

# 应用于结构光投影三维测量的二值时空编码方法

林海新 吴庆阳 黄锦辉 贺威

(深圳大学电子科学与技术学院, 深圳市微纳光子信息技术重点实验室, 广东 深圳 518060)

**摘要** 提出了一种应用于结构光投影三维测量的二值时空编码方法。通过投影 3 幅二值编码条纹图, 利用条纹边界左右两侧的编码值对截断相位图中的截断线进行编码。测量时, 根据截断线提供的初始位置, 在 3 幅编码图中读取其左右两侧的黑白编码值, 从而每根截断线可以得到一个二进制码, 解码后可以计算出该截断线的级次, 从而确定其对应正弦条纹的级次。根据该级次对截断相位图进行展开得到绝对相位图。实验结果表明, 该编码方法在保证测量精度和可靠性的前提下, 有效减少了编码的幅数, 提升了测量的速度, 非常适用于高速三维测量系统。

**关键词** 信号处理; 三维传感; 编码结构光; 相位展开; 时空编码

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1108002

## Binary Spatiotemporal Encoded Method for Structured Light Projection of Three-Dimensional Measurement

Lin Haixin Wu Qingyang Huang Jinhui He Wei

(Shenzhen Key Laboratory of Micro-Nano Photonic Information Technology, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

**Abstract** A binary spatiotemporal encoding method for structured light projection of three-dimensional measurement is proposed. Through the projection of three binary encoded fringe patterns, every discontinuities in the wrapped phase are encoded with the code values in the left and right sides of the stripe boundary. During measurement, according to the initial position of discontinuities, the gray values in the left and right sides of the discontinuities in the three encoded patterns can be got, and each discontinuities can obtain a binary code, after decoding the order of the discontinuities can be calculated, thereby the corresponding order of fringe pattern can be determined. According to the order of fringe pattern, the absolute phase can be got. The experimental results show that the encoded method effectively decreases the number of encoded patterns and improves the measurement speed under the premise of ensuring the measurement accuracy and reliability, and it is very suitable for high speed three-dimensional measurement system.

**Key words** signal processing; three-dimensional sensing; coding structure-light; phase unwrapping; spatiotemporal encoding

**OCIS codes** 150.6910; 120.4630; 100.5088

## 1 引言

基于编码结构光投影的光学三维传感技术由于其具有非接触、测量速度快和精度高等优点, 已经被广泛应用于逆向工程、质量控制、虚拟现实、影视特

技和生物医学等领域<sup>[1-6]</sup>。目前所用的编码方法<sup>[7]</sup>主要分为时间编码方法、空间编码方法和时空编码方法。时间编码方法<sup>[8]</sup>是将一系列编码图案依次投影到被测物体表面, 获得一组时间连续的编码值, 由

收稿日期: 2013-04-12; 收到修改稿日期: 2013-06-17

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项(61027014)、国家自然科学基金青年项目(11109052)、深圳大学应用技术开发项目(201151)

作者简介: 林海新(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学三维测量方面的研究。E-mail: linhaixin2011@163.com

导师简介: 吴庆阳(1973—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事三维传感和机器视觉方面的研究。

E-mail: wuqy@szu.edu.cn(通信联系人)

于对每个像素都进行独立编码,因此具有较高的测量精度。它的缺点是需要投影多帧编码图案,不适用于扫描动态场景;空间编码方法<sup>[9]</sup>仅需投影一幅编码图案,由光强在空间上的变化规律形成编码,因此对每个像素进行编码时都需要考虑其邻域像素点,它的优点是可以用于获取运动物体表面的信息,其缺点是在解码时,如果空间邻域点信息的丢失会造成解码的困难,所以该方法的可靠性比较低;时空编码方法<sup>[10]</sup>是对时间编码和空间编码方法的一种改进方案,它采用的编码图案比时间编码方法的少,其测量速度位于时间编码和空间编码方法之间,测量精度与时间编码方法相当,它的缺点是编码和解码都较为复杂,同时存在误码率较高的问题。

针对上述时空编码方法存在的问题,本文提出了一种基于截断线的二值时空编码方法。这种编码方法编码简单、解码容易,同时有效地提高了测量的可靠性。通过投影3幅二值编码条纹图,利用条纹边界左右两侧的编码值对截断相位图中的截断线进行编码。实验结果表明,在保证测量精度和可靠性前提下,该编码方法有效减少了编码的幅数,提升了测量的速度,非常适用于高速三维测量系统。

## 2 原 理

### 2.1 相移法原理

相位测量轮廓术通过投影正弦光栅、待测表面和摄像机像面上的对应点之间的三角关系来测量物体的三维形貌。当光栅投影到待测物体表面时,所探测到的正弦光栅的相位会受到物体表面高度的调制,它们之间满足一种映射关系。目前获取相位的方法主要有傅里叶变换法<sup>[11]</sup>、小波变换法<sup>[12]</sup>、空间相位检测法和相移法。这些方法中相移法的相位获取精度最高。采用3步相移法来获取被测物体的相位信息,采集的变形条纹为

$$\begin{cases} I_1(x,y) = A(x,y) + B(x,y)\cos[\phi(x,y) - 2\pi/3] \\ I_2(x,y) = A(x,y) + B(x,y)\cos\phi(x,y) \\ I_3(x,y) = A(x,y) + B(x,y)\cos[\phi(x,y) + 2\pi/3] \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $A(x,y)$  为背景光强,  $B(x,y)$  为条纹的调制度,  $\phi(x,y)$  为物体高度  $h(x,y)$  所决定的相位调制量。由(1)式可推出

$$\phi(x,y) = \arctan[\sqrt{3}(I_1 - I_3)/(2I_2 - I_1 - I_3)], \quad (2)$$

$\phi(x,y)$  的相位值截断在  $(-\pi, \pi]$  之间,称之为截断

相位。

### 2.2 编码原理

相移法虽然提取相位的精度高,但由于在计算相位时使用了反正切函数,相位值被截断在  $(-\pi, \pi]$  之间。为了恢复其真实相位,必须对其进行相位展开。通常采用的方法是格雷码结合相移的编码方法。即除了基本的相移条纹外,再将多幅格雷编码图案按顺序先后投影到被测物体的表面,由摄像机同步采集,然后对这一组编码图案进行解码,即可得到整个条纹图像的绝对相位。这种方法由于对所有的条纹进行编码,因此所需投影的编码图案较多(一般为7幅),测量速度较低。

为了提高测量速度,本文提出了一种基于截断线的二值时空编码方法。在截断相位图中相位跳变绝对值大于  $\pi$  的点通常连成线,称之为截断线。设计编码的过程中,保证编码条纹的边界与截断线相互匹配,通过读取截断线的编码值,就可以确定对应正弦条纹的级次。由于二进制黑白条纹编码对各种噪声(如来自测量环境的噪声)具有很强的稳健性,所以本实验采用了3幅二进制黑白条纹编码图案。条纹的边界通过左右两侧不同的编码值来确定,则3幅编码图总共可以确定  $2^{2n}$  ( $n$  为幅数) 即  $2^{(2 \times 3)} = 64$  个编码值。而3幅格雷编码图只能确定8个编码值,相比之下编码效率提高了  $2^n$ , 即  $2^3 = 8$  倍。实验中所用的投影仪的分辨率为  $800 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$ , 投影的正弦条纹的每个周期的像素宽度为  $16 \text{ pixel}$ , 则条纹的总周期数为  $800/16 = 50 \text{ pixel}$ 。由于一个编码值对应一条截断线,因此需要用到49个编码值。

编码条纹分布图如图1所示。每幅编码图都是由一系列的竖条组成,最小竖条的宽度与正弦条纹的周期相同,其他竖条的宽度为正弦条纹周期的整数倍。一共采用两个灰度级(白为1,黑为0)对竖条进行编码,沿竖条方向灰度无变化。由于编码条纹的边界与截断线相互匹配,因此可以沿着时间轴方

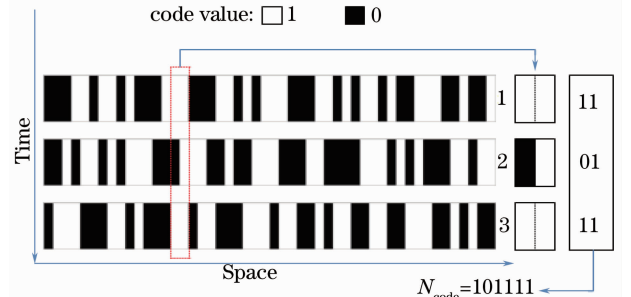


图1 编码图案

Fig. 1 Coded patterns

向依次读取截断线在 3 幅编码图中其左边的 3 个码值,再按顺序读取其右边的 3 个码值,最后可以得到一个 6 位的二进制码值(如 101111)。相邻条纹的二进制码值满足前一个二进制码值的后 3 位是后一个二进制码值的前 3 位,每个二进制码值在整个测量空间内是唯一的。

### 2.3 解码算法

在实际测量中截断线一般不会与编码条纹的边

表 1 码值转换

Table 1 Code values translation

$k$	1	2	3	4	5	6
Binary code	000001	001011	011101	101110	110010	010100
$k$	7	8	9	10	11	12
Binary code	100111	111001	001110	110011	011010	010000
$k$	13	14	15	16	17	18
Binary code	000100	100101	101111	111010	010011	011001

从表 1 中可以得出,一旦获得了截断线的编码值,就可以得到对应正弦条纹的级次  $k$ 。实际中如果被测物体的局部高度起伏较大,采用该方法所得到的那部分截断线的  $k$  值的错误率较高,采取的解决方案如下:由于解码时截断相位图中的相位跳变绝对值大于  $\pi$  的点都获得了一个  $k$  值,因此可以先将该条纹周期内所有的点提取出来,然后统计该条纹周期内跳变点中出现次数最多的  $k$  值,则该  $k$  值即为该条纹周期的级次。一旦确定条纹的级次  $k$ ,则该周期条纹的绝对相位可以用下式求出:

$$\phi_u(x, y) = \phi(x, y) + 2k\pi, \quad (3)$$

式中  $\phi(x, y)$  为利用 3 步相移条纹计算的截断相位

界直接吻合,会有 1~2 pixel 的错位,因此不能直接读取截断线在 3 幅编码图中左右位置的码值来解码。采取的方法是读取编码图中左右两边距离其位置有 4 pixel 宽度处的码值来得到一个 6 位的二进制码值。表 1 给出了部分编码值与其相对应的正弦级次  $k$  的关系,其余的正弦条纹的级次也可以通过类似的转换关系来确定。

值,  $\phi_u(x, y)$  为求得的连续相位值。

实际中由于环境噪声、物体本身的遮挡等原因也会造成截断线错误或无法获取。由噪声引起的截断线往往都是孤立的,可以通过滤波的方法来消除;而物体的遮挡会导致该区域截断线的码值无法获取,这样会引起局部绝对相位无法恢复,这个可以通过多次测量的方法来解决。

通过利用上述的编码方法,再对照表 1 的码值转换就可以获得正弦条纹的级次,最后使用(3)式就可以恢复真实相位。相位展开的模拟过程如图 2 所示。

### 2.4 相位-高度映射

设展开后的连续相位分布函数为  $\phi_u(x, y)$ ,则根据投影系统的数学模型,可以建立相位到高度的

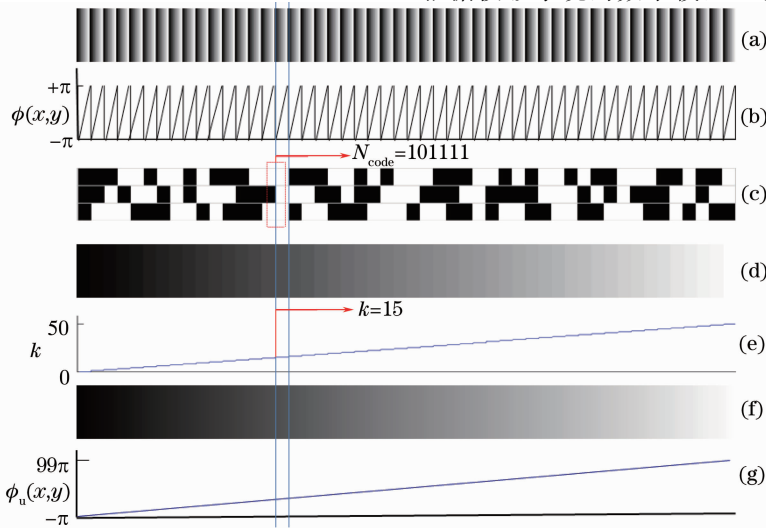


图 2 相位展开模拟过程。(a)和(b)是截断相位图;(c)是编码图;(d)和(e)是解码值图;(f)和(g)是绝对相位图

Fig. 2 Phase unwrapping simulation process. (a) and (b) Wrapped phase; (c) coded patterns;

(d) and (e) decoded values map; (f) and (g) absolute phase

映射关系。空间中每一点的测量相位差  $\Delta\phi_u(x, y)$  (指的是成像系统上同一点接收到的在参考平面上和在物体表面上的两个展开后相位值之差) 和待测高度  $h(x, y)$  之间存在以下关系<sup>[13]</sup>:

$$\frac{1}{h(x, y)} = a(x, y) + b(x, y) \frac{1}{\Delta\phi_u(x, y)} + \frac{c(x, y)}{\Delta\phi_u^2(x, y)}, \quad (4)$$

式中  $a(x, y)$ 、 $b(x, y)$  和  $c(x, y)$  3 个未知参数可以通过系统标定获得。

### 3 实验及结果分析

为验证本文提出的方法,对浮雕和 kitty 猫进行测量。实验装置如图 3 所示。其中投影仪的型号为三星(SAMSUNG)SP-P410M、摄像机为 Point Grey

公司出品的 Chameleon CMLN-1362M 工业相机,其分辨率为  $1280 \text{ pixel} \times 960 \text{ pixel}$ ,像元尺寸为  $3.75 \mu\text{m}$ 。本实验投影了 3 幅具有  $2\pi/3$  相移的正弦光栅图像和 3 幅二值编码光栅图像,图 4(a)为被测物体的相移条纹图,图 4(b)为其中 1 幅编码图。

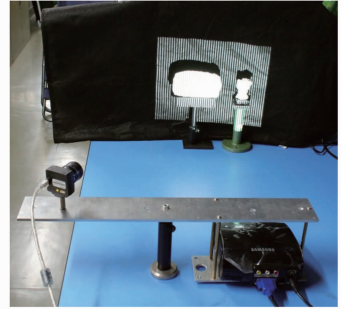


图 3 实验装置图

Fig. 3 Device of experiment

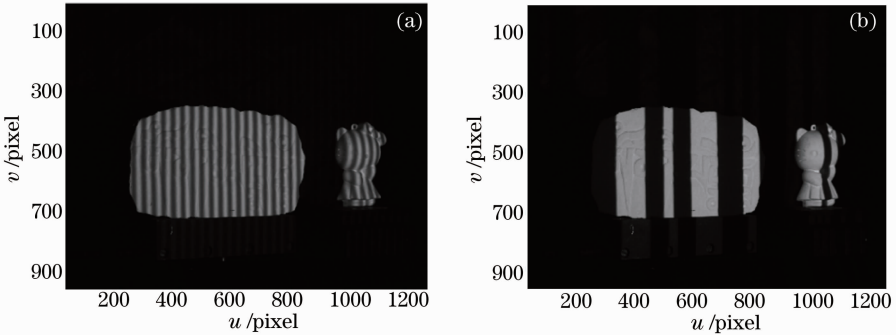


图 4 (a) 相移条纹图; (b) 编码条纹图

Fig. 4 (a) Phase-shifted fringe pattern; (b) coded pattern

实验步骤:

1) 求截断相位,根据求相位算法,利用(2)式对

采集的 3 幅相移正弦条纹图进行解相,得到截断在  $(-\pi, \pi]$  区间的相位值,如图 5(a)所示;

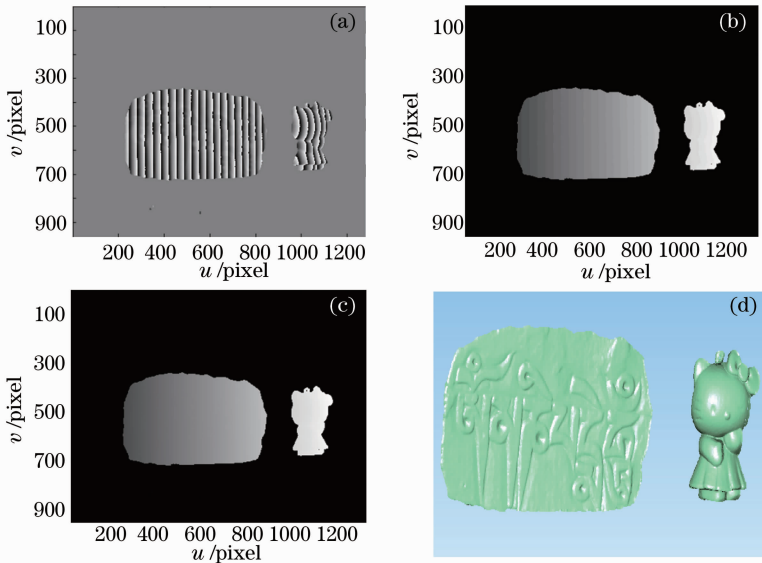


图 5 (a) 截断相位图; (b) 码值图; (c) 绝对相位图; (d)重建效果图

Fig. 5 (a) Wrapped phase; (b) decoded values map; (c) absolute phase; (d) reconstruction result

2) 运用编码方法,对截断相位图中的截断线进行解码,从而确定正弦条纹的级次  $k$ ,得到的  $k$  值如图 5(b)所示;

3) 求绝对相位,利用(3)式对截断相位进行相位展开,得到的连续相位值如图 5(c)所示;

4) 对系统进行标定,根据(4)式获得物体表面的三维数据,利用 Geomagic Studio 软件导入物体的三维数据,得到物体的三维重构图如图 5(d)所示。

## 4 结 论

提出了一种应用于结构光投影三维测量的二值时空编码方法。通过投影 3 幅二值编码条纹图,利用条纹边界左右两侧的编码值对截断相位图中的截断线进行编码。在保证测量精度和可靠性的前提下,有效地减少了编码图案的数量,较大地提高了三维面形的测量速度。实验结果表明,该方法能够快速、准确地重建物体的三维面形,适用于高速三维测量系统。

## 参 考 文 献

- 1 G Sansoni, F Docchio. Three-dimensional optical measurements and reverse engineering for automotive applications[J]. Robotics and Computer - Integrated Manufacturing(S0736-5845), 2004, 20(5): 359-367.
- 2 S Zhang. Flexible 3D shape measurement using projector defocusing: extended measurement range[J]. Opt Lett, 2010, 35(7): 934-936.
- 3 G Sansoni, F Docchio. 3D optical measurements in the field of cultural heritage: the case of the Victoria Alata of Brescia [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement(S0018-9456), 2005, 54(1): 359-368.
- 4 S S Gorthi, P Rastogi. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. Opt & Lasers in Eng, 2010, 48(2): 133-140.

- 5 Zhu Ronggang, Zhu Rihong, Li Jianxin. Application of virtual grating phase-shifting fringe method for three-dimensional shape measurement[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s108003.  
朱荣刚,朱日宏,李建欣.一种虚条纹相移算法在结构光三维测量中的应用[J].中国激光,2012,39(s1):s108003.
- 6 Zhang Qican, Su Xianyu. Research progress of dynamic three-dimensional shape measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010001.  
张启灿,苏显渝.动态三维面形测量的研究进展[J].激光与光电子学进展,2013,50(1):010001.
- 7 J Salvi, S Fernandez, T Pribanic, *et al.*. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry [J]. Pattern Recognition, 2010, 43(8): 2666-2680.
- 8 Zhang Wuming, Zhong Yuebian, You Zhifu, *et al.*. A phase unwrapping method based on structured light binary code [J]. Optical Technique, 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.
- 9 S Y Chen, Y F Li, J Zhang. Realtime structured light vision with the principle of unique color codes [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007. 429-434.
- 10 Li Yong, Chen Yunfu, Jin Hongzhen, *et al.*. Binary spatiotemporal encoded illumination for 3D imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 670-675.  
李勇,陈云富,金洪震,等.三维成像中的二值时空编码照明方法[J].光学学报,2009,29(3):670-675.
- 11 Wang Chenxing, Da Feipeng. A novel adaptive windowed Fourier transform for phase retrieval in 3D shape measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0612005.  
王辰星,达飞鹏.三维测量中一种新的自适应窗口傅里叶相位提取法[J].光学学报,2012,32(6):0612005.
- 12 Li Sikun, Su Xianyu, Chen Wenjing. Analytic image based wavelet transform method for phase reconstruction of optical interferogram with linear-carrier [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0209002.  
李思坤,苏显渝,陈文静.基于解析图像的小波变换光学载频干涉全息图相位重建方法[J].中国激光,2011,38(2):0209002.
- 13 Song Wanzhong, Su Xianyu, Cao Yiping, *et al.*. A new method of three-dimensional coordinates calibration in phase measuring profilometry [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(3): 272-277.  
宋万忠,苏显渝,曹益平,等.相位测量轮廓术中三维坐标校准新方法[J].光学学报,2003,23(3):272-277.

栏目编辑:何卓铭