

# 彩色组合编码条纹光栅轮廓术\*

刘维一 王肇圻 母国光 方志良

(南开大学现代光学研究所, 教育部光电信息技术科学开放研究实验室, 天津 300071)

**摘 要** 研究了一种新的编码光栅投影三维轮廓术。其中投影光栅利用彩色空间红、绿、蓝三基色相互独立的特性, 用彩色条纹对光栅进行编码, 以白色条纹为起始位, 后接红、绿、蓝(R、G、B)三种颜色的条纹组成一组。改变红、绿、蓝的排列顺序可使各组有不同的编码。根据排列组合原理, 红、绿、蓝三色可有 6 种不同的排列方式。经过编码处理的光栅在保证测量精度不变的前提下, 加大了高度测量的范围。由于每个条纹只采用 0 和 255 两个状态, 因此具有较强的抗干扰能力。测量的精度主要取决于图像的分辨率。

**关键词** 彩色组合编码, 条纹光栅, 三维轮廓术。

## 1 引 言

光学三维轮廓术是获取物体三维信息的有效手段之一。目前研究和使用的较多的方法有相移测量法和激光扫描法。在相移测量法中, 通常需要把正弦光栅或线性周期光栅投射到物体的表面<sup>[1-3]</sup>。由于受到物体表面高度的调制, 光栅的相位相对参考面产生了位移。通过求解相位的偏移量, 即可获得被测物体的高度。由于这种方法采用连续变化的光强对光栅进行编码, 因而测量精度容易受到表面反射率、图像采样噪声等许多因素的影响, 很难得出测量的绝对精度值。

激光扫描法几乎可以适应任何物体的外形轮廓测量<sup>[4]</sup>。由于扫描激光的强度是二值化的, 并且光强较高, 所以不会受到物体表面纹理的干扰。它的缺点是需要一个扫描装置, 而且测量速度慢, 不能对动态物体进行实时测量。每当激光移动一个角度就要获取一幅图像。在整个测量过程中要处理大量的图像。而每幅图像中有用的信息只占整个图像的一小部分。采用条纹光栅可以增加每幅图像的信息量。但条纹数量的增加又使高度测量的有效范围受到限制<sup>[5]</sup>。本文在两个光栅条纹之间插入红、绿、蓝三种颜色的条纹, 并经过不同的排列组合构成编码的条纹光栅, 既增加了光栅条纹的数量, 又保证了足够的高度测量范围。

## 2 彩色组合编码光栅的原理

### 2.1 光栅周期与测量高度的关系

用条纹光栅进行轮廓测量时, 光栅的空间周期与测量精细度有密切的关系。光栅越密,

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 69777003)。

收稿日期: 1999-02-08; 收到修改稿日期: 1999-07-29

表面测量精细度越高, 但测量的高度范围越小。由于光栅具有空间周期性, 物体表面形状的变化经常使光栅条纹出现许多断点, 在断点前后条纹具有相同的形态, 无法辨别断点前后究竟相差几个周期, 因而失去了对高度的判别能力。解决这一问题的办法之一是增大光栅的空间周期, 使得由高度变化引起的光栅条纹移动在一个周期以内。这样就能保证高度测量的要求<sup>[5]</sup>。

在图 1 中,  $A$  点为光栅投影仪的位置,  $B$  点为 CCD 摄像机的位置,  $AB$  之间的距离为  $W$ 。 $x$  轴取在基准面上,  $z$  轴与  $x$  轴垂直。 $AB$  与  $x$  轴平行。 $AC$  与  $AD$  是投向物体表面的相邻两条光束, 其中光束  $AD$  投射在物体表面上的  $E$  点。 $E$  点的垂直坐标为  $Z$ ,  $E$  点到  $AB$  的垂直距离为  $L$ 。由图 1 可以看到, 从  $B$  点获得的图像中, 参考面上的  $C$  点与物体表面上的  $E$  点正好重合。由于  $AC$  与  $AD$  是相邻的两条光束,  $CD$  的距离为一个光栅周期的空间距离  $T$ 。因为  $\triangle CDE$  与  $\triangle ABE$  相似, 可得到:

$$Z = \frac{L}{W}T, \quad (1)$$

由此确定的  $Z$  值就是空间周期为  $T$  的光栅所能测量的最大高度。由此看到, 要获得到足够高的测量范围, 必须使条纹光栅的空间周期足够宽; 而光栅周期的加大又使测量的精细度降低。为解决这一矛盾, 我们采用彩色条纹对光栅进行编码处理, 即满足精度测量的要求, 又有足够的高度测量范围。

## 2.2 编码原理

用彩色 CCD 获得的图像被分成红、绿、蓝三个分量。红色条纹在红光分量图像中为一条亮条纹, 而在蓝光和绿光分量图像中则为暗条纹。对蓝光和绿光也是同样的情况。只有白光条纹在红、绿、蓝三个分量图像中都是亮条纹。因此可以很容易地把白光以及红、绿、蓝三色条纹从图像中解调出来。利用这一原理, 以白色条纹为起始位, 后接红、绿、蓝三种颜色的条纹组成一组, 两个条纹之间用黑色条纹隔开, 所以每组共有 8 个条纹。改变红、绿、蓝的排列顺序可使各组有不同的编码。根据排列组合原理, 红、绿、蓝三色可有 6 种不同的排列方式, 所以最多可有 6 组, 共 48 个条纹组成一个大的周期光栅。

图 2 是彩色组合编码光栅图。依次的排列顺序如表 1 所示。其中  $W$  表示白色条纹,  $R$ 、 $G$ 、 $B$  分别表示红、绿、蓝三色条纹, 黑色条纹未在表中列出。

Table 1. The arrangement of color strips in color permutation code grating

No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
WRGB	WRBG	WGBR	WGRB	WBRG	WBGR

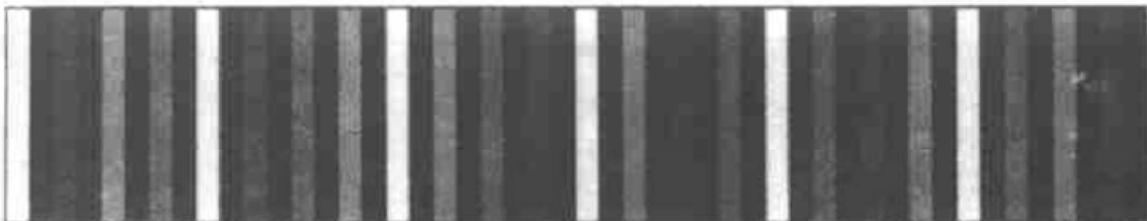


Fig. 2 The sample of color permutation code grating

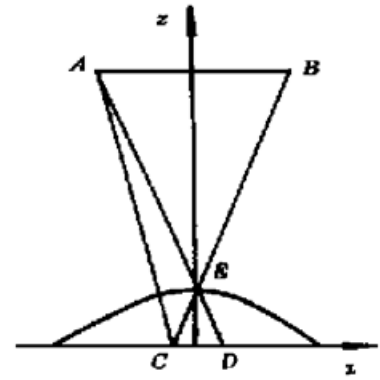


Fig. 1 Schematic diagram of projection and image system

如果每个条纹的宽度是 5 mm, 则整个编码光栅的空间周期  $T = 240$  mm。将  $T$  代入(1)式(在我们的测量系统中,  $L/W = 2.7$ ), 得到最大测量高度为 648 mm。这一高度范围能够适应一般物体的测量要求。由于每个光栅条纹都较细, 所以可以保证足够高的测量精细度; 同时, 整个光栅的空间周期很长, 又能保证有足够的高度测量范围。

### 3 实验与结果

#### 3.1 实验装置

测量系统的光路结构如图 3 所示。 $P(-X_0/2, 0, Z_0)$  为光栅投影仪的位置,  $C(X_0/2, 0, Z_0)$  为 CCD 摄像机的位置, 两者位于同一水平高度。

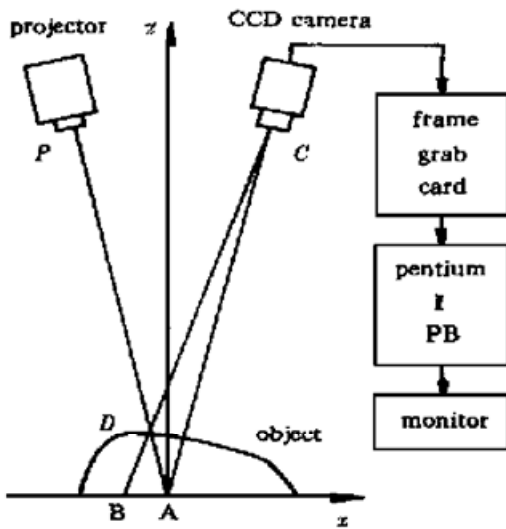


Fig. 3 Configuration diagram of measuring system

一光栅条纹投射在参考平面上的  $A$  点。放入物体后, 该条纹投射在物体的  $D$  点。从摄像机获得的图像中,  $D$  点与  $B$  点在同一位置。线段  $AB$  即为物体相对参考面的高度  $Z_D(x, y)$  产生的光栅条纹的位移。由于  $\triangle PCD$  与  $\triangle BAD$  为相似三角形, 所以

$$\frac{Z_D(x, y)}{Z_0 - Z_D(x, y)} = \frac{AB}{PC} \quad (2)$$

在实际测量系统中  $Z_0 \gg Z_D(x, y)$ ,  $PC = X_0$ ,  $AB = X$ , 所以

$$Z_D(x, y) = \frac{Z_0}{X_0} X = kX, \quad (3)$$

系统中  $Z_0 = 1150$  mm,  $X_0 = 420$  mm, 由此得到系统结构常数  $k = 2.73$ 。在进行实际测量时, 光栅条纹的移动距离是由图像中移动的像素数  $n$  来确定的。将  $n$  乘以成像系统的横向放大率  $\beta$  即可得到光栅条纹移动的实际距离  $X = \beta n$ 。因此, (3) 式可以写成:

$$Z_D(x, y) = k\beta n. \quad (4)$$

#### 3.2 解码过程

实验过程首先将彩色组合编码光栅投射在一个参考平面上, 用 CCD 摄像机获取参考平面的采样图像, 并由图像采集卡送入计算机, 作为高度测量的基准。然后放入被测物体, 由于物体表面高度的变化, 使光栅条纹发生位移。由于每一组编码条纹均由白、红、绿、蓝组成, 所以只要知道相邻 3 个条纹的颜色就能唯一地确定这 3 个条纹在编码光栅中的位置。将物体表面的编码条纹所在的位置与参考面上具有相同编码值的条纹所在的位置相减, 可得到条纹的平移距离, 再乘以系统结构常数即可得到物体表面的高度值。

#### 3.3 实验过程与结果

为了得到编码光栅轮廓术的实际测量精度, 对一个顶角为直角的等腰三角形样块进行测量, 得到的采样图像如图 4(a) 所示。在对实际物体进行测量时, 由于受到环境等各种因素的影响, 彩色条纹的颜色将变模糊。即在红色条纹处也存在绿光和蓝光的成分。为了消除这些影响, 首先对图像的颜色进行纯化处理。由于编码所采用的颜色只有单纯的红、绿、蓝及白和黑条纹, 没有中间色, 所以可以比较容易地通过设置适当的阈值来判断每一个像素的颜

色, 然后将其设成单纯的颜色。在 24 位真彩色模式下, 红、绿、蓝三个分量只取 0 或 255。图 4(b) 是经过颜色纯化处理后的图像, 其中每种颜色的条纹都成为单一的颜色, 同时条纹的边界也变得清晰锐利。为了进行测量精度的比较, 同时采用精度为  $\pm 0.02 \text{ mm}$  的游标卡尺对三角形样块进行测量, 得到三角样块的底边宽为  $154.00 \text{ mm}$ , 高为  $78.40 \text{ mm}$ 。经解码处理后得到的高度测量值与用游标卡尺测量的结果列于表 2。其中平均误差为游标卡尺的测量值与编码光栅测量的平均值之差。在等腰三角形顶点处条纹的移动距离为 60 个像素。由此得到每个像素所对应的高度值为  $1.3 \text{ mm}$ 。从表 2 可以看到, 编码光栅轮廓术的测量误差为  $\pm 1$  个像素, 它所对应的高度测量误差为  $\pm 1.3 \text{ mm}$ 。

Table 2. Data of height measured by vernier caliper and color-coded grating profilometry (dimension: mm)

measured by vernier caliper		13.90	43.80	58.76	73.70	78.40	67.24	52.30	37.36	22.40
measured by color-coded grating	maximal value	15.6	45.5	59.8	75.4	79.3	67.6	54.6	39.0	24.7
	average value	14.3	44.2	58.5	74.1	78.0	67.6	53.3	37.7	23.4
	minmal value	14.3	42.9	58.5	72.8	76.7	66.3	53.3	37.7	23.4
average error		0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	1.0	0.3	1.0

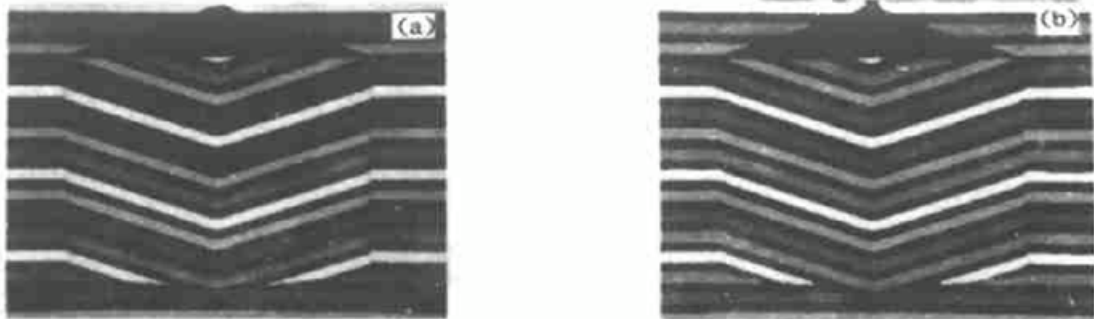


Fig. 4 (a) The triangle specimen image from CCD camera, (b) The specimen image after purified processing

图 5(a) 是一个用于测量的人头像。为了尽量减少脸部的阴影, 将光栅投影仪与 CCD 摄像机垂直摆放, 并使投射光栅从下往上投影, 这样整个脸部没有遮挡阴影。图 5(b) 是经过颜

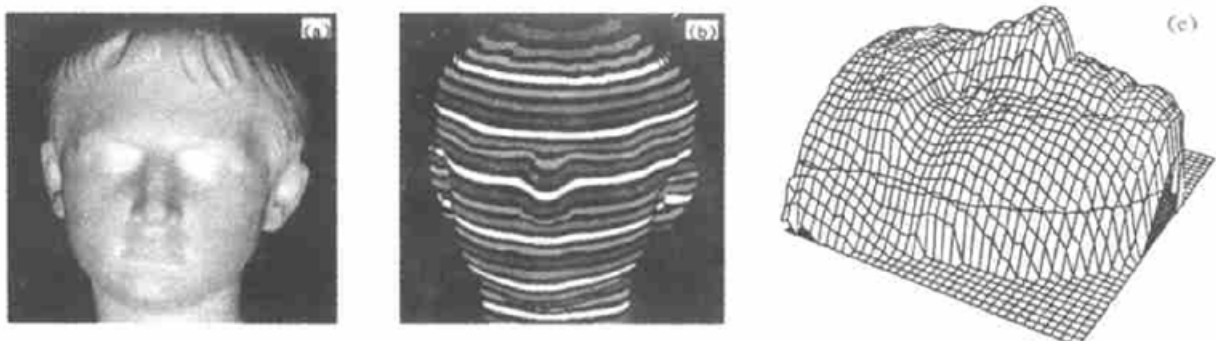


Fig. 5 (a) The front-view image of the statue, (b) The measured image after purified processing, (c) Surface plot showing the profile obtained by Fig. 5 (b)

色纯化处理后的图像,图 5(c) 是三维轮廓测量结果的网格图。由于人脸的形状比较复杂,无法用直接测量的方法与实验结果进行比较,但从网格图的主观观察来判断,测量的结果与原物基本是一致的。

## 4 讨 论

彩色组合编码条纹中的颜色没有灰度变化,只有 0 和 255 两种状态,因此具有较强的抗干扰能力。由于 CCD 摄像机的分辨率有限,使得图像中条纹的边界发生模糊。虽然通过适当地选择阈值可使边界变得锐利,但总要在边界处产生 $\pm 1$ 个像素的随机偏差,这就造成测量时的误差。比较光栅条纹的采样图与颜色纯化处理后的图像,可以看到彩色条纹变宽,黑色条纹变窄。我们认为这是由两个原因造成的,其一是光学镜头在成像时由于离焦等原因造成图像一定程度的模糊;其二,彩色 CCD 中,红、绿、蓝三种颜色的分辨率不一样<sup>[6]</sup>,其中绿色的分辨率比红色和蓝色的分辨率高一倍。所以经过颜色纯化处理后,红色和蓝色条纹在主观感觉上变宽得更多。从理论上分析,条纹变宽会带来测量上的误差,即使用条纹上沿和下沿得到的高度测量值应该是不一样的。但实际测量的结果两者之间并没有显著的差别,如表 2 所示。原因是参考面上的条纹也同样变宽了,使两者之间的偏差互相抵消。

彩色编码条纹光栅采用 4 个条纹为一组,最少要有 3 个条纹才能确定其所在位置,如果被测物体的空间宽度容纳不下 3 个条纹,则无法进行测量。这是本方法对被测物体限制条件之一。我们在实验中采用幻灯机作为投射光源,其亮度有限,同时彩色 CCD 获取的图像只有  $688 \times 516$  个像素点,因而条纹不能太细,否则条纹在采样图像中难以辨认。在对图像进行处理时,要求条纹的宽度至少要在 5 个像素以上。为此采用一定宽度的条纹投射到被测物体的表面,如图 5(b) 所示。提高图像的分辨率,就可以使用更细的光栅条纹。在有些应用场合,如在三维重建等问题中,并不需要对每一个像素点的高度进行测量。因此,在一定的应用领域中,本方法有其自身的优势。

**结 论** 采用红、绿、蓝三色条纹对条形光栅进行编码处理,可以在不改变单个条纹宽度的前提下,增加光栅的空间周期,从而在测量精度不变的条件下,保证有足够的高度测量范围。由于每个条纹只采用 0 和 255 两个状态,因此具有较强的抗干扰能力。整个测量过程只需一幅图像即可完成,所以特别适合对动态物体进行测量。测量精度主要取决于采样图像的分辨率。

## 参 考 文 献

- [1] Halioua M, Liu H C. Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry. *Opt. & Laser Engng.*, 1989, **11**(3) : 185~ 215
- [2] Fan Hua, Zhao Hong, Tan Yushan. Automated three-dimensional surface profilometry using dual-frequency optic fiber phase-shifting method. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(11) : 3167~ 3171
- [3] 张舜德, 方 强. 线性结构光编码的三维轮廓术. *光学学报*, 1997, **17**(11) : 1533~ 1537
- [4] Cheng Xiaoxue, Su Xianyu, Guo Lurong. Automated measurement method for 3-D diffuse objects. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(10) : 1274~ 1278
- [5] 田 丰, 赵 宏, 陈文艺等. 一种新的光栅投影轮廓术. *光学学报*, 1996, **16**(10) : 1506~ 1509
- [6] 王庆有, 孙学珠. CCD 应用技术. 天津: 天津大学出版社, 1993.

## Color Permutation Coded Grating Profilometry

Liu Weiyi    Wang Zhaoqi    Mu Guoguang    Fang Zhiliang

*(Institute of Modern Optics, Nankai University,*

*Opto-Electronic Information Science and Technology Lab, EMC, Tianjin 300071)*

(Received 8 February 1999; revised 29 July 1999)

**Abstract** A novel profilometry with color encoded projecting grating is proposed. The grating is composed of white, red, green, blue and black strips. The white strip is used as beginning strip and followed by red, green and blue strips. The black strip is placed between two color strips to increase the period of grating. Thus eight strips form a group. Changing the order of color strips, different coding groups can be got. According to the principle of permutation, there are six kinds of arrangement of color strips for R, G, B colors, and so 48 strips is in one period of the grating. By decoding processing, the shape of an object can be obtained from single image. The obtained measurement depth is even wider than the depth of field of the CCD camera. Because the strips have only two logical states, the proposed structure-light system possesses high ability of disturbance-resistance.

**Key words** color permutation code, strip grating, 3-D profilometry.

## 参 考 文 献

- [1] 黄德双, 马德颂. 关于前馈网络分类器的研究进展. 见: 靳藩, 范俊波主编. 神经网络理论与应用研究'96. 重庆: 西南交通大学出版社, 1996. 62~ 69
- [2] 胡飞, 靳藩. 模式分类学习样本的重构原则. 见: 靳藩, 范俊波主编. 神经网络理论与应用研究'96. 重庆: 西南交通大学出版社, 1996. 520~ 524
- [3] Baum E B, Haussler D. What size net gives valid generalization. *Neural Computation*, 1989, **1**(1) : 151~ 160
- [4] Schwartz D B, Samalam V B, Solla S A *et al.*. Exhaustive learning. *Neural Computation*, 1990, **2**(3) : 374~ 385
- [5] 张鸿宾. 训练多层网络的样本数问题. 自动化学报, 1993, **19**(1) : 71~ 77
- [6] 何振亚. 神经智能——认知科学的若干前沿问题研究. 南京: 东南大学出版社, 1996. 58~ 63
- [7] Kan T C. Ill-posed problem of the constant-constraint criterion in optical correlation pattern recognition. *J. Opt. Soc. Am (A)*, 1995, **12**(10) : 2114~ 2121

## Selecting of Learning Samples Based on Hamming Distance

Shen Jinyuan    Liu Yue    Zhang Wenwei    Chen Shu

Guo Pengyi    Song Zhuang    Zhang Yanxin

(Nankai University, Institute of Modern Optics, Optoelectronic Information Science and technology Lab,  
Education Ministry of China, Tianjin 300071)

(Received 15 January 1999; revised 12 May 1999)

**Abstract** Learning samples significantly affect the recognition ability of neuron network models. One of selecting rules of learning samples is proposed according to the principle of the pattern recognition model. A method of selecting learning samples based on Hamming distance used in the cascade neuron network model for rotation invariance recognition is analyzed. The results of the computer recognition show that the effective selection of the learning samples can not only reduce the training time but also improve the recognition ability of the model.

**Key words** neural network, pattern recognition, learning sample, the cascade neural network model.