光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023091501

基于 LSD 和 FLD 融合的道路裂缝图像预处理方法研究

陈昌川*，彭　芳

（重庆邮电大学 通信与信息工程学院，重庆 400065）

摘　要： 针对道路中的路标、路沿等直线类干扰物影响道路裂缝识别的问题，提出一种基于 LSD(Line Segment Detector)和 FLD(Fast Line Detector)融合的道路裂缝图像预处理方法。首先，基于 LSD 算法和 FLD 算法对裂缝图像进行直线检测，获取直线类干扰物的线段坐标值；其次，根据直线检测算法返回的线段坐标值进行断线重连，解决了直线检测算法提取线段不连续的问题；最后，根据线段重连后获取的直线类干扰物的掩膜图和裂缝图像原图，运用 FMM(Fast Marching Method)图像修复算法达到消除直线类干扰物的目的。经过大量实验分析可得：该方法能够有效地消除裂缝图像中的直线类干扰物，使得裂缝检测的准确率提升了 7.1%。

关键词： LSD 算法；FLD 算法；断线重连；FMM 图像修复算法

中图分类号： TP391　**文章编号：** 1001－5868(2024)01－0122－08

Adaptive Road Crack Image Preprocessing Method Based on LSD-FLD Fusion

CHEN Changchuan, PENG Fang

(School of Communications and Information Engin., Chongqing University of Posts and Telecomm., Chongqing 400065, CHN)

Abstract: This study proposes a road crack image preprocessing method based on the fusion of a line segment detector (LSD) and fast line detector (FLD) to address the issue of linear interference, such as road signs and road edges, which affect road crack recognition. First, based on the LSD and FLD algorithms, line detection is performed on the crack image to obtain the line segment coordinate values of linear interferences. Second, by reconnecting the broken lines based on the line segment coordinate values returned by the line detection algorithm, the problem of extracting discontinuous line segments is solved using the line detection algorithm. Finally, the fast marching method (FMM) inpainting algorithm is used to eliminate linear interferences using the mask image of the linear interferences and the original image of the crack image obtained after reconnecting the line segments. Based on extensive experimental analysis, this method can effectively eliminate linear interference in crack images, improving the accuracy of crack detection by 7.1%.

Key words: LSD algorithm; FLD algorithm; intermittent line segment reconnection; FMM image repair algorithm

0　引言

裂缝类破损是公路路面主要且常见的破损之一，它会加速路面结构损坏，降低公路整体的性能和寿命。面对日益增长的路面养护需求，路面裂缝自动检测对于路面养护极为重要。路面状况复杂多变，检测路面裂缝信息主要面临着如下挑战：(1)难以快速、准确且稳定地识别路面裂缝；(2)影响裂缝识别的干扰因素太多；(3)缺乏快速、准确的消除影响裂缝识别干扰物的方法。针对检测路面信息复杂

收稿日期：2023－09－15.

* **通信作者：**陈昌川

的问题，本文提出了一种基于 LSD(Line Segment Detector)算法和 FLD(Fast Line Detector)算法相融合的道路裂缝图像预处理方法，用于直线类干扰物的检测，以达到消除路面部分干扰的目的。

LSD 算法是基于梯度的一种直线检测分割算法，它能在线性的时间内得出亚像素级精度的检测结果。近年来，LSD 算法应用较为广泛。2020 年王冬梅等[1]针对 LSD 算法在对图像中连续的边缘进行提取时，结果中常常呈现线段不连续的问题，提出了一种基于信息熵的自适应高斯金字塔的 LSD 改进算法。2021 年曹义亲等[2]针对传统 LSD 直线检测算法容易丢失图像细节，造成提取直线不连续等不足，提出了一种基于双边滤波改进 Canny 提取边缘图像的 LSD 直线检测算法。2022 年李玉峰等[3]针对 LSD 进行研究改进，提出了 Light-LSD，改进了特征重复、特征断连、特征过短等问题。实验结果表明，在弱纹理场景下 Light-LSD 可以剔除大量无效特征，使总特征数量减少 60%，提高算法整体运行效率。

LSD 直线检测算法是基于多尺度边缘检测的直线检测算法，可以在图像中检测出所有的直线段。而 FLD 直线检测算法是基于极小二乘法的直线拟合算法，可以在图像中找到最佳拟合直线。FLD 算法是用边缘检测代替像素合并，在边缘检测的基础上只连接边缘像素，不进行复杂的线段验证，因此 FLD 算法能以更快的速度提取线特征[4]。FLD 也得到了一些运用，例如彭亚慧等[5]通过改进的 FLD 直线检测方法识别并计算道路图像中车道线直线的角度。曾俊琪等[6]使用 FLD 算法和 LSD 算法来识别不同高度的车位线，并做了对比试验，可看出 FLD 算法和 LSD 算法各具优点。

1　核心算法

1.1　LSD 算法

1.1.1　LSD 算法原理

LSD 是一种直线检测分割算法，该算法基于梯度运算，能在短时间内检测出影像上亚像素级精度的线段特征。检测直线的实质就是在图像中搜索梯度变化较大的像元，LSD 算法中的梯度和水平线是两个基本的理论，如图 1 所示[7]。LSD 算法从梯度最大的像素出发，计算该像素点附近的水平线角度并形成线支撑区域(Line Support Region，LSR)，每个 LSR 都是线段检测的备选区域，如图 2 所示[7]。

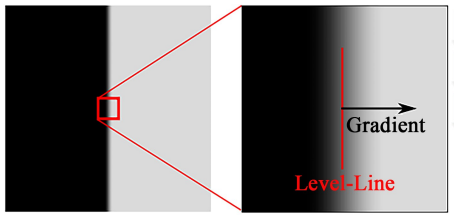
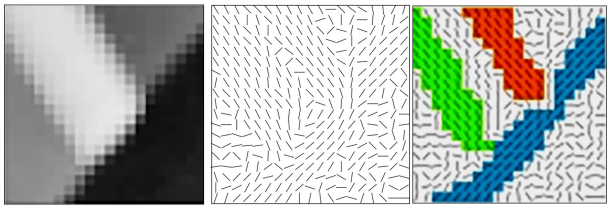


图 1　像素的梯度和水平线[7]



(a) 原图　　(b) 水平线字段　(c) 线路支持区域

图 2　线支撑区域生成[7]

1.1.2　LSD 算法流程

(1)高斯降采样，即高斯模糊后降采样，目的是减弱锯齿效应。

(2)梯度计算。图像梯度计算为：

$$g_x(x,y)=\frac{i(x+1,y)+i(x+1,y+1)-i(x,y)-i(x,y+1)}{2},$$

$$g_y(x,y)=\frac{i(x,y+1)+i(x+1,y+1)-i(x,y)-i(x+1,y)}{2} \tag{1}$$

式中，$i(x,y)$是像素(x,y)处的图像灰度值。

这里梯度的大小定义为：

$$G(x,y)=\sqrt{g_x^2(x,y)+g_y^2(x,y)} \tag{2}$$

水平角定义为：

$$\arctan(g_x(x,y)/(-g_y(x,y))) \tag{3}$$

(3)伪排序。将梯度分为 1 024 个桶，将梯度放入相应桶中，并不做全排序。这里认为梯度越大，越可能是直线。

(4)剔除梯度值小于阈值的像素点。

(5)从排序列表中选取种子像素，基于区域增长算法生成线性支撑区域，获取较为规范的矩形直线区域。

(6)矩形的纠正。需要计算 NFA 值，本文理解为：它可以看作伯努利分布下，随机获得的矩形内梯度一致性要好于当前矩形内梯度一致性的情况数，该数值越小，则当前矩形内梯度的一致性越好。

1.2　FLD 算法

FLD 是一种基于边缘检测的直线检测算法，其原理是通过对图像边缘进行分析，找到其中的直线

特征。其工作流程如下：

(1)边缘检测。使用 Canny 等边缘检测算法对图像进行边缘检测，得到二值化的边缘图像。

(2)累加器数组初始化。初始化一个累加器数组，用于存储直线的参数空间。

(3)参数空间投票。对于每个边缘点，计算其到所有可能直线的距离，并在累加器数组中对应的位置进行投票。

(4)直线提取。在累加器数组中找到投票数最多的位置，这个位置对应的直线即为图像中的一条直线。

(5)非极大值抑制。对于相邻的直线，保留投票数最多的直线，其余直线进行抑制。

(6)阈值处理。根据设定的阈值，将投票数低于阈值的直线进行过滤。

(7)输出直线。输出检测到的直线的参数，如斜率和截距等。

FLD 直线检测算法的优点是速度快，适用于实时应用，但其精度相对于其他直线检测算法较低。

2 本文改进的方法

2.1 基于灰度直方图的 LSD 与 FLD 融合的算法

FLD 直线检测算法性能与 LSD 直线检测算法相似，可以看作是快速 LSD 算法。FLD 算法是基于极小二乘法的直线拟合算法，可以在图像中找到最佳拟合直线，所以在设置阈值时，FLD 算法能更精确地识别图像中较细的直线，而不会识别多余的线条，例如将裂缝识别为直线。而 LSD 算法则是基于多尺度边缘检测的直线检测算法，可以在图像中检测出所有的直线段[8]，但因此也会导致在阈值设置时，既会将细小直线检测到，也会将裂缝误识别为直线。所以本文将 LSD 用于识别较粗直线，FLD 用于识别较细直线，以达到对裂缝图像中的直线类干扰物进行检测的目的。

具体实现方法为：首先用 labelme 生成直线干扰物的 mask 图，mask 图与原图结合生成直方图，可获得直线干扰物的灰度级范围大致为 0～60；然后再将所有图像分为细直线和粗直线两组，分别统计每张图像灰度级在 0～60 的像素点求和的值，获得粗线的像素点求和的最小值 min_pixel 和细线像素点求和的最大值 max_pixel；最后根据 min_pixel 和 max_pixel 来确定裂缝图像使用 LSD 算法或者 FLD 算法。

本文使用统计图像灰度级在 0～60 的像素点的值的方法将 LSD 算法和 FLD 算法融合在一起，相较于串联使用两种检测算法，其准确率和速度都有所提升。当不使用融合的情况下进行本文的预处理工作时，流程图如图 3 所示，会因为每张图像都经过三次直线检测和三次直线消除而造成处理时间变长。使用融合的方法后，图像灰度级在 0～60 的像素点求和的值高于 130 000 的不经过 FLD 直线处理，低于 10 000 的不经过 LSD 直线处理，如图 4 所示，在不降低直线检测率的情况下，大大节省了预处理的时间。

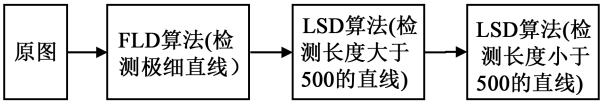


图 3 串联不同阈值的 LSD 和 FLD 算法系统

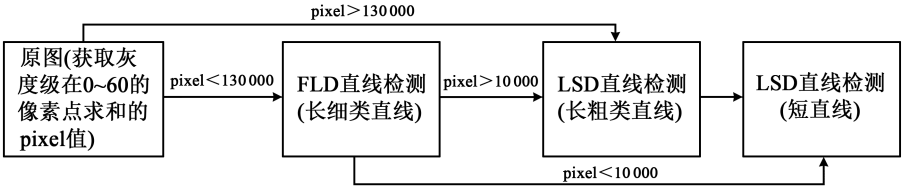


图 4 LSD 与 FLD 融合的直线检测系统

2.2 不连续线段重连机制

即使自适应地使用 LSD 算法和 FLD 算法对直线类干扰物进行检测，但仍然会有部分被识别直线出现不连续的情况，如图 5 所示。因此本文利用直线检测返回的直线坐标列表进行断线重连，主要流程如下：

(1)创建空数组 $X_1[]$，$Y_1[]$，$X_2[]$，$Y_2[]$，用于存放线段的首尾坐标值；

(2)遍历当前图像直线检测算法返回的线段坐标列表，根据需求返回长度在阈值范围内的线段首尾坐标(x_1,y_1)，(x_2,y_2)，并将其分别存放在预先创建好的数组中；

(3)通过双重遍历 $X_1[]$，$Y_1[]$，$X_2[]$，$Y_2[]$，计算当前线段的斜率 k_1，截距 d_1，根据待比较线段的首尾坐标(x_3,y_3)，(x_4,y_4)计算其斜率 k_2，截距 d_2，计算两条线段的距离 d_{is}；

(4)由于裂缝图像中直线基本上是水平和竖直的,所以需要分情况来连接新直线。如果 $k_1=k_2=\infty$,则计算 x_1 与 x_3 的差值的绝对值;若小于 3 且 d_{is} 小于 500,则将当前线段的尾坐标和待比较线段的首坐标连接成一条新的直线;如果 $k_1=\infty$,x_3 与 x_4 差值的绝对值小于 5,或 $k_2=\infty$,x_1 与 x_2 差值的绝对值小于 5,且 d_{is} 小于 500,则将当前线段的尾坐标和待比较线段的首坐标连接成一条新的直线;如果 $k_1=k_2=0$,则计算 y_1 与 y_3 的差值的绝对值,若小于 3 且 d_{is} 小于 500,则将当前线段的尾坐标和待比较线段的首坐标连接成一条新的直线;如果 k_1,k_2 都小于 -1,或者都大于 1,且若 d_1 与 d_2 差值的绝对值小于 10 且 d_{is} 小于 500,则将当前线段的尾坐标和待比较线段的首坐标连接成一条新的直线;如果 k_1,k_2 都在 $-1\sim1$(包括 -1,1,但不包括 0),若 k_1 和 k_2 差值的绝对值小于 0.1,d_1 与 d_2 差值绝对值在 5,d_{is} 小于 500,则将当前线段的尾坐标和待比较线段的首坐标连接成一条新的直线;

(5)重复步骤(3)、(4),直到图像中每一条直线都相互比较完成。

斜率 k 公式和截距 d 公式如下:

$$k_1=\begin{cases}(y_2-y_1)/(x_2-x_1) & x_2-x_1\neq0\\ \infty & x_2-x_1=0\end{cases}\tag{4}$$

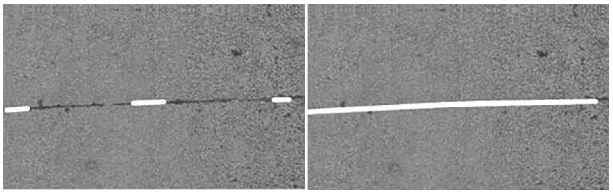
$$k_2=\begin{cases}(y_4-y_3)/(x_4-x_3) & x_4-x_3\neq0\\ \infty & x_4-x_3=0\end{cases}\tag{5}$$

$$\begin{aligned}d_1&=y_1-k_1\times x_1\\ d_2&=y_3-k_2\times x_3\end{aligned}\tag{6}$$

距离公式:

$$d_{is}=\sqrt{(x_3-x_1)^2+(y_3-y_1)^2}\tag{7}$$

不连续线段的重连机制,解决了直线不连续的问题,使得直线的消除工作更彻底,同时也降低了裂缝检测的误识别率。



(a) 重连前　　(b) 重连后

图 5　断线重连对比图

2.3　FMM(Fast Marching Method)图像修复算法在裂缝图像预处理中的应用

FMM 算法是基于快速行进的方法,其工作原理为:首先逐渐填充边界中的所有内容,在要修复的邻域上的像素周围需要一个小的邻域。该像素被附近所有已知像素的归一化加权总和所代替,因此权重的选择很重要。那些位于该点附近,边界法线附近的像素和那些位于边界轮廓线上的像素将获得更大的权重。修复像素后,将使用快速行进方法将其移动到下一个最近的像素。FMM 确保首先修复已知像素附近的那些像素,以便像手动启发式操作一样工作[9]。

本文算法是先通过直线检测算法对图像中的直线类干扰物进行检测,再进行断线重连,然后生成仅有直线类干扰物的 mask 图,最后根据 mask 图对原图采用 FMM 算法进行处理,其结果如图 6 所示。



(a) 原图　　(b) mask 图　　(c) FMM 算法处理后的图

图 6　FMM 算法处理图像

3　实验过程及分析

本实验基于 LSD 算法与 FLD 算法融合的道路裂缝图像预处理方法,使用的数据由多功能道路检测车在复杂场景下的路面上采集的裂缝图像。同时将本文预处理图像与传统方法进行预处理的图像送入神经网络进行裂缝检测,并将其他常见直线检测算法与本文算法进行比较,最后通过一系列实验操作得出结论。

3.1　实验设计

(1)将图片进行灰度化处理。与彩色图像相比,灰度图占用内存小、运算速度快;灰度化后,可在视觉上增加对比,突出目标区域;

(2)获取图像灰度级直方图。一幅图像由不同灰度值的像素组成,图像中灰度的分布情况是该图像的一个重要特征。前期通过数据统计,得到的直线类接缝的灰度级范围为 0～60,粗直线的像素点

求和的最小值 min_pixel 为 10 000，细线的像素点求和的最大值 max_pixel 为 130 000；

(3)进行 FLD 直线检测。根据上一步获取每张图像中灰度级在 0～60 的像素个数的总数，对该区间像素点总数低于 130 000 的图像进行 FLD 检测，高于该值的图像则不经过 FLD 检测，这一步可以消除细直类直线干扰物；

(4)进行第一轮 LSD 检测。虽然 LSD 算法有无参输入的优点，但针对本文的裂缝图像中的直线检测，阈值的设定不同，其所识别的效果也不相同。本文将粗直线类干扰物总体分为短粗直线和长粗直线，分别使用不同阈值的 LSD 算法进行检测。根据前面获取的 0～60 的像素点求和值，对像素点求和值高于 10 000 的图像进行本轮 LSD 检测，具体检测流程为：第一步，将图片的尺寸由 3 846×1 000 降为 1 000×500，可以增加 LSD 对长粗直线的识别率；同时避免对裂缝的误识别(LSD 算法本身是会将输入图像源缩小至原图像的 80%，这样可以减弱或消除图像中的锯齿效应，利用高斯下采样的方式对输入图像进行操作。但由于本文所使用的数据是高分辨率数据，所以再对原图进行缩放会增加长粗直线的识别率)；第二步，对图片进行双边滤波处理。双边滤波(Bilateral Filter)是一种非线性滤波方法，可结合图像的空间邻近度和像素值相似度的一种折中处理，同时考虑空域信息和灰度相似性，以达到保边去噪的目的，这有效地避免了将部分裂缝误识别为直线；第三步，对图像进行 LSD 直线检测，倾斜角度公差为 70°，其对直线的覆盖率更广，对边缘不太平滑的直线也能进行检测，所以在进行直线绘制时，设置直线长度阈值为 500，排除短的直线，避免将裂缝识别为直线；最后一步，将 LSD 检测的直线绘制在 1 000×500 的掩膜图上，然后结合掩膜图与 resize 后的图像进行图像修复处理，即可消除长粗类直线干扰物，再将图像尺寸还原；

(5)进行第二轮 LSD 检测。本轮检测主要是检测短粗类直线干扰物，比如油漆线等。第一步，进行均值滤波；第二步，进行倾斜角度公差为 22°、限定在梯度范数上的量化误差为 2 的 LSD 直线检测，该参数对直线的边缘平滑度和直线的笔直度要求更高；第三步，进行断线重连；最后一步，将 LSD 检测的直线绘制在 3 846×1 000 的掩膜图上，然后结合掩膜图与 resize 后的图像进行图像修复处理，即可消除短粗直线干扰物；

(6)最后输出保存直线干扰物消除后的图像。

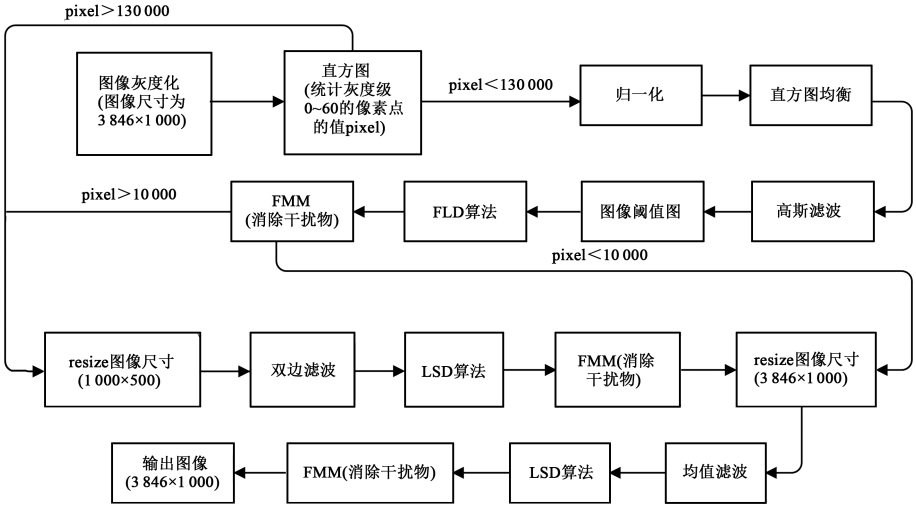


图 7 本文算法流程图

3.2 不同直线类干扰物场景下的实验结果

由于道路裂缝检测场景的复杂性，为了验证本文算法在不同直线类干扰物场景下的适用性，将其分为 3 类不同场景：接缝类，斑马线、箭头等路标类，路沿线类。使用本文的算法分别对不同场景的裂缝图像进行处理。

(1)接缝类场景下的预处理实验结果

接缝是一条很细并且颜色比较深的一条直线，而裂缝也是比较细、颜色比较深的线。两者的区别就是裂缝是不规则有分支的纹路，接缝是比较笔直的没有分支的线，所以本文通过直线检测算法去除这类干扰。实验结果如图 8 所示。

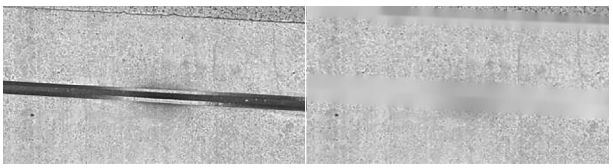


图 8　使用本文算法对接缝类场景下的裂缝图片预处理效果

(2)路标线类场景下的预处理实验结果

地面路标是由油漆刷的，时间久了就会出现开裂的情况，但这并不属于沥青路面的裂缝，而这种线条是最接近裂缝的线条，因此机器识别时候也特别容易将其识别为裂缝，造成误识别率提高。实验结果如图 9 所示。

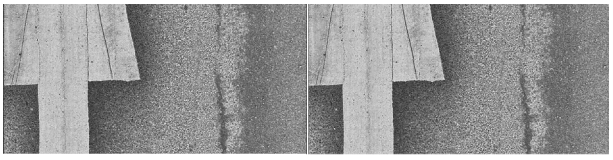


图 9　使用本文算法对路标类场景下的裂缝图片预处理效果

(3)路沿线类场景下的预处理实验结果

在进行裂缝图像数据采集时，会出现道路两边是地砖铺成的道路，而这种道路会有规则的砖缝线条，而在后期进行裂缝识别时，这类线条也是很容易被误识别为裂缝的，因此也可以通过直线检测将其去除。实验结果如图 10 所示。

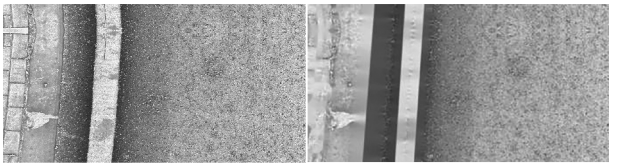


图 10　使用本文算法对地砖线类场景下的裂缝图片预处理效果

3.3　对比试验

3.3.1　本文预处理结果与传统预处理裂缝识别效果对比

为验证本文预处理方法与传统预处理方法相比的优势，将本文算法与传统预处理方法(主要通过灰度化，滤波，直方图均衡处理)所处理后的图片通过基于 transformer 的语义分割算法进行裂缝检测[10]后进行对比，不同场景下具体实验结果对比如图 11～13 所示，裂缝识别率具体结果见表 1。



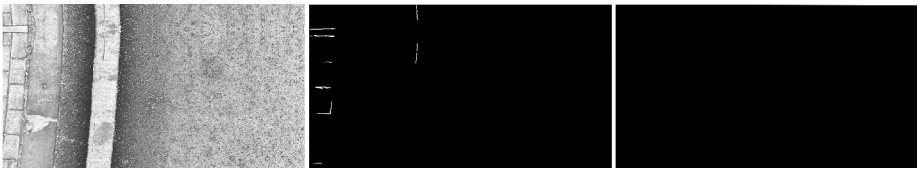
(a) 原始图片　(b) 传统预处理后裂缝识别情况　(c) 本文预处理后裂缝识别情况

图 11　接缝类场景下裂缝识别结果



(a) 原始图片　(b) 传统预处理后裂缝识别情况　(c) 本文预处理后裂缝识别情况

图 12　路标类场景下裂缝识别结果



(a) 原始图片　(b) 传统预处理后裂缝识别情况　(c) 本文预处理后裂缝识别情况

图 13　路沿线类场景下裂缝识别结果

表 1　裂缝识别 MIoU 对比

预处理方法	MIoU
传统预处理方法[10]	0.719
本文预处理方法	0.790

表 1 中的 MIoU 为该数据集中的每一个类的交并比的平均，计算公式如下：

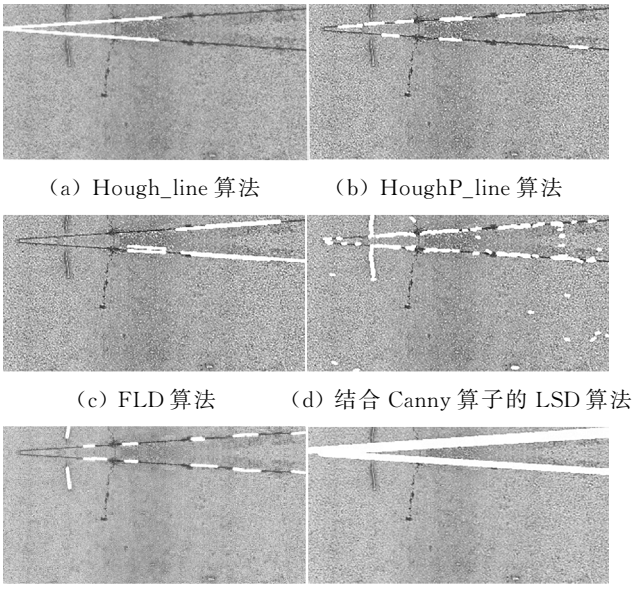
$$MIoU=(k+1)^{-1}\sum_{i=0}^{k}\frac{p_{ii}}{\sum_{j=0}^{k}p_{ij}+\sum_{j=0}^{k}p_{ji}-p_{ii}} \tag{8}$$

式中：P_{ij} 表示将 i 类别预测为 j 类别。从表 1 中可以看出，本文所使用的预处理算法的 MIoU 好于传统的图像预处理算法，故使用本文预处理算法在复杂场景下的道路裂缝检测中可达到更好的效果，适用性更强。

裂缝检测所使用的 Transformer 模型是一种用于自然语言处理的深度学习模型，由 Google 在 2017 年提出，最初被用于自然语言处理任务，但近年来也被应用于计算机视觉领域。在道路裂缝检测中，Transformer 模型用于图像分割任务，即将图像中的每个像素分配给道路裂缝和背景两个不同类别。它的主要特点是使用了自注意力机制（Self-Attention）来捕捉输入序列中的上下文信息，避免了传统的循环神经网络（RNN）和卷积神经网络（CNN）中存在的长依赖问题。Transformer 模型的核心是由多个编码器和解码器组成的堆叠结构，编码器和解码器都由多个层组成，每个层包含了一个自注意力机制和一个前馈神经网络[10]。总的来说，Transformer 模型在道路裂缝检测中的运用可以提高检测的准确性和效率，所以将其用于本文后期的道路裂缝检测来验证本文算法的可行性。

3.3.2 不同直线检测方法实验对比

图 14 是不同直线检测方法在同一张裂缝图像中的检测结果图，白色为检测到的直线。



（a）Hough_line 算法　（b）HoughP_line 算法

（c）FLD 算法　（d）结合 Canny 算子的 LSD 算法

（e）LSD 算法　（f）本文算法

图 14　不同直线检测算法识别结果对比图

实验需要的数据根据其干扰物类型大概可分为四类：路沿线类，接缝类，斑马线、箭头等路标，以及将只有裂缝的图片分为一类，测试直线检测是否将裂缝误识别为直线。其中每一类的数量大概在 100 张左右，具体数据信息如表 2 所示。

表 2　复杂场景下裂缝图像分类

算法	路沿线类/108 张	接缝类/105 张	路标类/109 张	裂缝类/200 张
Hough_line 算法[11]	20	12	18	12
HoughP_line 算法	20	5	14	9
FLD 算法	100	40	65	8
LSD 算法[12]	104	50	37	5
结合 Canny 算子的 LSD 算法[13]	107	70	99	54
本文算法	108	100	105	0

Hough 系列算法之所以在本文的数据集中的直线检测中效果不太理想，主要是因为道路裂缝图像中的直线类干扰物不是标准的直线，其长短斜率和粗细都是不规则的，而 Hough 系列算法最大的缺点就是需要根据图片去调节参数[14]，这对于裂缝图像来说是很难调到一个参数使其在检测每一张图像时都能达到很优的效果，这也是本文不选择 Hough 算法的原因。

其中 LSD 算法和 FLD 算法的检测效果优于 Hough 算法，而且具有较好的检测速度。由于裂缝图像中的直线类干扰物有粗也有很细，经过实验发现 LSD 对较粗的直线类干扰物有很好的效果，FLD 对很细的直线类干扰物的检测效果更好。但单独使用两种检测算法并不能将数据集中的各类直线都检测，所以本文采用将两者结合起来使用。

在实验的过程中，通过 Canny 算子对裂缝图像进行边缘检测，然后再用 LSD 进行边缘检测，这种方式对细小的直线效果佳，但对于比较粗、比较长、边缘较不规矩的直线类干扰物识别效果并不理想，并且将裂缝误识别为直线的情况也增加了不少，所以对于裂缝图像中的直线检测，此方法不适用。

综上所述，本文所使用的算法更适用于在复杂场景下得裂缝检测。为了更科学的验证本文直线检测较其他直线检测更适合复杂场景下的裂缝检测预处理，将本文算法与其他常见直线检测算法所处理后的图片通过基于 transformer 语义分割算法进行裂缝检测，然后进行对比，如表 3 所示。

表 3　不同直线检测算法预处理后裂缝检测的识别结果

直线检测算法	MIoU
Hough_line 算法	0.726
HoughP_line 算法	0.725
FLD 算法	0.714
LSD 算法	0.734
结合 Canny 算子的 LSD 算法	0.761
本文算法	0.790

4　结论

本文针对复杂场景下道路裂缝直线类干扰物致使裂缝检测误识别率高的问题，提出了基于 LSD 和 FLD 融合的道路裂缝图像预处理方法，将影响裂缝识别的一些干扰直线、轮廓进行提取和消除，在不影响裂缝识别的情况下，有效降低了裂缝的识别的误识别率，在用 transformer 算法进行裂缝识别的过程中准确率提高 7.1%。

参考文献：

[1] 王冬梅，谢　鑫. 基于信息熵的自适应高斯金字塔的 LSD 算法改进[J]. 吉林大学学报(信息科学版)，2020，38(6)：647-655.
Wang Dongmei，Xie Xin. Improvement of LSD algorithm of adaptive Gaussian pyramid based on information entropy[J]. J. of Jilin University (Information Science Edition)，2020，38(6)：647-655.

[2] 曹义亲，何　恬，刘龙标. 基于改进 LSD 直线检测算法的钢轨表面边界提取[J]. 华东交通大学学报，2021，38(3)：95-101.
Cao Yiqin，He Tian，Liu Longbiao. Rail surface boundary extraction based on improved LSD line detection algorithm[J]. J. of East China Jiaotong University，2021，38(3)：95-101.

[3] 李玉峰，张　宸. 一种基于 LSD 改进的室内直线特征匹配算法[J]. 现代计算机，2022，28(9)：15-21.
Li Yufeng，Zhang Chen. An improved indoor line feature matching algorithm based on LSD[J]. Modern Computer Science，2022，28(9)：15-21.

[4] Lee J H，Lee S，Zhang G，et al. Outdoor place recognition in urban environments using straight lines[C]// IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)，2014：1050-4729.

[5] 彭雅慧，潘树国，高　旺，等. 基于直线检测和数字地图匹配的车辆航向角估计[J]. 电子测量与仪器学报，2022，36(3)：194-201.
Peng Yahui，Pan Shugao，Gao Wang，et al. Vehicle heading angle estimation based on line detection and digital map matching [J]. J. of Electronic Measurement and Instrumentation，2022，36(3)：194-2011.

[6] 曾俊琪，张足生，张声健，等. 基于直线检测与密度聚类的车位识别算法研究[J]. 东莞理工学院学报，2023，30(3)：41-48.
Zeng Junqi，Zhang Zusheng，Zhang Shengjian，et al. Research on parking space recognition algorithm based on line detection and density clustering[J]. J. of Dongguan Institute of Technol.，2023，30(3)：41-48.

[7] Rafael G V G，Jean M M，Gregory R，et al. LSD：A line segment detector[J]. Image Processing on Line，2012(2)：35-55.

[8] Cho N，Yuille A L，Lee S，et al. A novel linelet-based representation for line segment detection[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence，2018，40(5)：1195-1208.

[9] Telea A. An image in painting technique based on the fast marching method[J]. J. of Graphics Tools，2004，9(1)：23-24.

[10] 刘　军，王慧民，张兴忠，等. 基于 Transformer 的端到端路面裂缝检测方法[J]. 太原理工大学学报，2022，53(6)：1143-1151.
Liu Jun，Wang Huimin，Zhang Xingzhong，et al. Transformer based end-to-end road crack detection method[J]. J. of Taiyuan University of Technol.，2022，53(6)：1143-1151.

[11] 周占松. 基于 Hough 变换的直线轨道检测[J]. 中国高新科技，2022(12)：85-86，94.
Zhou Zhansong. Linear orbit detection based on Hough transform[J]. China High Tech.，2022(12)：85-86，94.

[12] 刘思雨，吕开云，刘　盈. 基于 LSD 算法的航拍影像电力线提取[J]. 江西科学，2019，37(6)：825-831.
Liu Siyu，Lv Kaiyun，Liu Ying. Power line extraction from aerial images based on LSD algorithm[J]. Jiangxi Science，2019，37(6)：825-831.

[13] Kalbasi M，Nikmehr H. Noise-robust，reconfigurable Canny edge detection and its hardware realization[J]. IEEE Access，2020，8：39934-39945.

[14] 张　俊，庞　世，李晓斌，等. 融合 LSD 算法与 Hough 变换的航拍输电线路图像杆塔自动识别方法[J]. 电子器件，2021，44(5)：1210-1214.
Zhang Jun，Pang Shi，Li Xiaobin，et al. Automatic tower recognition method for aerial transmission line images using LSD algorithm and Hough transform[J]. Electronic Devices，2021，44(5)：1210-1214.

作者简介：

陈昌川(1978—)，男，四川广安人，硕士，副教授。主要研究方向为：图像处理与 AI，智能信息处理，红外成像与测温；

彭　芳(1998—)，女，四川巴中人，硕士，学生。主要研究方向为：图像处理。