

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.013

基于高度差乘积的三维沥青路面裂缝识别

李燕

(鄂尔多斯应用技术学院, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要:为了提高三维沥青路面中裂缝的提取精度与可靠性,提出了一种基于高度差乘积原理的沥青路面三维图像裂缝检测算法。首先,使用同时考虑空域和频域信息的双边滤波器对图像进行预处理,以达到平滑路面纹理并保持裂缝轮廓特征的目的;然后,利用裂缝轮廓的高一低一高程度大于纹理区域且具有较强对称性的特点,设计了一个高度差乘积算子,该算子能有效放大裂缝与非裂缝区域的差异程度,通过该算子的处理可得到相应的裂缝映射图像;最后,对映射图像进行动态阈值分割和去噪,获得最终的裂缝二值图像。研究测试表明:提出的算法能达到96.51%的准确率、83.35%的召回率及87.97%的 F 值,相对于其他典型三维裂缝检测方法有所改善。

关键词:道路工程;识别算法;图像处理;路面裂缝;高度差乘积;三维图像

目前,获取路面裂缝基本信息的方式主要有两种:

①采取人工测量,但这种方法存在封闭交通以及成本高等缺陷,难以满足当前高速公路的海量检测任务;②通过数字图像实现裂缝的快速检测。由于该方法具有精度高、速度快、能在不干扰交通的情况下完成裂缝检测等优点,适用于公路路面病害检测,受到了公路养护部门的高度重视。

数字图像有二维与三维两种基本数据,在过去几十年里,各国研究人员围绕二维图像数据提出了许多算法。如Zhang等成功将视网膜图像中检测血管的匹配滤波器运用于二维裂缝识别,该算法假设裂缝截面可用高斯曲线拟合,通过调整滤波器模板方向来匹配裂缝轮廓,达到检测裂缝与消除路面标线的目的,但该滤波器对低对比度裂缝的响应较小;Miguel等提出了基于种子识别的二维裂缝检测方法,然而这类算法采用固定阈值,易造成粗糙纹理的误检;Zhou等提出了基于小波变换的二维裂缝识别算法,通过将裂缝图像分解为不同频段,以背景对应低频段而裂缝对应高频段为依据来识别裂缝,但该类算法对高曲率裂缝的识别效果较差,且计算成本较高;王晓明等基于两个相机对同一路面不同角度拍摄得到的两幅二维图像,提出了多图像、多分辨率的二维裂缝检测算法;韦春桃等为提取细小裂缝与微灰度差异裂缝提出了自适应阈值分割法。

近年来,为了应对二维图像数据易受外界环境干

扰的问题,相关研究人员开始研究基于结构光的三维检测技术。如2014年,Ouyang等详细阐述了激光三角测量原理,通过在不同车速和天气条件下,测试对比4种裂缝检测结果的差异性,证实了激光三维技术在裂缝检测方面的优势。此后,诸多三维检测算法涌现,如彭博等基于三维数据并利用深度验证指标对各向异性测度法(CTA)在大测量尺度下难以适应不同裂缝宽度的问题进行了改进;任青青提出了一种不需要设置参数的基于二维经验模式分解的三维沥青路面全自动裂缝识别方法,但该方法检测出的裂缝连续性不高;Jiang等提出了基于改进的动态优化识别算法,通过使用概率模型初步识别裂缝,最后根据搜索区域与方向对裂缝进行动态优化。然而由于裂缝形态多变以及纹理复杂度高因素,众多已发表的三维算法文献未能较好地实现裂缝误检与漏检之间的平衡,对路面的适应性较差,因而有必要对其进行深入研究。

1 图像预处理

虽然三维图像相关噪音较二维图像少,但由于路面纹理复杂多变,如果不进行恰当的处理,其中一部分粗糙纹理可能会造成算法误检,最终影响路面评价。滤波是图像预处理最常用的方法,如高斯、中值、均值等传统滤波法;然而这些算法的无差别滤波处理将造成裂缝轮廓的模糊,进而降低算法检测精度。为了防

收稿日期:2020-09-19(修改稿)

作者简介:李燕,女,硕士,副教授。E-mail:313531941@qq.com

止这一问题的发生,该文选取了一种既能平滑纹理,亦能保持裂缝轮廓的滤波算法。

双边滤波器是一种同时考虑空域与频域的局部非迭代滤波算法。该滤波器涉及两个重要要素:紧密度(closeness)和相似度(similarity)。其中,紧密度计算空域信息,与传统滤波器相同,通过计算周围像素的权重来实现;而相似度则计算频域信息,即周围像素的权重将随灰度或颜色不相似度的增大而减小,其处理方式如下:

$$h(x) = k^{-1}(x) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) c(\xi, x) s[f(\xi), f(x)] \cdot d\xi \quad (1)$$

$$k(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} c(\xi, x) s[f(\xi), f(x)] d\xi \quad (2)$$

式中: $k^{-1}(x)$ 为归一化因子; $c(\xi, x)$ 为 closeness 函数,测量待处理像素 x 与其周围像素 ξ 的紧密度; $s[f(\xi), f(x)]$ 为 similarity 函数,测量像素 x 与像素 ξ 的相似度; f 与 h 分别为处理前后的图像。

具有平移不变性的高斯函数是双边滤波器的重要基础,因此函数 $c(\xi, x)$ 与 $s[f(\xi), f(x)]$ 可表示为:

$$c(\xi, x) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\|\xi - x\|}{\sigma_d} \right)^2} \quad (3)$$

$$s[f(\xi), f(x)] = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\|f(\xi) - f(x)\|}{\sigma_r} \right)^2} \quad (4)$$

式中: $\|\xi - x\|$ 为像素 ξ 与像素 x 的欧式距离; $\|f(\xi) - f(x)\|$ 为两像素灰度或 CIE-Lab 颜色空间中的欧式距离; σ_d 为空间尺度; σ_r 为值域尺度;经大量试验,取 $\sigma_d = 8$ 。

由于不同图像裂缝高度值差异较大,因此以处理图像的标准差 σ_r 为最终取值;由图 1 可知:双边滤波器能较大程度平滑纹理并能较好地保持裂缝轮廓,有助于提高裂缝检测精度。

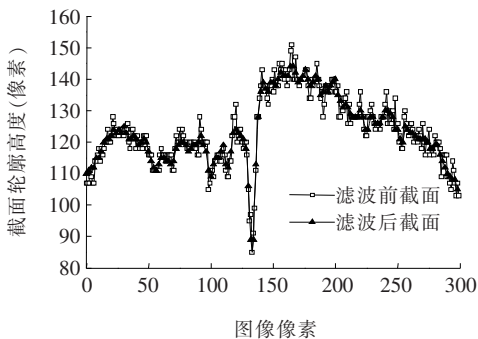


图 1 双边滤波器对三维图像截面的处理结果

2 高度差乘积原理

裂缝轮廓的高一低一高程度可通过两侧区域与中

间部分的高度差来定量描述,为了实现这一目标,首先定义待检测像素与其两侧像素的高度差分别为:

$$\Delta^l(x_i) = f(x_j) - f(x_i) \quad j \in [i-r, i] \quad (5)$$

$$\Delta^r(x_i) = f(x_j) - f(x_i) \quad j \in [i, i+r] \quad (6)$$

式中: $\Delta^l(x_i)$ 为检测中心像素 $f(x_i)$ 与其一侧某像素 $f(x_j)$ 的高度差; $\Delta^r(x_i)$ 为中心像素与其另一侧某像素的高度差; r 为轮廓半径,表示计算尺度。

为了最大程度体现裂缝与非裂缝的差异,取两侧范围内的最大高度差的乘积作为乘积算子,因此像素 x_i 处的高度差乘积算子 $\Delta(x_i)$ 可表示为:

$$\Delta(x_i) = \max_{j \in [i-r, i]} [\Delta^l(x_i)] \cdot \max_{j \in [i, i+r]} [\Delta^r(x_i)] \quad (7)$$

由基本不等式可知:当两个实数 a 与 b 的和为一固定常数时,这两个数的取值越接近,其乘积 ab 就越大,这是因为存在 $ab \leq (a^2 + b^2)/2$, 当且仅当 $a = b$ 时等号成立。从裂缝剖面来看,其两侧轮廓较为对称,因此基于以上分析可知,裂缝处的乘积算子值要大于非对称的阶梯型轮廓(如标志标线的边缘)。值得注意的是,算子 $\Delta(x_i)$ 的大小除了受裂缝轮廓本身性质影响外,还取决于参数 r 的取值大小。 r 值过大、过小都会影响裂缝处 $\Delta(x_i)$ 的大小。图 2 为裂缝轮廓示意图。

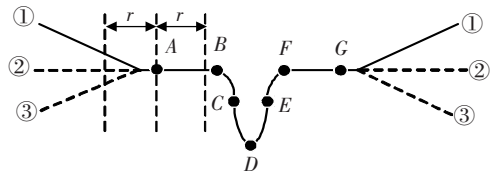


图 2 裂缝轮廓示意图

对于情况①:

(1) A 点为待处理中心像素:当 r 在 A~B 范围内时,算子为较小的正值或趋于 0;当 r 在 B~F 范围内时,算子值略大于 A~B 范围内的值;当 r 在 F~G 范围内时,算子值大于 B~F 范围内的值。当 r 的取值不超过 G 点时,由于 A 点右侧的高度差始终较小,所以算子较小;然而,如果 r 的取值超过 G 点,此时算子值较大,会增加裂缝误检的可能性。

(2) B 点为待处理中心像素:当 r 在 B~F 范围内时,算子为负值或趋于 0;当 r 在 F~G 范围内时,算子值为较小的正值或趋于 0;当 r 的取值超过 G 点时,其影响与 A 点相同。

(3) C 点为待处理中心像素:当 r 在 C~E 范围内时,算子为负值或趋于 0;当 r 在 E~G 范围内时,算子为正值且较大;当 r 的取值超过 G 点时,算子值要大于相同状况下 A、B 点的算子值。

(4) D 点为待处理中心像素;当 r 在 $C \sim D$ 或 $D \sim E$ 范围内时,算子为较大的正值;当 r 在 $B \sim C$ 或 $E \sim F$ 范围内时,算子大于 $C \sim D$ 或 $D \sim E$ 范围内的值;当 r 在 $A \sim B$ 或 $F \sim G$ 范围内时,算子值为 $A \sim G$ 范围内的最大值;如果 r 的取值超过 G 点,算子值要大于相同状况下 A 、 B 、 C 点的算子值。

(5) E 、 F 、 G 点分别与 C 、 B 、 A 点情况相同。

对于情况②和③:各点的算子值与情况①下 r 的取值不超过 G 或 A 点时相同。因此对于情况①, r 值过大会使 $A \sim B \sim C$ 和 $E \sim F \sim G$ 范围内的非裂缝点的算子增大,进而影响 $C \sim D \sim E$ 范围内的裂缝点的提取。此外,为了使 $C \sim D \sim E$ 范围内的裂缝点的算子值达到最大, r 的取值不能过小。经分析可知, r 的取值稍大于最大裂缝宽度的一半就可满足要求,即 $r \geq \frac{1}{2}$ 最大裂缝宽度。

满足尺度条件后,便可通过映射把滤波后的三维图像转换为高度差乘积矩阵。由图 2 可知: $C \sim D \sim E$

范围内裂缝点两侧的高度差 $\Delta^l(x_i)$ 或 $\Delta^r(x_i)$ 的最大值不可能为负值和零值,因此可将高度差为负值和零值的像素点划分为背景,详细过程如下:

$$f'(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } \max_{j \in [i-r, i]} [\Delta^l(x_i)] \leq 0 \text{ or } \max_{j \in [i, i+r]} [\Delta^r(x_i)] \leq 0 \\ \Delta(x_i) & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

式中: f' 为映射后的高度差乘积图像;由于裂缝延伸方向复杂多变,从不同方向剖切同一裂缝,可以获得不同的截面轮廓,使得对应的算子有所差异。为了提高识别精度,对图像轮廓进行 0 、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 $3\pi/4$ 共 4 个方向的映射,然后对得到的 4 幅映射图像进行如下融合:

$$f''(x_i) = \max [f'_0(x_i), f'_{45}(x_i), f'_{90}(x_i), f'_{135}(x_i)] \quad (9)$$

式中: f'' 为融合后的映射图像; f'_0 、 f'_{45} 、 f'_{90} 、 f'_{135} 分别为 0 、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 $3\pi/4$ 方向的映射结果。

图 3 为路面图像随 r 值变化时的映射融合结果。

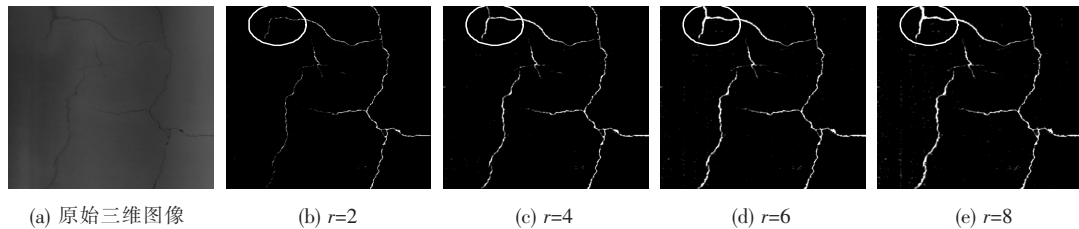


图 3 裂缝图像随 r 值变化时的映射融合结果

由图 3 可知:当 r 值较小时,宽度较小的裂缝位置处具有较强的映射响应,这是由于此时的 r 处于 $A \sim B$ 或 $F \sim G$ 范围内(图 2),相应算子值已然达到最大值;然而对于宽度较大的裂缝, r 处于 $C \sim D$ 或 $D \sim E$ 范围内,在裂缝深度与细裂缝相同的情况下,其映射响应相对较弱,如图 3 中白色椭圆标注区域所示;随着 r 值的增大,宽裂缝的响应逐渐增大,细裂缝的映射也得到加强,当 r 值大于 6 时,绝大部分裂缝的响应与 $r=6$ 时相同,为兼顾精度与计算成本,取 $r=6$ 。将映射图像按下式进行阈值分割,可以获得含有少量噪音的裂缝二值图:

$$b(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } f''(x_i) > \max \left[c, \frac{\text{mean}(f'') + \max(f'')}{n} \right] \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $b(x_i)$ 为含少量噪音的裂缝二值图; $\text{mean}(f'')$ 为映射图像 f'' 的平均值; $\max(f'')$ 为映射图像 f'' 中的最大值; c 为最小分割阈值,为避免算法对无裂缝图像的

误检而设置,该文取 $c=2$; n 为正常系数,试验表明,取 $n=100$ 较为合适。

3 算法性能测试

该文所测试的三维数据均来源于 DHDV 多功能检测车,其采集的图像分辨率为 2048×2048 ,为了减少计算时间并保证图像清晰度,将原始图像进行 4 像素 \times 4 像素子块降维获得分辨率为 512×512 的图像;然后通过双边滤波器的预处理、乘积算子的映射融合以及裂缝的分割与去噪,获得最终的裂缝二值图。为体现算法优劣,随机选取 240 幅三维裂缝图像进行试验,并采用另一种三维算法 S 进行对比,评价指标除采用准确率、召回率和 F 值外;还增加了 σ 和 u/σ 指标。虽然一些算法的 F 值均值很高,但波动较大、不稳定,优秀的算法不仅需要很高的 F 值,还应具备极高的稳定性,以适应复杂多变的裂缝图像。一般而言,算法的 F 值越大,标准差越小,其性能越稳定,因此采用均值

u 与标准差 σ 的比值这一指标来判断算法的优劣,相应测试结果如表 1 所示。

由表 1 可知:算法 S 的准确率变化区间为 [72.29%, 88.27%], 召回率为 [92.55%, 97.08%], 综合性能 F 值在区间 [78.91%, 89.42%] 内变化, 可以看出, 虽然算法 S 的召回率很高 (94.32%) 且稳定 (σ

$=7.62$), 但准确率较低 (80.62%) 且波动大 ($\sigma = 20.34$), 使得综合性能较低 (84.76%)。而该文算法的准确率变化区间为 [93.51%, 99.83%], 召回率为 [76.46%, 88.57%], 综合性能 F 值在区间 [84.15%, 91.90%] 内变化, 均值为 87.97%; 算法的平均准确率很高 (96.51%) 且波动较小 ($\sigma = 10.65$), 虽然召回率

表 1 算法检测结果对比

图像编号	算法 S			该文算法		
	准确率 P /%	召回率 R /%	F 值/%	准确率 P /%	召回率 R /%	F 值/%
1~40	79.70	97.08	85.37	98.46	87.14	91.90
41~80	84.93	94.49	88.01	99.83	79.72	87.58
81~120	81.12	94.91	85.76	98.14	76.46	84.15
121~160	72.29	93.09	78.91	93.51	84.05	87.22
161~200	88.27	92.55	89.42	94.88	84.16	87.09
201~240	77.42	93.80	81.09	94.27	88.57	89.89
均值 u	80.62	94.32	84.76	96.51	83.35	87.97
标准差 σ	20.34	7.62	15.06	10.65	14.93	12.55
u/σ	3.96	12.38	5.63	9.06	5.58	7.01

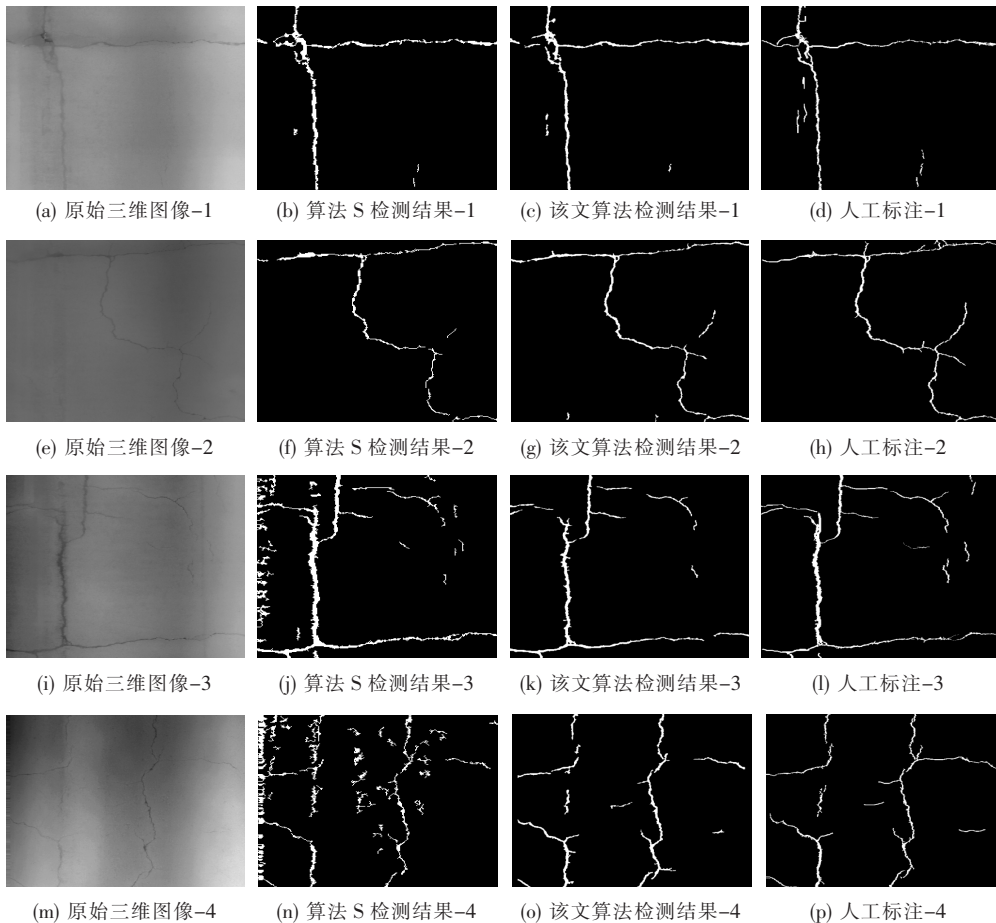


图 4 典型沥青路面图像检测结果

(83.35%) 低于算法 S, 但综合性能及稳定性高于对比算法 ($u/\sigma=7.01 > u/\sigma=5.63$)。为了直观展示各算法性能, 选取 4 幅典型三维裂缝图像作为示例, 算法检测结果如图 4 所示。

由图 4 可知: 当图像纹理粗糙度较小时, 算法 S 的检测精度较高, 如图 4 中图像-1 和图像-2 所示。然而, 该算法以裂缝种子为原理并采用固定阈值对裂缝进行识别, 所以会出现一些较深的具有裂缝特征的纹理结构被误检为裂缝的现象 (如图像-3 和图像-4 所示), 使得召回率增大, 准确率降低, 这与表 1 所示的结果一致。而该文算法首先通过双边滤波器对路面纹理进行平滑处理, 然后设计乘积算子对裂缝特征进行放大, 所以能有效避免粗糙纹理构造对裂缝检测的影响, 提高了裂缝的检测精度。

4 结 论

利用三维图像中裂缝轮廓的高一低一高程度大于纹理区域且具有较强的对称性两个重要特点, 提出了基于高度差乘积原理的三维沥青路面裂缝自动检测算法, 该方法进行了裂缝与纹理的有区别性滤波, 以及裂缝特征的针对性放大, 经测试后可得出以下结论:

(1) 双边滤波器能有效平滑路面纹理构造并同时保持裂缝轮廓原有的特征, 减小了粗糙纹理结构对裂缝提取的干扰, 提高了裂缝的识别精度。

(2) 高度差乘积算子能有效放大裂缝轮廓与非裂缝轮廓的差异特征, 其原理类似于对大于 1 的正实数 x 进行平方 (幂的二次方), 显然 x 越大, x^2 就越大; 放大后通过阈值分割便能较为精确地将裂缝从图像中提取出来; 然而三维路面图像复杂多变, 算法漏检的问题仍需进一步解决。

参考文献:

[1] Zhang, A., Li, Q. J., Wang, K. C. P., et al. Matched Filtering Algorithm for Pavement Cracking Detection[J].

Transp. Res. Rec., 2013, 2367(1): 30-42.

- [2] Chaudhuri S, Chatterjee S, Katz N, et al. Detection of Blood Vessels in Retinal Images Using Two-Dimensional Matched Filters[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1989, 8(3): 263-269.
- [3] Miguel G, David B, Oscar M, et al. Adaptive Road Crack Detection System by Pavement Classification[J]. Sensors, 2011, 11(12): 9628-9657.
- [4] Zhou, J. Wavelet-Based Pavement Distress Detection and Evaluation[J]. Optical Engineering, 2006, 45(2): 1-10.
- [5] 王晓明, 冯鑫, 党建武. 基于多图像与多分辨率的路面裂缝检测方法[J]. 兰州理工大学学报, 2013(1).
- [6] 韦春桃, 余俊辰, 赵平, 等. 基于自适应阈值的细小裂缝与微灰度差异裂缝自动检测方法[J]. 中外公路, 2019(1).
- [7] Ouyang W, Xu B. Pavement Cracking Measurements Using 3D Laser-Scan Images[J]. Measurement Science & Technology, 2013, 24(10): 1-9.
- [8] 彭博, Wang K C P, 陈成, 等. 基于各向异性测度的路面三维图像裂缝识别[J]. 西南交通大学学报, 2014(5).
- [9] NGUYEN T S, AVILA M, BEGOT S. Automatic Detection and Classification of Defect on Road Pavement Using Anisotropy Measure [C]. European Signal Processing Conference. IEEE, 2009: 617-621.
- [10] 任青青. 基于二维 EMD 的三维路面裂缝检测算法研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2017.
- [11] Jiang C, Tsai Y J. Enhanced Crack Segmentation Algorithm Using 3D Pavement Data[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2016, 30(3).
- [12] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral Filtering for Gray and Color Images[J]. Proc. Ieee Inter. Conf. Computer Vision, 1998: 839.
- [13] 彭博, Wang K C P, 陈成, 等. 基于 1 mm 精度路面三维图像的裂缝种子自动识别算法[J]. 中国公路学报, 2014(12).
- [14] 魏海斌, 武少威, 张启帆, 等. 基于图像处理的沥青路面裂缝识别算法研究[J]. 中外公路, 2020(4).