

基于三维激光的路面裂缝智能识别准确性研究

孔海望¹, 吴迪², 孙杨勇², 张傲南¹

(1.广东省建筑科学研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510500; 2.广东建科交通工程质量检测中心有限公司, 广东 广州 510500)

摘要: 依托广东省建筑科学研究院引进、研发的三维智能路面检测系统, 采用广泛用于信息检索和统计学分类领域的准确率、召回率和 F_1 值指标, 分析车速、雨水、光照强度对路面裂缝识别准确性的影响。结果表明, 检测车速不高于 80 km/h 时, 病害识别准确率较稳定且高于 90%; 一定范围内路面越潮湿, 病害识别准确率越低, 湿度小于 8% 时准确率趋于稳定; 光照强度主要影响误判, 强度越大, 误判越多, 病害识别准确率越低, 照度不大于 100 000 lx 时图像质量能满足规范要求。

关键词: 公路; 路面病害; 三维激光; 智能识别; 识别准确率

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)06-0093-04

裂缝是评价路面质量的重要指标之一, 是多数路面病害的早期表现形式, 直接影响道路使用寿命和行车安全, 及时掌握路面裂缝发展情况并进行科学管养, 能有效避免裂缝进一步发展。目前多数路面裂缝检测采用二维路面检测系统, 通过快速连续扫描获取二维灰度图像进行路面破损数据采集, 扫描精度接近 1 mm。二维图像分析技术不仅能实现快速检测, 无需封闭交通, 而且拍摄的照片能直观反映路面的平面特征, 是裂缝、坑槽等病害的有效调查手段。但该系统采用带状照明灯作为激发光源, 较易受路面油污、标线或轮胎痕迹、阴影、光照不均等因素干扰, 也无法获取变形类病害的形变信息。目前基于二维灰度图像的智能识别技术还不能对现场随机采集的数据进行有效处理, 大多仍采用现场采集、人工识别方式, 效率低下。基于三维激光的路面裂缝智能识别技术利用三角位移和激光测距原理, 可全断面扫描路面各点的高程信息, 利用特定算法和深度学习原理从扫描到的路面纹理中智能识别路面病害。理论上, 通过二维图像和三维数据相结合, 可识别包括沉陷、拥包和坑槽等变形病害在内的所有病害。

1 三维智能路面检测系统

采用广东省建筑科学研究院引进美国 Way-Link 公司技术并结合国内实际需求研发的三维智能路面检测系统识别路面裂缝。该系统包括道路表面成像系统、道路路权成像系统、路面平整度检测系统和车辙深度检测系统, 硬件包括 GPS 接收机、距

离测量仪、电源、加速度计和惯性测量单元。配置有高能激光成像系统和特制滤光片, 具有三维数据收集与拼接及病害自动化识别分析功能, 可在最高 100 km/h 速度下采集纵横向精度为 1 mm、垂直向精度为 0.5 mm 的路面三维点云数据。横向 4 m 范围内平均分布 4 000 个像素点, 主要用于路面破损、车辙、平整度、构造深度、路面磨损、路面跳车等检测。

为了提高裂缝识别准确率, 该系统采用基于递归神经网络的三维沥青路面全自动像素级裂纹检测方法 CrackNet-R。该方法采用一种新的递归单元——门控递归多层感知器 (GRMLP) 更新内部存储器, 与广泛使用的长短期存储器 (LSTM) 和门控递归单元 (GRU) 不同, GRMLP 通过在选通单元处进行多层非线性变换, 对输入和隐藏状态进行更深入的抽象 (见图 1)。CrackNet-R 可实现序列生成和序列建模两相序列处理, 其中: 序列生成是在研究中特别开发的, 以找到最有可能形成裂纹模式的最佳局部路径; 序列建模预测输入序列为裂纹模式的

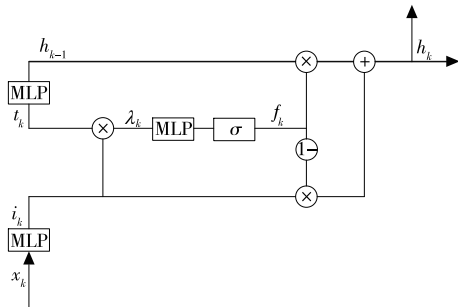


图 1 GRMLP 原理示意图

及时概率。在序列建模方面,GRMLP仅在每个门处使用一个以上的非线性层,略优于 LSTM 和 GRU。除序列处理外,还设置有一个输出层,用于基于序列预测的及时概率产生像素概率,该输出层可实现从序列级学习到像素级学习的过渡,这对像素级的精确性至关重要。

2 准确性分析方法

目前,图像识别领域暂无通用的对准确率进行定量描述的指标。为此,引用信息检索和统计学分类领域的准确率、召回率和 F_1 值指标作为衡量裂缝识别准确性的指标。

对于裂缝识别算法,要求识别结果既准确又全面,准确率、召回率正是这样一组评价指标,其计算公式如下:

$$P_r = T_p / (T_p + F_p) \times 100\% \quad (1)$$

$$R_e = T_p / (T_p + F_N) \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_r 为准确率(Precision); T_p 为正确检测出来的目标物数目(True Positive); F_p 为不是目标物却检测为目标物的数目(False Positive); R_e 为召回率(Recall); F_N 为是目标物却没有检测出来的数目(False Negative)。

对于道路裂缝识别算法,令集合 Γ_1 为识别算法的检测结果,集合 Γ_2 为实际正确识别出的结果, Γ_3 为算法正确识别出的裂缝像素集合, $\Gamma_3 = \Gamma_1 \cap \Gamma_2$,则有:

$T_p = \Gamma_3$ 的裂缝像素数目

$T_p + F_p = \Gamma_1$ 的裂缝像素数目

$T_p + F_N = \Gamma_2$ 的裂缝像素数目

P_r 和 R_e 越接近于 100% 越好,但很多情况下二者是矛盾的:准确率高,则很难检测出所有裂缝,即召回率降低;召回率高,即检测结果覆盖全面,识别到的裂缝像素多,则准确率降低。因此,需综合考虑准确率和召回率。常用的 F_1 值是综合评价指标,它能总体评价识别算法的优劣,其值越高,算法越优。 F_1 值的计算公式如下:

$$F_1 = 2P_r R_e / (P_r + R_e) \times 100\% \quad (3)$$

在获得识别算法检测结果 Γ_1 和手动标注的真实裂缝图像 Γ_2 之后,首先对它们的裂缝像素进行统计,分别计算各自的裂缝像素数目($T_p + F_p$ 和 $T_p + F_N$);然后与 Γ_1 和 Γ_2 的裂缝像素进行对比,若像素 (x, y) 在 Γ_1 和 Γ_2 中均为裂缝,则该像素记为 Γ_3 的裂缝像素,得到 T_p ;最后计算 P_r 和 R_e 。

3 准确率影响因素分析

基于三维激光的路面病害智能识别技术的准确率受检测车速、雨水、光照强度的影响,影响方式和程度目前无统一认识。选取广州市某工业区沥青路面为试验路段(该道路建成于 2010 年,有较多不同严重程度纵横向裂缝和网裂),设计 3 种工况,研究以上因素对裂缝识别准确率的影响。三维系统测试前先进行人工检测,作为比对的真值。

3.1 车速的影响

数据采集速度受相机拍摄频率和数据传输速度限制,在保证同等数据质量的前提下,相机拍摄频率越高、数据传输速度越快,最大采集速度越高。

在阴天路面干燥条件下,分别以 20、40、60、80、100 km/h 车速进行检测,每级车速重复检测 3 次,取准确率和召回率各自的平均值作为检测值。检测结果见表 1、图 2、图 3。

表 1 不同检测车速下路面裂缝识别准确率

车速/(km·h ⁻¹)	准确率/%	召回率/%	F_1 值/%
20	92.90	91.50	92.19
40	92.80	90.90	91.84
60	91.50	89.70	90.59
80	90.20	87.70	88.93
100	87.80	82.40	85.01

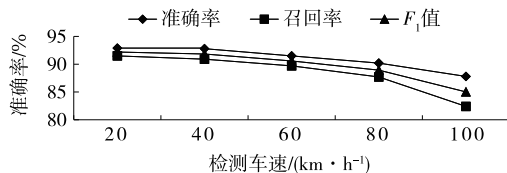


图 2 路面裂缝识别准确率随检测车速的变化

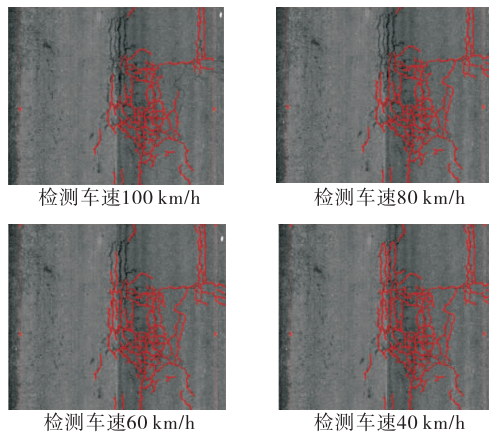


图 3 不同检测速度下的自动分析效果

从表 1、图 2、图 3 可看出:检测车速越小,路面

裂缝识别准确率越高;车速在 80 km/h 以下时准确率高于 90%且较稳定,能满足规范要求;车速为 100 km/h 时准确率为 87.8%,基本能满足日常巡查要求。实际道路检测中,80 km/h 采集速度能满足准确率和工效的要求。

3.2 雨水的影响

降雨过后会在道路表面形成一层水膜,激光在表面发生镜面反射而形成噪点。因此,路面潮湿程度直接影响激光的反射效果,从而影响三维激光路面病害识别准确率。雨后路面潮湿程度在车流作用下会随时间逐渐降低,路面潮湿程度可通过基面湿度计测量。

为研究路面潮湿程度对裂缝识别准确率的影响,分别在雨后 30、60、90、120、180 min 对同路段进行裂缝检测(车速 60 km/h),并记录当时的路面湿度,取 5 个区域同时段的平均值作为测试值。检测结果见表 2、图 4。

表 2 不同路面湿度下路面裂缝识别准确率

雨后时间/ min	湿度/ %	准确率/ %	召回率/ %	F_1 值/ %
30	29.70	48.1	41.5	44.6
60	17.60	70.1	61.6	65.6
90	12.30	81.2	72.2	76.4
120	7.60	92.0	87.6	89.8
180	5.80	92.8	90.3	91.6

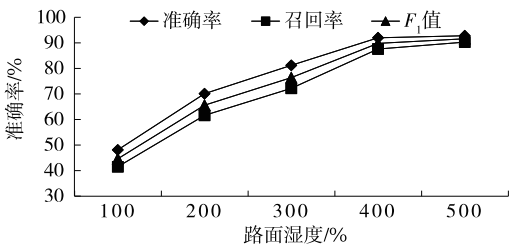


图 4 路面裂缝识别准确率随路面潮湿程度的变化

从表 2、图 4 可看出:大雨过后 30 min 内,湿度在 30%左右,路面水膜明显,对激光采集系统造成强干扰,识别准确率极低;随着时间的推移,路面湿度降低,识别准确率不断提升,在 120 min 后路面湿度降至 7.6%时准确率达到 92.0%。因降雨后路面干净无污染,准确率高 60 km/h 车速测试工况下的准确率。三维激光路面病害识别技术在路面湿度低于 8%时基本能保证准确率在 90%以上;路面湿度高于 8%时,湿度越大,识别准确率越低,说明其对路面湿度极其敏感。

3.3 光照强度的影响

三维激光检测系统采用光源为波长 800 nm 的激光,可有效降低自然光的干扰。但太阳光波谱是连续的,仍含有少量该波段的光线,且阳光越强烈,该波段光照强度越大。因此,光照强度对采集数据的质量仍存在一定影响。

为研究光照强度对裂缝识别准确率的影响,分别在晴天的 12 点(300 000 lx)、14 点(100 000 lx)、16 点(60 000 lx)、18 点(10 000 lx)、20 点(2 500 lx)进行数据采集,检测车速为 60 km/h,地面干燥无杂物。检测结果见表 3、图 5。

表 3 不同光照强度下路面裂缝识别准确率

时刻	照度/lx	准确率/%	召回率/%	F_1 值/%
12:00	300 000	82.35	89.10	85.59
14:00	100 000	89.60	89.80	89.70
16:00	60 000	91.50	89.70	90.59
18:00	10 000	92.00	90.60	91.29
20:00	2 500	92.90	90.90	91.89

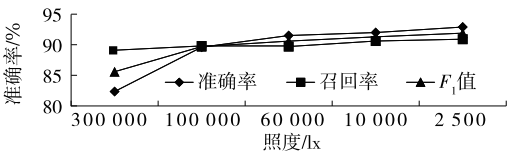


图 5 路面裂缝识别准确率随光照强度的变化

从表 3、图 5 可看出:照度在 100 000 lx 以上时,路面裂缝识别准确率随照度降低明显增强, F_1 值敏感性次之,召回率基本不随照度改变而改变;照度在 100 000 lx 以下时,准确率、召回率和 F_1 值均基本稳定在 90%以上。准确率受光照强度影响较大主要是因为光照强度越大,光噪点越多,误判比例越高。而漏判基本不受影响。因此,为保证识别准确率,应尽量在照度不大于 100 000 lx 的条件下进行数据采集。

4 结论

通过不同工况测试,得出三维激光路面裂缝识别系统病害识别准确率受检测车速、雨水、光照强度的影响规律如下:

(1) 一定范围内裂缝识别准确率与车速成反相关关系。车速低于 80 km/h 时,准确率高于 90%且较稳定,能满足规范要求;车速为 100 km/h 时准确率为 87.8%,基本能满足日常巡查的要求。实际道路检测中,车速控制在 80 km/h 能满足准确率和工

效的要求。

(2) 激光对路面湿度极为敏感,裂缝识别准确率与路面湿度成反相关关系。湿度在30%左右时,路面水膜明显,采集的数据噪点较多,识别准确率极低;随着湿度的降低,识别准确率不断提升,在路面湿度降至7.6%时准确率达到92.0%。三维激光路面病害识别技术在路面湿度低于8%时基本能保证准确率在90%以上。

(3) 裂缝识别准确率随照度降低明显增强, F_1 值敏感性次之,召回率基本不随照度改变而改变。准确率受光照强度影响较大主要是因为照度越大,光噪点越多,误判比例越高。而漏判基本不受影响。为保证识别准确率,应尽量在照度不大于100 000 lx的条件下进行数据采集。

参考文献:

- [1] 孙晓明.基于结构光的公路路面裂缝检测关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [2] 黄建平.基于二维图像和深度信息的路面裂缝检测关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [3] ZHANG A, WANG K C P. The fast prefix coding algorithm (FPCA) for 3D pavement surface data compression[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(3): 173-190.
- [4] ZHANG A, WANG K C P, AI C. 3D shadow modeling for detection of descended patterns on 3D pavement

surface[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 31(4): 04017019.1-04017019.13.

- [5] ZHANG A, WANG K C P, JI R, et al. Efficient system of cracking-detection algorithms with 1mm 3D-surface models and performance measures[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2016, 30(6): 04016020.1-04016020.16.
- [6] ZHANG A, WANG K C P, LI B, et al. Automated pixel-level pavement crack detection on 3D asphalt surfaces using a deep-learning network[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(10): 805-819.
- [7] ZHANG A, WANG K C P, FEI Y, et al. Automated pixel-level pavement crack detection on 3D asphalt surfaces with a recurrent neural network[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2019, 34(3): 213-229.
- [8] FEI Y, WANG K C P, ZHANG A, et al. Pixel-level cracking detection on 3D asphalt pavement images through deep-learning based crackNet-V[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 21(1): 1-12.
- [9] 彭博.基于路面高精三维图像的裂缝自动识别与分类算法[D].成都:西南交通大学,2014.
- [10] 庞楠楠.高速相机记录系统的设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2017.

收稿日期:2020-03-31

(上接第92页)

开裂验算标准。

4 结论

(1) 随着SMA-13厚度和模量、碎石化下承层模量的增加及碎石化层与沥青层层间接触状态的改善,路面结构层底拉应变、路表弯沉减小。

(2) 各参数对层底拉应变与路表弯沉的影响程度均为下承层模量>SMA-13厚度>SMA-13模量>层间接触状态。

(3) “白改黑”改扩建项目建设中,应首先关注碎石化层模量,通过合理工艺提高其当量顶面模量,同时注重碎石化层模量数据的快速有效检测,实时反馈并指导碎石化施工。

(4) 为满足结构验算要求,某省省道公路改扩建工程碎石化下承层模量应 ≥ 239 MPa。

参考文献:

- [1] 姜献东.旧水泥路面共振碎石化技术的应用[J].筑路机械与施工机械化,2017,34(8):98-101.
- [2] 李萍,念腾飞,张雅莉,等.MHB碎石化动力响应及其对邻近建筑和居民的振动影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(3):89-99.
- [3] 张洪刚,黄慧,岳爱军,等.旧水泥路面碎石化加铺级配碎石与沥青罩面结构组合设计参数研究[J].公路工程,2012,37(1):19-22.
- [4] 赵全满,张洪亮,许晔.多锤头破碎机作用下旧水泥路面的力学响应[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(5):620-623.
- [5] 何超,石健,杨建明,等.旧路面碎石化加铺方式对水泥加铺层的影响研究[J].中外公路,2014,34(2):109-112.

收稿日期:2020-03-13