

文章编号 1004-924X(2013)10-2728-08

应用像素邻接特性分析的激光边缘图像修复

谭建平^{1,2}, 王 宪^{1,2*}

(1. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083;

2. 中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要:针对现有边界提取方法用于复杂工业环境的不足,提出了一种应用像素邻接特性分析的光斑边缘图像修复方法。首先,通过对边缘图像的距离变换和连通分量标记得到一张标号图像,该图像把与最近边缘距离低于某一数值的背景像素标注为边缘候选点,其他背景像素标注为独立的连通区域。然后,依据真实边缘的邻接特性对候选边缘候选点重标号,实现断裂边缘的连接。最后,从邻接特性的角度对噪声进行分类并去除,从而完成激光边缘图像的修复。实验结果表明:该方法能有效修复 8 pixel 的边缘缝隙并去除较大的噪声;引入的中心定位均方根(RMS)误差为 0.05 pixel,峰值(PV)误差为 0.086 pixel,稳定地保持在较低的水平;单次图像修复耗时小于 130 ms,实时性较好;能用于工业在线中心定位检测。

关键词:计算机视觉;图像修复;边缘检测;在线监测;中心定位

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132110.2728

Laser edge image inpainting based on pixel adjacency analysis

TAN Jian-ping^{1,2}, WANG Xian^{1,2*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. State Key Laboratory of High Performance and Complex Manufacturing,

Central South University, Changsha 410083, China)

* Corresponding author, E-mail: 15111388435@163.com

Abstract: As existing edge extracting method has its drawbacks in complex industrial environments, a laser edge image inpainting method based on pixel adjacency analysis is presented. The first step of the method is to obtain a label image by distance conversion and connected component mark for an edge image. In the label image, the background pixels whose minimum edge distances are less than a certain value are marked as edge candidate points while the rest background pixels are marked as independent connected regions. The second step is to re-label the edge candidate points based on the adjacency of real edge to connect the broken edges. And the final step is to categorize the noises as per adjacency and remove them respectively to inpaint the laser edge image. The experimental results indicate that this method can effectively inpaint a 8-pixel edge gap and remove larger noises; the introduced root-mean-square (RMS) error of centering measurement is 0.05 pixel, while the peak value(PV) error is 0.086 pixel, which

收稿日期:2013-02-28;修订日期:2013-04-01.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2009ZX04005-031)

show a steadily low value. Moreover, it takes less than 130 ms for an image to be inpainted one time in real-time. This method is applicable to industrial online centering measurement.

Key words: computer vision; image inpainting; edge detection; online monitoring; centering location measurement

1 引言

近年来,计算机视觉技术在工业测试领域的应用越来越多。在大型挤压机活动部件五自由度实时监测系统^[1]中,快速、稳定、准确的光斑边界提取是机器正常运行的一个非常重要的步骤。环境复杂多变的工业现场中存在石墨粉、玻璃屑等锯屑,另外,外界光照条件的变化,以及激光成像的散斑和散粒噪声均有可能造成边缘提取失败。125MN 挤压机中心在线监测系统^[2]的实际应用表明,系统长期工作的情况下,还会使激光束质量下降及检测装置密封性能下降,这将导致边缘检测图像上存在较大的虚假边缘和边缘断裂现象,从而,进一步增加准确提取光斑边界的难度。

近年来,国内外学者对在干扰条件下获得较高的边界提取精度进行了广泛而深入的研究。这些工作大体上可分为三类:第一类是提高边缘检测性能的方法,如针对传统边缘检测方法在弱照明条件下无法正常检测的问题,曹万鹏^[3]等提出通过与照明无关的小波多尺度相乘边缘检测方法,CHEN^[4]等提出了一种基于形态学伪 top-hat 变换的边缘检测算法,上述方法均可提高弱照明条件下边缘检测的成功率。ZHAO^[5]等提出了一种基于高斯多尺度理论的边缘检测算法,较传统的边缘检测算法具有更高的边缘检测精度和更强的噪声抑制能力。第二类是研究原始检测图像的噪声抑制及增强方法,如董吉辉^[6]等在分析激光成像噪声特性的基础上,提出了通过组合数值滤波器来降低激光散斑对边界提取的影响。付树军^[7]等提出了一种基于自适应非线性扩散滤波的图像增加方法,它通过对原始检测图像进行边缘锐化和锯齿伪像去除,从而提高边缘检测精度。上述两类研究虽可在一定程度上提高干扰条件下边缘检测的正确率,但用于工业在线检测时,仍无法避免边缘检测失败的情况。第三类是边缘图像的修复方法,如针对检测低对比度图像时边缘容易断裂的问题,邓世超^[8]等提出了一种应用灰度

等高线的边缘连接方法,该方法在金相组织的封闭边缘提取的应用中得了很好的效果。Frank Y S^[9]提出了一种自适应形态学的边缘连接方法,在一定程度上提高了形态学边缘连接方法的边缘保持能力。但上述边缘修复方法均不适合在线检测,且对于存在较大噪声的边缘检测图像,目前没有好的修复方法。

总之,上述研究各有优势,但对在环境复杂多变的工业在线检测中获取的低质量边缘检测图像可能同时存在较大的虚假边缘和断裂边缘的情况,这些算法均难以快速地排除干扰因素,稳定准确地提取光斑边界。

自从 Rosenfeld 和 Pfaltz 于 1966 年首次提出距离变换以来,距离变换就被广泛地应用于图像处理 and 模式识别领域^[10-11]。连通分量分析是计算机视觉中的一种重要处理手段^[12-13],它可以把二值图像中的不同区域提取出来,并通过对区域特征进行分析来达到检测或者识别物体的目的。针对现有边界提取方法用于复杂工业环境时存在的不足,本文结合图像距离变换和连通成分分析的相关理论,提出了一种应用像素邻接特性分析的光斑边缘图像修复方法。该方法的优势在于仅通过对同一张标号图像的分析即可实现对 8 像素大小的断裂边缘的连接,并可以去除图像上较大的噪声。实验验证其实时性和边界保持能力能满足在线检测的要求。

2 距离变换与分类标记

本文通过对边缘检测图像的距离变换和连通分量标记得到一张标号图像,该图像为后续断裂边缘连接和噪声边缘抑制提供基础。

2.1 距离变换

距离变换是一种将二值图像转换成灰度图像的运算,若二值图像 I 包含 2 种元素集合,分别为前景集合 X 及背景集合 X^c ,则距离变换的定义为:

$$DT(p) = \min\{dist(p, q), q \in X, p \in X^c\}, \quad (1)$$

其中, p, q 为图像上的像素点, $dist(p, q)$ 为距离测度函数, 常见的测度函数有欧氏距离、街区距离和棋盘距离等。欧氏距离即直线距离, 测度函数为:

$$dist_e[(x_1, y_1), (x_2, y_2)] = [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2]^{1/2}. \quad (2)$$

欧氏距离虽然非常直观, 但其计算包括开方运算, 计算量较大。街区距离和棋盘距离均是欧氏距离的近似, 街区距离是基于 4 连通邻域测量像素间路径的方法, 直线接触是一个距离单位, 对角接触为两个距离单位; 棋盘距离是基于 8 连通邻域的测量像素间路径的方法, 每次接触都是一个距离单位。工业在线检测对计算速度要求敏感, 且本文对距离变换的精度没有特别要求, 采用计算较简单的棋盘距离变换即可满足要求, 其测度函数为:

$$dist_c[(x_1, y_1), (x_2, y_2)] = \max(|x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|). \quad (3)$$

棋盘距离变换可采用结构算子 $H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 对边缘图像进行串行扫描来实现^[14], 图 1(a) 所示的边缘图像(边缘像素标记为 b , 背景像素标记为 0)的距离变换图如图 1(b) 所示, 图中, 所有背景像素均被标记成了与最近边缘的棋

盘距离。

2.2 像素分类标记

本文依据距离变换的结果对背景像素进行分类标记。

首先, 把到最近边缘的距离低于 k 的背景像素标注为 a_k , 这表明它们被视为边缘缝隙候选点。其余的背景像素则通过形态学连通区域提取方法标记为独立的区域。设 A 是图像 I 中的一个连通区域, 先找到其中一点 P , 可用下述迭代式求出连通域 A 中所有元素:

$$\begin{aligned} X_0 &= P \\ X_j &= (X_{j-1} \oplus S) \cap X^{C2}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, X^{C2} 为图像 I 余下的背景像素集合, S 为一

结构算子, $S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$, $X_{j-1} \oplus S$ 为形态学膨胀

运算, $k=1, 2, \dots$ 。当 $X_{j-1} = X_j$ 时, 表明该算法收敛, X_j 即为连通域 A 。接着, 继续寻找连通域 A 以外的背景像素并重复这一过程, 直至所有背景像素均被归入某一连通域。图 1(c) 所示为按照该方法对图 1(b) 进行标号的结果, 该标号图像中, k 取值为 1, 背景像素被标记成 1 和 2 两个独立的连通域。

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	b	b	b	b	0	0	0	0
0	0	0	b	0	b	0	0	b	0	0	0
0	0	0	b	0	b	0	0	b	0	0	0
0	0	0	b	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	b	0	0	0	0	b	0	0	0
0	0	0	b	0	0	0	0	b	0	0	0
0	0	0	b	0	0	0	0	b	0	0	0
0	0	0	b	0	0	0	0	b	0	0	0
0	0	0	b	0	0	0	0	b	0	0	0
0	0	0	0	b	0	0	b	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) 边缘图像

(a) Edge image

3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
3	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	3
3	2	1	1	b	b	b	b	1	1	2	3
3	2	1	b	1	b	1	1	b	1	2	3
3	2	1	b	1	b	1	1	b	1	2	3
3	2	1	b	1	1	1	1	1	1	2	3
3	2	1	b	1	2	2	1	b	1	2	3
3	2	1	b	1	2	2	1	b	1	2	3
3	2	1	b	1	2	2	1	b	1	2	3
3	2	1	b	1	1	1	1	b	1	2	3
3	2	1	1	b	1	1	b	1	1	2	3
3	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	3

(b) 棋盘距离变换

(b) Chessboard distance transform

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	a_1	a_1	a_1	a_1	a_1	a_1	1	1	1
1	1	a_1	a_1	b	b	b	b	a_1	a_1	1	1
1	1	a_1	b	a_1	b	a_1	a_1	b	a_1	1	1
1	1	a_1	b	a_1	b	a_1	a_1	b	a_1	1	1
1	1	a_1	b	a_1	a_1	a_1	a_1	b	a_1	1	1
1	1	a_1	b	a_1	2	2	a_1	b	a_1	1	1
1	1	a_1	b	a_1	2	2	a_1	b	a_1	1	1
1	1	a_1	b	a_1	2	2	a_1	b	a_1	1	1
1	1	a_1	b	a_1	a_1	a_1	a_1	b	a_1	1	1
1	1	a_1	a_1	b	a_1	a_1	b	a_1	a_1	1	1
1	1	1	a_1	a_1	a_1	a_1	a_1	a_1	1	1	1

(c) 标号图像

(c) Labelling image

图 1 边缘图像的距离变换及标号

Fig. 1 Distance transform and labeling for edge image

3 断裂边缘连接原理

激光光斑上的真实边缘像素, 其邻接的背景像素必来自与其不同的连通域, 本文依据这一特

性对边缘缝隙候选点重新标号以实现断裂边缘的连接。

重标号从标记为 a_k 的像素开始, 具体方法为: 逐一分析标记为 a_k 像素的 8 连接邻域像素, 这些像素的状态可归为以下 2 种情况: (1) 边缘像

素或待定像素;(2)某一背景连通区域的像素。若被分析像素的 8 连接邻域像素均属于第(1)种情况,则暂时无法确定该像素的归属,先将其标记为 a_{k-1} ,在下一轮遍历时再做决定;若该像素的邻域像素中有属于第(2)种情况的,且所有属于第(2)种情况的邻域像素均来自同一背景连通区域,则该像素不符合光斑边缘的邻接特性,因此,可把该像素标记为该背景区域;若该像素有邻域像素属于第(2)种情况,且这些像素来自不同的连通域,则可把该像素标记为边缘。按照以上规则完成对所有标记为 a_k 像素的标号以后,按照同样的规则处理标号为 a_{k-1} 的像素,直至将所有标号为 a_0 像素(即在处理标号为 a_1 的像素时暂时无法确定其归属的像素)处理完。易知,若把与边缘像素距离小于 k 的背景像素标记为边缘缝隙候选点,则最多能修复的边缘缝隙长度为 $2k$ 。图 1(c)经该方法处理后的结果如图 2 所示,由图 2 可知,图 1(c)中两处断裂边缘已被修复。

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	b	b	b	b	1	1	1	1
1	1	1	b	2	b	2	2	b	1	1	1
1	1	1	b	2	b	2	2	b	1	1	1
1	1	1	b	2	2	2	2	b	1	1	1
1	1	1	b	2	2	2	2	b	1	1	1
1	1	1	b	2	2	2	2	b	1	1	1
1	1	1	b	2	2	2	2	b	1	1	1
1	1	1	b	2	2	2	2	b	1	1	1
1	1	1	1	b	b	b	b	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

图 2 断裂边缘修复后
Fig. 2 Repaired fractured edge

4 噪声抑制原理

本文从邻接特性的角度对噪声边缘进行分类,并分别予以剔除。

通过对工业现场采集的光斑边缘图像的分析可知,从邻接特性的角度可把噪声边缘分为 2 类:1. 孤立噪声,即没有形成封闭连接的噪声,如图 1、图 2 所示,光斑边缘上连着长度为 2 像素的孤立噪声;2. 封闭噪声,即已形成封闭连接的噪声。

对于第一类噪声,本文利用其与激光光斑上真实边缘的邻接特性差别予以剔除,实现方法为:逐一分析图像中的边缘像素,若其 8 连接邻域中

的背景像素均属于同一连通域,则由于该边缘不符合光斑边缘的邻接特性,可将其归为背景。

对于第二类噪声,在多数情况下,其连接长度与光斑周长差别较明显,因此,可采用文献[15]中的边缘连接长度筛选方法予以剔除。

5 实验及性能评价

5.1 实验系统

实验所用的检测图像来自于工作环境恶劣的 125MN 挤压机中心在线监测系统,工作现场如图 3 所示。该系统为本课题组 2008 年为西南铝业集团研制的。监测原理如图 4 所示,两束激光构成基准光路,将梁上的末端测点固定以对基准激光的误差来实现初始标定和实时监测,在每个活动部件上安装两个用于采集激光基准位置信号的测点,并由此通过模型计算得到各活动部件的中心偏移情况。发射器为准直扩束激光器,波长为 650 nm、功率为 20 mW;测点中图像传感器的分



图 3 实验系统
Fig. 3 Experimental system

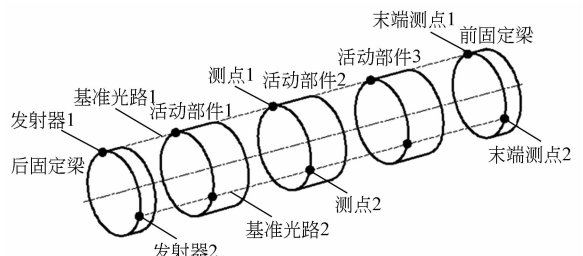


图 4 监测原理
Fig. 4 Monitoring principle

分辨率为 $320 \text{ pixel} \times 240 \text{ pixel}$; 工业镜头为 8 mm 固定焦距镜头 M0814-MP, 其对应的单像素尺寸为 $0.3431 \text{ mm} \times 0.3431 \text{ mm}$ 。本文的图像处理算法是在 PC 机(主频 2.1 G 双核处理器、内存 2 G)上通过 Visual C++ 6.0 实现的。

5.2 参数 k 取值讨论

通过分析所提方法的断裂边缘修复能力及实时性来讨论参数 k 的取值问题。

首先, 分析本文方法的断裂边缘修复能力。实验过程为: 对 5 张完整的光斑边缘图像(椭圆形, 短轴长度为 $24.7 \sim 26.1 \text{ pixel}$, 长轴长度为 $25.6 \sim 27.1 \text{ pixel}$) 人为引入不同长度的缝隙($1 \sim 14 \text{ pixel}$), 采用本文的断裂边缘修复方法进行修复。修复过程中, k 取值为 7 pixel , 从而保证 14 pixel 的缝隙也能被连接。以原始边缘图像的中心坐标作为真值, 不同长度的边缘缝隙修复时引入的中心定位误差(两中心点间的距离)的平均值如图 5 所示。

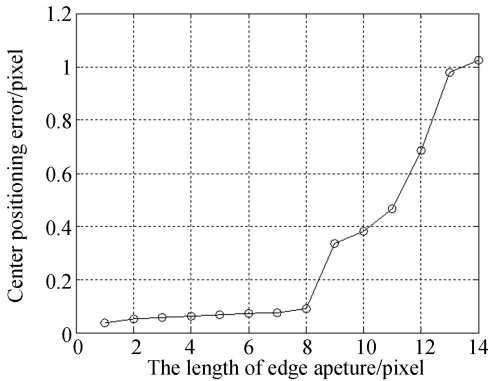


图 5 断裂边缘修复后引入的中心定位误差

Fig. 5 Introduced center positioning error by repairing fractured edge

由图 5 可知, 本文的方法并不是信息无损的, 当边缘缝隙在 $1 \sim 8 \text{ pixel}$ 时, 断裂边缘修复后引入的中心定位误差的平均值由 0.036 pixel 缓慢爬升至 0.091 pixel , 这对于在线激光光斑中心定位检测是可以接受的, 修复的光斑边缘与实际边缘的一致性较好; 当边缘缝隙超过 8 pixel 时, 修复引入的定位误差迅速增加, 最后达到 1.03 pixel , 此时, 修复得到的边缘图像已与激光光斑的真实边缘有较大差距, 表明本文方法对断裂边缘的修复已失效。

接着, 分析 k 的取值对方法实时性的影响。实验过程为: 对来自工业现场的 5 张检测图像, 采

用本文方法进行断裂边缘修复, 参数 k 取值为: $1 \sim 4 \text{ pixel}$, 记录 k 取不同值时程序的运行时间。实验结果为: 当 k 取值为 $1, 2, 3$ 和 4 pixel 时, 对应的程序的平均运行时间分别为 $71, 82.4, 96.2$ 和 113.6 ms 。由上可知, 随着 k 取值的增大, 由于该方法的计算量也会随之增加, 这将在一定程度上降低程序的实时性, 但程度并不特别显著。

由以上分析可知, k 的有效取值为 $1 \sim 4 \text{ pixel}$ 。一般情况下 k 可取为 4 pixel , 此时, 本文方法的有效修复能力最好, 这时可有效修复 8 pixel 的边缘缝隙, 且实时性仍然较好。若系统对实时性要求很高时, 可适当减小 k 的取值。

5.3 算法测试实验

本实验通过对采自实际工业现场的激光光斑图像进行边缘修复来验证本文方法的有效性。

图 6(a) 为采自工业现场的一张典型的低质量检测图像, 该图像对比度较低, 光斑内部存在明显的明暗相间的散斑, 由 Canny 方法得到的边缘检测图像的光斑轮廓上可见多处断裂, 且存在大小不一的噪声边缘响应, 如图 6(b) 所示。本文方法得到的标号图像如图 6(c) 所示, 图中与最近边缘的棋盘距离小于 1 的像素被标记为边缘缝隙候选点, 这些点和边缘像素在标号图像中均以白色表示, 3 个独立的背景区域被标上了不同的灰度。对边缘缝隙候选点重标号后的图像如图 6(d) 所示, 由图 6(d) 可知, 光斑轮廓的断裂得到了修复, 另外, 部分光斑内部纹理也形成了一个封闭的连接。去除孤立噪声后的检测图像如图 6(e) 所示, 该图中, 仅存在两个封闭的边缘连接, 最后, 按照文献[15]中的边缘连接长度筛选方法进行筛选后得到的图像如图 6(f) 所示, 图 6(b) 中的噪声边缘均已得到抑制, 得到了完整的光斑边缘图像。

采用文献[16]提出的图像分割质量评价体系进一步验证本文方法的可靠性。分别采用人工方法和本文方法对 10 组工业现场采集的低质量光斑边缘图像进行边缘提取, 再采用曲线拟合法进行中心定位, 得到的光斑中心坐标以及本文方法的耗时数据如表 1 所示。其中, 采用本文方法时, k 取值为 4 pixel 。

由表 1 可知, 本文方法单次图像修复耗时小于 130 ms , 实时性较好。以人工提取边缘后得到的光斑中心坐标作为真值, 采用本文方法对检测图像进行处理后, 引入的中心定位均方根(RMS)

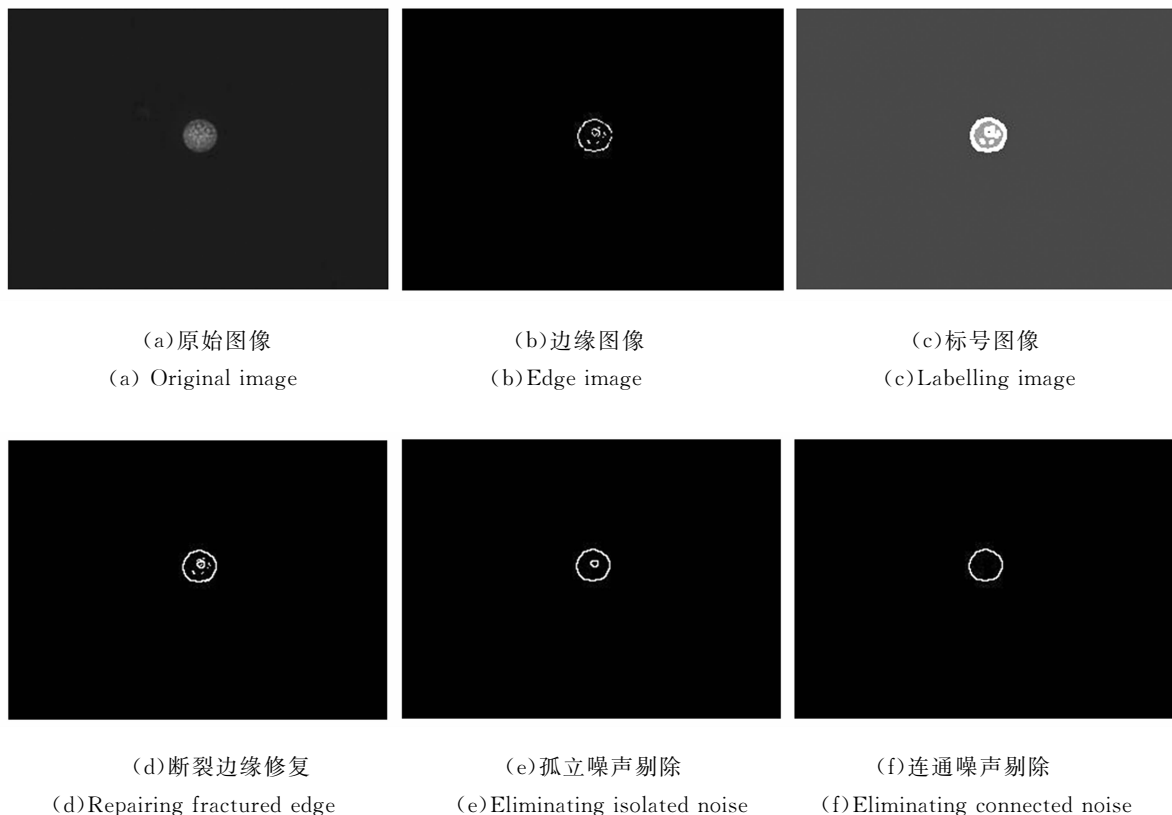


图 6 光斑边缘的修复
Fig. 6 Repairing spot edge

误差为 0.05 pixel,峰值(PV)误差为 0.086 pixel,稳定地保持在较低的误差水平,因此,该方法能用于在线激光光斑中心定位检测。

表 1 边缘修复后中心定位结果及修复耗时

Tab. 1 Repairing consuming time and center positioning results of post-repair

图像编号	人工边缘提取/pixel	本文方法/pixel	本文方法耗时/ms
1	(165.01,56.18)	(165.08,56.13)	108
2	(170.26,120.50)	(170.26,120.50)	90
3	(167.20,62.37)	(167.20,62.33)	116
4	(144.43,56.41)	(144.47,56.43)	119
5	(132.46,80.88)	(132.44,80.89)	97
6	(140.11,63.08)	(140.10,63.08)	122
7	(149.18,62.82)	(149.15,62.86)	125
8	(157.67,85.67)	(157.67,85.69)	114
9	(140.79,107.37)	(140.83,107.32)	119
10	(123.63,107.51)	(123.70,107.47)	127

6 结 论

在环境复杂多变的工业在线检测系统中,低质量边缘检测图像可能同时存在较大的虚假边缘和边缘断裂,现有算法均难以快速排除干扰因素的影响,难以稳定准确地提取光斑边界,从而影响检测系统的稳定性。针对上述问题,本文结合图像距离变换和连通分量分析相关理论,提出了一种应用像素邻接特性分析的光斑边缘图像修复方法。通过对同一张标号图像的分析即可实现断裂边缘连接,并可以去除图像上较大的噪声。对该方法断裂边缘修复能力的分析可知,该方法能有效修复 8 pixel 的边缘缝隙;参数的取值对方法实时性影响不是特别显著。因此, k 的有效取值为 1~4 pixel,通常可取为 4 pixel。将该方法用于所采集到的实际工业现场的低质量光斑边缘图像的修复,结果表明,单次图像的修复耗时小于 130 ms,实时性较好;该方法引入的中心定位 RMS 误

差为 0.05 pixel, PV 误差为 0.086 pixel, 稳定地保持在较低的误差水平, 能用于在线激光光斑的中心定位检测。

参考文献:

- [1] WANG X, TAN J P, QUAN L Y, *et al.*. Real-time monitoring method for five-degrees-of-freedom of the extruder's moving parts [C]. 2011 *International Conference on Vibration, Structural Engineering and Measurement (ICVSEM), Clausthal-Zellerfeld*, 2012: 630-634.
- [2] 肖刻军. 125MN 挤压机活动部件中心偏移检测系统软件设计与应用研究[D]. 长沙: 中南大学机电工程学院, 2009: 8-19.
XIAO Y J. *System software design and applied research of the center offset measuring system for 125MN extruder's moving parts* [D]. Changsha: College of mechanical and electrical engineering, Central south university, 2009:8-19. (in Chinese)
- [3] 曹万鹏, 车仁生, 叶东. 一种照明无关的小波多尺度相乘边缘检测方法[J]. *光学学报*, 2007, 27(10): 1751-1757.
CAO W P, CHE R SH, YE D. Illumination-independent wavelet scale multiplication edge detection method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(10): 1751-1757. (in Chinese)
- [4] CHEN T, WU Q H, RAHMANI-TORKAMAN R. A pseudo top-hat mathematical morphological approach to edge detection in dark regions [J]. *Pattern Recognition*, 2002, 35(1):199-210.
- [5] ZHAO X L. Edge detection algorithm based on multiscale product with Gaussian function [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15:2650-2654.
- [6] 董吉辉, 胡企铨, 孙东松. 空间激光成像跟踪系统中的图像噪声抑制技术[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0109002.
DONG J H, HU Q Q, SUN D S. Techniques of depressing image noise in laser imaging tracking system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(1):0109002. (in Chinese)
- [7] 付树军, 阮秋琦, 穆成坡, 等. 基于非线性扩散滤波的边缘检测和图像测量[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2):289-293.
FU SH J, RUAN Q Q, MU CH P, *et al.*. Edge detection for image measurement based on nonlinear diffusion filtering[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):289-293. (in Chinese)
- [8] FRANK Y S, CHENG S X. Adaptive mathematical morphology for edge linking [J]. *Information Sciences*, 2004, 167(1-4):9-21.
- [9] 邓仕超, 刘铁根, 萧泽新. 应用 Canny 算法和灰度等高线的金相组织封闭边缘提取[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9): 2314-2323.
DENG SH CH, LIU T G, XIAO Z X. Extraction of enclosing image edge for metallographic structure based on Canny and grayscale contour line [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2314-2323. (in Chinese)
- [10] 王蒙军, 阳路, 王震, 等. 用简化脉冲耦合神经网络实现交通标志图像的类 Euclidean 距离变换类内特征提取[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12):2751-2757.
WANG M J, YANG L, WANG X, *et al.*. Realization of within-class feature extracting based on Euclidean-like distance transform for traffic signs using simplified PCNN [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12):2751-2757. (in Chinese)
- [11] 王平, 张力, 周长其. 基于种子点的粘连巨噬细胞图像的分割方法[J]. *液晶与显示*, 2012, 27(6): 808-813.
WANG P, ZHANG L, ZHOU CH Q. Segmentation method to adhesion macrophage image based on seeding point [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(6):808-813. (in Chinese)
- [12] HE L F, CHAO Y Y, SUZUKI K, *et al.*. Fast connected-component labeling [J]. *Pattern Recognition*, 2009, 42(9):1977-1987.
- [13] 吕国亮, 赵曙光, 赵俊. 基于三帧差分法和连通性检验的图像运动目标检测新方法[J]. *液晶与显示*, 2007, 22(1):87-93.
LV G L, ZHAO SH G, ZHAO J. Novel method of moving object detection based on three frame differencing and connectivity checking [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(1):87-93. (in Chinese)
- [14] 李红松, 侯朝桢. 基于距离变换和形态学的顶点探测算法[J]. *电子学报*, 2004, 32(1):38-41.
LI H S, HOU CH ZH. Corner detection based on

distance transform and morphology[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(1):38-41. (in Chinese)

- [15] 王宪,谭建平,全凌云,等. 复杂工业环境下激光束中心快速精确定位方法[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2012, 39(12):43-49.

WANG X, TAN J P, QUAN L Y, *et al.*. Fast and precise location method of the laser beam center point in complex industrial environment [J].

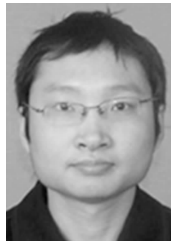
Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2012, 39(12):43-49. (in Chinese)

- [16] HOOVER A, JEAN-BAPTISTE G, JIANG X. An experimental comparison of range image segmentation algorithms [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18(7):673-689.

作者简介:



谭建平(1963—),男,湖南攸县人,博士,教授,博士生导师,1984年于中南矿冶学院获得学士学位,1989年、1993年于中南工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事机电系统状态监测与集成控制研究。E-mail: jptan@163.com



王宪(1982—),男,湖南益阳人,博士研究生,2004年于中南大学获得学士学位,2008年于上海理工大学获得硕士学位,主要从事工业环境下计算机视觉检测系统的理论与技术研究。E-mail: 15111388435@163.com.

(本栏目编辑:李自乐)

(版权所有 未经许可 不得转载)