

# 基于直线段特征单元提取的隧道砼衬砌接缝去除算法

安世全 白 羚 瞿 中

(重庆邮电大学计算机科学与技术学院 重庆 400065)

**摘 要** 由于部分隧道砼衬砌表面图像中固有衬砌接缝与裂缝灰度值相似且线性一致,衬砌接缝处易产生起砂、空鼓、掉块及渗漏水,已有的裂缝检测算法提取单一的裂缝存在缺陷。提出基于直线段特征单元提取的隧道砼衬砌表面衬砌接缝去除算法。在裂缝聚类特征粗检测的基础上,首先通过改进的累计概率霍夫变换检测出显著的直线特征;然后利用像素点的延伸搜索计算来提取衬砌接缝可处理的最小直线段特征单元线;最后根据单元线标记信息及定区域内单元线特征去除部分衬砌接缝,并运用渗流去噪算法得到隧道砼衬砌表面真实裂缝。实验结果表明,提出的算法弥补了已有隧道砼衬砌表面裂缝检测技术的不足,能够精确、快速、有效地去除相似线性特征对单一的真实裂缝检测的干扰,具有较强的鲁棒性。

**关键词** 衬砌接缝去除,累计概率霍夫变换,单元线,渗流去噪,裂缝检测

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.07.055

## Lining Seam Elimination Algorithm in Tunnel Concrete Lining Based on Line Feature Unit Extraction

AN Shi-quan BAI Ling QU Zhong

(College of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract** Due to the brightness similarity and linear consistency between surface cracks and inherent lining seams in some tunnel concrete lining, lining seams are prone to sugaring, hollowing, localized rock fall and water leakage. The existing crack detection algorithms cannot accurately extract single cracks. This paper proposed a lining seam elimination algorithm based on the extraction of line feature unit in tunnel concrete lining. Firstly, on the basis of the clustering characteristics detection which is similar to cracks, the significant linear characteristics have been detected by progressive probabilistic hough transform (PPHT). Secondly, the minimum line feature processing unit of lining seam, which is called Unit-Line, has been extracted by the search calculation of pixel extension. Finally, according to the marking information of the Unit-Line characteristics and the Unit-Line characteristics in fixed area, a part of the lining seams can be removed, and the real surface cracks in tunnel concrete lining can be obtained by the percolation de-noising. The experimental results show that the proposed surface lining seam elimination algorithm based on the extraction of line feature unit, which has strong robustness, fills the gap in the existing technology of tunnel concrete lining surface cracks detection, and the interference of similar linear characteristics to the single real cracks detection can be removed accurately, quickly and effectively.

**Keywords** Lining seam elimination, PPHT, Unit-Line, Percolation de-noising, Crack detection

## 1 引言

隧道是当前交通基础设施的重要组成部分<sup>[1]</sup>,表面裂缝的开裂程度、规律、走向及其病害形态是评价隧道衬砌结构健康状况的指标。基于数字图像处理的裂缝检测技术避免了人工仪器检测的主观性及安全问题,主要由电荷耦合元件 (Charge-Coupled Device, CCD) 组成的图像采集模块和裂缝识别模块构成<sup>[2]</sup>,而裂缝检测算法是裂缝识别模块的重要组成部分。

瑞士 GRP5000 隧道检测系统<sup>[3]</sup>、日本 Komatsu Engi-

neering Corp 的隧道光学检测系统<sup>[4]</sup>及 Yu 等人<sup>[5]</sup>的自动化裂缝检测方法进行隧道衬砌裂缝检测的精度较高,但由于国外检测设备昂贵、技术垄断,我国对隧道衬砌表面裂缝检测的研究处在起步阶段,直到 2015 年,国内首台隧道快速检测车搭载隧道快速测量系统 ZOYON-TFS 才正式下线。目前国内外在裂缝检测效率、精度及安全上的研究仍需改进。

本文提出了基于直线段特征单元提取的隧道衬砌表面衬砌接缝去除算法,补充了相关特殊性研究。首先,在去除长度过短和角度概率偏小的直线段的基础上,进行单像素步长的搜索计算,将衬砌接缝分割为可处理的单像素宽的最小直

到稿日期:2016-06-23 返修日期:2016-09-03 本文受重庆市科委基础科学与前沿技术研究重点项目 (cstc2015jcyjBX0090) 资助。

安世全 (1962—),男,教授,主要研究方向为数字图像处理、微分方程、信息与计算理论, E-mail: ansq@cqupt.edu.cn; 白 羚 (1991—),女,硕士生,主要研究方向为数字图像处理; 瞿 中 (1972—),男,博士,教授, CCF 会员,主要研究方向为数字图像处理、普适计算、物联网技术等。

线段特征单元线(Unit-Line);然后,根据单元线的特征信息去除部分衬砌接缝,并运用基于渗流模型的去噪算法<sup>[6]</sup>得到隧道衬砌表面的真实裂缝。

## 2 衬砌接缝

温度、湿度等变化易造成隧道衬砌结构的胀缩变形,不均匀沉降、位移、水平方向地震波等也将对结构物造成一定破坏。因此,在对隧道进行模筑衬砌结构施工过程中,常设置伸缩缝、沉降缝及抗震缝以防止结构构件产生严重的变形开裂。此外,衬砌的分层分段浇筑极易形成施工结合面即施工冷缝,施工冷缝主要为纵向施工缝及环向施工缝<sup>[7]</sup>。

隧道衬砌表面的固有衬砌接缝与裂缝灰度值相似且线性一致,现有的单纯裂缝检测<sup>[8]</sup>无法准确提取单一的裂缝像素点,图 1(a)为含有衬砌接缝的隧道通道图,图 1(b)为含有衬砌接缝及裂缝的隧道衬砌表面图,虚线框内为裂缝。

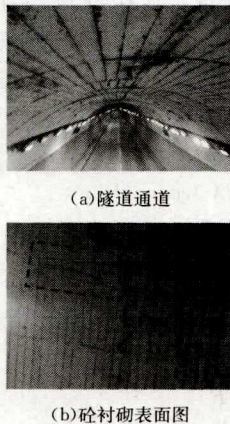


图 1 隧道衬砌表面衬砌接缝示意图

## 3 衬砌接缝去除算法

### 3.1 显著的直线段特征提取

在基于渗流模型<sup>[9]</sup>的裂缝聚类特征粗检测的基础上,本文首先进行图像内轮廓填充,即孔洞填充。目标密度较大、多个目标粘连且形成环状时,不带任何条件的内轮廓填充将造成环状内部背景部分作为目标孔洞进行错误填充,因此,本文将内轮廓面积作为限制条件进行孔洞填充;然后,采用改进累计概率霍夫变换(Progressive Probabilistic Hough Transform, PPHT)<sup>[10]</sup>,完成显著的直线段特征检测及归类,合并具有最大重叠的直线段及邻近角度区域内的直线段集合,去除长度过短及角度概率偏小的直线段。

在合并过程中,首先根据式(1)分别计算直线段  $P_1P_2$  的两端点  $P_1$  和  $P_2$  与直线段  $P_3P_4$  的距离  $H_1$  和  $H_2$ ,如图 2 所示。

$$\begin{cases} H_i = \frac{2 \times \sqrt{(P_h \times (P_h - A_i)(P_h - B_i)(P_h - C))}}{C} \\ P_h = \frac{A_i + B_i + C}{2} \end{cases} \quad (1)$$

若  $P_1$  和  $P_2$  中任一端点到  $P_3P_4$  的距离满足式(2),则该点在平行矩形区域  $Area_{Rec}$  内,如图 2(a)所示;否则,该点在平行区域外,如图 2(b)所示。

$$A_i + B_i \leq H_i + \sqrt{H_i^2 + C^2} \quad (2)$$

若  $H_1 + H_2 < H_{Merge}$ ,则根据  $P_1P_2$  两端点是否在平行区域内进行最大重叠的合并,并保证覆盖两线段(如图 2(b)所示, $P_1P_2$  与  $P_3P_4$  合并为  $P_1P_4$ ),其中  $H_{Merge}$  为两直线段距离的可控的极大值抑制门限。

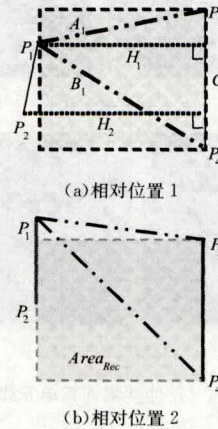


图 2 两线段距离计算示意图

### 3.2 最小可处理的直线段特征单元线

为了保证衬砌接缝的有效去除,加快计算速度,避免不必要的漏检、误检,本文将显著的直线段特征分割为最小可处理的单像素宽的特征单元线。如图 3 所示,虚线框内标记了单像素宽的单元线(Unit-Line),其中,在 Rec2 中的衬砌接缝上的单元线长度较短,与区域内的单元线长度的平均值差值偏小,且相邻单元线位置在宏观上是近似一致的,即没有明显的突变情况;而 Rec1 中裂缝上的单元线长度差异性较大,与相邻衬砌接缝上的单元线产生突变。因此,以待去除衬砌接缝的单元线为中心,计算一定区域范围内的单元线长度平均值,并根据邻近单元线的位置偏移量判断区域内是否存在突变,从而有效去除该单元线并保留裂缝。然后计算待去除衬砌接缝的长度  $L_{Scan}$ ,对过度去除进行判定,还原过度去除,恢复裂缝。

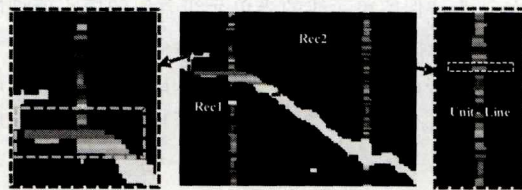


图 3 区域内单元线特征示意图

### 3.3 标记待去除单元线

利用 Bresenham 直线扫描转换算法,只检查一个误差项,获得线段上所有的点,得到点集  $P_{Line}$ ,取其中每一点  $p_{start}$  为起始点进行单位像素步长的搜索计算。若起始点灰度值  $I(p_{start}) = 255$ ,即起始点属于目标白色像素点,如图 4(b)所示,则直接计算该起始点所在目标区域的单元线长度及端点坐标位置;若  $p_{start}$  为背景像素点,如图 4(a)所示,则沿角度模板方向进行搜索长度  $L_{Search} < L_{SearchMax}$  的延伸搜索,当遇到目标白色像素点时,再计算该点所在目标区域的单元线长度及端点坐标位置。若最大延伸搜索长度  $L_{SearchMax}$  设置过长,则会导致单元线的过度计算,从而影响去除衬砌接缝的判定,因此本

文利用衬砌接缝单元线的长度即接缝宽度的平均值设置单元线搜索计算时的最大延伸搜索长度。

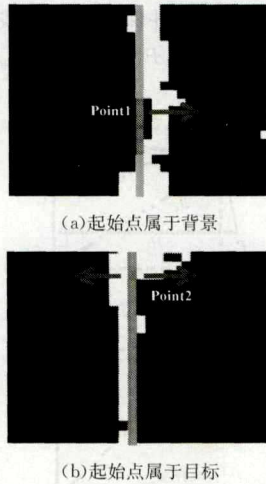


图4 延伸搜索计算单元线

图5为单元线标记流程图,其中定义单元线标签  $Tag=0$  为保留单元线,  $Tag=1$  为去除单元线,单元线的3种标记准则如下。

Rule1 若该单元线长度  $L[0]$  满足式(3):

$$\begin{cases} L[0] > L_{Avg} + \delta \\ L_{Avg} = \frac{1}{2n+1} \sum_{i=-n}^n L[i] \end{cases} \quad (3)$$

其中,以该单元线延伸搜索的起始点  $p_{start}$  为中心,  $L[i]$  为其  $n$  个单位像素邻近的单元线的长度,  $\delta$  为两个单位像素的偏移增量,在本文中取经验值  $n=3$ 。

Rule2 若该单元线  $p_{start}$  的两侧半单元线长度  $L[0]_1, L[0]_2$  满足式(4),且该单元线两端点与其邻近的第  $n$  条单元线的两端点的偏移差值大于2:

$$\begin{cases} |L[0]_1 - L[-1]_1| \geq L_{Ddiff} \parallel |L[0]_2 - L[-1]_2| \geq L_{Ddiff} \\ |L[0]_1 - L[1]_1| \geq L_{Ddiff} \parallel |L[0]_2 - L[1]_2| \geq L_{Ddiff} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $L_{Ddiff}$  为待保留单元线的半单元线差值的极小值抑制门限,即两个单位像素的偏移误差。

Rule3 衬砌接缝长度满足  $0 < L_{Scan} < L_{Recover}$ , 其中  $L_{Recover}$  为待去除衬砌接缝长度的极小值抑制门限,即还原裂缝的最大长度。

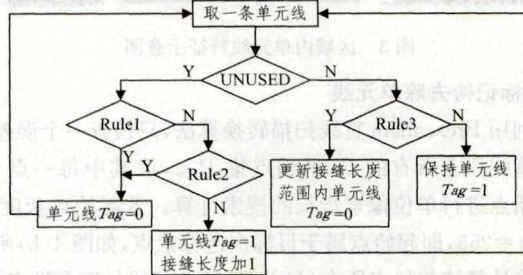


图5 单元线标记流程

### 3.4 衬砌接缝去除算法步骤

衬砌接缝去除算法步骤描述如下:

(1)输入待处理图像,进行限制条件下的内轮廓孔洞填充。

(2)执行 PPHT 算法,得到相应直线段集合  $Line$ ,完成直线检测及归类。

(3)遍历直线段集合  $Line$ ,将最大重叠的直线段进行合并,之后设置累加器统计各角度区域内出现直线段的次数从而判定角度模板方向,去除长度过短及角度概率偏小的直线段,提取显著的直线段特征。

(4)执行 Bresenham 直线扫描转换算法,获取直线段上的点,并以单像素步长的延伸搜索计算单元线。

(5)定义单元线标签,对所有单元线进行标记。

(6)根据单元线标记信息去除衬砌接缝,并进行渗流去噪,最终输出结果图。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 实验评价指标

本文采取精确率(Precision, P)、召回率(Recall, R)<sup>[11]</sup>、噪声率(Noise Rate, NR)、假阳性率(False Positives Rate, FPR)、准确度(Accuracy, Acc)、加权调和平均值(F-Measure, F)作为算法的综合评价指标进行实验定量分析。其定义如下:

$$P = \text{card}(R_C \cap D_C) / \text{card}(D_C) \quad (5)$$

$$R = \text{card}(R_C \cap D_C) / \text{card}(R_C) \quad (6)$$

$$NR = \text{card}(R_B \cap D_C) / \text{card}(D_C) \quad (7)$$

$$FPR = \text{card}(R_B \cap D_C) / \text{card}(R_B) \quad (8)$$

$$Acc = \frac{\text{card}(\text{card}(R_C \cap D_C) \cup \text{card}(R_B \cap D_B))}{\text{card}(R_C \cup R_B)} \quad (9)$$

$$F = \frac{(\alpha^2 + 1) \times P \times R}{\alpha^2 \times (P + R)} \quad (10)$$

其中,  $\text{card}(\cdot)$  表示集合中的元素个数,  $\cap$  表示集合交运算,  $\cup$  表示集合并运算,  $R_C$  及  $R_B$  分别表示人工提取的真实裂缝图像中的裂缝像素集合及背景像素集合,  $D_C$  及  $D_B$  分别表示检测结果中的裂缝像素集合及背景像素集合。

精确率越低说明检测结果中正确目标的所占比例低,存在过多误检;召回率越低说明检测结果中可召回真实目标类的比例低,存在过多漏检;噪声率表示错误分类即检测为背景噪声的结果概率;当式(10)中参数  $\alpha$  为1时,调和平均值  $F_1$  可较为全面地反映算法性能。

本文另采用真阳性率-假阳性率曲线即受试者操作特征(Receiver Operating Characteristic, ROC)<sup>[12]</sup>进行实验定量分析,其中真阳性率(True Positives Rate, TPR)即灵敏度(Sensitivity),满足  $TPR=R$ ;假阳性率与特异度(Specificity)满足  $FPR + Specificity = 1$ ;准确度  $Acc$  越大,ROC 曲线下面积(Area Under Curve, AUC)越大,算法性能越好。

### 4.2 实验分析

在实际工程图像中选取不同衬砌背景、不同特征的大小为  $400 \times 300$  的隧道衬砌表面图像作为实验定量分析的数据测试集。如图6及表1所示,本文算法有效去除了衬砌接缝及团状噪声对裂缝检测精度的影响,检测到的裂缝与人工提取的真实裂缝基本一致。如图7所示,本文算法的ROC曲线趋向于左凸,  $Acc$  值、AUC 值较大且接近于1。综合考虑,本文算法能够精确、高效地提取出真实裂缝,特异度高,灵敏度高,具有较强的鲁棒性。

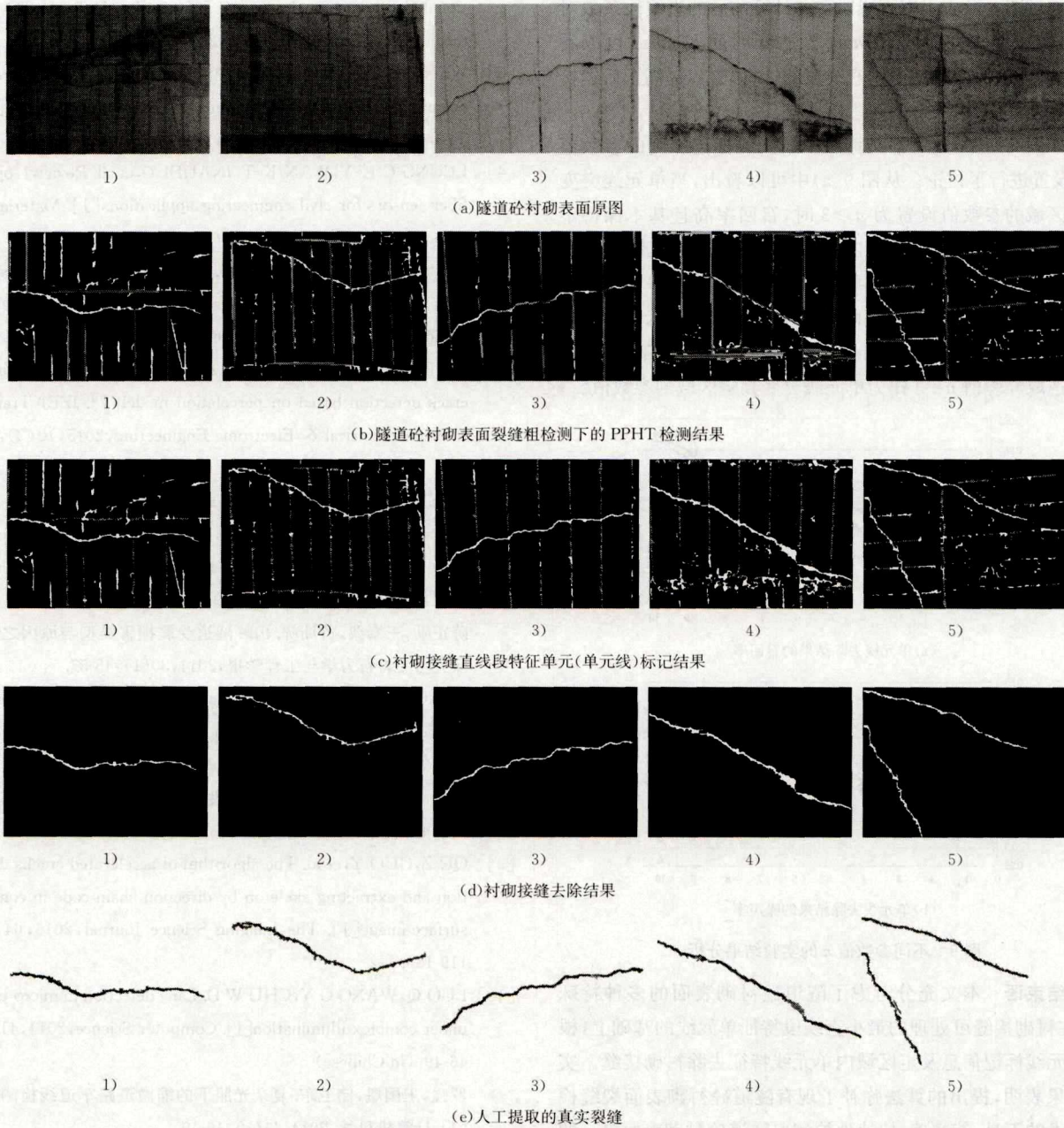


图 6 衬砌接缝去除算法的实验结果

表 1 衬砌接缝去除算法量化分析

| Image     | Line Number |       |        |           | Time/s |         |       |       | Performance/% |       |      |       |                |  |
|-----------|-------------|-------|--------|-----------|--------|---------|-------|-------|---------------|-------|------|-------|----------------|--|
|           | PPHT        | Merge | Reduce | Improve/% | Remove | Denoise | Total | P     | R             | NR    | FPR  | Acc   | F <sub>1</sub> |  |
| 图 6(a) 1) | 20          | 7     | 13     | 65.00     | 0.405  | 0.063   | 0.468 | 92.69 | 99.72         | 7.31  | 0.10 | 99.90 | 96.08          |  |
| 图 6(a) 2) | 41          | 13    | 28     | 68.29     | 0.499  | 0.062   | 0.561 | 86.00 | 96.62         | 14.00 | 0.18 | 99.78 | 91.00          |  |
| 图 6(a) 3) | 88          | 15    | 73     | 82.95     | 0.359  | 0.046   | 0.405 | 95.88 | 98.82         | 4.12  | 0.05 | 99.93 | 97.33          |  |
| 图 6(a) 4) | 64          | 20    | 44     | 68.75     | 0.593  | 0.093   | 0.686 | 93.95 | 97.14         | 6.05  | 0.05 | 99.82 | 95.52          |  |
| 图 6(a) 5) | 21          | 8     | 13     | 61.90     | 0.327  | 0.078   | 0.405 | 93.32 | 96.24         | 6.68  | 0.12 | 99.82 | 94.76          |  |

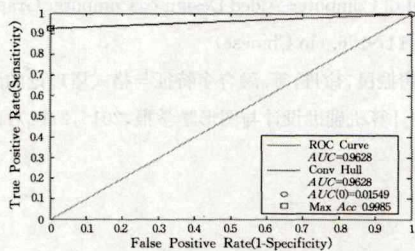


图 7 隧道衬砌表面衬砌接缝去除算法 ROC 曲线

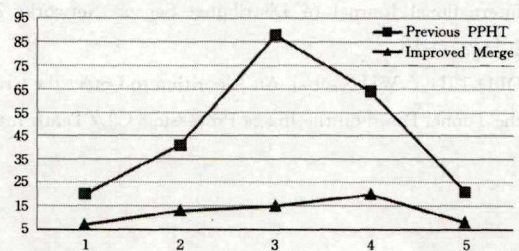
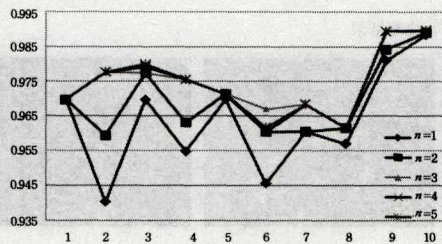


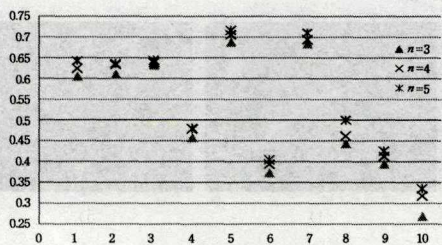
图 8 直线段数量合并前后对比

通过图8及表1中直线段合并计算前后的直线段条数对比、衬砌接缝去除时间 *Remove* 及去噪时间 *Denoise* 可以看出,本文算法有效地减少了直线段的计算冗余,提高了后续接缝去除计算的效率。

如图9所示,针对本文算法中单元线标记准则的参数值  $n$  的设置进行了讨论。从图9(a)中可以看出,当单元线突变判定区域的参数值设置为  $n \geq 3$  时,召回率高且基本保持不变,即去除衬砌接缝的结果中保留的真实裂缝像素点多,过度去除较少。从图9(b)中可以看出,当  $n$  设置为3时,噪声率低,即实验结果有效地去除了过多衬砌接缝对真实裂缝的干扰。因此,本文在考虑去除结果的召回率的前提下,根据噪声率选取经验值  $n=3$  作为单元线突变判定区域的参数值。



(a)单元线去除结果的召回率



(b)单元线去除结果的噪声率

图9 不同参数值  $n$  的实验结果分析

**结束语** 本文充分考虑了隧道衬砌表面的多种特殊性,在衬砌接缝可处理的最小直线段特征单元线的基础上,根据单元线标记信息及定区域内单元线特征去除衬砌接缝。实验结果表明,提出的算法弥补了现有隧道衬砌表面裂缝检测技术的不足,能精确、快速地检测出隧道衬砌表面单一的真实裂缝,特异度高,灵敏度高,具有较强的鲁棒性;同时,本算法可推广应用于其他复杂交错的相似线性特征检测及去除。

## 参考文献

- [1] SHEN B, ZHANG W Y, QI D P, et al. Wireless multimedia sensor network based subway tunnel crack detection method[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 2015(2):1-10.
- [2] QI D, LIU Y, WU X, et al. An Algorithm to Detect the Crack in the Tunnel Based on the Image Processing[C]//Tenth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. IEEE, 2014:860-863.
- [3] WEN Z B, DUAN Q, LI Z Z. Application of Laser Holographic Scanning Technology in Tunnel Disease Investigation [J]. Transportation Standardization, 2014, 42(23):115-118.
- [4] LEUNG C K Y, WAN K T, INAUDI D, et al. Review: optical fiber sensors for civil engineering applications[J]. Materials & Structures, 2015, 48(4):871-906.
- [5] YU S N, JANG J H, HAN C S. Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel[J]. Automation in Construction, 2007, 16(3):255-261.
- [6] QU Z, LIN L D, GUO Y, et al. An improved algorithm for image crack detection based on percolation model[J]. IEEJ Transactions on Electrical & Electronic Engineering, 2015, 10(2):214-221.
- [7] CHEN Z X, WANG T D, HUANG C H. Case study of earthquake-induced damage patterns of rock tunnel and associated reason[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1):45-57. (in Chinese)  
陈正勋,王泰典,黄灿辉.山岭隧道受震损害类型与原因之案例研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(1):45-57.
- [8] DONG A G, LIANG M M. Crack detection algorithm based on gray correlation[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(10):3121-3123. (in Chinese)  
董安国,梁苗苗.基于灰度相关性的裂缝检测算法[J].计算机应用研究,2013,30(10):3121-3123.
- [9] QU Z, GUO Y, et al. The algorithm of accelerated cracks detection and extracting skeleton by direction chain code in concrete surface image[J]. The Imaging Science Journal, 2016, 64(3):119-130.
- [10] LUO Q, WANG G Y, CHU W D. Lane detection in micro-traffic under complex illumination[J]. Computer Science, 2014, 41(3):46-49. (in Chinese)  
罗强,王国胤,储卫东.复杂光照下的缩微道路车道线检测方法[J].计算机科学,2014,41(3):46-49.
- [11] QU Z, LIN L D, GUO Y. Algorithm of image crack detection based on morphology and region extends[J]. Computer Science, 2014, 41(11):297-300. (in Chinese)  
瞿中,林丽丹,郭阳.形态学与区域延伸结合的裂缝检测算法研究[J].计算机科学,2014,41(11):297-300.
- [12] 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. (in Chinese)  
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.