

基于数字图像技术的沥青路面纹理重构和抗滑性能评价方法综述

蔡爵威^{1,2}

(1. 上海市建筑科学研究院有限公司, 上海市 200030; 2. 上海市工程结构安全重点实验室, 上海市 200030)

摘要: 沥青路面的表面纹理特性直接决定其抗滑性能, 并影响道路交通安全。传统的沥青路面纹理测量方法(如铺砂法、环形纹理测试仪法等)在测量精度、操作便捷性及环境适应性方面存在一定局限。近年来, 随着计算机视觉与图像处理技术的发展, 基于数字图像技术的沥青路面纹理重构与抗滑性能评价方法逐渐成为研究热点。系统综述了数字图像技术在沥青路面纹理表征中的应用, 重点探讨了4类常见的纹理重构方法, 包括基于灰度图像、立体视觉、光度立体视觉及三维激光视觉的重构技术, 并分析了各自的优缺点及适用范围。此外, 梳理了4种主要的沥青抗滑性能评价方法, 包括基于几何学指标、频谱分析、分形理论及人工智能的评价策略, 归纳了相关研究成果及其在不同工况下的适用性。研究表明: 数字图像技术能够精准重构沥青路面的三维纹理形貌, 并通过提取关键特征参数(如构造深度、轮廓曲率、分形维数等)实现对抗滑性能的科学评价。深度学习和机器学习等人工智能技术的引入, 使得基于图像数据的抗滑性能预测达到了更高的精度和自动化水平。尽管数字图像技术在实验室和现场检测中表现出较好的适用性, 但仍面临计算复杂程度高、环境适应性不足及工程应用标准化程度较低等挑战。未来研究应重点关注多模态数据融合、智能算法优化、实时监测及标准化应用, 以进一步提高路面抗滑性能评价的精度和工程实用性, 为道路安全和智能交通系统管理提供科技支撑。

关键词: 数字图像技术; 沥青路面; 三维纹理重构; 抗滑性能评价; 计算机视觉; 人工智能

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0001-08

Review of Asphalt Pavement Texture Reconstruction and Skid Resistance Evaluation Based on Digital Image Technology

CAI Juewei^{1,2}

(1. Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, Shanghai 200032, China)

Abstract: The surface texture characteristics of asphalt pavement directly determine the skid resistance and affect the road traffic safety. The traditional pavement texture measurement methods, such as the sanding method and circular texture meter, have certain limitations in measurement accuracy, operational convenience and environmental adaptability. In recent years, with advancements in computer vision and image processing technology, the pavement texture reconstruction and skid resistance evaluation based on digital imaging technology have gradually become the research hot spots. The application of digital image technology in asphalt pavement texture characterization is systematically reviewed, and the focus is on four common texture reconstruction methods such as grayscale image-based, stereo vision-based, photometric stereo-based and 3D laser vision-based techniques. The respective advantages, disadvantages and applicability are analyzed. Additionally, four main skid resistance evaluation methods are sorted out, including the evaluation strategies based on geometry index, spectral analysis, fractal theory and artificial intelligence. The relevant research findings and the applicability under different conditions are concluded. The study results show that digital imaging technology can accurately reconstruct the 3D texture shape of asphalt pavement and scientifically assess the skid resistance by extracting the key feature parameters, such as texture depth, contour curvature and fractal dimension. The introduction of AI techniques, such as deep learning and machine learning, can make the skid resistance prediction based on image data achieve a higher accuracy and automation level. Although the digital image technology demonstrates the good applicability in both laboratory and field detection, it still faces challenges such as high

收稿日期: 2025-04-10

基金项目: 上海市白玉兰人才计划浦江项目(2023PJD043); 上海市城市数字化转型专项资金项目(202401069)

作者简介: 蔡爵威(1995—), 男, 博士, 工程师, 从事道路智能化运维工作。

computational complexity, limited environmental adaptability, and a low degree of standardization in engineering applications. Future research should focus on the multimodal data integration, intelligent algorithm optimization, real-time detection and standardization application to further enhance the accuracy and engineering practicality of pavement skid resistance evaluation, which provides the scientific support for road safety and intelligent transportation systems management.

Keywords: digital imaging technology; asphalt pavement; 3D texture reconstruction; skid resistance evaluation; computer vision; artificial intelligence

0 引言

沥青路面纹理指的是路面与真实平面的偏差,其波长在0~500 mm之间变化^[1]。路面纹理与路面的抗滑性能密切相关,直接影响到车辆的行驶安全。1987年,世界道路协会(Permanent International Association of Road Congresses, PIARC)根据路面纹理波长的大小,将沥青路面纹理分为微观构造、宏观构造、大构造和不平度4大类^[2]。

相关研究表明,在轮胎-路面的相互作用中,摩擦力主要由黏附力和滞阻力组成^[3]。由于沥青路面的不平整,轮胎-路面界面中高局部压力区域的分子键产生了黏附力,而滞阻力则是由于轮胎橡胶在路面凸起或凹陷处变形滞后产生的能量损失。除了上述2种作用力之外,界面间的摩擦力还包含另外2种成分,分别是轮胎因橡胶材料制成而具有的黏弹性和磨损脱落而产生的摩擦力,但2者仅占整体摩擦力的小部分,一般可以忽略不计。

对于沥青路面纹理的4种形式,宏观构造和微观构造对其抗滑性能的影响最大^[5]。宏观构造纹理(Macrotexture)的波长为0.5~50 mm,高度尺寸为0.5~20 mm。该构造主要受级配、骨料粒径、骨料形态及其排列方式等因素影响^[6]。宏观纹理对抗滑性能的作用主要体现在2个方面^[7]:(1)宏观纹理直接影响轮胎因弹性形变滞后效应所产生的滞阻力;(2)宏观纹理有助于迅速排除轮胎与路面之间的积水,增加轮胎与路面的接触面积,提升抗滑性能。微观构造纹理(Microtexture)指波长小于0.5 mm、高度范围在0.001~0.5 mm之间的纹理特征。这种构造主要来源于沥青胶浆及骨料表面的微观结构^[8]。微观构造纹理直接与轮胎接触,决定了摩擦力中的黏附力分量。此外在路面湿滑状态下,微观构造纹理能够促进路面纹理穿透水膜,减小动力水膜的润滑作用,从而提高行车安全性^[9]。

在国内外的相关研究与实践中,建立了多种沥青路面纹理的测试方法,如铺砂法(测量平均构造深

度MTD)、环形纹理测试法(测量平均断面深度MPD)、溢流时间法(用路面排水时间表征路面的宏观纹理特征)等^[10]。在实际应用过程中发现,这些常用的量化沥青路面纹理的方法具有一定的局限性^[11-12]。例如:在使用铺砂法测量路面的平均构造深度时,由于此方法强烈依赖操作员的经验,使得测量结果没有良好的可重复性;而环形纹理测试仪得到平均断面深度是一个二维指标,一个小小的奇点(如凹陷或凸起)都会导致该指标偏离合理范围,因此采用该指标来评价路面整体的三维构造较为片面。

针对传统测量方法的不足,数字图像技术的引入为研究沥青路面纹理提供了新的视角和手段。该技术利用非接触式计算机视觉与图像处理技术,从高分辨率图像中提取沥青路面纹理的三维形貌信息,实现了高效化与精细化重构沥青路面纹理。相关研究最早可以追溯到1970年,Schonfeld^[13]通过数字图像技术描述了路面纹理的7个参数,并由此建立路面的纹理编码,通过比对不同路面的纹理编码与实测的抗滑系数,发现二者具有良好的相关性。这项研究是数字图像技术应用于路面纹理分析中的初步尝试,之后随着计算机科学的快速发展,该技术也得到了越来越广泛的应用。

数字图像技术的核心优势在于其对多维信息的获取与表征能力。通过灰度图像分析、立体视觉重构、光度立体视觉以及三维激光视觉等多种方法,研究人员能够高效地重构沥青路面的三维纹理形貌,并从中提取具有物理意义的纹理特征指标。这些指标不仅在表征沥青路面构造复杂性方面具有重要价值,还能有效关联沥青路面纹理特征与抗滑性能之间的关系,弥补传统方法的不足。随着人工智能与大数据分析技术的兴起,基于数字图像的路面纹理研究正向更高效、更智能化的方向发展。例如:深度学习技术的引入,使得研究者能够从复杂的图像数据中自动提取纹理特征,提升了抗滑性能评价的精度和效率。此外,实时传感器与自动化检测系统的集成使动态监测与湿滑状态下的性能评价成为可能。

综上所述,基于数字图像技术的沥青路面纹理重构与评价方法为抗滑性能的科学评价提供了新的手段,但也面临着诸多技术与应用挑战。本文将系统梳理现有的沥青路面纹理重构与评价方法,总结其理论与实践的最新进展,展望未来的发展方向,为相关领域的研究与工程实践提供参考依据。

1 基于数字图像技术的路面纹理重构方法

通过文献调研,现阶段常用的基于数字图像技术的路面纹理重构方法可分为4类:基于灰度图像的重构方法,基于立体视觉的重构方法,基于光度立体视觉的重构方法和基于三维激光视觉的重构方法。

1.1 基于灰度图像的重构方法

由于表面纹理的存在,当光线照射到沥青路面上时,会产生漫反射。当光线照射到表面凸起区域时,大部分光线被反射,使该区域的灰度值较高;而在凹陷区域,光线被更多地吸收或散射,导致灰度值较低^[14]。数字图像像素的灰度大小与路面表面纹理构造状态呈现较好的一一对应关系,因此,可以通过沥青路面表面的灰度图像对路面纹理进行重构。图1所示为基于灰度图像得到的沥青路面三维纹理模型。

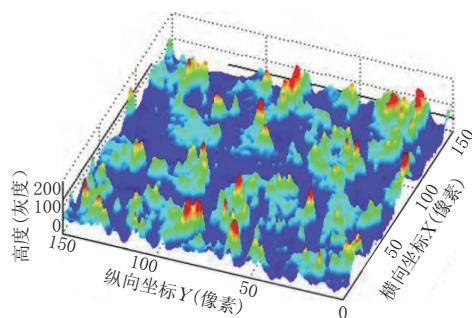


图1 基于灰度图像得到的沥青路面三维纹理模型

近年来,研究者们基于灰度图像的重构方法开展了系列研究^[15-17],其研究重点在于改进图像处理算法的提取特征指标等方面。Yu等^[18]开发了一种基于MATLAB的图像处理程序,通过分析路面图像的灰度变化来检测和分析沥青路面的纹理深度,其研究表明该方法与传统的铺砂法检测结果具有良好的线性关系,能够有效反映沥青混合料级配的偏差程度。虽然基于灰度图像的重构方法重构效率高、操作简单、成本低廉,在一定程度可以实现沥青路面三维纹理的快速重构,但此方法在图像采集过程中容易受到光照条件、路面表面颜色、镜头位置等多个因素的影响,所得的灰度图像与实际的纹理

分布可能会存在较大差异,仅适用于沥青路面抗滑性能的定性评价,而不适用于纹理构造的高精度建模。

1.2 基于立体视觉的重构方法

立体视觉法的原理是通过从2个或多个不同视角对同一目标物体进行观测,获取其在不同角度下的图像,从而确定物体的空间位置^[19]。

如图2所示,对于目标在三维空间的任意一点 P ,用相机 M_1 对其进行观察时,可得到点 P 在 M_1 上对应的成像点 P_1 。同样,用相机 M_2 对其进行观察,可以得到 M_2 上的成像点 P_2 。点 P 位于直线 O_1P_1 和直线 O_2P_2 的交点上,此时点 P 唯一确定,这样就可以得到点 P 的空间坐标,确定其空间位置。采用同样的方法可获取沥青路面表面各点的坐标,从而完成沥青路面纹理的三维重构。

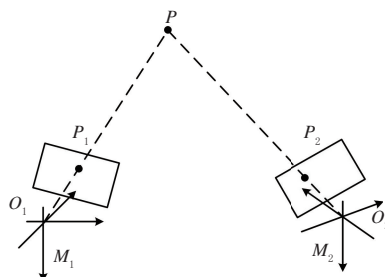


图2 基于立体视觉的重构方法^[20]

Mahmoudzadeh等^[21]提出了一种使用RGB-D传感器的3D沥青路面重构方法。他们设计了一种安装有Kinect传感器的推车,通过校准相机并校正采集的表面坡度,利用SURF和MSAC算法拼接RGB-D图像,创建路面表面的3D结构。该方法提供了一种低成本、高效的路面数据采集和重构手段。Luo等^[22]通过构建基于双目立体视觉的硬件系统,利用图像采集装置、测微计及摄像头支架,提出了一种经济高效的沥青路面纹理信息采集与三维重建方法。研究中,基于MATLAB和Python的相机标定与立体校正技术获得了稳定的相机参数,并使用不同算法进行立体匹配与视差映射。该研究为沥青路面抗滑性能的实时监测提供了新的技术路径,但指出该系统在室外光照条件下的应用仍需优化。此方法能够非常精确地恢复沥青路面表面的三维尺寸,但其算法较为复杂,且容易受到光照、阴影等环境因素的影响,因此仍需进一步改进,以提高重构精度和鲁棒性,满足实际应用需求。

1.3 基于光度立体视觉的重构方法

光度立体视觉技术与立体视觉技术相对,在进

行图像获取时,物体和摄像机的位置相对不变,通过改变光源方向照射物体,以获取不同明暗分布的图像,根据图像的灰度矩阵计算出物体表面的法向量场,从而得到沥青路面纹理构造的三维信息^[23]。

Woodham^[24]最早将光度立体视觉法应用于沥青路面构造重构中,此方法基于Lambert漫反射定律,其提出在图3所示的场景中,CCD相机获取的图像灰度满足式(1)关系:

$$I(x, y) = \frac{L(x, y)}{r^2} \cdot \frac{-(\partial z / \partial y) \sin \theta_i \sin \phi_i}{\sqrt{1 + (\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2}} \quad (1)$$

式中: $I(x, y)$ 为CCD相机在像素 (x, y) 处采集到的图像灰度值; $L(x, y)$ 为被成像表面点 (x, y) 处的反射光亮度; r 为光源到被照表面点的距离; $\partial z / \partial y$ 为表面在 (x, y) 处沿 y 方向的空间坡度(高度梯度); θ_i 为入射光的方位角; ϕ_i 为入射光的极角; $\partial z / \partial x$ 为表面在 (x, y) 处沿 x 方向的空间坡度。在式(1)中共存在3个未知量,分别为 $\partial z / \partial x$ 、 $\partial z / \partial y$ 以及表面色度特征 $L(x, y)$,因此拍摄3个不同光源方向的照片即可求解得到纹理构造上各点的法向量,之后通过局部积分或全局积分的方法即可完成对纹理构造的三维重构。

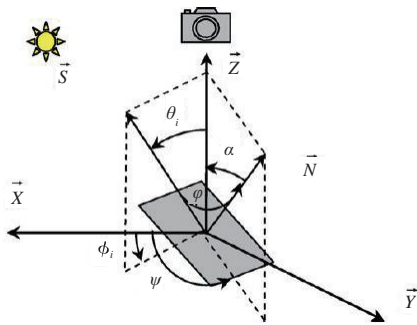


图3 基于光度立体视觉的重构方法^[25]

由于拍摄角度的问题,采用三光源光度立体视觉技术进行纹理重构时,图像中可能出现高光点或阴影区域,从而对求解精度产生影响。因此,学者们在三光源光度立体视觉技术的基础上,提出了四光源^[26]、五光源^[27]、六光源^[28]光度立体视觉技术,光源数量的增加提高了法向量的求解精度,但同时也在一定程度上增加了计算量。此外, Mohsen Najafi Alamdarlo等^[23]还对最优的光照天顶角进行研究,结果表明,随着沥青路面构造深度的增加,天顶角越小,图像中的阴影效应越少,重构效果也就越好。基于室内试验的结果,文章给出了不同构造深度范围内沥青路面的最佳天顶角。

综上,光度立体视觉技术设备简单、分辨率高,

在应用过程中不用标定,操作快速便捷,在实验室对沥青路面进行纹理重构具有较高的精度,但若将其应用于室外路面检测仍需要对测试装置进行深入改进和研究。

1.4 基于三维激光视觉的重构方法

三维激光视觉技术本质上基于三角测量原理。其通过将激光器、图像接收装置(CCD)与被测物体布置成三角关系,形成特定的光路,并通过解析光线之间的几何关系,从而获取路面表面的三维纹理信息^[12]。根据激光器与CCD的布置位置及角度关系,激光三角测量法可分为斜射式和直射式2种^[29]。斜射式测量法(见图4(a))具有较高的测量精度,更适用于表面光滑、容易产生镜面反射的物体。相比之下,直射式测量法(见图4(b))所形成的光斑较小,不会因被测表面不垂直而导致光斑扩散,因此适用于柔软表面、以散射和漫反射为主的粗糙表面,同时其测量范围更广。因此在沥青路面的纹理重构中常采用直射式的方法。

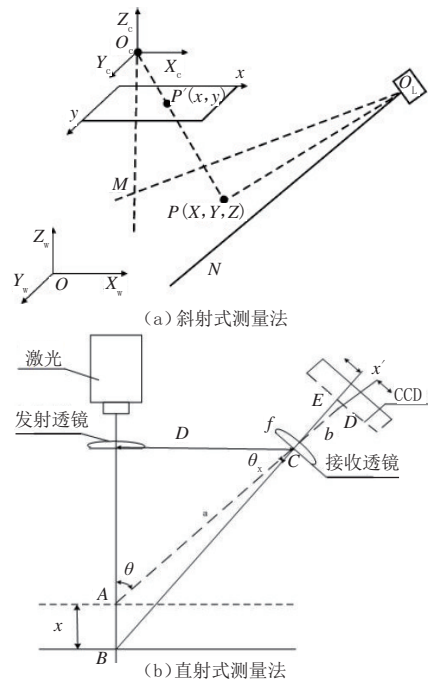


图4 基于三维激光视觉的重构方法

Wang等^[30]通过采用三维激光视觉技术,开发了一种基于深度学习的扩展PT-SRGAN算法,结合双三次插值,重构任意速度下沥青路面低分辨率纹理图像至0.1 mm。该方法利用三维激光传感器采集路面纹理数据,并重建低分辨率数据。研究表明,该技术不仅可以有效提升数据分辨率,还能准确再现7种关键的三维纹理参数,从而为路面抗滑性能评估提供了一种高效、准确的解决方案。Yu等^[31]开发了

一种基于三维激光扫描技术的沥青路面纹理提取与评价方法,通过改进的Steger算法提取激光条纹中心线,采用坐标变换和三次样条插值处理三维点云数据,实现了沥青路面纹理的三维重构和对平均纹理深度(MTD)的评估。实验结果表明,该方法能够在复杂环境下高效去噪,提取激光条纹中心线的平均误差小于0.09像素,三维点云数据的插值误差控制在0.01~0.02 mm之间。该方法在路面纹理提取与评价方面具有较高的精度与稳定性,可用于不同类型路面的抗滑性能评价。

基于三维激光视觉的重构方法测试效率高、稳定性好,常被集成于车载检测设备中,实现对路面纹理的快速检测。但相对于前面几种方法,此方法价格昂贵,所获取的图像容易受到外界因素干扰,影响测试精度。

2 基于数字图像技术的沥青路面抗滑性能评价方法

在完成沥青路面纹理重构之后,需要从中获取相应的参数指标,进而评价沥青路面纹理,并建立其与路面抗滑性能的关系。现阶段常用的分析方法包括基于几何学指标的评价方法、基于频谱分析的评价方法、基于分形理论的评价方法和基于人工智能的评价方法等。

2.1 基于几何学指标的评价方法

重构得到的沥青路面纹理构造三维模型富含众多几何信息,可通过相关算法计算三维评价指标,其中应用最多的就是平均构造深度MTD。

钱振东等^[15]、宋永朝等^[16]通过数字图像技术得到沥青路面的灰度分布模型,根据铺砂法的测量原理计算用灰度表示的沥青路面构造深度值,并与实测的构造深度值进行对比,结果发现2个指标具有极高的线性关系,两项研究中得到的相关系数 R^2 分别是0.992 0和0.941 6。他们的研究表明,采用数字图像技术能很好地获取路面的构造深度值,避免传统测试方法中人为因素的干扰,实现沥青路面抗滑性能的快速连续化检测。

平均构造深度MTD和平均断面深度MPD等指标都属于平均指标,无法很好地反映路面整体形貌的方向特征和分布特征,从而使路面丰富的构造信息不能得到有效表达^[32]。因此,研究人员还考虑从重构得到的纹理构造三维模型中提取其他几何指标,对路面抗滑性能进行评价,如轮廓算数平均偏

差、轮廓均方根偏差、偏态系数、峰态系数、轮廓峰/谷面积等等。

Reginald等^[33]根据数字三维图像计算了沥青材料表面的高度均方根和算数平均值、轮廓峰材料体积和核心材料面积、轮廓峰密度和轮廓峰曲率算数平均值6个指标,分析了4种场景下这6个指标与实测摩擦系数的关系,结果发现:纹理构造上部2 mm范围内的轮廓峰材料体积 V_{mp} 和轮廓峰密度 S_{pd} 与摩擦系数具有良好的相关性($R^2=0.75\sim0.76$),且轮廓峰密度对摩擦系数的影响更大,可通过回归公式预估采用这2个三维指标对材料的摩擦系数,同时可以据此指导沥青混合料的材料设计。

长安大学的Hu等^[34]采用多元统计分析法探究了8个宏观纹理指标(包括3个高度指标、2个混合指标、2个特征指标以及分形维数)与动态摩擦测试仪器测试得到的摩擦系数之间的关系,结果表明轮廓峰密度和轮廓峰曲率的算数平方根与摩擦系数具有良好的线性关系。其原因是轮廓峰密度越大,越能促进轮胎与路面间滞后效应产生的能量消散,而轮廓峰曲率越大,其接触应力越大,这会导致更大的轮胎变形和滞阻力产生,从而增大路面摩擦力。此外,其研究还表明,车速越快,轮廓峰密度对抗滑性能影响下降、而对曲率算数平方根的影响上升。这是由于车速越快,车轮与路面的接触越少,高的曲率能促进沥青路面纹理穿透水膜。

华南理工大学的Zhang等^[35]通过三维激光视觉重构方法获取了沥青路面纹理构造的多个几何参数,通过加速磨光试验和轮碾试验,探究在磨光和碾压作用下,沥青材料几何参数的变化情况。研究结果表明,在多次磨光作用下轮廓峰的峰数减小峰角增加,而轮碾作用会减小轮廓峰的高度并使集料集中,良好的集料性能和级配设计对于提高路面的抗滑性能至关重要。

Mohboob等^[36]使用纹理深度的均方根和偏度表征沥青路面的宏观纹理特征,并测试了3月至11月这2个指标的变化情况,发现在夏季时,宏观纹理会降低,分析说明此现象与循环垂直荷载以及较高温度的综合作用影响有关。

2.2 基于频谱分析的评价方法

沥青路面的纹理构造实际上是由不同波长的纹理构造(如宏观构造和微观构造)相互叠加产生,基于此,研究人员通过频谱分析的方法,将宏观纹理和微观纹理进行分离,分别探究两者对路面抗滑性能的影响。

Animesh等^[37]使用快速傅里叶变换获得不同频率下纹理波的振幅,并按照宏观纹理和微观纹理的波长界限将频段分成2个部分,探究不同频段内平均振幅与不同抗滑能力评价指标的关系。结果表明:宏观纹理波段的平均幅值与构造深度相关性较高,微观纹理波段的平均振幅与摆值的相关性较高,而这2个波段的平均振幅均与横向力系数有较高的相关性,这与这3种抗滑能力评价指标的测试方法的原理一致。

Fereidoon等^[38]通过傅里叶变换和小波变换对图像进行水平向、竖直向和对角向的分解,假定这3个方向对于路面的抗滑性能会产生不同影响,并由此计算其对应的抗滑性能指标(SRI),之后使用所得到的综合SRI值与实测BPN值进行训练,最终得到SRI与BPN值的关系。实测结果发现,在足够的训练样本下,使用综合SRI能够较为准确地计算路面的BPN值,从而实现对路面抗滑性能的快速评价。

Alfredo等^[39]对激光三维扫描获得的三维纹理数据的功率谱密度进行计算,分析不同粗糙状态下沥青路面的能量分布情况。结果表明:沥青路面表面越粗糙其包含的能量越大,同时通过比对不同车速下的PSD分布图发现,车速越低,激光三维扫描捕获的高频数据越多,获取的微观纹理信息也就越丰富。

2.3 基于分形理论的评价方法

对沥青路面的抗滑性能而言,存在着大量而复杂的影响因素,如原材料的几何构型、颗粒分布情况等,在一定尺度范围内,路面纹理具有随机性和统计自相似性,这些特性难以用常规数学语言进行精确描述。而分形理论正是一种专门研究自然界不规则现象的理论工具,能够有效表征沥青路面纹理的复杂程度及其细节特征。分形维数越大,表明路面纹理结构越复杂,细节越丰富^[40]。

1998年,Kokkalis^[41]首次在路面抗滑性能研究中引入分形理论,利用分形维数表征微观与宏观纹理特征,并探讨了影响路面抗滑性能的关键因素。此外,他还通过室内试验,分析了沥青路面在磨光条件下的纹理深度与分形维数之间的关系,并根据分形维数的结果评价了沥青路面的摩擦系数。

Liu等^[42]提出了一种改进差分盒计数(IMDBC)方法,用于测量沥青路面的分形维数,以评价其抗滑性能。该方法在完整纹理和局部纹理上的拟合精度分别提高了18.8%和900%。通过对不同层次的路面纹理进行分层分析,发现最高点高度的50%~60%的分形维

数与摩擦系数的相关性最高(达0.6),表明该层的分形维数可作为评价沥青路面抗滑性能的潜在参数。

钱振东等^[15]采用差分盒维数法计算获取了沥青路面的分形维数,通过对实测的构造深度和摆值数据进行回归分析发现,分形维数与构造深度呈现良好的二次函数关系($R^2=0.987\ 3$),与摆值呈现出较好的三次函数关系($R^2=0.980\ 4$)。作为能够同时反映构造深度和摆值的参数,分形维数有助于避免因单一参数设计而导致路面出现“粗而不糙”的现象。

2.4 基于人工智能的评价方法

在沥青路面的抗滑性能评价中,传统方法往往依赖几何学、频谱分析或分形理论等数学模型,但這些方法在面对复杂、非线性的路面纹理特征时存在一定局限性。而人工智能技术的引入,为沥青路面纹理分析提供了一种高效、自动化的解决方案。人工智能模型,如机器学习、深度学习等能够通过海量数据训练,自动学习路面纹理特征,并建立纹理参数与抗滑性能之间的非线性映射关系,避免了传统方法对特征选择的依赖,提高了评价精度和鲁棒性。

Yang等^[43]提出了一种基于深度学习的非接触式路面抗滑性能评估方法,利用3D激光成像技术提取路面纹理特征,并通过卷积神经网络(CNN)建立纹理与抗滑性能的映射关系。研究采集了28个现场试验路段的3D纹理图像和摩擦系数数据,共构建28 000对图像-摩擦数值数据集,用于训练和验证深度学习模型FrictionNet-V。实验表明,该模型在5 600张测试图像上表现优于其他深度学习模型,实现了高速、非接触的抗滑性能预测,为未来基于高分辨率3D图像的路网级沥青路面抗滑性能管理提供了技术支持。

He等^[44]采用BP神经网络建立路面纹理与抗滑性能的映射关系,并结合CarSim/Simulink仿真分析行车安全。研究基于LCDFM测试评估9种沥青混合料,发现驾驶速度对行车安全影响最大,其次是车辆类型、平均纹理深度(MTD)和抛光时间。较大骨料公称最大粒径(NMAS)可提高抗滑性能,推荐OGFC-16和SMA-16作为高速公路优选路面。最终,研究构建了BP神经网络预测模型,实现对抗滑性能的精准预测。

王海涛等^[45]采用改进教学优化算法(MTLBO)优化极限学习机(ELM),构建沥青路面抗滑性能预测模型。通过MMLS3载荷模拟器采集路面宏观纹理与抗滑性能指标BPN,并利用ELM预测BPN变化趋势,基于MTLBO优化其权重和偏置参数。实验表明,该方法较SVM、ELM和TLBO-ELM预测误差分别

降低1.80%、1.50%和1.07%,可有效提升预测精度,从而快速评估沥青路面抗滑性能。

3 结 语

本文综述了基于数字图像技术的沥青路面纹理重构及抗滑性能评价方法,系统分析了几何学指标、频谱分析、分形理论及人工智能方法在路面抗滑性能评估中的应用。研究表明:数字图像技术能够实现对于沥青路面表面构造的精准重构,并通过提取关键几何特征,如轮廓峰密度、轮廓曲率、构造深度等,有效表征路面抗滑性能。此外,人工智能与深度学习方法的引入,使得基于图像数据的抗滑性能预测达到了更高的精度和自动化水平,有助于提升路面安全性评估的智能化水平和效率。

然而,当前基于数字图像技术的评价方法仍面临一些挑战。首先,该方法计算复杂程度较高,三维纹理数据的提取与处理涉及大量计算,尤其是在大规模路网级检测应用时,数据存储与实时处理仍需优化;其次,环境适应性问题,如光照变化、阴影干扰、表面污染等,可能影响图像采集的稳定性,导致重构结果偏差;此外,标准化与工程应用仍有待完善,尽管数字图像技术在实验室环境下表现良好,但如何将其与传统抗滑性能检测标准(如摆式摩擦仪BPN、构造深度MTD等)结合,并应用于不同类型的道路条件,仍需进一步研究。

未来研究可重点关注以下方向:(1)多模态数据融合:结合激光扫描、光学成像、高光谱分析等技术,实现路面纹理的多源数据融合,提高检测精度和可靠性;(2)智能算法优化:利用强化学习、神经网络自适应优化等方法,提升深度学习模型在复杂环境下的适应性,并减少对大规模标注数据的依赖,提高泛化能力;(3)实时检测与自动化应用:探索开发基于无人机、自动驾驶车辆等移动平台的实时检测系统,实现城市道路和高速公路的智能化抗滑性能监测,为路面维护和交通安全管理提供高效解决方案;(4)标准化研究与行业推广:推动基于数字图像技术的路面抗滑性能评估方法向行业标准化发展,使其与传统物理测量方法结合,提高工程应用的可行性。

总之,数字图像技术结合机器学习和智能检测,为沥青路面抗滑性能的精准评估提供了新的机遇。未来,随着计算机视觉、人工智能和交通工程的进一步融合,该技术将在道路维护、数智管养等领域发挥更大作用。

参考文献:

- [1] PUZZO L, LOPRENCIPE G, TOZZO C, *et al.* Three-dimensional survey method of pavement texture using photographic equipment[J]. *Measurement*, 2017(111): 146–157.
- [2] PIARC World Road Association. Report of the committee on surface characteristics[C]//Proceeding of XVIII World Road Congress Symposium. Paris: World Road Association, 1987: 13–19.
- [3] MATAEI B, ZAKERI H, ZAHEDI M, *et al.* Pavement Friction and Skid Resistance Measurement Methods: A Literature Review[J]. *Open Journal of Civil Engineering*, 2016, 6(4): 537.
- [4] HALL J, SMITH K L, TITUS-GLOVER L, *et al.* Guide for pavement friction[J]. Final Report for NCHRP Project, 2009(1): 43.
- [5] HENRY J J. Evaluation of pavement friction characteristics[M]. Washington D.C.: Transportation Research Board, 2000.
- [6] FWA T, CHOO Y, LIU Y. Effect of aggregate spacing on skid resistance of asphalt pavement[J]. *Journal of transportation engineering*, 2003, 129(4): 420–426.
- [7] ERGUN M, IYINAM S, IYINAM A F. Prediction of road surface friction coefficient using only macro- and microtexture measurements[J]. *Journal of transportation engineering*, 2005, 131(4): 311–319.
- [8] LEU M, HENRY J. Prediction of skid resistance as a function of speed from pavement texture measurements[J]. *Transportation Research Record*, 1978, 666(2): 7–13.
- [9] DO M T, ZAHOUANI H, VARGIOLU R. Angular parameter for characterizing road surface microtexture[J]. *Transportation Research Record*, 2000, 1723(1): 66–72.
- [10] HENRY J, HEGMON R. Pavement texture measurement and evaluation[C]//Surface Texture Versus Skidding: Measurements, Frictional Aspects, and Safety Features of Tire–Pavement Interactions. West Conshohocken: ASTM International, 1975.
- [11] FLINTSCH G W, DE León E, MCGHEE K K, *et al.* Pavement surface macrotexture measurement and applications[J]. *Transportation Research Record*, 2003, 1860(1): 168–177.
- [12] BITELLI G, SIMONE A, GIRARDI F, *et al.* Laser scanning on road pavements: A new approach for characterizing surface texture[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 9110–9128.
- [13] SCHONFELD R. Photo-interpretation of skid resistance[J]. *Highway Research Record*, 1970(311): 11–25.
- [14] 刘婉辰, 黄晓明. 基于图像处理的沥青路面构造深度评价方法的优化研究[J]. *北方交通*, 2013(3): 9–13.
- [15] 钱振东, 薛永超, 张令刚. 沥青路面三维纹理分形维数及其抗滑性能[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(10): 3590–3596.
- [16] 宋永朝, 梁乃兴, 闫功喜, 等. 基于数字图像技术的露石混凝土路面纹理构造抗滑性能[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47(2): 123–128.
- [17] 曹平, 白秀琴. 沥青路表面分形特性与抗滑性能的关系研究[J]. *润滑与密封*, 2009, 34(3): 9–11.
- [18] YU D, CAO Y, ZHAO Q. Detection and Analysis of Asphalt Pavement Texture Depth Based on Digital Image Analytics Technology[J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2023, 18(3): 628–637.
- [19] SALARI E, BAO G. Automated pavement distress inspection based on 2D and 3D information[C]//2011 IEEE International Conference on Electro/Information Technology. New York: IEEE, 2011: 1–4.

- [20] 赵晶. 基于数字图像的沥青路面表面构造评价体系研究[D]. 西安:长安大学, 2012.
- [21] MAHMOUDZADEH A, YEGANEH S F, AREZOUMAND S, *et al.* 3D Pavement Surface Reconstruction Using An RGB-D Sensor[C]//The 6th International Electronic Conference on Sensors and Applications. Basel Switzerland: MDPI, 2019: 47.
- [22] LUO Y, GUO P, GAO J, *et al.* Three-dimensional reconstruction of asphalt road surface texture based on binocular stereo vision[J]. Construction and Building Materials, 2024(455): 139092.
- [23] ALAMDARLO M N, HESAMI S. Optimization of the photometric stereo method for measuring pavement texture properties[J]. Measurement, 2018(127): 406-413.
- [24] WOODHAM R J. Photometric stereo: A reflectance map technique for determining surface orientation from image intensity[C]//Image understanding systems and industrial applications I. Bellingham: SPIE, 1979: 136-143.
- [25] SLIMANE A B, KHOUDEIR M, BROCHARD J, *et al.* Characterization of road microtexture by means of image analysis[J]. Wear, 2008, 264(5-6): 464-468.
- [26] GENDY A E, SHALABY A. Image requirements for three-dimensional measurements of pavement macrotexture[J]. Transportation Research Record, 2008, 2068(1): 126-134.
- [27] RUSHMEIER H, TAUBIN G, Guézic A. Applying shape from lighting variation to bump map capture[C]//Rendering Techniques' 97: Proceedings of the Eurographics Workshop in St. Etienne. Berlin: Springer, 1997: 35-44.
- [28] SUN L, WANG Y. Three-dimensional reconstruction of macrotexture and microtexture morphology of pavement surface using six light sources - based photometric stereo with low-rank approximation[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 31(2): 04016054.
- [29] 侯青. 沥青路面激光三维构造深度检测技术研究[D]. 西安:长安大学, 2013.
- [30] WANG G, WANG K C P, YANG G. Deep learning based image reconstruction at any speeds for faster pavement texture measurement using 3D laser technology[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2023, 24(2): 2269461.
- [31] WANG Y, YU B, ZHANG X, *et al.* Automatic extraction and evaluation of pavement three-dimensional surface texture using laser scanning technology[J]. Automation in Construction, 2022(141): 104410.
- [32] EL GENGY A, SHALABY A, SALEH M, *et al.* Stereo-vision applications to reconstruct the 3D texture of pavement surface[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2011, 12(3): 263-273.
- [33] KOGBARA R B, MASAD E A, WOODWARD D, *et al.* Relating surface texture parameters from close range photogrammetry to Grip-Tester pavement friction measurements[J]. Construction and Building Materials, 2018(166): 227-240.
- [34] HU L, YUN D, LIU Z, *et al.* Effect of three-dimensional macrotexture characteristics on dynamic frictional coefficient of asphalt pavement surface[J]. Construction and Building Materials, 2016(126): 720-729.
- [35] ZHANG X, LIU T, LIU C, *et al.* Research on skid resistance of asphalt pavement based on three-dimensional laser-scanning technology and pressure-sensitive film[J]. Construction and Building Materials, 2014(69): 49-59.
- [36] MAHBOOB KANAFI M, KUOSMANEN A, PELLINEN T K, *et al.* Macro-and micro-texture evolution of road pavements and correlation with friction[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2015, 16(2): 168-179.
- [37] DAS A, ROSAUER V, BALD J S. Study of road surface characteristics in frequency domain using micro-optical 3-D camera[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015(19): 1282-1291.
- [38] NEJAD F M, KARIMI N, ZAKERI H. Automatic image acquisition with knowledge-based approach for multi-directional determination of skid resistance of pavements[J]. Automation in Construction, 2016(71): 414-429.
- [39] CIGADA A, MANCOSU F, MANZONI S, *et al.* Laser-triangulation device for in-line measurement of road texture at medium and high speed[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(7): 2225-2234.
- [40] 谌文. 基于分形理论的环保安全型沥青路面抗滑性能研究[D]. 西安:长安大学, 2014.
- [41] KOKKALIS A G, PANAGOULI O K. Fractal evaluation of pavement skid resistance variations. I: Surface Wetting[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 1998, 9(11): 1875-1890.
- [42] LIU C, ZHAN Y, DENG Q, *et al.* An improved differential box counting method to measure fractal dimensions for pavement surface skid resistance evaluation[J]. Measurement, 2021(178): 109376.
- [43] YANG G, ZHANG A A, WANG K C, *et al.* Deep-learning based non-contact method for assessing pavement skid resistance using 3D laser imaging technology[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2023, 24(2): 2147520.
- [44] HE Y, WANG C, YANG X, *et al.* Skid Resistance Performance analysis and driving safety evaluation in the full life cycle of asphalt pavement[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2024, 150(4): 04024047.
- [45] 王海涛, 沈平, 高博. 基于MTLBO和ELM的沥青路面抗滑性能预测[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(1): 196-208.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

