亚像素条纹边缘提取技术在型面测量上的应用

陈石平 毕 娅

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083) (武汉经济学院 经济信息系, 武汉 430205)

李晓星 周贤宾

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 三维型面非接触测量在工业领域有着广泛的应用前景. 双目视觉是一种有效获取三维轮廓信息的方法,其中对大密度的黑白相间条纹进行精确定位和提取,是基于投影光栅图像的光学三维型面测量的关键技术和难点. 利用空间编码技术将被测空间划分为若干区域,每个区域对应一个二进制码. 条纹落在区域上与唯一的二进制码相对应,就可以对条纹精确定位. 利用边缘提取算法获得像素级条纹后,再利用亚像素技术可以进一步对条纹进行高精度提取. 介绍了基于灰度矩的和基于多项式拟合的亚像素边缘检测算法. 将空间编码和亚像素条纹提取技术相结合,对光栅条纹进行亚像素级定位和提取的技术,与像素级的定位技术相比,能提高图像的定位精度,有效地改善测量系统的性能.

关 键 词: 型面测量; 空间编码; 亚像素提取

中图分类号: TP 391

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)08-0979-04

The technique of sub-pixel stripes distinguish on the surface measurement

Chen Shiping

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Bi Ya

(Hubei University of Economics, Department of Information and Economics, Wuhan 430205, China)

Li XiaoXing Zhou Xianbin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Non-contact measurement of 3-D surface has been extensively applied in industry. The stereo vision is an effective way for 3-D profile measurement. Distinguishing and detecting the high density white-black stripes is one of the key techniques in the 3D-measurement based on the image of grating. Using spatial code technology, the measurement space was divided to several parts, and each part corresponded with a unique binary code. Falling on the space part, there was a unique binary code corresponded with the stripes, thus the stripes could be distinguished accurately. After getting pixel stripes with edge detection algorithm, the high precision strips could be detected by sub-pixel technology. The sub-pixel edge detection algorithm based on gray moment and polynomial fitting was presented. Combining spatial code and sub-pixel technique, it could easily distinguish and detect the sub-pixel stripes. This method can obtain a higher precision comparing with pixel stripes detection and improve the accuracy of measurement system.

Key words: moulding surface measurement; spatial code; sub-pixel detection

收稿日期: 2005-10-14

作者简介: 陈石平(1979-),男,江西井冈山人,硕士生, shp_chen@me.buaa.edu.cn.

在飞机钣金、汽车覆盖件的制造中,需要进行大量复杂型面的加工,其质量和开发周期对产品的性能和市场影响速度起着关键作用,三维型面的高精度测量是保证精度和加快开发周期的重要手段. 传统的三坐标测量虽然精度高,但速度慢、设备成本高,不能测量柔软材质的物体,而且不能在工作现场实现在线测量. 基于计算机视觉的非接触光学测量法可以很好地解决以上问题.

利用基于计算机视觉图像的光学非接触测量技术进行型面测量时,以下3个环节对测量精度有关键影响[1]:①图像采集系统的分辨率;②摄像系统的标定和误差修正精度;③图像中目标的定位精度. 提高CCD摄像机的分辨率是改善系统测量精度的最直接的方法,但这种方法受到硬件的限制. 近些年来,随着图像处理技术的发展,越来越多的研究者把目光集中在图像中目标的高精度定位上,其中亚像素级定位就是有代表性的技术之一. 在硬件分辨率不变的条件下,如果把定位精度提高到$1/n$个像素级,从理论上来说相当于把测量系统的分辨率提高了n倍. 因此对亚像素定位技术进行研究具有十分重要的理论价值和实际意义.

1 亚像素技术原理

可以把黑白相间的条纹图像看成是阶跃边缘模型,对于理想的阶跃边缘可以假设

$$f(x) = Au(x) \tag{1}$$

其中
$$u(x) = \begin{cases} 1 & x \geqslant x_0 \\ 0 & x < x_0 \end{cases}$$

对阶跃边缘可以采用2种常用的亚像素边缘定位法进行定位:一种是灰度矩边缘定位法;另外一种是多项式曲线拟合法.

1.1 灰度矩法

灰度矩法[2]是由Tabatabai等提出的一种利用前三阶灰度矩来对边缘进行亚像素定位的算法. 一维理想阶跃边缘模型可以认为由一系列具有灰度h_1与一系列具有灰度h_2的像素相接而成. 其理想模型可由图1表示. 这个一维模型边缘由3个参数决定:边缘位置k、边缘两侧的灰度值h_1和h_2.

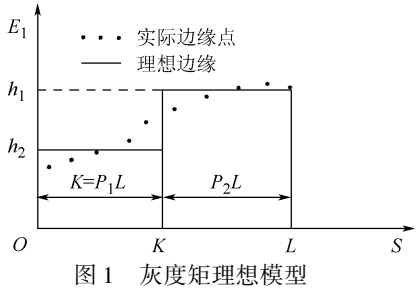


图1 灰度矩理想模型

设$u(x)$为理想阶跃函数,则一维理想边缘函数可表示为

$$E_1(x) = (h_2 - h_1)u(x - k) + h_1 \tag{2}$$

设p_1和p_2分别表示灰度值为h_1和h_2的像素点所占的比例,两者满足以下关系:

$$p_1 + p_2 = 1 \tag{3}$$

设单调序列$g_j(j=1,2,3,\cdots,n)$为实际边缘点的灰度值,则该序列的前三阶灰度矩[2]满足式(4):

$$\overline{m}_i = \sum_{j=1}^{2} p_j h_j^i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} g_j^i \qquad i = 1,2,3 \tag{4}$$

其中,n为实际边缘点的个数;$p_1 = k/n$.

方程(4)中包含3个未知数:p_1,h_1和h_2. 求解可得

$$\left.\begin{aligned} h_1 &= \overline{m}_1 - \overline{\sigma}\sqrt{p_2/p_1} \\ h_2 &= \overline{m}_1 - \overline{\sigma}\sqrt{p_1/p_2} \\ p_1 &= \frac{1}{2}\left(1 + \bar{s}\sqrt{\frac{1}{4+\bar{s}^2}}\right) \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

其中
$$\overline{\sigma}^2 = \overline{m}_2 = \overline{m}_1^2$$

$$\bar{s} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(x_i - \overline{m}_i)^3}{\overline{\sigma}^3} = \frac{\overline{m}_3 + 2\overline{m}_1^3 - 3\overline{m}_1\overline{m}_2}{\overline{\sigma}^3}$$

由式(5)可得到边缘位置[1]:

$$k = np_1 - \frac{1}{2} = \frac{n}{2}\sqrt{\frac{\bar{s}}{4+\bar{s}^2}} + \frac{n-1}{2} \tag{6}$$

本文设序列g_j中的第1个像素位置取为0,而文献[2]中序列g_j中第1个像素的位置取为1/2.

1.2 多项式拟合法

基于灰度分布曲线拟合亚像素边缘定位法是根据光栅条纹的灰度分布,利用多次多项式对边缘区域的灰度进行拟合,从而获得精确边缘位置的方法. 采用高次多项式

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n$$

拟合离散的灰度分布,使得$\sum_{i=1}^{n}\left[p_i - (a_0 + a_1j_i + a_2j_i^2 + \cdots + a_nj_i^n)\right]$最小.

获得$f(x)$的解析式后,以这个解析式代替原来边缘灰度的离散变化,可以利用方程二阶导数的过零点检测边缘位置[3],即$f''(x) = 0$. 可得到$n-2$个解:$[x_1, x_2, \cdots, x_{n-2}]$. 利用在亚像素定位前已经获得的像素级初定位的边缘位置x_t,在$[x_1, x_2, \cdots, x_{n-2}]$中找到最接近$x_t$的实数解$x_s$,即使得$|x_s - x_t| < |x_i - x_t|$,就可得到边缘的精确位置.

理论表明灰度矩法有以下特点[4]:①灰度矩定位法具有对灰度平移和缩放的不变性;②边缘序列点的长度对边缘的定位影响较小;③加性噪声具有将真实边缘位置向序列中心移动的趋势,当边缘位置位于序列中心时其均方误差最小. 利用现有硬件做的实验也可以得到灰度矩法比多项式拟合法更稳定,故在本文的实验中用空间灰度距法对光栅条纹进行提取,得到了很好的结果.

2　亚像素条纹边缘定位实施

在采用基于光栅投影测量图像的型面测量中,需要对投影的光栅条纹进行定位,要区分这些条纹必须给每条条纹一个标记. 由于被测物体没有特殊的特征,不能直接对条纹进行区分,因此采用空间编码法以确定每条条纹的位置.

2.1　空间编码原理

早在 20 世纪 70 年代就有人提出二进制空间编码的概念,由于硬件条件限制应用比较少,数字投影仪的发展使这种技术的实际应用成为可能. 所谓空间二进制编码[5]是指通过向被测物空间投影一系列栅状的由黑白条纹构成的编码图案,将这些编码图案在被测物表面投影所形成的条纹图像组合,把被测物空间的区域分割成一系列条状、狭窄的子区域,每个子区域由唯一的一个二进制编码标识.

应用于立体视觉的空间二进制编码原理可用图 2 表示. 在计算机的控制下,通过投影仪投影出黑白相间的条纹,再由 CCD 摄像机依次采集投影出来的图像[6]. 将拍摄出来的图像进行必要的图像处理后,对其进行黑白二值化. 图像中白色条纹区域的像素标记为“1”,黑色条纹区域的像素标记为“0”,这样每经过一次投影,图像中的每一个像素就获得一个二进制数“0”或“1”. 待投影图案全部投影完后将像素所获得的二进制数顺序组合起来,具有相同编码的像素就构成了一个窄的带状区域,这样被测物空间就相应被分割成众多由二进制编码唯一确定的窄带状区域.

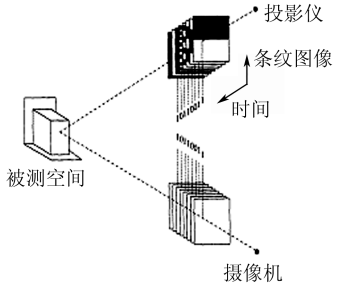


图 2　空间二进制编码原理图

采集到的物体图像是用像素表示的,前 3 幅图像二值化后某一行的像素如图 3 所示,0 和 1 分别代表黑和白.

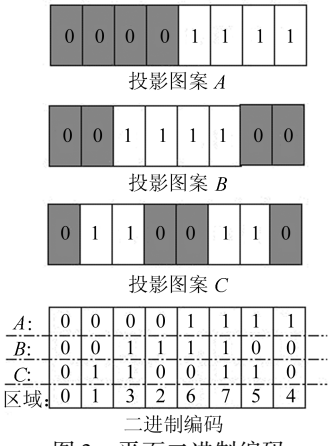


图 3　平面二进制编码

在图 2 中,投影装置依次向被测物空间投影 A,B,C 3 幅编码图案,通过空间二进制编码,被测物空间在图像上被分成了由“000”到“111”8 个二进制编码标识的区域. 理论上,被测物空间区域被分割成的子区域的数目与投影图案的幅数和编码方案有关. 如果采用图 2 所示的编码方案,则分割区域的数目与投影图案的幅数之间的关系是 $F = 2^n$, 其中,F 是分割区域的数目;n 是光栅条纹图的幅数.

2.2　条纹初定位

本文空间编码定位亚像素条纹采用 8 幅图像,其中前面 3 幅图像如图 3 所示. 8 幅图像采用了图 2 的编码方法(即后一幅光栅图样是前一幅密度的 2 倍),这样就可以将被测物空间划分为 256 份,并且每一份都对应唯一的二进制值. 再投影出第 9 幅图像,第 9 幅图像的理论边界刚好在每个 256 区间的中间,这样下面定位出来的每条边界就有一个唯一的二进制编码与之对应,从而可以确定每一条条纹.

对采集图像进行亚像素定位前,需要对图像进行像素级的边缘初定位,初定位结合空间编码就可以确定每条条纹的位置,也就确定了条纹亚像素的位置. 对原始图像进行必要的滤波去噪后,应用传统的像素级边缘检测方法就可以获得足够的精度.

3　试　验

对某模具的型面进行测量试验,采集到的图像如图 4 所示,图像某一行前面 64 个像素灰度值如 表1所示. 将这64个像素灰度值按横坐标展

表1 图像某行前64个像素(x坐标为634~697)的灰度值

x坐标/像素	灰度值															
634~649	11	37	100	138	140	139	140	144	143	122	76	29	12	7	7	10
650~665	11	22	52	113	141	143	140	133	140	135	111	60	25	12	12	10
666~681	10	11	24	64	117	140	140	136	137	140	132	103	51	22	15	9
682~697	12	11	16	34	83	131	148	149	141	144	143	132	95	39	15	13

开,用一个坐标系来表示,可以得到图像大致呈阶跃形状,如图5所示. 初定位得到的边缘和经过亚像素技术定位的边缘位置以及各个边缘的二进制编码如表2所示. 表2可见,用亚像素技术得到的边缘更能精确地定位条纹的实际位置.

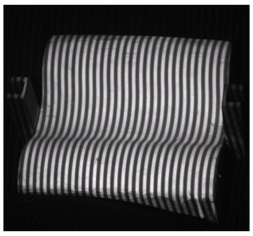


图4 被测物体光栅图

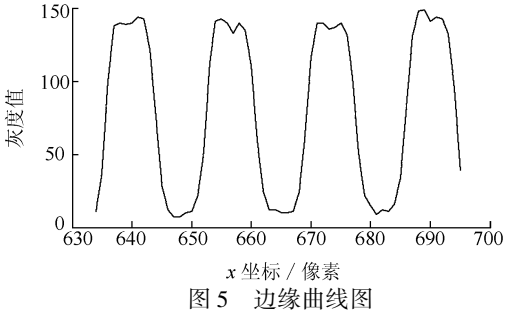


图5 边缘曲线图

表2 边缘位置及边缘二进制编码对应表

序号	x坐标/像素		边缘编码
	初定位边缘	灰度矩边缘	
1	635	635.035	46
2	643	643.223	47
3	652	651.876	45
4	660	660.266	44
5	669	668.690	36
6	677	677.361	37
7	686	685.683	39
8	694	694.367	38

4 结束语

基于图像的视觉测量技术,在一定的硬件条件下,提高系统测量精度的一个重要手段是提高目标特征的精确定位. 对于以投影光栅作为人为添加特征的测量方式,对光栅条纹的精确提取和定位是提高测量精度的关键技术. 本文采用空间编码技术对光栅条纹进行区分和利用亚像素技术对光栅条纹边缘进行精确定位的方式,结合了2种方法的优点,通过对型面三维测量的试验,验证了该技术能有效提高测量精度.

参考文献(References)

[1] 于起峰,陆宏伟,刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京:科学出版社,2002:132-142
Yu Qifeng, Lu Hongwei, Liu Xiaolin. The precision and movement measurement based on image[M]. Beijing:Science Press, 2002:132-142(in Chinese)

[2] Tababai E P, Mitchell O R. Edge location to subpixel values in digital imagery[J]. IEEE Trans on PAMI, 1984, 6(2):188-201

[3] 章毓晋. 图像工程[M]. 北京:清华大学出版社,2001:197-203
Zhang Yujin. Image engineering[M]. Tsinghua University Press, 2001:197-203(in Chinese)

[4] 刘亚威. 空间距亚像素图像测量方法的研究[D]. 重庆:重庆大学数理学院,2003
Liu Yawei. Study on the spatial moment-based on operator for image measurement[D]. Chongqing:College of Mathematics and Physics, Chongqing University, 2003(in Chinese)

[5] 董斌,尤政,李颖鹏,等. 基于空间二进制编码的3-D形貌测量方法[J]. 光学技术,1999,9(3):33-36
Dong Bin, You Zheng, Li Yingpeng, et al. A novel 3D rang image measurement method based on spatial binary code[J]. Optical Technique, 1999, 9(3):33-36(in Chinese)

[6] 董斌,尤政,刘兴占,等. 用构造光系统实现3-D形貌测量的研究[J]. 光学精密工程,1996,7(3):97-102
Dong Bin, You Zheng, Liu Xingzhan, et al. Study on accurate 3D rang image measurement using a structured light system[J]. Optical and Precision Engineering, 1996, 7(3):97-102(in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)