

基于双重阈值和张量投票的表面裂纹检测算法

李慧娴, 张斌, 刘丹, 杨腾达, 宋文豪, 李峰宇

郑州大学物理工程学院, 河南 郑州 450001

摘要 针对裂纹与背景之间的低对比度及裂纹区域内灰度值不均匀所导致的裂纹提取困难问题, 提出一种基于双边滤波和局部灰度差相结合的双重阈值裂纹片段提取法, 并结合张量投票算法进行裂纹检测。该算法采用双重阈值法获取裂纹片段, 并根据裂纹片段的接近度和连续性特征, 通过张量投票算法得到裂纹的显著性图谱以及完整的裂纹曲线, 利用裂纹曲线对裂纹片段进行连接并去除离散点, 完成准确裂纹提取。实验结果表明, 相比于根据裂纹片段首尾位置进行连接的方法, 该算法处理类陶瓷元件表面裂纹图像时 F -measure 提高了约 27%。

关键词 图像处理; 裂纹检测; 张量投票; 双重阈值; 双边滤波

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.051010

Surface Crack Detection Algorithm Based on Double Threshold and Tensor Voting

Li Huixian, Zhang Bin, Liu Dan, Yang Tengda, Song Wenhao, Li Fengyu

College of Physical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract The double threshold method based on the combination of bilateral filter and local grayscale difference is proposed to extract crack segments, and tensor voting algorithm is adopted to solve the problem of crack extraction caused by low contrast between cracks and background, as well as unevenness of gray values within the crack region. The double threshold method is introduced to obtain crack segments, and then based on proximity and continuity of crack fragments, the significant map and complete center line are obtained with tensor voting. Accurate crack extraction is realized by connecting crack fragment and removing discrete points with center line. Experimental results show that, compared with the method based on the beginning and end of crack fragments to connect, the proposed algorithm can increase F -measure about 27% to process the surface image of ceramic elements with cracks.

Key words image processing; crack detection; tensor voting; double threshold; bilateral filter

OCIS codes 100.2000; 150.1135; 100.3008

1 引言

物体表面裂纹是材料内部裂纹在各种力的作用下扩展形成的, 当裂纹到达表面时会引起材料性能急剧下降。实际应用中, 含有裂纹的机械元件会严重影响机械的整体使用寿命^[1], 路面裂纹和墙体裂纹会引发不同程度的安全事故^[2], 因此对于表面裂纹的检测十分必要。近年来, 随着机器视觉的快速

发展^[3], 基于数字图像处理的裂纹检测广泛应用, 大量的裂纹检测算法相继提出。

根据裂纹区域灰度值低于背景灰度值的特点, 基于灰度强度阈值的方法广泛应用于裂纹检测^[4-6], 由于裂纹灰度的不连续性, 该方法只能够提取一些裂纹片段, 不能得到完整的裂纹; 基于边缘检测算子的裂纹检测算法^[7-9]因受低对比度及噪声的影响, 容易将背景中的噪声错误地识别为裂纹片段; 小波变换^[10]

收稿日期: 2017-10-16; 收到修改稿日期: 2017-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(81171410)

作者简介: 李慧娴(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事机器视觉、图像处理方面的研究。E-mail: 1163287643@qq.com

导师简介: 张斌(1967—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事机器视觉、医学图像处理方面的研究。

E-mail: 13503811569@163.com(通信联系人)

具有各向异性特征,其应用于裂纹检测时,不能够有效地处理高曲率和低连续性的裂纹;张量投票^[11]是一种感知编组方法,能够有效地从噪声和灰度值不连续的裂纹图像中推断出裂纹的曲线结构,近年来,该算法逐渐应用于裂纹检测^[12-14]。然而,现有的基于张量投票的裂纹检测算法,没有对参与投票的像素点进行筛选,因此计算成本很高,时间复杂度很大,而且只提取裂纹曲线,得不到完整的裂纹区域。

针对以上问题,本文提出一种基于双重阈值和张量投票相结合的裂纹检测算法。该算法采用双重阈值法实现最大程度的图像裂纹提取;对限定于裂纹片段的局部区域进行张量投票计算,能够大幅度降低计算时间的复杂度;以裂纹曲线为引导,连通各裂纹片段,得到完整的裂纹区域。实验结果表明,针对类陶瓷体元件表面的裂纹检测,本文算法所得的 F -measure 相比其他算法提高了约 27%。

2 裂纹片段的提取

2.1 感兴趣区图像获取

由于待测元件边界与裂纹特征相似,易造成假阳性裂纹的提取,因此,在进行裂纹提取前必须首先对图像进行感兴趣区(ROI)图像的获取,如图 1 所示。

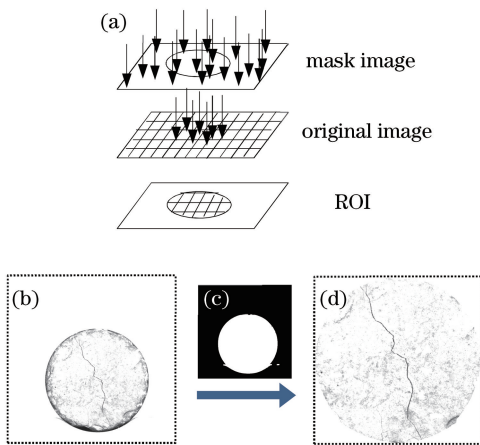


图 1 ROI 图像获取。(a) 掩模过程原理图;

(b) 原图像; (c) 掩模图像; (d) ROI 图像

Fig. 1 Acquisition of the ROI image. (a) Mask process schematic; (b) original image; (c) mask image; (d) ROI image

首先计算原始图像的局部标准偏差,得到掩模图像,再对原始图像进行掩模处理,即原图像与掩模图像的白色区域进行区域合并操作,从而得到去除元件边界后的图像,如图 1(a) 所示。此外,根据 ROI 掩模的最小外接矩形,对去除边界后的图像进行裁剪,最终得到如图 1(d) 所示的 ROI 图像。

2.2 双重阈值

在获取裂纹片段时,为克服传统阈值法[如直接阈值法、最大类间方差法(Otsu)]难以获取背景复杂的图像中纯净的裂纹片段的难点,提出一种基于双边滤波和局部灰度差的双重阈值法,该算法流程如图 2 所示。

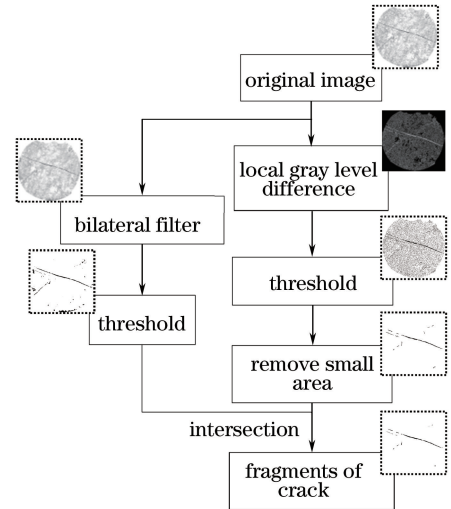


图 2 双重阈值算法流程

Fig. 2 Flow chart of double threshold algorithm

2.2.1 双边滤波阈值

Tomasi 等^[15]提出的双边滤波算法,既能有效去除噪声,又能最大限度保持边缘信息。由于其无法实现图像线性卷积运算^[16],因此双边滤波算法的计算量非常大。2006 年,Paris 等^[17]提出了增维型双边滤波器,该算法将图像的二维坐标和各坐标上像素点的灰度值作为三维空间,如图 3 所示。图像在三维空间中可以形成三维高斯核函数与三维图像函数的线性卷积,之后在三个维度上进行下采样,从而减少直接计算的数据,实现算法的加速。改进后的增维型双边滤波算法的公式为

$$B_I(x, y) = \frac{I_Y(x, y)}{E_Y(x, y)} =$$

$$\frac{\text{interp}[G \otimes \mathbf{I}_X, x/s_s, y/s_s, I(x, y)/s_r]}{\text{interp}[G \otimes \mathbf{E}_X, x/s_s, y/s_s, I(x, y)/s_r]}, \quad (1)$$

式中 $I(x, y)$ 表示 (x, y) 处的像素点灰度值, \mathbf{I}_X 和 \mathbf{E}_X 分别为输入图像增维后得到的三维图像矩阵和权值矩阵, s_s 为空间域采样率, s_r 为灰度域采样率。interp 为插值函数,实现的功能是对 $G \otimes \mathbf{I}_X$ 和 $G \otimes \mathbf{E}_X$ 进行三维空间上插值,并求出两者在坐标 $[x/s_s, y/s_s, I(x, y)/s_r]$ 上的值。 G 为线性化后的 G_s 和 G_r 的乘积。对经过增维型双边滤波的图像进行阈值分割,即可得到第一重阈值图像。

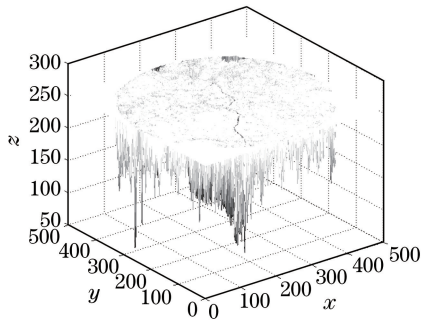


图3 双边滤波增维后图像

Fig. 3 Bilateral filtering image after increase the dimension

2.2.2 局部灰度差

局部灰度方差方法^[12]可以突出图像中的细节部分,为了便于提取更加完整的裂纹片段,对文献^[11]中的局部灰度差方法进行改进。改进后的局部灰度差公式为

$$\psi(x, y) = \sum_{(u, v) \in N(x, y)} [I(u, v) - I(x, y)], \quad (2)$$

$$\psi'(x, y) = \begin{cases} 255, I(x, y) < 100 \\ 255, \psi(x, y) > 255 \\ 0, \psi(x, y) < 0 \\ \psi(x, y), \psi(x, y) \in [0, 255] \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $N(x, y)$ 表示中心点为 (x, y) 处的连通区域, $\psi(x, y)$ 表示 (x, y) 处所求得的局部灰度差值。对得到的灰度差图像进行阈值处理并去除小区域作为第二重阈值图像,最后对第二重阈值图像与第一重阈值图像求交集,即可得到所需要获取的裂纹片段。

3 完整裂纹的连接

3.1 张量投票获取裂纹曲线

张量投票是机器视觉中感知重组的方法,可以用来获取图像中的显著性结构^[18],其主要由两部分

组成:数据的张量表示和张量之间的非线性投票^[19]。在二维图像中,一个二阶半正定对称张量可被分解为

$$T = (\lambda_1 - \lambda_2) \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1^T + \lambda_2 (\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1^T + \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_2^T), \quad (4)$$

式中 λ_1, λ_2 为特征值,且 $\lambda_1 > \lambda_2$, $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ 为对应的特征向量, $\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1^T$ 和 $\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1^T + \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_2^T$ 分别表示棒张量和球张量, $\lambda_1 - \lambda_2$ 和 λ_2 为对应的棒张量和球张量的显著性指标。

在进行张量投票时,首先将像素点初始化为球张量,并进行球张量投票,其投票场如图4(a)所示。之后将每一点接受到的投票数进行特征分析得到初始方向,并将初始方向赋予棒型投票域,如图4(b)所示。然后进行棒张量投票。如图4(c)所示,投票规则为:在坐标系 Oxy 中,有两个分别位于 O 点和 P 点的张量,其中 O 为投票点, P 为受票点, \mathbf{N}_O 和 \mathbf{N}_P 分别为其法向量。令 L 表示投票点与受票点之间的距离, θ 表示投票点在密切圆上的切线与过投票点和受票点直线之间的夹角, s 和 k 分别表示弧长和曲率,则 P 点的张量接收到的 O 点投票可以定义为

$$\begin{cases} V(P) = DF(s, k, \sigma) \mathbf{N}_P \mathbf{N}_P^T \\ \mathbf{N}_P = \mathbf{N}_O [-\sin(2\theta), \cos(2\theta)]^T \\ DF(s, k, \sigma) = \exp \left[- \left(\frac{s^2 + ck^2}{\sigma^2} \right) \right] \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $DF(s, k, \sigma)$ 为显著性衰减函数,尺度因子 σ 是决定投票区域的大小的参数,也是唯一可以改变的参数, c 为控制衰减程度的参数。

投票过后,每一个像素点收集邻域内所有张量投出的票,并整合为一个新的张量,票数的积累直接通过张量相加得到。最后将新的张量分解为(4)式的形式后计算特征值,并得到图像中每一点为裂纹的概率的显著性图谱,如图4(d)所示。

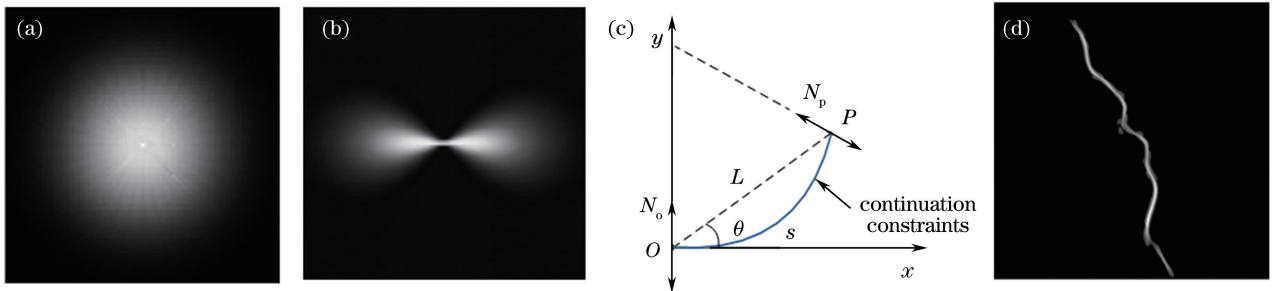


图4 张量投票。(a)球型投票域;(b)棒型投票域;(c)投票规则示意图;(d)概率显著性图谱

Fig. 4 Tensor voting. (a) Ball voting field; (b) stick voting field; (c) schematic of tensor voting rules;

(d) probability significance map

3.2 完整裂纹的获取

在获取完整裂纹区域时,首先需要将候选裂纹

图像中的离散点去除;其次是对候选裂纹图像中的裂纹片段进行连接。这两个部分均可以通过张量投

票得到的裂纹曲线实现。其流程如图 5 所示,首先对张量投票得到的裂纹曲线进行膨胀,得到比实际裂纹大的区域,之后对膨胀后的区域与候选裂纹图像求交集,去除图像中的离散点,而将裂纹片段保

留,得到只含有裂纹片段的图像,最后对只含有裂纹片段的图像与张量投票得到的裂纹曲线图像求并集,通过张量投票后的裂纹曲线对裂纹片段进行连接,即可得到完整的裂纹图像。

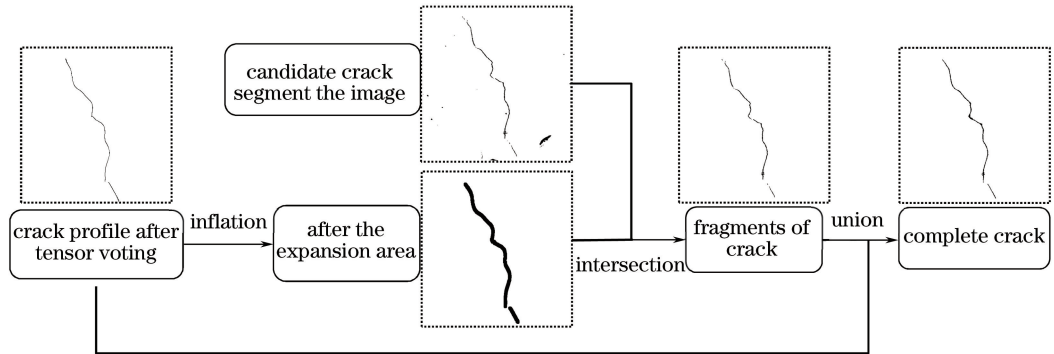


图 5 完整裂纹获取过程

Fig. 5 Complete crack acquisition process

4 实验结果分析

为验证本文算法的有效性,对图 6(a)所示的元件进行实验,图 6(b)为所采用的拍摄装置,采用 Basler 面阵 CCD 相机结合低角度环形光进行图像采集,采集图像的尺寸为 $900 \text{ pixel} \times 900 \text{ pixel}$,图像

分辨率为 $8.8 \mu\text{m} \cdot \text{pixel}^{-1}$ 。元件表面的裂纹是元件在烧结过程中出现的自然裂纹,由于元件表面粗糙,因此在提取裂纹时易受噪声及背景不均匀的影响。本文算法与对比算法均在 Matlab R2014a 平台下实现,操作系统为 Window 7 professional,计算机型号为 Dell Precision T5810。

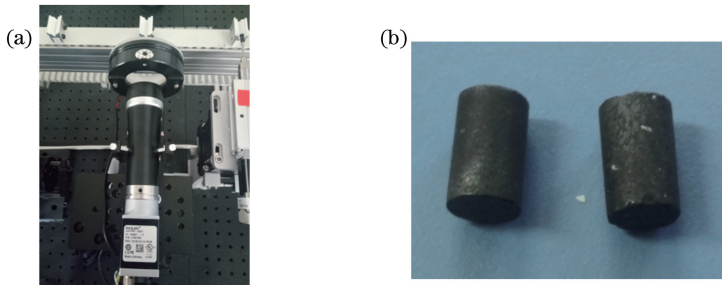


图 6 (a)实验装置图;(b)相机拍摄下的元件图像

Fig. 6 (a) Experimental equipment; (b) image of components

4.1 参数选择

通过评估参数的估算^[20]对本文算法进行优化,3个评估参数分别为查准率、查全率和 F -measure (F 为根据查准率和查全率得出的综合评价指标),定义分别为

$$P = \frac{\sum_{(x,y)} G(x,y)B(x,y)}{\sum_{(x,y)} B(x,y)} = \frac{L_r}{L_N}, \quad (6)$$

$$R = \frac{\sum_{(x,y)} G(x,y)B(x,y)}{\sum_{(x,y)} G(x,y)} = \frac{L_r}{L_s}, \quad (7)$$

$$F = 2 \times \frac{P \times R}{P + R}, \quad (8)$$

式中 G 为人工标记得到的裂纹图像^[21],将其作为裂纹的真实值, B 为通过算法检测出的裂纹图像, L_r 为提取结果中真实裂纹部分, L_N 为算法提取的总裂纹, L_s 为人工标记的实际裂纹。

在进行裂纹提取时,双重阈值方法中阈值 T 的选择非常重要,关系着能否将裂纹从不均匀的背景中有效区分。阈值过低会导致得到的目标结果中包含过多的背景信息,影响后续张量投票的处理,同时难以保证裂纹提取的有效性;阈值过高,则可能会产生裂纹漏检的情况。因此为了保证检测结果的准确性,本文选取一系列阈值对 56 幅图像进行裂纹检测,每

个阈值 T 均对 56 幅图像进行裂纹提取,并得出提取结果的平均查准率、查全率及 F 值,最终得到如图 7(a)所示的裂纹平均性能变化曲线。从图 7 可以看出,在 T 不断增大的过程中,查准率也在不断增

大,从 0.7 增加到 0.93;而查全率却在逐渐降低,从 0.83 下降到 0.53。根据综合评价指标 F 值,选取 F 值最大时所对应的点为最佳阈值点,此时,算法性能最好,由图 7(a)可知,最终选择的阈值 $T=0.7$ 。

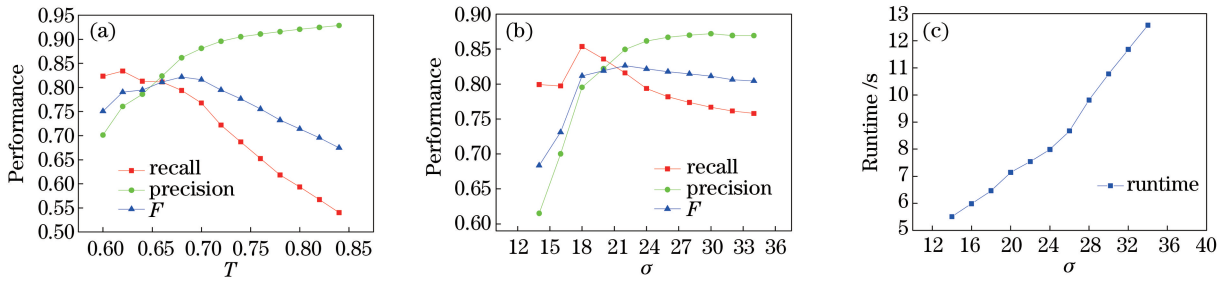


图 7 算法性能评估。(a)不同阈值;(b)不同 σ 值;(c)运行时间

Fig. 7 Performance evaluation of algorithm. (a) Different threshold; (b) different σ values; (c) runtime

本文算法中另一个重要的参数为张量投票过程中的投票域 σ ,投票窗口大小为张量投票中唯一可以改变的参数,其对算法的运行结果及时间都有十分重要的影响。投票窗口过小时,算法会更加关注图像的细节部分,但容易造成裂纹无法连接的情况;投票窗口过大时,虽然能够连接图像中的片断,但易受到图像中离散点的影响,致使检测结果不准确,因此为了选择合适的 σ 值,利用 12~35 之间的一系列 σ 值分别对 56 幅图像进行处理,得出根据 σ 值变化的裂纹平均性能变化曲线,如图 7(b)所示,以及根据 σ 值变化引起的算法运行时间的变化,如图 7(c)所示。从图 7(b)可以看出,随着投票窗口的增大,即 σ 值的增大,裂纹的平均查准率不断增大,而平均查全率却不断降低, F 值越高表示算法的性能越好,

因此根据综合评价指标 F 值的最高点选取 $\sigma=22$ 。从图 7(c)可以看出,随着 σ 值的不断增大,算法的平均运行时间也不断增加,当 $\sigma=22$ 时,对应的平均运行时间为 7.5 s,可以满足要求,因此最终选取 $\sigma=22$ 。

4.2 算法比较

将双重阈值方法与传统的 Otsu 算法的阈值结果进行比较。原始图像如图 8(a)所示,图中红圈标示的区域为裂纹区域。图 8(b)为采用 Otsu 算法得到的裂纹片段,从图中可以看出,原始图像的背景不均匀,严重影响了 Otsu 算法对裂纹片段的提取,导致该算法不能够有效地将裂纹片段从背景中分离,目标区域内包含很多背景信息。图 8(c)为采用双重阈值法在最佳阈值参数 $T=0.7$ 时得到的裂纹片段,从图中可以看出,选取合适阈值参数后,该方法能够有效

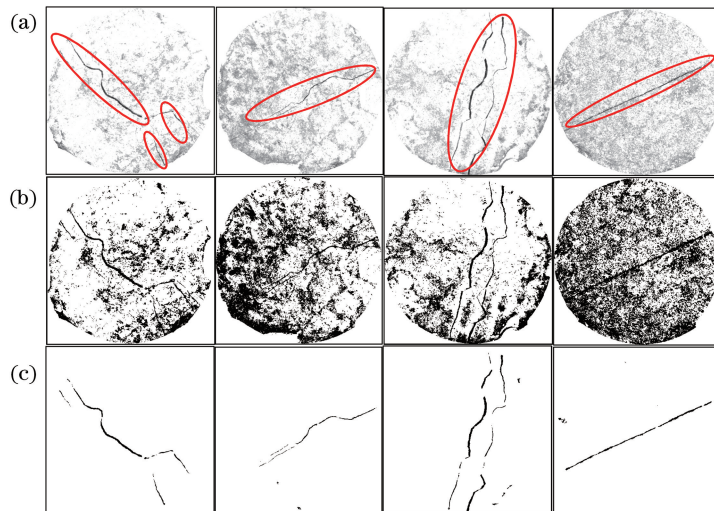


图 8 双重阈值图像处理过程及结果。(a) ROI 图像;(b)经过 Otsu 算法得到的图像;(c)经过双重阈值得到的图像

Fig. 8 Image processing and results with double threshold. (a) ROI images; (b) images obtained by Otsu algorithm; (c) images obtained by the double threshold

地将裂纹片段从不均匀的背景中分离,且得到的裂纹区域较准确,仅包含较少的背景信息。因此,已然验证所提的双重阈值方法的有效性和准确性。

4.3 算法性能评估

将本文算法与张国旗^[22]提出的裂纹片段连接算法进行对比。根据 4.1 节选取最佳参数: $T=0.7$ 和 $\sigma=22$ 。在用现有裂纹提取算法处理前,先通过去除元件边界的算法对图像进行预处理,表 1 给出了两种算法分别处理 56 幅裂纹图像,获得最佳 F 值时的 3 个评估参数,从表中可以看出,本文算法在获得最佳 F 值时,其平均查准率为 0.81,平均查全

率为 0.82 以及平均 F 值为 0.81,均高于裂纹片段连接算法的平均查准率(0.58)、平均查全率(0.75)以及平均 F 值(0.64)。其中评估裂纹算法的重要参数为 F 值,本文算法的最佳 F 值比裂纹连接算法的最佳 F 值高出了 27%。

图 9 给出了两种算法分别对随机 5 幅裂纹图像进行处理的结果以及人工标记的裂纹。通过对比可以看出,裂纹连接方法不仅在阈值处理时受对比度影响大,无法将裂纹片段完全提取出来,且在进行裂纹连接时会对部分裂纹片段进行错误连接,而本文方法对裂纹提取的准确性有较大提升。

表 1 两种算法在最佳 F 值时的 3 个评估参数

Table 1 Three evaluation parameters of two algorithms at the best F value

Index	Crack fragments' connection algorithm	Algorithm based on double threshold and tensor voting
Precision	0.58	0.81
Recall	0.75	0.82
F	0.64	0.81

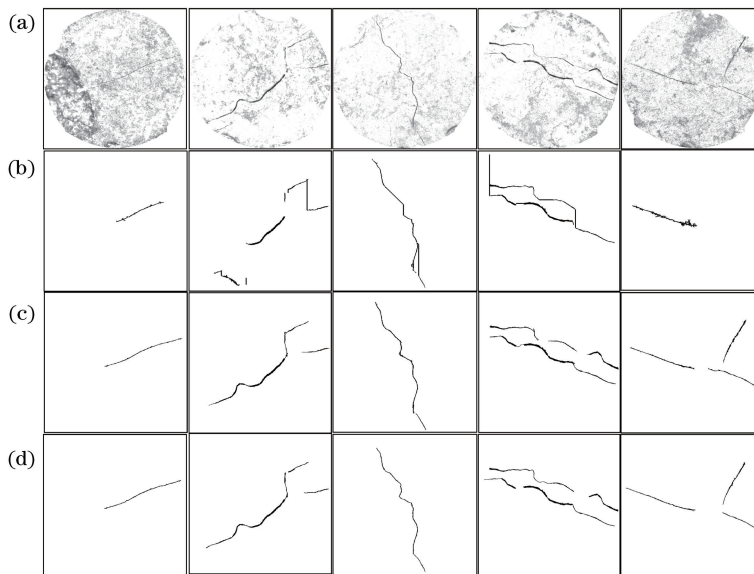


图 9 对 5 幅图像进行裂纹检测。(a)原始图像;(b)裂纹连接算法的检测结果;(c)本文算法的裂纹检测结果;(d)实际裂纹

Fig. 9 Crack detection on five images. (a) Original images; (b) detection results by crack connection algorithm;

(c) cracks detection results by proposed algorithm; (d) truth cracks

5 结 论

针对传统阈值法无法得到完整裂纹片段且受噪声影响严重的缺点,提出了基于双边滤波和局部灰度差的双重阈值法,该方法不仅能够得到较完整的裂纹片段,而且能够去除大部分的噪声。此外,为了得到完整的裂纹区域,将通过张量投票得到的裂纹中心线用于裂纹片段的连接。实验结果表明,该裂纹检测算法不仅能够消除图像中裂纹区域灰度值不均匀对裂纹检测的影响,而且能够根据张量投票对

裂纹片段进行有效连接和噪声去除。与目前的裂纹连接方法相比,本文算法具有较好的性能评价能力。

参 考 文 献

- [1] Liang S D, Zhang A F, Wang T, *et al.* Elimination of laser direct forming crack on DD4 parts by induction heating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0202003.
梁少端, 张安峰, 王潭, 等. 感应加热消除激光直接成形 DD4 零件裂纹 [J]. 中国激光, 2017, 44(2):

- 0202003.
- [2] Wang B, Wang X, Chen F, *et al.* Pavement crack recognition based on aerial image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0810004.
王博, 王霞, 陈飞, 等. 航拍图像的路面裂缝识别[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0810004.
- [3] Chen J, Zhu Q B, Huang M, *et al.* Recognition of *empoasca flavescens* based on machine vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011502.
陈晶, 朱启兵, 黄敏, 等. 基于机器视觉的茶小绿叶蝉识别方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011502.
- [4] Kirschke K R, Velinsky S A. Histogram-based approach for automated pavement-crack sensing[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1992, 118(5): 700-710.
- [5] Li Q Q, Liu X L. Novel approach to pavement image segmentation based on neighboring difference histogram method [C] // *Proceedings of IEEE Computer Society*, 2008, 2: 792-796.
- [6] Tsai Y, Kaul V, Mersereau R M. Critical assessment of pavement distress segmentation methods[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2010, 136(1): 11-19.
- [7] Yan M D, Bo S B, Xu K, *et al.* Pavement crack detection and analysis for high-grade highway[C] // *Proceedings of International Conference on Electronic Measurement and Instruments*, 2007: 548-552.
- [8] Liu F F, Xu G A, Yang Y X, *et al.* Novel approach to pavement cracking automatic detection based on segment extending[C] // *Proceedings of International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling*, 2008: 610-614.
- [9] Hua C J, Xiong X M, Chen Y. Feature extraction of workpiece circular arc contour based on Sobel operator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021011.
化春键, 熊雪梅, 陈莹. 基于 Sobel 算子的工件圆弧轮廓特征提取[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021011.
- [10] Subirats P, Dumoulin J, Legeay V, *et al.* Automation of pavement surface crack detection using the continuous wavelet transform[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, 2007: 3037-3040.
- [11] Medioni G, Lee M S, Tang C K. A Computational framework for segmentation and grouping [M]. Amsterdam: Halland Elsevier, 2000.
- [12] Zou Q, Cao Y, Li Q Q, *et al.* Crackree: automatic crack detection from pavement images[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2012, 33(3): 227-238.
- [13] Guan H Y, Li J, Yu Y T, *et al.* Iterative tensor voting for pavement crack extraction using mobile laser scanning data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(3): 1527-1537.
- [14] Shu J F, Chen X D, Huang J J. Research and application of tensor voting on wall crack detection [J]. *Journal of Geomatics*, 2017, 42(2): 80-84.
束进芳, 陈晓东, 黄晶晶. 墙体裂缝检测中张量投票算法的应用研究[J]. *测绘地理信息*, 2017, 42(2): 80-84.
- [15] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[C] // *Proceedings of 6th International Conference on Computer Vision*, 1998: 839-846.
- [16] Li J F, Yang F, Huang J. A fast implementation of improved bilateral filter based on ascending dimension [J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2013, 18(1): 137-143.
李俊峰, 杨丰, 黄靖. 一种改进的增维型双边滤波的快速算法[J]. *电路与系统学报*, 2013, 18(1): 137-143.
- [17] Paris S, Durand F. A fast approximation of the bilateral filter using a signal processing approach[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 81(1): 24-52.
- [18] Mou L, Zhang X W, Zhang Z, *et al.* Saliency detection optimization method in natural scene [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 121501.
牟丽, 张学武, 张卓, 等. 自然场景下的显著性检测优化方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 121501.
- [19] Guy G, Medioni G. Inferring global perceptual contours from local features[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1996, 20(1): 113-133.
- [20] Xu W, Tang Z M, Lü J Y. Pavement crack detection based on image saliency [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 18(1): 69-77.
徐威, 唐振民, 吕建勇. 基于图像显著性的路面裂缝检测[J]. *中国图象图形学报*, 2013, 18(1): 69-77.
- [21] Xu W, Tang Z M, Xu D, *et al.* Integrating multi-features fusion and gestalt principles for pavement crack detection [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2015, 27(1): 147-

156.

徐威, 唐振民, 徐丹, 等. 融合多特征与格式塔理论的路面裂缝检测[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(1): 147-156.

[22] Zhang G Q. Study on the concrete bridge bottom

crack inspection method based on image processing

[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.

张国旗. 基于图像处理的混凝土桥梁底面裂缝检测方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.