

基于高斯积分曲线拟合的亚像素边缘提取算法

段振云, 王 宁, 赵文辉, 赵文珍
(沈阳工业大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 针对传统边缘提取算法定位精度低、对噪声敏感等缺点,提出一种基于高斯积分曲线拟合的亚像素边缘提取算法。通过曲面插值求取像素级边缘法截线上各离散点的灰度值,再进行高斯积分曲线拟合,寻找高斯积分曲线的均值点坐标,实现亚像素边缘的精定位。用量块直线边缘进行实验,并与现有亚像素边缘提取算法比较,实验证明基于高斯积分曲线拟合的亚像素边缘提取算法定位精度较高,可以达到 1 μm ,且算法可靠性高、计算速度快,能够用于高精度测量。

关键词: 计量学; 边缘提取; 高斯积分; 亚像素; 法截线; 视觉测量
中图分类号: TB92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1158(2016)04-0371-04

Algorithm of Sub-pixel Edge Detection Based on Gauss Integral Curve Fitting

DUAN Zhen-yun, WANG Ning, ZHAO Wen-hui, ZHAO Wen-zhen
(School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China)

Abstract: Aiming at the low accuracy in localization and sensitivity to noise in traditional edge detection algorithm, an algorithm of sub-pixel edge detection based on Gauss integral curve fitting is proposed. The gray value of discrete points on pixel edge normal section line is calculated with surface interpolation, and fitting Gauss integral curve, achieving accurate location of sub-pixel edge by searching the mean point of Gauss integral curve. Experiment with the gauge block line edge, and comparing with the existed sub-pixel edge detection algorithm, the experiment show that algorithm of sub-pixel edge detection based on Gauss integral curve fitting has high location accuracy, and can reach 1 μm , it also has high reliability and speed, and can be used for high precision measurement.

Key words: metrology; edge detection; Gauss integral; sub-pixel; normal section line; vision measurement

1 引 言

亚像素定位作为视觉测量的关键技术之一,近年来得到了广泛研究,根据计算原理不同,主要可分为矩方法、拟合法和数字相关法等几类^[1~5]。其中拟合法是在最小均方误差的准则下,对图像中目标的灰度或坐标进行数学模型拟合,实现对目标的亚像素定位。由于拟合处理可以滤除噪声,因此这种方法的定位精度较高。目前 Facet 曲面模型是一种广泛使用的亚像素边缘提取方法,其基本原理是对

离散数字图像的灰度进行曲面拟合,利用连续曲面的特征确定亚像素边缘位置^[6~8]。该模型是对像素级边缘点对称邻域内的所有像素点进行灰度曲面拟合,拟合像素点多数位于图像的背景和前景,只有少数点位于边缘过渡带,求出的亚像素边缘误差较大,且计算速度较慢。

本文提出一种基于高斯积分曲线拟合的亚像素边缘提取算法,是对像素级边缘进行曲线拟合,并获取其法向;通过曲面插值得到像素级边缘法截线上各离散点的灰度值,再进行高斯积分曲线拟合;通过计

收稿日期:2015-09-18; 修回日期:2016-01-29
作者简介:十二五国家科技支撑计划(2014BAF08B01)
作者简介:段振云(1971—),男,河南新乡人,沈阳工业大学教授、博士生导师,主要研究方向为复杂曲面加工技术、视觉测量等。
王宁为本文通讯作者。wangningcom@126.com

算高斯积分曲线的均值点坐标确定边缘的亚像素位置,实现边缘的精定位,从而提高测量系统的精度。

2 边缘特征

在硬件条件不变的情况下,通过软件提高系统分辨率的方法,称为亚像素边缘提取。常见的图像边缘可分为阶跃状边缘和屋顶状边缘两种,本文所研究的测量对象的边缘属于单边阶跃状边缘。

实际透镜成像系统受到调制传递函数截止频率的制约,实际图像可以看作是成像系统的点扩展函数与理想图像函数的卷积。成像系统的点扩展函数满足高斯分布,理想图像函数为一维理想阶跃边缘模型,经透镜成像后,图像实际边缘如图 1(a)所示,灰度值的渐变部分为边缘引起的灰度值变化,灰度值较小的为前景(测量对象),灰度值较大的为背景。实际边缘的一阶导数分布与成像系统的点扩展函数分布一致,如图 1(b)所示^[9]。

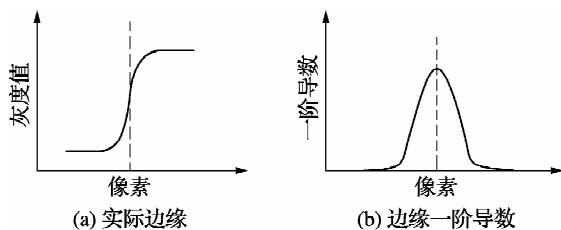


图 1 阶跃边缘灰度分布

由于 CCD 为光学积分元件,根据方形孔径采样定理可知,在固定的时间间隔内它以固定大小的面积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,因此像素输出的灰度值是像素感光面上各部分光强综合作用的结果,采样结果为一个表示像素点灰度值的离散矩阵^[10]。

3 亚像素边缘提取算法

本文算法是在已获取图像像素级边缘的基础上进行亚像素边缘提取。亚像素边缘点位于像素级边缘点的法线方向,为了实现精确定位,利用曲面插值的方法求取像素级边缘法截线上各离散点的灰度值,并进行高斯积分曲线拟合,通过计算高斯积分曲线的均值点坐标确定边缘的亚像素位置。

2.1 高斯积分曲线模型建立

由前文分析,图像的单边阶跃状边缘灰度值可用高斯积分曲线模型表示,即

$$P(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (1)$$

式中: t, μ 分别为法截线上离散点的坐标和亚像素边缘点到像素级边缘的距离。

直接对该积分表达式求解比较困难,为了求出高斯积分曲线的均值点,将公式(1)进行变换,令 $u = (t - \mu)/\sigma$, 可得

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{t-\mu}{\sigma}} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (2)$$

将图像的灰度值进行归一化处理,即

$$\varphi_i(t) = \frac{P(t)}{K} = \frac{1}{K} \varphi\left(\frac{t_i - \mu}{\sigma}\right)$$

式中 K 为背景与前景的灰度差。

根据标准正态分布表,由 $\varphi_i(t)$ 可得到式(2)中的积分上限 a_i , 即

$$a_i = (t_i - \mu)/\sigma$$

由最小二乘法拟合的最小均方差原则,可得

$$\sum_{i=-N}^N (t_i - \mu - a_i \sigma)^2 = E \quad (3)$$

根据多元函数求极值的必要条件,将 E 分别对 μ, σ 求偏导数,其偏导数等于零,即

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial \mu} = 2 \sum_{i=-N}^N (t_i - \mu - a_i \sigma) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial \sigma} = 2 \sum_{i=-N}^N (a_i t_i - a_i \mu - a_i^2 \sigma) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

求解可得

$$\begin{cases} \mu = \bar{t}_i - \bar{a}_i \cdot \frac{\bar{t}_i \cdot \bar{a}_i - \bar{t}_i \bar{a}_i}{\bar{a}_i \cdot \bar{a}_i - \bar{a}_i^2} \\ \sigma = \frac{\bar{t}_i \cdot \bar{a}_i - \bar{t}_i \bar{a}_i}{\bar{a}_i \cdot \bar{a}_i - \bar{a}_i^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\bar{t}_i, \bar{a}_i, \bar{t}_i \bar{a}_i, \bar{a}_i^2$ 分别为 $t_i, a_i, t_i a_i, a_i^2$ 的算术平均值。

μ 为法截线上亚像素边缘点到像素级边缘点的法向距离,如图 2 所示,通过转换即可得到亚像素边缘点的坐标位置。将各亚像素边缘点进行拟合,即可获得被测对象的亚像素边缘。

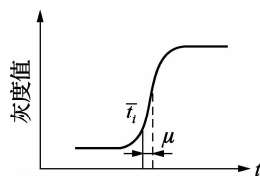


图 2 法截线高斯积分曲线模型

2.2 算法实现

算法实现过程如下:

(1) 像素级边缘的拟合与离散

图像的像素级边缘是一系列离散点,可表示为

$(x_i, y_i), i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。为了获取其法线方向,对其进行最小二乘法三次曲线拟合。将拟合后的曲线按一定的弧长进行离散,获得像素级边缘点,并根据拟合曲线确定各像素级边缘点的法截线。

(2) 高斯积分曲线拟合点选取

在像素级边缘拟合曲线的的两侧各求取*i*条法向等距线,为了获得较为准确的亚像素边缘位置,要求法向等距线涵盖整个边缘过渡带,并兼顾计算量,考虑到亚像素边缘偏离像素级边缘的位置较小,各等距线之间的间隔采用等差数列,第*i*条法向等距线与像素级边缘点之间的距离可表示为

$$l(i) = a_0 \times i + \frac{i(i-1)}{2}d \tag{6}$$

式中,*a*₀和*d*分别为等差数列的首项和公差。

像素级边缘点处的法截线与各条法向等距线的交点即为高斯积分曲线的拟合点。

(3) 拟合点赋灰度值

利用贝塞尔曲面插值的方法对高斯积分曲线拟合点赋初始灰度值,进而沿法向等距线的切线方向对拟合点的初始灰度值进行高斯滤波,得到高斯积分曲线拟合点的最终灰度值。

(4) 高斯积分曲线拟合

为了准确提取亚像素边缘,将法截线上的离散点的灰度值按照高斯积分曲线模型拟合。由于高斯积分曲线中的均值点就是梯度最大点,因此由式(5)求出高斯积分曲线的均值*μ*,即为沿法线方向亚像素边缘点和像素边缘点之间的距离,进而可以确定对应的亚像素边缘坐标。

4 实 验

按 JJG 2056—90《长度计量器具(量块部分)检定系统》规范,1 mm ~ 10 mm 的 1 等量块测量面的精度可以达到 0.05 μm,且边缘简单,有利于高精度提取边缘,因此分别使用本文算法和 Facet 曲面拟合算法提取 1 等量块的亚像素边缘,比较两种方法提取的亚像素边缘,以验证本文算法的有效性。

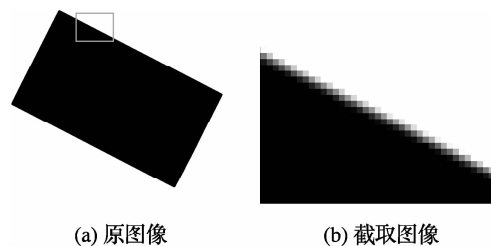


图3 量块图像

获取的 10 mm 量块图像如图 3(a)所示,将量块上边缘的一部分进行局部放大,如图 3(b)。采用本文算法进行边缘提取,在拟合后的像素级边缘两侧对称各取 7 条法向等距线,等距线之间的间隔为首项 0.3,公差 0.1 的等差数列,则对应于像素级边缘上某点法截线上的离散点为 15 个。拟合后的像素级边缘上某点的像素坐标为(741.626, 294.636),其法向的方向角为 63.01°,该点对应法截线上离散点的信息如表 1 所示,其高斯积分拟合曲线如图 4 所示。

表1 像素级边缘点法截线上离散点信息

序号	<i>t</i> /像素	灰度值	图像坐标/像素
1	-4.2	11.439	(739.721, 298.379)
2	-3.3	13.756	(740.129, 297.577)
3	-2.5	19.637	(740.492, 296.864)
4	-1.8	34.192	(740.810, 296.240)
5	-1.2	58.134	(741.082, 295.706)
6	-0.7	86.939	(741.309, 295.260)
7	-0.3	114.963	(741.490, 294.903)
8	0	136.982	(741.626, 294.636)
9	0.3	158.789	(741.762, 294.369)
10	0.7	186.839	(741.944, 294.012)
11	1.2	214.919	(742.170, 293.567)
12	1.8	238.123	(742.443, 293.032)
13	2.5	250.363	(742.760, 292.408)
14	3.3	254.562	(743.123, 291.695)
15	4.2	254.997	(743.531, 290.893)

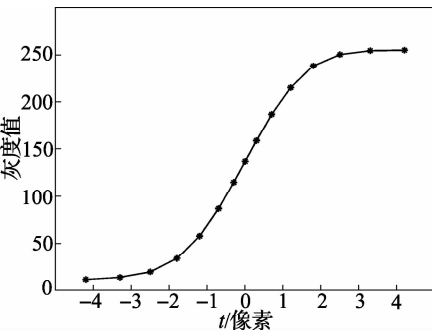


图4 法截线上高斯积分拟合曲线

求得高斯积分拟合曲线的均值为 -0.168 像素。根据其像素级边缘坐标和法向方向角,可求得其对应的亚像素级边缘点坐标为(741.550, 294.786)。

分别使用本文算法和 Facet 曲面拟合算法进行亚像素提取的结果如图 5 所示。可以看出两种方法提取的亚像素边缘具有一致性,验证了本文算法的有效性。通过图 6 所示的边缘点到拟合直线的距离可以看出,采用 Facet 曲面拟合算法提取的亚像素边缘

局部跳跃量较大,直线度误差为 6 μm ,采用本文算法提取的亚像素边缘比较平滑,直线度误差为 1 μm 。

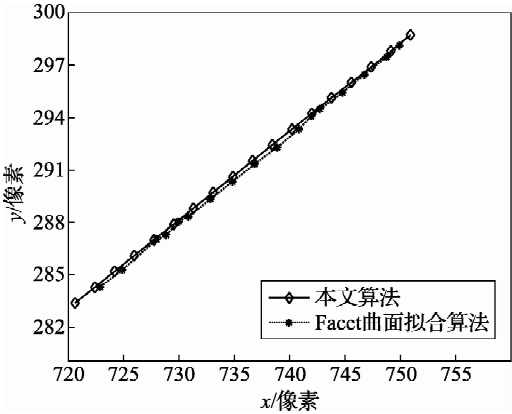


图 5 亚像素边缘

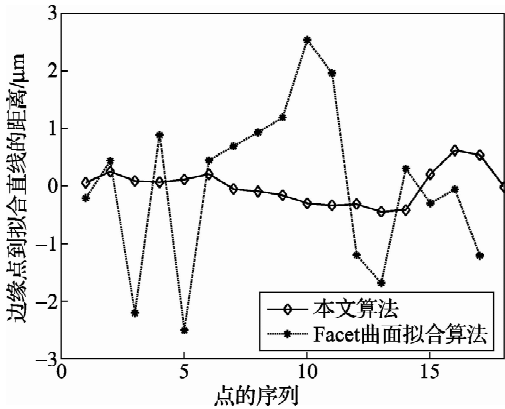


图 6 边缘点到拟合直线的距离

为了验证本文算法的测量精度,对测量系统标定后,多次测量同一量块不同位姿时的尺寸,使用本文算法和 Facet 曲面拟合算法提取量块直线边缘。对于其中一条量块边缘进行最小二乘法直线拟合,并计算另一条边缘上各测量点到拟合直线的距离,以所有距离的平均值作为量块的测量尺寸,将理论尺寸和测量尺寸进行比较,得到测量误差。两种算法的测量误差结果如表 2 所示。

表 2 测量误差比较 μm		
测量图像	本文算法	Facet 曲面算法
位姿 1	-0.335 1	1.923 8
位姿 2	2.473 2	3.240 2
位姿 3	1.055 4	3.614 2
位姿 4	0.923 8	2.675 2
位姿 5	1.653 7	2.485 8
位姿 6	-0.398 1	1.852 3
平均值	0.895 5	2.631 9

由表 2 可知,采用本文算法提取亚像素边缘可靠性高,与 Facet 曲面拟合算法相比测量误差较小。

4 结 论

(1)考虑到边缘法向和切向的各向异性,对像素级边缘点进行曲线拟合,将边缘的切向和法向分离,沿切向进行高斯滤波,达到保持图像边缘切向平滑和法向陡峭的双重目的。

(2)对边缘法截线上的离散点灰度值进行高斯积分曲线拟合,通过求均值点确定亚像素边缘位置,解决了根据梯度确定亚像素边缘时,对边缘点处灰度值变化较为敏感的问题,具有较好的抗噪性,提高了边缘提取精度。

(3)高斯积分曲线拟合算法采用的是曲线拟合,而 Facet 曲面拟合算法采用的是曲面拟合,计算量减少,因此本文算法的计算速度较快。

本文算法根据像素级边缘拟合曲线确定法向;通过曲面插值得到像素级边缘法截线上各离散点的灰度值,再进行高斯积分曲线拟合;最后计算高斯积分曲线的均值点坐标确定边缘的亚像素位置,实现边缘的精定位。该算法能够满足高精度测量的要求。

[参 考 文 献]

[1] 潘兵,续伯钦,陈丁,等. 数字图像相关中亚像素位移测量的曲面拟合法[J]. 计量学报,2005,26(2):128-134.

[2] Zhao P, Ni G Q, Pu Z B. Simultaneous perimeter measurement for multiple planar objects[J]. *Optics and Laser Technology*, 2009, 41(2): 186-192.

[3] 刘国栋,刘炳国,陈风东,等. 亚像素定位算法精度评价方法的研究[J]. 光学学报,2009,29(12):3446-3451.

[4] 李帅,卢荣胜,史艳琼,等. 基于高斯曲面拟合的亚像素边缘检测算法[J]. 工具技术,2011,45(7):79-82.

[5] 段振云,张思佳,赵文辉. 基于机器视觉的齿轮齿廓偏差测量[J]. 计量技术,2014,(6):7-9.

[6] 马睿,曾理,卢艳平. 改进的基于 Facet 模型的亚像素边缘检测[J]. 应用基础与工程科学学报,2009,17(2):296-302.

[7] 王凯,张定华,黄鹤龄,等. 基于 3-D Facet 模型的亚像素边缘检测算法研究[J]. 机械科学与技术,2005,24(7):865-868.

[8] Carsten Steger, Markus Ulrich, Christian Wiedemann. Machine vision algorithms and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 204-228.

[9] 于起峰,尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京:科学出版社,2009.

[10] 贺忠海,王宝光. 利用曲线拟合方法的亚像素提取算法[J]. 仪器仪表学报,2003,24(2):195-197.