

# 相移法光栅投影3维物体表面重建中 一种消除交叠的算法

刘飞 滕奇志 余艳梅 罗代升

(四川大学电子信息学院图像信息研究所, 成都 610064)

**摘要** 光栅投影成像是3维物体重建和测量的重要技术。它将广泛应用于科学研究、生产、文化艺术、医学等各个领域。目前,这项技术的自动化程度较低,速度较慢。因此,对其研究具有重要的理论意义和实用价值。首先介绍了光栅投影成像和3维物体重建的基本原理,然后提出了利用光栅投影条纹编码、解码、相移技术和莫尔法相位解缠确定3维物体深度信息的方法。光栅投影条纹采用逐步二分的二进制7位码编码,相移采用间隔 $\frac{\pi}{4}$  8步相移的正弦相移技术。此外,还提出了一种算法以消除因光栅条纹图像发生交叠而造成条纹解码产生的错码。这种算法利用各幅条纹编码图像中条纹位置的相关性,通过对条纹边界线灰度值的迭代,实现交叠条纹的区分。该算法加快了条纹解码和相位解缠速度,减少了存储量,提高了自动化程度和测量精度。

**关键词** 光栅投影成像 3维物体重建 3维物体测量 正弦相移技术 相位解缠

**中图分类号**: TP391.72 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)06-0725-06

## An Algorithm for Discriminating Overlapped Stripes in 3D Object Reconstruction Using Phase-Shifting Raster Projection

LIU Fei, TENG Qi-zhi, YU Yan-mei, LUO Dai-sheng

(Image Information Institute, School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064)

**Abstract** Raster projection imaging is an important technology for 3D object reconstruction and measurement. It will be applied widely in the fields of research, manufacturing, culture and art, medicine, etc. So far, the technology is still in low automation and low speed. Hence, its development is significant theoretically and practically. In this paper, the principles of raster projection imaging and 3D object reconstruction are introduced firstly. Then a method is proposed for determining the depth of 3D object surface using raster stripe encoding, decoding, phase shifting, and Moire phase unwrapping. The raster stripes are encoded in 7 digit binary codes obtained by bisection and the phase shifting is performed by a sine function of 8 step shifting in  $\pi/4$  interval. In this paper, an algorithm is also proposed to avoid stripe decoding errors caused by the overlapping of raster projection stripes. The algorithm uses the position correlation of the stripes in raster projection sequential images and the intensity accumulation of the stripes to discriminate the overlapped stripes. The algorithm can speed up the stripe decoding and phase unwrapping, reduce required memory size, promote automation, and increase measurement precision.

**Keywords** raster projection imaging, 3D object reconstruction, 3D object measurement, sine phase shifting, phase unwrapping

## 1 引言

近年来,随着数字图像处理的发展和光学电子

仪器精度的提高,光栅投影成像得到了很快的发展。光栅投影成像是3维物体重建和测量的一种重要技术。光栅投影3维物体重建,可用于产品设计、仿制、修改,各类模型、模具制造的设计、快速成型系

收稿日期:2004-03-26; 改回日期:2004-12-20

第一作者简介:刘飞(1978~),男。现为四川大学电子信息学院在读硕士研究生。从事图像处理、模式识别、图像通信等方面的研究。

E-mail: liufeinwpu@163.com

统、工业测量、工艺、艺术品复制、文物的复制、电子存储和展示,网络虚拟现实系统,网上 3 维产品展示,保安刑侦,医学仿真等科学研究,以及工业、生产、文化艺术、医学等各个领域。但是光栅投影 3 维物体重建目前存在的主要问题是自动化程度不够高,速度不够快。因此,光栅投影 3 维物体重建的研究具有重要的理论意义和实用价值。

利用光栅投影重建 3 维物体就是将光栅图样投影于被测物体表面,摄取下物体表面上变形的光栅图样,然后由变形的光栅图样与原图样相位信息的关系,确定深度信息,从而由深度信息重建出 3 维物体的表面。光栅投影表面重建主要有直接三角法和相位测量法。直接三角法是由于光栅投影场中物体的加入使光敏面上像点的位置发生变化,由这种变化可以直接求得深度信息<sup>[1]</sup>。但该方法的测量精度不高。相位测量法又可以分为时域相位测量与空域相位测量<sup>[2]</sup>。傅里叶变换法和相移法是目前所普遍采取的两种方法。傅里叶变换法是通过对有光栅投影的物体表面图像进行傅里叶变换,截取其基频分量,然后经傅里叶反变换得到相位信息,再经过几何变换,得到物体的深度信息<sup>[3]</sup>。傅里叶变换法只需要一幅光栅投影图像,适宜于 3 维物体表面的实时测量<sup>[3]</sup>。但该方法经过了一次傅里叶变换和一次傅里叶反变换,计算量大,且边缘精度不高。相移法是按一定规律变化的不同相位的光栅对物体进行投影,然后由于干涉场中同一点在不同相位光栅中的光强值求解出该点的相位。相移法计算速度快,测量精度较高,对物体表面的反射率变化不敏感,因此得到了更为广泛的应用。但是,当物体表面的起伏较大时,可能使投影在物体表面的光栅交叠在一起,造成相位信息的紊乱,从而影响表面的重建质量。为了消除这种交叠,提出了一种新的算法,能充分利用编码逐步二分的特性改变条纹边界线的灰度值,以边界线的灰度值作为区分条纹的标识。

## 2 光栅投影成像的基本原理

光栅投影成像的基本原理如图 1 所示。被测物体放在参考平面上。由光栅投影装置产生的光栅条纹投影到被测物体上,在被测物体表面形成变形的条纹图像。CCD 摄像机拍摄条纹图像,送入计算机进行图像处理。计算机根据被测物体表面到参考平面的深度  $h$  重建 3 维物体,测量 3 维物体的参数。

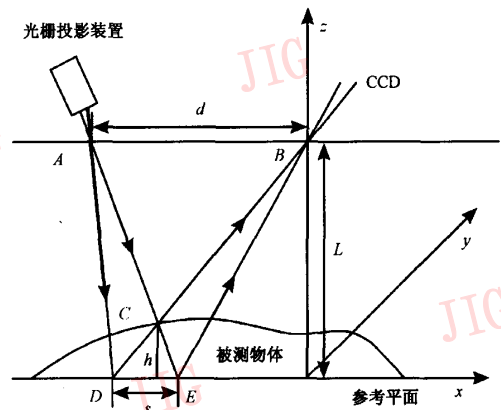


图 1 光栅投影成像的基本原理图

Fig. 1 Raster projection imaging system

被测物体表面到参考平面的深度  $h$  由图 1 可以算出。当光栅投影场内没有被测物体时,某条光线  $AE$  直接照射到参考平面上  $E$  的位置,经参考平面反射的光线  $EB$  被 CCD 摄像机所摄取。当在光栅投影场中放入被测物体时,光线  $AE$  照射在物体表面上  $C$  的位置,经物体表面反射的光线  $CB$  被 CCD 摄像机所摄取。然而,反射光  $CB$  又恰好是光栅投影场内没有被测物体时光线  $AD$  照射在参考平面上  $D$  的位置时的反射光线  $DCB$ 。因此,由图 1 可以看出,同一条光线在放入被测物体后所形成的像点比没有放入被测物体时所形成的像点移动了距离  $s$ 。

如果光栅投影装置和 CCD 摄像机处于同一水平高度  $L$ ,且其连线  $AB$  与参考平面的  $x$  轴平行,即  $AB \parallel x$ ,则有  $\triangle ABC$  与  $\triangle DEC$  相似。由三角形相似性原理可得:

$$\frac{d}{s} = \frac{L-h}{h} \quad (1)$$

$$h = \frac{sL}{d+s} \quad (2)$$

式中,  $d$  和  $L$  都可以测出。如果求出  $s$ , 就可以得到深度信息  $h$ 。

图 1 是 3 维截面图,图中  $C, D, E$  等点代表垂直于截面的条纹。由图 1 可以看出,  $s$  是光线  $AE$  在参考平面上产生的条纹图像  $E$  和与  $AE$  在被测物体表面上产生的条纹图像  $C$  相对应的光线  $AD$  在参考平面上产生的条纹图像  $D$  之间的距离。因此,只要识别出哪一条是条纹  $D$ , 哪一条是条纹  $C$ , 哪一条是条纹  $E$ , 就可以算出条纹  $E$  和条纹  $D$  之间的距离。识别条纹的方法,是先对光栅投影装置的光栅条纹进行编码,然后对拍摄的光栅条纹图像进行条纹检测

和条纹解码。

由图 1 还可以看出,光栅条纹越细,投射到被测物体表面上的光栅条纹就越密,分辨率就越高,测量物体的精度就越高。但是,光栅条纹越密,光栅条纹检测和解码就越困难。因此,编码条纹一般不能做得太细。为了提高分辨率,一方面采用相移技术,细分每条编码条纹。另一方面研究优越的条纹检测和解码算法,提高条纹检测精度。

### 3 光栅条纹编码和解码

采用二进制编码方法对光栅投影装置的光栅投影条纹进行编码,如图 2 所示。光栅投影条纹由黑白条纹相间构成。黑代表 0,白代表 1。黑白条纹由粗到细逐步二分。本步黑或白条纹的中心对准上一步黑与白条纹的边界。

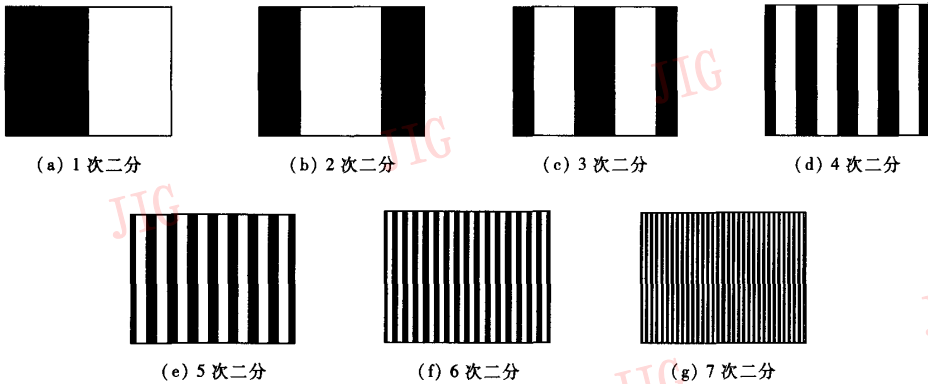


图 2 逐步二分的 7 幅条纹编码图像

Fig. 2 Seven  $2^m$  dividing code images

图 2 给出的是逐步二分的编码条纹光栅投影图像。由图 2 可以看出,图 2(a)由 1 对黑白条纹组成,图 2(b)由 2 对组成,图 2(c)由 4 对组成,图 2(g)由 64 对组成。由这 7 幅编码条纹图像分别投影到 3 维物体表面,再将这 7 幅条纹图像组合,得到一幅有 127 条条纹的条纹图像。每条条纹由 1 个二进制 7 位码组成。每个码的第 1 位码字是第 1 幅条纹图的相应码,第 2 位是第 2 幅的相应码,依次类推,第 7 位是第 7 幅的相应码。

设编码条纹光栅投影图像图 2(a)在点  $(x, y)$  的码(即像素值)为  $P_a(x, y)$ ,图 2(b)在点  $(x, y)$  的码为  $P_b(x, y)$ ,依次类推,图 2(g)在点  $(x, y)$  的码为  $P_g(x, y)$ ,那么,合成的条纹图像在点  $(x, y)$  的码(即像素值) $P(x, y)$  为

$$P(x, y) = [P_a(x, y)P_b(x, y)P_c(x, y)P_d(x, y) \times P_e(x, y)P_f(x, y)P_g(x, y)]_2 \quad (3)$$

其中,  $P_a(x, y), P_b(x, y), P_c(x, y), P_d(x, y), P_e(x, y), P_f(x, y), P_g(x, y)$  的值为 0 或 1。 $[\cdot]_2$  表示 7 位二进制码。

例如,合成条纹图像的左边 4 条条纹码依次是 0000000, 0000001, 0000011, 0000010。右边 4 条条纹码依次是 1000010, 1000011, 1000001, 1000000。

在光栅投影场中放入被测物体,拍摄 7 幅光栅投影图像。采用图像预处理和图像分割技术进行条纹检测,得到 7 幅二值条纹图像。由这 7 幅二值图像组合,按照已经编好的条纹码进行解码。

这里只进行了 7 次二分编码。如果为了提高分辨率,采用 8 次二分编码,则第 8 幅图的条纹很密,条纹检测比较困难。因此,每条条纹用相移技术进行细分,再用莫尔法进行相位解缠。

### 4 莫尔法相位解缠

为了细分编码条纹,以提高分辨率和测量精度,采用正弦相移技术,用 8 幅正弦相移光栅条纹投影到待测物体表面。正弦相移光栅条纹,如图 3 所示。

$$I_k(x, y) = c \sin(\varphi(x, y) + \Phi_k + T) \quad (4)$$

$$\Phi_k = k\pi/4 \quad (5)$$

$$\varphi(x, y) = 2\pi(x - nT)/T \quad (6)$$

其中,  $I_k(x, y)$  表示第  $k$  幅相移图中  $(x, y)$  点的光强值,  $\Phi_k$  表示第  $k$  幅相移图的相移量,幅度  $c$  是常数,  $T$  是周期,它等于合成编码条纹的宽度,  $\varphi(x, y)$  为相位,  $k$  为相移图像序号,  $k = 1, 2, \dots, 8, n$  为合成编码条纹的码,以升序排列。

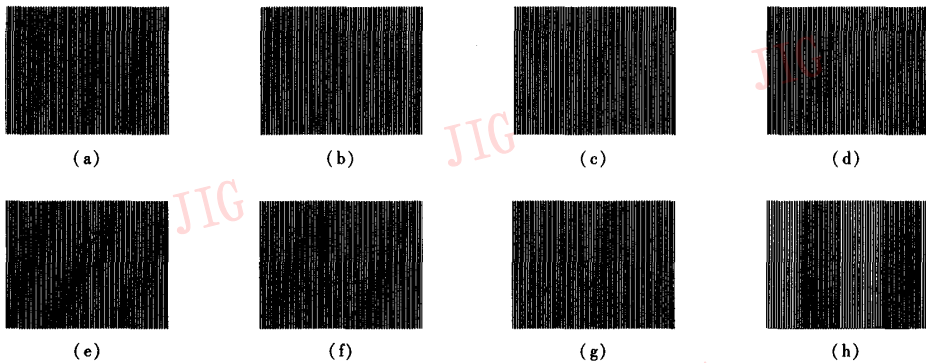


图 3 用于投影到物体表面的 8 幅正弦相移光栅条纹

Fig. 3 Eight images of sine phase-shifting raster stripes projected onto object surface

由 8 幅正弦相移光栅条纹投影到物体表面得到 8 幅光栅相移投影图像,采用莫尔法对投影图像进行相位解缠,获得被测物体的深度信息。莫尔法相位解缠的基本公式<sup>[4]</sup>为

$$I(x, y) = I_{\text{black}}(x, y) + T(x, y) \cos \varphi(x, y) \quad (7)$$

式中,  $I(x, y)$  表示拍摄图像在点  $(x, y)$  的光强,  $I_{\text{black}}(x, y)$  为背景光强,  $T(x, y)$  为正弦相移条纹的幅度,  $\varphi(x, y)$  是相移, 它与深度信息有关, 其变化反应光栅投影条纹的形变。因此, 只要解缠相位  $\varphi(x, y)$ , 就可以重建出物体表面。由于  $I(x, y)$  是已知的拍摄图像, 故式(4)只有 3 个未知参数:  $I_{\text{black}}$ ,  $T(x, y)$ ,  $\varphi(x, y)$ 。因此, 至少需要 3 个方程才能求解出  $\varphi(x, y)$ 。相移法就是通过  $N(N \geq 3)$  幅依次相移投影的图像, 得到  $N$  个莫尔方程式(4), 由这  $N$  个方程式(4)求解得到相位  $\varphi(x, y)$ 。一般说来, 只要相移 3 次, 就可以解出完整的相位信息。假设采用  $N(N \geq 3)$  步相移法, 则  $N$  幅条纹图所对应的  $N$  个方程可以表示为

$$I_k(x, y) = I_{\text{black}}(x, y) + T(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \Phi_k] \quad (8)$$

$$k = 1, 2, \dots, N$$

由于采用的相移法是周期性的, 所以  $\Phi_k = 2\pi(k - 1)/N, k = 1, 2, \dots, N$ <sup>[4]</sup>。由  $N$  个方程可以计算出

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{k=1}^N I_k(x, y) \sin(2\pi(k-1)/N)}{\sum_{k=1}^N I_k(x, y) \cos(2\pi(k-1)/N)} \quad (9)$$

由式(9)可以看出, 只要已知相移的步长, 测得各条纹图的光强值, 则容易得到每个像素相位值。这里, 采用相移步长  $\Phi = \pi/4$ , 相移步数  $N = 8$  的正弦相移, 一方面能提高分辨率, 另一方面工作量又不太大。

得到了每一点的  $\varphi(x, y)$ , 就很容易得到每一点的深度值  $h$ 。

若某一条条纹  $n$  中某两点的坐标分别为  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 。则光栅投影图中两点的距离  $s$  为

$$s = (x_1 - nT) - (x_2 - nT) \quad (10)$$

由于式(6)中  $\varphi(x, y) = 2\pi(x - nT)/T$ , 故将两点的相位相减得到

$$\varphi(x_1, y_1) - \varphi(x_2, y_2) = \frac{2\pi}{T} [(x_1 - nT) - (x_2 - nT)] \quad (11)$$

令  $\Delta\varphi = \varphi(x_1, y_1) - \varphi(x_2, y_2)$ , 并将式(10)代入式(11), 可以得到:

$$s = \Delta\varphi \frac{T}{2\pi} \quad (12)$$

将式(12)代入式(2), 得到:

$$h = \frac{\Delta\varphi LT}{2d\pi + \Delta\varphi T} \quad (13)$$

其中,  $T$  为参考面上的周期。由已知的  $L, T, d, \Delta\varphi$ , 就可以求得物体表面的深度信息。

由相移技术可以看出, 提高精度的前提仍然是需要正确的条纹检测和条纹解码。

## 5 条纹检测改进算法

图 4(a) 为光栅投影到物体表面后的图像。图 4(b)、(c) 为 (a) 中两个方框的局部放大图。由图 4(b)、(c) 可以看出, 投影光栅由于物体表面形状的变化而发生了交叠。这种交叠会引起解码的错误和相位的紊乱, 从而解出错误的深度信息, 影响表面重建的质量。所以必须尽可能地消除这种交叠的影响。通常的实现方法是将相邻两条条纹的位置进行

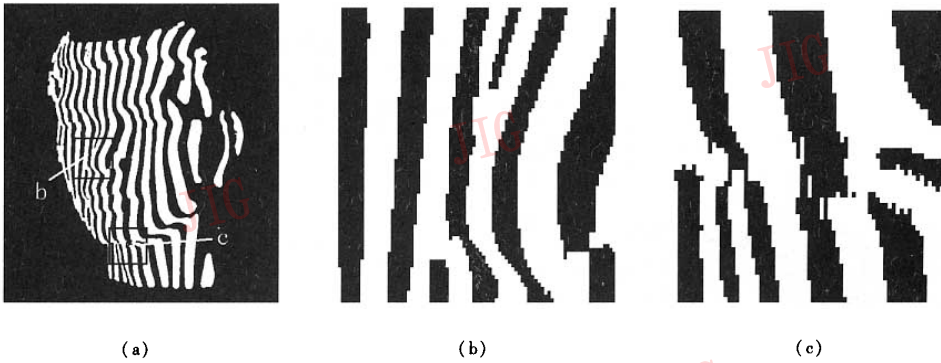


图 4 光栅投影条纹的相互交叠  
Fig. 4 Overlapped stripes of raster projection

比较以区分开交叠条纹。通过位置比较需要记录的位置的数据量大,而且如果条纹出现断裂,断裂部分的位置将无法记录,从而影响到后续的位置比较。为此提出一种新的算法,能充分利用编码逐步二分的特性改变条纹边界线的灰度值,以边界线的灰度值作为区分条纹的标识。其中边界线是条纹图中黑白交界的线。

设图 2 中有  $M$  幅光栅投影条纹图像,通过边缘检测得到  $M$  幅图中的边界线,然后按照一定的方式编码改变边界线的灰度值,并且将处理后的边界线叠加,使其条纹边界线的灰度值从左至右从  $1 \sim 2^M$  变化。改变边界线灰度值的基本原理如下:

(1) 图 2(a) 中的有一对黑白条纹,即有一条边界线。由于条纹边界线灰度变化范围为  $1 \sim 2^M$ ,该条纹的边界线理应在合成的边界线图(图 5)的正中,所以令其灰度值为  $a_0 = 2^{M-1}$ ;

(2) 图 2(b) 中有两条边界线,位于  $a_0$  的两边,同理,令灰度值分别为  $a_1 = 2^{M-2}, a_2 = 2^{M-2} + a_0 = 3 \times 2^{M-2}$ ;

(3) 如图 2(c) 有 4 条边界线,分别位于  $a_1, a_2$  两边,同理,令灰度值分别为  $a_3 = 2^{M-3}, a_4 = 2^{M-3} + a_1 = 3 \times 2^{M-3}, a_5 = 2^{M-3} + 2a_1 = 5 \times 2^{M-3}, a_6 = 2^{M-3} +$

$$3a_1 = 7 \times 2^{M-3};$$

(4) 依次类推,依次改变  $M$  幅条纹图中边界线的灰度值,每幅图含有的边界线的条数依次为  $1, 2, 4, \dots, 2^{M-1}$ ;

(5) 将  $M$  幅条纹图中的边界线叠加,就得到灰度值按从左到右的顺序依次从  $1 \sim 2^M$  变化的边界线图。

图 5 就是通过逐步二分改变边界线的灰度值,然后合成后的边界线图。光栅中加入物体后,按照以上的原理改变边界线的灰度值,就可以很容易地纠正条纹的交叠现象。

把物体放入图 2 中的光栅条纹以后,由于物体的调制,条纹发生形变,边界线也会形变。

通过边缘检测检测出形变后的边界线按以下方式处理:

设一数组为  $code[n][m]$ ,其中  $n, m$  为正整数。 $n$  表示 7 幅逐步二分的条纹图数,  $n = 0, 1, \dots, 6$ ;  $m$  表示图像中一行边界点的个数,其中  $m = 0, 1, \dots, 2^{n-1}$ 。数组  $code$  为一组灰度值,表示第  $n$  幅图中的某一行中第  $m$  个边界点的灰度值。由逐步二分的编码规则,很容易得到下式:

如果  $n = 0$ , 则

$$code[0][m] = 63$$

否则

$$code[n][m] = code[n-1][\text{floor}(m/2)] \pm 2^{6-n}$$

其中  $\text{floor}(m/2)$  表示对  $m/2$  向下取整。

若  $m$  是偶数

$$code[n][m] = code[n-1][m/2] - 2^{6-n}$$

若  $m$  是奇数

$$code[n][m] = code[n-1][(m-1)/2] + 2^{6-n}$$

由于 7 幅图像中的每一幅是由上一幅逐步迭代

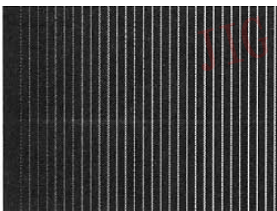


图 5 合成的边界线图  
Fig. 5 Composed edges

出来的,所以可以得出灰度逐步变化的边界线图。

图 6 为经过以上算法处理后的边界线图。条纹边界线的灰度值从左至右递增。但图中头部和颈部相交的地方出现了断裂,这是由该算法的单向性造成的。图中的有些点和边界线并不符合从左到右灰度递增的规律,这可能是由于噪声造成的。

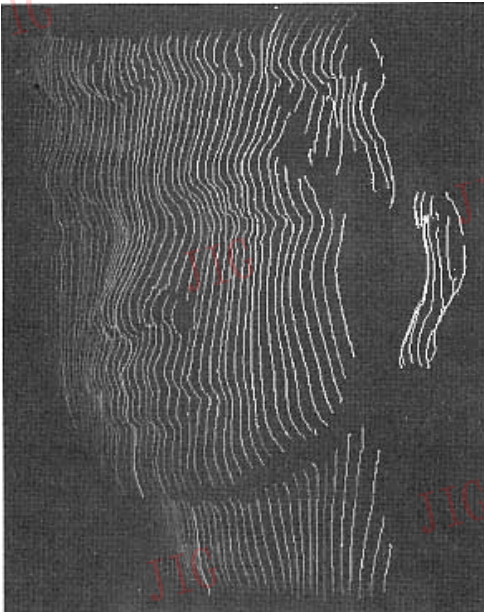


图 6 加入物体后的边界线图  
Fig. 6 Edges after an object presents

## 6 结 论

利用逐步二分法确定每一个像素的相位,把光栅投影到物体上时,因为物体表面的起伏不定,光栅将

发生形变。当形变过大,以至于相邻条纹之间产生交叠,表面重建时将不能区分交叠部分的相位,从而影响表面重建的质量。为此提出了一种算法,区分相邻条纹的交叠现象。该算法利用了逐步二分法的特点,通过第 1 幅图到第 7 幅图逐步迭代的方法得到边界线的灰度级别,从理论上保证了灰度级别的正确性。同时,该算法还有计算速度快(所有的计算在一次扫描内完成)的特点。但是,由于图像中除存在边界点外,还存在许多的噪声点、只能从上到下找到边界点等问题。该算法会认为所有的噪声点都是边界线,从而引起后续边界点灰度级别标定错误。由于噪声对该算法的影响,所以在后续工作中消除噪声尤为重要。可以采用更好的预处理方法,在算法中运用位置信息等方式来消除噪声的影响。

## 参考文献 (References)

- 1 Mashimo K, Nakamura T, Tanimura Y. Development of non-contact sensor for measurement of three-dimensional profiles using depolarized components of scattered light[J]. *Optical Engineering*, 1997, 36(1): 227 ~ 234.
- 2 NIU Xiao-bin, Lin Yu-chi, Zhao Mei-rong, et al. Principles of 3-D Profilometry Measurement of Using Grating Projection and Key Technique Analysis [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22(4): 203 ~ 206. [牛小兵, 林玉池, 赵美蓉等. 光栅投影三维测量的原理及关键技术分析 [J]. *仪器仪表学报*, 2001, 22(4): 203 ~ 206.]
- 3 Mitsuo Takeda, Kazuhiro Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 182 ~ 187.
- 4 Degrieck J, Paepegem W, Boone P. Application of digital phase-shift shadow moire to micro deformation measurements of curve surfaces [J]. *Optics and Laser Engineering*, 2001, 36(1): 29 ~ 40.
- 5 Kreis T. *Holographic Interferometry-principles and Methods* [M]. Berlin: Akademie Verlag, 1996.