

文章编号: 0253-2239(2001)06-0687-04

彩色数字编码投影光栅三维轮廓术的研究*

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: 研究了一种用彩色条纹对光栅进行数字编码的方法。其中投影光栅用白、红、绿、蓝和它们的补色黑、青、品、黄按照四位二进制原理对光栅进行编码。用白色和黑色条纹分别表示八位上的 1 和 0; 用红色和青色条纹分别表示四位上的 1 和 0; 用绿色和品色条纹分别表示二位上的 1 和 0; 用蓝色和黄色条纹分别表示个位上的 1 和 0。这样在一个周期中共有 64 个条纹。这样的空间周期能够胜任一般物体的测量。由于每个颜色的条纹只有一个逻辑状态, 所以这种方法具有较好的抗干扰能力。

关键词: 三维传感器; 数字编码; 彩色编码光栅

中图分类号: TB96 文献标识码: A

1 引 言

利用投影光栅进行三维轮廓测量是基于三角测量的原理^[1]。目前研究较多的是相位测量技术。产生光栅光场的方法既可以用传统的成像方法^[2], 也可以采用相干光干涉法^[3]。用 CCD 摄像机记录光栅随被测物体高度的变化产生的形变, 并用计算机图像处理系统进行分析, 从而获得被测物体表面的高度信息。

相移测量法一般采用光强为正弦分布的光场, 对被测物体进行三次采样, 每次采样正弦光栅的相位移动 120°。通过分析三个采样图像强度变化, 可解出采样点的高度值^[4]。借鉴计算机中的二进制原理, 本文对投影光栅进行数字化处理。采用白、红、绿、蓝和它们的补色黑、青、品、黄八种颜色, 按照四位二进制原理对光栅进行编码处理。在一个空间周期里可以有 64 个条纹。这样的空间周期能够适应一般物体的高度测量。

2 表面测量原理

2.1 测量原理

三维面形测量系统的原理如图 1 所示。P 点为光栅投影仪的位置, C 点为 CCD 摄像机的位置, PC 之间的距离为 W。x 轴取在基准面上, PC 的连线与 x 轴平行, z 轴与 x 轴垂直。光束 PA 投射在基准面上

的 A 点。放入物体后光束 PA 投射在物体表面上的 D 点。从 CCD 摄像机获得的图像中看到, 由于物体的高度变化使得光束从 A 点移到 B 点, 移动的距离为 S。D 点的垂直坐标为 h, x 轴到 PC 的垂直距离为 L。由于 PC 与 x 轴平行, 所以 $\triangle PCD$ 与 $\triangle ABD$ 相似。因此可以由投射光束相对参考面移动的距离 $AB = S$ 得到 D 点的高度 h 为

$$h = [(L - h) / W] S = kS, \quad (1)$$

其中, $k = (L - h) / W$ 是由测量系统的结构决定的, 称为测量系统结构常数。由于在实际测量系统中 $L \gg h$, k 值可以近似为 L / W 。从图像中得到的只是像空间中光栅条纹移动的像素数 p, 将其乘以成像系统的横向放大率 β , 才能得到物空间光栅条纹的移动距离 $S = \beta p$ 。(1) 式可以写成

$$h = (L / W) \beta p. \quad (2)$$

由(1)式可以看到, 如果采用空间周期为 T 的投影光栅进行高度测量, 则高度测量的范围为 kT 。投影光栅的周期越长, 高度测量的范围就越宽。

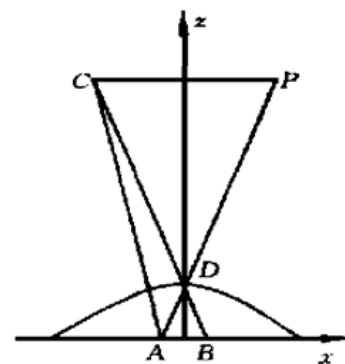


Fig. 1 Schematic diagram of projecting and imaging system

* 国家自然科学基金(69777003)资助项目。

收稿日期: 2000-02-29; 收到修改稿日期: 2000-04-10

2.2 数字编码方法

在电子技术领域中,对模拟信号进行数字化处理首先要经过模数转换。转换的精度取决于数字量的位数。例如 8 位二进制数值可以表示 0~255 个数值。要提高转换精度,就要提高数字量的位数。但对投影光栅进行数字化处理时,不能单纯靠提高编码的位数来增长光栅的周期。因为提高位数,就要由更多的条纹共同决定编码值。如被测物体在局部面积容纳不下更多的条纹,就不能对其进行测量。

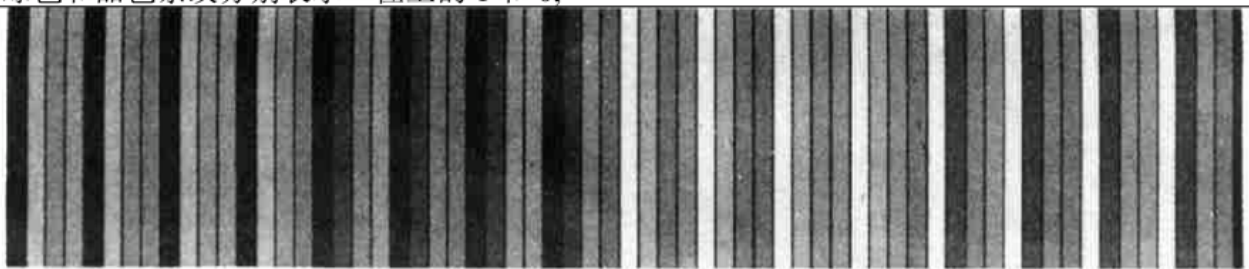
在彩色空间中,任意一种颜色可由红、绿、蓝三种颜色的光叠加而成,而红、绿、蓝三种颜色不能由其他颜色叠加而成。因此红、绿、蓝三种颜色是互相独立的,称为三基色。在 24 位彩色模式下,每一种颜色可以有 256 个灰阶。进行数字化处理时,每个颜色只取 0 和 255 两个值,分别表示 0 和 1 两个逻辑状态。这时用三种颜色进行组合,可得到白、红、绿、蓝四种颜色,以及它们的补色黑、青、品、黄。如果简单地将它们排列起来,则在一个周期中只能有八个条纹。为了得到更大的空间周期,我们根据四位二进制原理对光栅进行数字编码。用四个条纹分别代表二进制中的八位、四位、二位和个位。在不失一般性的条件下,用白色和黑色条纹分别表示八位上的 1 和 0;用红色和青色条纹分别表示四位上的 1 和 0;用绿色和品色条纹分别表示二位上的 1 和 0;

用蓝色和黄色条纹分别表示个位上的 1 和 0。这样共有 16 种不同的组合。由于每组有四个条纹,所以在一个周期中共有 64 个条纹。表 1 给出了每一组的十进制表示、二进制数值表示及其对应的彩色条纹编码表示。其中 W、R、G、B 分别表示白、红、绿、蓝;K、C、M、Y 分别表示黑、青、品、黄。

图 2 是数字编码光栅一个周期内的彩色条纹排列图。

Table 1. Binary values and their color-coding arrangement

decimal value	binary value	color-coding arrangement
0	0000	KCMY
1	0001	KCMB
2	0010	KCGY
3	0011	KCGB
4	0100	KRMY
5	0101	KRMB
6	0110	KRGY
7	0111	KRGB
8	1000	WCMY
9	1001	WCMB
10	1010	WCGY
11	1011	WCGB
12	1100	WRMY
13	1101	WRMB
14	1110	WRGY
15	1111	WRGB



KCMYKCMBKCGYKGBKRMYKRMBKRGYKRGBWCMYWCMBWCGYWGBWRMYWRMBWRGYWRGB

Fig. 2 The arrangement of the fringes from color-coded grating

2.3 解码方法

解码过程首先确定白色和黑色条纹的位置,然后获得随后三个条纹的颜色。根据这四个条纹的颜色可以立刻确定该组条纹所代表的数值。用参考平面上具有相同数值的一组条纹所在的位置与被测物体条纹所在位置相比较,即可得出条纹的平移量。用系统的结构常数乘以条纹的平移量即得出该点的高度值。

3 实验装置与结构

实验装置如图 3 所示。其中 P 点处的投影仪

用的是一台幻灯机, C 点处的 CCD 摄像机采用的是 SONY SSC-DC18P 型摄像机,并由图像采集卡将视频信号转换成数字图像送入计算机。图像采集卡的分辨率为 688 像素 \times 516 像素。彩色编码光栅用 135 彩色反转片以照相的方法制成。测量系统要求 P 点与 C 点的连线必须与参考平面平行,否则高度变化与条纹移动的关系不符合 (2) 式给出的线性关系。而实际使用的幻灯机和 CCD 摄像机都没有给出光学中心的确切位置。因此在实际测量前要对系统进行校正和定标,并获取参考面的测量图像。系统经过校正和标定以后,只需一幅光栅投影图就能得出被测物体的高度分布。

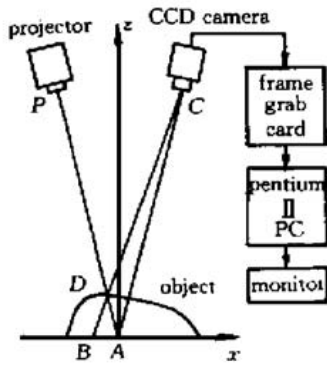


Fig. 3 Configuration of measuring system

为了对系统进行定量标定,我们采用顶角为直角的等腰三角形样块作为标准样块。它的好处是从样块的边缘开始横向移动的距离与高度相等。图 4 是三角标准样块的彩色数字编码光栅投影图。在进行标定前,先用游标卡尺对样块进行测量,得到三角样块的底边宽为 54.0 mm,高为 78.4 mm。经解码处理后得到测量系统的结构常数为 $k = 2.73$, $\beta = 0.48 \text{ mm/pixel}$ 。每一个像素平移所对应的高度值为 1.3 mm。系统的测量误差为 ± 1 个像素,它所对应的高度测量误差为 $\pm 1.3 \text{ mm}$ 。

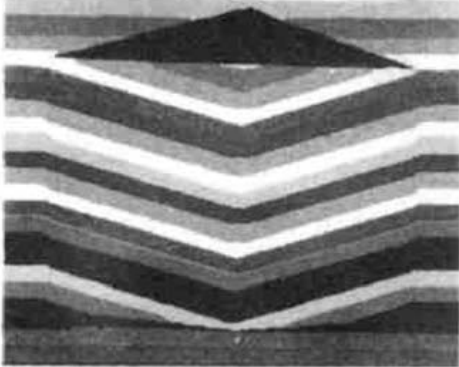


Fig. 4 The color-coded grating pattern of the triangle specimen

实验用的被测物体是一个与真人大小相似的头像模型,如图 5 所示。头像模型的脸部长约 220 mm,宽约 170 mm,纵向高度约为 200 mm。编码条纹在参考面上的条纹宽度为 5 mm 左右。在一个周期中四位二进制编码共有 64 个条纹组成,这样在参考面上,其空间周期长度为 320 mm。实验所用的幻灯机的投影镜头中心与 CCD 摄像机镜头中心的距离为 420 mm,它们到参考平面的距离为 1150 mm。按照(1)式给出的投影光栅条纹移动的距离与高度测量的关系,可以得到光栅条纹移动一个周期所对应的高度测量范围为 876 mm。这样的高度测量范围能够适于那些长、宽、高基本相等的立方体型的三维物体的测量。

图 6 是头像模型三维测量的彩色数字编码光栅

的采样图。其中彩色条纹有一定程度的模糊,同时存在着灰度的变化。为了方便解码过程同时保证解码的准确性,我们首先对图像中的彩色条纹进行了色彩纯化处理。



Fig. 5 The image of face model used for 3-D measurement

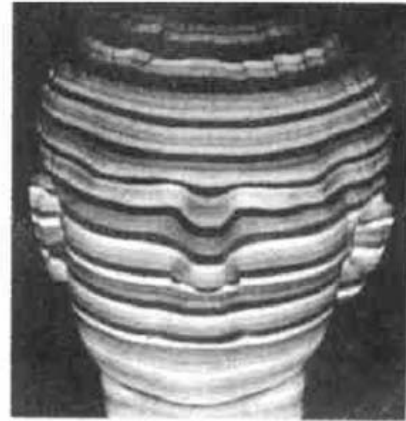


Fig. 6 The digital color-coded grating pattern deformed by the object surface

图 7 是经过色彩纯化处理后的彩色数字编码光栅投影图。其中消除了色模糊和灰度变化。经解码处理后得出每一个条纹相对参考面的平移量,再乘以测量系统的结构常数,就得到人脸模型的高度分布。



Fig. 7 The object image after color purifying

图 8 是测量结果的三维重建网格图。从测量结果来看,基本上能够反映出面部的三维结构特征。



Fig. 8 The 3-D reconstruction of the model

4 讨 论

相移测量法可以看成用连续变化的强度值对周期光栅进行编码。为了消除背景光和表面纹理带来的影响,需要对多幅图像进行处理。由于连续变化的强度值是模拟量,因而容易受到噪声和表面纹理的干扰。彩色编码光栅采用不同的颜色对周期光栅进行编码。每一个彩色条纹只有单一逻辑状态,是数字量。经过颜色纯化处理,可以完全消除灰度变化和模糊,因此具有较好的抗干扰能力。测量精度不受噪声和表面纹理的影响。

采用四位二进制的原理对光栅进行数字编码,可以用较少的颜色获得较大的空间周期。对于一般的测量系统而言,由 64 个条纹组成的编码光栅得到的高度测量范围可以满足三维测量的要求。同时,由于每一组编码条纹都有确切的数值,因此可以采用一个数组来直接表示光栅条纹所在的空间位置。在用计算机软件解码时不需要查表或跳转等语

句,可以直接与参考面条纹光栅的数组相减,其好处是解码速度快,在实际测量时有着明显的优势。

四位二进制编码方案在实际测量中也存在着一定的局限性。在解码时必须同时知道四个彩色条纹的颜色才能确定该组条纹的编码值。如果在被测物体表面存在较多的断点,或在局部范围内容纳不下四个条纹时,就会失去高度测量的能力,造成测量盲区。由于在测量图像中,每一个彩色条纹存在一定的宽度,所以得到的三维测量结果在与条纹垂直的方向上是不连续的。当需要对物体表面轮廓的每一点都进行测量时,如对模具进行测量,这种方法就不能满足要求。此外,用分立的八种颜色对光栅进行编码处理虽然提高了测量系统的抗干扰能力,但不能完全消除环境噪声的影响。如果被测物体表面存在反差较大的纹理图案,或者存在一定程度的偏差,就会对测量产生较大的影响。

参 考 文 献

- [1] Häusler G, Ritter D. Parallel three dimensional sensing by color coded triangulation. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(35): 7164~ 7169
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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

Three Dimensional Surface Profilometry Using Color-Coded Projection Grating

Liu Weiyi Wang Zhaoqi Mu Guoguang Fang Zhiliang

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Opto-Electronic Information Science and Technology Laboratory, Ministry of Education, Tianjin 300071)

(Received 29 February 2000; revised 10 April 2000)

Abstract: A method of digital coding of grating by using color strips is presented. White, red, green, blue and their complementary colors, black, cyan, magenta and yellow are used to code the grating based on the binary system. The white and the black stripes are used to represent 1 and 0 on the fourth bit, red and cyan to represent 1 and 0 on the third bit, the green and magenta to represent 1 and 0 on the second bit and the blue and yellow to represent 1 and 0 on the first bit of the binary system, respectively. There are 64 stripes in one period. The space period of the projection grating is large enough for measuring the surface profiles of normal objects. Since each strip has only one logical state, the system possesses good disturbance-resistance.

Key words: three-dimension sensor; digital coding; color-coded grating