

高精度图像测量系统

吴晓波 钟先信 刘厚权 潘振显

(重庆大学光电精密仪器系, 重庆 630044)

摘要 图像测量系统的测量原理是通过处理被测物体图像的边缘而获得物体的几何参数。为提高图像测量系统的测量精度,本文提出了一种具有保持特征和滤波功能的十字窗口边缘自动检测算法。该算法能有效地抑制图像边缘检测中的噪声,并且能对非均匀照明的图像进行自动变阈值设置,从而能准确地检测出图像边缘。并在此基础上,又提出了以多项式插值为原理的新的亚像元边缘检测算法,使图像测量系统的CCD摄像机的分辨率提高约60倍。

关键词: 图像测量; 边缘检测; 亚像元边缘检测; 多项式插值

1 引言

图像测量技术是近年来的测量领域中形成的新的测量技术。它以光学为基础,融光电子学、计算机技术、激光技术、图像处理技术等现代科学技术为一体,组成光、机、电、算综合的测量系统。它广泛应用于几何量的尺寸测量、航空等遥感测量、精密复杂零件的微尺寸测量和外观检测、以及光波干涉图、应力应变场状态分布图等和图像有关的技术领域中^[1]。所谓图像测量就是测量被测对象时,把图像当作检测和传递信息的手段或载体加以利用的测量方法,其目的是从图像中提取有用的信号。图像测量的重要课题是正确地测量和处理图像。

2 系统结构

图像测量系统的结构主要由 CCD 摄像机、图像卡、计算机及其外设等组成,如图 1 所示。其工作过程为,将被测物体置于尽可能均匀照明的可控背景前,CCD 和图像卡将被测物体图像采集到计算机里,计算机按一定的算法计算出被测物体的几何参数,最后计算机对这些数据进行各种处理并将结果按一定的要求予以显示,存储,打印。

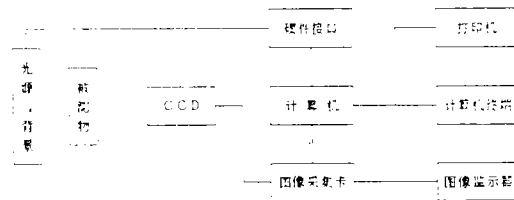


图 1 图像测量系统结构框图

3 测量算法

在图像测量系统中, 图像边缘检测是测量的基础和关键。现有的一些边缘检测方法是原始图像按像素的某邻域构造边缘检测算子。如梯度算子、Sobel 算子、Laplacian 算子、Kirsch 算子等^[2]。但由于原始图像往往含有噪声, 而边缘和噪音在空间域都表现为灰度有比较大的起落, 在频率域则反映为同是高频分量, 这就给边缘检测带来了困难。为了克服噪声的影响, Marr 提出用二维高斯加权函数对原始图像作平滑, 然后检测二阶方向导数的零交叉点作为边缘点^[2], 这种方法的优点是过滤了噪声, 而缺点是可能将原有的边缘也给平滑了。另外值得指出的是, 现有的边缘检测算法所得到的边缘都具有一定的宽度, 尺寸分散, 检测分辨率低, 不能直接用于测量。

为满足图像测量的需要, 本文提出具有保持边缘特征和滤波功能, 且能适应非均匀照明的十字窗图像边缘自动检测算法, 使图像边缘精确地定位在一个像素上。并在此基础上利用多项式插值函数, 推导出新的亚像素边缘检测算法, 从而使图像测量系统的 CCD 摄像机的分辨率提高了约 60 倍。

3.1 十字窗边缘自动检测算法

该算法的设计思想为, 首先对原始图像求梯度, 然后构造一个 $Q \times Q$ 十字窗口, 如图 2, 在窗内对梯度图像作滤波和提取边缘处理, 并根据窗内灰度均值设置阈值, 使所设阈值能适应非均匀照明的图像。

对于阶跃边缘, 已证明其边缘点在光强斜率最大的地方^[3]。现考虑含有噪声和存在非均匀照明的二维数字图像 $f(i, j)$; $i, j = 0, 1, \dots, N-1$ 。

第 1 步: 对 $f(i, j)$ 求梯度, 用 Roberts 算法得其梯度图像 $R(i, j)$

$$R(i, j) = |f(i-1, j-1) - f(i+1, j+1)| + |f(i-1, j+1) - f(i+1, j-1)| \quad (1)$$

第 2 步: 考虑非均匀照明, 对梯度图像 $R(i, j)$ 将其分为 k 个区域, 划分要求为每个区域内必须包含边缘。然后求出每个区域内的灰度最大值 R_{kmax} 和最小值 R_{kmin} , $k = 1, 2, \dots, k$ 。

$$TH_k = (R_{kmax} + R_{kmin})/4; \quad (2)$$

为克服噪声, 对梯度图像 $R(i, j)$ 的每一像素在十字窗 W 内, 以 (i, j) 为中心作平滑处理

$$G(i, j) = 1/M \sum_{i, j \in W} R(i, j) \quad (3)$$

其中, $M = Q \times Q - 1$, 为除 (i, j) 以外的 W 内包含的所有坐标点数。

对梯度图像 $R(i, j)$ 的每一像素, $i, j = 2, 3, \dots, N-3$ 。

当 $R(i, j) > TH_k$; $i, j \in k$ 区域

且 $R(i, j) < 2G(i, j)$;

则 转 3.;

否则 继续第 2 步;

第 3 步: 十字窗边缘检测

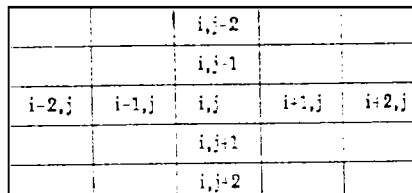


图 2 $Q=5$ 的十字窗

$$E_x(i, j) = R(i-1, j) + R(i, j) + R(i+1, j); \quad (4)$$

$$\text{当: } R(i, j) \geq R(i+1, j) > \dots > R(i+Q/2, j)$$

$$\text{当: } R(i, j) \geq R(i-1, j) > \dots > R(i-Q/2, j)$$

$$E_x(i, j) = R(i, j); \quad (5)$$

其它情况

$$E_y(i, j) = R(i, j-1) + R(i, j) + R(i, j+1); \quad (6)$$

$$\text{当: } R(i, j) \geq R(i, j+1) > \dots > R(i, j+Q/2)$$

$$\text{且: } R(i, j) \geq R(i, j-1) > \dots > R(i, j-Q/2)$$

$$E_y(i, j) = R(i, j); \quad (7)$$

其它情况

$$E(i, j) = \sqrt{E_x^2(i, j) + E_y^2(i, j)}; \quad (8)$$

$$E_d(i, j) = \tan^{-1}(E_y/E_x); \quad (9)$$

则: $E(i, j)$ 为边缘图像, $E_d(i, j)$ 为边缘在 (i, j) 点的方向, 满足式(4)或式(6)的点 (i, j) 为边缘点。

否则: 转第 2. 步继续;

3.2 多项式插值亚像元边缘检测算法

用十字窗边缘检测算法可将边缘点精确定位到一个像元位置, 边缘点坐标可近似为像元的几何中心 (X_i, Y_i) , 如图 3。这时测量系统的精度受到 CCD 光敏元间距 W, H 的约束, W 为像元 X 方向间距, H 为像元 Y 方向间距。其分辨误差约为一个光敏元间距。可见, 图像测量系统的精度, 在假定摄像光学系统的像差忽略不计时主要取决于 CCD 摄像机的分辨率。为提高测量系统精度, 文献 [3] 提出解调测量法提高 CCD 尺寸测量分辨率, 文献 [4] 提出应用概率论提高 CCD 尺寸测量分辨率。本文提出用多项式插值法提高面阵 CCD 尺寸测量系统精度。

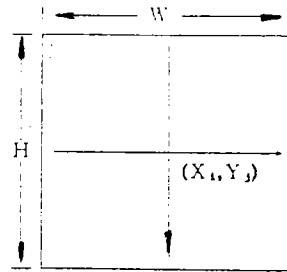


图 3 像元示意图, (X_i, Y_i)

为像元几何中心坐标

a 对连续图像 $f(x, y)$, 求导得 $R(x, y)$, 图像的边缘坐标 (X_E, Y_E) 在 $R(x, y)$ 最大的点。由于 CCD 受其分辨率的影响, 所得到的数字图像及其梯度图像的分辨精度均以像元间距为单位。为得到亚像元分辨精度, 可利用最大梯度值两边的梯度值所提供的信息来求 $R(x, y)$ 的插值函数 $\Phi(x, y)$, 然后求 $\Phi(x, y)$ 的最大值点的坐标即为边缘点的坐标。

b 算法推导

用十字窗边缘检测算法找到边缘点 (X_i, Y_i) , 对梯度图像 $R(i, j)$ 在 X 方向取三点 $R(i-1, j), R(i, j), R(i+1, j)$, 求 $R(x)$ 的二次多项式插值函数 $\Phi(x)$, 对 $\Phi(x)$ 求导并令其等于零, 求出导数最大点的 X 方向坐标 X_E ; 同理, 在 Y 方向取三点 $R(i, j-1), R(i, j), R(i, j+1)$, 求 $R(y)$ 的二次多项式插值函数 $\Phi(y)$, 对 $\Phi(y)$ 求导并令其等于零, 求出导数最大点的 Y 方向坐标 Y_E 。据计算方法 [5] 有:

$$y(x) = \sum_{j=0}^n l_j^{(n)}(x) f_j \quad (10)$$

$$l_j^{(n)}(x) = \frac{(x-x_0)\cdots(x-x_{j-1})(x-x_{j+1})\cdots(x-x_n)}{(x_j-x_0)\cdots(x_j-x_{j-1})(x_j-x_{j+1})\cdots(x_j-x_n)} \quad (11)$$

式中: $y(x)$ 为插值函数; $l_j(x)$ 为插值基函数; f_j 为函数值; x_j 为插值基点; 在 X 方向, 用 $\Phi(x)$ 为插值函数, $R(i-1, j), R(i, j), R(i+1, j)$ 为函数值, $X_i - W, X_i, X_i + W$ 为插值基点; 在 Y 方向, 用 $\Phi(y)$ 为插值函数, $R(i, j-1), R(i, j), R(i, j+1)$ 为函数值, $Y_j - H, Y_j, Y_j + H$ 为插值基基点; 分别代入式 (10) 和 (11), 并分别令 $\frac{d\Phi(x)}{dx} = 0; \frac{d\Phi(y)}{dy} = 0$ 。经推导求得边缘坐标 (X_E, Y_E) 为:

$$X_E = X_i + \frac{R(i-1, j) - R(i+1, j)}{R(i-1, j) - 2R(i, j) + R(i+1, j)} \times \frac{W}{2} \quad (12)$$

$$Y_E = Y_j + \frac{R(i, j-1) - R(i, j+1)}{R(i, j-1) - 2R(i, j) + R(i, j+1)} \times \frac{H}{2} \quad (13)$$

c 精度分析

为简化表达式, 用 R_{-1}, R_0, R_1 代表 $R(i-1, j), R(i+1, j)$, 根据误差理论, 对 X 坐标方向的检测误差 dX_E 的计算, 由式 (12) 计算求得:

$$\begin{aligned} dX_E &= \frac{\partial X_E}{\partial R_{-1}} dR_{-1} + \frac{\partial X_E}{\partial R_0} dR_0 + \frac{\partial X_E}{\partial R_1} dR_1 + \frac{\partial X_E}{\partial W} dW \\ &= \frac{W}{R_{-1} - 2R_0 + R_1} \left[\frac{(R_1 - R_0)dR_{-1} + (R_{-1} - R_1)dR_0 + (R_0 - R_{-1})dR_1}{R_{-1} - 2R_0 + R_1} + \frac{R_{-1} - R_1}{2W} dW \right] \end{aligned}$$

因: $R_0 \geq R_{-1}, R_1$;

有: $|R_{-1} - 2R_0 + R_1| \geq |R_1 - R_0| \cdot |R_{-1} - R_1| \cdot |R_0 - R_{-1}|$;

所以: $|dX_E| \leq \frac{W}{|R_{-1} - 2R_0 + R_1|} (|dR_{-1}| + |dR_0| + |dR_1|) + \frac{1}{2} |dW|$
 $\leq 1/2(3W|dR_0| + |dW|)$;

因: 图像卡的 A/D 有 ± 1 LSB 的量化误差, CCD 的制造精度约为百分之一像元间距;

所以: $|dX_E| \leq 1/2(3W \times 2/256 + W/100)$;

得: $|dX_E| \leq W/59.8$ 同理得: $|dY_E| \leq H/59.8$;

4 实 验

本实验采用 MINTON MTV-1881CB CCD 摄像机, 其 X 方向像元间距 $W = 10.00\mu\text{m}$, Y 方向像元间距 $H = 10.82\mu\text{m}$, V512A 512×512×8Bit 图像卡及 PC-386 计算机组成的图像测量系统, 对一弧型零件的参数进行测量。测量系统经定标、校正后, 将被测物体置于尽可能均匀照明的背景。摄取一幅图像 $f(i, j)$, 其部分灰度值如表 1 所示; 用 Roberts 算法对 $f(i, j)$ 处理得梯度图像 $R(i, j)$ 如表所示; 表 3 所示为用十字窗口边缘自动检测算法检测算法检测出的边缘; 亚像元边缘检测结果如表 4。

表 1 部分原始数字图像 $f(i, j)$ 的灰度值

j/i	162	163	164	165	166	167	168	169	170
62	172	170	170	170	170	162	144	122	102
63	172	172	170	158	134	112	94	78	66
64	170	166	146	122	102	84	70	58	54
65	136	112	92	76	62	54	50	46	44
66	92	76	64	56	50	44	42	40	40

表 2 $f(i, j)$ 的梯度图像 $R(i, j)$

j/i	162	163	164	165	166	167	168	169	170
62	2	4	14	36	70	112	142	154	150
63	4	26	52	92	126	142	142	122	102
64	72	114	142	150	140	116	90	66	48
65	150	160	156	134	108	80	58	42	28
66	132	112	82	58	42	28	22	14	12

表 3

j/i	162	163	164	165	166	167	168	169	170
62								—	·
63						—	·		
64				—	·				
65	—	·							

“—”表示用十字窗边缘检测算法求得的边缘

“·”表示用亚像元边缘检测算法求得的边缘点，其值如表 4

表 4 用亚像元边缘检测算法求得的边缘点

(i, j)	$X_E - X_i, Y_E - Y_i$	(i, j)	$(X_E - X_i, X_E - Y_j)$
163, 65	2.14, -0.12	166, 64	—, -2.25
164, 65	—, -3.69	167, 63	5.00, 0.38
165, 64	-0.56, 3.07	168, 63	-5.00, -5.41

偏离像元几何中心的偏移坐标，坐标数据单位为 μm

6 结 论

本文首先讨论了图像测量系统的结构、原理及算法等问题。为正确地检测出图像的边缘，本文提出了具有保持边缘特征、能有效地抑制图像边缘检测中的噪声，并且能适应非均匀照明的十字窗口边缘自动检测算法，使检测出的边缘精确定位在一个像元宽度位置上；为提高测量精度，本文进而又提出了利用多项式插值函数为原理的亚像元边缘检测算法，该算法的检测分辨率达到约 60 分之一像元宽度，即将 CCD 摄像机的分辨率提高了 60 倍。

最后必须指出，图像测量系统总的测量精度不仅只取决于测量算法精度，还与系统的定标精度，以及光学系统的像差等因素有关。

参 考 文 献

- [1] 李鹏生, 新技术的几何量计量中的应用. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989
- [2] 徐建华, 图像处理与分析. 北京: 科学出版社, 1992
- [3] 邹仲力, 提高 CCD 尺寸测量分辨力的解调测量法. 仪器仪表学报, 1986, 7 (1): 38-44
- [4] 郭彦珍, 应用概率论提高 CCD 尺寸测量的分辨力. 仪器仪表学报, 1988, 9 (2): 149-154
- [5] 陈公宁等, 计算方法引导. 北京: 北京师范大学出版社, 1988

High Accuracy Image Measurement System

Wu Xiaobo, Zhong Xianxin, Liu Houquan and Pan Zhenxian
(Dept. of Optoelectronic Instruments, Chongqing University,
Chongqing 630044)

Abstract

The Principle of image measurement system is that the geometrical parameters are obtained by processing the image edge of the object. For improving the accuracy of the image measurement system, this paper proposed a crossed window automatic edge detection algorithm which has the properties of holding edge, reducing noise and adjusting threshold automatically in case of nonuniform luminary, and furthermore, a new subpixel edge detection algorithm based on polynomial interpolation is presented. By the algorithms the measuring resolution of CCD camera in image measurement system might be improved by about 60 times.

Key Words: Image measurement, Edge detection, Subpixel edge detection, Polynomial interpolation