

# 激光与光电子学进展

## 基于混合编码结构光的相移轮廓测量法

曾欣怡, 伍世虔, 陈彬\*

武汉科技大学信息科学与工程学院, 机器人与智能系统研究院, 湖北 武汉 430081

**摘要** 为了快速、准确地获取空间不连续物体的三维信息,提出了一种既包含相位级次又包含相对相位的混合编码方法。在传统相移轮廓术的基础上,根据 De Bruijn 序列将相位的级次信息调制到相移图片中,序列的长度为相位的周期数,其中每一个码元对应一个周期的相位。计算得到相对相位后,将每个周期所对应的码元组成的序列与原序列进行匹配,码元在原序列中的位置则为该周期相位的级次。该方法不需要投影额外的图片来编码相位的周期级次,仅根据投影的相移图片,就可获取相位展开所需要的相位级次以及原始相对相位。实验结果表明,本文方法在只投影拍摄 4 张图片的情况下,可以还原多种形状的待测物体的三维形貌,重建平板的标准差为 0.319 mm。

**关键词** 测量; 结构光; 相移轮廓术; 混合编码; De Bruijn 序列

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1312002

### Hybrid-Coded Phase-Shifting Profilometry for Structured Light Measurement

Zeng Xinyi, Wu Shiqian, Chen Bin\*

*Institute of Robotics and Intelligent Systems, School of Information Science and Engineering,  
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China*

**Abstract** In this paper, we proposed a hybrid coding method that includes both phase order and relative wrapped phase to quickly and accurately obtain three-dimensional information of spatially discontinuous objects. Based on the traditional phase-shifting profilometry, the phase order was modulated into the phase-shifting image using the De Bruijn sequence. The length of the De Bruijn sequence used is the number of periods, where each code value corresponds to a phase period. After calculating the wrapped phase, the code sequence corresponding to each period was matched with the De Bruijn sequence to verify whether the location of the code in the De Bruijn sequence is the phase order. The proposed method need not project additional images to encode the phase order as both the phase order and the wrapped phase required by the unwrapped phase can be obtained from the projected phase-shifting patterns. The experimental results show that when only four images are projected, the three-dimensional morphology of the objects to be measured can be reconstructed, and the standard deviation of the reconstructed plate is 0.319 mm.

**Key words** measurement; structured light; phase-shifting profilometry; hybrid code; De Bruijn sequence

## 1 引言

三维(3D)测量技术在工程测绘、数字化模拟、医学成像等众多领域都发挥着重要的作用。为了更加快速、准确地得到物体的三维信息,多种三维测量技术迅猛发展。根据测量过程中观测装置有无接触待测物体,三维测量可以分为接触式测量和非接触式测量。接触式测量的优点是可靠性强、测量精度高,其局限性

是测量效率较低,操作不当时还可能发生接触性破坏。为了弥补接触式测量技术的不足,人们深入研究了基于机器视觉的非接触测量技术,其优点是对待测物体无接触且无损伤、测量速度快、测量精度高,并且已经成为三维测量研究的主流。根据测量系统是否需要场景发射光源以及采取信号源的不同,非接触式测量可以分为主动式测量和被动式测量。被动式测量不需要对场景发射测量信号,但难以获取物体精确的三维信

收稿日期: 2021-07-01; 修回日期: 2021-08-11; 录用日期: 2021-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(61775172)

通信作者: \*chenbin@wust.edu.cn

息。主动式测量需要先对待测物体发射测量信号,之后再采集测量信号,通过分析采集到的信号所携带的信息,计算获得物体的三维信息。相较于被动式测量方法,主动式测量方法具有测量速度快、精度高等优点。

结构光三维测量法作为非接触、主动式测量技术的一个重要组成部分,具有精确度高、测量速度快、实用性强等优点,有着广泛的应用前景,已经被应用于工业测量、质量控制、机器视觉、影视特技和生物医学等领域<sup>[1-3]</sup>。

相移法<sup>[4-5]</sup>作为结构光三维测量技术的方法之一,具有精度高以及测量速度快等优点。在求解待测物体表面相位信息的过程中,得到的相对相位主值包裹在 $[-\pi, \pi)$ 的区间范围内,在测量具有高度变化的待测物体时,准确地对相位进行解包裹是一个难题。传统的相位解包裹方法分为空间相位解包裹法和时间相位解包裹法。空间相位解包裹法的原理是基于相位图,沿着相位展开路径,在相位跳变处加减 $2\pi$ 的整数倍,从而获得连续展开的相位。传统的空间相位解包裹法包括剪枝法<sup>[6]</sup>、最小二乘法<sup>[7-8]</sup>、基于质量图引导法<sup>[9-10]</sup>、区域增长算法<sup>[11]</sup>等经典的空间相位解包裹算法。然而,空间相位解包裹法依赖于路径展开,会引起相位误差沿着路径传递,所以只能测量形貌较简单的待测物体。另一类相位解包裹算法为时间相位解包裹算法,它根据多张图片计算每个像素点,即每个像素点都是单独运算的,与周围的像素点无关,不会出现误差的传递。然而,该方法确定相位级次时需要投影并拍摄另外的辅助编码图片,这增加了投影拍摄的图像数量从而降低了测量速度。例如:投影有 $T$ 个周期的 $N$ 步相移条纹图,二进制编码方法<sup>[12-13]</sup>和格雷码方法<sup>[14-16]</sup>均需要投影并拍摄 $N + \log_2 T$ 幅条纹图,而双频外差方法<sup>[17-19]</sup>需要投影并拍摄 $2N$ 幅图像。

针对空间相位解包裹与时间相位解包裹方法的缺点,为了更加快速、准确地获取待测物体表面的绝对相位,本文提出了一种将相位的级次信息调制到相移图

片中的混合编码方法。该方法不需要投影额外的图片,仅根据投影的 $N$ 张相移图片,即可获取相位展开所必需的相位级次与相对相位,从而直接得到整个待测物体表面的绝对相位。再根据相位与深度的对应关系,获得整个待测表面的三维信息。并通过实验验证了所提方法的可行性。

## 2 相关工作

本节介绍了传统的相移法以及格雷码与相移法相结合的方法,并分析了相移法在解包裹过程中存在的问题。

### 2.1 相移法

相移法是一种空间分辨率高、实用性强的三维表面成像的条纹投影方法,应用较为广泛。相移是指正弦条纹在一个周期内均匀移动 $N$ 次,其中 $N \geq 3$ ,每次移动的相位为 $\frac{2\pi}{N}$ 。拍摄条纹的正弦表达式为

$$I_n = I_{\text{bias}}(x, y) + I_{\text{mod}}(x, y) \cos \left[ \varphi_w(x, y) + \frac{2\pi n}{N} \right], \quad (1)$$

式中: $n = 1, 2, \dots, N$ ;  $I_n$ 为拍摄得到的条纹图片的强度;  $I_{\text{bias}}(x, y)$ 为背景光强;  $I_{\text{mod}}(x, y)$ 为调制强度;  $\varphi_w(x, y)$ 为相位,  $\varphi_w(x, y) = \frac{2\pi}{p} x$ ,  $p$ 为条纹的宽度。利用 $N$ 张拍摄到的图片上的变形信息,可以计算出每个点的相位,表示为

$$\varphi'_w(x, y) = -\arctan \left[ \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin \left( \frac{2\pi n}{N} \right)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos \left( \frac{2\pi n}{N} \right)} \right]. \quad (2)$$

式(2)中得到 $[-\pi, \pi)$ 的相对相位 $\varphi'_w$ ,相位展开后得到绝对相位,表示为

$$\varphi_{\text{uw}}(x, y) = \varphi'_w(x, y) + 2k(x, y)\pi, \quad (3)$$

式中: $\varphi_{\text{uw}}(x, y)$ 为展开后的绝对相位;  $\varphi'_w(x, y)$ 为相对相位;  $k(x, y)$ 为相对相位的级次。三者关系如图1所示。

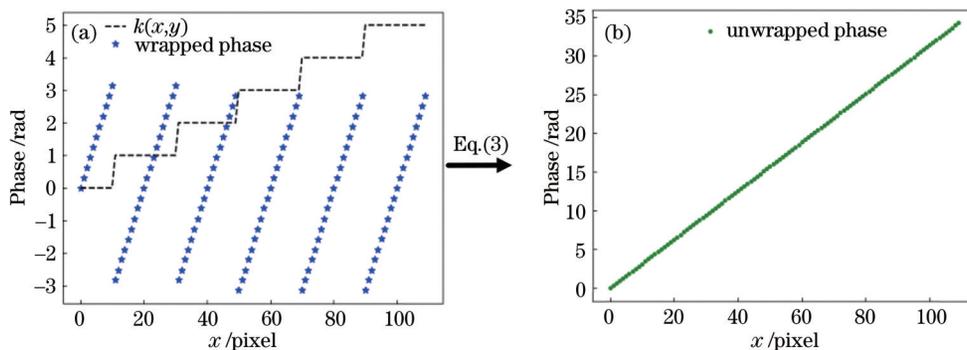


图1 相对相位、绝对相位和相位级次的对应图

Fig. 1 Correspondence among wrapped phase, unwrapped phase, and phase order

空间相位解包裹方法是根据一点与其邻点的相位差进行解包裹即计算 $k(x, y)$ 。当待测物体表面

不连续时,某一点的相位由于混叠、噪声、遮挡等原因而导致该点解包裹错误,这个错误会传递到后续

所有点的相位解包裹过程中,无法得到准确的绝对相位。

### 2.2 格雷码与相移法相结合

正如上一节中所讨论的,仅根据  $N$  张相移图片无法准确求解得到待测物体的绝对相位,该局限性可以通过结合使用格雷码和相移技术来解决。 $m$  位格雷码有个不同的编码值,即可编码  $2^m$  个相位的周期,

若需要编码 64 个相位的周期,则需要 6 位格雷码。该方法需要另外投影 6 张格雷码编码图案,图 2 显示了将格雷码与相移法相结合编码的示例。6 张格雷码图片确定了相位的级次,即式(3)中的  $k(x, y)$  值,而相移图片可以解出相对相位,即式(3)中  $\varphi'_w(x, y)$  的值。在得到  $k$  与  $\varphi'_w$  后,代入式(3)可以得到绝对相位  $\varphi_{uw}$ 。

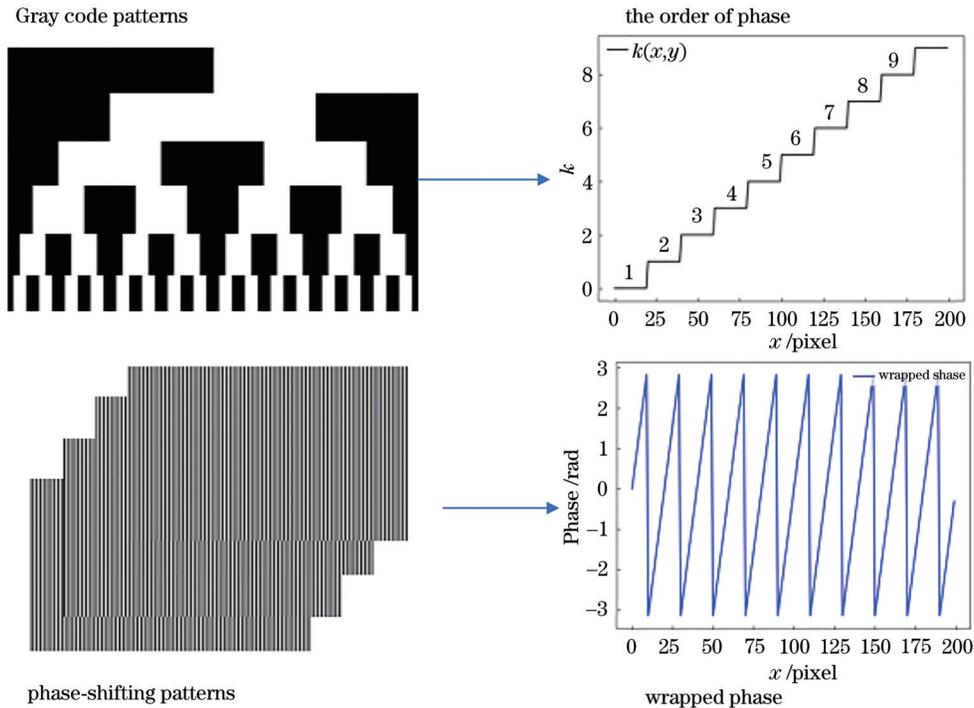


图 2 格雷码与相位的对应关系

Fig. 2 Correspondence between Gray code and phase

虽然根据格雷码图片可以准确地得到相位的级次,但需要多投影 6 张图案,加上 4 张相移图案,一共需

要投影 10 张图案,降低了测量的效率。时间相位解包裹方法都存在类似的问题,如表 1 所示。

表 1 相位编码方法对比

Table 1 Comparison of phase coding methods

Method	Number of patterns	Accuracy of wrapping phase
Four-step phase-shifting+ spatial phase wrapping	4	×
Four-step phase-shifting+ 6-digit Gray code	10	✓
Multi-frequency heterodyne	12	✓

空间相位解包裹方法无法准确地确定  $k(x, y)$  的值,而时间相位解包裹方法虽然可以确定准确的相位级次,但需要投影并拍摄另外的图片来编码相位的级次。针对存在的这些问题,本文提出在相移法的基础上结合 De Bruijn 序列进行编码的方法,仅根据四张相移图片,既可以得到相对相位,又可以得到绝对相位,能够快速高效地计算出待测物体的绝对相位。

## 3 结构光混合编解码

针对相移法和格雷码与相移法相结合测量效率较低的不足,本文提出了一种测量速度快并且能够准确

解包裹的混合编码相移法,接下来本节主要介绍编解码原理。

### 3.1 编码原理

由式(3)可知,相移法在计算相对相位  $\varphi'_w(x, y)$  的过程中,已经消除了背景光强  $I_{bias}(x, y)$  以及调制强度  $I_{mod}(x, y)$  的影响,求解得到的相对相位是较为准确的。根据相移法的特性,本文考虑利用幅度调制原理将周期的级次信息调制到相位  $\varphi_w$  中,使得  $\varphi_w$  中既包含相对相位又包含相位级次,可根据每个周期相位的最大幅值得到周期的级次。首先,本文混合编码方法使得相位  $\varphi_w$  在一个周期内按三角波函数  $f_c(x)$  变化,

其中  $f_\tau(x)$  定义为

$$f_\tau(x) = -\frac{2}{\tau}|x| + 1, \quad -\frac{\tau}{2} \leq x \leq \frac{\tau}{2}, \quad (4)$$

式中:  $\tau$  为三角波的宽度。而后将相位  $\varphi_w$  的周期级次信息  $k$  调制到三角波的幅值上, 即相位  $\varphi_w$  的表达式可写为

$$\varphi_w = A_k f_p(x - kp - \frac{p}{2}) - \pi, \quad (5)$$

式中:  $p$  为条纹的宽度;  $k \in (0, 1, \dots, T-1)$  为周期级次;  $T$  为周期的总数即条纹的数量, 则每一行的点数为  $M = p \times T$ ;  $A_k$  为第  $k$  个周期的幅值, 本文所描述的混合编码方法中  $A_k$  取  $(1 + \frac{k+1}{T})\pi$ 。由此可知, 按式(5)

所表示的相位  $\varphi_w$  的取值范围为  $[-\pi, \pi)$ 。

通过式(4)、(5)生成  $\varphi_w$ , 当  $T=5, k \in (0, 1, 2, 3, 4)$  时,  $A_0 \sim A_4$  的取值依次为  $6\pi/5, 7\pi/5, 8\pi/5, 9\pi/5, 2\pi$ ,  $p=20$ 。如图 3(a) 所示, 生成的  $\varphi_w$  一共有 100 个点, 第 0~4 个周期的相位最大幅值分别为  $\pi/5, 2\pi/5, 3\pi/5, 4\pi/5, \pi$ 。可以根据每个周期的最大幅值区分不同的周期, 每个周期中根据斜率区分上升端和下降端, 在区分周期以及上下端之后, 每个点与相位值都是一一对应的, 这样就使得  $\varphi_w$  中既包含相对相位又包含相位级次。投影的正弦条纹强度为  $I_0 = \cos[\varphi_w(x, y)]$ , 如图 3(b) 所示。

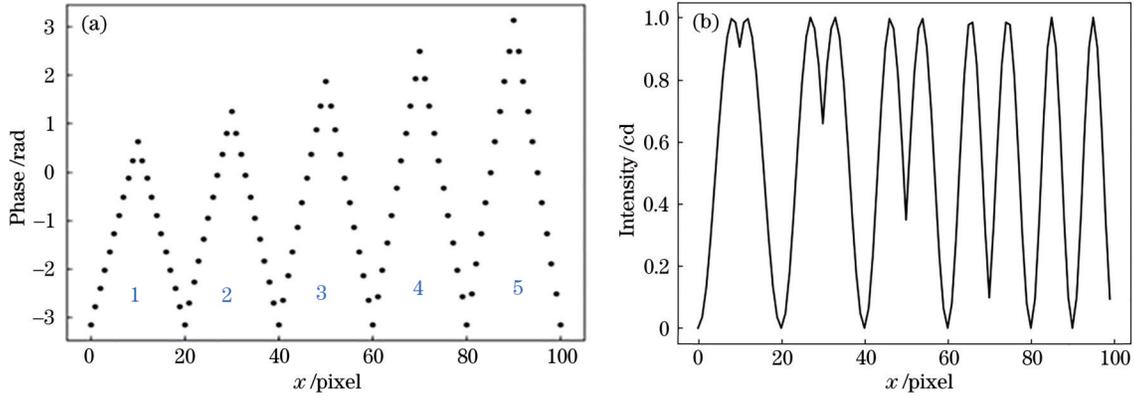


图 3 振幅调制后的相对相位和正弦条纹强度。(a) 相对相位; (b) 对应的正弦条纹强度

Fig. 3 Wrapped phase and intensity of sinusoidal stripe after amplitude modulation. (a) Wrapped phase; (b) corresponding intensity of sinusoidal stripe

通常投影图案中每一行的点数远大于 100, 且条纹宽度  $p$  不会远大于 20, 所以一行的周期数  $T$  远大于 5。直接用  $k \in (0, 1, \dots, T-1)$  来编码周期的级次误差会较大, 因为相对相位包裹在  $[-\pi, \pi)$  之间, 如果用  $T$  个不同幅值来区别不同的周期, 则区别很小, 容易误判所对应的级次, 导致计算出的绝对相位的误差很大。如图 4 所示, 当  $T$  大于 10 之后, 计算出的绝对相位的误差较大。

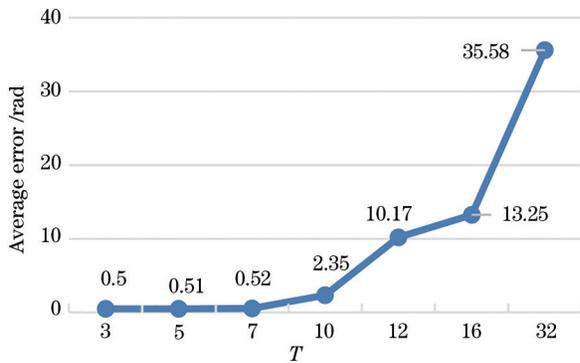


图 4 不同周期  $T$  得到的绝对相位的平均误差

Fig. 4 Mean error of the unwrapped phase in different periods  $T$

由于存在上述局限性, 最好能够用  $k(k \ll T)$  个码元来编码  $T$  个周期, 即只利用较少的  $A_k$  来对  $T$  个不同的周期进行编码。出于该考虑, 本文选用了 De

Brujn 序列对相位的周期进行编码, 其核心思想为: 假设有  $k$  个码元, 则  $n$  次的 De Bruijn 序列是由这  $k$  个不一样的码元组成长度为  $k^n$  的符号序列, 其中一个长度为  $k$  的子序列在整个序列中出现且只出现一次, 所以每一个子序列都具有唯一的编码值, 因此可以根据子序列中包含的元素确定子序列在整个序列中出现的位置, 即可实现利用  $k(k \ll T)$  个码元来编码  $T$  个周期级次信息。

若要编码  $T$  个周期, 则需要使  $k^n \geq T$ 。当  $T=64$  时,  $n=3, k=4$  或者  $n=4, k=3$  皆可满足需求。例如  $n=3, k=4$  的 De Bruijn 序列, 由 0, 1, 2 组成, 长度为 81, 0000100020011001..., 其中每四位都在整个序列中出现且仅出现一次, 因此可以根据四位码元确定该四位码元在序列中唯一的位置。De Bruijn 序列中的每一个码元对应相位的一个周期, 如图 5 所示, 其中 0, 1, 2 分别对应周期内相位的最大幅值依次为  $\pi/3, 2\pi/3, \pi$ 。解码过程中, 根据连续四个周期的相位最大幅值可以确定其对应的码元, 而后结合 De Bruijn 序列中子序列具有唯一编码值的特性, 确定该四个对应码元在 De Bruijn 序列中的位置, 即可准确地得到相位的周期数。

根据上述相位周期与 De Bruijn 序列之间的对应规则, 81 位的 De Bruijn 序列可以编码 81 个周期的相位, 解决了传统相移法中周期歧义的问题。在判断周

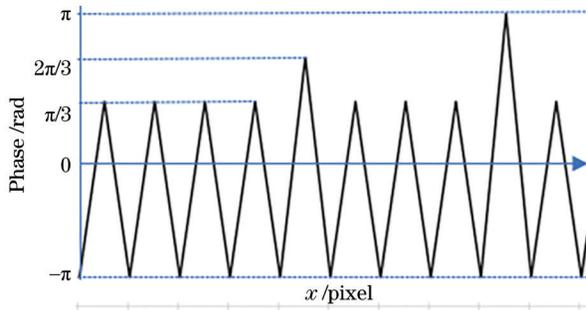


图 5 相位周期数与 De Bruijn 序列之间的对应关系

Fig. 5 Correspondence between the number of phase periods and De Bruijn sequence

期数之后,结合相位斜率和相位值,可以确定唯一的对应点。

### 3.2 解码原理

本文使用四步相移方法,  $N=4$ , 根据 2.1 节介绍的编码原理编码相位  $\varphi_w(x, y)$ , 再根据式(4)生成四张投影图案, 如图 6 所示。

$$I_n^p = \cos\left[\varphi_w(x, y) + \frac{2\pi n}{4}\right], n = 1, 2, 3, 4. \quad (6)$$

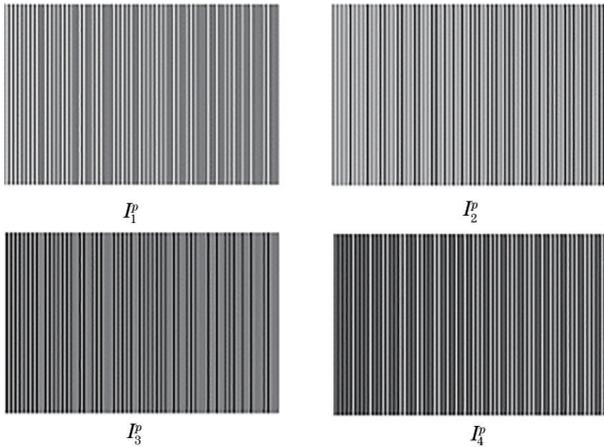


图 6 计算机生成的四张投影图案

Fig. 6 Four computer generated projection patterns

由式(1)可知,相机拍摄得到图片为

$$I_n^c = I_{\text{bias}}(x, y) + I_{\text{mod}}(x, y) \cos\left[\varphi_w(x, y) + \frac{2\pi n}{4}\right], \quad n = 1, 2, 3, 4. \quad (7)$$

由式(2)解出相对相位  $\varphi_w'$ , 表示为

$$\varphi_w' = -\arctan\left[\frac{I_4^c - I_2^c}{I_1^c - I_3^c}\right]. \quad (8)$$

在解出了相对相位之后,将相对相位  $\varphi_w'$  中的每一行分别代入算法 1, 对相位进行周期划分为  $w_0, w_1, \dots, w_m$ , 并得到每个周期的最大幅值为  $mv_0, mv_1, \dots, mv_m$  和对应索引  $mi_0, mi_1, \dots, mi_m$ 。

算法 1 划分周期并求解各周期最大幅值和索引

输入 a row of wrapped phase  $\varphi_w'$

输出 wrapped phase  $w_0, w_1, \dots, w_m$  of  $m$  periods and the maximum value  $mv_0, mv_1, \dots, mv_m$  for each period.

The index  $mi$  of  $mv$ .

1.  $g \leftarrow \text{diff}(\text{res}); X \leftarrow \text{length}(\text{res}); k \leftarrow 0$
2. **while**  $i < X - 1$  **do**
3.   **if**  $g[i] \times g[i + 1] < 0$  **then**
4.      $mv[k] \leftarrow \text{res}[i + 1]$
5.      $mi[k] \leftarrow i + 1$
6.   **else**
7.      $gap[k] \leftarrow i + 1$
8.      $k \leftarrow k + 1$
9.   **end if**
10. **end while**
11.  $m \leftarrow k$
12. identify periods of  $\varphi_w'$  according to  $gap$  as  $w$

完成算法 1 的计算之后,将一行相位中的最大幅值记作  $P_{\text{Max}}$ 。根据下式得到最大值与 De Bruijn 码元的对应关系:

$$d_i = \begin{cases} 0, & mv \leq \frac{P_{\text{Max}}}{3} \\ 1, & \frac{P_{\text{Max}}}{3} < mv \leq \frac{2P_{\text{Max}}}{3} \\ 2, & mv > \frac{2P_{\text{Max}}}{3} \end{cases}. \quad (9)$$

通过式(9)得到了对应序列  $d_0, d_1, \dots, d_m$ , 并与原始 De Bruijn 序列进行匹配, 匹配结果为相位级次  $k_0, k_1, \dots, k_m$ 。绝对相位  $\varphi_{\text{uw}}$  为

$$\varphi_{\text{uw}}(x) = \begin{cases} 2\pi k_i + 3 \frac{w_i + \pi}{d_i + 4}, & x < mi[i] \\ 2\pi k_i - 3 \frac{w_i + \pi}{d_i + 4}, & x \geq mi[i] \end{cases}. \quad (10)$$

按照上述步骤依次求解得到每一行的绝对相位, 便可以得到整幅图像的绝对相位。由四张相移图片求解得到绝对相位的流程如图 7 所示。

### 3.3 遮挡分析

由编解码方法可知,解码过程中是根据一个周期内相位的最大幅值来判断该周期所对应的 De Bruijn 码元, 在得到对应 De Bruijn 序列后再与原始 De Bruijn 序列进行匹配, 匹配过程使用了 Boyer 等<sup>[20]</sup>提出的匹配方法。当幅值最大处被遮挡时, 对该周期的级数判断可能会误判, 但在出现少量误判情况时, 可以利用 De Bruijn 序列的特性将误判进行修正。

当一个周期的相位被遮挡而导致周期不完整时, 即由上升端与下降端组成一个周期的相位只剩下某一

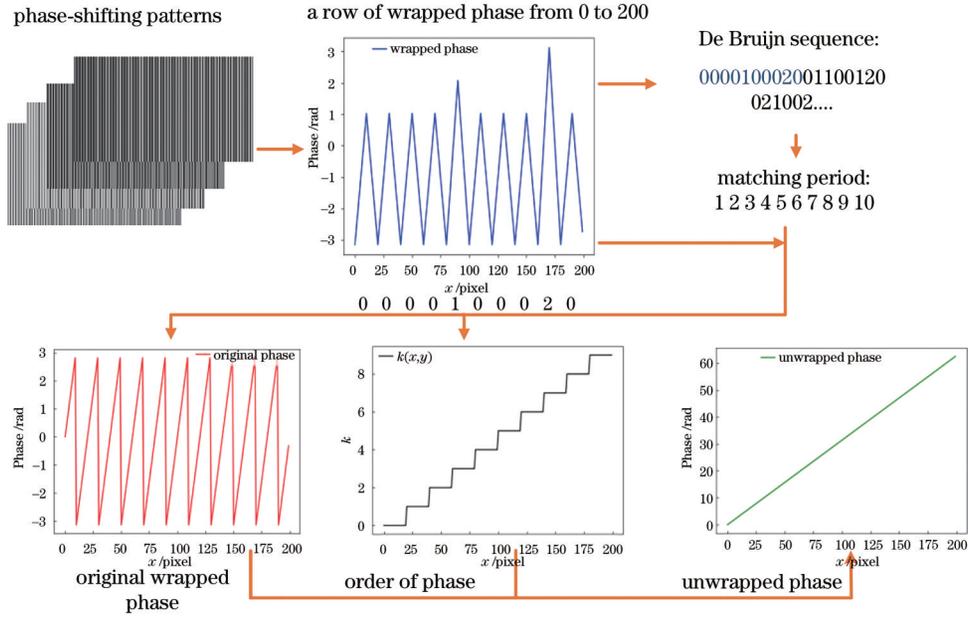


图 7 求解绝对相位的流程

Fig. 7 Flowchart of unwrapping phase

端。只剩下上升端的情况如图 8(a)所示,可以根据前面周期所对应的 De Bruijn 码元对该不完整周期所对应的码元进行预测。只剩下下降端的情况如图 8(b)所

示,可以根据后面周期所对应的 De Bruijn 码元对该不完整周期所对应的码元进行预测。这两种情况皆可准确预测不完整周期的相位的级次。

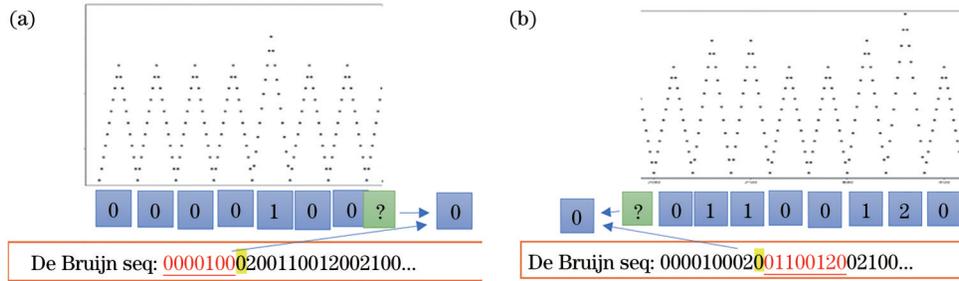


图 8 周期不完整情况。(a)遮挡下降沿,只剩下上升沿的情况;(b)遮挡上升沿,只剩下下降沿的情况

Fig. 8 Incomplete period case. (a) Occluding falling edge, only left rising edge; (b) occluding rising edge, only left falling edge

在一个周期中相位的最大幅值被遮挡,但该周期仍然有上升端和下降端的情况下,会影响该周期中对最大幅值的判断,其对应的 De Bruijn 码元可能不准确。如图 9 所示,遮挡了幅值最大处而使得对应 De Bruijn 码元出现误判,可以根据前后周期所对应的 De

Bruijn 码元对该错误码元进行修正。

在其他遮挡情况中,虽然遮挡了一部分的点,但没有遮挡住最大幅值,不影响对最大幅值判断,所以能够得到准确的 De Bruijn 码元以及匹配结果。然而,当误判较多时,也并不能完全正确地进行匹配并计算出正确的级次信息,所以该编码方法不能用于测量形状太过于复杂的物体的三维形貌。

#### 4 实验及分析

实验中使用的相机型号为 JAI-GO-5000M-USB,分辨率为 2048 pixel×2560 pixel,使用的投影仪型号为洪基(acer)K137i,分辨率为 800 pixel×1280 pixel。计算机生成 64 条条纹的投影图案,条纹的宽度为 20 pixel,则 De Bruijn 需要编码 64 条条纹即 64 个周期,采用了 3 元 4 次的 De Bruijn 序列中的前 64 位: 000010002001100120021002201010201110112012101

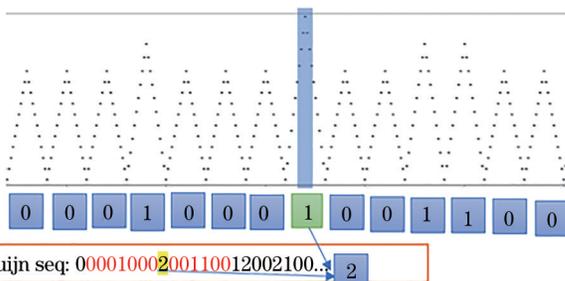


图 9 最大值被遮挡导致码元判断错误情况

Fig. 9 Symbol judgment error caused by the maximum value being blocked

2202021102120221022。

图 10(a)为待测物体,是一副人脸面具,采用本文方法测量该物体的三维信息只用投影并拍摄四张图片,求解该待测物体三维信息的步骤如下:

- 1) 标定相机和投影仪,记录标定结果。
- 2) 由计算机生成的四张图片  $I_1^p, I_2^p, I_3^p, I_4^p$ , 如图 6 所示,将四张图片投影至待测物体上并依次拍摄,相机拍摄得到四张条纹图片  $I_1^c, I_2^c, I_3^c, I_4^c$ , 图 10(b)为其中的一张条纹图  $I_1^c$ 。
- 3) 根据拍摄的四张条纹图代入式(8)计算相对相

位  $\varphi'_w$ 。计算结果如图 10(c)所示。

4) 根据算法 1 以及式(9)和式(10),将相对相位转化为绝对相位的步骤来计算整张图的绝对相位,计算得到的整幅图的绝对相位如图 10(d)所示。

5) 在求解出待测物体表面的绝对相位信息后,结合步骤 4 中求出来的绝对相位以及步骤 1 中的标定结果,计算出待测物体的三维点云结果,如图 11 所示,其中,图 11(a)为点云结果正面,图 11(b)为点云结果侧面,可以看出,所提方法基本还原了面具的三维形貌。

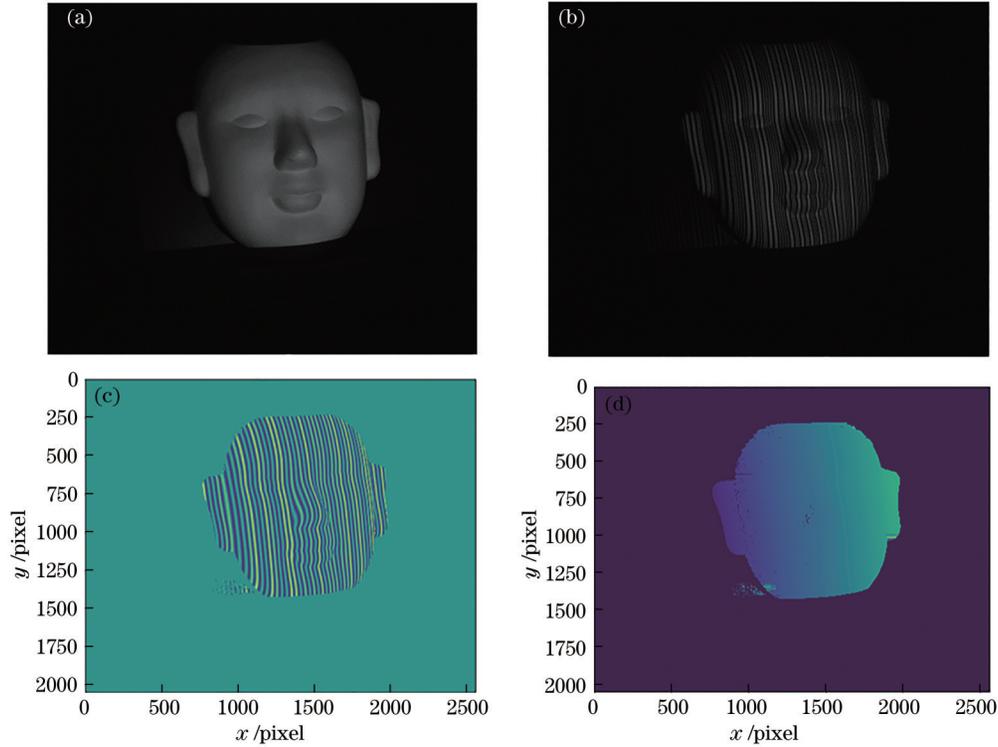


图 10 面具。(a)待测物体;(b)相机拍摄的条纹图片;(c)相对相位;(d)绝对相位

Fig. 10 A mask. (a) Object to be tested; (b) fringe image captured by camera; (c) wrapped phase; (d) unwrapped phase

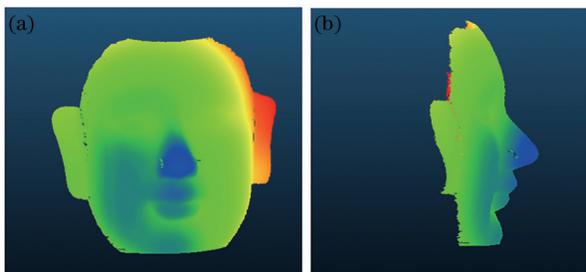


图 11 三维点云结果。(a)正面;(b)侧面

Fig. 11 3D point cloud results. (a) Frontal result; (b) profile result

为了进一步验证所提方法在待测物体表面不连续时的有效性,选用了前后放置的两个水管作为待测物体,两个水管的重叠处具有明显的不连续性。待测物体如图 12(a)所示,图 12(b)为计算得到的相对相位图。

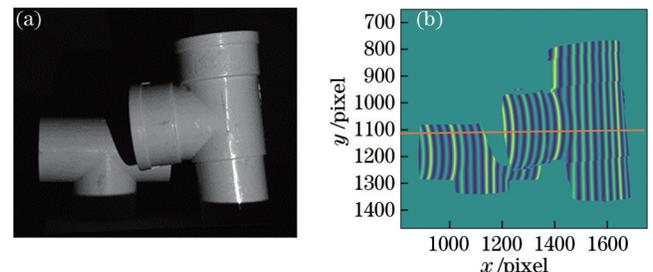


图 12 两个前后放置的水管。(a)待测物体;(b)相对相位

Fig. 12 Two water pipes placed front and back. (a) Object to be tested; (b) wrapped phase

其中,第 1100 行的相对相位如图 13(a)所示,水管重叠的部分遮挡了一个周期中的最大幅值,如图中框内的相位只剩下了上升端,符合 3.3 节中介绍的周期不完整情况,可以根据前面周期所对应的 De Bruijn 码元对该不完整周期所对应的码元进行预测。其他周期

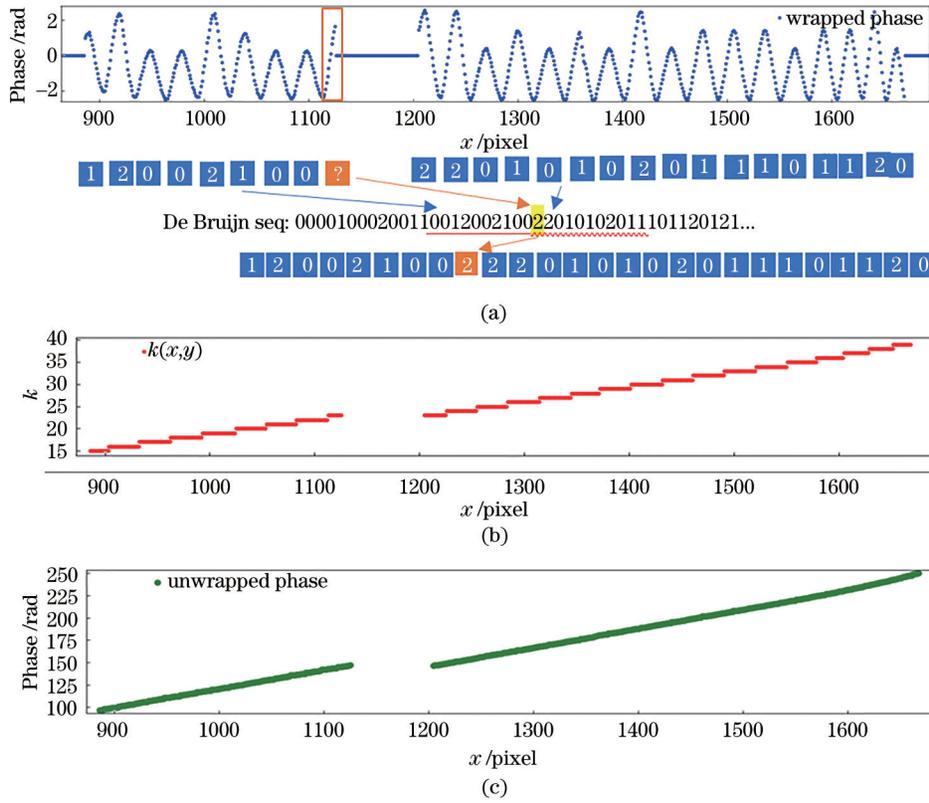


图 13 相位解包裹。(a)相对相位;(b)相位级次;(c)绝对相位  
 Fig. 13 Phase unwrapping. (a) Wrapped phase; (b) phase order; (c) unwrapped phase

中虽然有的缺少了一部分的点,但没有缺少最大幅值,不影响对最大幅值的判断,所以对应的 De Bruijn 码元以及匹配结果都是准确的。图 13(b)为根据修正过的序列所求得的相位级次  $k$ ,图 13(c)为根据式(10)计算得到的绝对相位。

传统方法中,为了准确求得待测物体表面的相位信息,一般需要结合另外的图片来确定相位的周期,对比实验使用了四步相移法与六位格雷码相结合来求得准确的相位信息,一共需要投影拍摄 10 张图片。为了充分验证本文方法对各种形貌物体进行三维测量的适用性,待测物体包括前后放置的水管、不规则形状的几何体、陶瓷罐子,如图 14 所示,其中前后放置的水管明显存在不连续表面,对比格雷码与相移法相结合的重建结果可知,本文方法仍然能够准确还原前后放置水管的三维形貌。且格雷码与相移法相结合的方法存在格雷码变化边缘与相移周期变化处不对齐的问题,这些不对齐的点会使得重建的点云结果缺少一些点,虽然可以利用互补型格雷码<sup>[21]</sup>解决该问题,但需要再多投影 1 张图片。而本文方法不存在此类问题,重建效果更加完整。但在重建不规则三维物体时,并未准确重建出其顶端部分,原因是其顶端部分太过于窄小,顶端上投影拍摄条纹数量少于 4 条,所对应的 De Bruijn 码元少于 4 个,无法准确还原条纹的周期,重建结果的顶端出现缺失,所以本文方法无法测量具有许多窄小不连续表面的物体。

由点云结果可以看出,两种方法都可以还原物体的三维形貌,格雷码与相移法相结合的方法需要投影并拍摄 10 张图片,而本文方法只需要投影拍摄 4 张,提高了测量的效率。

为了对比测量精度,对平板进行了三维测量,重建结果如图 15 所示,其中图 15(a)为格雷码与相移法相结合重建平板的结果,图 15(b)为多频外差(三频四相)的重建结果,图 15(c)为本文方法的重建结果。

三种方法的误差对比结果如表 2 所示,在确保一定精度的情况下,本文方法只投影并拍摄了 4 张图片,与其他方法相比,大大提高了测量效率,且不涉及颜色信息,抗噪能力强、数据量小,更适用于有一定精度要求且实时性要求比较高的场合。

和其他相位测量轮廓术一样,本文方法也会受到噪声的影响,但可以通过增加相移帧数的方法减小噪声的影响。传统相移法的每个周期的相位在  $[-\pi, \pi)$  之间均匀变化,对应的正弦条纹的强度处处可导,而本文方法中的一个周期的相对相位的最大值为  $\pi/3, 2\pi/3, \pi$ , 相位范围分别是  $[-\pi, \pi/3), [-\pi, 2\pi/3), [-\pi, \pi)$ , 并没有将  $[-\pi, \pi)$  完全利用上,减小了不同点之间相位的差距,且由图 3(b)可知,对应的正弦条纹的强度并不能处处可导,从而降低了正弦条纹图案在这些区域的质量,造成了局部相位误差,降低了精确度。

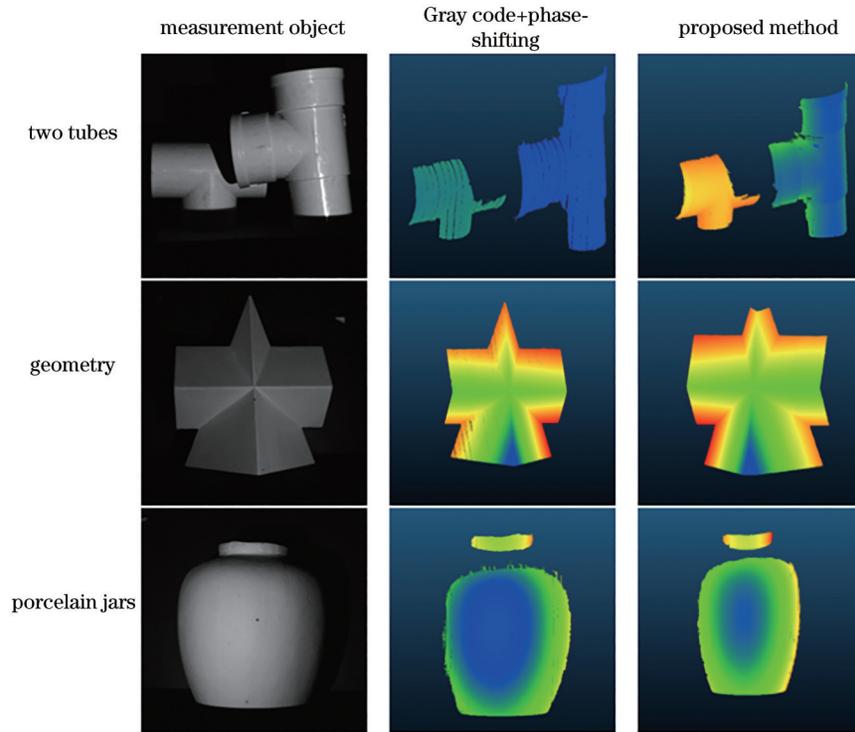


图 14 格雷码与相移法相结合方法的重建结果与本文方法重建结果的对比

Fig. 14 Comparison of the reconstruction results between Gray code combined with phase-shifting method and the proposed method

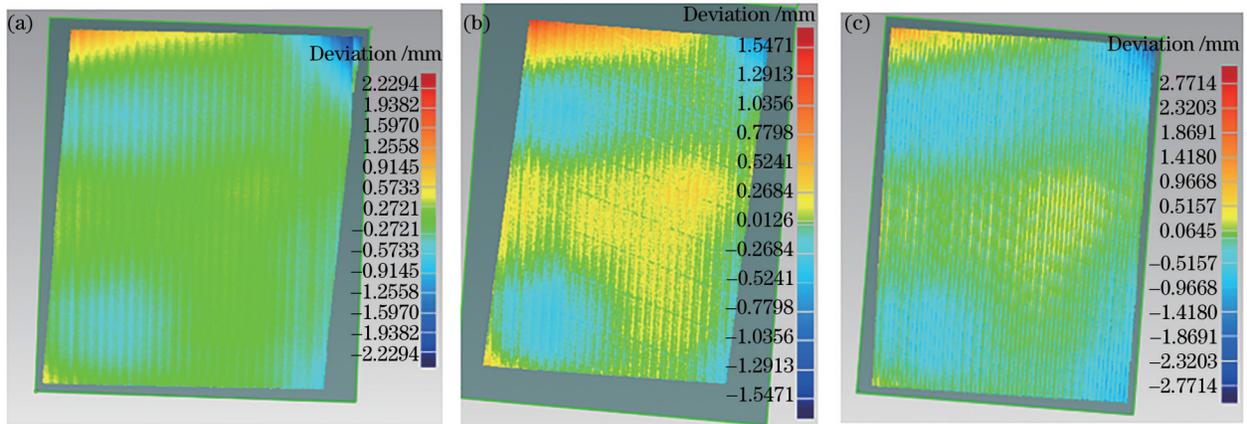


图 15 平板重建结果。(a)格雷码与相移法相结合方法重建结果;(b)多频外差重建结果;(c)本文方法重建结果

Fig. 15 Reconstruction results of flat plate. (a) Reconstruction result of Gray code combined with phase-shifting method; (b) reconstruction results of multi-frequency heterodyne; (c) reconstruction results of proposed method

表 2 格雷码+相移法、多频外差与本文方法精度对比结果

Table 2 Accuracy comparisons between Grey code + phase-shifting method, multi-frequency heterodyne, and proposed method

Parameter	Gray code+ phase-shifting	Multi-frequency heterodyne	Proposed method
Standard deviation /mm	0.232	0.198	0.319
Number of patterns	10	12	4

## 5 结束语

本文提出了一种在传统相移轮廓术的基础上,利用 De Bruijn 序列来编码相位级次的方法,可以快速准确地求解待测物体表面的相位信息,并实验验证了该方法的可行性。与空间相位解包裹方法相比,本文方

法能够更加准确地得到绝对相位值,与时间相位解包裹方法相比,本文方法投影图案较少,测量效率更高。但本文方法在待测物体形貌较复杂时,并不能很好地求解出待测物表面的相位信息,需要进一步深入研究是否能较好地处理该缺陷,且重建精度也有待进一步提高。

## 参 考 文 献

- [1] 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. 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.
- [2] 崔海华, 姜涛, 国荣辉, 等. 基于深度学习位姿估计的多视结构光三维成像方法[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1712001. Cui H H, Jiang T, Guo R H. 3D imaging method for multi-view structured light measurement via deep learning pose estimation [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1712001.
- [3] 张世宽, 吴清潇, 林智远. 焊缝图像中结构光条纹的检测与分割[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0515002. Zhang S K, Wu Q X, Lin Z Y. Detection and segmentation of structured light stripe in weld image[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0515002.
- [4] 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 3D shape measurement based on Gray code and phase-shifting algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0512001.
- [5] Hu E Y, He Y M, Hua Y. Profile measurement of a moving object using an improved projection grating phase-shifting profilometry[J]. Optics Communications, 2009, 282(15): 3047-3051.
- [6] Huntley J M. Noise-immune phase unwrapping algorithm [J]. Applied Optics, 1989, 28(16): 3268-3270.
- [7] Ghiglia D C, Romero L A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1994, 11(1): 107-117.
- [8] Yan L P, Zhang H Y, Zhang R, et al. A robust phase unwrapping algorithm based on reliability mask and weighted minimum least-squares method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 112: 39-45.
- [9] Wang X, Fang S P, Zhu X D, et al. Phase unwrapping of interferometric fringes based on a mutual information quality map and phase recovery strategy[J]. Optical Engineering, 2018, 57: 114108.
- [10] Zhong H P, Tang J S, Zhang S. Phase quality map based on local multi-unwrapped results for two-dimensional phase unwrapping[J]. Applied Optics, 2015, 54(4): 739-745.
- [11] de Veuster C, Slangen P, Renotte Y, et al. Disk-growing algorithm for phase-map unwrapping: application to speckle interferograms[J]. Applied Optics, 1996, 35(2): 240-247.
- [12] Flores J L, Torales G, Ferrari J A, et al. Binary coded triangular fringes for 3D surface-shape measurement[J]. Applied Optics, 2013, 52(15): 3576-3582.
- [13] Feng X H, Gao L. Robust structured-light depth mapping via recursive decomposition of binary codes[J]. Optical Engineering, 2019, 58(6): 060501.
- [14] Yu S, Zhang J, Yu X Y, et al. Unequal-period combination approach of Gray code and phase-shifting for 3D visual measurement[J]. Optics Communications, 2016, 374: 97-106.
- [15] Zhang Q C, Su X Y, Xiang L Q, et al. 3D shape measurement based on complementary Gray-code light[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(4): 574-579.
- [16] Zeng Z H, Fu Y J, Li B, et al. Complex surface three-dimensional shape measurement method based on defocused Gray code plus phase-shifting[J]. Optical Review, 2016, 23(4): 628-636.
- [17] Cheng Y Y, Wyant J C. Two-wavelength phase shifting interferometry[J]. Applied Optics, 1984, 23(24): 4539-4543.
- [18] Hyun J S, Zhang S. Enhanced two-frequency phase-shifting method[J]. Applied Optics, 2016, 55(16): 4395-4401.
- [19] Guo T, Li F, Chen J P, et al. Multi-wavelength phase-shifting interferometry for micro-structures measurement based on color image processing in white light interference [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 82: 41-47.
- [20] Boyer K L, Kak A C. Color-encoded structured light for rapid active ranging[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(1): 14-28.
- [21] Zhang Q C, Su X Y, Xiang L Q, et al. 3D shape measurement based on complementary gray-code light[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(4): 574-579.