

基于错位格雷码的动态三维形貌测量方法

陆丽莲, 吴周杰, 张启灿*

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 格雷码辅助相移技术可以实现具有较强鲁棒性与抗噪能力的三维(3D)形貌测量。为解决由待测物体不均匀的表面反射率、噪声和物体运动等因素造成的级次边沿误码问题,提出了一种基于错位格雷码的动态 3D 形貌测量方法。将传统格雷码图案在投影前预先移动半个条纹周期得到错位格雷码图案,再采用传统格雷码解码方法对二值化后的错位格雷码图案解码,可得到与截断相位完全错开的解码结果。对该解码结果进行修正后即可利用得到的正确的相位级次辅助截断相位成功展开。同时,为了提高测量精度,引入了一个虚拟相位平面以进一步拓展投影条纹周期数。实验结果表明,所提方法在使用 N 帧格雷码图案的情况下,可以编码周期数为 2^{N+1} 的投影条纹进行 3D 测量,其无需任何附加图案即可避免级次边沿误码问题,并有效提升了测量精度。复杂动态场景的 3D 重建结果证明,所提方法能够以 2381 frame/s 的速率实现高精度、高效率和高速的 3D 形貌测量。

关键词 测量; 错位格雷码; 级次边沿误码; 周期数拓展; 相位展开

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0512005

Dynamic Three-Dimensional Shape Measurement Method Based on Misaligned Gray Code

Lu Lilian, Wu Zhoujie, Zhang Qican*

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

Abstract The Gray-code assisted phase-shifting technique can achieve three-dimensional (3D) shape measurement with strong robustness and anti-noise ability. To solve the order edge error caused by the uneven surface reflectivity of the measured object, noise, object motion, and other factors, a dynamic 3D shape measurement method based on misaligned Gray code is proposed. The traditional Gray-code patterns are moved in advance by half fringe period before projection to obtain misaligned Gray-code patterns, then the traditional Gray-code decoding method is used to decode the binarized misaligned Gray-code patterns to acquire a decoding result that is completely staggered from the wrapped phase. By correcting the decoding result, the obtained correct phase order can be used to assist the wrapped phase to be successfully unwrapped. Meanwhile, a virtual phase plane is introduced to further expand the number of projected fringe periods and ultimately to improve the measurement accuracy. The experimental results show that the proposed method can perform 3D measurement by coding projection fringes with 2^{N+1} periods when N -frame Gray-code patterns are used, which can avoid the order edge error without any additional patterns and effectively improve the measurement accuracy. The 3D reconstructed results in complex dynamic scenes prove that the proposed method can achieve high-precision, high-efficiency, and high-speed 3D shape measurement at a rate of 2381 frames/s.

Key words measurement; misaligned Gray code; order edge error; period number expansion; phase unwrapping

收稿日期: 2021-08-16; 修回日期: 2021-09-09; 录用日期: 2021-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(62075143)、博士后创新人才支持计划(BX2021199)

通信作者: *zqc@scu.edu.cn

1 引言

结构光投影三维测量方法是实现物体非接触三维(3D)形貌测量的一项重要技术,在机械工程、生物识别和机器视觉等领域^[1-4]扮演着越来越重要的角色,其常用方法主要包括相位测量轮廓术(PMP)^[5-7]、傅里叶变换轮廓术(FTP)^[8]和调制度测量轮廓术(MMP)^[9]等。相位展开是结构光投影三维测量方法中的重要环节,对应算法主要分为空间相位展开(SPU)算法^[10]和时间相位展开(TPU)算法^[11]。

格雷码辅助相移技术实现的结构光投影三维测量技术^[12-13]采用相移方法计算截断相位,并通过格雷码图案解码得到相位级次以辅助截断相位展开,具有不依赖空间展开路径、鲁棒性强和抗噪性能好等优点。然而,格雷码是一种二元光栅编码方法,受被测物体表面反射率、背景光强度和噪声等因素影响,格雷码黑白码字交替处的灰度值并非绝对锐截止变化,进而不易二值化处理,这会导致相位级次边缘误码与截断相位不匹配,产生相位展开错误。

为了解决上述问题,Laughner 等^[14]额外投影全为“0”的黑色图案和全为“1”的白色图案作为格雷码二值化阈值。Zheng 等^[15]利用附加的投影条纹图将格雷码图案归一化为二值分布。Wu 等^[16]不再投影额外的图案而是直接利用投影的三步相移正弦条纹图案的强度平均值作为阈值,再利用深度约束消除局部少量的误码。这些方法并不能完全避免级次边缘误码问题,故仍然需要后续的修正,如使用中值滤波^[17]来消除剩余的相位展开错误。因此,孙学真等^[18-19]提出了提前避免误差产生的互补格雷码编码方式,额外投影了一幅互补格雷码图案,利用产生的两个解码结果对误码位置进行码值修正。

随着数字光处理技术(DLP)^[20-22]的快速发展,相移技术结合二值离焦方法^[23-24]成为动态三维形貌测量的研究热点。Wu 等将传统格雷码在时间域和空间域上重新编码,分别设计了循环互补格雷码编码策略^[25]和移动格雷码编码策略^[16],并且将它们与二值离焦方法结合应用到了高速动态三维测量中。为了进一步提升测量效率,Wu 等^[26]提出了分区间相位展开策略,该方法无需额外投影图案就可避免格雷码误码问题带来的相位误差,但需要构建三个错位的截断相位,从而限制了该方法的适用范围。

本文提出了基于错位格雷码的动态三维形貌测量方法,使用 N 帧格雷码图案标记周期数为 2^{N+1}

的投影条纹即可进行三维测量,无需额外投影图案即可避免级次边缘误码问题并提升测量精度与测量效率。该方法将传统格雷码图案统一移动半个条纹周期使得截断相位跳变边界与格雷码边缘在投影时就全部错开。当解码时,通过校正格雷码码字结果得到正确的相位级次以辅助截断相位展开。同时,进一步拓展投影条纹周期数,利用相同数量的格雷码编码图案标记更多周期数的投影条纹获取更高精度的三维测量结果,也较好地避免了误码问题带来的相位误差。

2 基本原理

2.1 格雷码辅助相移技术

相移技术^[27]通过将投影的正弦条纹图案在一个周期内均匀移动等相位量实现待测相位信息的精确测定。本文使用的三步相移正弦条纹可表示为

$$\begin{cases} I_0(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \varphi_0] \\ I_1(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y) + 2\pi/3 + \varphi_0] \\ I_2(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y) + 4\pi/3 + \varphi_0] \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $a(x, y)$ 是背景强度; $b(x, y)$ 是调制度; $b(x, y)/a(x, y)$ 是条纹对比度; $\varphi(x, y)$ 是携带物体面形信息的相位; φ_0 是匹配格雷码边缘与相位的初始相位值。使用(1)式对应的三幅正弦条纹图可得到截断相位,其表达式为

$$\varphi_w(x, y) = \arctan \frac{\sqrt{3}[I_2(x, y) - I_1(x, y)]}{2I_0(x, y) - I_1(x, y) - I_2(x, y)}, \quad (2)$$

由于(2)式中运用了反正切函数,进而计算获得的相位被截断在 $-\pi \sim \pi$ 内,故需要对其进行相位展开以得到连续相位。在实际测量中,为了消除投影仪的非线性效应对正弦条纹图案的影响并加快投影速度,常利用抖动技术^[28]处理标准正弦条纹得到抖动二值条纹图案,并通过投影仪镜头轻微离焦的方式产生质量较好的正弦条纹图案。

传统格雷码方法通过投影一组有规律的二元编码光栅来标记正弦条纹图案, 2^N 个条纹周期最少需要使用 N 幅格雷码图案来标记。通常,用 T 来表示条纹周期的个数。若以 $G_i(x, y)$ 代表第 i 幅格雷码图案, $V(x, y)$ 表示解码得到的十进制数, $f(\cdot)$ 表示十进制 $V(x, y)$ 与解码级次 $k(x, y)$ 之间的已知关系,则格雷码解码过程可描述为

$$V(x, y) = \sum_{i=1}^N G_i(x, y) \times 2^{N-i}, \quad (3)$$

$$k(x, y) = f[V(x, y)]. \quad (4)$$

众所周知,测量精度随着条纹周期数的增加而提高。在动态三维测量中,兼顾测量速度与精度,通常选择 4 幅格雷码图案来标记 16 个条纹周期。图 1 以 16 个周期的三步相移正弦条纹为例,利用 4 幅格雷码图案标记正弦条纹的每个周期,在解码获得条纹级次信息后辅助截断相位进行相位展开。

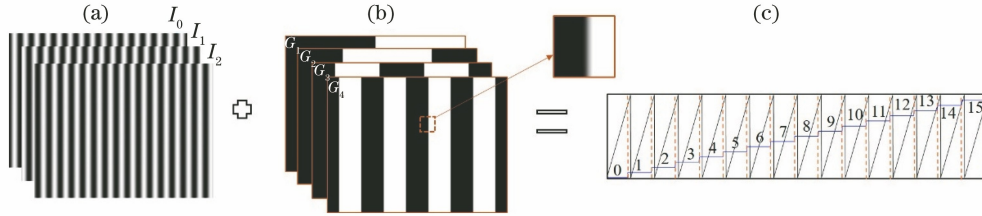


图 1 格雷码辅助相移技术原理示意图。(a)投影仪镜头离焦拍摄的正弦条纹图案;(b)投影仪镜头离焦拍摄的格雷码图案;(c)解码级次边沿与截断相位不匹配情况

Fig. 1 Schematic diagram of principle of Gray-code assisted phase-shifting technique. (a) Sinusoidal fringe patterns captured through projector lens defocusing; (b) Gray-code patterns captured through projector lens defocusing; (c) mismatch between decoding order edge and wrapped phase

2.2 错位格雷码编码策略

为了避免解码级次边沿误差与截断相位不匹配导致的相位展开误差的出现,提出了错位格雷码编码策略。由于相位在解码级次边沿附近截断,解码级次边沿误差与相位截断使相位展开过程变得复杂,故考虑将解码级次与相位截断处提前错开,这可在投影格雷码图案前预先将所有传统格雷码图案整体移动半个条纹周期实现。图 2 是所提错位格雷码编码策略示意图,其中:图 2(a)是经投影仪离焦后拍摄的传统格雷码图案;图 2(b)是将图 2(a)中传统格雷码图案移动半个条纹周期后拍摄的错位格雷码图案;图 2(c)是对应条纹和格雷码使用(2)~(4)式计算得到的截断相位 φ_w 和解码级次 k ,可以发现,两者完全错开。

2.3 错位格雷码的相位展开

根据错位格雷码编码策略得到的解码级次 k 不能直接用于辅助截断相位 φ_w 进行相位展开。观察图 2(c)中同一个解码级次(两虚线间的阶梯状解码级次区域)发现,将相位截断处左边的解码级次降低一级,右边的解码级次保持不变,可得到与截断相位相匹配的相位级次。然而,实际测量物体时会出现多个相位截断像素点,进而难以准确定位需要的相位截断点来区分每类相等解码级次的左右部分。因此,将每类解码级次 $k(x, y) = i - 1$ ($i = 1, 2, 3, \dots$,

图 1(a)为二值抖动条纹经投影仪镜头离焦后拍摄到的三幅正弦条纹图案。图 1(b)为捕获的受背景光强、噪声和投影仪离焦等影响在黑白码字交替处模糊的 4 幅格雷码图案,据此得到的解码级次边沿存在误码,出现如图 1(c)所示的阶梯状解码级次边沿与锯齿状截断相位的不匹配,进而导致相位展开错误。由于两个相邻格雷码字之间的汉明距离为 1,边界处只会发生一个级次误码,故得到的解码级次整体上仍然保持阶梯状。

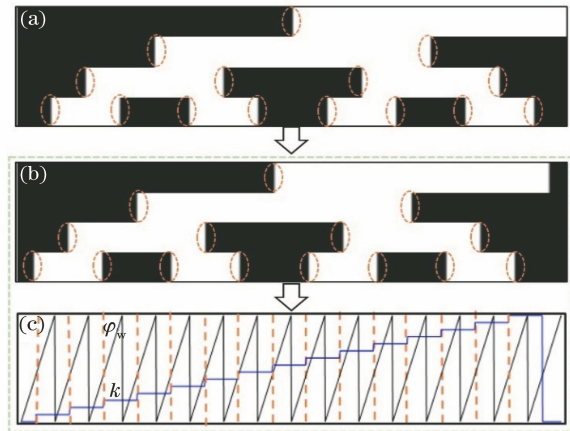


图 2 错位格雷码编码策略示意图。(a)传统的格雷码图案;(b)将图 2(a)中图案移动半个条纹周期后拍摄的错位格雷码图案;(c)使用图 2(b)中错位格雷码图案得到的解码级次 k 及对应的截断相位 φ_w

Fig. 2 Schematic diagram of misaligned Gray-code coding strategy. (a) Traditional Gray-code patterns; (b) captured misaligned Gray-code patterns after shifting patterns in Fig. 2(a) by half period; (c) decoding order k obtained by using misaligned Gray-code patterns in Fig. 2(b) and corresponding wrapped phase φ_w

2^N) 区域定义为 $A(i)$,通过将 $A(i)$ 划分为 4 个子区域间接区分左右部分,并对两部分进行不同的处理以得到正确的相位级次,简单示例如图 3 所示。

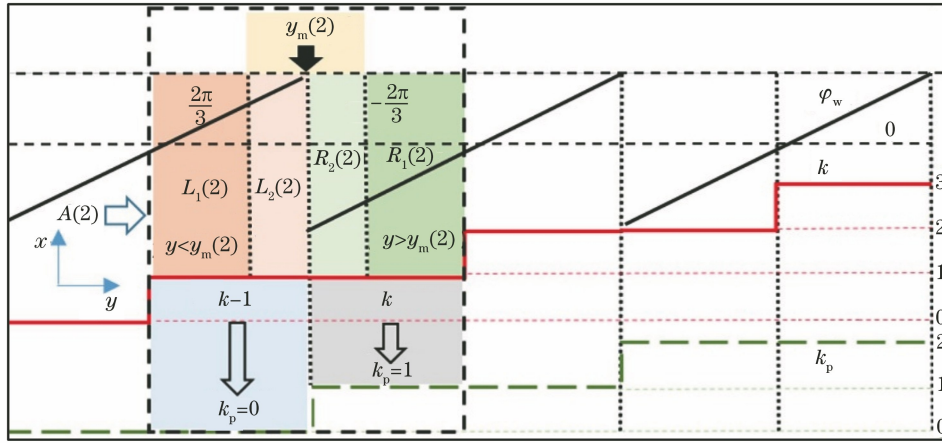


图 3 将解码级次 k 划分为 4 个子区域以获得正确相位级次 k_p 的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dividing decoding order k into four sub-regions to obtain correct phase order k_p

以图 3 中划分虚线框内解码级次 $k(x, y) = 1$ 的 $A(2)$ 区域为例, 获得相位正确级次的过程: 1) 为了保证寻找相位截断点的容错率为 $1/3$ 条纹周期宽度, 拓展相位截断点可能存在的区域为 $1/3$ 条纹周期宽度 ($|\varphi_w(x, y)| \geq 2\pi/3$), 据此将区域 $A(2)$ 划分为两部分。第一部分像素点 (x, y) 的截断相位值满足 $|\varphi_w(x, y)| \geq 2\pi/3$, 第二部分满足 $|\varphi_w(x, y)| < 2\pi/3$; 2) 将 $|\varphi_w(x, y)| < 2\pi/3$ 的区域划分为 $L_1(2)$ 与 $R_1(2)$ 两个子区域。将 $A(2)$ 中截断相位绝对值最接近 π 的像素点的 y 轴坐标标记为 $y_m(2)$, 若待处理像素点的 y 轴坐标小于 $y_m(2)$ 则判定其属于 $L_1(2)$, 反之则判定其属于 $R_1(2)$; 3) 将 $|\varphi_w(x, y)| \geq 2\pi/3$ 的区域也划分为 $L_2(2)$ 与 $R_2(2)$ 两个子区域。若待处理像素点满足 $\varphi_w(x, y) \geq 2\pi/3$, 将其划分到 $L_2(2)$ 子区域, 反之判定该像素点属

于 $R_2(2)$; 4) 获得正确相位级次 k_p 。将 $L_1(2)$ 与 $L_2(2)$ 子区域中的像素点解码级次 k 降低一个级次便可得到图 3 中虚线阶梯状表示的相位级次 k_p , 即 $L_1(2)$ 与 $L_2(2)$ 子区域中 $k_p = k - 1 = 0$, $R_1(2)$ 与 $R_2(2)$ 子区域中 $k_p = k = 1$ 。

由于阴影部分的光强近似为 0, 根据 (1) 式和 (2) 式可得其对应的截断相位值约等于 $\pm\pi$, 故在定位 $A(2)$ 中不将截断相位绝对值为 π 的像素点作为区域分界点, 目的是尽量避免相位值可能为 $\pm\pi$ 的阴影部分的干扰所引起的 $y_m(2)$ 寻找错误。只要寻找到的 $y_m(2)$ 在 $|\varphi_w(x, y)| > 2\pi/3$ 区域内, 就可准确地划分 $L_1(2)$ 与 $R_1(2)$, 确保了寻找相位截断点过程中有 $1/3$ 条纹周期宽度的容错率, 且当解码级次边沿误差区域不超过 $1/3$ 条纹周期宽度时能较好地展开相位。划分 $A(i)$ 子区域的过程可描述为

$$\begin{cases} (x, y) \in L_1(i), & |\varphi_w(x, y)| < 2\pi/3 \text{ and } y < y_m(i) \\ (x, y) \in L_2(i), & \varphi_w(x, y) \geq 2\pi/3 \\ (x, y) \in R_1(i), & |\varphi_w(x, y)| < 2\pi/3 \text{ and } (x, y) \notin L_1(i) \\ (x, y) \in R_2(i), & |\varphi_w(x, y)| \geq 2\pi/3 \text{ and } (x, y) \notin L_2(i) \end{cases} \quad (5)$$

式中: (x, y) 为 $A(i)$ 中的待处理像素点; $L_1(i)$ 、 $L_2(i)$ 、 $R_1(i)$ 与 $R_2(i)$ 分别是 $A(i)$ 划分得到的 4 个子区域。获取的相位的正确级次 k_p 可描述为

$$k_p(x, y) = \begin{cases} k(x, y) - 1, & (x, y) \in L_1(i) \text{ and } L_2(i) \\ k(x, y), & (x, y) \in R_1(i) \text{ and } R_2(i) \end{cases} \quad (6)$$

利用相位级次 k_p 辅助截断相位 φ_w 进行最终的相位展开可得到携带物体面形信息的连续相位

$\phi(x, y)$, 该过程可描述为

$$\phi(x, y) = \varphi_w(x, y) + 2\pi k_p(x, y). \quad (7)$$

2.4 拓展条纹周期数后的解码与相位展开

当三维测量中有更高测量精度的需求时, 所提方法无需添加额外图案即可对条纹周期数进行拓展。这里引入虚拟相位平面^[29-30]的思想将条纹周期数由 16 拓展到 32, 条纹周期数拓展的解码与相位展开如图 4 所示。

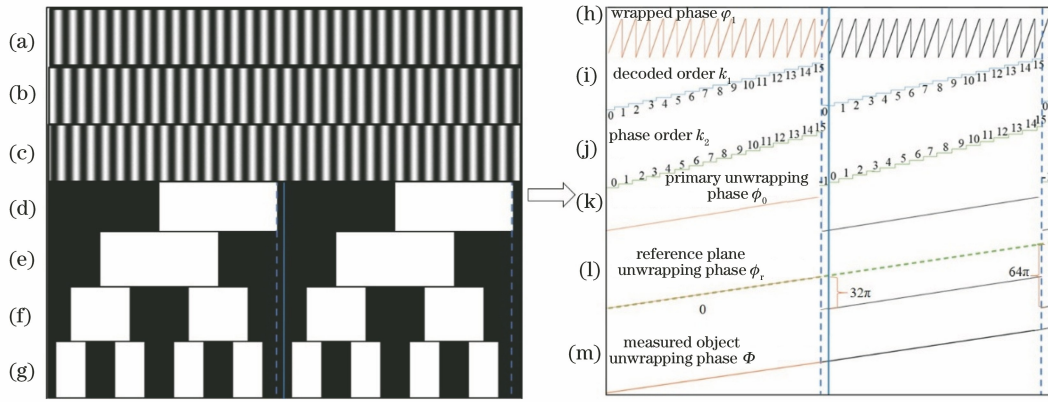


图 4 条纹周期数拓展的级次解码和相位展开示意图。(a)~(c)三步相移正弦条纹图案;(d)~(g)拓展周期后的错位格雷码图案;(h)截断相位 φ_1 ;(i)解码级次 k_1 ;(j)相位级次 k_2 ;(k)初始展开相位 ϕ_0 ;(l)参考平面展开相位 ϕ_r ;(m)待测物体的展开相位 Φ

Fig. 4 Schematic diagrams of order decoding and phase unwrapping of fringe period number expansion. (a)–(c) Three step phase-shifting sinusoidal fringe patterns; (d)–(g) misaligned Gray-code patterns after expanding period number; (h) unwrapped phase φ_1 ; (i) decoding order k_1 ; (j) phase order k_2 ; (k) primary unwrapping phase ϕ_0 ; (l) reference plane unwrapping phase ϕ_r ; (m) measured object unwrapping phase Φ

图 4(a)~(c)为拓展后 32 个周期的正弦条纹图案。图 4(d)~(g)是拓展周期数条纹图编码使用的拓展错位格雷码图案,实竖线左边与右边为完全相同的用于标记 16 个条纹周期的错位格雷码图案。图 4(h)是采用相移公式计算的包裹相位 φ_1 。4 幅拓展错位格雷码图案根据传统格雷码解码方式解码的级次 k_1 如图 4(i) 所示,其码值分布区间为 $[0, 15]$ 。通过 2.3 节提及的子区域划分与码值修正过程可从 k_1 得到如图 4(j) 所示的分布区间在 $[-1, 15]$ 的阶梯状相位级次 k_2 。利用该相位级次 k_2 辅助截断相位展开即可获得如图 4(k) 所示的初始展开相位 ϕ_0 ,由于 ϕ_0 不是全场连续的相位,故需要进行二次展开。根据图 4(l) 中参考平面连续相位 ϕ_r 与 ϕ_0 间的差值为 32π 的整数倍 $(0, 32\pi, 64\pi)$,二次相位展开使用

$$\Phi(x, y) = \phi_0(x, y) + 32\pi \times \text{round} \left[\frac{\phi_r(x, y) - \phi_0(x, y)}{32\pi} \right], \quad (8)$$

式中: $\Phi(x, y)$ 是携带物体面形信息的 32 个条纹周期的全场连续相位,如图 4(m) 所示; $\text{round}(\cdot)$ 是四舍五入函数。由于 32π 的相位变化量在测量时远大于物体高度导致的相位变化量,故二次相位展开方法相对可靠。

条纹周期数拓展可进行推广,对于 2^N 个条纹周期数,利用两组标记条纹周期数为 $T=2^N$ 的错位格雷码图案组成的 N 幅拓展错位格雷码图案解码并对解码结果进行校正,依据得到的相位级次辅助

截断相位获得初始展开相位。然后,根据参考平面的展开相位与初始展开相位间的差值为 $2\pi \times 2^N$ 的整数倍进行二次相位展开,将(8)式中的 32π 替换为 $2\pi \times 2^N$ 即可得到全场的连续相位。这样 N 幅拓展错位格雷码图案便可标记周期数为 2^{N+1} 的投影条纹,进而实现了更高精度的三维形貌测量。

2.2 节的错位格雷码与本节中的拓展错位格雷码辅助相移技术后得到的都是待测物体的全场连续相位,采用相机标定技术^[31-32]与 Li 等^[33]的相位映射高度算法可将连续相位转变为物体的三维形貌信息。系统标定过程中可获取(8)式中所需的参考平面连续相位 ϕ_r 。

3 实 验

为了验证所提方法的可行性与优势,开展了静态孤立物体的对比实验、标准球精度评价实验与复杂动态场景三维形貌测量实验。实验中搭建的高速测量系统如图 5 所示,该系统包括焦距为 16 mm 且分辨率为 1024 pixel \times 672 pixel 的高速相机 (Photron FASTCAM Mini AX200),分辨率为 1920 pixel \times 1080 pixel 的投影仪 (DLP VisionFly 6500) 和用于系统标定的参考平面。

3.1 静态孤立物体对比实验

该部分利用传统格雷码方法、互补格雷码方法、分区间相位展开方法与所提方法分别测量雕像与花形物体组成的孤立物体场景,实验时使用相同周期数的投影条纹以保证各方法在测量精度一致可比的

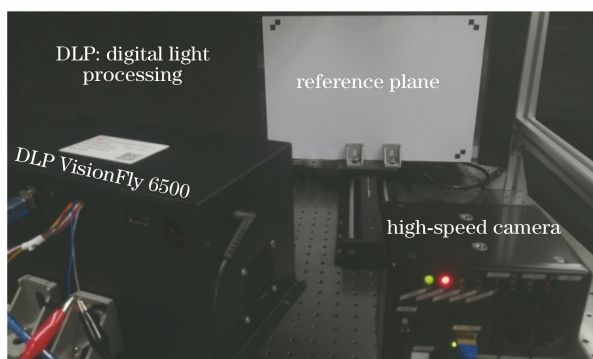


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experimental setup

前提下进行对比分析,重建的三维结果如图 6 所示。图 6 中第一列为实验中拍摄的周期数为 16 的三步

相移变形条纹图案。传统格雷码方法需要利用 4 幅传统格雷码图案(图 6 中间列第 1 行)与这 3 幅条纹图案一起解算,得到的孤立物体重建结果如图 6 中最右列第 1 行所示。可以看出,结果中存在明显的级次跳变错误。在此基础上,互补格雷码方法还需要再附加 1 幅互补格雷码图案(图 6 中间列第 2 行)才能恢复如图 6 中最右列第 2 行所示的结果。分区间相位展开方法使用拍摄的 4 幅传统格雷码图案(图 6 中间列第 3 行)结合这 3 幅条纹图案获得的重建结果如图 6 中最右列第 3 行所示。图 6 中最右列第 4 行为所提方法使用拍摄的 4 幅错位格雷码图案(图 6 中间列第 4 行)辅助这 3 幅条纹图案获得的重建结果。

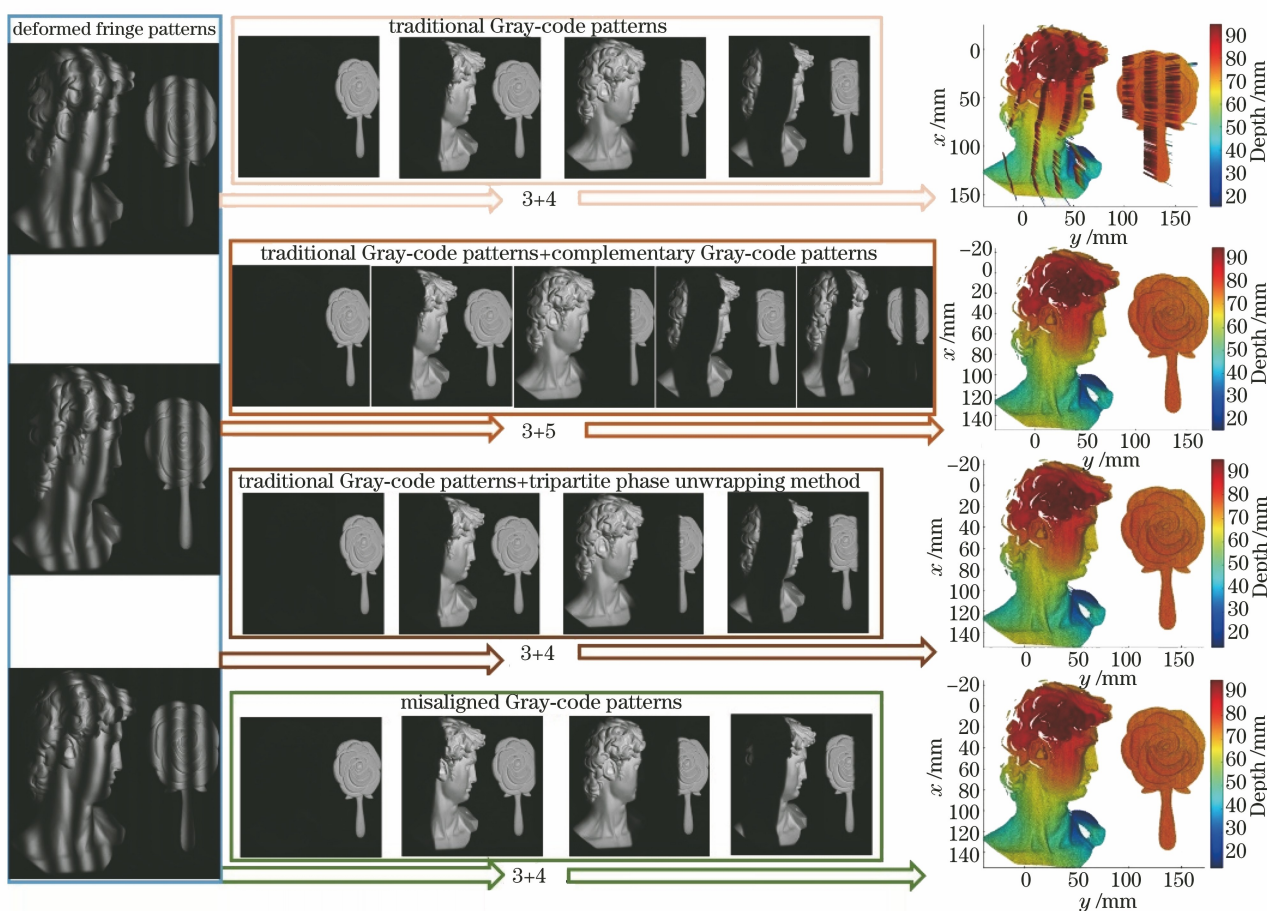


图 6 4 种方法对静态孤立物体的重建结果对比分析

Fig. 6 Comparison of reconstructed results of four methods for static isolated objects

4 种格雷码方法的重建结果可明显地证实所提错位格雷码方法的优越性。首先,所提方法使用与传统格雷码方法相同数量的拍摄图案就成功避免了级次跳变错误的出现,获得了与互补格雷码方法相当的重建结果,但与后者相比,所提方法无需投影额外的互补格雷码图案。其次,所提方

法使用相同数量的格雷码编码图案就能实现与分区间相位展开方法相当的重建精度,且所提方法不需要构建 3 个相位差为 $2\pi/3$ 的截断相位来指导相位展开。因此,所提方法不仅可以用于三步相移算法中,还可以用于更多步数的相移算法中,具有更广的适用范围。

3.2 标准球精度评价实验

为了证实所提方法在周期数拓展后可以有效地提升测量精度,利用所提的错位格雷码方法对半径为 25.3996 mm 的标准球在条纹周期数拓展前后的三维形貌测量结果进行了对比与精度评价。16 个条纹周期的标准球精度评价如图 7 所示。图 7(a)、(b)分别是实验中拍摄的经过标准球调制的 3 幅变形条纹图案与 4 幅变形错位格雷码图案。图 7(c)

展示了所提方法的标准球三维重建结果。图 7(d)是在三维重建结果基础上拟合的标准球体,根据其标准方程可得重建的标准球半径为 25.3616 mm。图 7(e)是测量结果与半径为 25.3996 mm 的拟合球体之间的误差分布,计算得到的均方根误差(RMSE)为 0.2235 mm。拓展后的 32 个条纹周期的标准球精度评价如图 8 所示,重建的标准球半径为 25.3969 mm,其 RMSE 为 0.1609 mm。

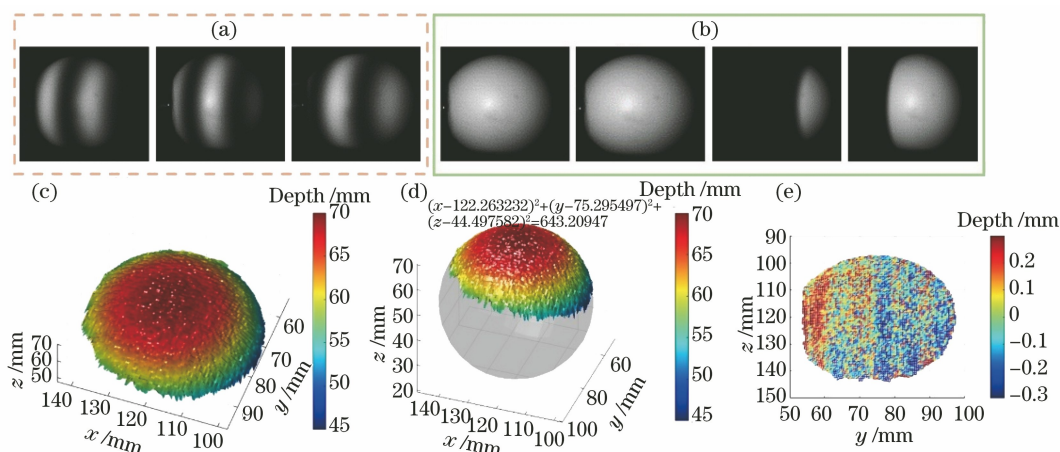


图 7 条纹周期数为 16 的标准球精度评价。(a)拍摄的条纹图案;(b)拍摄的错位格雷码图案;
(c)标准球的重建结果;(d)拟合的标准球;(e)标准球的误差分布

Fig. 7 Accuracy evaluation of standard ball with fringe period of 16. (a) Captured fringe patterns; (b) captured misaligned Gray-code patterns; (c) reconstructed result of standard ball; (d) fitted standard ball; (e) error distribution of standard ball

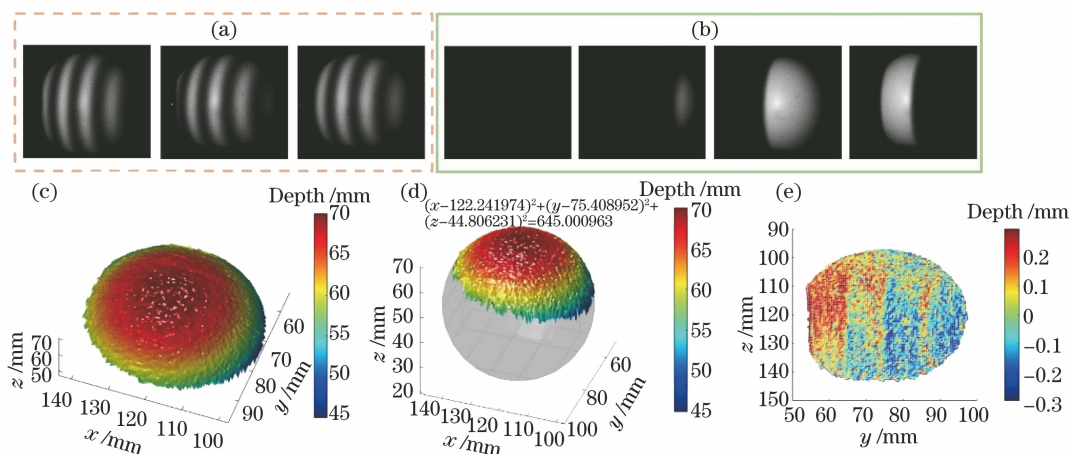


图 8 条纹周期数为 32 的标准球精度评价。(a)拍摄的条纹图案;(b)拍摄的拓展错位格雷码图案;
(c)标准球的重建结果;(d)拟合的标准球;(e)标准球的误差分布

Fig. 8 Accuracy evaluation of standard ball with fringe period of 32. (a) Captured fringe patterns; (b) captured expanded misaligned Gray-code patterns; (c) reconstructed result of standard ball; (d) fitted standard ball; (e) error distribution of standard ball

通过标准球的精度评价实验证实了所提方法在使用相同数量的格雷码编码图案前提下能编码更多条纹周期数的正弦条纹来获得更高精度的测量结果,并且无需投影额外的图案就能较好地避免级次

边沿误码问题。

3.3 复杂动态场景三维形貌测量

在搭建的测量实验系统中,投影仪能以高达 9524 Hz 的速度投影图案,高速相机同步以相同速

度拍摄图案。设计了堆叠多米诺木牌瞬间倒塌场景进行三维面形测量和重建,以验证所提方法在复杂动态场景中的可行性。随意抛掷一块木块击打堆叠木牌,倒塌过程中会出现多个不连续的孤立表面,其上的格雷码图案边界模糊严重,因此测量该动态场景具有很大的挑战性。虽然所提方法无需投影额外图案,但是重建一个三维结果仍然需要 3 幅正弦条纹图案与 4 幅格雷码编码图案。因此,在该动态实验中引用了文献[26]中的时间复用编码策略,将 4 幅拓展错位格雷码图案分开投影,一组三步相移条纹图案后面仅投影一幅拓展错位格雷码图案,解码时使用毗邻的 4 幅拓展错位格雷码图案,这样便能将每个序列中的投影图案数目由 $3+4$ 降为 $3+1$ 。

堆叠木牌动态场景倒塌的持续时间短于 0.5 s ,以 $9524/4=2381\text{ frame/s}$ 速率重建的代表性场景结果如图 9 所示。图 9(a)是运用时间复用编码策

略拍摄到的图案序列。图 9(b)、(d)为倒塌场景的代表性时刻,其对应的三维重建结果分别展示在图 9(c)、(e)中。

木牌瞬间倒塌的三维重建结果,证实了本文所提方法仅需 4 幅拓展错位格雷码图案便可辅助周期数为 32 的投影条纹以 2381 frame/s 的速率实现高效率与高精度的动态三维形貌测量。对比已有的格雷码辅助相移技术,所提方法的周期数拓展在确保测量精度一致情况下重建一个三维结果所需的格雷码编码图案数量最少,提高了测量效率。此外,与文献[26]中提出的分区间相位展开方法相比,该方法利用周期数拓展的方式使得相同数量的格雷码编码图案可以标记更多周期数的条纹,实现了三维动态测量,并且不需要人为构造交错截断相位。因此,所提方法不再仅适用于三步相移算法,拓展了相位方法的使用范围,更为灵活。

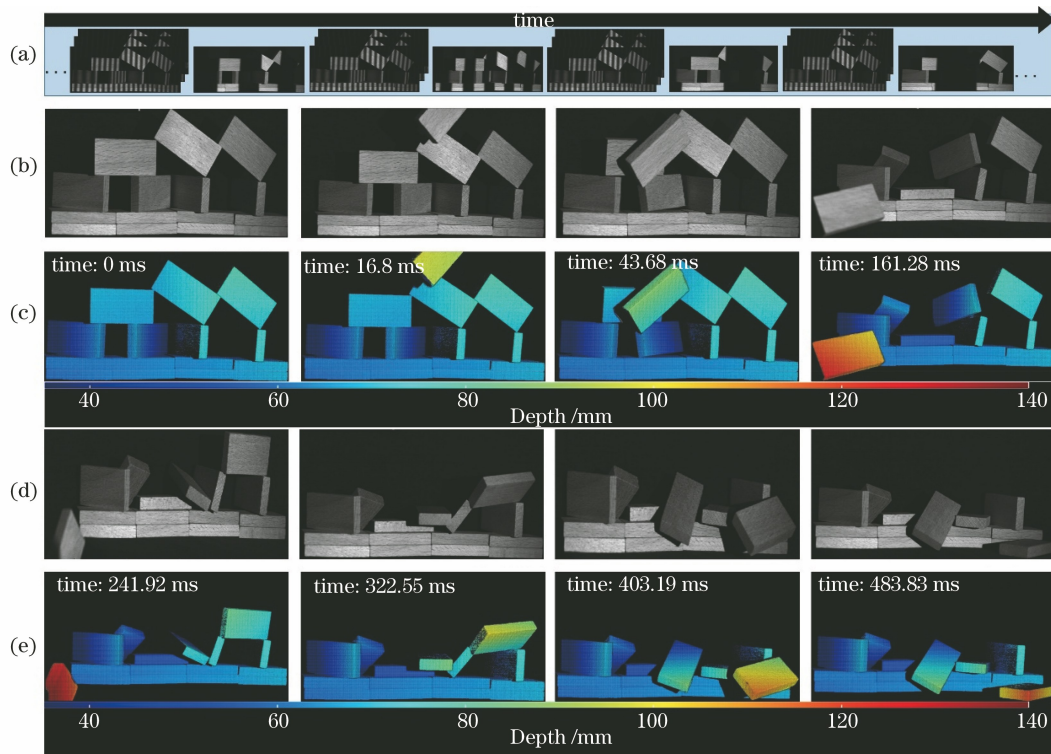


图 9 堆叠木牌倒塌的重建结果。(a)拍摄的图案序列;(b)(d)代表性的倒塌场景;
(c)图 9(b)对应的 3D 帧;(e)图 9(d)对应的 3D 帧

Fig. 9 Reconstructed results of collapsed stack of wooden signs. (a) Captured pattern sequences; (b)(d) representative collapsed scenes; (c) 3D frames corresponding to Fig. 9(b); (e) 3D frames corresponding to Fig. 9 (d)

4 结 论

提出了一种基于错位格雷码辅助相移的动态三维形貌测量方法,利用 N 帧格雷码图案可以实现周期数为 2^{N+1} 的投影条纹的动态三维形貌测量,成倍

增加了格雷码图案标记的条纹周期数进而有效提升了最终的测量精度。在投影图案前,将所有传统格雷码图案移动半个条纹周期使格雷码码字边缘与截断相位完全错开。然后,修正解码级次得到正确的相位级次用来辅助截断相位展开以获得连续的展开

相位。同时,引入一个虚拟相位平面来拓展条纹周期数以提升测量精度。接着,利用两组标记 2^N 个条纹周期的错位格雷码图案组成的拓展错位格雷码图案解码并更正所得相位级次来辅助截断相位可获取初始展开相位。最后,根据参考平面的展开相位与初始展开相位间的差值为 $2\pi \times 2^N$ 的整数倍进行二次相位展开,可得到全场的连续相位。

静态孤立物体、标准球精度评价与木牌瞬间倒塌实验证实了所提方法的可行性。今后的研究工作可定量分析所提方法在搭建的实验测量系统下,针对各种运动场景探究使用 4 幅格雷码编码图案能标记的最多条纹周期数,充分利用实验测量系统实现更高精度的动态三维形貌测量。

参 考 文 献

- [1] Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.
- [2] Song Z, Jiang H L, Lin H B, et al. A high dynamic range structured light means for the 3D measurement of specular surface [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 95: 8-16.
- [3] Sun C R, Zhang X Y. Real-time subtraction-based calibration methods for deformation measurement using structured light techniques[J]. Applied Optics, 2019, 58(28): 7727-7732.
- [4] Zhang J L, Guo W B, Wu Z J, et al. 3D shape measurement using speckle-embedded fringes and lookup table[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0512003.
张嘉玲, 郭文博, 吴周杰, 等. 利用散斑嵌入条纹和查找表进行三维面形测量[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0512003.
- [5] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. Applied Optics, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [6] Chong Q, Cao Y P, Chen Y T. Stroboscopic online phase measurement profilometry for high-speed rotating objects [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0812003.
种晴, 曹益平, 陈雨婷. 高速旋转物体频闪在线相位测量轮廓术[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0812003.
- [7] 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.
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.
- [8] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. Journal of the Optical Society of America, 1982, 72(1): 156-160.
- [9] Su L, Su X, Li W, et al. Application of modulation measurement profilometry to objects with surface holes[J]. Applied Optics, 1999, 38(7): 1153-1158.
- [10] Ghiglia D C, Pritt M D. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software[M]. Weinheim: Wiley, 1998.
- [11] Zuo C, Huang L, Zhang M L, et al. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 85: 84-103.
- [12] Sansoni G, Carocci M, Rodella R. Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors [J]. Applied Optics, 1999, 38(31): 6565-6573.
- [13] Zhang Q C, Wu Z J. Three-dimensional imaging technique based on Gray-coded structured illumination [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303004.
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): 0303004.
- [14] Laughner J I, Zhang S, Li H, et al. Mapping cardiac surface mechanics with structured light imaging [J]. American Journal of Physiology. Heart and Circulatory Physiology, 2012, 303(6): H712-H720.
- [15] Zheng D L, Da F P, Huang H M. Phase unwrapping for fringe projection three-dimensional measurement with projector defocusing [J]. Optical Engineering, 2016, 55(3): 034107.
- [16] Wu Z, Zuo C, Guo W, et al. High-speed three-dimensional shape measurement based on cyclic complementary Gray-code light [J]. Optics Express, 2019, 27(2): 1283-1297.
- [17] Zheng D, Da F, Kemao Q, 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.
- [18] 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.
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.
- [19] Zhang Q C, Su X Y, Xiang L Q, et al. 3-D shape

- measurement based on complementary Gray-code light[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(4): 574-579.
- [20] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 149-158.
- [21] van der Jeught S, Dirckx J J J. Real-time structured light profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 87: 18-31.
- [22] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 106: 119-131.
- [23] Lei S, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [24] Zhao L W, Da F P, Zheng D L. Method for binary grating generation using defocused projection for three-dimensional measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0812005.
赵立伟, 达飞鹏, 郑东亮. 离焦投影三维测量的二值光栅生成方法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0812005.
- [25] Wu Z J, Zuo C, Guo W B, et al. High-speed three-dimensional shape measurement based on cyclic complementary Gray-code light[J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 1283-1297.
- [26] Wu Z J, Guo W B, Li Y Y, et al. High-speed and high-efficiency three-dimensional shape measurement based on Gray-coded light[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(6): 819-829.
- [27] Halioua M, Liu H C. Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1989, 11(3): 185-215.
- [28] Wang Y, Zhang S. Three-dimensional shape measurement with binary dithered patterns [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(27): 6631-6636.
- [29] Li F J, Zhang Q C, Liu S Q, et al. Phase unwrapping method based on virtual phase plane[J]. *Imaging Science and Photochemistry*, 2017, 35(2): 185-192.
李凤娇, 张启灿, 刘守起, 等. 基于虚拟相位平面的相位展开方法 [J]. *影像科学与光化学*, 2017, 35(2): 185-192.
- [30] Pu T T, Wu Z J, Zhang Q C. Dynamic three-dimensional measurement technology based on gray code and phase-shifting algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(5): 0512001.
浦婷婷, 吴周杰, 张启灿. 基于格雷码和相移算法的动态三维测量技术 [J]. *光学学报*, 2021, 41(5): 0512001.
- [31] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [32] Lu X D, Xue J P, Zhang Q C. High camera calibration method based on true coordinate computation of circle center[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0304008.
卢晓冬, 薛俊鹏, 张启灿. 基于圆心真实图像坐标计算的高精度相机标定方法 [J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0304008.
- [33] Li W, Su X, Liu Z. Large-scale three-dimensional object measurement: a practical coordinate mapping and image data-patching method[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(20): 3326-3333.