

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311519

一种消除周期性毛刺相位误差的互补格雷码双N步相移法*

韩叔桓^{1,2}, 杨延西^{1,2}, 张新雨¹, 李昕杰¹

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048; 2. 陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室 西安 710048)

摘要:互补格雷码双N步相移法因其具有鲁棒性好、检测精度高等特点在条纹投影轮廓术领域成为研究热点。然而,传统互补格雷码双N步相移法存在检测效率低以及未消除周期性毛刺相位误差的问题。针对这些问题,本文对传统互补格雷码双N步相移法进行改进消除周期性毛刺相位误差,首先通过相机捕获形变条纹图像并计算出两组截断相位,然后利用两组截断相位的相关性消除检测数据中的相位差、周期性毛刺相位误差,再对两组截断相位进行融合,最后通过互补格雷码相位展开法对融合后的截断相位进行相位展开。实验得出本文方法在检测效率不变的情况下,能有效消除周期性毛刺相位误差,得到高精度展开相位,相比于未消除周期性毛刺相位误差的互补格雷码双N步相移法,本文检测方法精度提高了约24.57%,相比于互补格雷码N步相移法,本文检测方法精度提高了约6.29%。

关键词:双N步相移法;展开相位;周期性毛刺相位误差;互补格雷码

中图分类号: TP391 TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

A complementary Gray code double N-step phase-shifting method for eliminating periodic spurious tones phase errors

Han Shuhuan^{1,2}, Yang Yanxi^{1,2}, Zhang Xinyu^{1,2}, Li Xinjie¹

(1. School of Automation and Information Engineering Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing, Xi'an 710048, China)

Abstract: The complementary Gray code double N-step phase-shifting method has become a research hotspot in the field of fringe projection profilometry because of its good robustness and high detection accuracy. However, the traditional complementary Gray code double N-step phase-shifting method has the problems of low detection efficiency and does not eliminate the periodic spurious tones phase error. To solve these problems, the traditional complementary Gray code double N-step phase-shifting method is improved to eliminate periodic spurious tones phase errors in this paper. Firstly, the deformed fringe images are captured by camera to calculate two groups of wrapped phases. Next, the correlation of the two groups of wrapped phases is used to eliminate the phase difference and periodic spurious tones phase error in the detection data, and the two groups of wrapped phases are fused. Finally, the fused wrapped phase is unwrapped by the complementary Gray code phase unwrapping method. The experimental results show that the method in this paper could effectively eliminate the periodic spurious tones phase error and obtain the high-precision unwrapped phase, compared to the complementary Gray code double N-step phase-shifting method that does not eliminate periodic spurious tones phase errors, the accuracy of the detection method in this paper has been improved by about 24.57%. Compared with the complementary Gray code N-step phase-shifting method, the accuracy of the detection method in this paper has been improved by about 6.29%.

Keywords: double N-step phase shift method; wrapped phase; periodic spurious tones phase error; complementary gray code

0 引言

条纹投影轮廓术 (fringe projection profilometry, FPP)

三维重建方法因其具有灵活性高、可靠性高、测量精度高等优点^[1-4],广泛运用于逆向工程、计算机视觉、工业测量等各类场景下^[5-7]。该方法通过解算相位信息得到被测目标的高精度外轮廓信息,其检测精度受到相移步数N

的影响,然而当 N 值较小时,会产生周期性相位误差,当 N 值较大时,会降低算法运行效率^[8-10]。针对上述问题国内外学者做出大量研究,Huang等^[11]提出了双 N 步相移法,双 N 步相移法能够拼接用较小的相移步数得到高精度展开相位,但是,此研究未对两组相移数据的融合做进一步研究。Wang等^[12]提出了先将截断相位融合,再进行相位展开的研究方案,能够有效得到高精度展开相位,然后,此研究在截断相位融合判断部分仅通过一个定制常数进行判断,没有考虑现实中各类因素的影响。Han等^[13]提出互补格雷码双 N 步相移法,先求出展开相位再进行融合,来提高精度,但展开相位步骤需要重复两次,算法效率较低。针对此问题本文提出了一种消除周期性毛刺相位误差的互补格雷码双 N 步相移法,本方法的流程是:首先分别计算得到相机采集到原条纹图像和相移条纹图像的截断相位。然后利用两组截断相位的相关性消除其相位差、周期性毛刺相位误差,再对两组截断相位进行融合,最后通过互补格雷码相位展开法对融合后的截断相位进行相位展开。本文方法能有效消除周期性毛刺相位误差,在检测效率不变的情况下,得到高精度展开相位。

1 周期性毛刺相位误差

在实际环境中,当相移步数 N 较小时,通过相移法得到的截断相位会存在周期性相位误差,在截断相位边缘位置,周期性相位误差会影响其相位值,图1为其原理图。

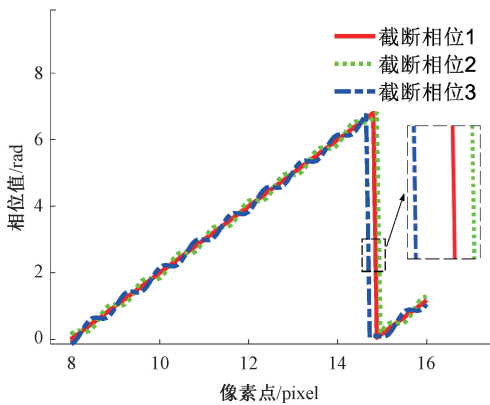


图1 周期性相位误差

Fig. 1 Periodic phase error

如图1所示,截断相位1、截断相位2和截断相位3为3组截断相位数据,其初始相位,相位周期完全相同。由于周期相位误差的影响,这些截断相位截断位置的横坐标会出现偏移,因此使得后续的融合后截断相位,展开相位受到周期性毛刺相位误差的影响,如图2所示。

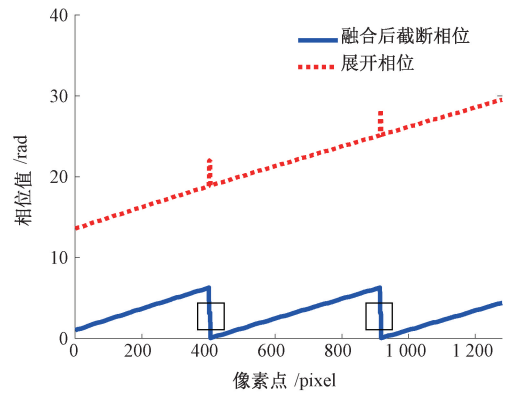


图2 周期性毛刺相位误差

Fig. 2 Periodic spurious tones phase error

2 本文方法

本文提出了一种消除周期性毛刺相位误差的互补格雷码双 N 步相移法,具体步骤如下所示。

算法1:一种消除周期性毛刺相位误差的互补格雷码双 N 步相移法

输入: $2N$ 幅相移条纹图像 $I_1 \sim I_{2N}$, 格雷码条纹图像 $I_1^{\text{gray}} \sim I_M^{\text{gray}}$ 。

输出: 被测目标的展开相位,记为 ψ 。

- 1 将原条纹图像与相移编码条纹图像 $I_1 \sim I_{2N}$, 格雷码条纹图像 $I_1^{\text{gray}} \sim I_M^{\text{gray}}$ 通过 DLP 投影仪投影到被测目标表面,然后通过工业相机依次采集,记为 $I'_1 \sim I'_{2N}, I_1^{\text{gray}} \sim I_M^{\text{gray}}$ 。
- 2 利用公式(1)得到每组图像的截断相位,记为: $[\psi_{\text{no-shift}}^{\text{wrapped}}, \psi_{\text{shift}}^{\text{wrapped}}]$ 。
- 3 利用公式(2)消除 $\psi_{\text{shift}}^{\text{wrapped}}$ 与 $\psi_{\text{no-shift}}^{\text{wrapped}}$ 的相位差,记为: $[\psi_{\text{no-shift}}^{\text{wrapped}}, \psi_{\text{shift}}^{\text{wrapped}}]$ 。
- 4 利用公式(3)得到 $\psi_{\text{shift}}^{\text{wrapped}}$ 与 $\psi_{\text{no-shift}}^{\text{wrapped}}$ 之间的周期性毛刺相位误差,记为: ψ_{tone} 。
- 5 利用公式(4)消除 ψ_{tone} 中更高频率周期相位误差的影响: 记为 ψ'_{tone} 。
- 6 利用公式(5)对 ψ'_{tone} 与 $[\psi_{\text{no-shift}}^{\text{wrapped}}, \psi_{\text{shift}}^{\text{wrapped}}]$ 进行融合,得到融合后的截断相位,记为 $\psi_{\text{fusion}}^{\text{wrapped}}$ 。
- 7 利用公式(6)将 $I_1^{\text{gray}} \sim I_M^{\text{gray}}$ 转化为格雷码级数 ψ_M^{gray} 。
- 8 通过公式(7)与公式(8)得到格雷码级数 ψ_{M-1}^{gray} 与 $\psi_{M-1, \text{co}}^{\text{gray}}$ 。
- 9 将 $\psi_{\text{fusion}}^{\text{wrapped}}, \psi_{M-1}^{\text{gray}}$ 与 $\psi_{M-1, \text{co}}^{\text{gray}}$ 代入公式(9),得到被测目标的展开相位,记为 ψ 。

步骤1:将原条纹图像与相移条纹图 $I_1 \sim I_{2N}$ 格雷码条纹图像 $I_1^{\text{gray}} \sim I_M^{\text{gray}}$ 通过 DLP 投影仪投影到被测目标表面并通过工业相机依次采集,记为 $I'_1 \sim I'_{2N}, I_1^{\text{gray}} \sim I_M^{\text{gray}}$ 。然后,通过式(1)^[14-16]分别得到原编码条纹图像与新增编码条纹图像的截断相位,记为 $[\psi_{\text{no-shift}}^{\text{wrapped}}, \psi_{\text{shift}}^{\text{wrapped}}]$ 。

$$\psi^{\text{wrapped}} = -\arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^N I'_n \sin \frac{2\pi(n-1)}{N}}{\sum_{m=1}^N I'_m \cos \frac{2\pi(m-1)}{N}} \right] \quad (1)$$

式中: $I'_1 \sim I'_N$ 为采集到的原编码条纹图像, $I'_{N+1} \sim I'_{2N}$ 为采集到的新增编码条纹图像。

步骤2:将 $\psi_{\text{shift}}^{\text{wrapped}}$ 代入式(2),消除其与 $\psi_{\text{no-shift}}^{\text{wrapped}}$ 的相位差,记为 $\psi_{\text{shift}}^{\text{rwrapped}}$,式中: $\psi_{\text{shift}}^{\text{rwrapped}}(x, y)$ 为 $\psi_{\text{shift}}^{\text{wrapped}}$ 坐标为 (x, y) 的像素点, $\psi_{\text{shift}}^{\text{wrapped}}(x, y)$ 为 $\psi_{\text{shift}}^{\text{wrapped}}$ 坐标为 (x, y) 的像素点。

$$\psi_{\text{shift}}^{\text{rwrapped}}(x, y) = \begin{cases} \psi_{\text{shift}}^{\text{wrapped}}(x, y) - \frac{\pi}{N}, & \psi_{\text{shift}}^{\text{wrapped}}(x, y) - \frac{\pi}{N} > -\pi \\ \psi_{\text{shift}}^{\text{wrapped}}(x, y) - \frac{\pi}{N} + 2\pi, & \psi_{\text{shift}}^{\text{wrapped}}(x, y) - \frac{\pi}{N} \leq -\pi \end{cases} \quad (2)$$

步骤3:利用公式(3)得到 $\psi_{\text{shift}}^{\text{rwrapped}}$ 与 $\psi_{\text{no-shift}}^{\text{wrapped}}$ 之间的周期性毛刺相位误差,记为: ψ_{tone} 。

$$\psi_{\text{tone}} = \psi_{\text{no-shift}}^{\text{wrapped}} - \psi_{\text{shift}}^{\text{rwrapped}} \quad (3)$$

步骤4:将 ψ_{tone} 代入式(4),消除高频周期相位误差的影响,记为: ψ'_{tone} 。其中: $\psi'_{\text{tone}}(x, y)$ 为 ψ'_{tone} 坐标为 (x, y) 的像素点, $\psi_{\text{tone}}(x, y)$ 为 ψ_{tone} 坐标为 (x, y) 的像素点, $\psi_{\text{thre}}^{\text{wrapped}}$ 为相位阈值,其取值范围如下:

$$\psi_{\text{thre}}^{\text{wrapped}} \in \left[\left(k_1 + \frac{k_2}{N} \right) \pi, 2\pi - \left(k_1 + \frac{k_2}{N} \right) \pi \right]$$

k_1 为补偿测量设备或周围干扰源引入系统误差的系数, k_2 为补偿相移步数 N 引入周期相位误差的系数,在实验室环境或不恶劣的工业环境中, k_1 与 k_2 取值为 0,此时, $\psi_{\text{thre}}^{\text{wrapped}} \in [0, 2\pi]$,通常取 π 。在恶劣的工业环境中, k_1 与 k_2 需要根据实际环境进行选择, $k_1 \in [0, 1], k_2 \in [0, (1 - k_1)N]$ 。

$$\psi'_{\text{tone}}(x, y) = \begin{cases} 2\pi, & |\psi_{\text{tone}}(x, y)| \geq \psi_{\text{thre}}^{\text{wrapped}} \\ 0, & |\psi_{\text{tone}}(x, y)| < \psi_{\text{thre}}^{\text{wrapped}} \end{cases} \quad (4)$$

步骤5:利用式(5)将 $[\psi_{\text{no-shift}}^{\text{wrapped}}, \psi_{\text{shift}}^{\text{rwrapped}}]$ 与 ψ'_{tone} 进行融合,得到融合后的截断相位,记为 $\psi_{\text{fision}}^{\text{wrapped}}$ 。

$$\psi_{\text{fision}}^{\text{wrapped}} = \frac{\psi_{\text{no-shift}}^{\text{wrapped}} + \psi_{\text{shift}}^{\text{rwrapped}} + \psi'_{\text{tone}}}{2} \quad (5)$$

步骤6:将 $I_1^{\text{gray}} \sim I_M^{\text{gray}}$ 通过式(6)^[17-19]得到格雷码级数 ψ_M^{gray} 。

$$\psi_M^{\text{gray}} = \sum_{i=1}^M (2^{i-1} \times I'_{\text{gray}_i}) \quad (6)$$

步骤7:将 ψ_M^{gray} 代入式(7)与式(8)得到格雷码级数 ψ_{M-1}^{gray} 与 $\psi_{M-1, \text{co}}^{\text{gray}}$,其中 $\psi_M^{\text{gray}}(x, y)$ 为 ψ_M^{gray} 坐标为 (x, y) 的像素点, $\psi_{M-1}^{\text{gray}}(x, y)$ 为 ψ_{M-1}^{gray} 坐标为 (x, y) 的像素点, $\psi_{M-1, \text{co}}^{\text{gray}}(x, y)$ 为 $\psi_{M-1, \text{co}}^{\text{gray}}$ 坐标为 (x, y) 的像素点。 $\psi_{M-1, \text{co}}^{\text{gray}}$ 为关于 ψ_{M-1}^{gray} 的互补格雷码级数,互补格雷码相位展开法能有效消除截断相位与格雷码级数相位之间相位不匹配的问题,得到高精度展开相位,其原理如式(9)所示:

$$\psi_{M-1}^{\text{gray}}(x, y) = \left\lfloor \frac{\psi_M^{\text{gray}}(x, y)}{2} \right\rfloor \quad (7)$$

$$\psi_{M-1, \text{co}}^{\text{gray}}(x, y) = \left\lfloor \frac{\psi_M^{\text{gray}}(x, y) + 1}{2} \right\rfloor \quad (8)$$

步骤8:将 $\psi_{\text{fision}}^{\text{wrapped}}, \psi_{M-1}^{\text{gray}}$ 与 $\psi_{M-1, \text{co}}^{\text{gray}}$ 代入式(9)^[20-22],得到被测目标的展开相位,记为 ψ 。其中: $\psi_{\text{fision}}^{\text{wrapped}}(x, y)$ 为 $\psi_{\text{fision}}^{\text{wrapped}}$ 坐标为 (x, y) 的像素点, $\psi(x, y)$ 为 ψ 坐标为 (x, y) 的像素点。

$$\psi(x, y) = \begin{cases} \psi_{\text{fision}}^{\text{wrapped}}(x, y) + 2\pi \times \psi_{M-1, \text{co}}^{\text{gray}}(x, y), & \psi_{\text{fision}}^{\text{wrapped}}(x, y) \leq -\frac{\pi}{2} \\ \psi_{\text{fision}}^{\text{wrapped}}(x, y) + 2\pi \times \psi_{M-1}^{\text{gray}}(x, y), & -\frac{\pi}{2} < \psi_{\text{fision}}^{\text{wrapped}}(x, y) < \frac{\pi}{2} \\ \psi_{\text{fision}}^{\text{wrapped}}(x, y) + 2\pi \times [\psi_{M-1, \text{co}}^{\text{gray}}(x, y) - 1], & \\ \psi_{\text{fision}}^{\text{wrapped}}(x, y) \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (9)$$

3 仿真实验

仿真试验的方案为,首先对所有条纹图像叠加预先设置的噪声。基于文献[23]可知实际环境中数字图像的峰值信噪比的极限情况一般为 25 db,故将有噪声环境下的仿真试验峰值信噪比设置为 25 db 左右。然后运用相移法求取形变条纹图像的截断相位,最后对截断相位展开得到展开相位。

为了方便实验,本文方法及对照方法实验参数选择如表1所示。

表1 实验参数表
Table 1 Experimental parameter table

分类	名称	编号
	互补格雷码 8 步相移法	A
对比方法	未消除周期性毛刺相位误差的互补格雷码双 4 步相移法(文献[11]方法)	B
	互补格雷码 4 步相移法	C
本文方法	消除周期性毛刺相位误差的互补格雷码双 4 步相移法	D

本仿真实验首先得到此环境下两组截断相位,效果图如图 3 所示。

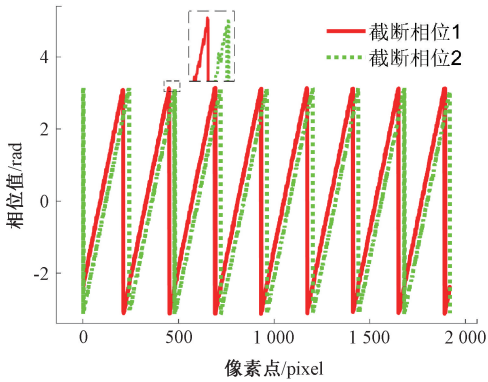


图 3 截断相位效果图
Fig. 3 Wrapped phase

图 4 为消除相位差后截断相位、减弱周期毛刺相位误差并融合后截断相位以及相位展开效果图。

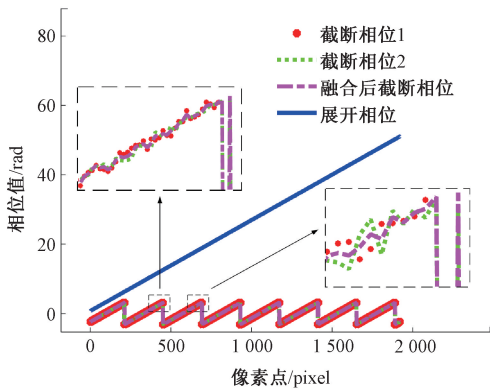


图 4 消除毛刺相位误差效果图
Fig. 4 Effect of eliminating burrs phase errors

通过分析上图,可以发现,本文方法能够有效消除周期性毛刺相位误差,得到高精度展开相位。

4 实物实验

为了验证实际情况下本文所提方法的有效性,搭建了试验平台如图 5 所示。本实验选择白色陶瓷长方体量块和白色聚合乒乓球的球冠分别作为不连续实物目标和连续实物目标。

在实物试验中,首先由计算机控制 DLP 投影仪向待测目标投射预先设定好的相移条纹图像和格雷码条纹图像,再由工业相机采集并保存所有条纹图像,最后通过本文方法得到检测目标的展开相位。本实验对比方法及参数与上文相同,实验结果如图 6 和图 7 所示。

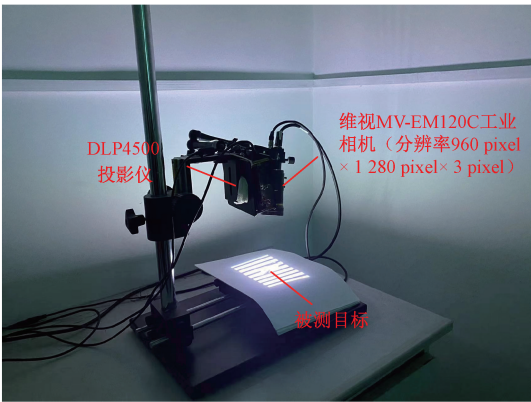
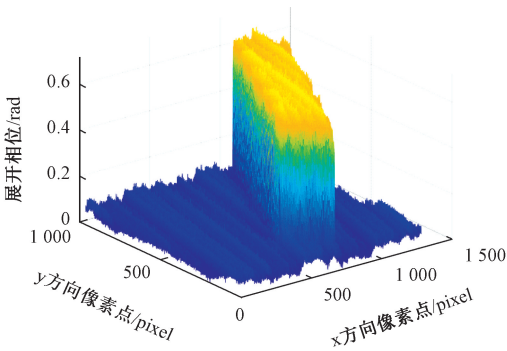
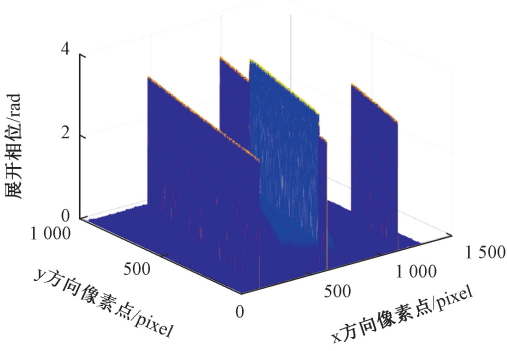


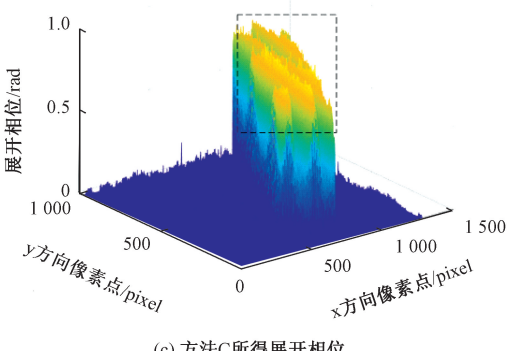
图 5 实物实验平台
Fig. 5 Physical experiment platform



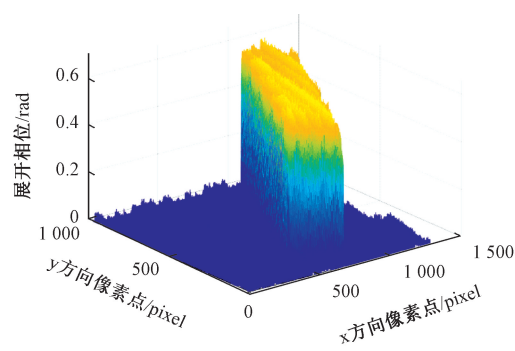
(a) 方法A所得展开相位
(a) The unwrapped phase obtained by method A



(b) 方法B所得展开相位
(b) The unwrapped phase obtained by method B

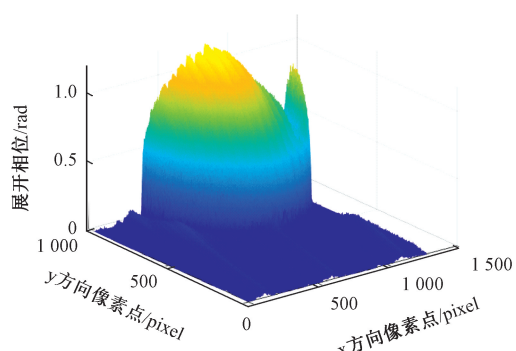


(c) 方法C所得展开相位
(c) The unwrapped phase obtained by method C



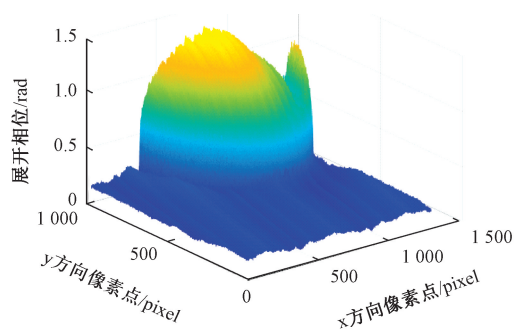
(d) 方法D所得展开相位
(d) The unwrapped phase obtained by method D

图 6 不同方法针对不连续实物目标所得展开相位
Fig. 6 Different methods are used to obtain unwrapped phase for discontinuous object

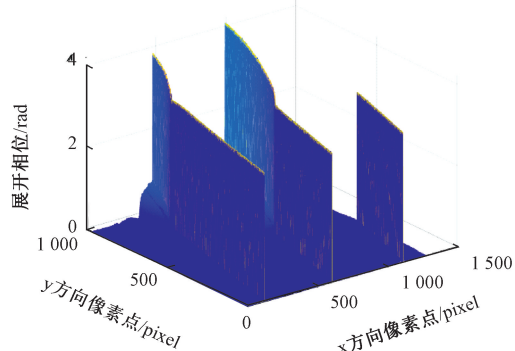


(d) 方法D所得展开相位
(d) The unwrapped phase obtained by method D

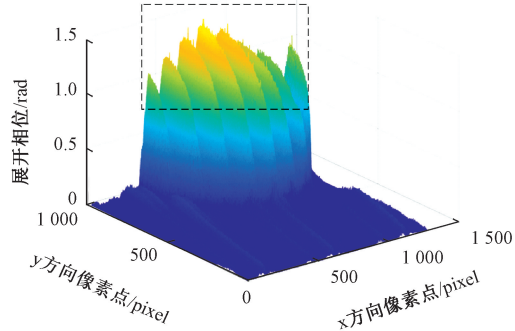
图 7 不同方法针对连续实物目标所得展开相位
Fig. 7 Different methods are used to obtain unwrapped phase for continuous object



(a) 方法A所得展开相位
(a) The unwrapped phase obtained by method A



(b) 方法B所得展开相位
(b) The unwrapped phase obtained by method B



(c) 方法C所得展开相位
(c) The unwrapped phase obtained by method C

分析图 6 和图 7,可知:与互补格雷码 4 步相移法相比,本文方法能够有效消除周期相位误差,得到高精度展开相位;与未消除周期性毛刺相位误差的互补格雷码双 4 步相移法相比,本文能有效的消除周期性毛刺相位误差对展开相位的影响。现计算上述三种方法与互补格雷码 8 步相移法得到展开相位之间的均方根误差 (root mean square error, RMSE),如表 2 所示。

表 2 不同方法与互补格雷码 8 步相移法所得展开相位之间的 RMSE

Table 2 RMSE between the unwrapped phase obtained by different methods and the complementary Gray code 8-step phase-shifting method		
编号	不连续目标	连续目标
B	0.188 3	0.247 0
C	0.105 9	0.198 8
D	0.066 9	0.186 3

由表 2 可知,相比于未消除周期性毛刺相位误差的互补格雷码双 4 步相移法,本文检测方法精度提高了 24.57%,相比于互补格雷码 4 步相移法,本文检测方法精度提高了 6.29%,现统计不同方法运行效率如表 3 所示。

表 3 不同算法运行效率表
Table 3 Different algorithm running efficiency table

编号	算法模块
A	1 次 8 步相移法,1 次互补格雷码相位展开法
B	2 次 4 步相移法,1 次互补格雷码相位展开法
C	1 次 4 步相移法,1 次互补格雷码相位展开法
D	2 次 4 步相移法,1 次互补格雷码相位展开法

通过对比,可知:本文方法无额外算法流程,在保证检测效率的情况下,能有效消除周期性毛刺相位误差,得到高精度展开相位。

5 结 论

本文首先通过分析得到了周期性毛刺相位误差的产生机理;然后提出一种消除周期性毛刺相位误差的互补格雷码双N步相移法。其流程为:首先由投影仪投射两组相移条纹图像和格雷码条纹图像,再通过工业相机捕获形变条纹图像并计算出两组截断相位,然后利用两组截断相位的相关性消除检测数据中的相位差、周期性毛刺相位误差,再对两组截断相位进行融合,最后通过互补格雷码相位展开法对融合后的截断相位进行相位展开。本文通过大量对比实验充分论证了本文方法的有效性,证明了本文方法在保证检测效率不变的情况下,能有效消除周期性毛刺相位误差,得到高精度展开相位,相比于未消除周期性毛刺相位误差的互补格雷码双N步相移法,本文检测方法精度提高了约24.57%,相比于互补格雷码N步相移法,本文检测方法精度提高了约6.29%。本文方法的提出,消除了互补格雷码双N步相移法中的周期性毛刺相位误差,提高了互补格雷码双N步相移法的实用价值,为条纹投影轮廓术领域提供了新的理论基础与实验基础。

参考文献

- [1] 李茂月,马康盛,许勇浩,等.基于单目结构光的形貌测量误差补偿方法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(5):19-31.
- LI M Y, MA K SH, XU Y H, et al. Research on morphology measurement error compensation method based on the monocular structure light[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(5):19-31.
- [2] 殷永凯,张宗华,刘晓利,等.条纹投影轮廓术系统模型与标定综述[J].红外与激光工程,2020,49(3):127-144.
- YIN Y K, ZHANG Z H, LIU X L, et al. Review of the system model and calibration for fringe projection profilometry[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020,49(3):127-144.
- [3] 王邳,陈文静,韩梦奇.基于傅里叶变换的改进圆形条纹投影轮廓术[J].光学学报,2022,42(13):89-99.

- WANG Y, CHEN W J, HAN M Q, et al. Improved circular fringe projection profilometry based on fourier transform[J]. Acta Optica Sinica, 2022,42(13):89-99.
- [4] WANG J, ZHANG Z H, LU W L, et al. High-accuracy calibration of high-speed fringe projection profilometry using a checkerboard[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022,27(5):4199-4204.
- [5] 冯世杰,左超,尹维,等.深度学习技术在条纹投影三维成像中的应用[J].红外与激光工程,2020,49(3):238-254.
- FENG SH J, ZUO C, YIN W, et al. Application of deeplearning technology to fringe projection 3D imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020,49(3):238-254.
- [6] 吴荣,赵世丽,赵洋,等.条纹投影用于不同景深物体的三维测量[J].红外与激光工程,2022,51(11):314-323.
- WU R, ZHAO SH L, ZHAO Y, et al. Fringe projection profilometry for 3D measurement of objects with different depth of fields[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022,51(11):314-323.
- [7] 伏燕军,蔡晓奇,钟可君,等.基于条纹投影轮廓术的相位-高度映射标定方法(英文)[J].红外与激光工程,2022,51(4):295-303.
- FU Y J, CAI X Q, ZHONG K J, et al. Method for phase-height mapping calibration based on fringe projection profilometry[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022,51(4):295-303.
- [8] 徐鹏,刘锦涛,王建华.改进的双N步相移轮廓术[J].电子测量与仪器学报,2022,36(8):213-222.
- XU P, LIU J T, WANG J H. Improved double N-step phase-shifting profilometry[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(8):213-222.
- [9] 张申华,杨延西.一种针对投影仪gamma效应的相位误差补偿方法[J].仪器仪表学报,2019,40(11):1-8.
- ZHANG SH H, YANG Y X. A phase error compensation method for the gamma effect of projector[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(11):1-8.
- [10] HAN SH H, YANG Y X, ZHANG X Y, et al. Complementary Gray code Fourfold-N step phase shift

- grating fringe projection profilometry[J]. IEEE Sensors Journal, 2023; 1-1.
- [11] HUANG P S, HU Q J, CHIANG F P. Double three-step phase-shifting algorithm[J]. APPLIED OPTICS, 2002, 41(22).
- [12] 王建华, 杨延西. 基于彩色编码光栅投影的双 N 步相移轮廓术[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 616-627.
WANG J H, YANG Y X. Double N-step phase-shifting profilometry using color-encoded grating projection[J]. Chinese Optics, 2019, 12(3): 616-627.
- [13] 韩叔恒, 杨延西, 张新雨, 等. 互补格雷码双 N 步相移的彩色编码光栅投影轮廓术[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 42-49.
HAN SH H, YANG Y X, ZHANG X Y, et al. Color coded grating projection complementary gray code double N-step phase shift profilometry[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 42-49.
- [14] 张申华, 杨延西. 非静态物体的光栅图像投影 3D 测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(8): 158-166.
ZHANG SH H, YANG Y X. 3D measurement method using grating image projection for non-static object[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(8): 158-166.
- [15] 李杰, 陈彬, 曾欣怡, 等. 基于条纹级次编码与调制的结构光相位展开算法[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 151-161.
LI J, CHEN B, ZENG X Y, et al. Phase unwrapping algorithm for structured light based on fringe-order encoding and modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 151-161.
- [16] YU J, DA F P. Absolute phase unwrapping for objects with large depth range[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-10.
- [17] 王浩然, 吴周杰, 张启灿, 等. 基于时间复用编码的高速三维形貌测量方法[J]. 光学学报, 2023, 43(1): 117-127.
WANG H R, WU ZH J, ZHANG Q C, et al. High-speed three-dimensional morphology measurement based on time multiplexing coding[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(1): 117-127.
- [18] 陆丽莲, 吴周杰, 张启灿. 基于错位格雷码的动态三维形貌测量方法[J]. 光学学报, 2022, 42(5): 103-112.
LU L L, WU ZH J, ZHAN Q C. Dynamic three-dimensional shape measurement method based on misaligned gray code. [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 103-112.
- [19] JIA T, XU D, WANG H Y, et al. An adaptive defocus three-dimensional measurement method based on tabu search and combined gray code[J]. IEEE Access, 2020, 8(14724-14736).
- [20] 严飞, 祁健, 刘银萍, 等. 基于格雷码的分区间相位展开方法[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 79-85.
YAN F, QI J, LIU Y P, et al. Inter-partition phase unwrapping method based on Gray code[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 79-85.
- [21] 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): 78-90.
ZHANG Q C, WU ZH J. Three-dimensional imaging technique based on Gray-coded structured illumination[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 78-90.
- [22] 刘今越, 马旭哲, 崔月盟, 等. 基于自适应插值滤波的室内环境高速重建系统[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(8): 374-381.
LIU J Y, MA X ZH, CUI Y M, et al. High speed reconstruction system for indoor environments based on an adaptive interpolation filter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(8): 374-381.
- [23] 郑翔, 米新英, 高见. 修订国家标准《民用闭路监视电视系统工程技术规范》工作浅谈[J]. 广播与电视技术, 2012, 39(11): 70+72-75+15.
ZHENG X, MI X Y, GAO J. Brief discussion on the revision of the national standard "Civil Closed Circuit Surveillance Television System Engineering Technical Code"[J]. Radio & TV Broadcast Engineering, 2012, 39(11): 70+72-75+15.

作者简介



韩叔恒, 2016 年于西安理工大学获得学士学位, 2021 年于兰州理工大学获得硕士学位, 现为西安理工大学在读博士研究生, 主要研究方向为机器视觉和数字信号处理。

E-mail: han_shuhuan@163.com

Han Shuhuan received his B.Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2016, and received his M. Sc. degree from Lanzhou University of Technology in 2021. He is currently a Ph. D. candidate at Xi'an University of Technology. His main research interests include machine vision and digital signal processing.



杨延西 (通信作者), 2003 年于西安理工大学获得博士学位, 现为西安理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为复杂系统控制、机器视觉和智能机器人。

E-mail: yangyanxi@xaut.edu.cn

Yang Yanxi (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Xi'an University of Technology in 2003. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Xi'an University of Technology. His main research interests include industrial parameter detection technology and estimation theory, adaptive filtering, and multi-objective optimization.



张新雨, 男, 2017 年于西安理工大学获得博士学位, 现为西安理工大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为工业参量检测技术与估计理论、自适应滤波、多目标优化等。

E-mail: xhyzzxy@126.com

Zhang Xinyu received his Ph. D. degree from Xi'an University of Technology in 2017. He is an assistant professor and a master advisor at Xi'an University of Technology. His main research interests include complex system control, machine vision and intelligent robot.



李昕杰, 2022 年于西安科技大学获得学士学位, 现为西安理工大学在读硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉和数字信号处理。

E-mail: 1270278329@qq.com

Li Xinjie received his B.Sc. degree from Xi'an University of Science and Technology in 2022. He is currently a M. Sc. candidate at Xi'an University of Technology. His main research interests include machine vision and digital signal processing.