

用构造光系统实现 3-D 形貌测量的研究

董 斌 尤 政 刘兴占 李颖鹏
(清华大学精仪系 北京 100084)

摘 要 介绍了一个用构造空间二进制编码进行非接触 3-D 形貌测量的系统。它以一台 LCD 投影仪为硬件基础,用 8 幅条纹投影图案对被测物体表面进行空间编码。用 CCD 摄像机获取物体编码信息,用基于单一像素的三角法原理从摄像机图像中获取三维形貌数据。指出了二进制编码图案生成软件及其生成的条纹图案的特点。为了提高 3-D 形貌测量的精度,分析了由摄像机和投影仪镜头造成的误差,建立了它们的透镜误差矫正公式,并取得了良好的实验结果。

关键词 3-D 形貌测量 三角法 构造光系统 空间二进制编码

1 引 言

用构造光系统获取物体的三维形貌是当前较流行的非接触 3-D 形貌测量方法。目前研究较多的一类方法是用光栅构造出光强按正弦分布的 2-D 图案并将它投影到被测物体上,然后记录这个图案被物体调制后的图像,最后用数学译码的方法解调出图像中含有的高度信息。这类方法包括傅立叶变换解调法^[1]、相移法^[2]、正/余弦解调法^[3]和相位还原法^[4]等等。然而,它们存在着一个共同的问题——含有不连续点的图像引起误差;同时为其测量精度付出的代价是:它在外部光照造成的背景光强分布不确定的情况下很脆弱^[5]。

LCD(Liquid Crystal Display)投影仪的使用极大地丰富了构造光系统的设计方法,一些以三角法为基础对被测空间进行图案编码的方法得到较快的发展,如二维条纹编码^[6]、多灰度值编码^[7]和 RGB(红绿兰)编码^[8]。本文以一台 LCD 投影仪为硬件基础,用软件设计了一套能对被测物体表面进行空间编码的构造光系统。如图 1 所示,计算机生成多幅条纹投影图案,由 LCD 投影仪把图案按一定时间间隔依次投射到物体表面上。投影图案由亮条纹和暗条纹组成,亮条纹表示二进制数“1”,暗条纹表示二进制数“0”。CCD 摄像机依次记录下每一幅投影图案在物面空间形成的图像,每一幅图像对应一幅图案。再由计算机处理这些图像,滤波和

二值化后,每一幅图像都转换成一个由 0 和 1 组成的矩阵。将这些矩阵中对应的元素放在一起,每一个像素就获得一个二进制编码,编码的位数等于投影图案的个数,编码的顺序为:第一位对应图像一,第二位对应图像二,依次类推。在我们的实验系统中,计算机生成了 8 幅条纹图案,它们将被测空间划分成 253 个狭长区域,每个区域用一个 8 位的二进制码字表示出来。

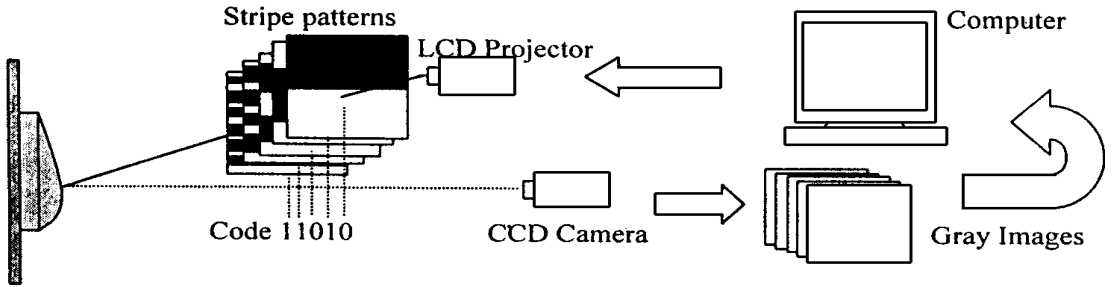


Fig. 1 Principle of spatial code using a structured light system

按照三角法原理,只要知道一个物点对应的摄像机水平视角、垂直视角和投影仪的投影角,就可以求出该点的三维位置^[9]。摄像机视角由物点在摄像机图像中对应的像素位置给出,投影角由该像素上获得的编码给出。这样,一个物点的三维坐标只取决于它对应的像素的信息,而不依赖其它像素的信息。因而,我们的空间编码 3D 形貌测量系统可以实现基于单一像素的三角法,这个方法可以成功地解决被测物体表面非常不连续和外部光照造成的背景光强分布不确定的问题。

2 二进制编码图案生成软件设计及其特点

为了满足基于单一像素三角法的 3-D 形貌测量,计算机生成的二进制编码必须满足以下条件:

1. 编码必须是相互独立的。这就是说每一个编码区域对应码字必须是独一无二的,即在被测空间内没有相同的编码。这个条件使基于单一像素的译码成为可能。

2. 编码相邻码字间的 Hamming 距离均是 1。相邻两个码字之间的不同位的数目称为 Hamming 距离。在译码过程中,如果相邻码字之间只有一个位数发生变化,那么这个像素只会被编码成这两个码字中的一个,这时译码误差最小。如果两个相邻码字之间的 Hamming 距离大于 1,那么在这两个码字交界的地方会产生较大的编码误差。

3. 编码必须是能够自我规范化的。由于像素上取得的光强灰度值受投影物面的反射率影响,可能的情况是暗条纹在白色物面上产生的灰度值比亮条纹在黑色物面上产生的灰度值大。这样就不能用一个二值化的阈值去满足所有的被测区域,单一阈值只适用于物面反射率一致且无外部光照的构造情况。因此,我们要求每一个物点上至少有一个亮条纹和一个暗条纹落在上面,它对应的像素上的光强灰度值序列中就会含有一个较大和较小的灰度值。这样就可以按单一像素二值化以取得二进制编码,其阈值为该像素上较大和较小的灰度值的平均值。我们称这样的编码为能够自我规范化的,它能够适用于物面反射率不一致且有外部光照的非构造情况。

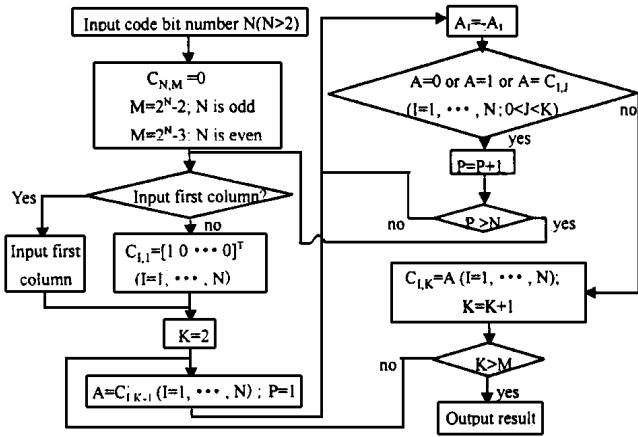


Fig. 2 Software flow chart

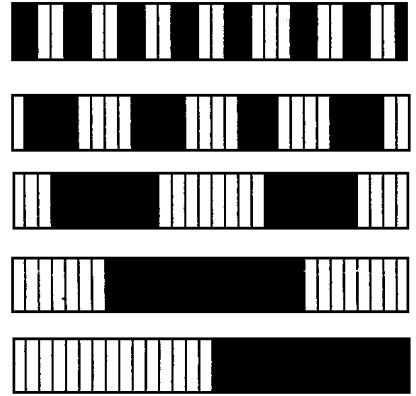


Fig. 3 A group 5 bit binary coding patterns

按照上述要求, 我们编写了一个软件, 它可以生成任意字长的二进制编码图案。其软件的流程图如图 2 所示。图 3 是用这个软件生成一组 5 位的二进制编码图案, 可以看出它满足编码相互独立、相邻码字间的 Hamming 距离均是 1 和能够自我规范化的三个条件。理论上讲, 编码码字的位数越大, 测量分辨率越高。空间分辨率 S 与编码位长 N 满足关系式:

$$S = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_0}{N \cdot \sin(\alpha)} \quad (1)$$

式中 h_0 是测量空间的亮度, α 是摄像机与投影仪之间的夹角。但在实际系统中, 编码码字的位数不能取得太大, 它受到采样定理和硬件设备的限制。采样定理在这里可以描述为摄像机的采样频率是投影仪对物体表面的区域划分频率的两倍以上。具体的讲, 编码要满足划分的最小区域的宽度和一个像素视野宽度之比大于 2。我们硬件设备是: EPSON7100 型 LCD 投影仪, 1024×768 像素; 敏通 TMC-56 型 CCD 摄像机, 640×480 像素(W/B 输出)。在实验中, 我们采用的是一组 8 位的二进制编码图案, 它由 8 幅图案组成, 把被测空间划分成 $2^8 - 3 = 253$ 个区域。

3 透镜误差矫正

为了实现高精度 3-D 形貌测量, 必须考虑由摄像机镜头和投影仪镜头造成的误差, 镜头误差主要由透镜的场曲造成。由于透镜的场曲, 投影仪将平面条纹投影成略微的曲面条纹; 与之类似, 物点在 CCD 摄像机上的像点与名义位置有略微的偏离。用标准模具可以标定出透镜模型参数, 建立摄像机镜头的误差矫正公式。设 $(u' \ v')^T$ 是物点 P 对应的实际像点位置(单位是 pixel), 那么名义位置 $(u \ v)^T$ 可表示为:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u' \\ v' \end{pmatrix} [1 + K_c(u'^2 + v'^2)] \quad (2)$$

K_c 是摄像机镜头场曲系数。物点 P 的坐标 (x_p, y_p) , 可表示为:

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_c^x & K_c \\ 0 & S_c^y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0^c \\ y_0^c \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, S_c^x 、 S_c^y 是摄像机镜头的标度因子(单位: mm/pixel), (x_0^c, y_0^c) 是摄像机原点的坐标, K_c 是摄像机坐标轴相关系数(单位: mm/pixel)。与摄像机透镜模型类似, LCD 投影仪镜头的误差修正公式可表示为:

$$u = u' [1 + K_p (u'^2 + v'^2)] \quad (4)$$

K_p 是投影仪镜头场曲系数。条纹 S 的位移 x_s 可表示为:

$$x_s = S_p^x u + x_0^p \quad (5)$$

其中, S_p^x 是投影仪镜头 x 方向的标度因子(单位: mm/pixel), x_0^p 是摄像机原点的 x 方向坐标。

4 实验结果和结论

具体的实验步骤是:

1. 投影仪将软件生成的 8 幅投影图案依次投射到被测物体表面, 每幅图案保持 3s; 同时, 摄像机依次记录下 8 幅灰度图像, 如图 4 中(a1)(a8)所示。

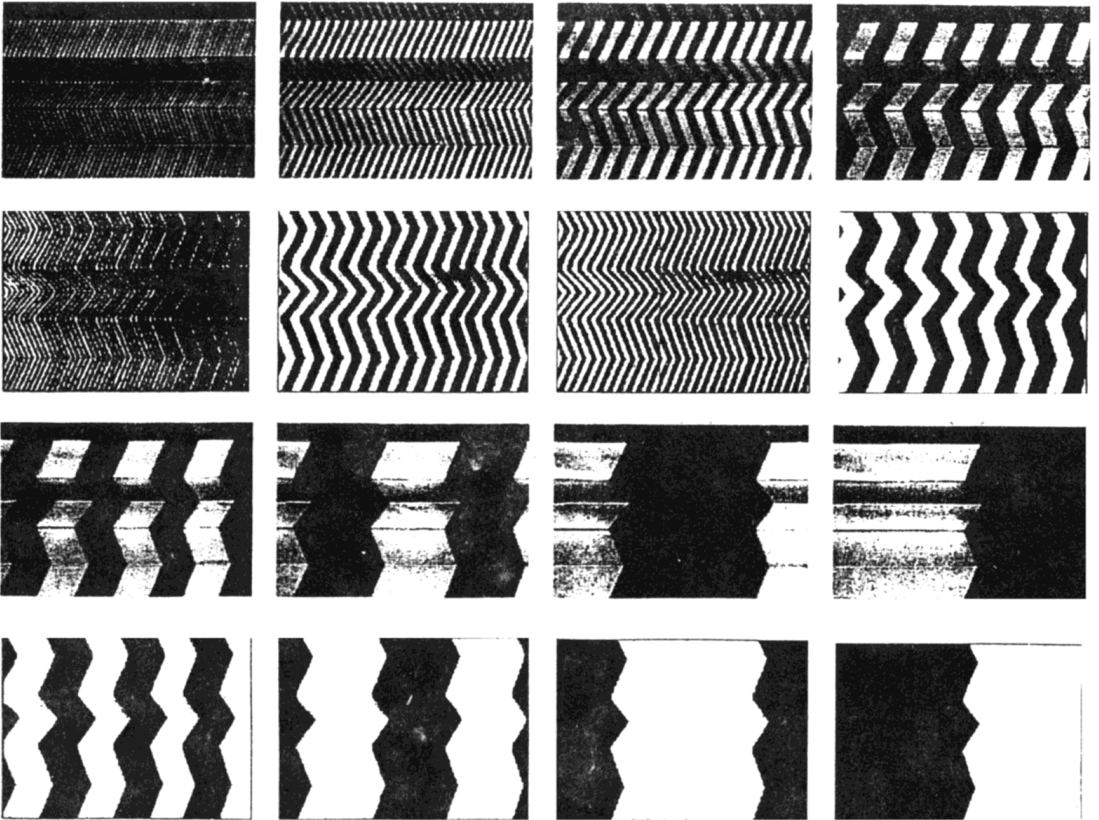


Fig. 4 White/black intensity images and the binarized images

2. 读取 8 幅灰度图像, 用二维小波变换滤波处理, 滤掉图像中的噪声干扰信号。
3. 把 8 幅图像基于像素二值化, 二值化后的图形如图 4 中(b1)(b8)所示。
4. 将每个像素对应的 8 位二进制码转换成十进制数, 按编码顺序求出投影角。

5. 按图 3 中的透镜误差校正公式校正镜头场曲误差。

6. 用基于像素的三角法求出物体的表面形貌。实验结果如图 6 所示。

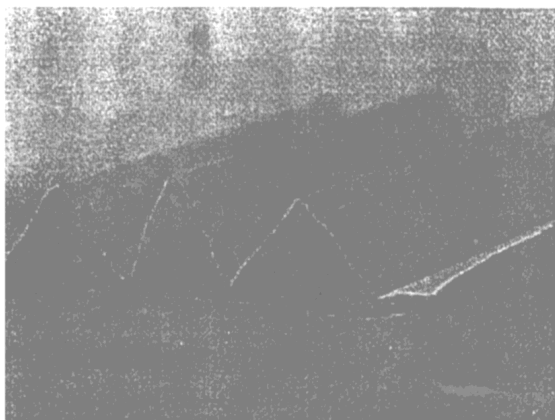


Fig. 5 Model of measured object

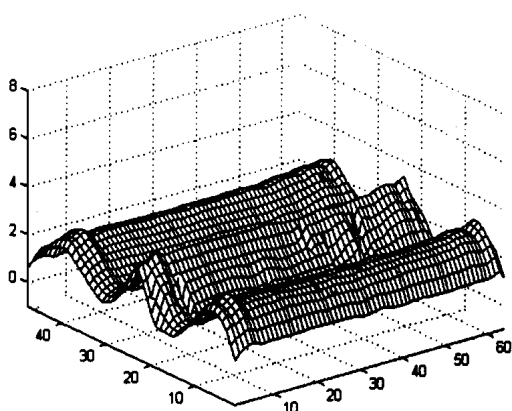


Fig. 6 Result of 3 D reconstruction

在本系统中, 摄像机与投影仪之间的夹角 α 是 1.2rad, 实际测量物体的空间高度是 28.5mm, 空间分辨率为:

$$S = \frac{1}{2} \cdot \frac{28.5}{253 \cdot \sin(1.2)} = 0.061\text{mm} \quad (6)$$

通过标定被测物体, 实际测量的精度在 0.4mm0.6mm 之间。实验装置参数不能精确标定是引起测量误差的另一个主要原因, 实验装置参数标定误差是由于无法准确标定投影仪和摄像机镜头中心而造成的。这个测量精度低于数学译码法的精度, 可以说是为系统的鲁棒性付出的代价。突破硬件的瓶颈是提高精度的根本途径, 通过选用高光学分辨率的 LCD 投影仪和 CCD 摄像机可以根本上提高系统的空间分辨率和测量精度。另一个提高精度的方法是采用数学译码法与基于三角法的空间编码法相结合的方法, 这类方法还有待于研究。

参 考 文 献

- 1 Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Applied Optics*, 1983, 22: 39773981
- 2 Hobson C Allan, Atkinson John T, Lilley Francis. The application of digital filtering to phase recovery when surface contouring using fringe projection techniques. *Optics and Lasers in Engineering*, 1997, 27: 355368
- 3 Tang Shouhong, Huang Yan Y. Fast profilometer for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Applied Optics*, 1990, 29: 30123018
- 4 Wan Der-Shen, Lin Ding-Tin. Ronchi test and a new phase reduction algorithm. *Applied Optics*, 1990, 29: 32553265
- 5 Goodall Anthony J E, Burton David R, Lalor Michael J. The future of 3-D range image measurement using binary encoded pattern projection. *Optics and Lasers in Engineering*, 1994, 21: 991 10
- 6 Yura Whoi Yul, Kim. Range data analysis using cross stripe structured light system. *Proc SPIE, Optics, illumination, and Image Sensing for Machine Vision*, 1385, 216228
- 7 Minoru Ito, Akira Ishii. A three level checkerboard pattern (TCP) projection method for curved surface measurement. *Pattern Recognition*, 1995, 28(1): 2740

- 8 Haeluser Gerd, Ritter Dieter. Parallel three dimensional sensing by color coded triangulation. *Applied Optics*, 1993, 32: 71647169
- 9 Dong Bin, You Zheng, Liu Xingzhan, Yang Ren. A triangulation base spatial binary coded system for 3-D range measurement. *International Conference on Advanced Manufacturing Technology: Xian*, 1999

Study on Accurate 3-D Range Image Measurement Using a Structured Light System

DONG Bin, YOU Zheng, LIU Xing-Zhan, LI Ying-Peng

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

This paper introduces a non-contact 3-D range image measurement system using a structured light system. By means of a LCD projector, eight stripe patterns encoded the measured space into 253 sections. A CCD camera sequentially recorded eight gray images corresponding to the eight patterns, respectively. The range data of the object surface is demodulated using the pixel-based triangulation. This paper also introduces a software to produce highly efficient binary spatial coding patterns. The error caused by projector lens distortion and camera lens distortion are analyzed, and the error formulae to rectify the error of radial lens distortion is set up in order to obtain a good measured resolution. As a pixel-based evaluation method, range data being got from only a single pixel, it can be used in measuring sharply discontinuous surfaces, and works smoothly in a less structured environment.

Key words: 3-D range image measurement, Triangulation, Structured light system, Spatial binary code

董 斌 男, 1972 年 11 月出生, 1994 年本科毕业于哈尔滨工业大学, 1996 年硕士毕业于哈尔滨工业大学, 现在清华大学就读博士研究生。主要研究领域包括光学仪器设计和数字图像处理。先后在《光学技术》、*Optical Engineering* 等刊物上发表论文。