

doi: 10.3788/gzxb20164503.0310002

用于绝对相位还原的对称式和非对称式 二元结构光编码

熊义可^{1,2}, 张万祯¹, 杨松涛¹, 林斌^{1,2}

(1 浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室国家光学仪器工程技术研究中心, 杭州 310027)

(2 浙江大学 昆山创新中心苏州江奥光电科技有限公司, 江苏 昆山 215347)

摘 要: 基于邻域分析的相移法不适合阶跃场景测量且往往会造成相位误差的积累, 为此提出了用于获取绝对相位的对称式和非对称式二元阶梯相位结构光编码方法. 两种方法编码图案不同, 对称式编码方法编码图案黑白条纹的宽度相等, 非对称式不等. 通过投影多帧二元结构光编码图案, 结合相移法相位提取公式获得阶梯相位. 测量时, 基于传统正弦条纹投影和相移法获得高精度包裹相位, 并用阶梯相位确定对应包裹相位的级次. 根据级次直接进行相位展开, 进而获得绝对相位. 以量块作为测量对象, 两种方法的测量均方根误差达到 0.072 mm. 两种方法均能够有效还原阶跃场景, 实现三维重构.

关键词: 阶梯相位; 二元编码; 相移法; 三维测量; 绝对相位

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)03-0310002-6

Symmetric and Asymmetric Dual Structure Light Coding Methods for Absolute Phase Retrieval

XIONG Yi-ke¹, ZHANG Wan-zhen¹, YANG Song-tao¹, LIN Bin^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, CNERC for Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 Zhejiang University Kunshan Innovation Institute, Suzhou Jiang-Ao Photoelectric Technology Co., Ltd, Kunshan, Jiangsu 215347, China)

Abstract: Phase-shift method based on domain analysis is not suitable for measuring step-changed object and always causes the accumulation of phase errors. Symmetric and asymmetric dual stair phase structure light coding methods for absolute phase retrieval were presented. The coding patterns of two methods are different. The width of the black and white fringes in symmetric coding patterns are equal, but not in asymmetric coding patterns. By the projection of binary coding structure light patterns, stair phase can be obtained with phase shift formula. During measurement, on the basis of traditional sinusoidal fringe projection and phase shift method, high-precision wrapped phase is obtained. The stair phase can be used to determine corresponding orders of wrapped phase. According to the order, the absolute phase can be got. Gauge blocks are measured and root mean square error of two methods are 0.072 mm. Both methods can effectively restore three-dimensional reconstruction for highly step-changed object.

Key words: Stair phase; Binary coding; Phase-shift method; Three-dimensional measurement; Absolute phase

OCIS Codes: 100.6890; 100.5070; 100.5088

基金项目: 江苏省科技支撑计划 (No. BE2014082) 资助

第一作者: 熊义可 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉和图像处理. Email: xyke2012@163.com

导师 (通讯作者): 林斌 (1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为图像传感及处理、光电测量技术和仪器. Email: wjlin@zju.edu.cn

收稿日期: 2015-08-17; 录用日期: 2015-12-22

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

结构光投影三维测量是一种主动式三维测量技术,该方法准确度高、非接触式且成本低,广泛应用于光学三维测量领域^[1-3].其测量系统主要由投影仪、数字 CCD 和计算机组成.光栅编码图像经投影仪投影至物体表面,经过物体表面调制后,由相机拍摄变形图案并传输至计算机进行处理,进而获取物体的包裹相位,经相位展开(Phase unwrapping)获取绝对相位,最后通过相位-高度的映射关系实现三维重建.因此,如何准确地进行相位展开是三维重建的关键^[4-6].

相位展开过程中,通过在每一个包裹相位中加入对应的阶梯相位来实现包裹相位变换到绝对相位^[7].传统的相位展开法都是基于邻域分析,即通过比较相邻像素的相位差来实现阶梯相位的添加,但这种方法不适合测量阶跃性较大的场景,且会造成相位误差的叠加.许多相位编码技术则是通过额外相位信息构建阶梯相位,用于包裹相位的展开,并减小误差^[8-9].灰度值编码图案^[10]、彩色通道灰度值编码^[11]和二元编码相移法^[12]等方法通过投影多帧图像获得绝对相位编码,但是,这些编码技术在相位解码时需要进行灰度分析,加大了系统的计算负担,并且一定程度上降低了相位解码的准确性.

为了避免相位误差的传递,可以对每个条纹单独编码,即除了投影基本的正弦相移条纹,另外投影若干幅特定的编码图案至物体表面,由 CCD 同步采集并进行解码,来获取阶梯相位.近年来相位展开技术不断发展,Yajun Wang 等提出了基于阶梯编码和正弦结构光编码的阶梯相位编码技术,在各种对比度条件下该技术均有较好的绝对相位还原能力^[13];但是,由于该结构光图案需要使用多级灰度值,因此,投影的非线性问题难以避免. Feipeng Da 等基于这种阶梯相位编码技术,提出了用于离焦状态下的脉宽调制阶梯相位结构光编码技术^[14].该方法可以在离焦状态下使用,并且,由于采用二元编码技术,该方法无需进行投影非线性校正.但是,该方法仅能在离焦状态下使用,对焦状态下往往难以准确获得理想的阶梯相位

针对以上问题,本文提出了对称式和非对称式两种二元结构光编码方法.两种方法都仅使用黑白两种灰度值进行图案编码,同时使用相移法获取阶梯相位.但二者编码图案不同,对称式编码图案黑白两种条纹宽度相同,非对称式不同,且在不同的相移步数下,两种编码方法获得的阶梯相位个数不同.由于仅存在黑白两级灰度,一方面该方法可以有效避免投影非线性校正,避免相位误差的叠加;另一方面无需进行灰度阈值处理,可以减少图像处理的时间.实验证明两种方法均能够有效地实现阶跃场景的三维重建.

1 相移法原理

相移法是一种常用的三维测量方法,该方法算法简单、高准确度、相位重构速度快.对于最常见的等相移步距的 N 步相移法,其第 $n(n=1, 2 \cdots N)$ 幅投影正弦条纹图的图像灰度 $I_n(x, y)$ 表示为

$$I_n(x, y) = B + A \cos [\varphi(x, y) + 2\pi n/N] \quad (1)$$

式中, B 是背景光强大小, A 是强度调制参量, $\varphi(x, y)$ 为相位编码值.其中, $\varphi(x, y)$ 可以通过式(2)求得

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

由于编码相位值 $\varphi(x, y)$ 是由反正切函数求解,因此式(2)的值被限制在 $[-\pi, \pi]$ 内.如果采用大于一个周期的正弦图案进行解码,求得的是包裹相位,最终的绝对相位需要进行相位解包裹获得.

2 两种二元阶梯相位结构光编码方法

本文提出了两种二元阶梯相位结构光编码方法,即对称式二元区块编码法和非对称式二元区块编码法.两种编码图案只有黑白两种区块.除了编码方式不同外,阶梯相位获取和绝对相位重构方式都相同.

2.1 对称式二元区块编码方法原理

对称式二元区块编码法中黑白两种区块的宽度是相等的.对于 N 步相移法的对称式二元区块编码法,其第 n 幅图案的灰度值 $I_n(x, y)$ 分布表示为

$$I_n(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{Mod}\left(x + (n-1)\frac{P}{N} + S, P\right) \geq \frac{P}{2} \\ 0, & \text{Mod}\left(x + (n-1)\frac{P}{N} + S, P\right) < \frac{P}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, P 表示二元区块的总宽度, $\text{Mod}()$ 表示求余, $n=1, 2, 3 \cdots N$, S 为预设相位偏移量.以三步相移为例,其编码示意图如图 1.



图 1 对称式二元区块编码图

Fig. 1 Symmetric dual block coding pattern

2.2 非对称式二元区块编码方法原理

与对称编码不同,非对称式二元区块编码的黑白两种区块的宽度是不相等的,大小跟相移的步数 N 有关,第 n 幅图案的灰度值 $I_n(x, y)$ 分布表示为

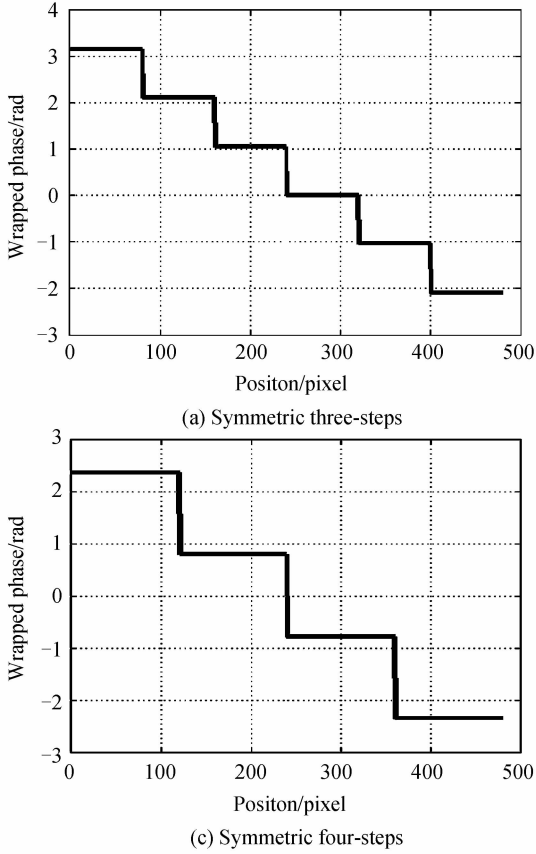
$$I_n(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{Mod}\left(x + (n-1)\frac{P}{N} + S, P\right) \geq \frac{N+1}{2N}P \\ 0, & \text{Mod}\left(x + (n-1)\frac{P}{N} + S, P\right) < \frac{N+1}{2N}P \end{cases} \quad (4)$$

以三步相移为例,其编码示意图如图 2.



图2 非对称式二元区块编码图案

Fig. 2 Asymmetric dual block coding pattern



2.3 阶梯相位获取

两种二元区块编码方法都使用传统的相移法公式,即式(2)提取阶梯相位.图3(a)、(c)为对称式二元区块编码法的三步、四步相移法获得的阶梯相位图.图3(b)、(d)为非对称式三步相移法获得阶梯相位图.

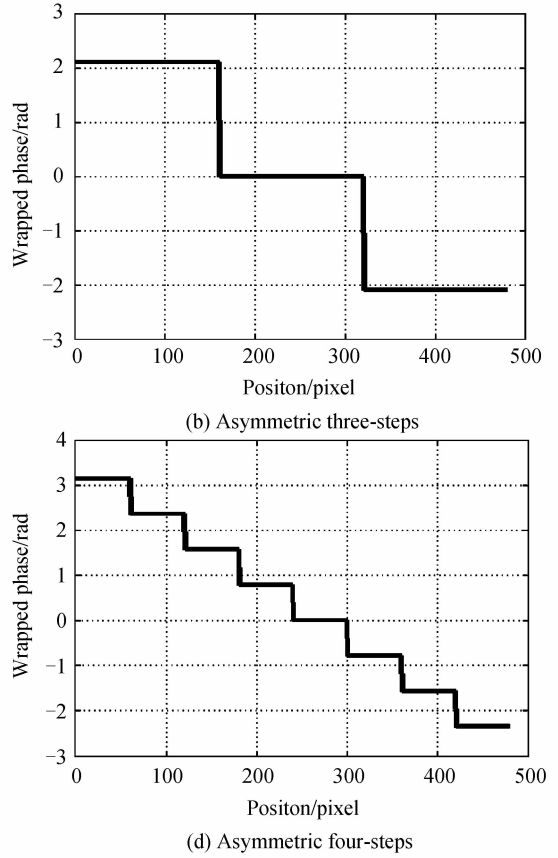


图3 阶梯相位

Fig. 3 Stair phase

从图3(a)、(b)可以看出,对称式二元区块编码图案通过3步相移法后有6个阶梯相位;非对称式却只有3个;从图3(c)、(d)可以看出,对称式二元编码图案经4步相移法后有且只有4个阶梯相位,非对称式却有8个.事实上,对于对称式二元区块编码图案,使用偶数 N 步相移法时,可以获得 N 个阶梯相位;使用奇数 N 步相移方法时,可以获得 $2N$ 个阶梯相位.非对称式二元区块编码图案正好相反,使用偶数 N 步相移法获得的阶梯相位是 $2N$,使用奇数 N 步相移法时获得的阶梯相位是 N .在进行相位展开时,对应投影高频的正弦光栅,高阶梯数的阶梯相位可以减少投影的二元编码图案数量.因此,本文采用奇数次对称二元区块编码法和偶数次非对称二元区块编码法.

3 绝对相位重构

相移法在提取相位时需要进行相位解包裹.对应正弦条纹的级次 k 可以通过阶梯相位 φ_s 获取,即

$$k = \text{round}((\varphi_s + \pi)N/2\pi) - 1 \quad (5)$$

式中, $\text{round}(x)$ 表示向下取整数.一旦确定了条纹级次 k ,则该条纹的绝对相位可通过式(6)求出

$$\varphi_a(x, y) = \varphi(x, y) + 2k\pi \quad (6)$$

式中, $\varphi_a(x, y)$ 为绝对相位值.图4为包裹相位及对应的阶梯相位图.

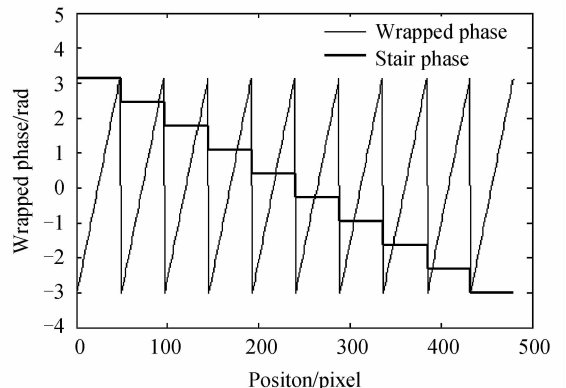


图4 包裹相位及对应阶梯相位

Fig. 4 Wrapped phase and stair phase

3.1 绝对相位误差矫正

由于两种二元阶梯相位编码方法仅使用黑白两种灰度,在黑白交界处容易产生相位误差,直接使用会造成绝对相位的提取错误,因此有必要进行矫正.两种编码方法获得的绝对相位图如图 5.从图 5 可见明显相位误差,在绝对相位曲线中表现为 π 相位的跳变.

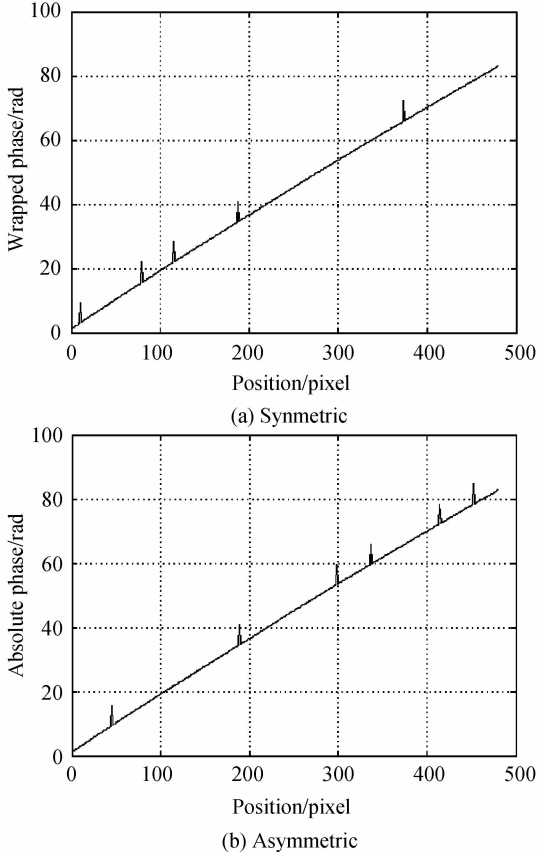


图 5 绝对相位曲线
Fig. 5 Absolute phase curve

相位误差出现在阶梯相位值发生阶跃改变的位置,这个位置发生相位 π 的跳变.采取以下方式来消除误差.

1) 设置一定的后向平移量,与相位跳变点对应的

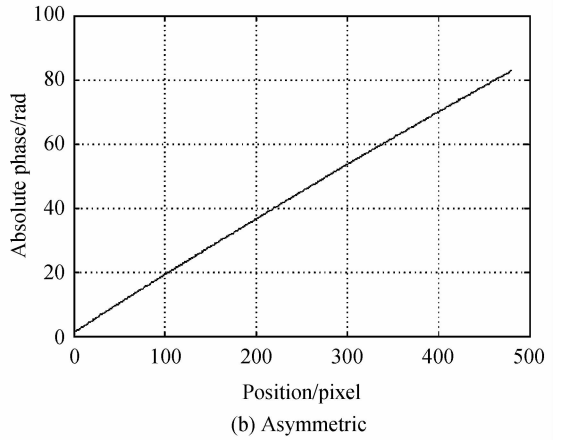
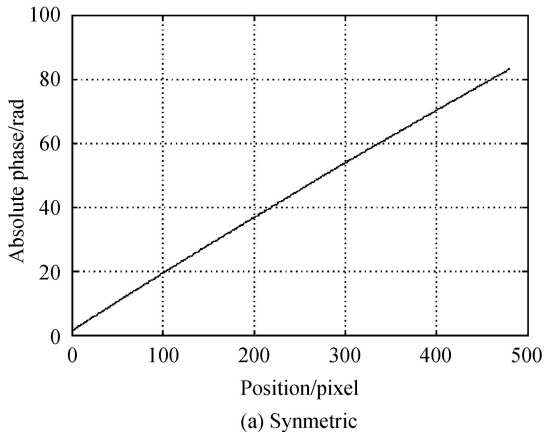


图 6 绝对相位矫正曲线

Fig. 6 Absolute phase corrected curve

阶梯相位图中的阶梯相位替换为垂直于条纹方向的后向位置的阶梯相位,获得的阶梯相位图称为阶梯相位矫正图.

2) 根据获得的阶梯相位矫正图对高频正弦结构光获得的相位图进行相位解包裹,获得的绝对相位图将消除相位跳变误差.实验中,后向平移量为 7.经矫正后的两种编码方法获得的绝对相位编码如图 6.从图 6 中可见,两种编码方法获得的绝对相位图的跳变相位误差已经消除.

3.2 实验及结果

为验证本文提出的两种编码方法的有效性,搭建如图 7 所示的实验光路进行实验测量.采用型号为 Esonic HD-720P 的 LCoS 投影仪和型号为 AVT Manta G-125B 的数字 CCD,相机分辨率为 $1292\text{pixel} \times 964\text{pixel}$,本实验仅采用 $640\text{pixel} \times 480\text{pixel}$ 区域.实验中,投影三幅周期为 48pixel 、相移量为 $2\pi/3$ 的正弦光栅,分别采用 7 步对称式和 8 步非对称式二元阶梯相位编码方法.图 8(a)为阶跃物体的场景图,图 8(b)为正弦光栅图,图 8(c)为二元块编码图.

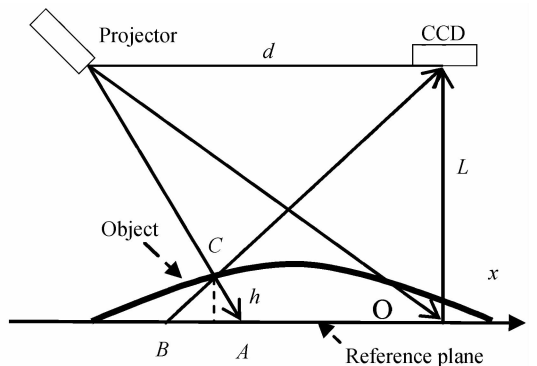


图 7 实验结构图

Fig. 7 Experimental structure

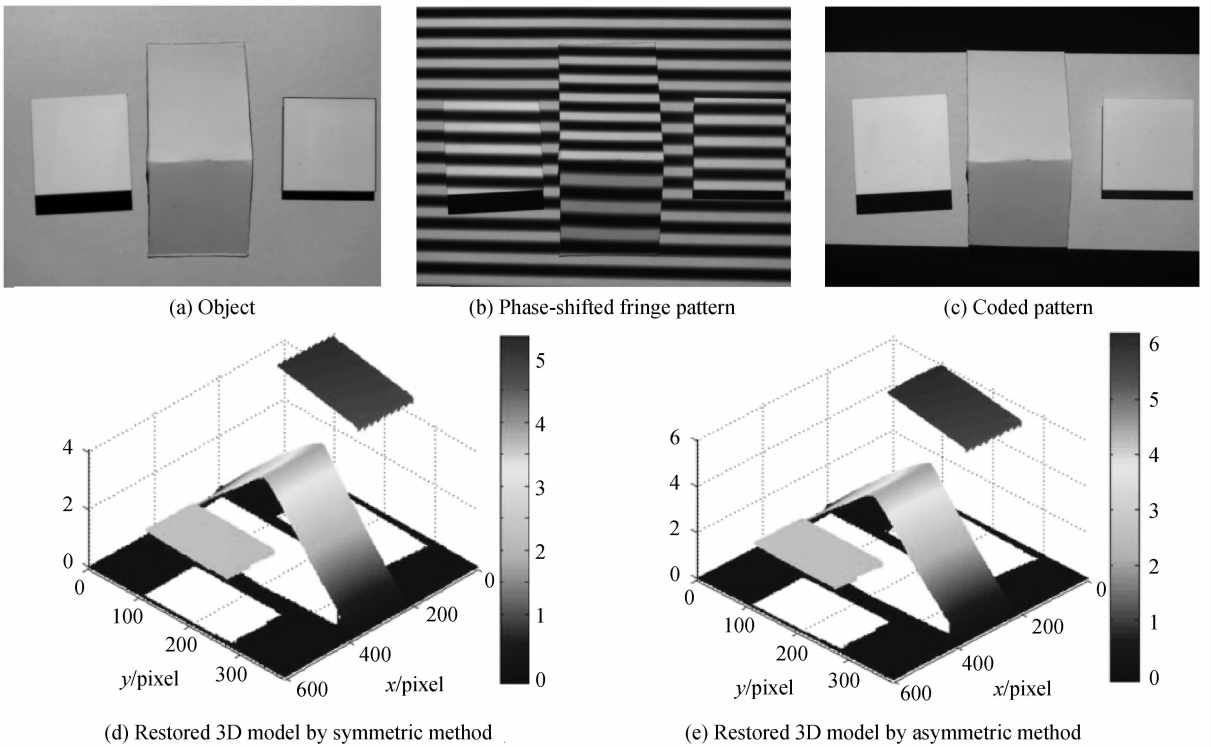


图8 实验结果

Fig. 8 Experimental results

实验步骤为

1) 求包裹相位. 通过投影三幅正弦光栅并运用三步相移法获取包裹相位;

2) 求取阶梯相位. 分别运用7步对称和8步非对称二元阶梯相位编码方法获取阶梯相位;

3) 求绝对相位. 通过阶梯相位和式(5)确定条纹级次,接着通过包裹相位和式(6)获取绝对相位值;

4) 对测量系统进行标定,根据相位和高度的映射关系进行三维重建. 图8(d)和(e)为两种方法的三维重建图,与物体实际轮廓分布相同.

为检验两种方法的三维重建准确度,采用4块等级为1,工作距离分别为5 mm、10 mm、20 mm、25 mm的标准量块进行测量. 测量过程中,本文只采用传统4步相移法获得包裹相位,而针对相位展开,根据对应条纹周期采用3步、4步、5步、6步、7和8步相移法. 两种方法进行三维重构后产生的高度均方根误差数据如

表1 对称式

Table 1 Symmetric method

	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Threesteps/mm	0.042 2	0.058 1	0.055 9	0.063 7
Four steps/mm	0.053 4	0.048 1	0.049 2	0.066 5
Five steps/mm	0.061 4	0.041 3	0.044 3	0.054 5
Six steps/mm	0.040 1	0.035 5	0.047 6	0.060 8
Seven steps/mm	0.040 7	0.035 9	0.047 6	0.070 9
Eight steps/mm	0.041 7	0.044 0	0.056 6	0.061 8

表2 非对称式

Table 2 Asymmetric method

	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Three steps/mm	0.042 2	0.058 0	0.055 9	0.065 7
Four steps/mm	0.050 1	0.046 1	0.049 2	0.066 5
Five steps/mm	0.061 4	0.043 0	0.044 3	0.054 5
Six steps/mm	0.040 1	0.038 5	0.047 6	0.061 0
Seven steps/mm	0.040 7	0.035 9	0.049 3	0.071 1
Eight steps/mm	0.043 1	0.047 9	0.056 6	0.062 2

表1、2. 表格中,Level 1至Level 4分别代表上述四个工作距离的量块.

从表1和表2可以看出,对称式和非对称式两种方法的均方根误差值都相差很小,最小测量均方根误差达到0.036 mm. 两种方法的均方根误差达到0.072 mm.

4 结论

本文提出了两种用于获取绝对相位的二元结构光编码方法. 两种方法投影多帧二元结构光编码图案,结合相移法公式获得阶梯相位. 通过传统正弦条纹图案投影和相移法获得高精度包裹相位,并用阶梯相位确定对应条纹级次,可有效避免相位误差的叠加和非线性的影响. 实验证明,两种方法均能还原阶跃场景,实现三维重构. 两种方法的测量均方根误差达到0.072 mm.

参考文献

- [1] SU Xian-yu, ZHANG Qi-can, CHEN Wen-jing. Three-dimensional imaging based on structured illumination [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(2):1-10.
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):1-10.
- [2] GORTHI S S, RASTOGI P. Fringe projection techniques: Whither we are? [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2010, **48**(2): 133-140.
- [3] LIU Da-hai, LIN Bin. Fourier transform profilometry using zero frequency elimination based on gray modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1697-1701.
刘大海, 林斌. 利用强度调制消除零频的傅里叶变换轮廓测量[J]. 光子学报, 2011, 40(11):1697-1701.
- [4] YANG Feng-tao, LUO Jiang-long, LIU Zhi-qiang, *et al.* Comparison of six phase unwrapping algorithms[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(3): 323-326.
杨锋涛, 罗江龙, 刘志强, 等. 相位展开的6种算法比较[J]. 激光技术, 2008, 32(3): 323-326.
- [5] PAN B, KEMAO Q, HUANG L, *et al.* Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(4).
- [6] ZHANG Wan-zhen, CHEN Zhe-bo, XIA Bin-feng, *et al.* Nonlinear effect of the structured light profilometry in the phase-shifting method and error correction [J]. *Chinese Physics B*, 2014, **23**(4): 324-329..
- [7] GHIGLIA D C, PRITT MD. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software[M]. Bibtex Nuhag, 1998.
- [8] LIU K, WANG Y, LAU D L, *et al.* Dual-frequency pattern scheme for high-speed 3-D shape measurement [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(5): 5229-5244.
- [9] DING Y, XI J, YU Y, *et al.* Recovering the absolute phase maps of two fringe patterns with selected frequencies [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(13): 2518.
- [10] SALVIJ, PAGES J, BATTLE J. Pattern codification strategies in structured light systems [J]. *Pattern Recognition*, 2004, **37**(4): 827-849.
- [11] SHAMIR J, KIRYATI N, CASPI D. Range imaging with adaptive color structured light [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1998, **20**(5): 470-480.
- [12] AYUBI G A. Three-dimensional profiling with binary fringes using phase-shifting interferometry algorithms [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(2): 147-154.
- [13] WANG Y J, ZHANG S. Novel phase-coding method for absolute phase retrieval [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(11): 2067-2069.
- [14] ZHENG D, DA F. Absolute phase retrieval for defocused fringe projection three-dimensional measurement [J]. *Optics Communications*, 2014, **312**(4): 302-311.