

基于格雷码和相移算法的动态三维测量技术

浦婷婷, 吴周杰, 张启灿*

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 格雷码辅助实现的相位测量轮廓术具有较好的鲁棒性和抗噪能力, 是三维测量领域的一个研究热点。在已有测量方法的基础上, 提出了一种把格雷码嵌入相移条纹进行复合图案投影的三维面形测量方法, 通过将传统的 3 幅格雷码图案整体向右移动半个条纹周期, 共得到 6 幅格雷码图, 将其交替嵌入三组相同的四步相移条纹中并结合二值离焦技术依次进行投影。通过拍摄得到一系列变形复合条纹图案后, 沿时序综合前后三组变形复合图案信息并进行解码, 从而获得两组错位的条纹级次, 这可从源头上避免格雷码级次边沿的错误; 同时采用传统相移算法计算得到对应的截断相位分布, 时序上的综合解码结果可用于指导截断相位产生并重建被测物体的三维面形信息。静态和动态场景的三维测量实验结果验证了该方法的可靠性、高效性和鲁棒性。该方法每多记录 5 幅图案就可以对应新重建出一个三维面形, 在高速动态三维测量中具有较好的实用性。

关键词 测量; 位移格雷码; 四步相移; 级次边沿误差; 动态测量

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0512001

Dynamic Three-Dimensional Measurement Technology Based on Gray Code and Phase-Shifting Algorithm

Pu Tingting, Wu Zhoujie, Zhang Qican*

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

Abstract Phase measurement profilometry based on Gray code has high robustness and anti-noise ability, and it is a major research hotspot in the field of three-dimensional (3D) measurement. Based on the existing measurement methods, this paper proposes a 3D shape measurement method via embedding the Gray code into the phase-shifting fringe for composite pattern projection. By moving the traditional three Gray code patterns to the right with the shift distance of half a fringe period, six Gray code patterns are obtained, which are alternately embedded into three groups of the same four step phase-shifting fringes and projected in turn combined with binary defocusing technology. After a series of deformed composite fringe patterns are captured, the information of the three groups of deformed composite patterns is synthesized and decoded along the time sequence to obtain two groups of staggered fringe levels, which can avoid the error of Gray code order edge from the source; at the same time, the corresponding truncated phase distribution is calculated by using the traditional phase-shifting algorithm, and the comprehensive decoding results on the time sequence can be used to guide the generation of truncated phase and reconstruct the 3D shape information of the object to be measured. Experimental results of 3D measurement of static and dynamic scenes verify the reliability, efficiency, and robustness of the method. This method can reconstruct a new 3D surface shape for every five more patterns recorded, which has good practicality in high-speed dynamic 3D measurement.

Key words measurement; shifting Gray code; four-step phase-shifting; order edge error; dynamic measurement

OCIS codes 120.5050; 100.2650; 100.5088; 150.6910

收稿日期: 2020-08-20; 修回日期: 2020-09-21; 录用日期: 2020-10-10

基金项目: 国家自然科学基金 (62075143)

* E-mail: zqc@scu.edu.cn

1 引言

光机电一体化融合的光学三维测量方法得到越来越多的应用,在机器视觉、实物仿形、工业检测、产品设计^[1]、生物医学^[2]等领域扮演着重要角色。伴随着各种需求的增加和仪器性能的改善,高速动态三维测量^[3-5]也受到许多学者的关注和研究。在高速动态三维测量领域,条纹投影轮廓术^[6-8]是最常见的测量技术^[9-11],包括傅里叶变换轮廓术(FTP)^[12]和相位测量轮廓术(PMP)^[13-14]等。FTP有着全场分析、单帧获取、高分辨率等优势^[15],常用于实时动态测量^[16]。但是由于带通滤波的局限性,FTP不太适用于表面陡变明显的物体的三维测量。与FTP相比,PMP具有高精度,对背景、对比度和噪声的变化不敏感等优点。近年来随着数字光处理(DLP)技术的飞速发展,数字投影仪能够以 kHz 的速度投影二值条纹,二值离焦投影技术^[17-20]被广泛地运用到高速动态三维测量中。PMP结合二值离焦投影技术可以实现高速、高精度的动态三维测量,相关研究成果不断涌现。

PMP解算出来的相位值在 $(-\pi, \pi]$ 之间,呈锯齿形。为了实现被测物体准确的三维重建,需要将该截断相位展开并恢复成连续相位,这一过程称为相位展开^[21]。在基于PMP的高速三维测量中,格雷码编码辅助相位展开的速度快,算法简单,不会发生误差的传递现象^[22-23],有很大的应用价值。但是格雷码编码方法也存在不足,受投影离焦、环境噪声,以及被测物体表面不均匀反射率或者物体运动等因素的影响,相邻码字交界处易出现解码错误,最终导致相位展开也出现错误^[24]。相关学者们针对这个问题提出了一些解决方法。Laughner等^[25]额外投影了全为“1”的白色图案和全为“0”的黑色图案作为阈值,以对格雷码进行二值化处理,但该方法需要使用10幅图案来恢复一个三维面形。Wang等^[26]结合了传统的空间相位展开和格雷码编码方法来解决运动引起的相位展开误差,但空间相位展开非常耗时,不适合并行计算。Zheng等^[27-28]利用投影仪的离焦投影一幅额外的二值图,以构建全为“1”的图案作为阈值,但是该方法还需借助其他方法来消除剩余的相位展开错误。孙学真等^[29-30]提出了互补格雷码编码方式,通过额外投影一幅格雷码,从根源上避免了级次边沿错误的产生。为了实现动态测量中简单而鲁棒的相位展开且不对其他图案进行

投影,Wu等提出了循环互补格雷码方法^[31]和移动格雷码编码方法^[32],结合三步相移方法计算出物体的截断相位,根据不同的截断相位分布范围,通过使用不同组的级次进行相位展开避免因使用边沿级次引发错误。

文献^[32]在时间轴上高效利用了每幅图案的信息,每多获取7幅图就可以新重建出一个三维结果,该项工作对相移条纹与格雷码图案分开进行有序的投影。为了提高投影图案的利用率,本文在此基础上提出了一种把格雷码嵌入相移条纹形成复合图案的同时进行离焦投影的三维测量技术,该方法减少了三维重建需要的投影图案数量;同时利用虚拟平面方法将编码周期数拓展为格雷码可标记周期的4倍,这样可提升测量精度。在动态三维测量时,通过综合使用时序上前后几组复合变形图案,使得每多获取5幅图就能对应新重建出一个三维结果,从而有效提升了三维测量的效率。

2 测量原理

2.1 位移格雷码编码方法

为避免由于条纹级次与截断相位匹配不准确引起的相位展开错误,本文采用了位移格雷码编码策略^[32]。通过将传统的3幅格雷码 $G_j(j=1,2,3)$ 整体向右移动半个条纹周期,形成新的3幅位移格雷码 $G_j(j=4,5,6)$,因此共获得6幅格雷码图案,码字分布如图1所示。

然后用这6幅格雷码对8个周期的四步相移条纹进行编码,编码原理如图2所示,其中 m 表示投影图案的序列号。

通过将6幅格雷码交替嵌入三组四步相移条纹中,形成三组(12幅)复合图案。将12幅图案经过抖动处理^[33]和适当离焦后依次进行投影。为了区分时间轴上的不同投影序列、便于计算机进行数据处理以及后续的二值化阈值确定,在每组满相移周期复合图案后都投影一幅全“1”白场。投影过程中用高速相机同步获取物体表面和参考平面上的变形复合图案和白场,以15幅图(12幅复合图案和3幅白场)作为一个序列构成循环投影,由于每4幅复合图案后都投影了1幅白场,所以每多投影5幅图就能构造出一个新的序列。整个投影过程如图3所示。

对于四步相移,相位移动量为 $\pi/2$,每幅相移图的表达式可描述为

G_1	0	0	0	0	1	1	1	1
G_2	0	0	1	1	1	1	0	0
G_3	0	1	1	0	0	1	1	0
G_4	1	0	0	0	0	1	1	1
G_5	0	0	0	1	1	1	1	0
G_6	0	0	1	1	0	0	1	1

图 1 格雷码码字分布图

Fig. 1 Distribution of Gray code words

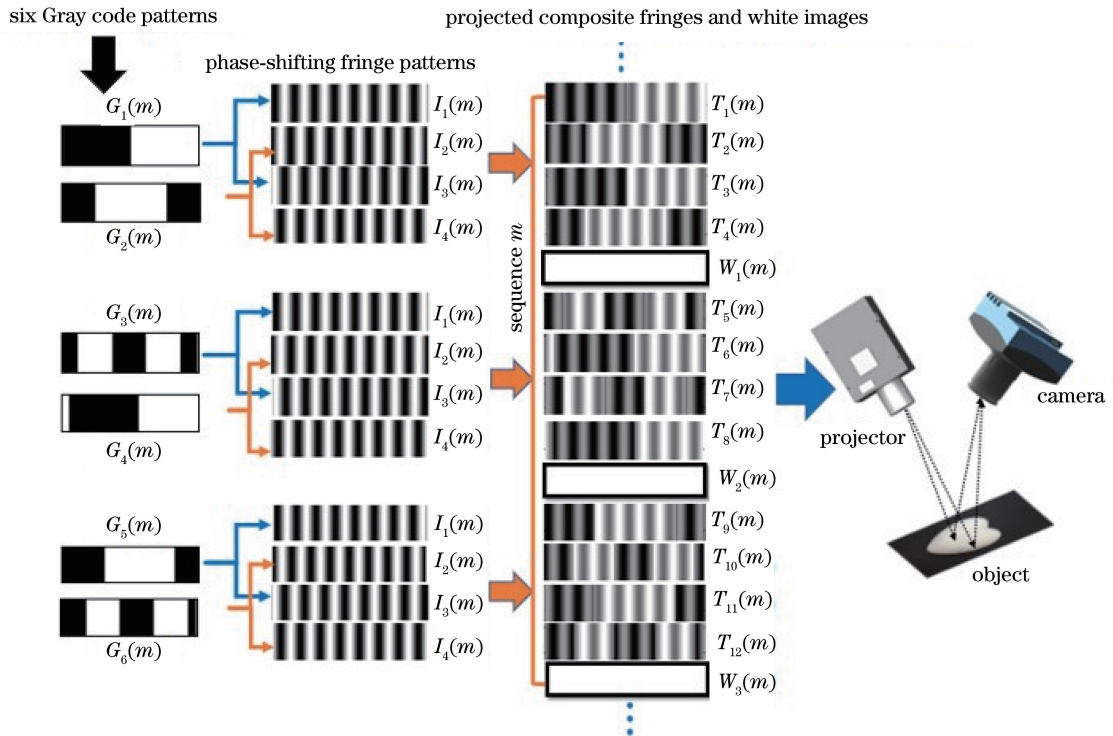


图 2 基于位移格雷码编码的复合条纹

Fig. 2 Composite fringe images based on shifting Gray code encoding

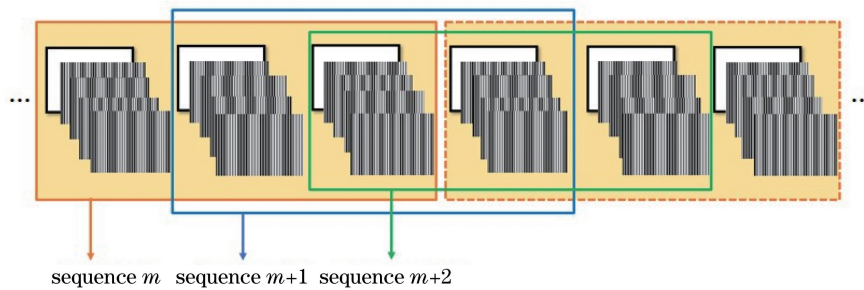


图 3 待投影图案序列

Fig. 3 Pattern sequences to be projected

$$I_i(x, y, m) = R(x, y, m) \left\{ A(x, y, m) + B(x, y, m) \cos \left[\phi(x, y, m) + \frac{(i-1)\pi}{2} \right] \right\}, \quad (1)$$

式中: $I_i(x, y, m)$ ($i=1, 2, 3, 4$) 表示条纹强度; $R(x, y, m)$ 表示物体表面的反射率; $A(x, y, m)$ 表示背景强度; $B(x, y, m)/A(x, y, m)$ 表示条纹的对比度; $\phi(x, y, m)$ 表示被测物体面形对应的截断相位信息。根据相移条纹的相位分析方法, 计算得到的截断相位为

$$\phi(x, y, m) = \arctan \frac{I_4(x, y, m) - I_2(x, y, m)}{I_1(x, y, m) - I_3(x, y, m)} \quad (2)$$

将格雷码编码图案 $G_j(m)$ 嵌入到相移条纹中, 得到的复合条纹图案为

$$T_n(x, y, m) = \begin{cases} P \cdot I_n(x, y, m) + (1 - P) \cdot G_1(m), & \text{when } n = 1, 3 \\ P \cdot I_n(x, y, m) + (1 - P) \cdot G_2(m), & \text{when } n = 2, 4 \\ P \cdot I_{n-4}(x, y, m) + (1 - P) \cdot G_3(m), & \text{when } n = 5, 7 \\ P \cdot I_{n-4}(x, y, m) + (1 - P) \cdot G_4(m), & \text{when } n = 6, 8 \\ P \cdot I_{n-8}(x, y, m) + (1 - P) \cdot G_5(m), & \text{when } n = 9, 11 \\ P \cdot I_{n-8}(x, y, m) + (1 - P) \cdot G_6(m), & \text{when } n = 10, 12 \end{cases} \quad (3)$$

式中: P 是调制因子, 其取值范围为 $0 < P < 1$, 用于控制相移条纹和编码图案的强度比例, 保证图案按照(3)式进行复合后的动态范围在 $[0, 1]$ 之间。本文采用 $P=0.6$, 具体的选取过程将在第 5 节中进行阐述。复合条纹经抖动处理和二值离焦后被投射到被测物体表面, 用高速相机进行同步拍摄以获取对应

的变形条纹。

2.2 解码过程

被测物面和参考平面上变形复合条纹图的解码过程一样, 需要先把拍摄的图像进行二值化, 才能提取出对应的格雷码信息。单个序列内的二值化步骤如图 4 所示。

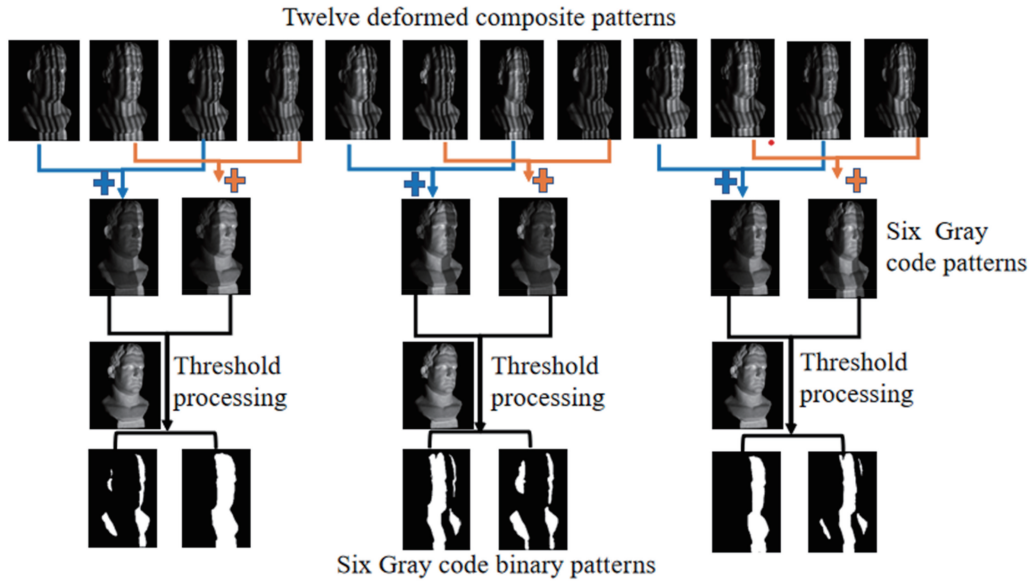


图 4 二值化过程

Fig. 4 Binarization process

对于 12 幅包含四步相移信息的变形复合图案, 把同一相移周期中相移量均为 π 的 1、3 和 2、4 各两幅图案对应叠加后获得如图 4 中第二行所示的 6 幅格雷码编码图案 $P_j(x, y, m)$ ($j=1, 2, \dots, 6$), 再将它们分成三组, 使用对应周期中投影白场时拍摄的图案各像素点的强度半值作为二值化阈值, 解算出如图 4 中第 4 行所示的对应格雷码二值码字图案 $B_j(x, y, m)$ ($j=1, 2, \dots, 6$)。通过在每组满周期相移

条纹之间增加 3 幅白场, 简化了二值化阈值的选取并确保了其精确度。得到的二值码字图案可以用来确定对应相位的条纹级次, 从而进行最终的相位展开。

拍摄图像时记录起始点的随机性导致解算出来的 6 幅二值码字图案顺序难以与编码时所用格雷码图案顺序一样, 其无法与有序条纹级次直接映射, 因此需要把二值码字图案 $B_j(x, y, m)$ ($j=1, 2, \dots, 6$) 进行再排序。定义再排序结果即与条纹级次直接

映射的格雷码为 $C_j(x, y, m)$ ($j = 1, 2, \dots, 6$)。假设序列 1 包含的图案与编码原理图(图 2)呈现的 15

幅待投影图案顺序一致,那么 $C_j(x, y, m)$ ($j = 1, 2, \dots, 6$)为

$$C_j(x, y, m) = \begin{cases} B_j(x, y, m), & \text{if } j = 1, 2, \dots, 6, & \text{when } \text{mod}(m, 3) = 1 \\ \begin{cases} B_{j-2}(x, y, m), & \text{if } j = 3, 4, 5, 6 \\ B_{j+4}(x, y, m), & \text{if } j = 1, 2 \end{cases}, & \text{when } \text{mod}(m, 3) = 2 \\ \begin{cases} B_{j+2}(x, y, m), & \text{if } j = 1, 2, 3, 4 \\ B_{j-4}(x, y, m), & \text{if } j = 5, 6 \end{cases}, & \text{when } \text{mod}(m, 3) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由(4)式得出 $C_j(x, y, m)$ ($j = 1, 2, \dots, 6$)与 $B_j(x, y, m)$ ($j = 1, 2, \dots, 6$)的对应情况如图 5 所

示。为简化表达,图 5 中将 $C_j(x, y, m)$ 和 $B_j(x, y, m)$ 分别记为 $C_j(m)$ 和 $B_j(m)$ 。

$\text{mod}(m,3)=1$	$C_1(m)$ ↓ $B_1(m)$	$C_2(m)$ ↓ $B_2(m)$	$C_3(m)$ ↓ $B_3(m)$	$C_4(m)$ ↓ $B_4(m)$	$C_5(m)$ ↓ $B_5(m)$	$C_6(m)$ ↓ $B_6(m)$
$\text{mod}(m,3)=2$	$C_1(m)$ ↓ $B_5(m)$	$C_2(m)$ ↓ $B_6(m)$	$C_3(m)$ ↓ $B_1(m)$	$C_4(m)$ ↓ $B_2(m)$	$C_5(m)$ ↓ $B_3(m)$	$C_6(m)$ ↓ $B_4(m)$
$\text{mod}(m,3)=0$	$C_1(m)$ ↓ $B_3(m)$	$C_2(m)$ ↓ $B_4(m)$	$C_3(m)$ ↓ $B_5(m)$	$C_4(m)$ ↓ $B_6(m)$	$C_5(m)$ ↓ $B_1(m)$	$C_6(m)$ ↓ $B_2(m)$

图 5 $C_j(x, y, m)$ 和 $B_j(x, y, m)$ 的对应关系

Fig. 5 Correspondence between $C_j(x, y, m)$ and $B_j(x, y, m)$

格雷码 $C_j(x, y, m)$ ($j = 1, 2, \dots, 6$)与对应的十进制数的转换公式为

$$N(x, y, m) = \begin{cases} \sum_{j=1}^3 C_j(x, y, m) \cdot 2^{3-j} \\ \sum_{j=4}^6 C_j(x, y, m) \cdot 2^{6-j} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $N(x, y, m)$ 表示十进制数; $C_1(x, y, m) \sim C_3(x, y, m)$ 表示传统格雷码码字; $C_4(x, y, m) \sim C_6(x, y, m)$ 表示位移格雷码码字。

最终得出格雷码转化出的十进制数与条纹级次之间的对应关系如表 1 所示。

表 1 十进制数与条纹级次之间的对应关系

Table 1 Correspondence between decimal number and fringe order

Decimal number	0	1	3	2	6	7	5	4
Fringe order	0	1	2	3	4	5	6	7

对于(2)式计算出的截断相位分布中的每个像素,只要找到它在二值图案中对应的格雷码码字,并将其转化为十进制数,就可得出该截断相位的条纹级次。

2.3 相位展开

选取序列 m 中第二组包含完整相移周期的 4 幅变形复合图案,用(2)式计算得到截断相位 $\phi(x, y, m)$ 。通过上面的解码过程得到的截断相位 $\phi(x, y, m)$ 、传统格雷码解码得到的级次 $K(x, y, m)$ 以及位移格雷码解码得到的级次 $K_s(x, y, m)$ 之间的

对应关系如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,本文 8 个周期的格雷码编码投影条纹的对应级次是 0~7。本文方法的位移格雷码是通过将传统格雷码整体向右移动半个条纹周期得到的,利用(5)式及表 1 得到的图 6(c)所示的条纹级次中出现两个级次 7,因此需要进行修正,将级次 0 之前的半个条纹周期标记出来。按照级次递增规律,将该半周期对应的位移格雷码映射级次标记为 -1,该修正过程可表示为

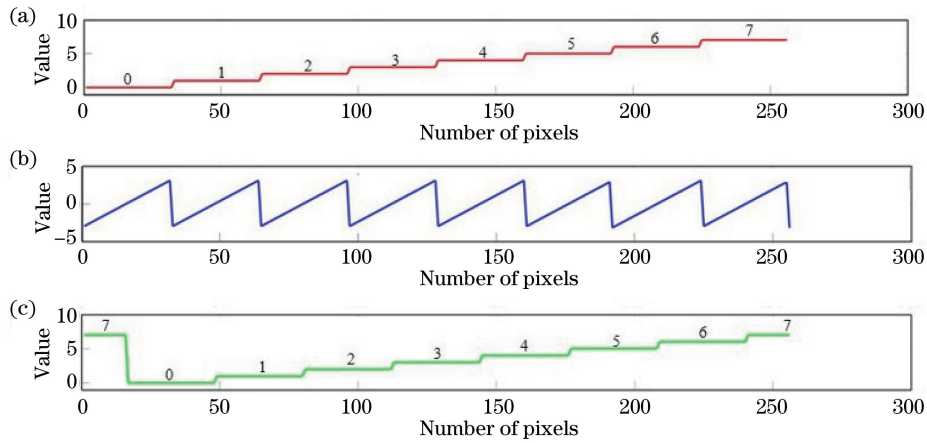


图 6 截断相位与两组条纹级次之间的对应关系。(a)传统格雷码解码得到的条纹级次；
(b)截断相位；(c)位移格雷码解码得到的条纹级次

Fig. 6 Correspondence between wrapped phase and two sets of fringe orders. (a) Fringe order obtained by traditional Gray code decoding; (b) wrapped phase; (c) fringe order obtained by shifting Gray code decoding

$$K_G(x, y, m) = \begin{cases} -1, & \text{if } \phi(x, y, m) < 0 \\ 7, & \text{if } \phi(x, y, m) > 0 \end{cases}, \text{ when } K_s(x, y, m) = 7, \quad (6)$$

$$K_s(x, y, m) = 0, 1, \dots, 6$$

式中： $K_G(x, y, m)$ 是修正后的位移格雷码映射级次。为避免使用级次边沿的码字，把截断相位值划分为三个范围，将不同范围内的截断相位匹配不同组的条纹级次并进行相位展开，相位展开的计算公式为^[32]

$$\Phi(x, y, m) = \begin{cases} \phi(x, y, m) + 2\pi \cdot [K_G(x, y, m) + 1], & \text{if } \phi(x, y, m) < -\frac{\pi}{2} \\ \phi(x, y, m) + 2\pi \cdot K_G(x, y, m), & \text{if } \phi(x, y, m) > \frac{\pi}{2} \\ \phi(x, y, m) + 2\pi \cdot K(x, y, m), & \text{if } -\frac{\pi}{2} \leq \phi(x, y, m) \leq \frac{\pi}{2} \end{cases}, \quad (7)$$

式中： $\Phi(x, y, m)$ 为展开相位； $\phi(x, y, m)$ 为截断相位； $K_G(x, y, m)$ 为通过位移格雷码解码并进行修正后的级次； $K(x, y, m)$ 为传统格雷码解码得到的级次。

2.4 基于虚拟平面的周期数拓展和相位展开

上述内容阐述的方法只能展开 8 个条纹周期，周期数过少，这限制了系统的测量精度。为了解决这个问题，引入了虚拟平面的思想^[34]。将 8 个周期的复合条纹图在空间上复制 3 次，以拓展到 32 个周期，通过增加 3 段虚拟平面，构造 $0 \sim 64\pi$ 的相位调制。通过投影拍摄获取变形条纹后，使用前述解码方法和相位展开方法以 8 个周期为单位进行第一次相位展开，该方法对于参考平面和物体都能得到 4 个 8 周期条纹展开相位，此时整场展开相位（称之为初级展开相位）并不连续，需进行二次展开。参考平面的连续展开相位与物体初级展开相位之间的差值为 16 的整数倍，据此把参考平面初级展开相位直接

通过空间相位展开方法展开，形成的连续展开相位可用来辅助被测物体进行二次相位展开。整个拓展过程和对应的相位展开过程如图 7 所示。

拓展周期前被测物体的截断相位 $\phi(x, y, m)$ 如图 7(a) 中实线所示，拓展部分对应的被测物体截断相位如图 7(a) 中三角形标注的实线所示。根据前述方法，用格雷码辅助相位展开得到的物体初级展开相位如图 7(b) 中实线，参考平面的二次展开相位用图 7(b) 中三角形标注的实线表示，是整场连续的。利用参考平面的展开相位 $\phi_1(x, y, m)$ 对被测物体初级相位展开结果 $\Phi(x, y, m)$ 进行二次相位展开：

$$\Phi_1(x, y, m) = \Phi(x, y, m) + 16\pi \cdot \left\{ \text{round} \left[\frac{\phi_1(x, y, m) - \Phi(x, y, m)}{16\pi} \right] \right\}. \quad (8)$$

最终得到整场连续的被测物体展开相位 $\Phi_1(x, y, m)$ ，如图 7(c) 所示。

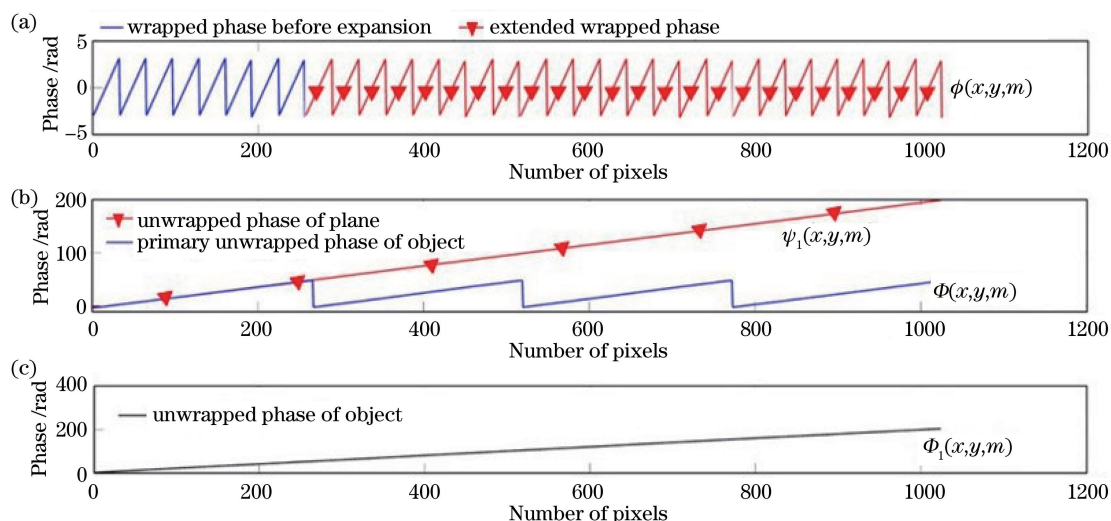


图 7 拓展成 32 个条纹周期后的相位展开过程。(a)截断相位;(b) 4 个 8 周期条纹初级展开相位和参考面的展开相位;(c)被测物体展开相位

Fig. 7 Phase unwrapping process of extended 32-period fringe. (a) Wrapped phase; (b) 4 primary unwrapping phase of 8-period fringe and unwrapped phase of reference plane; (c) unwrapped phase of object to be tested

2.5 复合图案中调制因子的选取

(3)式中的调制因子 P 值越大,嵌入的格雷码图案强度越小,复合条纹的正弦性越好,但复合图案对比度将越低,格雷码解码的难度也会随之增加。经过理论和实验分析得出 P 值与物体表面灰度强度及对比度互不影响,因此讨论 P 值取值时不考虑物体表面反射率。为了保证该方法的最终测量精

度, P 值的选取必须兼顾复合条纹的正弦性和对比度。为此,采用不同 P 值的复合条纹对标准平面使用本文方法进行了测量,根据测量结果的误差对应选取合适的 P 值。图 8 给出了通过利用具有不同 P 值的复合条纹测量同一标准平面得到的绝对相位的标准差(STD)值分布情况。

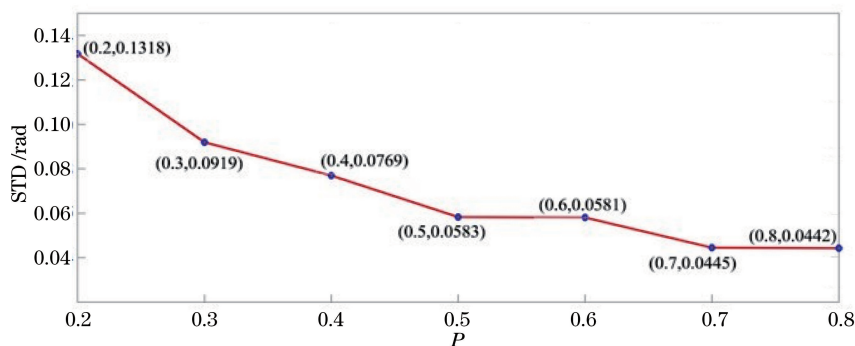


图 8 不同 P 值下标准平面绝对相位的 STD 值分布情况

Fig. 8 STD distribution of absolute phase of standard plane corresponding to different P

从图 8 中可以看出,随着 P 值的增加,STD 值逐渐减小, P 值为 0.5~0.8 时测量精度较高且变化趋势平缓,因此将 P 值的初步取值范围确定为 0.5~0.8。为进一步确定实际环境下 P 值的最佳取值,需将不同 P 值对应的二值化出错率进行对比,选用 0.5~0.8 之间的 P 值对静态物体进行了测量,二值化出错区域如图 9 所示。图中椭圆圈部分表示二值化出错的范围,箭头指向区域为放大后的主要出错区域。当 P 值为 0.5、0.6 时出错概率

小于 0.7 和 0.8。从二值化结果来看,在测量表面高度变化较明显的物体时, P 值太大会导致复合条纹对比度过低,造成二值化结果不准确,引起解码错误。为提高解码准确度且达到最大测量精度,本文选取 $P=0.6$ 进行实验。以上分析过程和 P 值的选取范围在实际应用中具备一定的参考价值,但为确保最佳实验效果,应该根据实际测量时的不同系统构成、不同测量环境事先做好最佳 P 值的确定工作。

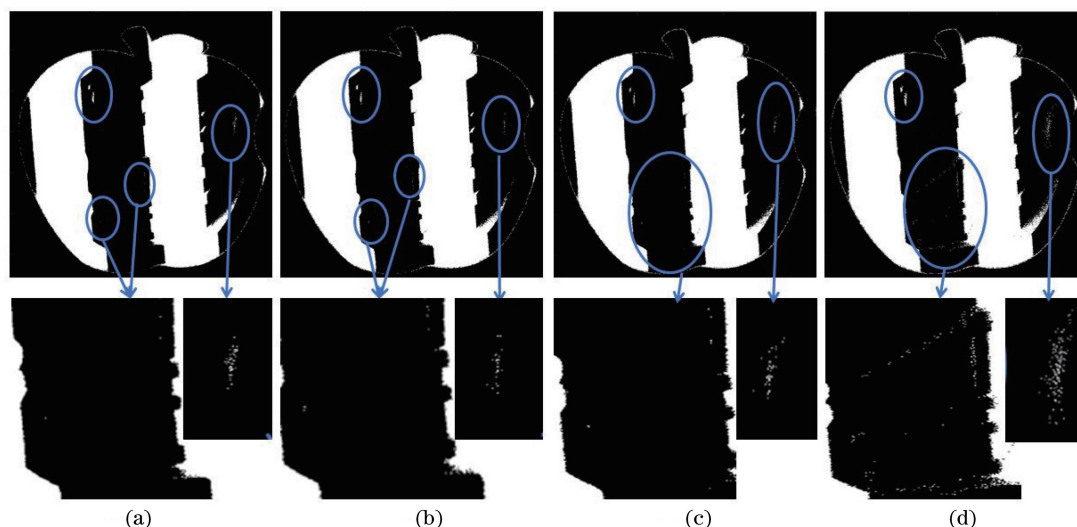


图 9 不同 P 值对应的格雷码图案二值化结果。(a) $P=0.5$; (b) $P=0.6$; (c) $P=0.7$; (d) $P=0.8$

Fig. 9 Binarization results of Gray code patterns corresponding to different P . (a) $P=0.5$; (b) $P=0.6$; (c) $P=0.7$; (d) $P=0.8$

3 实验结果

3.1 静态物体的三维测量

为了验证所提方法的可行性和鲁棒性,在实验室环境中分别用传统格雷码方法和本文方法进行了孤立物体的三维面形测量对比实验。测量过程中使用的设备包括 DLP 投影仪 (Light Crafter 4500) 和高速 CMOS 相机 (Photron FASTCAM Mini

UX100)。投影仪的分辨率为 $912 \text{ pixel} \times 1140 \text{ pixel}$,相机的分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。在整个实验过程中,投影仪的图案刷新率设置为 100 Hz ,投影条纹的周期数为 32,并用投影仪的触发信号触发相机进行图像的同时拍摄。

第一组实验的测量场景为一个时钟和一个花朵模型,第二组实验测量的是一个人像雕塑和一个心形模型。测量过程和得到的连续相位结果如图 10 所示。

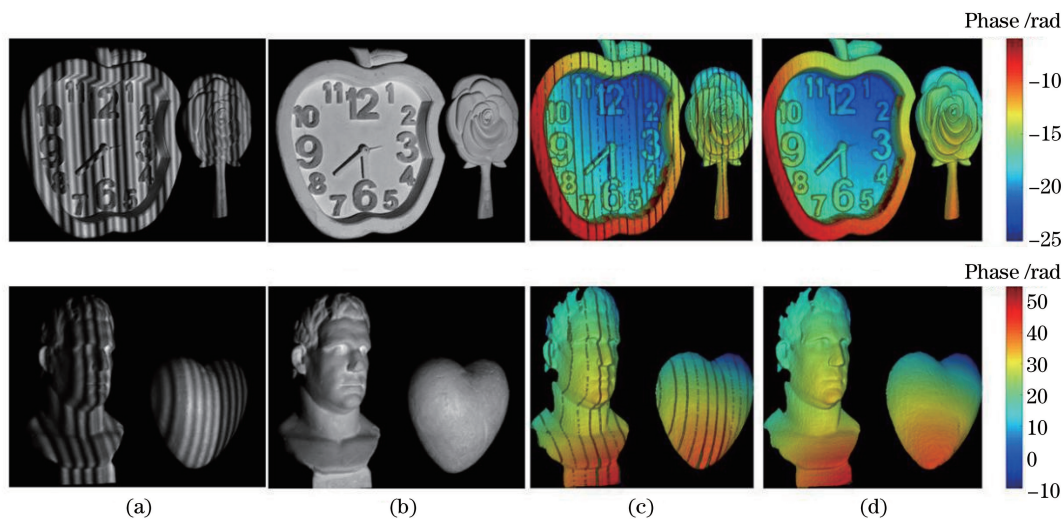


图 10 孤立物体的三维测量结果。(a) 一帧复合变形图案;(b) 拍摄所得的白场;(c) 使用传统格雷码方法重建的相位结果;(d) 使用本文方法重建的相位结果

Fig. 10 3D measurement results of isolated objects. (a) One frame of composite deformed pattern; (b) white field pattern obtained by camera; (c) restored phase using traditional Gray code method; (d) restored phase using proposed method

从上面两组实验结果可以看出,本文方法成功获得了静态孤立场景的正确相位分布,待通过系统标定

获得参数之后完成相位-高度映射,即可成功重建被测场景的三维形貌分布,测量过程具有很强的可靠性

和鲁棒性。在相同条件下,利用传统格雷码得到的实验结果在级次边沿易发生相位展开错误,这是因为传统格雷码编码方法受投影离焦、环境噪声、被测物体表面不均匀反射率以及物体运动等因素的影响,容易在相邻码字交界处出现解码级次错误,最终导致相位

展开也出现错误。而本文方法的测量结果并没有产生这类错误,弥补了传统格雷码的缺陷。

为验证本文方法不受物体表面反射率的影响,对花朵模型表面进行处理,以使反射率分布不均,测量结果如图 11 所示。

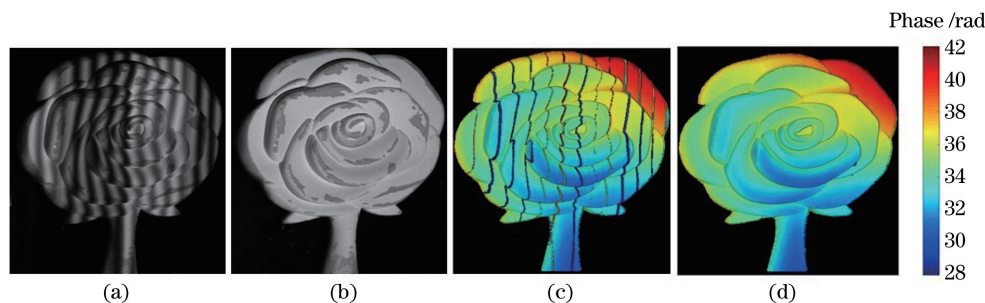


图 11 表面反射率不均匀的花朵模型的测量结果。(a) 一幅复合变形图案;(b) 拍摄所得的白场;(c) 使用传统格雷码方法重建的相位结果;(d) 使用本文方法重建的相位结果

Fig. 11 Measurement results of flower model with nonuniform surface reflectivity. (a) One frame of composite deformed pattern; (b) white field pattern obtained by camera; (c) restored phase using traditional Gray code method; (d) restored phase using proposed method

从实验结果可看出物体表面反射率的分布情况并不会影响测量结果,所提方法在测量表面反射率不均匀的物体时具有适用性和鲁棒性,重建结果明显比传统格雷码方法的结果好。

3.2 动态场景的三维测量

为了验证本文方法同样适用于高速动态三维测量,对风扇旋转的动态过程进行了三维测量和重建,测量过程中使用的设备同上一个实验一样。整个实

验过程中将投影仪的图案刷新率设置为 2000 Hz,相机的拍摄速度为 2000 frame/s。

图 12 展示了相机开始拍摄复合变形图案后第 8, 113, 270.5, 430.5, 625.5, 783 ms 6 个时刻的变形条纹图案、对应的白场图案和最终三维面重建所需的连续相位分布展开结果。实验结果表明该方法完全适用于高速动态三维测量。

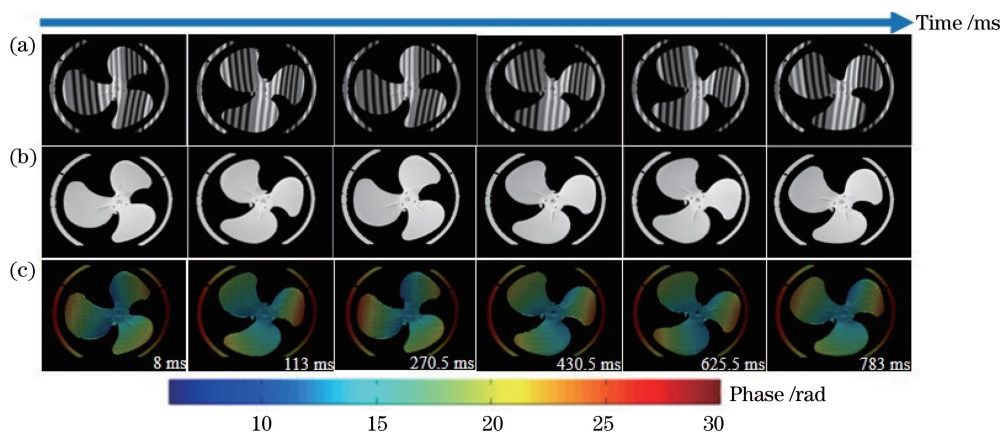


图 12 对处于旋转过程中的风扇的动态三维测量结果。(a) 高速相机记录的 6 帧复合条纹图案;(b) 带有物体信息的白场;(c) 与图 12(a) 中条纹对应的重建相位结果

Fig. 12 Dynamic 3D measurement results of fan during rotation. (a) Six frames of composite fringe patterns obtained by high-speed camera; (b) white fields with object information; (c) restored phase results corresponding to Fig. 12(a)

4 结 论

提出了一种基于位移格雷码和四步相移算法的

动态三维测量技术。把 3 幅传统格雷码整体向右移动半个条纹周期后得到的 6 幅格雷码一起嵌入到 3 组四步相移条纹中,结合二值离焦技术进行复合图

案投影,通过格雷码的位移编码和解码,避免了级次边沿的相位展开错误。由于 3 幅格雷码图案只能对应编码 8 个周期的条纹,因此借助虚拟平面方法来解决该格雷码编码条纹周期数过少的问题,通过把原始的 8 个编码周期拓展到 32 个周期进行测量,既能保证测量结果的精度也扩大了系统测量范围。该方法用于高速动态测量时,以 15 幅图作为一个序列,每个序列内都能对应一组截断相位,通过解出两组互相错开半个周期的条纹级次进行相位展开,沿时间轴重复利用每幅图案的信息,每多获取 5 幅图就能得出一个新的三维测量结果。与传统格雷码方法相比,本文方法弥补了传统方法级次边沿易出现相位展开错误的缺陷;与近期的格雷码相关研究相比,本文方法在保持位移格雷码优势、保证测量精度的同时减少了三维重建所需的投影图案数量,提高了投影图案的利用率,具有高效性。通过两组孤立物体的静态场景对比实验、表面反射率不均匀物体的测量实验以及旋转风扇的动态场景三维测量实验,验证了测量方法的可行性和鲁棒性。但是,本文工作中额外间插投影的白场增加了三维重建所需的图像数量,降低了测量效率。今后的研究工作可以通过改变编码策略,或者利用投影图案本身提取、确定对应的二值化阈值等方法进一步提高三维测量的速度和效率。

参 考 文 献

- [1] Lin C H, He H T, Guo H, et al. Fringe projection measurement system in reverse engineering [J]. *Journal of Shanghai University (English Edition)*, 2005, 9(2): 153-158.
- [2] Lippitsch M E, Draxler S, Kieslinger D, et al. Capillary waveguide optodes: An approach to optical sensing in medical diagnostics [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(19): 3426-3431.
- [3] Zhang Q C, Su X Y. Research progress of dynamic three-dimensional shape measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010001.
张启灿, 苏显渝. 动态三维面形测量的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 010001.
- [4] Zuo C, Tao T Y, Feng S J, et al. Micro Fourier transform profilometry (μ FTP): 3D shape measurement at 10, 000 frames per second [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 102: 70-91.
- [5] 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.
- [6] Salas L. Profilometry by fringe projection [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(11): 3307-3314.
- [7] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: A review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 106: 119-131.
- [8] Wang Z Y, Gao N, Zhang Z H. Three-dimensional shape measurement based on parallel four color channels fringe projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815022.
王张颖, 高楠, 张宗华. 基于并行四颜色通道条纹投影的三维测量术 [J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815022.
- [9] Zhang L, Chen Q, Zuo C, et al. Real-time high dynamic range 3D measurement using fringe projection [J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 24363-24378.
- [10] Wang Z Y, Zhang Z H, Gao N, et al. Single-shot 3D shape measurement of discontinuous objects based on a coaxial fringe projection system [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): A169-A178.
- [11] Yu H T, Yu H T, Yu H T, et al. Dynamic 3-D measurement based on fringe-to-fringe transformation using deep learning [J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9405-9418.
- [12] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [13] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [14] 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.
- [15] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 35(5): 263-284.
- [16] Su X Y, Zhang Q C. Dynamic 3-D shape measurement method: A review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 191-204.
- [17] Lei S Y, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [18] Zhang S. Flexible 3D shape measurement using projector defocusing: Extended measurement range [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(7): 934-936.
- [19] Gong Y, Zhang S. High-resolution, high-speed three-dimensional shape measurement using projector defocusing [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(2):

- 023603.
- [20] 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.
- [21] Itoh K. Analysis of the phase unwrapping algorithm [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(14): 2470.
- [22] Sansoni G, Corini S, Lazzari S, et al. Three-dimensional imaging based on Gray-code light projection: Characterization of the measuring algorithm and development of a measuring system for industrial applications [J]. *Applied Optics*, 1997, 36 (19): 4463-4472.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Wang Y J, Zhang S, Oliver J H. 3D shape measurement technique for multiple rapidly moving objects [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (9): 8539-8545.
- [27] Zheng D, Da F, Huang H. Phase unwrapping for fringe projection three-dimensional measurement with projector defocusing [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(3): 034107.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Wu Z J, Guo W B, Zhang Q C. High-speed three-dimensional shape measurement based on shifting Gray-code light [J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 22631-22644.
- [33] Wang Y J, Zhang S. Three-dimensional shape measurement with binary dithered patterns [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(27): 6631-6636.
- [34] 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.