

文章编号 1004-924X(2002)01-0089-05

理想边缘产生方法的研究

贺忠海, 王宝光, 廖怡白

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:详细介绍了产生理想直线边缘的方法。在亚像素提取算法中,通常要考察算法两个方面的内容,一是在没有噪声的情况下算法本身的精度,二是在有噪声的条件下考察算法的抗噪声能力,这两个方面是分开的。本文所介绍的理想边缘就可以用来考察亚像素算法精度的两个方面。本方法以 CCD 成像原理为基础,根据方形孔径采样定理,给出了边缘点灰度值的计算方法,并以一种情况为例给出了边缘点灰度值的计算公式,利用此公式可直接编程产生理想边缘,产生的边缘可用于亚像素细分算法的评价。

关键词:图像测量系统;灰度;计算方法;方形孔径采样

中图分类号: TP391; TB92 **文献标识码:** A

1 引言

图像测量技术是近期在测量领域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、航空遥感测量、精密复杂零件的微尺寸测量和外观三维检测、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。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,其目的就是从图像中提取有用的信号,图像测量的重要课题是正确的测量和处理图像。

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。可见在图像测量系统中,图像边缘提取是测量的基础和关键。早期常用像素级边缘提取方法,随着测量精度要求的提高,像素级提取已经不能满足实际测量的需要,因此需要更高精度的边缘提取算法,即亚像素算法,现在已经有很多的亚像素边缘提取方法^[1-4]。亚像素算法主要需考虑两方面的问

题,一是算法本身的精度,即在图像没有任何干扰的情况下对边缘的提取精度,二是算法的抗噪声能力。算法本身的精度是固定的,而且算法精度必须用理想图像来评价才能完全消除噪声的影响,这样应用外界实际目标成像到 CCD 上的方法就是不可取的。主要有以下两点原因,首先成像后的图像因为光学体系的缺陷要发生变化,这样图像的参数就要发生变化,即作为处理结果的基准就不准了;其次不论实验环境多么好,用成像方法不可避免地引入噪声。这样就只能用计算机产生理想图像,并且产生的理想图像应符合 CCD 摄像机的成像原理。

本文以 CCD 成像的基本原理为基础,介绍了理想边缘的产生方法。为了论述方便,仅以直线边缘为例进行介绍,其他形状的边缘可以类似求得。

2 方形孔径采样

CCD 是光积分器件^[5],也就是说,它在固定大小的面积在固定的时间间隔内对投射在它感光面上的光强进行积分,输出的结果就是图像的灰度值。由于 CCD 的积分时间和积分面积是固定

的,所以它的输出灰度值只与它的感光面上的光强分布有关。对于某一个像素的灰度值输出可以表示为:

$$f(i, j) = \int_{j-1/2}^{j+1/2} \int_{i-1/2}^{i+1/2} g(x, y) dx dy, \quad (1)$$

其中 $f(i, j)$ 为像素输出值,也就是灰度值, $g(x, y)$ 是连续图像的光强分布。由以上分析可以看出,像素的输出值是像素感光面上各部分光强综合作用的结果,这就是方形孔径采样定理(square aperture sampling)^[6],采样结果是一个以灰度值为数值的离散矩阵。

在实际计算像素灰度值之前,先对坐标系的问题进行说明,只有对坐标系有了充分明确的认识,才能对灰度值计算有透彻的理解。

3 关于图像坐标系

数字图像中点的坐标可以用不同的坐标系来表示^[7],常用的有两种:像素坐标系和空间坐标系,下面分别加以介绍。

(1) 像素坐标系

通常表示一个图像坐标的最简单的方法是使用像素坐标系,在这个坐标系中,图像被认为离散元素组成的栅格状结构,坐标轴方向从上到下,从左到右,如图 1 所示。

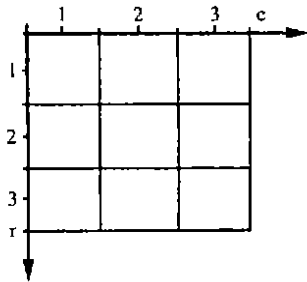


图 1 像素坐标系

Fig. 1 Pixel coordinates.

对于像素坐标系,第一坐标 r (行)是向下递增的,第二坐标 c (列)向右递增,像素坐标是由 1 开始的整数,这样像素坐标和矩阵下标之间就建立了一一对应的映射关系,这使得图像的存储和显示变得简单容易。例如第 5 行第 3 列的灰度值就储存在矩阵元素(5,3)中。

(2) 空间坐标系

在像素坐标系中,一个像素就是一个离散的

单位,由一对唯一确定的坐标来表示,如(5,3),从这点来说,像(5.3,3.2)这样的坐标是没有意义的。然而,把像素作为一个具有一定面积的方块,也是很有意义的,因为这实际上正是 CCD 像素的根本表示,从这点来说,像(5.3,3.2)这样的坐标就是有意义的,而且与(5,3)对应不同的点。在这样的空间坐标系中,图像的定位是在一定完整的平面上,它们用 x 和 y 来表示。

图 2 表示了数字图像中所用的空间坐标系,注意 y 轴向下递增。可以看出,空间坐标系与像素坐标系在很多方面是相同的,例如,方块中心点的空间坐标就与像素坐标相同。当然,两个坐标系之间也有很多的不同,在像素坐标系中,图像的左上角第一个坐标是(1,1),在空间坐标系中,坐标是(0.5,0.5)。引起这种差别的原因是:像素坐标是离散的,而空间坐标是连续的。另外,像素坐标系是固定的,即它的左上角的坐标一定是(1,1),而空间坐标系的原点坐标是可以任意指定的。

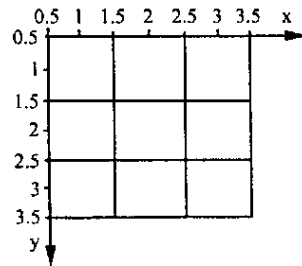


图 2 空间坐标系

Fig. 2 Spatial coordinates.

可以看出,像素坐标系对图像的存储和显示用处很大,而空间坐标系则对图像的计算和处理很有用处,只有在空间坐标系中才能有“亚像素”的概念,而且空间坐标系符合 CCD 采样模型。最后必须明确指出,图像存储用的像素坐标系,即 (r, c) 格式,而实际处理时用的则是空间坐标系,即 (x, y) 格式,应当注意 x 对应 c ,而 y 对应 r ,对这种存储和处理所用的不同的坐标系之间的关系必须搞清。

4 计算边缘像素的灰度值

为了论述方便,仅考虑直线边缘的情况。如图 3 所示,一幅图像被一条直线边缘分为两部分,此图像被 CCD 采样后,输出一系列的灰度值。像

素灰度值根据像素与边缘的位置关系分为三种情况^[8],参见图 4:第一种情况,A 像素完全位于直线左边,此像素的灰度值为左半区域的灰度值;第二种情况,C 像素完全位于直线的右边,则灰度值为右半区域的灰度值,如果我们假设这种情况为物体与背景的关系,则左右两边分别对应背景的灰度值和物体的灰度值;第三种情况,B 像素位于边缘上,这时的灰度值就需要根据边缘在像素区间上的位置来确定,如图 4 所示,这也是我们重点研究的部分。如果确定了上述三种情况的像素灰度值,那么就可以用计算机来产生理想图像,并且像素的灰度值与 CCD 理想采样所得到的灰度值完全相等。



图 3 带有直线边缘的图像
Fig. 3 Image with straight line edge.

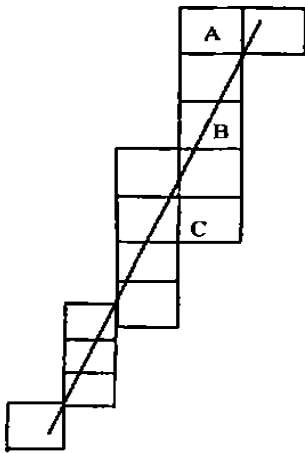


图 4 边缘像素和边缘直线
Fig. 4 Edge pixel and edge line.

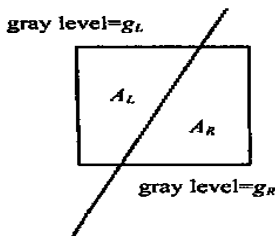


图 5 边缘直线通过像素内部
Fig. 5 Edge line passing through pixel.

参见图 5,设 P 为边缘像素, A_L 为 P 在边缘直线左边的部分, A_R 为 P 在直线右边的部分。设 g_L 为直线左边非边缘点的灰度值, g_R 为直线右边非边缘点的灰度值,则 P 点的灰度值可表示为:

$$g_P = A_L g_L + A_R g_R$$

其中 $A_L + A_R = 1$ 。这样,如果要设计一条方程已知的边缘线,并且边缘两边的灰度值也已确定,那么就可以求出 A_L 和 A_R ,进而求得 g_P 的值,这就是我们设计理想直线边缘的基本原理。

在边缘两边的灰度值已知的情况下,确定边缘点上每部分所占的面积就成为首要问题,为了得到边缘点的灰度值,需要找到计算 A_L 和 A_R 的公式,根据直线参数和像素本身的参数,假设每个像素的边长为 1, (x_i, y_i) 为像素中心。假设直线方程为 $y = kx + b$,为了表示直线与像素的位置关系,使用参数 d 来进行判断,并引入 d_M 作为判断的标准, d 是像素点中心到直线的垂直距离, d_M 是平行于直线 L 并经过像素端点的直线(不穿过像素内部)与像素中心 (x_i, y_i) 的距离,如图 6 线段 AB 所示。 d_M 的值用点到直线的距离公式可求得为 $d_M = \frac{|kx_i + y_i - b|}{\sqrt{1 + k^2}}$,式中 k 为直线的斜率,对于所有的像素点来说,它们与直线 L 的关系有以下三种:

- $d < -d_M \Rightarrow A_R = 0, A_L = 1;$
- $d > d_M \Rightarrow A_R = 1, A_L = 0;$
- $-d_M < d < d_M$, 则直线与像素 P 相交。

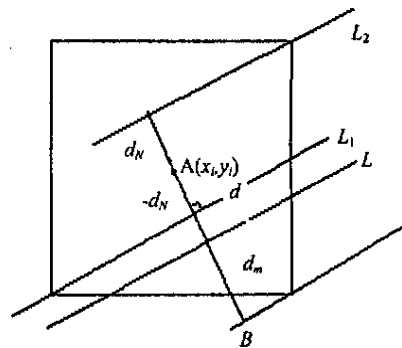


图 6 用于判断边缘与像素关系的变量
Fig. 6 Variables used to judge relationship between edge and pixel.

对于直线与方块相交的情况,还需有以下判断条件,参考图 6,画两条平行于直线 L 且经过方

利用上述方法可产生理想的边缘图像,实际上图 3 就是用上述算法产生的,从图中可以清晰地看到图像边缘灰度值的渐变过程。表 1 给出了图 3 图像的局部边缘灰度值,同样可以看到灰度值的变化情况。

6 结 论

利用本文方法可以产生理想边缘,产生的边

缘可用于亚像素算法精度的检验。本方法的优点是产生的图像完全没有噪声影响,因此可完全真实地检验算法的定位精度。用本方法产生的边缘参数是精确确定的,因此可以作为绝对基准对算法进行评价。对理想图像加入已知方差的噪声,则可精确评价算法的抗噪声能力,从而可对算法的固有精度和抗噪声能力进行全面的分析和评价。

参考文献:

- [1] Peter S. Optical super-resolution using solid-state cameras and digital signal processing [J]. *Opt. Eng.*, 1988, 27(7): 535 - 540.
- [2] Kisworo M, Venkatesh S. Modeling edges at subpixel accuracy using the local energy approach [J]. *IEEE Trans. on PAMI*, 1994, 16(4): 405 - 410.
- [3] 王建民, 浦昭邦. 提高图像测量系统精度的细分算法的研究 [J]. *光学精密工程*, 1998, 6(4): 44 - 50.
- [4] 吴晓波, 钟先信. 应用多项式插值函数提高面阵 CCD 尺寸测量的分辨力 [J]. *仪器仪表学报*, 1996, 17(2): 154 - 158.
- [5] 王庆有, 孙学珠. *CCD 应用技术* [M]. 天津: 天津大学出版社, 1996.
- [6] Lyvers E P, Mitchell O R. Precision edge contrast and orientation estimation [J]. *IEEE Trans. on PAMI*, 1988, 10(6): 927 - 937.
- [7] The Math Works Inc. *MATLAB User's Manual* (Z). 1997.
- [8] Hyde P D, Davis L S. Subpixel edge estimation [J]. *Pattern Recognition*, 1983, 16(4): 413 - 420.

Study of method for generating ideal edges

HE Zhong-hai, WANG Bao-guang, LIAO Yi-bai

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A method for generating an ideal edge line is introduced in detail. In subpixel edge extraction algorithm, the accuracy of subpixel algorithm without noise and the ability of the algorithm to resist noise under noisy circumstance should be considered and examined separately. The ideal edge introduced in this paper can be used to examine the subpixel algorithm. Based on the principle of imaging formation of CCD camera and the square aperture sampling theorem, a calculation method of gray level of boundary points is given. Furthermore, calculation formulas of boundary points' gray level are presented in a specific condition. It is convenient to generate an ideal edge using these formulas, which can be used in the validation of subpixel algorithm.

Key words: image measuring systems; gray level; calculation methods; square aperture sampling

作者简介: 贺忠海(1973 -), 男, 河北唐山人, 1994年毕业于合肥工业大学精密仪器系, 获工学学士学位, 1999年毕业于天津大学精仪学院, 获工学硕士学位, 现就读于天津大学精密学院, 博士研究生, 研究方向为近代光学测试技术, E-mail: zhhe@you.com.