李璐璐, 苏显渝, 窦蕴甫, 等. 时间相位展开的误差分析与算法设计[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2012, 49(1): 102-108.
Li L L, Su X Y, Dou Y F, et al. Error analysis and algorithm design of temporal phase unwrapping[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2012, 49(1): 102-108.
- [16] Wu Z J, Guo W B, Zhang Q C. Two-frequency phase-shifting method vs. Gray-coded-based method in dynamic fringe projection profilometry: a comparative review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 153: 106995.
- [17] 宋倩, 陈悦, 朱荣刚, 等. 基于格雷编码投影的三维测量技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 031203.
Song Q, Chen Y, Zhu R G, et al. Research of 3D measurement technology based on gray code projection [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 031203.
- [18] 陆丽莲, 吴周杰, 张启灿. 基于错位格雷码的动态三维形貌测量方法[J]. 光学学报, 2022, 42(5): 0512005.
Lu L L, Wu Z J, Zhang Q C. Dynamic three-dimensional shape measurement method based on misaligned Gray code[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 0512005.
- [19] Wang Y J, Zhang S. Novel phase-coding method for absolute phase retrieval[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 2067-2069.
- [20] Zheng D L, Da F P. Phase coding method for absolute phase retrieval with a large number of codewords[J]. Optics Express, 2012, 20(22): 24139-24150.
- [21] Li B, Fu Y J, Zhang J C, et al. Period correction method of phase coding fringe[J]. Optical Review, 2015, 22(5): 717-723.
- [22] Xing Y, Quan C, Tay C J. A modified phase-coding method for absolute phase retrieval[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 87: 97-102.
- [23] Zheng D L, Da F P, Qian K M, et al. Phase-shifting profilometry combined with Gray-code patterns projection: unwrapping error removal by an adaptive Median filter[J]. Optics Express, 2017, 25(5): 4700-4713.
- [24] 孙学真, 苏显渝, 邹小平. 基于互补型光栅编码的相位展开[J]. 光学学报, 2008, 28(10): 1947-1951.
Sun X Z, Su X Y, Zou X P. Phase-unwrapping based on complementary structured light binary code[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(10): 1947-1951.
- [25] Lin C, Zheng D L, Qian K M, et al. Spatial pattern-shifting method for complete two-wavelength fringe projection profilometry[J]. Optics Letters, 2020, 45(11): 3115-3118.
- [26] An Y T, Hyun J S, Zhang S. Pixel-wise absolute phase unwrapping using geometric constraints of structured light system[J]. Optics Express, 2016, 24(16): 18445-18459.