

〈红外应用〉

基于高光谱成像的桥梁混凝土表面露筋病害识别

周 坤^{1,2}, 彭 雄^{1,2}, 钟新谷^{1,2}, 张文辉³, 李千禧^{1,2}, 赵 超^{1,2}

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 结构抗风与振动控制湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

3. 丽水市市政设施管理中心(丽水市节约用水管理中心), 浙江 丽水 323020)

摘要: 桥梁作为交通关键节点, 承担与日俱增的交通流量压力, 相当一部分桥梁尚未达到设计使用年限就出现较多的病害, 技术状况不容乐观。高光谱成像运用光电技术检测物体对光谱波段信号的辐射和吸收情况, 将该信号转换成图像和图形, 可基于吸收峰的位置和强度分析被测物体的物理性质和物质组成, 因此本文提出基于高光谱成像的桥梁混凝土表面露筋病害识别方法。利用线阵高光谱相机集成匀速步进滑轨装置, 形成高光谱成像测试系统, 采集桥梁混凝土表面露筋病害图像; 基于桥梁露筋病害高光谱图像谱线与空间特征, 结合预处理——平滑滤波-多元散射校准(Savizky-Golay- Multivariate scattering calibration, SG-MSC)、特征空间变换——光谱导数法(First derivative, FD)、特征变量选择算法——竞争自适应重加权抽样(Competitive adapatative reweighted sampling, CARS), 将原始光谱曲线数据经特征空间转换提取相应特征值并显示波段; 以光谱曲线特征向量构建数据集, 基于支持向量机形成露筋病害识别预测模型。以某跨江大桥为例, 以高光谱成像测试系统对实际桥梁混凝土露筋病害进行识别, 将原始光谱数据经平滑特征空间变换与特征提取后放大差异, 将254个波段数据维度降低到23个波段数据, 模型预测精度达到94.6%, 对比可见光成像高光谱成像具有更高维度信息可有效表征物质属性, 表明高光谱成像对复杂表面环境下的桥梁病害识别具有可行性和广泛应用前景。

关键词: 桥梁混凝土; 高光谱成像; 露筋病害; 谱线特征; 机器学习

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)02-0216-08

Identification of Exposed Reinforcement Defects in Bridge Concrete Based on Hyperspectral Imaging

ZHOU Kun^{1,2}, PENG Xiong^{1,2}, ZHONG Xingu^{1,2}, ZHANG Wenhui³, LI Qianxi^{1,2}, ZHAO Chao^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hunan Science and Technology University, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Key Laboratory of Structural Wind and Vibration Control, Xiangtan 411201, China;

3. Lishui Municipal Facilities Management Center (Lishui Water Conservation Management Center), Lishui 323020, China)

Abstract: As a key mode of transportation, bridges bear the high pressure of traffic flow. Many bridges have defects before reaching their designed service life. Bridge-defect recognition based on visible light uses grayscale defect images and regional edge gradient information, which have limitations in complex environments. The radiation and absorption of spectral band signals by objects are detected by hyperspectral imaging, and the signals are transformed into images and graphics. The physical properties of the measured object are analyzed based on the position and intensity of the absorption peak. In this study, a method based on hyperspectral vision is proposed to identify exposed reinforcement bar defects in bridge concrete. Based on the spectral lines and spatial features of hyperspectral images of exposed

收稿日期: 2023-08-12; 修订日期: 2023-10-16。

作者简介: 周坤(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 结构健康监测, E-mail: 2213363020@qq.com。

通信作者: 彭雄(1992-), 博士, 副教授, 主要研究方向: 结构健康监测, E-mail: 1021009@hnust.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金(51678235), 教育部“春晖计划”合作科研项目(HZKY20220354), 湖南省教育厅优秀青年项目(23B0451), 浙江省建设科研项目(2022K144)。

reinforcement defects in bridge concrete combined with processing——Smooth filtering multivariate scattering calibration (SG-MSC), feature space transformation——First derivative method (FD), and feature variable selection algorithm——Competitive adaptive reweighted sampling (CARS), the original spectral curve data were transformed into feature space to extract the corresponding feature values and display the band. The dataset was constructed based on spectral curve feature vectors, and a support vector machine algorithm was used to establish a prediction model for identifying exposed reinforcement defects. Considering a cross-river bridge as an example, a hyperspectral visual testing system was used to identify actual exposed reinforcement bar defects of the bridge. By performing smooth feature space transformation and feature extraction on the original spectral data, the differences were amplified, reducing the dimensionality of the 254 band data to 23 band data and achieving a model prediction accuracy of 94.6%. Hyperspectral vision has higher dimensional information than visible-light vision. Hence, the proposed model can effectively characterize material properties, is feasible, and has broad application prospects.

Key words: bridge concrete, hyperspectral vision, exposed reinforcing bar defect, spectral line characteristics, machine learning

0 引言

桥梁作为交通关键节点，承担着与日俱增的交通流量压力，桥梁总体的技术状况不容乐观，特别近年来桥梁安全事故频发已成为社会关心的热点。因此，由相关机构根据《公路桥梁技术状况评定标准》(JTGT H21-2011)^[1]对特、大型桥梁每年进行一次“体检”，中小型桥梁二年进行一次“体检”，及时发现不能保证正常使用、处于危险状态的桥梁。基于远距离成像设备^[2]、爬壁机器人^[3]和无人机^[4]等平台携带可见光相机对桥梁表观缺陷进行识别与测量，能够较为有效地定位病害位置并量化缺陷尺寸信息，是解决高墩跨江跨河大桥技术状况评估的有效工具，学界已有大量研究^[5-12]。在实际桥梁环境中，桥梁混凝土表面存在如光照、划痕、麻面、黏贴物等各种复杂背景，可见光成像仅基于缺陷边缘的灰度差信息，数据维度对表征复杂背景仍存在一定的局限性，对于复杂背景和相互重叠下的病害识别和分析目前还存在一定困难。

高光谱成像是运用光电技术检测物体对光谱波段信号的辐射和吸收情况，将该信号转换成可供分辨的图像和图形，可基于吸收峰的位置和强度分析被测物体的物理性质和物质组成，如同于物质的“指纹”^[13]。高光谱技术的民用化是由航空航天、天文、物理领域应用发展而来，我国于2021发射的高光谱遥感观测卫星（高分五号02星），全面提升了对大气、水体、陆地的观测能力，基于反演算法和高光谱图像识别先进技术实现了对大气环境、水环境、生物当量、土地盐碱含量等实时监测^[14-15]。

将高光谱测试技术应用于土木材料领域相关测试

的研究近年来也得到迅速发展，如李笑芳^[16]等人研究了基于高光谱技术建筑反射隔热涂料厚度检测技术，构建涂料施工厚度检测模型。Bonifazi^[17]等进行了基于高光谱成像的再生混凝土骨料上附着砂浆的评价研究，以评估再生混凝土骨料表面的残余砂浆含量；Bonifazi^[18]等将高光谱成像和分级 PLS-DA 应用于建筑及拆卸废物中的石棉识别，能快速检测建筑废弃物是否存在石棉；Gargiulo^[19]等使用近红外光谱成像系统对建筑和建筑垃圾中的聚烯烃分类，提出了一种客观且无损的聚烯烃回收链分类和质量控制方法。

高光谱成像对物质成分具有精确表征的特点，为基于高光谱成像的结构健康监测提供了基础。如邵慧^[20]等人提出了一种适用于古建筑建模的全波形高光谱激光雷达，获取古建筑完整的空间结构、历史演化及其健康状态等特征信息；严阳^[21]等人利用可见光以及近红外波段下获取的高光谱图像，分析伪装目标在不同背景下的伪装效果；熊显名^[22]等人提出将“环境变量”作为特征值的解决方法，将光谱数据组合成新的数据波形，结合神经网络有效的识别路面状态；田英慧^[23]等人研究了高白度、高反射率的雪地型伪装材料的性能检测技术，通过光谱反射因数的欧氏距离和光谱角余弦计算伪装样品与雪地背景的相似性；张海馨^[24]等人设计了一种基于尾焰光谱分析特征分析的识别系统，通过结合跟踪成像模块对准目标结合光谱分析模块识别目标，实现对高速运动目标的快速识别。程俊毅^[25]等人通过研究地面光谱测量手段获取了公路沥青路面的光谱遥感数据，探索了沥青路面老化过程与光谱响应变化的规律；Ichi^[26]等人提出利用高光谱图像收集数据对铁路道路道砟含水率进行非接触

式检测与评价的方法; Kim^[27]等通过地物光谱仪获取桥梁混凝土材料表面完整光谱反射, 提出了基于高光谱成像定量评估混凝土风化程度的新方法; Runcie^[28]等人提出了高光谱成像和分类技术作为客观评估民用或其他结构上油漆状态的方法。文献表明基于高光谱成像对病害监测识别已有一定的研究, 但桥梁病害与混凝土背景的光谱信息差异较少, 造成识别难度较大、效率低等问题, 如何扩大谱线之间的差异、降低数据维度, 提出谱线峰值提取与特征学习预测建模方法, 还有待进一步研究。

因此本文提出基于高光谱成像的桥梁混凝土表面露筋病害识别方法。利用线阵高光谱相机集成匀速步

进滑轨装置, 形成高光谱成像测试系统, 采集桥梁混凝土表面露筋病害图像; 基于桥梁露筋病害高光谱图像谱线与空间特征, 结合预处理——平滑滤波-多元散射校准 (Savitzky-Golay-Multivariate scattering calibration, SG-MSC)、特征空间变换——光谱导数法 (First derivative, FD)、特征变量选择算法——竞争自适应重加权抽样 (competitive adaptive reweighted sampling, CARS), 将原始光谱曲线数据经特征空间转换提取相应特征值并显示波段; 以光谱曲线特征向量构建数据集, 基于支持向量机^[29]形成露筋病害识别预测模型, 如图 1 所示。

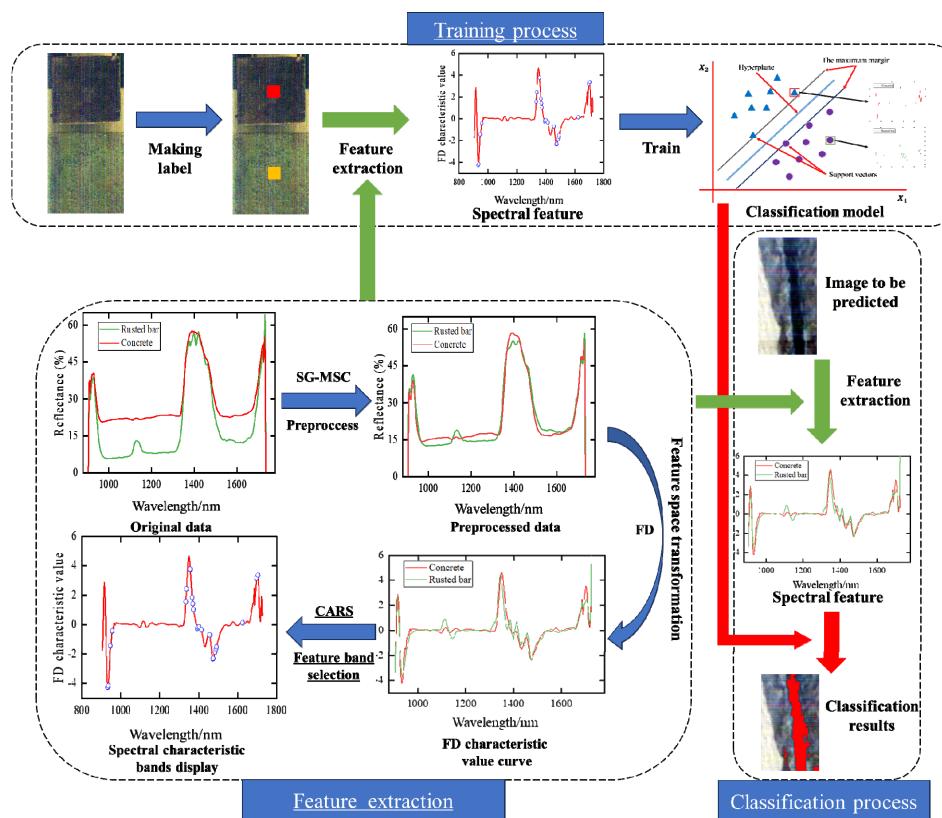


图 1 高光谱图像分类流程示意图

Fig.1 Schematic diagram of hyperspectral image classification process

1 高光谱成像系统原理与实际成像

1.1 高光谱成像成像系统

如图 2 所示, 高光谱图像采集系统为 FigSpec 高光谱相机 FS-15 (线阵扫描相机), 其利用高衍射效率的透射式光栅分光模组与高灵敏度面阵列相机结合。高光谱相机传感器的波谱线范围为 900~1700 nm, 光谱分辨率为 8 nm, 共 254 个波段。图像宽度为 320 像素, 图像长度根据线阵扫描速度与时间而定。相机为微机自动控制形成三维高光谱图像, 具体参数如表 1 所示。

1.2 桥梁混凝土露筋病害高光谱成像

1) 高光谱相机扫描速度

为对实际桥梁混凝土露筋病害进行高光谱成像, 基于线阵扫描相机特点结合可移动式电滑轨对高光谱相机进行集成, 形成如图 2 所示的高光谱成像测试系统。根据相机的基本参数, 计算相机最佳运动速度 V :

$$V = \frac{2d \tan(\frac{\text{Fov} \times \pi}{360})}{640r \times \text{Fps}} \quad (1)$$

式中: d 为目标与被测物体距离, m; Fps 为采集帧率, 帧/s; r 为相机分辨率, 该相机分辨率为 320dpi; Fov 为视场角, 该相机视场角为 21.74°。



图 2 高光谱成像测试系统各组成部分

Fig.2 Components of a hyperspectral vision test system

2) 高光谱相机实际成像

由于光源在每个波段的分布不均匀, 相机中的暗电流以及周围环境的影响, 收集的高光谱图像将包含一定的噪声量。为了尽可能减少噪声, 在扫描样品之前, 对相机进行实验现场的深色和白色参考校准^[18]。

表 1 高光谱相机各参数指标详情

Table 1 Details of each parameter index of hyperspectral camera

Parameter	Parameter indicators	Parameter	Parameter indicators
Illumination	Passive lighting(excluding light source)	Transmission efficiency	>60%
Spectral method	Transmission grating	Stray	<0.5%
Spectral range	900-1700 nm	Number of spatial pixels	320
Spectral bands	254	Pixel size	30 μm
Spectral resolution	8 nm	Imaging speed	200 Hz
Slit width	25 μm	Detector	InGaAs

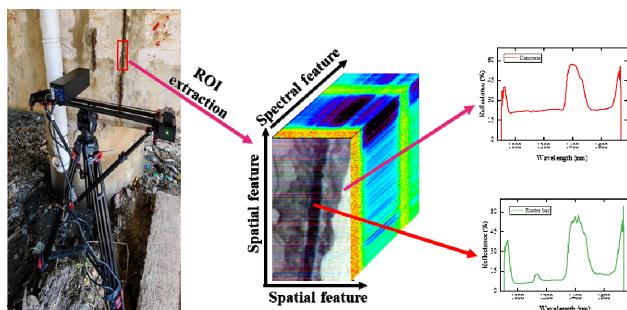


图 3 高光谱数据立方体以及相对于锈蚀钢筋与混凝土反射率的光谱变化
(a) 现场试验 (b) 三维高光谱图像 (c) 谱线特征
(a) Field experiment (b) 3D hyperspectral images (c) Spectral feature

Fig.3 Hyperspectral data cube and spectral variation of reflectance relative to corroded steel bar and concrete

2 室内标准模型的建立

2.1 室内样品制作与图像采集

在室内选取混凝土试块与锈蚀钢材作为样品, 在

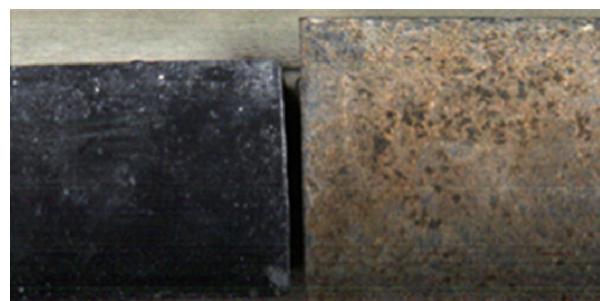
深色和白色参考用于归一化样品的反射率, 因此, 校准后高光谱图像 I_C 可以由公式(2)获得:

$$I_C = \frac{I_{\text{Raw}} - I_{\text{Dark}}}{I_{\text{White}} - I_{\text{Dark}}} \quad (2)$$

式中: I_{Raw} 是未经处理的原始反射谱线; I_{Dark} 表示深色参考谱线; I_{White} 表示白色参考谱线。经黑白平衡校准后, 如图 3(a)所示, 利用高光谱成像系统对湘潭湘江三大桥 8-20#墩柱进行了实际外观缺陷检测, 获得了钢筋露筋病害和各构件混凝土高光谱成像图像。如图 3(b)所示, 为移动平台搭载 FS-15 高光谱相机测试混凝土表面钢筋露筋所得到的三维高光谱图像。

如图 3 所示, 高光谱成像图像具有 3 个主要维度, 前两个维度代表空间特征, 第 3 个维度代表光谱谱线特征^[17]。如图 3(c)所示为高光谱图像数据立方体、锈蚀钢筋和混凝土背景的波长-反射率曲线。

准备样品过程中尽量避免过度擦拭样品表面, 确保保持样品原始属性。启动高光谱成像系统, 设置成像距离为 0.3 m, 图像采集频率为 50 帧/s, 自动计算出滑轨移动速度为 0.047 m/s。高光谱成像时两样品应放置于同一水平面上, 同时样品放置干净背景下来防止高光谱图像产生噪声。采集到的图像如图 4 所示。



(a) 混凝土样品 (b) 锈蚀钢材样品
(a) Concrete sample (b) Rusted steel sample

图 4 室内标准模型高光谱图像
Fig.4 Indoor standard model hyperspectral images

2.2 高光谱数据预处理

在高光谱图像采集过程中,由于环境约束、样品属性(尺寸、形态等)等方面的影响,光谱数据通常包含大量具有强协方差的冗余和噪声变量,对后续的识别工作增加了难度。采用合适的光谱预处理方法可以纠正光谱之间的相对基线偏移,提高模型的准确性和鲁棒性^[30]。

为了更好地提取光谱特征,减少噪声的影响,采用 Savitzky-Golay 平滑滤波器和多元散射校准(Multivariate scattering calibration, MSC)的组合算法进行高光谱图像谱线预处理,强化光谱波段特征点,加强数据之间的可比性,避免高反射率值带来的计算复杂性。SG 是一种基于局部多项式最小二乘拟合的滤波方法^[30]。该滤波器的主要特点是确保频谱的形状和宽度保持不变,同时消除环境和设备引起的噪声。MSC 有效地消除了由不同散射水平引起的光谱差异^[31],从而增强了光谱和数据之间的相关性,能有效减少由基线偏移和散射水平引起的光谱变异性。预处理前原始锈蚀钢筋与混凝土背景的光谱谱线如图 5(a)所示。使用 SG-MSC 对数据进行预处理时,选择的窗口大小为 25,多项式次数为 7,经预处理后的光谱谱线如图 5(b)所示。

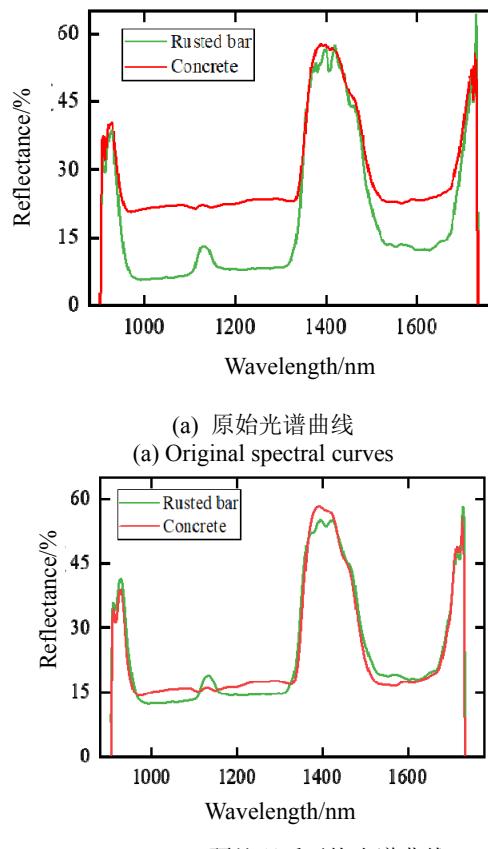


图 5 高光谱图像谱线预处理
Fig.5 Hyperspectral image line preprocessing

2.3 特征空间变换

由于高光谱相机工作波段在近红外光波段(900~1700 nm),其光谱的反射率特征主要受物料表面状态影响,在该波段范围内无机物敏感性较弱,使得锈蚀钢材与混凝土背景的光谱曲线之间存在重叠区间,缺少差异,识别难度较大。因此采用特征空间变换方法对高光谱反射率特征进行计算,放大其差异,有效降低识别难度。

光谱导数法可以有效地消除反射率基线偏移,一定程度上避免颜色、光强等因素的影响,有效识别重叠区域,提供比原始光谱分辨率更高的光谱轮廓变换,增加分辨率和灵敏度^[32-33]。

经 SG-MSC 预处理光谱信号是离散的反射率值,使用直接导数法对反射率进行求导,扩大锈蚀钢材与混凝土之间的差异,并选择一阶导数作为计算法则。如图 6 所示为经一阶光谱导数法处理后的谱线特征。

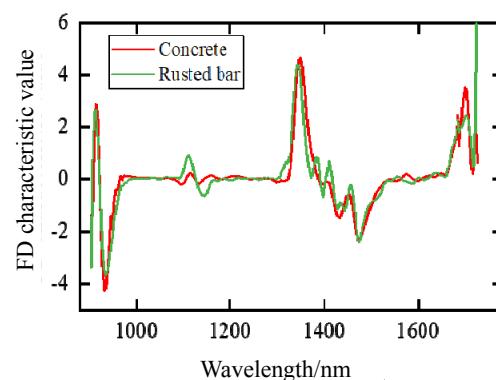


图 6 一阶光谱导数特征值曲线
Fig.6 First derivative eigenvalue curves

2.4 特征提取

一阶导数对高光谱数据特征空间转换后,显著增加了锈蚀钢材与混凝土背景之间的差异,但仍属于高维度数据,具有多个波段、相邻波段之间的强相关性和高冗余特点^[34],增加了识别模型构建的难度。

CARS 是一种特征变量选择方法,它将蒙特卡罗抽样(MC)与偏最小二乘(PLS)模型回归系数相结合^[35]。交叉验证(CV)用于确定 CV(RMSECV)均方根误差(RMSE)最低的子集。RMSECV 的计算如下所示:

$$RMSECV = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - y_{cv})^2} \quad (3)$$

式中: y 表示真实值; y_{cv} 表示 CV 中的预测值。

使用 CARS 算法的特征提取结果如图 7 所示。主成分的最大数量设置为 20, MC 采样次数设置为 50, 并进行 5 次交叉验证。随着 MC 样本数量的增加,特征数量呈指数级减少。RMSECV 方差先减小

后增大,主要是因为去除了波长变量中的有效信息,随着RMSECV值增大,模型性能降低。在图7(b)中,RMSECV在第21次采样处达到其最小值,其值为0.0064。CARS算法筛选的特征变量详见表2。CARS算法共筛选了23个特征变量,占总波长变量的9.06%。

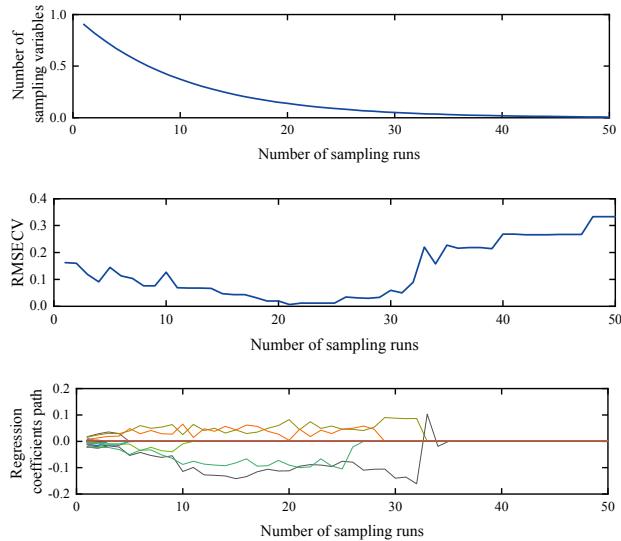


图7 CARS 算法的特征提取结果

Fig. 7 Feature extraction results of CARS algorithm

数据降维后,将具有254维特征的原始数据压缩为23维。平滑效果较好,并保留了原始数据中的大部分信息,保留了原有的趋势特征。所提取特征点在光谱中的对应位置如图8所示(以混凝土特征值曲线为例)。

如表2所示,锈蚀钢筋与混凝土背景之间的差异难以用特定的波长来表示,经CARS算法提取的特征波段集中在1400 nm左右。因锈蚀钢筋病害以深色为主,反射率较低,与未受锈蚀钢筋侵蚀混凝土有较大区别,钢筋锈蚀过程长期与混凝土结合,导致锈蚀钢筋附近混凝土颜色变深,使得区域的混凝土与锈蚀钢筋的光谱反射率曲线相近。

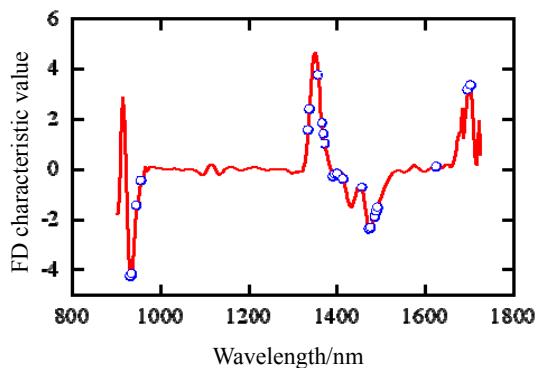


图8 所选特征变量的分布

Fig.8 The distribution of the selected feature variable

表2 CARS 算法提取特征波段

Table 2 Feature bands were extracted by CARS algorithm

Number	Selected wavelengths/nm
23	932, 935, 945, 956, 1334, 1337, 1356, 1366, 1369, 1372, 1392, 1395, 1401, 1414, 1456, 1472, 1475, 1485, 1488, 1491, 1625, 1697, 1704

2.5 基于支持向量机的光谱谱线分类与可视化

支持向量机(Support vector machines, SVM)是基于结构风险最小化的一种机器学习算法,具有泛化能力强、适用于小样本分类等优点^[29]。如图9所示,支持向量机计算出最优超平面将光谱谱线进行分类,最大限度的减少泛化误差并最大化裕量。基于高光谱成像的锈蚀钢筋与普通混凝土样本数据集制作的时间成本较高,因此本文利用支持向量机算法,建立小样本数据集,训练锈蚀钢筋与混凝土背景光谱谱线自动识别模型。选取具有强学习能力、适应范围宽的径向基(radial basis function, RBF)核函数作为支持向量机的核函数。

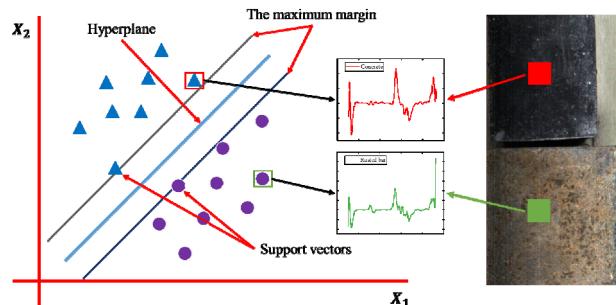


图9 支持向量机分类模型示意图

Fig.9 Schematic diagram of support vector machine classification model

在图4混凝土样品与锈蚀钢材样品上各选取大小为50×50的区域大小的高光谱图像,提取出共5000条高光谱信息,以构建SVM模型。将提取出来的5000条高光谱信息作为训练集提供给SVM训练,结果如表3所示。

表3 波段类型选取识别结果

Table 3 Identification results of band type selection

Select band type	All band			Characteristic band		
	Concrete	Rusted steel	Accuracy /%	Concrete	Rusted steel	Accuracy /%
Concrete	917	83	91.7	937	63	93.7
Rusted steel	74	926	92.6	46	954	95.4

结果表明,经特征提取后的波段相比于全波段在

识别准确率上有提升，同时大幅度降低了计算时间成本。

3 现场试验结果与讨论

利用高光谱成像系统对湘潭湘江三大桥 8-20#墩柱进行了实际外观缺陷检测，获得了露筋病害和各构件混凝土高光谱成像图像。将采集到的高光谱图像利用建立的室内标准识别模型进行预测识别，并将识别结果与传统识别方法进行比较。

如图 10(a)~(c)所示分别为桥梁混凝土露筋病害的高光谱成像经过平滑滤波-多元散射校准、光谱谱线求导、特征变量选择等系列预处理后，对三维高光谱图像每一点的谱线代入训练完成的支持向量机模型中进行预测，得到的光谱特征分类结果如图 10(c)

所示。对空间原始图像利用图像标记工具进行逐像素标记生成标定图像，结果如图 10(b)所示，用于评价该空间分割算法的分割效果。如图 10(d)~(f)为桥梁混凝土露筋病害的可见光图像传统阈值分割和人工标记的结果。对识别结果采用交并比 (IOU) 和真阳率 (TPR) 两种指标对结果进行评价，计算公式如：

$$IOU = \frac{TP}{FN + TP + FP} \quad (4)$$

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

式中：TP 为不同分类方式结果与人工标记结果的交集；FP 是过分割结果；FN 为欠分割结果。采用不同分类方法的结果如表 4 所示。

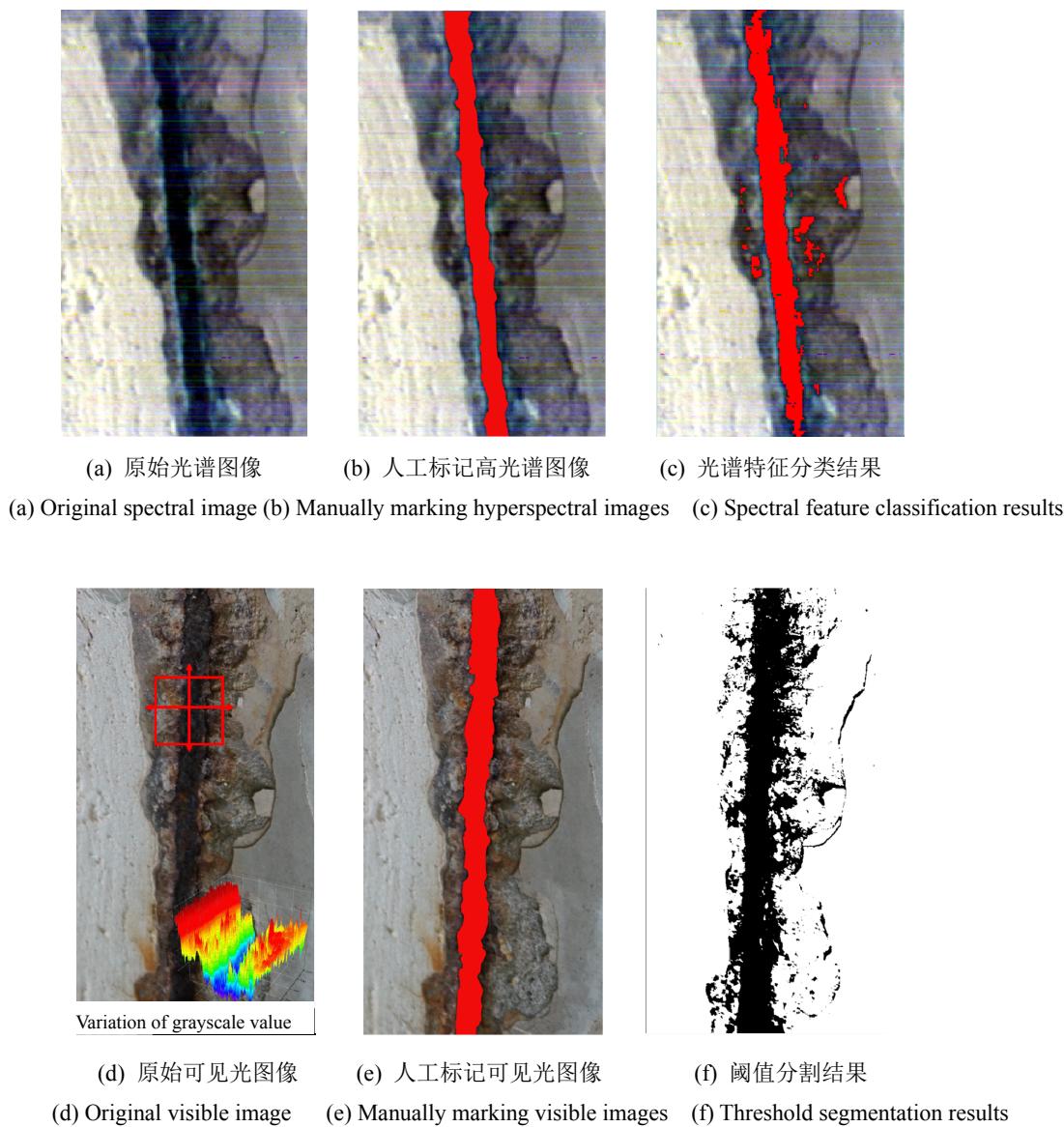


图 10 谱线特征分类与阈值分割对比

Fig.10 Spectral line feature classification and threshold segmentation

表4 不同分类方法结果

Table 4 Results of different classification methods

Evaluating indicator	TPR	IOU
Spectral feature	0.935	0.903
classification structure		
Threshold segmentation results	0.747	0.725

交并比 (IOU) 是算法分割和标定结果的交叠率, 即它们的交集与并集的比值, 比值越高说明分割效果越好, 当 IOU 为 1 时为完全分割。真阳率 (TPR) 代表了分割结果与标定结果的交集与标定结果的比值, 即在人工标记结果上实际分割了多少, 当 TPR 为 1 时也代表完全分割。采用光谱特征分类方法的 TPR 和 IOU 值明显大于传统阈值分割方法, 且 TPR 和 IOU 均大于 0.9, 表明本文采用基于光谱特征分类的方法具有良好效果。

4 结论与展望

本文提出了基于高光谱成像的桥梁混凝土表面露筋病害识别系统与方法。利用线阵高光谱相机集成匀速步进滑轨装置, 形成了高光谱成像测试系统。采集了桥梁混凝土表面露筋病害图像, 并提出了结合平滑滤波-多元散射校准、光谱导数法、特征变量选择算法高光谱图像谱线预处理方法, 并基于支持向量机训练了露筋病害识别预测模型, 以高光谱成像测试系统对实际桥梁混凝土露筋病害进行了识别, 基于谱线特征识别露筋病害达到 90%以上精度, 具有可行性和广泛应用前景。

桥梁混凝土病害由荷载与环境侵蚀共同作用导致, 且随着时间的推移病害还将逐渐发展, 严重影响服役寿命, 造成安全隐患。基于可见光成像结合深度学习人工智能技术可较好地对桥梁混凝土病害进行分类和识别, 但由于仅有病害灰度及区域边缘信息, 具有局限性, 利用高光谱成像具有更高维度信息可有效表征物质属性, 后续将结合无人机机载高光谱成像、增加病害类别, 能广泛应用于基于视觉的桥梁结构表面病害识别。另一方面, 桥梁混凝土关键破坏性病害具有稀疏、缺失、长尾的特点, 难以形成数据量大、鲁棒性好的结构病害数据集, 将使人工标记、训练工作量巨大。基于高光谱成像图像谱线的唯一性特征, 可大量减少数据标记和样本数量。结合空间-谱线三维特征, 可进一步构建深度学习网络模型, 提高识别的自动化、智能化程度。

在未来的研究工作中, 将高光谱相机与无人机进行集成, 形成无人机机载高光谱成像系统对全桥

进行扫描成像, 自动调整曝光时间、测量物距和飞行速度, 实现快速、稳定成像。

参考文献:

- [1] 李昌铸, 张劲泉, 夏晓霞, 等. 公路桥梁技术状况评定标准: JTGT H21-2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
LI Changzhu, ZHANG Jinquan, XIA Xiaoxia, et al. Evaluation Standard for Technical Condition of Highway Bridges: JTGT H21-2011[S]. Beijing: People's Transportation Press, 2011.
- [2] 张海明. 土木工程结构中远距离非接触式表面缺陷及裂缝检测系统研究[D]. 北京: 中冶集团建筑研究总院, 2013.
ZHANG Haiming. Research on Long-distance Non-contact Surface Defects and Crack Detection System in Civil Engineering Structures[D]. Beijing: MCC Construction Research Institute, 2013.
- [3] 吴韵哲. 桥用爬壁机器人检测高墩裂缝技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
XI Yunzhe. Research on the Technology of Detecting Cracks in High Piers by Wall-climbing Robot for Bridges[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [4] ZHANG Cheng, YANG Zou, FENG Wang, et al. Towards fully automated unmanned aerial vehicle-enabled bridge inspection: Where are we at? [J]. Construction and Building Materials, 2022, 347: 128543.
- [5] 赵天祺, 勾红叶, 陈萱颖, 等. 桥梁信息化及智能桥梁 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43: 268-279.
ZHAO Tianqi, GOU Hongye, CHEN Xuanying, et al. Research progress of bridge informatization and intelligent bridge in 2020[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering (Chinese and English) 2021, 43: 268-279.
- [6] 钟新谷, 彭雄, 沈明燕. 基于无人飞机成像的桥梁裂缝宽度识别可行性研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(4): 52-61.
ZHONG Xingu, PENG Xiong, SHEN Mingyan, et al. Feasibility study on bridge crack width identification based on unmanned aerial vehicle imaging[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(4): 52-61.
- [7] DING W, YANG H, YU K, SHEN Mingyan, . Crack detection and quantification for concrete structures using UAV and transformer[J]. Automation in Construction, 2023, 152: 04929.
- [8] 刘宇飞, 樊健生, 聂建国, 等. 结构表面裂缝数字图像法识别研究综述与前景展望[J]. 土木工程学报, 2021, 54(6): 79-98.
LIU Yufei, FAN Jiansheng, NIE Jianguo, et al. Review and prospect of digital image method recognition of structural surface cracks[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(6): 79-98.
- [9] 鲍跃全, 李惠. 人工智能时代的土木工程[J]. 土木工程学报, 2019, 52(5): 1-11.
BAO Yuequan, LI Hui. Civil engineering in the era of artificial intelligence[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 1-11.
- [10] 邓露, 褚鸿鹄, 龙丽芝, 等. 基于深度学习的土木基础设施裂缝检测综述[J]. 中国公路学报, 2023, 36(2): 1-21.
DENG Lu, CHU Honghu, LONG Lizhi, et al. Review of crack detection in civil infrastructure based on deep learning[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(2): 1-21.
- [11] 勾红叶, 杨彪, 华辉, 等. 桥梁信息化及智能桥梁 2019 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 14-27.

- GOU Hongye, YANG Biao, HUA Hui, et al. Research progress of bridge informatization and intelligent bridge in 2019[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, **42**(5): 14-27.
- [12] 王保宪, 白少雄, 赵维刚. 基于特征增强学习的路面裂缝病害视觉检测方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, **19**(7): 1927-1935.
- WANG Baoxian, BAI Shaoxiong, ZHAO Weigang. Visual detection method of pavement crack disease based on feature enhancement learning[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, **19**(7): 1927-1935.
- [13] 薛庆生, 李畅, 李婷婷, 等. 基于LVF的高光谱成像仪研制及应用[J]. 光子学报, 2021, **50**(9): 203-214.
- XUE Qingsheng, LI Chang, LI Tingting, et al. Development and application of LVF-based hyperspectral imager[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, **50**(9): 203-214.
- [14] 王冰冰, 喻文勇, 龙小祥, 等. 高分辨率卫星地面处理系统研制[J]. 遥感学报, 2021, **25**(9): 1946-1963.
- WANG Bingbing, YU Wenyong, LONG Xiaoxiang, et al. Development of high-resolution satellite ground processing system[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021, **25**(9): 1946-1963.
- [15] 肖臣稷, 王卿, 王敏, 等. 基于高分五号卫星遥感数据的长江河口叶绿素a浓度反演[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2022, **48**(4): 92-99.
- XIAO Chenji, WANG Qing, WANG Min, et al. Inversion of chlorophyll a concentration in the estuary of the Yangtze River based on remote sensing data of Gaofen-5 satellite[J]. *Journal of Donghua University (Natural Science Edition)*, 2022, **48**(4): 92-99.
- [16] 李笑芳, 王延仓, 顾晓鹤, 等. 基于高光谱技术建筑反射隔热涂料厚度检测技术的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, **40**(8): 2552-2557.
- LI Xiaofang, WANG Yancang, GU Xiaohe, et al. Research on thickness detection technology of building reflective thermal insulation coating based on hyperspectral technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, **40**(8): 2552-2557.
- [17] Bonifazi G, Palmieri R, Serranti S. Evaluation of attached mortar on recycled concrete aggregates by hyperspectral imaging[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, **169**: 835-842.
- [18] Bonifazi G, Capobianco G, Serranti S. Hyperspectral imaging and hierarchical PLS-DA applied to asbestos recognition in construction and demolition waste[J]. *Applied Sciences*, 2019, **9**(21): 4587.
- [19] Serranti S, Gargiulo A, Bonifazi G. Classification of polyolefins from building and construction waste using NIR hyperspectral imaging system[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, **61**: 52-58.
- [20] 邵慧, 撒贝宁, 李伟, 等. 一种适用于古建筑建模的全波形高光谱激光雷达设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2022, **51**(8): 197-206.
- SHAO Hui, SA Beining, LI Wei, et al. Design and implementation of a full-waveform hyperspectral LiDAR for modeling of ancient buildings[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, **51**(8): 197-206.
- [21] 严阳, 华文深, 张炎, 等. 可见-近红外高光谱伪装目标特分析[J]. 红外技术, 2019, **41**(2): 171-175.
- YAN Yang, HUA Wenshen, ZHANG Yan, et al. Special analysis of vision-near-infrared hyperspectral camouflage target[J]. *Infrared Technology*, 2019, **41**(2): 171-175.
- [22] 熊显名, 张乾坤, 秦祖军. 基于可见-近红外光谱的路面状况识别的研究[J]. 红外技术, 2021, **43**(2): 131-137.
- XIONG Xianming, ZHANG Qiankun, QIN Zujun. Research on road condition recognition based on vision-near-infrared spectroscopy[J]. *Infrared Technology*, 2021, **43**(2): 131-137.
- [23] 田英慧, 金伟其, 赵志勇, 等. 基于反射光谱和图像的雪地伪装材料紫外检测技术研究[J]. 红外技术, 2017, **39**(5): 469-474.
- TIAN Yinghui, JIN Weiqi, ZHAO Zhiyong, et al. Research on ultraviolet detection technology of snow camouflage materials based on reflection spectra and images[J]. *Infrared Technology*, 2017, **39**(5): 469-474.
- [24] 张海馨, 张正龙, 李晓奇, 等. 基于尾焰光谱分布特性分析的高速目标识别系统[J]. 红外技术, 2017, **39**(7): 599-604.
- ZHANG Haixin, ZHANG Zhenglong, LI Xiaoqi, et al. High-speed target recognition system based on analysis of tail flame spectral distribution characteristics[J]. *Infrared Technology*, 2017, **39**(7): 599-604.
- [25] 程俊毅, 张显峰, 孙权, 等. 沥青路面老化状况遥感监测与评估模型建立及应用[J]. 遥感技术与应用, 2018, **33**(5): 956-964.
- CHENG Junyi, ZHANG Xianfeng, SUN Quan, et al. Establishment and application of remote sensing monitoring and evaluation model for asphalt pavement aging condition[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, **33**(5): 956-964.
- [26] Ichi E, Dorafshan S. Spectral characterization of fouled railroad ballast using hyperspectral imaging[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, **394**: 132076.
- [27] Kim B, Cho S. Efflorescence assessment using hyperspectral imaging for concrete structures[J]. *Smart Structures and Systems, An International Journal*, 2018, **22**(2): 209-221.
- [28] Huynh C P, Mustapha S, Runcie P, et al. Multi-class support vector machines for paint condition assessment on the Sydney Harbour Bridge using hyperspectral imaging[J]. *Struct. Monit. Maint.*, 2015, **2**(3): 181-197.
- [29] 彭雄, 钟新谷, 赵超, 等. 基于无人机热成像的建筑饰面层脱粘缺陷识别[J]. 红外技术, 2022, **44**(2): 189-197.
- PENG Xiong, ZHONG Xingu, ZHAO Chao, et al. Desticking defect identification of building finishing layer based on UAV thermal imaging [J]. *Infrared Technology*, 2022, **44**(2): 189-197.
- [30] MENG Y, YUAN W, Aktilek E U, et al. Fine hyperspectral classification of rice varieties based on self-attention mechanism[J]. *Ecological Informatics*, 2023, **75**: 102035.
- [31] Schafer R W. What is a Savitzky-Golay filter[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2011, **28**(4): 111-117.
- [32] Fearn T, Riccioli C, Garrido-Varo A, et al. On the geometry of SNV and MSC[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2009, **96**(1): 22-26.
- [33] Abulaiti Y, Sawut M, Maimaitiali B, et al. A possible fractional order derivative and optimized spectral indices for assessing total nitrogen content in cotton[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, **171**: 105275.
- [34] FENG S, Itoh Y, Parente M, et al. Hyperspectral band selection from statistical wavelet models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, **55**(4): 2111-2123.
- [35] LI H, LIANG Y, XU Q, et al. Key wavelengths screening using competitive adaptive reweighted sampling method for multivariate calibration[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2009, **648**(1): 77-84.