

# 光学学报

## 基于时间复用编码的高速三维形貌测量方法

王浩然, 吴周杰, 张启灿\*, 陈正东, 李训仁

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

**摘要** 提出一种基于时间复用编码的高效、强鲁棒性结构光三维测量方法, 通过在时间序列上重新设计排布相移与编码图案, 充分利用高速记录的相邻图像时序信息的关联性, 将重建一个三维结果所需的投影序列图案数量降至 3 幅, 提高了测量的编码和重建效率。同时, 利用通用分区间相位展开方法, 提前避免级次跳变错误的产生, 保证了测量的鲁棒性。分析比较了二值格雷码和多灰度格雷码两类编码方案在该方法下的优势以及适用场景。实验结果表明: 所提方法每多获取 3 幅条纹图案就能重建一个新的三维结果, 能实现  $3174 \text{ frame} \cdot \text{s}^{-1}$  的高速三维形貌重建; 二值格雷码编码方法的鲁棒性和抗噪声能力更强, 适用于拍摄速度远高于物体运动速度的复杂高噪声动态场景, 而以四灰度格雷码编码方法为代表的多灰度格雷码编码方法的抗运动模糊能力更强, 适用于重建运动速度较快但环境噪声较低的动态场景。

**关键词** 测量; 结构光投影; 动态三维形貌; 格雷码; 时间复用

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221146

### 1 引言

作为一种精确灵活的光学三维形貌测量方法, 条纹投影轮廓术(FPP)受到学者们的广泛关注, 并已在实际中应用<sup>[1-6]</sup>。在 FPP 中, 投影仪将编码条纹图案投射到被测物体上, 另一侧的摄像机记录由被测物体面形高度调制产生的变形条纹, 通过定量分析条纹相位变化, 利用三角测量原理还原物体的展开相位<sup>[7]</sup>, 进一步通过标定将相位映射到真实的三维形貌<sup>[8-10]</sup>。傅里叶变换<sup>[11-12]</sup>和相移技术<sup>[13]</sup>是两种最为常用的条纹分析手段, 用来从变形条纹图中提取相位信息。在使用三角函数得到截断相位后, 需要进行相位展开(空间相位展开<sup>[14]</sup>或时间相位展开<sup>[15]</sup>)来消除相位歧义性, 将截断相位展开为连续相位。时间相位展开方法主要包括多频方法<sup>[16-17]</sup>、外差方法<sup>[18-20]</sup>、数论方法<sup>[21-22]</sup>以及格雷码方法<sup>[23-24]</sup>。相比前 3 种方法, 传统格雷码方法的鲁棒性和抗噪声能力更强, 因此在复杂静态场景的测量中得到了较多应用<sup>[25]</sup>, 但编码效率相对较低。

传统的二值格雷码(Gray code)由 Frank<sup>[26]</sup>于 20 世纪 40 年代提出, 根据编码要求, 格雷码相邻码字只有 1 位不同, 即编码汉明距离为 1, 是一种错误最小化的编码方式, 具有较强的鲁棒性和抗噪声能力, 被应用到结构光三维形貌测量中<sup>[27]</sup>: 利用相移技术计算出截断相位, 并通过格雷码辅助展开得到连续相位, 以消除截断

相位的歧义性。

随着高速相机、数码光处理(DLP)投影仪及图形处理器(GPU)等硬件设备的快速发展, 加上二值离焦技术的提出<sup>[28-29]</sup>, 高精度高速三维形貌测量受到越来越广泛的关注<sup>[30-31]</sup>。但是, 传统的格雷码结合相移技术的编码效率不高, 还容易受物体快速移动产生的运动模糊影响, 在高速动态场景下表现不佳。为了改善格雷码在高速动态场景测量中的表现, Zheng 等<sup>[32]</sup>提出了三灰度格雷码方法, 将格雷码码字变为对应黑白灰的三级, 减少投影格雷码的数量。受该方法启发, He 等<sup>[33]</sup>将三灰度格雷码拓展到四灰度, 进一步提升编码效率。此类方法是以牺牲格雷码信噪比来换取更高的测量效率。为了在保留格雷码高鲁棒特性的基础上进一步提升格雷码编码效率, Wu 等<sup>[34]</sup>先后提出了循环互补格雷码、移动格雷码编码方式<sup>[35]</sup>以及分区间相位展开方法<sup>[36-37]</sup>, 解决了格雷码码字边缘跳变产生误差的问题; 提出时间复用编码序列, 通过复用时间序列上前后的格雷码, 减少实际需要投影的格雷码数量<sup>[37]</sup>, 该方法结合三步相移条纹图构成循环投影的序列图案, 将重建一个三维结果需要的投影图案序列数量降低到 4 幅。

在前期工作的基础上, 本文提出一种基于时间复用编码的高速三维形貌测量方法。首先, 在时间序列上重新排列待投影结构光图案, 复用四步相移计算背

收稿日期: 2022-05-17; 修回日期: 2022-06-16; 录用日期: 2022-06-30; 网络首发日期: 2022-07-10

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)、四川省重点研发计划(2021YFS0398)、中央高校基本科研业务费专项(2022SCU12010)

通信作者: \*zqc@scu.edu.cn

景光强与截断相位,同时复用格雷码图案辅助计算相位级次,提升测量效率;其次,利用通用分区间相位展开方法提前避免级次跳变错误,保证测量的鲁棒性;最后,分析比较了四灰度格雷码与二值格雷码编码在本文方法下的优势,给出两种编码方法的适用范围。

## 2 基本原理

### 2.1 格雷码辅助相移技术

使用四步相移技术生成具有  $\pi/2$  相移量的 4 幅相移图,这 4 幅相移图分别用  $I_1(x, y)$ 、 $I_2(x, y)$ 、 $I_3(x, y)$  和  $I_4(x, y)$  表示。

$$\begin{cases} I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \phi(x, y) \\ I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[ \phi(x, y) + \frac{\pi}{2} \right] = A(x, y) - B(x, y) \sin \phi(x, y) \\ I_3(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos [\phi(x, y) + \pi] = A(x, y) - B(x, y) \cos \phi(x, y) \\ I_4(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[ \phi(x, y) + \frac{3\pi}{2} \right] = A(x, y) + B(x, y) \sin \phi(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $A(x, y)$  为背景光强;  $B(x, y)$  为条纹调制度;  $\phi(x, y)$  为经高度调制的相位。在传统方法中,通过四步相移算法计算截断相位:

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

由于计算截断相位时使用了反正切函数,得到的相位被截断在  $(-\pi, \pi]$  中,需要利用其他方法辅助计算相位级次(例如本文使用的格雷码),将截断相位展开为连续相位,即携带了物体三维形貌信息的  $\phi(x, y)$ 。在高速动态场景的实际测量中,往往需要将上述标准正弦条纹经抖动技术<sup>[28,38]</sup>处理得到抖动二值条纹,进一步经投影仪轻微离焦投影,以降低图像比特数为代价极大地提高投影速度。

在传统二值格雷码中,每个格雷码图案只有两种不同的强度——“白色”和“黑色”,因此  $M$  幅格雷码图案可以最大限度地标记  $2^M$  个相位级次。在后续解码处理中,需要利用设定的阈值  $T$ ,将灰度分布的格雷码图案二值化为 0 和 1 的码字:

$$G_{c,i}(x, y) = \begin{cases} 0, & G_{c,i}(x, y) \leq T \\ 1, & G_{c,i}(x, y) > T \end{cases} \quad (3)$$

在二值格雷码解码过程中,相位级次的计算公式为

$$k(x, y) = \text{LUT}_1[V(x, y)] = \text{LUT}_1 \left[ \sum_{i=1}^M G_{c,i}(x, y) \times 2^{(M-i)} \right], \quad (4)$$

式中:  $G_{c,i}(x, y)$  表示第  $i$  幅二值格雷码图案;  $M$  为格雷码图案的总量;  $V(x, y)$  为解码后的十进制码字;  $\text{LUT}_1(\cdot)$  表示查找二值格雷码的十进制码字和条纹级次之间的已知映射关系。

为了减少投影格雷码图案数量,四灰度格雷码有白、浅灰、深灰、黑 4 个灰度级,分别对应 0、1、2、3 这 4 个码字,编码的效率得到提升,  $M$  幅四灰度格雷码图案可以最大限度地标记  $4^M$  个相位级次,因此对于相同

数量的条纹周期,四灰度格雷码所需的编码图案数量更少。类似地,四灰度格雷码通过阈值转换为码字,转换公式为

$$G_{L,i}(x, y) = \begin{cases} 0, & G_{L,i}(x, y) \leq T_1 \\ 1, & T_1 < G_{L,i}(x, y) \leq T_2 \\ 2, & T_2 < G_{L,i}(x, y) \leq T_3 \\ 3, & G_{L,i}(x, y) > T_3 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $G_{L,i}(x, y)$  表示第  $i$  幅四灰度格雷码图案。在理想条件下,灰度格雷码归一化的码字灰度对应为 0、1/3、2/3、1,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  分别为 1/6、1/2、5/6,使用 4 幅相移图的平均值分别乘以 1/3、1、5/3 后得到 3 个阈值  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 。

四灰度格雷码解码时,可以采用与二值格雷码类似的方法,经式(6)的  $\text{LUT}_2(\cdot)$  查找四灰度格雷码的十进制码字和条纹级次之间的已知映射关系,获得相位级次:

$$k(x, y) = \text{LUT}_2[V(x, y)] = \text{LUT}_2 \left[ \sum_{i=1}^M G_{L,i}(x, y) \times 4^{(M-i)} \right]. \quad (6)$$

最后,利用二值或者四灰度格雷码解码后的相位级次  $k(x, y)$ ,可将截断相位展开为连续相位  $\Phi(x, y)$ ,用于最终的三维形貌重建:

$$\Phi(x, y) = \phi(x, y) + 2\pi \times k(x, y). \quad (7)$$

### 2.2 时间复用编码方法

为了实现高速测量,投影仪需要使用二值离焦技术来实现较高的投影速度。本文使用抖动技术,将相移条纹图、四灰度格雷码的 8 bit 降为 1 bit,再经过投影仪离焦以实现 9524 Hz 的投影速度。二值格雷码图案不需要经过抖动处理,但离焦会模糊黑白码字的边缘。处理效果如图 1 所示,其中图 1(a)所示为第 1 幅四灰度格雷码灰度图案及其部分区域在抖动处理前后的对比,图 1(b)所示为第 4 幅二值格雷码灰度图案及其部分区域在离焦前后的对比,图 1(c)所示为一幅相移条

纹图及其部分区域在抖动处理前后的对比。

前文提到,传统格雷码编码效率不高,当编码周期数为 16 时,至少需要三步相移图和 4 幅格雷码图案才

能完成对待测物体的一次测量,生成的序列如图 2(a) 所示。为了提高结构光编码效率,本文提出了时间复用编码方法。

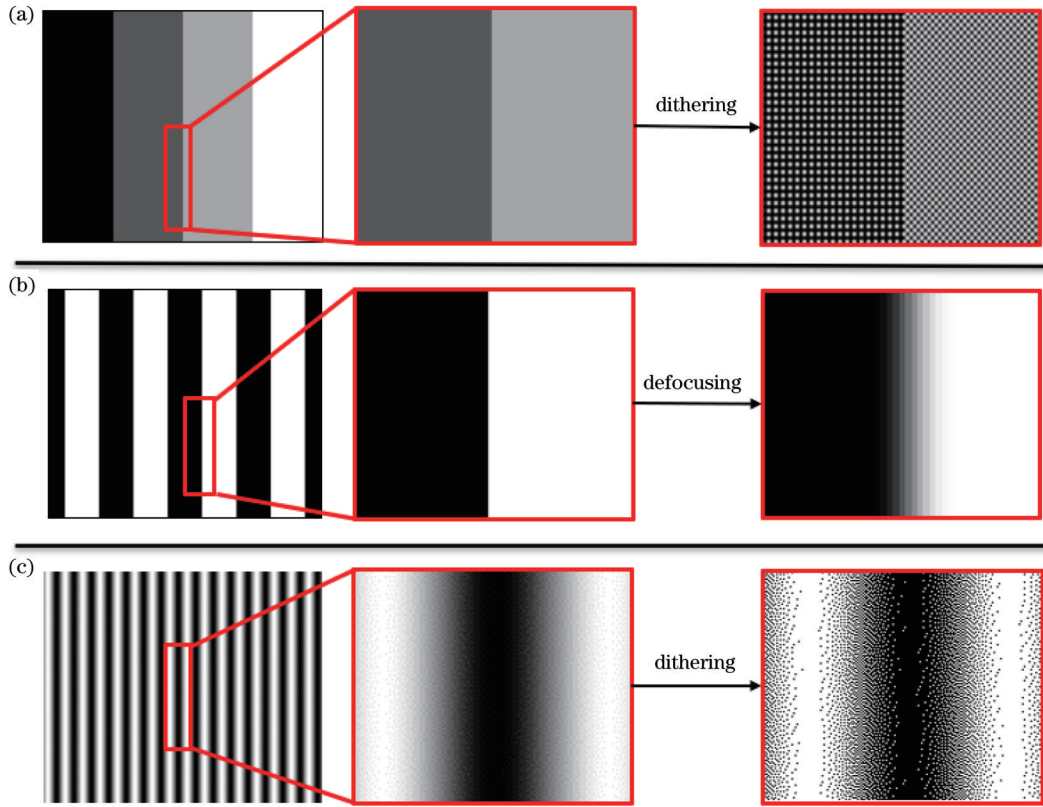


图 1 投影图案抖动或离焦效果。(a)第 1 幅四灰度格雷码灰度图案边缘抖动前后对比;(b)第 4 幅二值格雷码灰度图案边缘离焦前后对比;(c)正弦相移条纹抖动前后对比

Fig. 1 Dithering or defocusing effects of projected patterns. (a) Comparison before and after dithering of edges in the first quaternary Gray code pattern; (b) comparison before and after defocusing of edges in the fourth binary Gray code pattern; (c) comparison before and after dithering of sinusoidal phase-shifting fringe

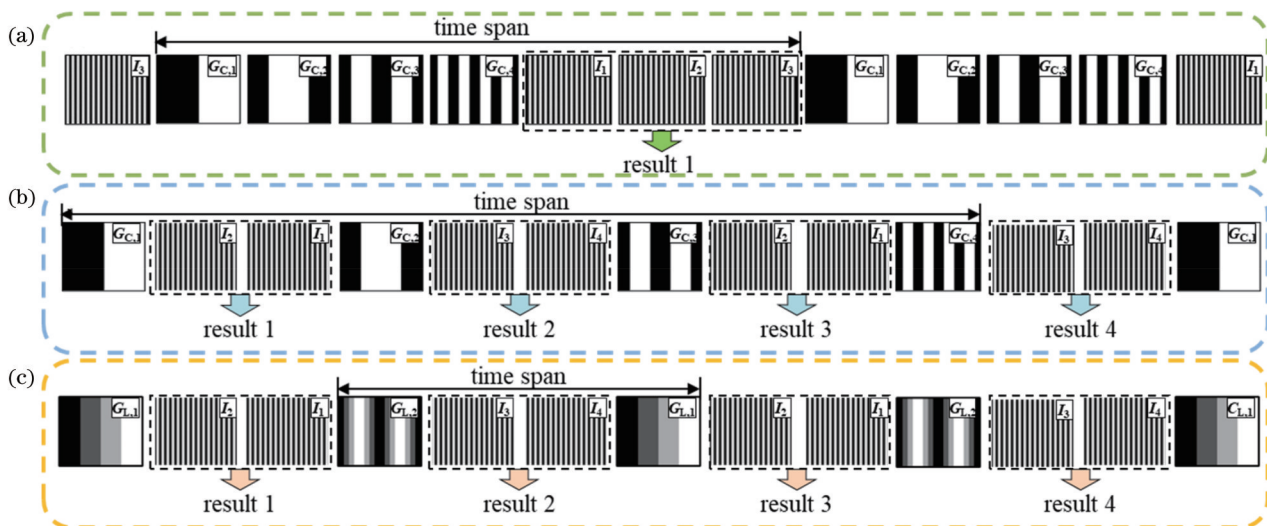


图 2 3 种方法对应的投影图案序列示意图。(a)传统格雷码辅助相移条纹方法;(b)时间复用二值格雷码辅助相移条纹方法;(c)时间复用四灰度格雷码辅助相移条纹方法

Fig. 2 Schematic of corresponding projected pattern sequences of three methods. (a) Traditional Gray code method assisted phase shift fringe; (b) time multiplexed binary Gray code method assisted phase shift fringe; (c) time multiplexed quaternary Gray code method assisted phase shift fringe



对于四步相移条纹,依据式(1)中四步相移的表达,按  $I_2, I_1, I_3, I_4$  的顺序循环排列相移条纹图,如图 2(b)所示。通过此排列,相邻条纹  $I_1(x, y)$  和  $I_3(x, y)$  或者  $I_2(x, y)$  和  $I_4(x, y)$  间的相位正好相差  $\pi$ 。将结构光编码图案依次插入上述序列中每两幅相移条纹图案的间隔,当条纹周期数为 16 时,所需使用的二值格雷码数量为 4,四灰度格雷码数量为 2,分别得到如图 2(b)、(c)所示的序列,用  $G_{c,i}$  表示二值格雷码图案,  $G_{L,i}$  对应四灰度格雷码图案。因此,利用所提时间复用编码方

法,可将每个序列中投影图案数量从传统编码方法的 7 幅降低为 3 幅,编码效率得到了大幅度提升。

使用该时间复用编码方法,待编码条纹周期数目变化,编码结构光图案数量也会发生变化。将两种格雷码统一用  $G_i$  表示,将总计  $M$  幅格雷码编码图案 ( $G_1, G_2, \dots, G_i, \dots, G_M$ ),按上述策略插入到四步相移条纹中,得到如图 3 所示的排列方式。其中,每一幅编码图与两幅相移图 ( $G_n I_{2,1}$  或  $G_n I_{3,4}$ ) 称为一个序列单元,每一个序列单元在时间轴上都有对应的编号  $n$ 。

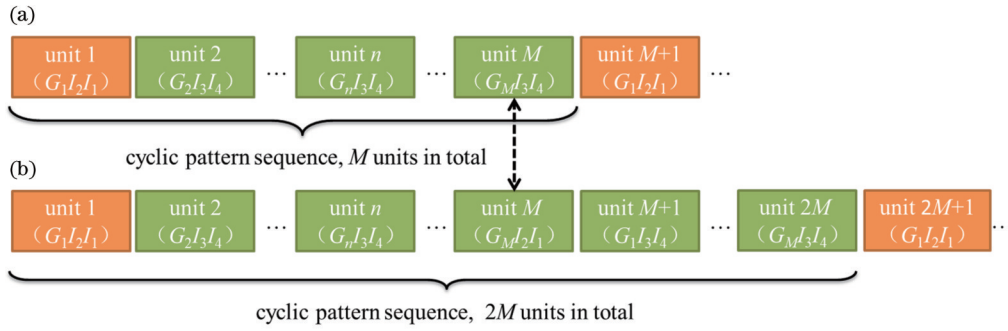


图 3 四步相移条纹图与  $M$  幅格雷码图案的时间复用排列。(a)  $M$  为偶数;(b)  $M$  为奇数

Fig. 3 Time multiplexing arrangement of four-step phase-shifting fringe patterns and  $M$  Gray code patterns.

(a)  $M$  is even; (b)  $M$  is odd

在实际测量中,将设计的投影图案排为序列,由投影仪读取后,沿时间轴上循环投影即可。当  $M$  为偶数时,如图 3(a)所示,编号为  $M+1$  的单元与编号为 1 的单元相同,需要的图案序列共  $M$  个单元,并以  $G_M I_{3,4}$  结束。经过循环投影,使得  $G_1 \sim G_M$  与四步相移在时间轴上复用;当  $M$  为奇数时,如图 3(b)所示,编号为  $M+1$  的单元与编号为 1 的单元不相同,所需要的图案序列共  $2M$  个单元,保证同样以  $G_M I_{3,4}$  结束,以达到充分利用投影图案获取尽可能多的三维重建结

果的目的。

### 2.3 时间复用解码方法

将上述编码循环投影至被测场景,再利用高速采集设备同步采集。数据处理时,需要对获取的图像序列进行时序解码。图 4 为时间复用解码过程示意图,单元  $n$  为单元 1 到单元  $M$  中一个随机的序列单元,  $n$  的两幅相移条纹图案是否相同,由  $n$  的奇偶性决定:  $n$  为偶数时,这两幅条纹图案与图 4 中一致 ( $I_3 I_4$ );  $n$  为奇数时,两幅条纹图案则不同 ( $I_2 I_1$ )。

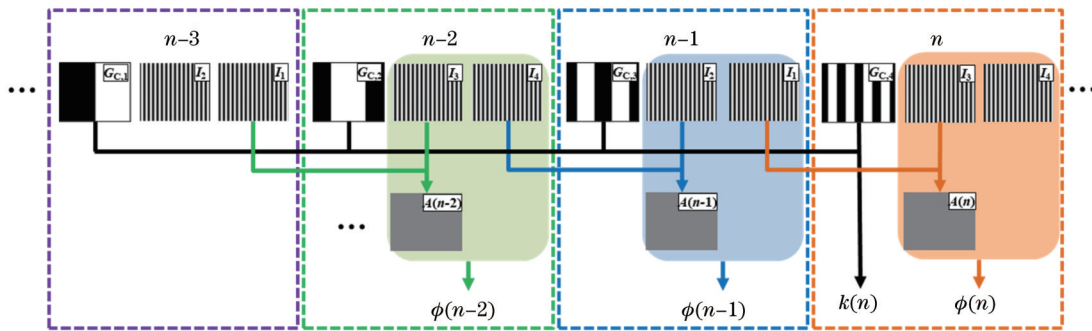


图 4 时间复用解码过程示意图

Fig. 4 Schematic of time multiplexing decoding process

在图 4 所示的编号为  $n-1$  和  $n$  的序列单元中,两幅相移条纹图案  $I_1(x, y, n-1)$  与  $I_3(x, y, n)$ , 或  $I_2(x, y, n-1)$  与  $I_4(x, y, n)$  的相位都相差  $\pi$ ,可利用这两幅条纹图案计算提取背景光强  $A(x, y, n)$ 。

$$A(x, y, n) = \begin{cases} \frac{I_2(x, y, n) + I_4(x, y, n-1)}{2}, \text{mod}(n, 2) = 0 \\ \frac{I_1(x, y, n-1) + I_3(x, y, n)}{2}, \text{mod}(n, 2) = 1 \end{cases} \quad (8)$$

同样,在图 4 中,编号序列单元  $n$  中的  $I_3(x, y, n)$ 、 $I_4(x, y, n)$  也与序列单元  $n+1$  结合,用于计算拍摄条纹图案对应的背景光强分布  $A(x, y, n)$ 。对于编号为  $n$  的序列单元,得到背景光强  $A(x, y, n)$  后,截断相位  $\phi(x, y, n)$  的计算公式为

$$\phi(x, y, n) = \begin{cases} \arctan \frac{A(x, y, n) - I_2(x, y, n)}{I_1(x, y, n) - A(x, y, n)}, \text{mod}(n, 2) = 0 \\ \arctan \frac{I_4(x, y, n) - A(x, y, n)}{A(x, y, n) - I_3(x, y, n)}, \text{mod}(n, 2) = 1 \end{cases} \quad (9)$$

进一步地,截断相位经格雷码辅助展开,计算连续相位  $\Phi(x, y, n)$  的公式为

$$\Phi(x, y, n) = \phi(x, y, n) + 2\pi \times k(x, y, n) \quad (10)$$

按式(8)提取背景光强,依据式(9),使用每个序列中的两幅相移条纹图案和由式(9)算出的背景光强可计算得到截断相位,并按式(10)展开相位。利用此策略,对相移图案和编码结构光图案同时在时间轴上进行复用,每多获取两幅相移条纹图就可重新解得一组截断相位,最终将每个投影序列中的投影图案数量降低到 3 幅,极大提升了动态测量中的编码效率。如表 1 所示,以 16 周期的条纹为例,与已有的基于格雷码的方法相比,利用所提方法计算一个三维结果需要的图

案数量最少。

表 1 各种基于格雷码的方法所需的图案数量统计(16 周期条纹图案)

Gray code-based method	Number of patterns in every sequence for one new 3D result
CCGC <sup>[27]</sup>	3+4+1
SGC <sup>[28]</sup>	3+4+4
TOGC <sup>[29-30]</sup>	3+1
Proposed method	2+1

### 2.4 通用分区间相位展开方法

文献[34-35]指出,反正切函数的特点使相位计算结果从  $\pi$  跳变到  $-\pi$ ,产生不期望的截断跳变,此处对应的展开结果容易出错且不可靠;同时高速测量中物体运动和二值离焦都容易模糊格雷码码字边缘,使计算的相位级次产生一定偏移。这两类错误统称跳变误差,广泛存在于格雷码辅助相移技术中,直接导致截断相位与相位级次边缘错位,展开相位错误。同时,所提的时间复用编码策略主动将编码图案分散投影到多组相移图案中,因此级次跳变错位会更加严重。为了解决上述问题,使用图 5 所示的通用分区间相位展开方法<sup>[36]</sup>来避免级次跳变的产生。

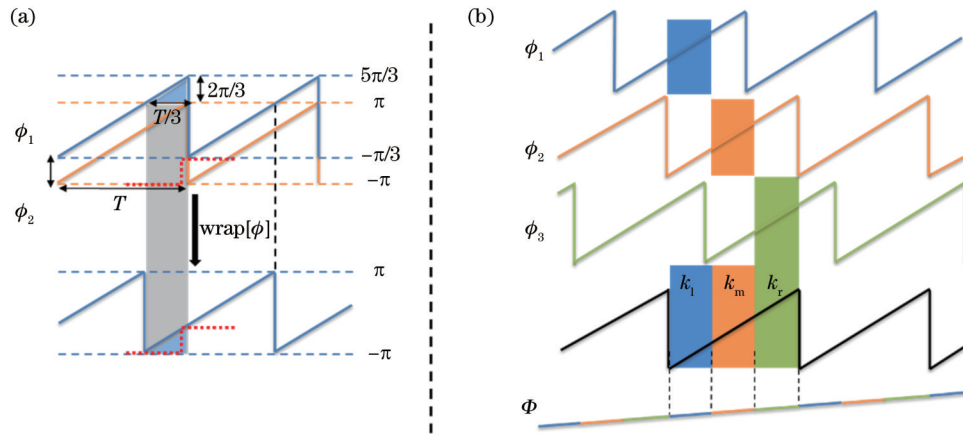


图 5 分区间相位展开示意图。(a)通过平移  $\phi_2(x, y)$  构造  $\phi_1(x, y)$  的过程;(b)相位展开

Fig. 5 Schematic of phase unwrapping with divided regions. (a) Process of transforming  $\phi_2(x, y)$  to create  $\phi_1(x, y)$ ; (b) phase unwrapping

此方法将直接计算的截断相位  $\phi(x, y)$  向左平移  $2\pi/3$  构造  $\phi_1(x, y)$ , 向右平移  $2\pi/3$  构造  $\phi_3(x, y)$ , 如图 5(a) 所示, 根据代表像素的横轴和代表幅值的纵轴之间固定的比例关系, 对幅值整体加上或减去  $2\pi/3$ , 相当于  $1/3$  周期的左右相位平移, 以此将截断相位的边缘和级次的边缘错开。

$$\begin{cases} \phi_1(x, y) = \text{wrap}[\phi(x, y) + 2\pi/3] \\ \phi_2(x, y) = \phi(x, y) \\ \phi_3(x, y) = \text{wrap}[\phi(x, y) - 2\pi/3] \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\text{wrap}[\phi]$  函数用来限制  $\phi_2(x, y)$ 、 $\phi_3(x, y)$  依然截

断在  $(-\pi, \pi]$ , 计算公式为

$$\text{wrap}[\phi] = \begin{cases} \phi - 2\pi, \phi > \pi \\ \phi + 2\pi, \phi \leq -\pi \end{cases} \quad (12)$$

对于 3 组相位  $\phi_1(x, y)$ 、 $\phi_2(x, y)$ 、 $\phi_3(x, y)$ , 根据文献[37]的方法, 通过截断相位的数值选择中间部分, 使用单调性划分出对应的级次区间  $k_1(x, y)$ 、 $k_m(x, y)$ 、 $k_r(x, y)$ , 并分别利用条纹级次的不同区间进行展开, 保证每一级次的截断相位中间部分都是用可靠度高的不同区间信息指导展开, 从源头避免级次跳变错误的产生。

最终的展开相位还需要消除在构造  $\phi_2(x, y)$ 、 $\phi_3(x, y)$  时引入的平移量  $2\pi/3$ :

$$\Phi(x, y) = \begin{cases} \phi_1(x, y) + 2\pi k_1(x, y) - 2\pi/3 \\ \phi_2(x, y) + 2\pi k_m(x, y) \\ \phi_3(x, y) + 2\pi k_r(x, y) + 2\pi/3 \end{cases} \quad (13)$$

分区间相位展开的方法在不影响原有相位  $\phi(x, y)$  的前提下, 通过平移构造额外的两组相位分布, 将截断相位边缘与格雷码字边缘错开, 避免了跳变误差, 极大增强了格雷码辅助相移技术在高速场景测量时的鲁棒性。

### 3 实验

为了验证所提方法的可行性与两种格雷码的优势, 进行了两个动态三维形貌测量实验。实验中搭建了图 6 所示的高速测量系统, 该系统包括分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 、镜头焦距为  $16 \text{ mm}$  的高速相机 (Photron FASTCAM Mini AX200) 与  $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$  分辨率的投影仪 (DLP Vision Fly 6500), 以及用于系统标定的参考平面。

#### 3.1 两种格雷码对比实验

以二值格雷码测量石膏像为例, 时间复用的解码

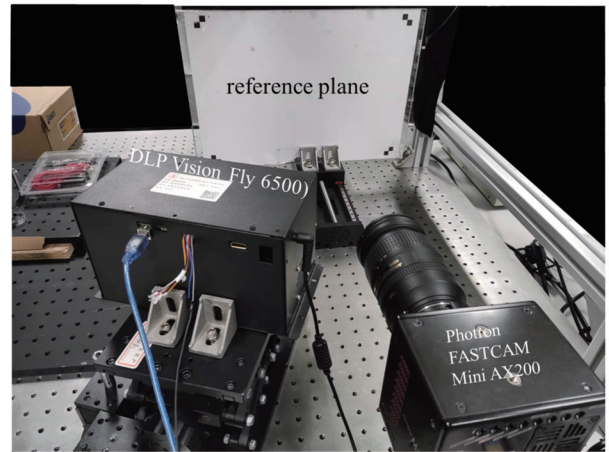


图 6 高速三维形貌测量系统

Fig. 6 High speed 3D morphology measurement system

重建过程如图 7 所示, 得到新单元  $n+1$  的图案序列, 即一幅格雷码图案和两幅四步相移图案组合后, 使用新获得的格雷码图案  $G_{C,4}(n+1)$  与先前记录的  $G_{C,3}(n)$ 、 $G_{C,2}(n-1)$ 、 $G_{C,1}(n-2)$  计算相位级次, 并按 2.3 节和 2.4 节的方法计算截断相位, 通过相位级次将截断相位展开, 计算展开相位。

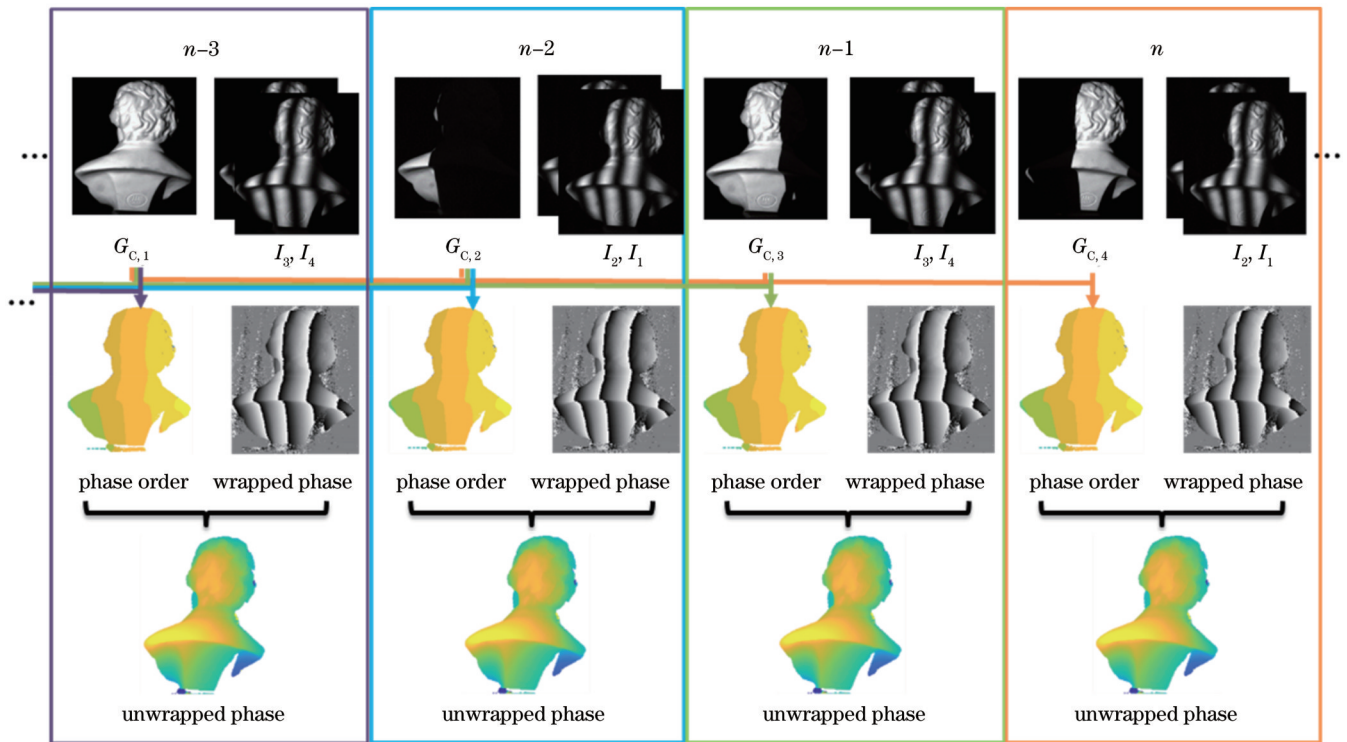


图 7 时间复用计算示意图

Fig. 7 Schematic of time multiplexing calculation

为了进一步比较两种格雷码编码方式在所提时间复用方法下的优缺点, 使用图 2(b)、(c) 所示的两种循环序列, 比较了投影 16 周期四步相移条纹的相位展开结果。在实验中, 放置在转台上的石膏像以  $3 \text{ r/min}$  的

转速匀速转动, 通过将投影仪与相机的同步速度分别设置成  $60$ 、 $250$ 、 $500 \text{ Hz}$  来比较两种编码方式的抗运动模糊能力。另外, 实验中还测量不同表面材质的两类物体来比较两种编码方式的抗噪能力。



使用两种格雷码编码的实验结果对比如图 8 所示,为了更清晰地展示实验结果,图 8 放大了所选方框

中的区域,正确的放大结果默认用黑色边框,并将由噪声和运动引起的错误结果分别标记为类型(1)和(2)。

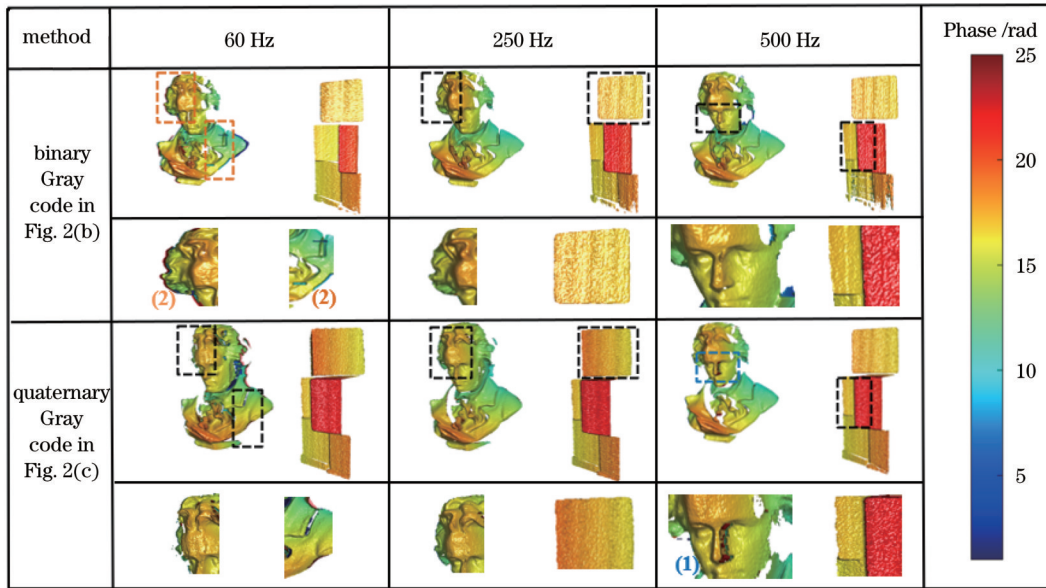


图 8 不同投影速度下两种编码方法的恢复结果和错误分析。其中(1)表示由噪声引起的误差,(2)表示由运动引起的误差  
Fig. 8 Recovery results of two coding methods at different projection speeds and error analysis. (1) stands for error caused by noise and (2) stands for error caused by motion

实验结果表明,两类编码方式均可重建物体相位。下面将进一步从抗噪声能力、抗运动模糊能力两个方面分析、比较两类方法的优缺点。

1)抗噪声性能。当投影速度为 500 Hz 时,四灰度格雷码在鼻翼阴影处的恢复结果有缺失,而二值格雷码重建的结果比较平滑,如图 8 错误类型(1)所示,说明在低照度区域四灰度格雷码的抗噪能力不如二值格雷码。这是因为增加格雷码的灰度级,将原本简单的 0、1 码字拓展到 0、1、2、3 这 4 个码字,降低了抗噪声能力,在相位级次计算过程中更容易出错。综上所述,二值格雷码方法在抗噪声性能上相比于四灰度格雷码具有显著优势。

2)抗运动模糊能力。当拍摄速度接近物体运动速度(60 Hz)时,二值格雷码在石膏像的两侧边缘都出现明显的错误相位,如错误类型(2),但四灰度方法未出现明显错误。出现上述现象的原因是在时间复用方法中,计算一次展开相位使用的格雷码时间跨度更长,会为结果引入更多的运动误差,如:二值格雷码中  $G_{C,1}$  与  $G_{C,4}$  间隔 8 幅投影图案,时间为  $840 \mu\text{s}$ ,而  $G_{L,1}$  与  $G_{L,2}$  间隔 2 幅投影图案,时间为  $210 \mu\text{s}$ ;在  $G_{C,1} \sim G_{C,4}$  中,由物体运动导致的幅间相位错误比  $G_{L,1} \sim G_{L,4}$  更加明显。上述结果证实了四灰度格雷码在所提方法下具有抗运动模糊的优势。

综上所述,在实际测量时,四灰度格雷码编码方式更适用于测量环境噪声较小而运动较快的动态场景,而二值格雷码编码方式则更适用于环境噪声较大,测量表面反射率不均匀,但运动速度相对成像速度较慢

的动态场景。

### 3.2 高速动态测量实验

在上一个实验的基础上,为了进一步验证所提方法在复杂动态三维场景中的高效性和鲁棒性,选用时间复用的二值格雷码方法,对击打羽毛球和手拧捏橡胶球两个动态过程进行了三维形貌重建。在 9524 Hz 的投影速度下,投影时间复用二值格雷码辅助 16 周期的相移条纹序列,相机用外触发方式同步拍摄,重建击打羽毛球与手拧橡胶球两个同样用时 210 ms 的动态三维过程。

在击打羽毛球的实验中,飞行的羽毛球除了下落,还伴有高速旋转,这对三维形貌重建具有一定的挑战性。部分实验结果如图 9 所示,其中图 9(a)是相机按顺序采集的图像序列及对应的记录时间,图 9(b)所示为羽毛球击球过程中部分时刻的恢复高度分布。从结果来看,该场景的深度范围超过 250 mm,在投影条纹周期数较少的情况下,时间复用方法依然有效地重建了球拍和球身面形分布孤立的复杂形貌,并在高速运动中成功重建了球上各片羽毛的清晰轮廓。

在手拧捏橡胶球的实验中,恢复的部分时刻高度与对应的纹理图案(相移条纹图像的平均强度)如图 10 所示。在本实验中,所提方法较好地还原了橡胶球的复杂形变过程,在低照度区域有一定的重建能力。

在两组实验中,所提方法保持了格雷码的鲁棒性,对羽毛球拍这种复杂的空间不连续物体和明显形变的橡胶球,成功完成了对应的三维形貌重建;同时,对同

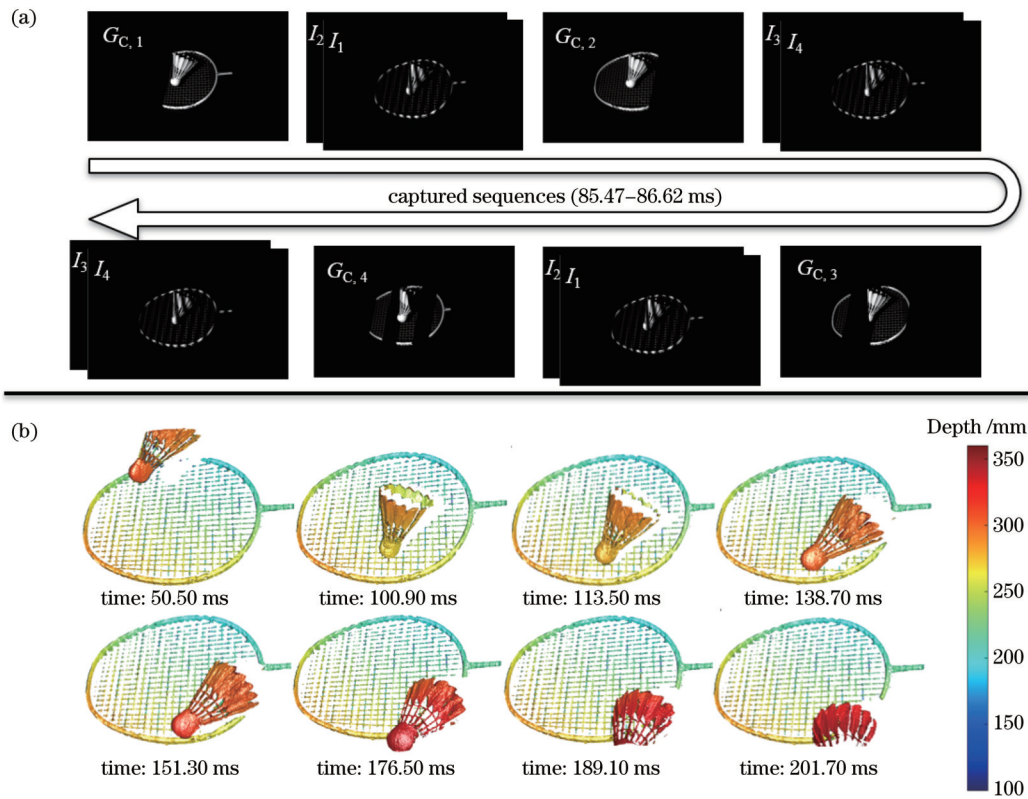


图 9 击打羽毛球的实验过程。(a)拍摄的一段连续(85.47~86.62 ms)图案序列;(b)8个代表性时刻(50.50~201.70 ms)的三维重建结果

Fig. 9 Experimental process on stroking a badminton ball. (a) A continuous captured pattern sequences (85.47~86.62 ms); (b) 3D reconstruction results at eight representative moments (50.50~201.70 ms)

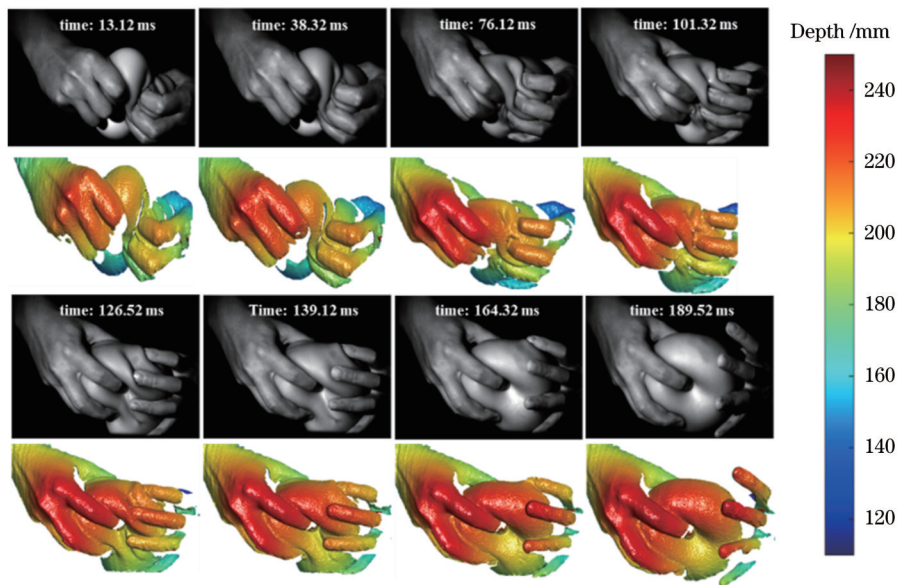


图 10 手拧捏橡胶球实验中 8 个代表性时刻(13.12~189.52 ms)的纹理图与对应的重建结果

Fig. 10 Texture distributions at eight representative moments (13.12~189.52 ms) and corresponding reconstruction results in the experiment on pinching a rubber ball with hands

样时长(210 ms)的击打羽毛球和拧捏橡胶球两个动态全过程,重建速度高达  $9524/3=3174 \text{ frame}\cdot\text{s}^{-1}$ 。与已有的格雷码结合相移方法相比,本文方法在三维测量过程中计算一次形貌结果所需的投影图案数量最少(3

幅),因此本文方法能实现高效的动态三维测量。

#### 4 结 论

提出一种基于时间复用格雷码编码辅助相移条纹



的三维测量方法,通过时间复用相移条纹和格雷码图案,分别计算背景光强和相位级次,使用背景光强在一个图案序列单元  $n$  中计算截断相位、解码相位级次后辅助展开得到连续相位。该方法突破了传统结构光编码方法在动态场景中测量效率低、鲁棒性不强的应用限制,为复杂动态场景的高效、强鲁棒性三维形貌测量提供了可行的技术方案。

击打羽毛球过程等重建实验结果证明所提方法能对复杂动态场景进行高效率三维形貌重建;二值格雷码和四灰度格雷码对不同物体的测量结果比较分析证实了二值格雷码编码方法的鲁棒性和抗噪声能力更强,适用于拍摄速度远高于物体运动速度的复杂高噪声动态场景;也证实了以四灰度格雷码编码方法为代表的多灰度格雷码编码方法的抗运动模糊能力更强,适用于重建运动速度较快但环境噪声较低的动态场景。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang S. High-speed 3D imaging with digital fringe projection techniques[M]. Boston: CRC Press, 2016.
- [2] 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.  
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.
- [3] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. Applied Optics, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [4] 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.  
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.
- [5] 侯冠宇,吴斌,何荣芳,等. 基于双目光栅重建和纹理映射的缺陷三维测量方法[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0712003.  
Hou G Y, Wu B, He R F, et al. Three-dimensional measurement method of defects based on binocular grating reconstruction and texture mapping[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0712003.
- [6] 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): 0512003.  
Feng W, Tang S J, Zhao X D, et al. Three-dimensional shape measurement method of high-reflective surfaces based on adaptive fringe-pattern[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0512003.
- [7] 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.  
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.
- [8] 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.  
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.
- [9] 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.  
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.
- [10] 周舵,王鹏,孙长库,等. 投影仪和双相机组成的三目立体视觉系统标定方法[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1115001.  
Zhou D, Wang P, Sun C K, et al. Calibration method for trinocular stereovision system comprising projector and dual cameras[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1115001.
- [11] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. Applied Optics, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [12] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 35(5): 263-284.
- [13] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 109: 23-59.
- [14] Ghiglia D C, Pritt M D. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1998.
- [15] 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.
- [16] Huntley J M, Saldner H. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. Applied Optics, 1993, 32(17): 3047-3052.
- [17] Saldner H O, Huntley J M. Temporal phase unwrapping: application to surface profiling of discontinuous objects[J]. Applied Optics, 1997, 36(13): 2770-2775.
- [18] Cheng Y Y, Wyant J C. Two-wavelength phase shifting interferometry[J]. Applied Optics, 1984, 23(24): 4539-4543.
- [19] Cheng Y Y, Wyant J C. Multiple-wavelength phase-shifting interferometry[J]. Applied Optics, 1985, 24(6): 804-807.
- [20] Parshall D, Kim M K. Digital holographic microscopy with dual-wavelength phase unwrapping[J]. Applied Optics, 2006, 45(3): 451-459.
- [21] Gushov V I, Solodkin Y N. Automatic processing of fringe patterns in integer interferometers[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1991, 14(4/5): 311-324.
- [22] Zhong J G, Wang M. Phase unwrapping by lookup table method: application to phase map with singular points[J]. Optical Engineering, 1999, 38: 2075-2080.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Frank G. Pulse code communication: US2632058[P]. 1953-03-17.
- [27] 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.  
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.
- [28] Lei S Y, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. Optics Letters, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [29] 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.  
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.

- [30] 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.
- [31] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 106: 119-131.
- [32] Zheng D L, Qian K M, Da F P, et al. Ternary Gray code-based phase unwrapping for 3D measurement using binary patterns with projector defocusing[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): 3660-3665.
- [33] He X Y, Zheng D L, Qian K M, et al. Quaternary Gray-code phase unwrapping for binary fringe projection profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 121: 358-368.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Wu Z J, Guo W B, Lu L L, et al. Generalized phase unwrapping method that avoids jump errors for fringe projection profilometry[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27181-27192.
- [38] Wang Y J, Zhang S. Three-dimensional shape measurement with binary dithered patterns[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(27): 6631-6636.

## High-Speed Three-Dimensional Morphology Measurement Based on Time Multiplexing Coding

Wang Haoran, Wu Zhoujie, Zhang Qican\*, Chen Zhengdong, Li Xunren

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

### Abstract

**Objective** Fringe projection profilometry (FPP) has been widely used in dynamic three-dimensional (3D) morphology measurement. Nevertheless, its application in transient and complex dynamic scenes is weakened by the low measurement efficiency and poor robustness of the traditional methods. As one of the simplest approaches to eliminating phase ambiguity, the Gray code-based temporal phase unwrapping method codes fringe orders  $f$  with serial binary Gray-code patterns on the time axis. In static scenes, the Gray code-based method is able to analyze highly discontinuous objects because each spatial pixel of the measured object is unwrapped independently. Another advantage of this method is that noisy pixels remain isolated and do not spread to ruin the entire unwrapped phase. However, since  $M$  patterns can be used to code  $2^M$  phase orders at most. Consequently, the entire duration of data acquisition is significantly prolonged, rendering the Gray code-based method inefficient in some time-critical situations such as online inspection and real-time scanning. Furthermore, blurred pattern edges caused by optical defocusing are also a source of additional errors. Pixels incorrectly unwrapped at the partial boundary between adjacent Gray-coded image areas are common. The intrinsic superiority of Gray codes in robustness and anti-noise ability appears to be no longer obvious in dynamic scenes. This study proposes an efficient and robust 3D measurement method based on time multiplexing structured light coding.

**Methods** The basic idea of time multiplexing light coding in the present study is reorganizing pattern arrangement and reusing fringe patterns and Gray-code patterns on the time axis. The coding process starts by reordering the four-step phase-shifting fringe patterns according to the initial phase order:  $\pi/2$ ,  $0$ ,  $\pi$ , and  $3\pi/2$ . Subsequently,  $M$  Gray-code patterns are inserted into the gaps among the phase-shifting fringe groups, resulting in a phase shift value of  $\pi$  between two nonadjacent fringe patterns. Then, the combination of one Gray-code pattern and two phase-shifting patterns are called a sequence unit, and it has a corresponding number  $n$  on the time axis. Finally, considering the oddity of  $M$ , the cyclic sequence units shall be looped end to end to make full use of the projected pattern and obtain as many 3D reconstruction results as possible. The decoding process starts by calculating the average of the fringe patterns from two adjacent units respectively to obtain the background light intensity. Then, the truncated phase is calculated in each unit with the background light intensity. Furthermore, the phase order is calculated with the closest four Gray-code patterns on the time axis, and the unwrapped phase is obtained with the truncated phase and the phase order. The proposed method reduces the number of required patterns and improves coding efficiency. As a result, the number of projected sequential patterns required for updating a new 3D result is reduced to three. With the help of a high-speed projector and a synchronous camera in the aspect of hardware and the generalized tripartite phase unwrapping method in the aspect of algorithm, the blur caused by motion and defocusing can be suppressed greatly in principle. The combination of the above parts all together paves the way for high-robustness and high-speed 3D morphology measurement.

**Results and Discussions** The results of the experiments of striking a badminton ball and pinching a rubber ball with hands prove that the proposed method can efficiently reconstruct 3D morphologies in complex dynamic scenes. The comparison and analysis of the results of measuring different objects with the binary Gray code and the quaternary Gray code confirm that the binary Gray code-based method, with greater robustness and higher anti-noise ability, is more suitable for complex high-noise dynamic scenes where the shooting speed is much higher than the speed of the objects. They also prove that the multi-grayscale Gray codes represented by the quaternary Gray code are more resistant to motion-induced blur and are thus more applicable for reconstruction in dynamic scenes featuring fast speed and lower environmental noise. The following observations can be made from the experimental results: 1) the proposed method can update a new 3D result with every three more patterns in dynamic measurement and finally reconstruct 3D morphology at  $3174 \text{ frame} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 2) compared with multi-grayscale Gray codes, the binary Gray code-based method offers a longer decoding sequence, a higher anti-noise ability, and lower resistance to motion-induced blur. Therefore, it is more suitable for complex dynamic scenes featuring measuring speeds much higher than the objects' speeds.

**Conclusions** This study proposes a 3D measurement method based on the time-multiplexed Gray-code coding technique assisting phase-shifting fringes. Through multiplexing phase-shifting fringe and Gray-code patterns in time, the study calculates the background light intensity and the phase order successively. Then, the truncated phase is calculated in a pattern sequence unit  $n$  with the background light intensity, and the continuous phase is further obtained by decoding the phase order. Breaking through the application limitation of low measurement efficiency and weak robustness on traditional structured-light coding methods in dynamic scenes, the proposed method provides a feasible technical scheme for efficient and robust 3D morphology measurement in complex dynamic scenes.

**Key words** measurement; structured light projection; dynamic three-dimensional morphology; Gray code; time multiplexing