

圆弧状边缘的亚像素定位方法研究

李自乐

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 精确确定图像边缘的位置对于图像测量非常重要。因此, 用于边缘精确定位的亚像素算法已被广泛研究。利用理想光条法, 比较了几种有代表性的亚像素算法对于圆弧状边缘的定位能力。通过实验得出, 定位对称的圆弧边缘, 重心法效果最好。

关键词: 亚像素; 边缘定位; 重心法; 灰度矩法; 插值法

中图分类号: TP391

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102711.0036

Research of Sub-pixel Location Methods in Circular Arc

LI Zi-le

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The precise image edge location was very important for image measurement. Therefore, the sub-pixel algorithm in edge precise positioning was widely researched. Through ideal light bar method, some representative sub-pixel algorithm were compared for the capability of positioning circular arc edge. The experiment showed that the center-of-gravity method had the best result for positioning the edge of a symmetrical arc.

Keywords: sub-pixel; edge position; centre-of-gravity method; gray moment method; interpolation method

1 引言

随着图像处理对边缘定位精度要求的不断提高,

像素级精度已经不能满足实际需求, 很多应用要求更高的精度。通常, 提高 CCD 摄像机分辨率是改善系统测量精度最直接的方法, 但这种方法受到硬件限

制,并且不是万能的。而另一方面,改善图像中目标定位的精度,在硬件分辨率不变的情况下,就相当于提高了测量精度^[1]。而且,利用软件提高测量精度具有简单有效、设备成本低的优点,因此,直接影响整个测量精度的边缘定位算法已被广泛地研究。

数字图像是将物体投射到二维图像平面上、然后进行离散化取样量化而形成的,由于离散取样为非理想采样,存在有限的灰度平均效应,因此,即使物体的亮度分布为较理想的阶跃分布,系统的最终输出也是一个由高到低或由低到高的渐变过程。另外,CCD敏感元不但接收直接照射到自身感光面的光能,还能够感受照射到相邻感光元的光能,尤其是在图像边缘附近。感光元所接收的来自于物体的反射(或透射)和背景的光特性是不同的,造成CCD感光部分对阶跃边缘的响应信号存在由明变暗(或由暗变明)的一个渐变过程。边缘点的位置恰好在这渐变的过程中斜率最大的位置,因此,可以采用灰度矩法、重心法以及插值法获得边缘点的亚像素级位置。

这些方法都有各自的优缺点和适用范围,现有的对这些算法定位能力的结论^[2-3],主要都是以直线边缘作为目标对象得出的。本文主要针对边缘检测中另一种常见的边缘——圆弧状边缘分析几种算法的定位能力。

本文首先介绍几种亚像素细分算法的特点,然后针对实际光带灰度截面呈余弦分布的情况,做出理想光条,通过单一因素法定量定性分析灰度矩法、多项式插值法及重心法的定位精度、抗噪能力。

2 常用的亚像素细分算法

2.1 灰度矩法

一维理想边缘模型可以认为是由一系列具有灰度 h_1 的像素与一系列具有灰度 h_2 的像素相接而构成的,实际边缘由一些离散的点构成^[4-6]。根据被测目标的矩特性在成像前后保持不变的原理,其前3阶矩

满足下式:

$$\bar{m}_i = \sum_{j=1}^2 p_j h_j^i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^2 g_j^i \quad i=1, 2, 3 \quad (1)$$

其中, n 为实际整个边缘所占的像素总数,进而有 $p_1 = \frac{k}{n}$ 。这3个方程中像素序列的灰度值已知,只包括 h_1 、 h_2 、 k 3个未知数,求解可得:

$$p_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \bar{s} \sqrt{\frac{1}{4 + \bar{s}^2}} \right) \quad (2)$$

$$h_1 = \bar{m}_1 - \bar{\sigma} \sqrt{p_1 / p_2} \quad (3)$$

$$h_2 = \bar{m}_1 + \bar{\sigma} \sqrt{p_1 / p_2} \quad (4)$$

$$k = np_1 - \frac{1}{2} = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{\bar{s}}{4 + \bar{s}^2} + \frac{n-1}{2}} \quad (5)$$

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

2.2 插值法

基于多项式的插值法需要先对灰度图求梯度,由于边缘的亚像素位置待求,因而边缘的灰度梯度方向未知,而已知的边缘点的灰度梯度方向是可以得到的,因此,用已知的边缘点的梯度方向近似替代未知的亚像素点的梯度方向,并在此方向上进行插值以得到边缘的亚像素位置^[7-8]。

运用 Sobel 算子计算梯度图像:

$$R(i, j) = |f(i+1, j+1) + 2f(i, j+1) + f(i-1, j+1) - f(i-1, j-1) - 2f(i, j-1) - f(i+1, j-1)| + |f(i-1, j-1) + 2f(i-1, j) + f(i-1, j+1) - f(i+1, j+1) - 2f(i+1, j) - f(i+1, j-1)| \quad (6)$$

对于已确定的边缘点 (m, n) ,在梯度图像 $R(i, j)$ 的 X 方向上取3点 $R(m-1, n)$ 、 $R(m, n)$ 、 $R(m+1, n)$,以这3点的梯度幅值作为函数值, $m-1$ 、 m 、 $m+1$ 为插值基点,代入则为二次多项式插值函数 $\phi^2(x)$,并令 $\frac{d\phi^2(x)}{dx} = 0$;

同理,在 Y 方向上取3点 $R(m, n-1)$ 、 $R(m, n)$ 、 $R(m, n+1)$ 进行相同的操作,经推导可得亚像素边缘坐标 (X_e, Y_e) 为:

$$\begin{cases} X_e = m + \frac{R(m-1, n) - R(m+1, n)}{2[R(m-1, n) - 2R(m, n) + R(m+1, n)]} \\ Y_e = n + \frac{R(m, n-1) - R(m, n+1)}{2[R(m, n-1) - 2R(m, n) + R(m, n+1)]} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} R(m,n) > R(m-1,n) \text{ 且 } R(m,n) > R(m+1,n) \\ R(m,n) > R(m,n-1) \text{ 且 } R(m,n) > R(m,n+1) \end{cases} \quad (8)$$

如果式 (8) 成立, 则上述亚像素细分算法理论上可获得较高的边缘定位精度。

2.3 重心法

重心法是基于物理学中刚体在 x 轴的质心演化而来的^[9-10]。设 x 轴上的 n 个离散质点的坐标为 x_i , 质

量为 m_i , 则 n 个离散质点的质心为 $x_c = \sum_{i=1}^n m_i x_i / \sum_{i=1}^n m_i$ 。

在图像的亚像素级边缘提取中, 亚像素点可以看成是以灰度或灰度的导数为权值的加权重心, 重心法公式如下:

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^n I'(x_i) x_i}{\sum_{i=1}^n I'(x_i)} \quad (9)$$

$I'(x_i)$ 为各像素点的灰度值, 此式是对一阶阶跃边缘分析, 因此导函数的最大值点对应阶跃函数的边缘。

3 理想光条法

建立一个理想模型, 然后用几种经典亚像素算法, 包括灰度矩法、二次多项式插值法及重心法分别提取其边缘, 并与理想光条的实际边缘比对, 分析几种算法的定位能力, 在此基础上, 在理想图像中加入空间频率和统计参数可调的随机噪声信号, 重复上面的方法, 分析几种算法的抗噪能力。

根据实际光带灰度截面呈余弦分布的情况做出的理想光条, 它的中心边缘是圆心坐标 (50, 50)、半径为 50 的一段圆弧。理想光条、理想光带波形及加入噪声的余弦波图如图 1 所示。

理想光条的真实边缘点位置确定, 通过程序将算法定位出的边缘位置提取出来, 利用统计的方法, 计算几种算法定位出的边缘点位置和真实边缘点位置的差值来说明算法的定位能力。引入误差标准差和误差均值两个统计量来评价算法的定位精度, 误差均值反映了定位结果较真实边缘的均匀偏离程度, 计算方法为式 (10); 误差标准差 (STD) 反映的是各

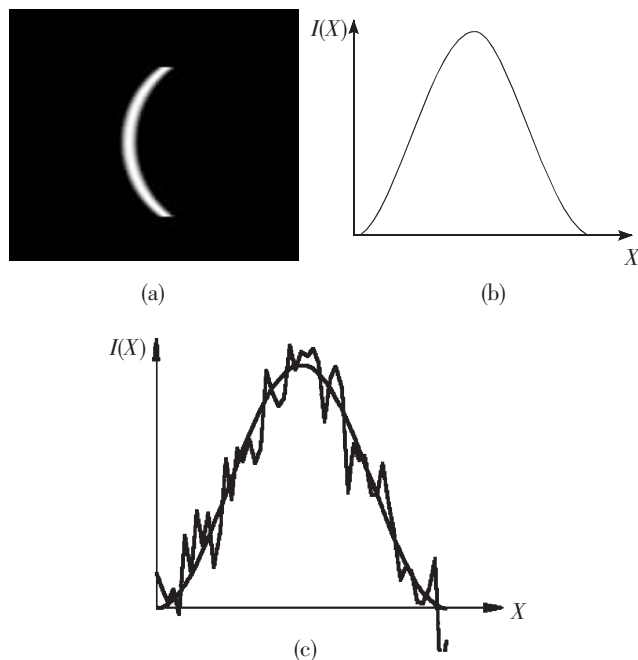


图 1 理想光带及其波形图

误差值对误差均值的偏离程度, 计算方法为式 (11):

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad (10)$$

$$\text{STD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}} \quad (11)$$

4 实验

4.1 算法自身定位精度分析

在 Windows 系统下, 用 C++ Builder5.0 软件编制算法程序, 理想光条图片背景灰度为 0。

定位结果中, 图像横坐标方向放大了 20 倍, 为了使图像比例好一些, 纵坐标放大了 5 倍。图像横向放大 20 倍后, 20 个像素点的距离才相当于原图一个像素点宽, 这样就相当于将图像分辨率提高到 1/20 个像素的级别, 即亚像素级。每种算法都设定了 3 种阈值 (0, 50, 90), 用来探讨算法对图像亮度的适用范围。由于插值法具有均化效果, 利用分阈值讨论其亮度适应能力没有太大意义, 故对插值法只采用 0 阈值。

定位结果中白点是放大后的理想光条真实边缘点的亚像素级位置,绿、红、黄点分别为每种算法阈值为0、50、90时的定位结果。阈值用于确定参加亚像素算法的像素点数量,阈值为0时,所有灰度值>0的点都可以参加计算,在理想图像中,背景没有噪声,因此,0阈值时也可以定位出边缘。灰度矩法、重心法、插值法定位结果如图2所示。用插值法做亚像素级边缘检测时,先将边缘定位到像素级,再利用像素点的信息定位到亚像素级,可以利用像素点的灰度值信息做插值,还可以利用像素点的梯度值信息做插值。因此有两种结果。

由于余弦波梯度值有一个极大值和一个极小值,这两个值大小相等,方向相反,但程序中使用的是梯度绝对值,故有两个起点,从而图2(d)会有两个边缘。图2(a)和图2(b)中左上侧数据依次是绿、红、黄3个阈值定位时的误差标准差值和绿、红、黄3个阈值定位时的误差均值。图2(c)和图2(d)中左上侧第一行数据是误差标准差值,第二行是误差均值。将其整理成表1(精确到小数点后3位)。表中数据的亚像素级单位为1/20个像素。

表中数据均为程序处理结果。由上述结果可见

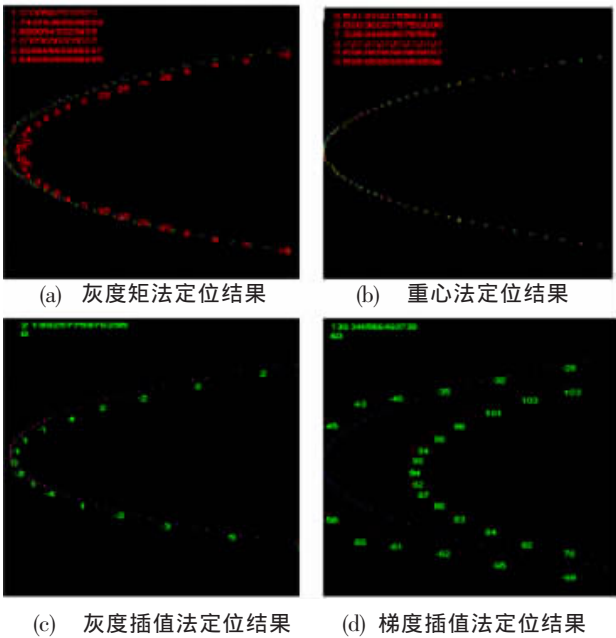


图2 算法精度分析结果

重心法和灰度矩法定位边缘截面符合对称余弦波分布的理想光条图像时,最大定位误差均值分别为0.727个亚像素级单位和2.667个亚像素级单位。

表1中重心法在阈值为50时,出现了一个极小的误差标准差。分析其原因,可能是由于阈值为50时,参加计算的点完全对称,达到了误差均化的效果,这属于特殊情况,不具有一般意义。理论上,对于理想图像,阈值越小,参加定位的点越多,定位误差应该越小,但由表1可见,重心法的结果与理论分析正好相反,阈值越大,误差均值却越小。这是因为实际边缘截面分布是离散的,并不完全对称,重心法程序中使用的是相对坐标,因而每个像素点灰度值的权重就不同,左侧点权重大,右侧点的权重小,导致重心法产生误差。阈值越小,参与计算的点越多,可能包含的不对称点也越多,产生的误差值就会越大。灰度矩法阈值为50时,误差均值比阈值为90时大。经分析,这和离散的边缘截面分布波形有关,阈值50正好处在灰度变化较大的区域,包含了一个灰度值变化很大的点,很难均化掉所致。

表2中,灰度插值法的误差均值极小但误差标准差却很大。究其原因,插值法计算亚像素级边缘仅利用3点信息,每个点都能至少参与三次插值运算,这在一定程度上起到了均化效果。因此插值法定位误差中,大小相等的正负误差数量相近,大部分误差被抵消,所得误差均值极小。表2中,梯度

表1 不同阈值时的误差标准差及误差均值

	误差标准差		误差均值	
	灰度矩法	重心法	灰度矩法	重心法
绿(0)	1.000 1	0.531 0	2.000 0	0.727 2
红(50)	1.743 8	0.000 1	2.666 7	0.666 7
黄(90)	1.680 1	1.326 0	2.646 4	0.565 7

表2 插值法的误差标准差及误差均值

	灰度插值法	梯度插值法
误差均值	0.000 2	60.000 0
误差标准差	2.199 3	130.340 6

插值法的误差均值及误差标准差都比其他算法高很多,这是因为在图 2(d)中,用梯度插值法定位时,出现了两条定位边缘,两个边缘较真正边缘都有较大的原理误差,这些本身就很大的误差的累加值必然很大。

4.2 算法抗噪能力分析结果

研究亚像素边缘定位算法的性能,除了考察算法自身定位精度外,还要分析算法的抗噪能力。具体做法是在 C++ Builder 中编写噪声程序,用该程序处理理想光条图像,则得到含有噪声的理想光条图像。此时,再用几种亚像素算法对图像做边缘定位。定位结果如图 3 所示。

图 3(a)、图 3(b)为重心法定位结果,其中,图 3(a)绿、红、黄阈值分别为 0、50、90;图 3(b)绿、红、黄阈值分别为 20、50、90;图 3(c)为灰度矩法定位结果,其中绿、红、黄点阈值为 20、50、90;图 3(d)为

插值法定位结果,其中绿、红、黄阈值分别为 20、50、90。

可以看到图 3(a)中,红点和黄点还能很好地定位,但阈值为 0 的绿线却离散了,这是由于在理想光条图中加入噪声后,图像背景亮度不再为 0,而程序设定的起始点是该点灰度值 >0 ,左边点灰度值 <1 ,中间点是连着两点值都 >0 ,末点值 >0 ,其后一点值小于 1。满足上述要求的点,算法都会处理,因此,绿线离散了。所加噪声最大灰度值为 15,考虑将绿点的阈值提高到 20,如图 3(b)所示,可以看到提高阈值后,绿线又有了比较好的定位精度。由图 3(c)灰度矩法对含有噪声的理想光条图像的定位结果可以看到,灰度矩法在阈值为 20 时,还是不能很好地定位,这说明灰度矩法较重心法抗噪范围小,同时,也说明重心法较灰度矩法的亮度适应能力强。由图 3(d)可以看出,插值法在 3 种阈值时都不能正常定位,也就是说插值法对灰度值 >90 的点进行处理时,都不能正常工作,可见其抗噪能力不好。

5 结 论

本文采用理想光条法分析了灰度矩法、插值法和重心法的自身定位精度和抗噪能力。重心法的误差均值和误差标准差都很小,定位精度最高;灰度矩法其次;插值法虽然有很好的均化效果,但误差标准差很大。在算法抗噪能力方面,重心法的抗噪能力最好,最小阈值提高到 20 后,几种阈值都有很好的定位;而灰度矩法在最小阈值提高到 20 时,还是不能很好地定位;其他两种阈值时定位效果都较好;插值法几种阈值下都不能很好地定位,其抗噪能力最差。另外,还得出重心法对图像背景亮度的适应能力较灰度矩法好的结论。

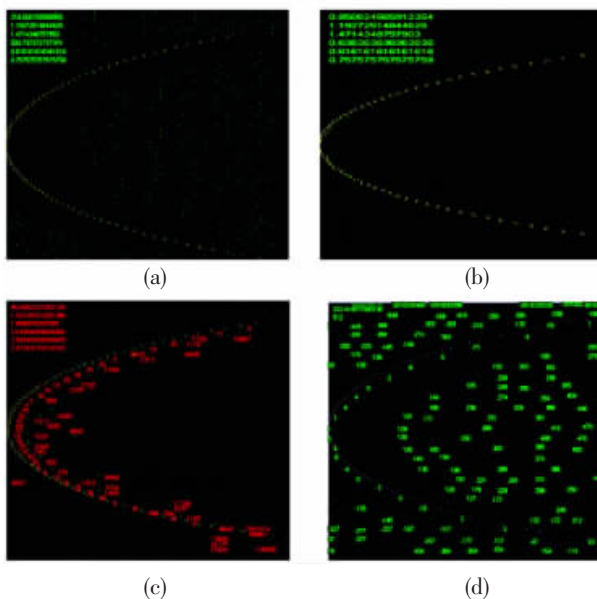


图 3 亚像素算法抗噪能力分析结果

参考文献

- [1] 洪海涛, 张守愚, 俞朴. 复杂零件参数的图像测量方法[J]. 机械工艺师, 2000, 22(1): 22-24.
- [2] 廖常俊, 骆德渊, 秦东兴, 等. 一种用于零件定位系统的亚像素边缘检测方法[J]. 冶金自动化, 2004, 28(z1): 948-950.
- [3] 高春甫, 贺新升, 唐可洪, 等. 随机纹理图像的色差检测[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1999-2003.

- [4] Tabatabai A J, Mitchell O, Robert. Edge location to subpixel values in digital imagery[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1984, 26(2): 188-201.
- [5] Lyvers E P, Mitchell O R. Subpixel measurements using a moment based edge operator[J]. *IEEE Trans. On PAMI*, 1989, 11(12): 1293-1 309.
- [6] 张学成, 杨敏华, 张英杰. 灰度矩边缘精确定位法的测量应用探讨 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(11): 1446-1449.
- [7] 吴晓波, 钟先信. 应用多项式插值函数提高面阵 CCD 尺寸测量的分辨率[J]. 仪器仪表学报, 1996, 7(2): 154-159.
- [8] 李庆利, 张少军, 李忠富. 一种基于多项式插值改进的亚像素细分算法 [J]. 北京科技大学报, 2003, 25(3): 280-283.
- [9] He Zhonghai, Wang Baoguang, Liao Yibai. Subpixel algorithm using a curve fitting method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, 24(2): 195-197.
- [10] 章毓晋. 图像工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

作者简介: 李自乐 (1983-), 女, 汉族, 内蒙赤峰人, 硕士, 实习研究员, 2009年于吉林大学获得硕士学位, 主要从事机器人技术、图像处理的研究。E-mail: zlijlu@yeah.net

《发 光 学 报》

——中文核心期刊 (物理学类; 无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊, 曾于1992年, 1996年, 2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”, 并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年; 美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年; 美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年; 日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文; 2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊; 2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中, 《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国[JP]知识资源总库·中国科技精品库》。

本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。《发光学报》为双月刊, A4开本, 144页, 国内外公开发行。国内定价: 40元, 全年240元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

电 话: (0431) 86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

<http://www.fgxb.org>