

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210729

互补格雷码双 N 步相移的彩色编码光栅投影轮廓术*

韩叔桓^{1,2}, 杨延西^{1,2}, 张新雨¹, 刘伟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:在三维轮廓测量领域,互补格雷码相移法能够得到连续的展开相位,然而,单组相移条纹导致其测量精度极易受到周围环境变化的影响,且传统投影方式增加了干扰的引入。针对此问题,本文提出了一种基于彩色编码光栅投影的互补格雷码双 N 步相移法。首先将双 N 步相移条纹和互补格雷码条纹混合编码成彩色条纹,然后依次投射到目标表面,最后从采集的彩色条纹中提取相位信息分别进行相位解算、融合后求得表面三维形貌。为了验证本文所提方法,将该方法与传统互补格雷码 N 步相移法以及三频外差法进行了对比实验。实验结果证明,本文方法能够获得高精度表面形貌信息,有效降低测量误差,同时检测效率提高 50%。

关键词:刚体轮廓检测;彩色条纹;双 N 步相移法;互补格雷码;相移轮廓术

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

Color coded grating projection complementary gray code double N -step phase shift profilometry

Han Shuhuan^{1,2}, Yang Yanxi^{1,2}, Zhang Xinyu¹, Liu Wei¹

(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: In the field of three-dimensional contour measurement, the complementary gray code phase shift method can obtain continuous unwrapped phase. However, the measurement accuracy of a single set of phase shift fringes is easily affected by the changes in the surrounding environment, and the traditional projection method increases the introduction of interference. To solve this problem, this article proposes a complementary gray code double- N -step phase shift profilometry based on the color-coded grating projection. First, the double- N -step phase shift fringe and the complementary gray code fringe are mixed and coded into color fringe, and then projected onto the target surface in turn. Finally, the phase information is extracted from the collected color fringe, and the phase is calculated and fused to obtain the three-dimensional surface topography. To evaluate the proposed method, a comparative experiment is carried out among this method, the traditional complementary Gray code N -step phase shift method and the three-frequency heterodyne method. Experimental results show that this method can obtain high-precision surface topography information, effectively reduce the measurement error, and improve the detection efficiency by 50%.

Keywords: rigid body contour detection; color stripe; double N -step phase shift method; complementary Gray code; phase shift profilometry

0 引 言

随着检测技术的不断进步,非接触三维几何面型测量被广泛应用于各个领域。例如:3D 人面识别、工业成

品率检测、刚体表面轮廓检测等。光栅投影法作为光学检测的一种,具有检测精度高等特点。其检测基本原理为:数字光处理(digital light processing, DLP)投影仪将预先设定好的编码条纹投影到被测目标表面^[1]。投影条纹因被测目标表面轮廓而发生改变,工业相机将改变的投

影条纹进行采集,最后通过分析得到被测目标的表面轮廓特征^[2]。然而此类方法仍存在着误差较大、检测效率低等特点^[3],具体原因如下:单次检测需要拍摄8幅及以上投影图像,在实际检测过程中,环境中的光强等条件会因为各种因素发生变化,从而引入噪声误差^[4]。因此,提出一种新的解决方案就显示非常重要。

近年来,针对光栅投影法存在的问题,国内外学者提出了大量的解决方案,青岛理工大学的Wang等^[3]提出了 $3N$ 步相位偏移法来提高检测精度,并取得了显著的提高。但是, $3N$ 步相位偏移法却需要针对单一目标增加 $2N$ 张图像,这不仅对运行效率造成了巨大的损失,更是增加了单目标的检测时间,从而影响检测精度。四川大学的Zhang等^[5]和陆丽莲等^[6]提出了一种互补格雷码的编码条纹,在原有编码条纹的基础上增加一张格雷码条纹图像,得到变化提前 $1/2$ 正弦周期的新编码级数。利用两份编码级数消除展开相位中周期边沿的误差,此方法需要在原有投影图像基础上增加一幅格雷码条纹图像才能完成单个目标的检测,因而未消除因拍摄时间过长而引起光强等因素变化的噪声误差。为此,本文提出一种基于彩色编码光栅投影的互补格雷码双 N 步相移法,将原本的相移条纹和格雷码条纹混合编码成彩色条纹^[7],然后投射 N 幅条纹图像到目标,再从采集的彩色条纹中提取相位信息解耦后进行相位解算获得三维形貌信息,该方法可以在较短时间内完成检测,并得到消除相位误差的结果,从而实现高精度快速轮廓检测。

1 格雷码 N 步相移法及其误差分析

1.1 格雷码 N 步相移法

格雷码 N 步相移法常用的光栅投影相移条纹一般为行(或列)的正(或余)弦条纹图像^[8],其正(或余)弦条

纹图像的物理表达式如式(1)所示。

$$I_{(x,y)} = A + B\cos(2\pi f_0 x + \theta_0) \quad (1)$$

式中: I 表示图像的灰度值, A, B 为常数, f_0 为编码条纹的额定频率, θ_0 为编码条纹的初始相位, x 为像素的横坐标。通过式(1)可知:光栅投影条纹被调制为变化在 $A \pm B$ 范围内,频率为 f_0 的余弦条纹。

令光栅投影条纹的相位在一个周期内均匀偏移 N 次($N \geq 3$),便可得到 N 幅幅值、频率相同,连续图像相位差 $\frac{2\pi}{N}$ 的 N 幅编码条纹图像^[9],表达式如式(2)所示,其中, $n \in [1, N]$ 。

$$I_{n(x,y)} = A + B\cos\left[2\pi f_0 x + \theta_0 + (n-1)\frac{2\pi}{N}\right] \quad (2)$$

上述条纹图像通过DLP投影仪投影到被测目标表面,然后依次通过工业相机进行采集。采集到的图像物理表达式如(3)式所示^[10],其中, $n \in [1, N]$ 。

$$I'_{n(x,y)} = A'_{(x,y)} + B'_{(x,y)}\cos\left[2\pi f_0 x + \theta_0 + (n-1)\frac{2\pi}{N}\right] \quad (3)$$

其中, N, θ_0, f_0, x 的定义与式(1)相同, $A'_{(x,y)}$ 为背景光强, $B'_{(x,y)}$ 为调制强度。代入式(4)得到频率为 f_0 的截断相位图,如图1(a)所示。

$$\psi_{(x,y)} = -\arctan\left\{\frac{\sum_{n=1}^N I'_{n(x,y)} \sin\left[\frac{2\pi(n-1)}{N}\right]}{\sum_{m=1}^N I'_{m(x,y)} \cos\left[\frac{2\pi(m-1)}{N}\right]}\right\} \quad (4)$$

N 步相移截断相位的展开采用格雷码级数法,格雷码级数如图1(b)所示^[11]。通过式(5)得到目标展开相位,如图1(c)所示,其中 $\psi'_{(x,y)}$ 表示展开后的相位图像, $\psi_{(x,y)}$ 表示截断相位图像, $Ge_{(x,y)}$ 表示格雷码级数^[12]。

$$\psi'_{(x,y)} = \psi_{(x,y)} + 2\pi Ge_{(x,y)} \quad (5)$$

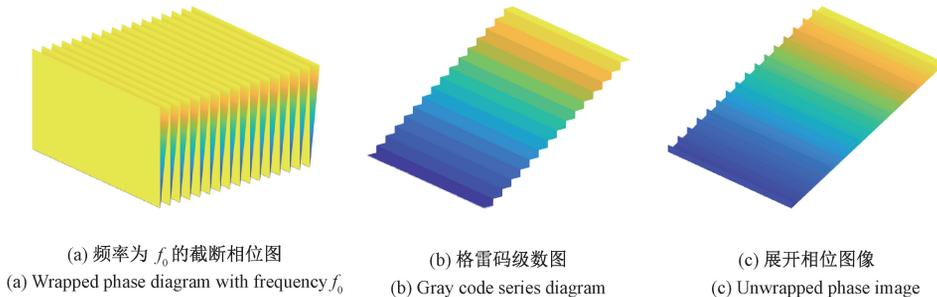


图1 截断相位展开原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the unwrapped phase

1.2 误差分析

图2所示为实际环境中检测目标的截断相位图,从图中可发现结果存在一定的误差,因此推断在实际环境

中存在干扰因素引起误差。在理想条件下, $A'_{(x,y)}$ 与 $B'_{(x,y)}$ 在多幅相位图像的各个像素点处为定值或满足高斯分布。在式(4)中,因为正弦(余弦)函数在 $[0, 2\pi]$

的积分为0且分子分母均包含 $NB'_{(x,y)}$,因此通过式(4)的运算可以消除背景光强 $A'_{(x,y)}$ 和调制强度 $B'_{(x,y)}$ 对检测结果的影响。然而在实际环境中,背景光强 $A'_{(x,y)}$ 会受到很多额外因素的影响^[13-15],具体如下:

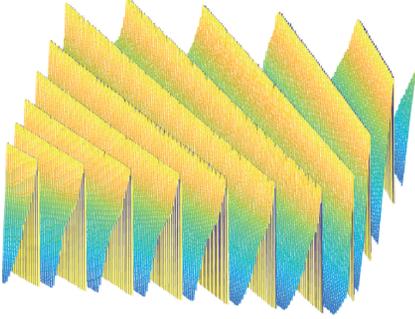


图2 实际环境中的截断相位图

Fig. 2 Wrapped phase diagram in real environment

1) 因周围环境改变而引起背景光强 $A'_{(x,y)}$ 突变,在工业环境中,经常会因为工件移动和仪器状态改变而引起背景光强 $A'_{(x,y)}$ 突变。此误差的物理模型可由式(6)所示。

$$I''_{n(x,y)} = I'_{n(x,y)} + \Delta A_{n(x,y)} = A'_{(x,y)} + \Delta A_{n(x,y)} + B'_{(x,y)} \cdot \cos \left[2\pi f_0 x + \theta_0 + (n-1) \frac{2\pi}{N} \right] \quad (6)$$

其中, $\Delta A_{n(x,y)}$ 为周围环境改变而引入的背景光强相对变化量,不同相位图像中 $\Delta A_{n(x,y)}$ 之间的关系如式(7)所示。

$$\begin{aligned} \Delta A_{N(x,y)} &= b_{N-1} + \Delta A_{N-1(x,y)} = b_{N-2} + \Delta A_{N-2(x,y)} \\ &= \dots = b_2 + \Delta A_{2(x,y)} = b_1 + \Delta A_{1(x,y)} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $b_1 \sim b_N$ 均为常数。

2) 因条纹变化使得光强改变导致曝光时间变化引起背景光强 $A'_{(x,y)}$ 变化,此误差的物理模型可由式(8)表示,其中 $\Delta A_n^2(x,y)$ 为因曝光时间改变而引入的背景光强相对变化量。

$$I''_{n(x,y)} = I'_{n(x,y)} + \Delta A_{n(x,y)} = A'_{(x,y)} + \Delta A_{n(x,y)} + \Delta A_n^2(x,y) + B'_{(x,y)} \cos \left[2\pi f_0 x + \theta_0 + (n-1) \frac{2\pi}{N} \right] \quad (8)$$

而调制强度 $B'_{(x,y)}$ 更是受到被测目标表面颜色、条纹以及反光情况的影响。令调制强度的变化量为 $\Delta B_{(x,y)}$,则包裹相位的表达式如式(9)所示。

$$\begin{aligned} \psi'_{(x,y)} &= \\ &= -\arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^N (I'_{n(x,y)} + \Delta I_{n(x,y)}) \sin \frac{2\pi(n-1)}{N}}{\sum_{m=1}^N (I'_{m(x,y)} + \Delta I_{m(x,y)}) \cos \frac{2\pi(m-1)}{N}} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $n \in [1, N]$ 。

$$\Delta I_{n(x,y)} = \Delta A_{n(x,y)} + \Delta A_n^2(x,y) + \Delta B_{(x,y)} \cos \left[2\pi f_0 x + (n-1) \frac{2\pi}{N} \right]$$

$$I'_{n(x,y)} = A'_{(x,y)} + B'_{(x,y)} \cos \left[2\pi f_0 x + \theta_0 + (n-1) \frac{2\pi}{N} \right]$$

令 $\Delta\psi_{(x,y)}$ 为误差引起的相位畸变量,则:

$$\tan[\Delta\psi_{(x,y)}] = \tan[\psi'_{(x,y)} - \psi_{(x,y)}] = \frac{\tan(\psi'_{(x,y)}) - \tan(\psi_{(x,y)})}{1 + \tan(\psi'_{(x,y)})\tan(\psi_{(x,y)})} =$$

$$\frac{\frac{\sum_{n=1}^N (I'_{n(x,y)} + \Delta I_{n(x,y)}) \sin \frac{2\pi(n-1)}{N}}{\sum_{m=1}^N (I'_{m(x,y)} + \Delta I_{m(x,y)}) \cos \frac{2\pi(m-1)}{N}} - \frac{\sum_{n=1}^N I'_{n(x,y)} \sin \frac{2\pi(n-1)}{N}}{\sum_{m=1}^N I'_{m(x,y)} \cos \frac{2\pi(m-1)}{N}}}{1 + \frac{\sum_{n=1}^N (I'_{n(x,y)} + \Delta I_{n(x,y)}) \sin \frac{2\pi(n-1)}{N}}{\sum_{m=1}^N (I'_{m(x,y)} + \Delta I_{m(x,y)}) \cos \frac{2\pi(m-1)}{N}} \cdot \frac{\sum_{n=1}^N I'_{n(x,y)} \sin \frac{2\pi(n-1)}{N}}{\sum_{m=1}^N I'_{m(x,y)} \cos \frac{2\pi(m-1)}{N}}} \quad (10)$$

从而可得到 $\Delta\psi_{(x,y)}$ 的表达式如式(11)所示。

$$\begin{aligned} \Delta\psi_{(x,y)} &= -\arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^N (I'_{n(x,y)} + \Delta I_{n(x,y)}) \sin \frac{2\pi(n-1)}{N}}{\sum_{m=1}^N (I'_{m(x,y)} + \Delta I_{m(x,y)}) \cos \frac{2\pi(m-1)}{N}} - \frac{\sum_{n=1}^N I'_{n(x,y)} \sin \frac{2\pi(n-1)}{N}}{\sum_{m=1}^N I'_{m(x,y)} \cos \frac{2\pi(m-1)}{N}} \right] \\ &= -\arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^N (I'_{n(x,y)} + \Delta I_{n(x,y)}) \sin \frac{2\pi(n-1)}{N}}{\sum_{m=1}^N (I'_{m(x,y)} + \Delta I_{m(x,y)}) \cos \frac{2\pi(m-1)}{N}} \right] \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sum_{n=1}^N (I'_{n(x,y)} + \Delta I_{n(x,y)}) \sin \frac{2\pi(n-1)}{N}}{\sum_{m=1}^N (I'_{m(x,y)} + \Delta I_{m(x,y)}) \cos \frac{2\pi(m-1)}{N}} \cdot \frac{\sum_{n=1}^N I'_{n(x,y)} \sin \frac{2\pi(n-1)}{N}}{\sum_{m=1}^N I'_{m(x,y)} \cos \frac{2\pi(m-1)}{N}}} \end{aligned} \quad (11)$$

2 互补格雷码双N步相移法

2.1 彩色编码条纹

本文提出了一种双N步相移法与互补格雷码结合的彩色编码条纹生成方法,彩色编码条纹图像可视为由RGB三基色组成的三维阵列。其中双N步相移法是指在原有的N步相移条纹基础上,增加一组相位偏移 $\frac{\pi}{N}$ 的附加条纹,此方法能够降低测量误差,提高精度。

本文通过对大量工业现场(如高温锻件测量和高温不锈钢零件测量环境)图像进行光谱分析,发现现场的投影条纹更容易受到红外干扰的影响,因此,为了保证测量方法在此类工业环境中的可靠性,本文将鲁棒性较好的互补格雷码编码条纹设置在R图层,双N步相移条纹分别设置在G图层和B图层,其原理如图3所示。

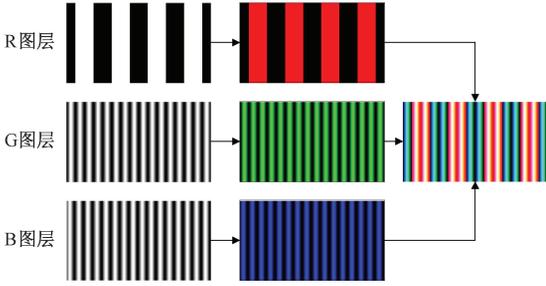


图3 彩色编码条纹原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the color coded stripes

如图3所示,本文首先将所有格雷码条纹图像与相移条纹图像的灰度值映射到 $[0, 2^b]$ 范围内,其中, b 与DLP投影仪像素点的位数相同。创建数量与互补格雷码条纹、原始相移条纹中较大数量相同的彩色编码条纹图像,并依次将互补格雷码条纹、原始相移条纹、偏移相移条纹依次写入彩色编码条纹图像的RGB三层,得到最终的彩色编码条纹图像。

2.2 互补格雷码双N步相移法

本文使用工业相机采集彩色编码条纹,通过分析得到目标的外轮廓展开相位,其原理与具体步骤如算法1所示。为了便于书写,实验步骤将变量角标省略。

1) 将采集到的图像 I_n^in 利用式(12)进行分解,得到对应的互补格雷码条纹与双N步相移条纹,分别记为 Ge_n^in 、 $I_{0,n}^in$ 、 $I_{\pi/N,n}^in$,其中: M 和 N 表示互补格雷码条纹图像与双N步相移条纹图像的数量, $n \in \max[M, N]$ 。

$$I_n^in = [R_n^in, G_n^in, B_n^in] = [Ge_n^in, I_{0,n}^in, I_{\pi/N,n}^in] \quad (12)$$

2) 分别将 $I_{0,n}^in, I_{\pi/N,n}^in$ 代入式(13),得到截断相位 ψ_0^in 、

$$\psi_{\pi/N}^in。$$

算法1 彩色编码相位展开算法

输入:相机采集到的彩色编码图像,记为 I_n^in

输出:目标的输出展开相位,记为 ψ'

- 1) for $n=1; n < N; n++$ do
- 2) 利用式(13)分解 I_n^in ,分别得到互补格雷码编码图像 Ge_n^in 、双N步相移图像 $I_{0,n}^in, I_{\pi/N,n}^in$;
- 3) 利用式(14)分别求得 $I_{0,n}^in, I_{\pi/N,n}^in$ 的截断相位 $\psi_0^in, \psi_{\pi/N}^in$;
- 4) 通过格雷码转化 Ge_n^in 得到格雷码级数 $Ge(M)$ 和 $Ge(M-1)$;
- 5) 利用式(15)得到互补格雷码级数 $Ge^{co}(M-1)$;
- 6) 利用式(16)分别得到展开相位 ψ_0 和 $\psi_{\pi/N}$;
- 7) 利用式(17)得到输出展开相位,记为 ψ' ;

$$\psi^in = -\arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^N I_n^in \sin \frac{2\pi(n-1)}{N}}{\sum_{m=1}^N I_n^in \cos \frac{2\pi(m-1)}{N}} \right] \quad (13)$$

3) 将 Ge_n^in 进行进制转换,得到 M 张图像转换的格雷码级数图像阵列 $Ge(M)$ 与其前 $M-1$ 张图像转换的格雷码级数图像阵列 $Ge(M-1)$ 。

4) 将 $Ge(M)$ 代入式(14),得到 $Ge(M-1)$ 的互补格雷码级数图像阵列 $Ge^{co}(M-1)$,其中 $Ge^{co}(M-1)$ 表示求得的互补格雷码级数阵列。

$$Ge^{co}(M-1) = \left[\frac{Ge(M) + 1}{2} \right] \quad (14)$$

5) 分别将截断相位 $\psi_0^in, \psi_{\pi/N}^in$ 代入式(15),求得其展开相位 $\psi_0, \psi_{\pi/N}$ 。式(15)中: $\psi^in(x, y)$ 为 ψ^in 图像阵列中横纵坐标为 x 和 y 像素点的值, $Ge^{co}(x, y), Ge(x, y), \psi(x, y)$ 与 $\psi^in(x, y)$ 类似。

$$\psi(x, y) =$$

$$\begin{cases} \psi^in(x, y) + 2\pi Ge^{co}(x, y), & \psi^in(x, y) \leq -\frac{\pi}{2} \\ \psi^in(x, y) + 2\pi Ge(x, y), & -\frac{\pi}{2} < \psi^in(x, y) < \frac{\pi}{2} \\ \psi^in(x, y) + 2\pi [Ge^{co}(x, y) - 1], & \psi^in(x, y) \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (15)$$

6) 最后利用式(16)得到输出展开相位,式中, ψ' 为输出展开相位。

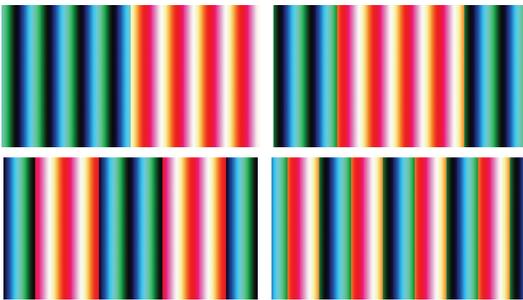
$$\psi' = \frac{\psi_0 + \psi_{\pi/N} - \frac{\pi}{N}}{2} \quad (16)$$

3 实 验

为验证方法的有效性,本文首先进行了模拟形变彩色编码条纹求得三维轮廓的仿真实验,然后 DLP 投影仪与工业相机进一步测试有效性。除本文方法外,分别对被测目标进行三频外差法与互补格雷码 N 步相位法进行轮廓检测作对比论证。

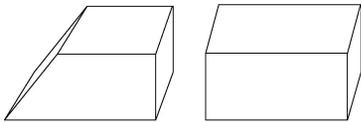
3.1 仿真实验

本实验采用尺寸为 $1\ 080\ \text{pixel} \times 1\ 920\ \text{pixel} \times 3\ \text{pixel}$ 、频率为 128 的互补格雷码双四步相移彩色编码条纹,则编码条纹共出现 $1\ 080/128=8$ 个周期。则互补格雷码图像与原始相移图像均为 4,根据上文进行编码,结果如图 4(a)所示。



(a) 投影图像

(a) Projected images



(b) 仿真投影目标

(b) Simulation projection targets

图 4 仿真实验

Fig. 4 Simulation experiments

综上所述,仿真实验采用在无噪声与有噪声且峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)为 25 dB 两种环境。已知数字视频安防监控系统图像质量和技术指标峰值信噪比不低于 32 dB,且 25 dB 为已知实验中峰值信噪比最低的情况^[16],因此选择 25 dB 作为极限情况进行仿真实验。对彩色编码条纹图像加入幅值为 25 的高斯噪声并利用式(17)分别求得图像每个图层数据在有噪声条件下的峰值信噪比,结果如表 1 所示。

$$I_{PSNR} = 10 \times \lg \left[\frac{1\ 080 \times 1\ 920 \times (2^8 - 1)^2}{\sum_{x=1}^{1\ 920} \sum_{y=1}^{1\ 080} [I(x,y) - I^n(x,y)]^2} \right] \quad (17)$$

其中, $I(x,y)$ 为无噪声编码条纹图像横纵坐标为 x,y 像素点的值, $I^n(x,y)$ 为引入噪声图像横纵坐标为 x,y 像素点的值, I_{PSNR} 为峰值信噪比值。

表 1 峰值信噪比计算结果

Table 1 PSNR calculation results

dB

图层	图像 1	图像 2	图像 3	图像 4
R 图层	24.94	24.94	24.94	24.94
G 图层	25.37	25.31	25.31	25.31
B 图层	25.35	25.30	25.30	25.35

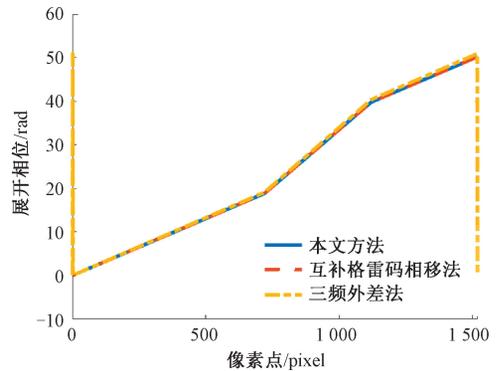
由表 1 可知,引入噪声后图像的峰值信噪比约等于 25 dB,满足预先设置的噪声环境。模拟将图 4(a)的 4 幅彩色编码条纹依次分别投影到图 4(b)的目标表面,通过分析彩色编码条纹变形情况得到仿真目标的外轮廓展开相位。

通过分析展开相位可知,得到的展开相位每行数据完全相同。本文选择任意行数据进行分析,结果如图 5 所示,其中图 5(a)与(b)分别表示无/有噪声情况下图 4(b)中连续目标展开相位的行向量,图 5(c)与(d)分别表示无/有噪声情况下图 4(b)中不连续目标展开相位的行向量。

通过对比本文方法、互补格雷码相移法以及三频外差法,可以发现本文方法输出曲线的相位误差明显降低,相位误差得到了很好的抑制。

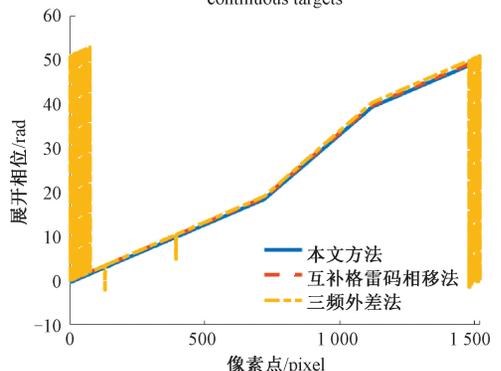
3.2 实物实验

本文采用德州仪器的 DLP4500 投影仪以及维视 MV-EM120C 工业相机(分辨率 $960\ \text{pixel} \times 1\ 280\ \text{pixel} \times 3\ \text{pixel}$)搭建了实验平台,如图 6 所示。为了确保实验的



(a) 连续目标无噪声展开相位图

(a) Noise-free unwrapped phase diagram of continuous targets



(b) 连续目标有噪声展开相位图(噪声幅值 25)

(b) Unwrapped diagram of continuous target with noise (noise amplitude 25)

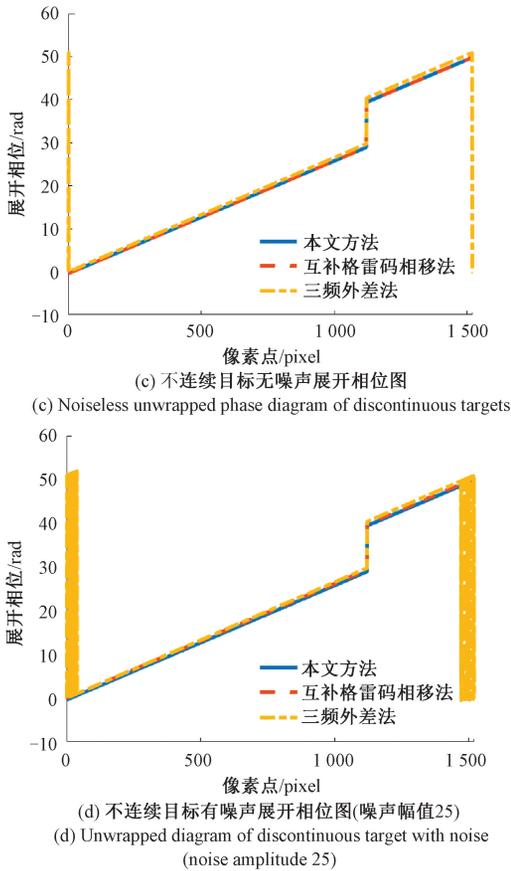


图 5 不同情况第 500 行展开相位图

Fig. 5 Line 500 expanded phase diagram in different conditions

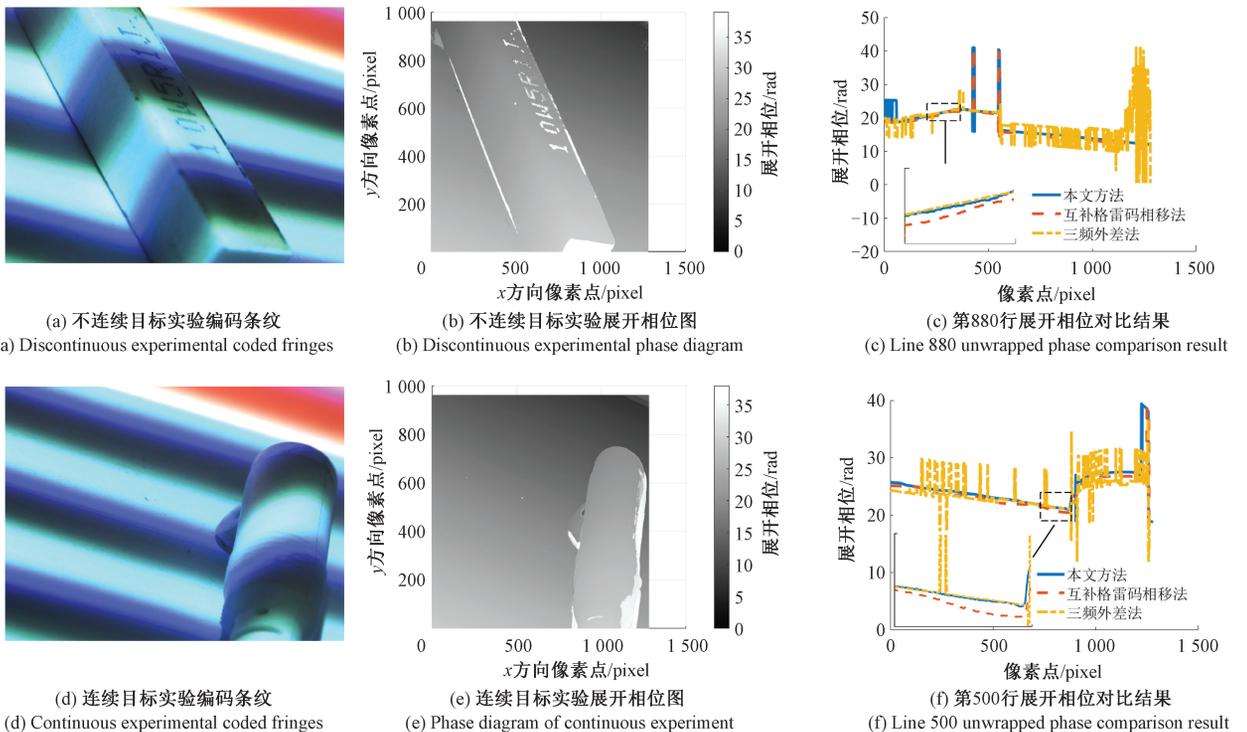


图 7 实验结果

Fig. 7 Experimental results

客观性与直观性, 本文将展开相位分别切分为 960 个行向量, 并随机选取任意行的数据进行误差分析。其中, 非连续目标选取其中的第 880 行的数据进行分析, 而连续目标选取其中的第 500 行的数据进行分析。选取非连续目标和连续目标区域的其他行也可以, 受篇幅限制, 在此仅给出了其中一组, 特此说明。

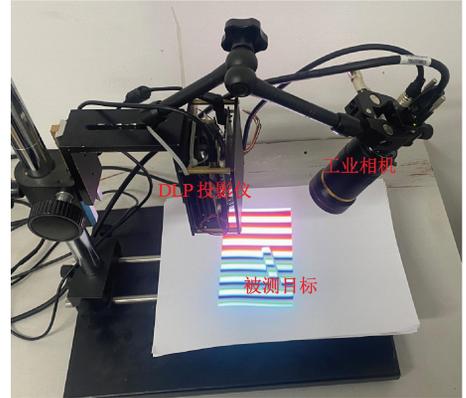


图 6 实验硬件结构

Fig. 6 Experiment hardware structure

如图 7 所示, 为不连续与连续两组实验结果。其中图 7(b) 和(e) 分别为采用本文方法在不同情况下的展开相位图; 图 7(c) 为不连续情况不同方法求得展开相位第 880 行的数据对比结果; 图 7(f) 为连续情况不同方法求得展开相位第 500 行的数据对比结果。由图 7 可知,

三频外差法的相位误差远高于其他两种方法。通过分析图7中线性区域(图7(c)中 $x \in [200, 350]$ 区域与图7(f)中 $x \in [600, 850]$ 区域)内数据的线性度,可知本文方法相位精度优于互补格雷码相移法。因此,在复杂环境中,本文方法得到的展开相位精度高于三频外差法与互补格雷码相移法,在减少投影条纹图像同时有效的降低了相位误差。通过比较表2可以发现,测量效率提高了50%同时测量精度得到一定提升。

表2 不同方法投影条纹数量

Table 2 Number of projected stripes by different methods

方法	本文方法	互补格雷码	三频外差法
投影图像/幅	4	8	12

4 结 论

本文提出了一种基于彩色编码光栅投影的互补格雷码双 N 步相移法。该方法将原 N 步相移条纹、偏移了 $\frac{\pi}{N}$ 的相移条纹以及互补格雷码条纹编码成RGB彩色条纹,融合到一幅彩色投影条纹图像中,同时进行PLD投影仪投影以及工业相机采集,提取出原相移条纹、偏移相移条纹以及互补格雷码条纹后,分别求得包裹相位并通过互补格雷码解包裹成展开相位,融合两幅展开相位信息以减小误差。本文详细阐述了误差的物理模型以及所提方法的原理,并将其与互补格雷码相移法和三频外差法结合对比,实验结果证明,所提方法仅需 N 幅彩色投影条纹图像同时有效的降低了相位误差。经对比,测量效率提高了50%同时测量精度得到一定提升。

参考文献

[1] 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.

[2] 李勇,张广汇,马利红,等.条纹投影动态三维表面成像技术综述[J].红外与激光工程,2020,49(3):91-103.
LI Y, ZHANG G H, MA L H, et al. Review of dynamic three-dimensional surface imaging based on fringe projection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3):91-103.

[3] WANG J H, YANG Y X. Triple N -Step phase shift algorithm for phase error compensation in fringe projection profilometry[J]. IEEE Transactions on Instrumentation

and Measurement, 2021, 70:1-9.

[4] 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.

[5] ZHANG C Q, SU X Y, XIANG L Q, et al. 3-D shape measurement based on complementary Gray-code light[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 50(4):574-579.

[6] 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, ZHANG Q C. Dynamic three-dimensional shape measurement method[J]. Acta Optica Sinica, 2022,42(5):103-112.

[7] 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.

[8] 刘玉红.基于编码结构光的反光物体三维测量方法研究[D].镇江:江苏科技大学,2021.
LIU Y H. Research on 3D measurement method of reflective object based on coded structured light [D]. Zhongjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2021.

[9] 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.

[10] 钟锦鑫,尹维,冯世杰,等.基于深度学习的散斑投影轮廓术[J].红外与激光工程,2020,49(6):81-91.
ZHONG J X, YIN W, FENG SH J, et al. Speckle projection profilometry with deep learning [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(6):81-91.

[11] 刘路,奚冬冬,程磊,等.改进格雷码条纹投影三维测量方法[J].红外与激光工程,2020,49(11):213-220.
LIU L, XI D D, CHENG L, et al. Enhanced Gray-code method for three-dimensional shape measurement [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(11):213-220.

[12] 李洋,李岩,赵爱国,等.四步相移结合互补格雷码的快速相位展开[J].激光杂志,2022,43(2):36-41.
LI Y, LI Y, ZHAO AI G, et al. Fast phase unwrapping of four-step phase shift combined with compleme-ntary

Gray code[J]. *Laser Journal*, 2022, 43(2): 36-41.

- [13] 王建华,周玉国,杨延西. 基于相位误差自校正的高速三维测量技术[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(12): 116-125.

WANG J H, ZHOU Y G, YANG Y X. High-speed three-dimensional measurement technique based on phase error self correction [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(12): 116-125.

- [14] 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 SH K, 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.

- [15] 孙丽君,黄志远,陈天飞. 基于傅里叶变换的Gamma因子快速自标定方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(24): 116-127.

SUN L J, HUANG ZH Y, CHEN T F. Fast self-calibration method of gamma factor based on fourier transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 116-127.

- [16] 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. Discussion on the revision of the national standard "Technical Code for Civil CCTV System Engineering" [J]. *Radio and television technology*, 2012, 39(11): 70, 72-75, 15.

作者简介



韩叔桓, 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.



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.



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.



Liu Wei

received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Xi'an Jiaotong University in 2005 and 2013, respectively. He is currently an assistant professor at Xi'an University of Technology. His main research interests include computer vision and robotics.

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

张新雨, 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: xhyzxy@126.com

刘伟, 2005年于西安交通大学获得学士学位, 2013年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安理工大学讲师, 主要研究方向为计算机视觉和机器人。

E-mail: liuwei@xaut.edu.cn