

基于格雷编码投影的三维测量技术研究

宋倩 陈悦 朱荣刚 朱日宏

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 采用编码条纹投影解相位技术,通过向物体投影6幅经过格雷编码的二值条纹图与4幅周期为 2^{N-1} 的正弦条纹图,来实现相位的求解。这种方法实现了边缘陡峭物体的测量,同时提高了相位解包的准确性。与传统方法相比,这种方法能够测量物体的阶跃特性,且投射高频条纹能够提高测量精度。

关键词 测量;条纹投影;相位解包;编码投影;格雷码

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.031203

Research of 3D Measurement Technology Based on Gray Code Projection

Song Qian Chen Yue Zhu Ronggang Zhu Rihong

School of Electronic Engineering and Optoelectronic Techniques, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract The way of encoded fringe projection is taken through projecting six binary fringe patterns after gray coding and four sinusoidal fringe patterns with the cycle of 2^{N-1} into the object to unpack phase. This method achieved a measurement of object with steep edge, and improved the accuracy of phase unwrapping at the same time. Compared with traditional methods, this method can measure the step characteristics of object, and the measurement accuracy can be improved when high frequency fringe is projected.

Key words measurement; fringe projection; phase unwrapping; coded projection; gray code

OCIS codes 120.505; 150.0155; 150.1135; 330.4060; 330.7310

1 引言

相位测量轮廓术就是光学三维面形测量中最为常见的测量方法,有计算简单,测量效率高等优点^[1-3]。采用四步移相法^[4],用CCD记录被测物体高度调制的变形条纹,通过条纹形变量计算压包相位。本文采用条纹编码技术,通过向物体投影6幅经过格雷编码的二值条纹图,可以检测边缘陡峭的物体,取得了不错的复原效果。

2 原理

2.1 相移条纹投影法测物体三维轮廓

相移条纹投影法测面形示意图如图1所示。其由数字投影仪DLP、待测物和CCD组成。

CCD接收的光信号表示为

$$I(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos\phi(x,y), \quad (1)$$

式中 $a(x,y)$ 为背景光强, $b(x,y)$ 为条纹的调制度, $\phi(x,y)$ 为由被测件镜面引入的相位调制。

采用 N 步相移法^[4]就能够很容易地将其求出,即将正弦条纹图分 N 次进行投影,则相邻两幅光栅的相位

收稿日期: 2013-08-02; 收到修改稿日期: 2013-09-02; 网络出版日期: 2014-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(U231112)

作者简介: 宋倩(1988—),女,硕士研究生,主要从事条纹投影方面的研究。E-mail: songqianqingyu@163.com

导师简介: 朱日宏(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事精密光学仪器理论与技术方面的研究。

E-mail: zhurihong@mail.njust.edu.cn

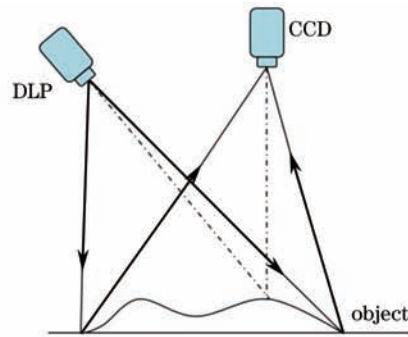


图1 相移条纹投影示意图

Fig. 1 Schematic diagram for phase shift fringe projection

差为 $2\pi/N$ 。那么在 CCD 相机端获取到的变形条纹为

$$I_n(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\phi(x, y) + 2\pi(n-1)/N], \quad (2)$$

由最小二乘法从 N 幅变形条纹图中计算相位值可得:

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y)\sin[2\pi(n-1)/N]}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y)\cos[2\pi(n-1)/N]}, \quad (3)$$

本文采用的是四步移相法。

2.2 相位解包原理

(3)式中的解相算法得到的相位值被包裹在反正切函数的值域 $[-\pi, \pi]$ 之间,存在间断和跳变的不连续相位,被称为压包相位^[6-7]。为了获得真实的相位分布,需要对压包相位进一步的处理,这一过程就是相位解包^[6-8]。

设压包相位为 $\phi(x, y)$,解包后的真实相位为 $\varphi(x, y)$,则有

$$\varphi(x, y) = \phi(x, y) + 2\pi n(x, y), \quad (4)$$

求解整数 n 就是所谓的相位解包过程,通常我们所采用的的方法是 比较相邻两个像素点的相位值,如果相位差小于 $-\pi$,则后一点的相位值加 2π ;如果相位差大于 π ,则后一点的相位值减去 2π ^[6]。

2.3 二值编码原理

二值编码分为普通的二进制码和格雷码两种。格雷码是一种常见的无权码,使它在代码形成与传输中引起的误差较小^[9]。

二进制码和格雷码的条纹图如图2所示。

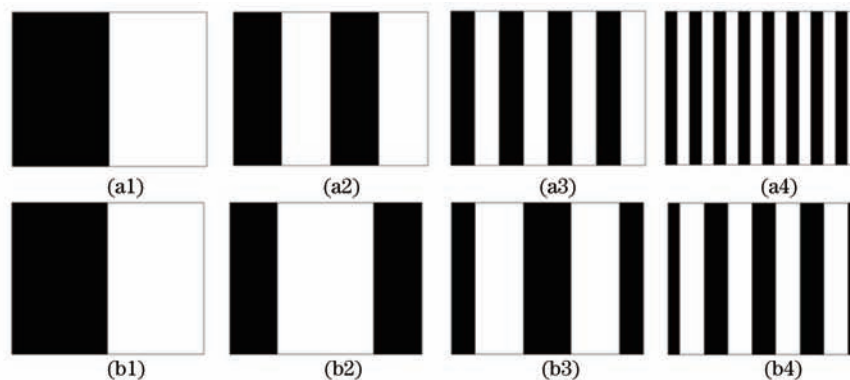


图2 两种编码图的部分示例。(a1)~(a4)二进制编码图;(b1)~(b4)格雷编码图

Fig.2 Parts of two kinds of coded pictures. (a1)~(a4) Binary coded pictures ; (b1)~(b4) gray coded pictures

由上图对比可知,同样周期格雷码条纹图比二进制码条纹图少了许多边界线,这样有利于减少条纹的边界效应,本文选用格雷码作为编码投影。

采用6幅二值条纹图,每幅图的区域分别为 2^m 个^[10],其中 $m=0, 1, \dots, 5$ 。将编码投影在待测物表面,由

CCD 分别采集。记黑色区域为 1, 白色区域为 0, 6 幅编码图依次记为 10, 1001, 10011001, 1001100110011001, ... , 压包相位里的每一个像素点对应于 6 幅编码图都有一组格雷码。格雷码不能直接进行计算, 需要转换为二进制码。格雷码转换为二进制码准则为: 从左边起第一位不变, 第二位起, 将每位与左边一位解码后的值做异或运算, 作为该位解码后的值(最左边一位依然不变)。假设 $n+1$ bit 二进制码为 $B_n \cdots B_1 B_0$, $n+1$ bit 格雷码为 $R_n \cdots R_1 R_0$, 两码的转换公式如下^[9]:

$$\begin{cases} B_n = R_n, \\ R_i = B_{i+1} \oplus B_i, \\ i \neq n, \end{cases} \quad (5)$$

式中 \oplus 为异或运算符。

压包相位上的每一个像素都对应一组 6 bit 的二进制码, 记为 $B_5 B_4 B_3 B_2 B_1 B_0$ 。即有:

$$n(x, y) = 2^5 B_5 + 2^4 B_4 + 2^3 B_3 + 2^2 B_2 + 2B_1 + B_0, \quad (6)$$

将(3)、(6)式代入(4)式可得最终解包相位:

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin[2\pi(n-1)/N]}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos[2\pi(n-1)/N]} + 2\pi(2^5 B_5 + 2^4 B_4 + 2^3 B_3 + 2^2 B_2 + 2B_1 + B_0). \quad (7)$$

3 实验

被测物体为一眼睛的石膏像, CCD 相机型号为 Baumer TXG13, 投影仪分辨率为 1024 pixel \times 768 pixel。

将图 3(a) 中的 4 幅正弦条纹图和图 3(b) 中 6 幅格雷码条纹图分别投影到被测物体上, 由 CCD 采集变形条纹。将采集的 6 幅编码图做二值化, 便于运算。

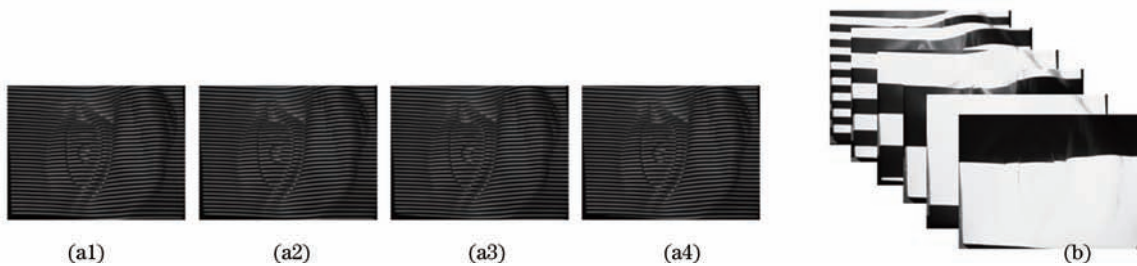


图 3 CCD 采集条纹图及二值化的编码图。(a1)~(a4) 4 幅被调制的正弦条纹图; (b) 将采集的编码图做二值化

Fig.3 Fringe patterns and coded patterns after binarization. (a1)~(a4) Four modulated sinusoidal fringe patterns; (b) six gray coded patterns after binarization

裁剪所有采集图, 4 幅调制的正弦条纹图经过用四步移相可得到被测物的压包相位, 采用格雷码解相位, 得到阶梯 n 的三维图, 以及解包相位如图 4 所示。

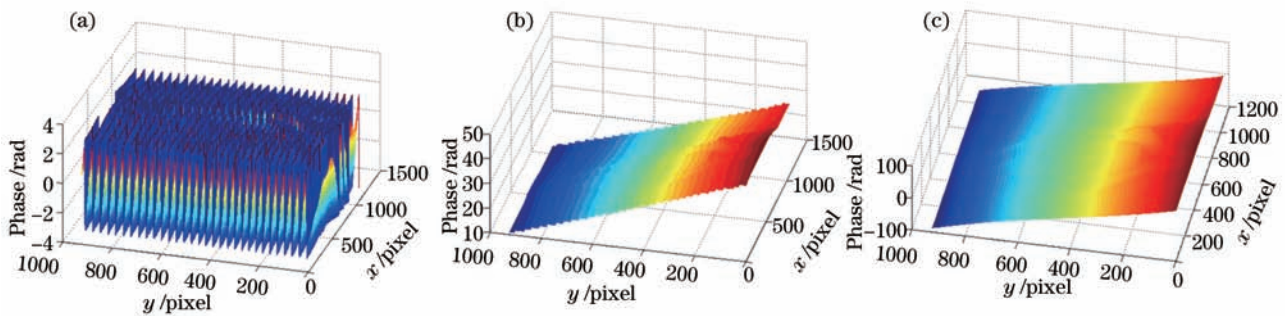


图 4 相位图。(a) 压包相位图; (b) n 的分布图; (c) 解包相位图

Fig.4 Phase diagram. (a) Phase diagram without unwrapping; (b) distribution of n ; (c) phase diagram after unwrapping

使用最小二乘法做平面拟合, 对解包相位消倾斜, 得到物体的真实相位分布如图 5 所示。

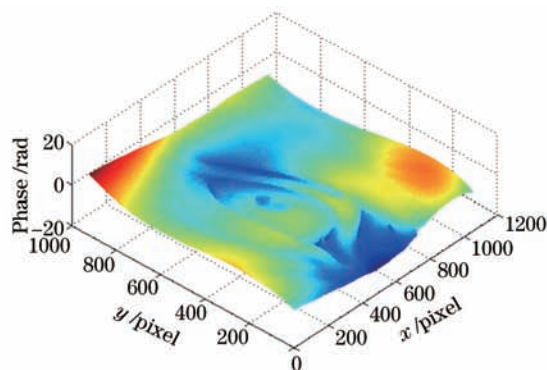


图5 物体的相位分布图

Fig.5 Phase distribution of the object

4 结 论

采用条纹编码技术,在投影4幅正弦条纹图之后,通过向物体投影6幅经过格雷编码的二值条纹图,得出6 bit 格雷码,再将格雷码转变为二进制码计算,实现相位解包和边缘陡峭物体的三维测量,取得了不错的效果。具体的精度分析正在进一步的研究分析中。

参 考 文 献

- 1 S S Gorthi, P Rastogi. Fringe Projection Techniques: Whither we are? [J]. Opt Laser Eng, 2010, 48(2): 133-140.
- 2 M C Knauer, J Kaminski, G Hausler. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces [C]. SPIE, 2004, 5869: 355-366.
- 3 T Bothe, W Li, C von Kopylow, *et al.*. High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection [C]. SPIE, 2004, 5457: 411-422.
- 4 V Srinivasan, H C Liu, M Halioua. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. Appl Opt, 1984, 23(18): 3105-3108.
- 5 Z Wang, H Du, S Park, *et al.*. Three-dimensional shape measurement with a fast and accurate approach [J]. Appl Opt, 2009, 48(6): 1052-1061.
- 6 Liu yan. Research and Improvement of Grating projection 3D Surface Profile Measurement Method [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
刘 艳. 光栅投影式物体表面三维形貌测量方法的研究与改进[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- 7 Tan Huazhu, Zhao Huijie. Application of noise-immune phase unwrapping algorithm on projecting fringe method of measuring the 3D topography [J]. J Astronautic Metrology and Measurement, 2002, 22(2):14-19.
谭华竹, 赵慧洁. 抗噪相展开算法在投影栅法三维形貌测量中的应用[J]. 宇航计测技术, 2002, 22(2): 14-19.
- 8 Wang Xin, Jia Shuhai, Chen Guangde. A review of the study on phase unwrapping [J]. Chinese J Scientific Instrument, 2005, 26(8): 665-668.
王 新, 贾书海, 陈光德. 相位去包裹技术进展[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 665-668.
- 9 Jiang Liping. Digital Logic Circuits and System Design [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008: 10-11.
蒋立平. 数字逻辑电路与系统设计[M].北京:电子工业出版社, 2008: 10-11.
- 10 M Petz, R Ritter. Reflection grating method for 3D measurement of reflecting surfaces [C]. SPIE, 2001, 4399: 38-39.