

基于互补型光栅编码的相位展开

孙学真 苏显渝 邹小平

(四川大学电子信息学院光电科学技术系, 四川 成都 610065)

摘要 为了解决在运用相移技术和二元光栅编码结构光进行相位展开时存在的误码问题,提出了一种新的互补型二元光栅编码。通过多投一幅格雷码图案,并利用格雷码相邻码字之间 Hamming 距离为 1 的特点,设计出互补的两种编解码方式。利用两种编码出现误码位置的不同,并结合相移技术解决了去包裹过程中的误码问题。论述了互补型二元光栅编码的设计方法及特点,并详细分析了基于互补型二元光栅编码的相位展开过程。计算机模拟和三维重建实验清楚地表明,提出的互补型光栅编码能很好地解决了误码问题且具有很高的可靠性。

关键词 光学测量; 结构光; 相位展开; 格雷码; 互补型光栅编码

中图分类号 TB11 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082810.1947

Phase-Unwrapping Based on Complementary Structured Light Binary Code

Sun Xuezhen Su Xianyu Zou Xiaoping

(Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract In order to solve the problem of error code in the field of phase unwrapping based on phase-shift technology combined with structured light binary code, a new complementary structured light binary code was presented. Two kinds of complementary encoding and decoding modes were designed by projecting one more Gray code image as well as taking advantage of the property of Gray code that the Hamming distance of the neighbor code is one. By using the new codes which mode error code happen at different positions, and combining with phase-shift technology make the problems of error code in the process of phase-unwrapping solved. The design and property of the complementary structured light binary code was discussed, and then the process of phase-unwrapping based on complementary structured light binary code was analyzed in detail. Computer simulation and three-dimensional experiments prove the complementary structured light binary code practicable and reliable.

Key words optical measurement; structured illumination; phase unwrapping; Gray code; complementary structured light binary code

1 引 言

结构光三维测量是一类重要的无接触三维测量方法,常用的方法包括相位测量轮廓术^[1,2],傅里叶变换轮廓术^[3,4],空间相位检测等。对截断相位进行相位展开是结构光三维测量法的必须过程,常见的相位展开方法包括最小二乘法^[5]、时间相位展开方法^[6,7]、基于调制度的相位展开方法^[8]、用于动态过程测量的三维相位展开方法^[9,10]及一些综合的相位展开方法^[11]。时间相位展开方法具有很高的可靠性,但需采集多帧不同频率的相移条纹图形。各

种空间相位展开方法虽然只需采集一种频率的相移条纹图形,但相移条纹图形存在较多缺陷(如阴影,条纹断裂等)时相位展开比较困难。另一种相位展开方法是相移技术和二元编码光栅方法相结合^[12,13],采用相移技术计算相位主值,采用二元编码光栅序列计算相位级次,具有不依赖路径、不存在误差的传播、抗干扰能力较强等特点。格雷码是通常采用的一种二元光栅编码方法,由于被测物体表面不均匀反射率、背景光强、噪声和有限离焦的影响,格雷码图像黑白变化处的灰度值分布并非锐截

收稿日期: 2008-03-04; **收到修改稿日期:** 2008-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(62527001)资助课题。

作者简介: 孙学真(1985—),男,硕士研究生,主要从事机器视觉与三维传感等方面的研究。

E-mail: sunxuezhen001@163.com

导师简介: 苏显渝(1944—),男,教授,主要光学三维传感与机器视觉等方面的研究。E-mail: xysu@email.scu.edu.cn

止,造成黑白交替处总会出现一些误码,导致部分错误的相位展开。本文提出了一种基于互补型二元光栅编码的相位展开方法,通过增加一帧特殊设计的编码图形,产生互补的两种编码结果。利用这两种编码出现误码位置的不同进行互补,较好地解决了误码问题,同时也使得编码图像二值化过程变得相对简单。

2 互补型二元光栅编码设计

传统的用于相位展开的二元光栅是根据格雷码的编码原则设计的,编码图像中的某一点最多只会出现在一幅编码图的黑白交界处,虽然最多只会导致一位错码,然而用于相位展开将引入 2π 的相位误差。

本文提出的互补型二元光栅也同样按照格雷码的编码原则进行设计的,不同的是对于周期数一定的解相光栅所采用码字是传统的两倍,即多投一帧编码光栅。互补型二元光栅编码采用了两种编码方式,对 n 幅编码光栅,将前 $n-1$ 幅编码光栅所产生的每个码字按传统的方式进行编码;对由 n 幅编码光栅产生的每个码字按照另一种方式进行编码,其原则是使两种编码出现误码的位置不同。在相位展开时根据截断相位的不同,利用编码的互补性,采用不同的解码方式来恢复真实相位。

不失一般性,为便于说明令相移光栅的周期数为 8,互补型二元光栅的编码方式如图 1 所示, k_1 是对前三幅编码光栅所产生的码字进行的编码, k_2 是对四幅编码光栅所产生的码字进行的编码。由图可得,在 k_1 可能出现误码的位置(椭圆处),在 k_2 中不会出现误码。

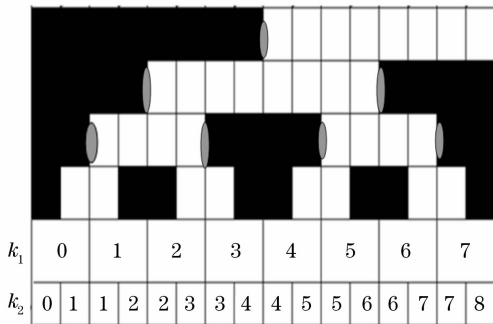


图 1 两种编码图案

Fig. 1 Two kinds of encoding fringe

3 基于互补型光栅编码的相位展开

基于互补型光栅编码的相位展开可分为三个

步骤:

1) 求解截断相位

由 CCD 记录的 $M(M=4)$ 幅相移光栅的强度分布可表示为

$$I_m(i, j) = A(i, j) + B(i, j) \cos \left[\phi(i, j) - m \frac{\pi}{2} \right], \quad m = 0, 1, 2, 3 \quad (1)$$

式中 $A(i, j)$ 为背景光强, $B(i, j)$ 为条纹对比度。利用相移算法算出截断相位

$$\phi(i, j) = \arctan \frac{I_1(i, j) - I_3(i, j)}{I_0(i, j) - I_2(i, j)}. \quad (2)$$

2) 二值化过程

为便于对采集的格雷码图像进行二值化,在投射的图案中加入一幅全黑和一幅全白图像,在二值化过程中,将某一点阈值设置为此点在全黑图像灰度值 $I_B(i, j)$ 和全白图像灰度值 $I_W(i, j)$ 之和的一半:

$$T(i, j) = \frac{1}{2} [I_B(i, j) + I_W(i, j)]. \quad (3)$$

3) 利用互补型光栅进行相位展开

$$\phi(i, j) = \begin{cases} \phi(i, j) + 2\pi + 2\pi k_1, & \phi(i, j) \leq -\frac{\pi}{2} \\ \phi(i, j) + 2\pi k_2, & -\frac{\pi}{2} < \phi(i, j) < \frac{\pi}{2} \\ \phi(i, j) + 2\pi k_1, & \phi(i, j) \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式中 k_1 为由前 $n-1$ 幅格雷码图像进行相应的解码, k_2 为由 n 幅格雷码图像进行相应的解码。利用互补型光栅编码的互补性,根据截断相位的分布情况,采用不同的解码方法进行相位展开,较好地避免了二值化过程出现的误码问题。

4 计算机模拟实验

为验证利用互补型光栅编码进行相位展开的有效性,进行了相关的计算机模拟实验。模拟实验所采用的相移光栅的周期为 32,在部分离焦和添加 5% 以及 10% 高斯噪声的影响下的实验结果如图 2 所示。

模拟实验是在不同的离焦量和不同的高斯噪声下进行的,通过对比图 2 可得,利用互补型编码光栅进行相位展开可以很好地解决基于传统编码光栅进行相位展开时出现的误码问题,证明了利用互补型光栅编码进行相位展开的有效性。

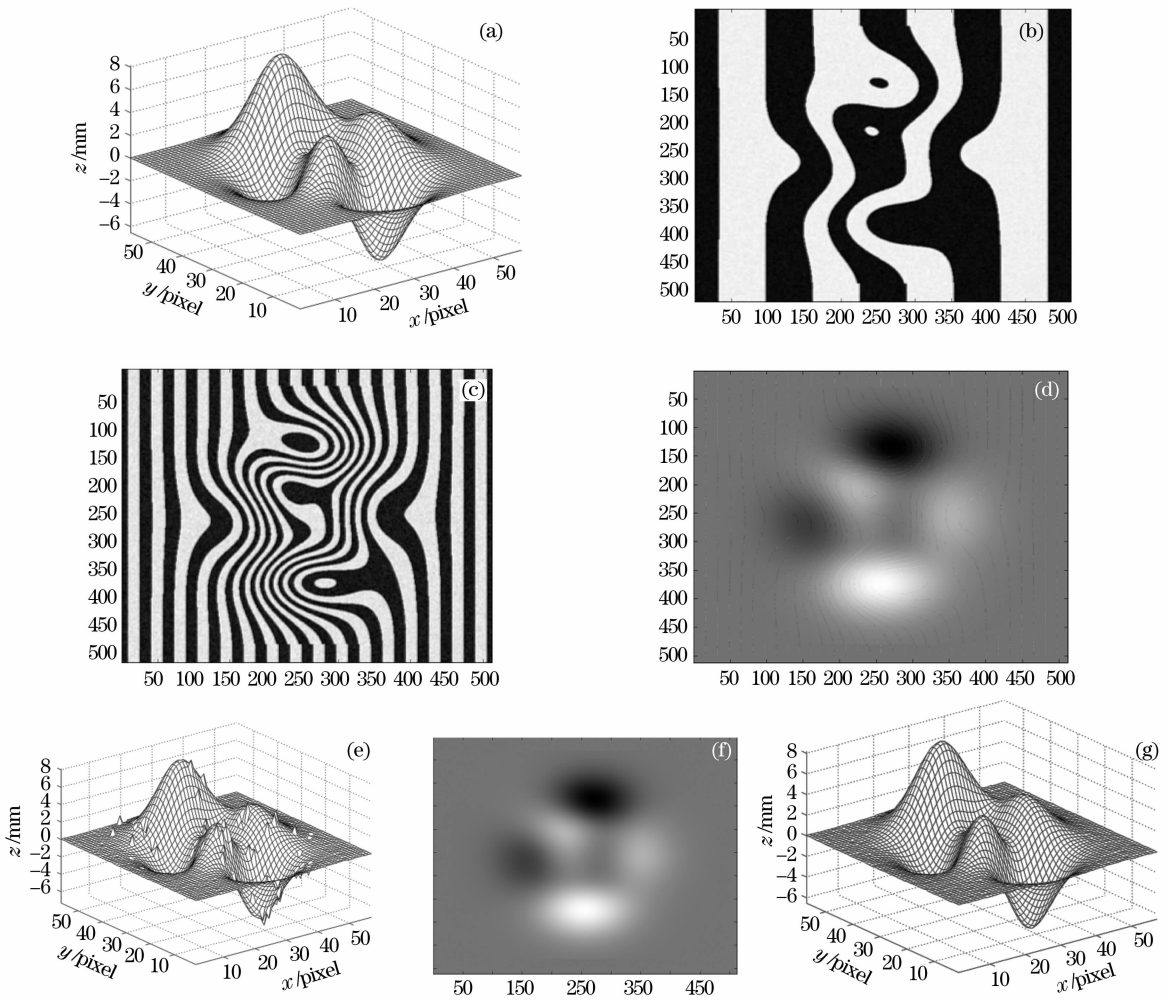


图 2 计算机模拟实验中生成的部分图像。(a) 模拟物体,(b) 在一定离焦和 5% 高斯噪声下第四幅变形图,(c) 改变离焦量和 10% 高斯噪声下第六幅变形图,(d),(e) 基于传统编码光栅的相位展开及重构物体,(f),(g) 基于互补型编码光栅的相位展开及重构物体

Fig. 2 Partial images created in computer simulation. (a) Simulative object, (b) the fourth deformed fringe with the influence of certain defocus and 5% Gauss noise, (c) the sixth deformed fringe with the influence of different defocus and 10% Gauss noise, (d) unwrapped phase and (e) restored object based on traditional structured light binary code, (f) unwrapped phase and (g) restored object based on complementary structured light binary code

5 三维重建实验

为验证本文提出的算法,在实验室对一人头模型

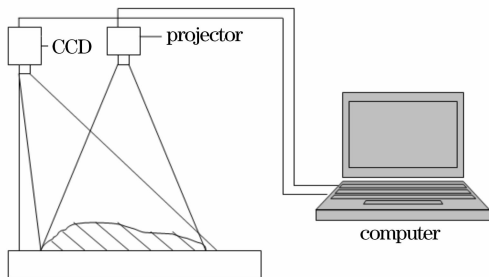


图 3 实验装置图
Fig. 3 Measurement setup

试件进行了无接触测量。实验所用的装置如图 3。

实验中所投影的相移光栅的周期为 64, 投影了 7 幅编码光栅和全黑全白编码图各一幅。图 4 为摄像机所采集的部分图片。

对采集的图像进行以下操作:求解截断相位:根据相移算法,对采集的四幅解相光栅条纹进行解相,求得截断相位主值。二值化过程:在对编码图像进行二值化的过程中,某一点的阈值取此点全黑全白灰度之和的 1/2。若某一点在全白图像中的灰度值小于 50,则此点作为阴影点处理。相位展开过程:根据截断相位的不同取值范围进行相应的解码后,按展开算法求出真实相位。展开相位及重构的局部

三维图如图 5 所示。

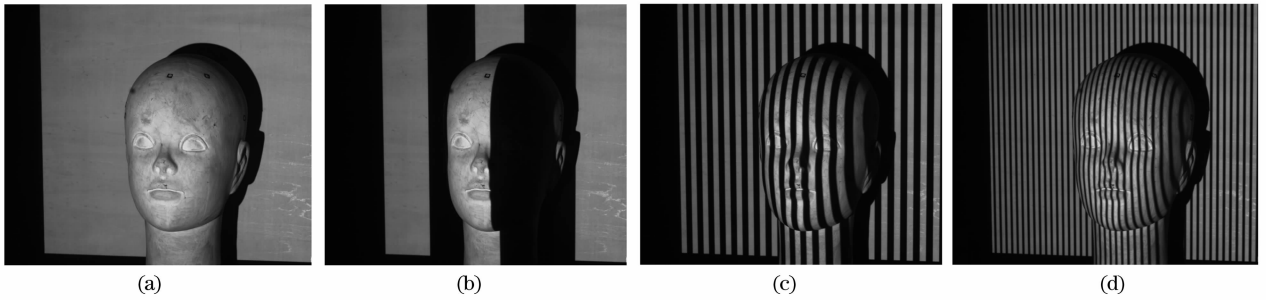


图 4 实验中 CCD 采集的全白条纹(a),第四幅格雷码(b), 第七幅格雷码(c), 第一幅相移光栅(d)投射到物体表面的图像
 Fig. 4 Images captured by CCD in experiment when white fringe (a) the fourth Gray code fringe (b), the seventh Gray code fringe (c), the first phase-shifting fringe (d) are projected

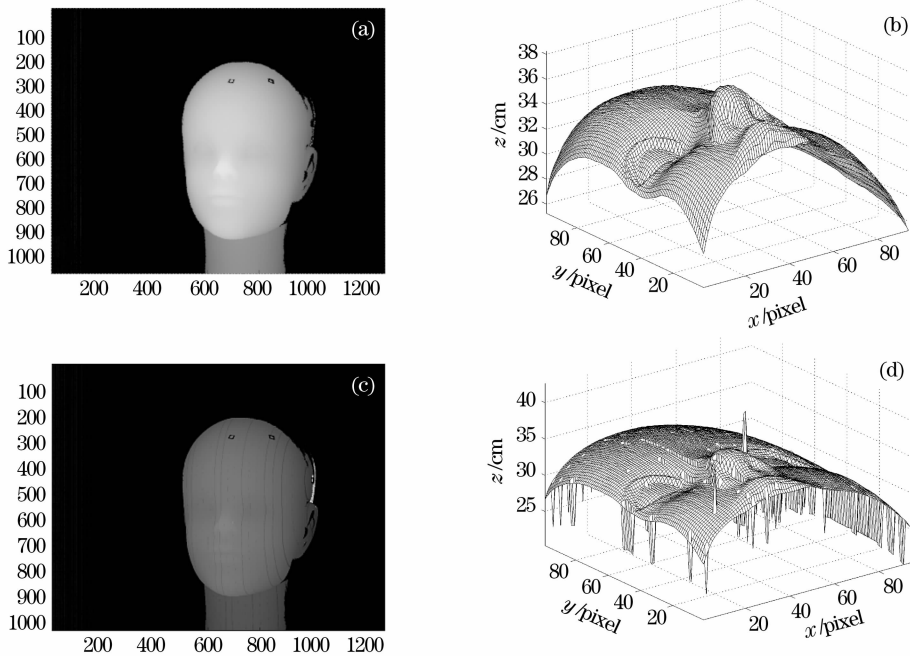


图 5 实验获得的展开相位图(a),(c)及重构物体(b),(d). (a),(b) 基于互补型光栅编码,(c),(d) 基于传统光栅编码
 Fig. 5 Unwrapped phase (a),(c) and reconstructed object (b),(d). (a),(b) based on complementary structure light binary code, (c),(d) based on traditional structured light binary code

通过对比展开相位图,可见基于传统光栅编码展开的相位存在着大量的解错相位,而这些错误都是由局部误码所引起,需要较大范围的调整;而基于互补型光栅编码进行相位展开,仅以多投影一幅编码光为代价;利用编码的互补性,不但很好地解决了局部误码问题且使图像的二值化变得简单。

6 结 论

提出一种新的互补型光栅编码,以多投影一幅编码光栅为代价,采用了两种编码方式,使每一种编码出现误码的位置不同;利用这两种编码的互补性,较好解决了误码问题,而且使图像的二值化过程变

得相对简单。计算机模拟和三维重建实验清楚地表明,提出的相移技术与互补型光栅编码相结合的相位展开方法能解决误码问题,具有很高的可靠性。

参 考 文 献

- 1 V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halious. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105~3108
- 2 Xian-Yu Su, G. von Bally, D. Vukicevic. Phase-stepping grating profilometry: utilization of intensity modulation analysis in complete object evaluation[J]. *Opt. Commun.*, 1993, **98**(1): 141~150
- 3 M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **22**(24): 3977~3982
- 4 Xianyu Su, Wenjing Chen. Fourier transform profilometry: a

- review[J]. *Opt. and Lasers in Eng.*, 2001, **35**(5): 263~284
- 5 Ma Min, Zhang Dongsheng. Least-square method for phase unwrapping[J]. *Optical Technology*, 2002, **28**(1): 94~96
马 民, 张东升. 最小二乘相位解包络方法[J]. *光学技术*, 2002, **28**(1): 94~96
- 6 Yue Huimin, Su Xianyu. Temporal phase unwrapping progress [J]. *Laser J.*, 2004, **25**(3): 9~12
岳惠敏, 苏显渝. 时间相位展开方法研究进展[J]. *激光杂志*, 2004, **25**(3): 9~12
- 7 Shi Zhan, Zhao Hong, Zhang Lu. Phase-unwrapping method based on dual-frequency colorful fringe projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 461~465
施 展, 赵 宏, 张 璐. 基于双频彩色条纹投影的相位测量去包裹方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 461~465
- 8 Jiang Zhenyu, Miao Hong, Zhang Qingchuan *et al.*. Weighted phase unwrapping based on analysis of intensity modulation for phase-shifting interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1032~1038
蒋震宇, 缪 泓, 张青川 等. 调制度分析在等步长相移法相位展开中的应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1032~1038
- 9 Zhang Qican, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. Three-dimensional shape measurement for rotating blade using stroboscopic structured illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 207~211
张启灿, 苏显渝, 曹益平等. 利用频闪结构光测量旋转叶片的三维面形[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 207~211
- 10 Hu Chunguang, Hu Xiaodong, Li Dachao *et al.*. Application of three-dimensional phase unwrapping algorithm in precision motion measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 68~72
胡春光, 胡晓东, 栗大超 等. 三维相位展开算法在精密运动测试中的应用[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 68~72
- 11 Wang Jun, Zhao Jianlin, Fan Qi *et al.*. A novel synthetical method for phase unwrapping [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(6): 795~799
王 军, 赵建林, 范 琦 等. 相位图去包裹的一种新的综合方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 795~799
- 12 G. Sansoni, M. Carocci, R. Rodella. Three-dimensional vision based on a combination of Gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(31): 6565~6573
- 13 Zhang Wuming, Zhong Yuexian, You Zhifu *et al.*. A phase unwrapping method based on structured light binary code[J]. *Optical Technology*, 2002, **28**(5): 404~406
张吴明, 钟约先, 由志福 等. 基于结构光编码的相展开方法[J]. *光学技术*, 2002, **28**(5): 404~406