

某高层建筑幕墙玻璃面板的多源感知与特征提取初探

Investigation on Multi-Source Perception and Feature Extraction Method of Curtain Wall Glass Panels at a High-Rise Building

刘长儒¹, 卢文胜¹, 李志宇¹, 王诗腾², 李恒鑫², 黄杰²

(1. 同济大学结构防灾减灾工程系, 上海 200092; 2. 同济大学软件学院, 上海 200092)

LIU Chang-ru¹, LU Wen-sheng¹, LI Zhi-yu¹, WANG Shi-teng², LI Heng-xin², HUANG Jie²

(1. Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

【摘要】近年来,高层建筑玻璃幕墙面板因自爆、脱落等引发的安全事故在我国频频发生,其主要原因是幕墙面板的性能特征不清晰。论文提出了玻璃幕墙面板的多源感知与特征值提取方法,结合实际工程案例,通过设计施工资料、振动测试、图像识别3种多源感知方法获取玻璃幕墙特征信息,并从中提取出典型特征值。

【Abstract】 In recent years, safety accidents caused by self-explosion and detachment of glass curtain wall panels at high-rise buildings, with its ambiguity features, have occurred frequently in China. A multi-source perception method and feature values extraction for glass curtain wall panels are proposed in this paper. Combining with practical engineering cases, three multi-source perception methods, namely design and construction materials, vibration testing, and image identification, are used to obtain the feature information of glass curtain walls.

【关键词】 玻璃幕墙面板; 多源感知; 图像识别; 特征提取; 高层建筑

【Keywords】 glass curtain wall panels; multi-source perception; image identification; feature extraction; feature extraction; high-rise buildings

【中图分类号】 TU382; TU317

【文献标志码】 A

【文章编号】 1007-9467(2024)04-0011-07

【DOI】 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2024.04.003

1 引言

我国建筑幕墙工业起步于20世纪80年代,在90年代取得了高速发展,至21世纪初我国就成为幕墙生产大国和建设大国,幕墙的生产量和保有量位居世界第一^[1]。建筑幕墙面板一般包含玻璃、石材、金属、和人造板材等多种材料类型^[2]。其中玻璃幕墙由于其质量轻、透光性好、外形美观等特点,在高层建筑和公共建筑中大量使用。然而,近年来因既有玻璃幕墙自爆、脱落等引发的安全事故在我国频频发生,明显多于国外发达国家同类事故^[3]。

现有玻璃幕墙面板的检测方法主要包括振动分析法、接触式检测法以及图像处理法。Lin等^[4]利用激光深度加热的方法研发了一种基于热波响应分析的幕墙胶损伤检测技术,并通过理论模型和试验给出了一种既能达到充分加热效果也

能防止幕墙过热损伤的激光加热技术指导方法。郑恒等^[5]基于频响函数理论,提出了一种以驱动点加速度频响函数的相对累计偏差RAE作为指标的快速检测方法,该方法仅需在玻璃面板上安装一个加速度传感器,随后在紧邻传感器区域用力锤敲击面板,即可快速检测玻璃幕墙粘结结构的损伤程度。Choi等^[6]开发了一种利用从无人机收集图像对建筑幕墙进行视觉检查的方法,并采用Structure-from-Motion(SfM)算法建立三维模型以实现损伤的快速定位。然而,幕墙系统相关设计信息、制造安装工艺和运维保养技术等常常呈现数据离散、片段和静态化的特点;也缺乏高效能、低功耗和可持续的特征感知手段和数据融合方法,导致幕墙系统的功能与安全特征模糊不清,因此,有必要开展针对性研究探索。

本文提出了玻璃幕墙面板的多源感知与特征值提取方法,结合实际工程案例,通过设计施工信息感知、振动测试分析

感知、图像识别融合感知 3 种多源感知方法获取玻璃幕墙特征信息，并从中提取出特征值，以表征玻璃幕墙安全性能状态，为后续的评估决策提供方向。

2 多源感知与特征参数选取方法

2.1 多源感知方法

多源感知是指通过多种不同的途径获取与玻璃幕墙性能状态有关的数据。采用多源感知方法，可通过数据融合分析，在时间和空间上不断积累数据且迭代更新形成更准确、更全面的评价结果；可将玻璃幕墙多源感知方法划分为设计施工信息感知、振动测试分析感知、图像识别融合感知 3 类。

2.1.1 设计施工信息感知

设计施工信息感知主要是通过对玻璃幕墙的设计资料进行收集，整合玻璃幕墙设计施工阶段的重要信息，包括玻璃幕墙结构设计图纸、重要节点的初始信息。同时，还包括在施工阶段对部分幕墙进行力学试验，获取玻璃幕墙面板或者连接件的力学参数。该感知来源获取的信息是性能评估的基础，也可以通过与后续人工维修检测结果的对比得到相应特征值的变化量。

2.1.2 振动测试分析感知

振动测试分析感知主要是在实际幕墙工程的有效位置处安置加速度传感器、位移传感器等感应装置，收集实际幕墙在环境、地震等作用下的反应数据，通过对数据进行分析处理最终可得到幕墙面板自振频率等特征值。

2.1.3 图像识别融合感知

图像识别融合感知主要是对实际幕墙工程的图像信息进行现场采集，采集的工具通常包括无人机、高清相机、手机、红外热成像仪等。对于外观图像，可以通过图像处理的方式，提取更加精确的特征值描述玻璃幕墙的外观特征，实现对玻璃幕墙外观、结构和材质等方面感知。

2.2 特征参数选取

玻璃幕墙面板的状态受面板材质、结构胶质量、初始缺陷、自振频率等参数影响，因参数较多且多数参数的特征值随时间的改变而发生变化，故将特征参数分为 3 个特征维度构造 D_1 、造型 D_2 、力学 D_3 ，结合相关规范标准条文及工程经验^[7-9]，提出玻璃面板特征参数如表 1 所示。

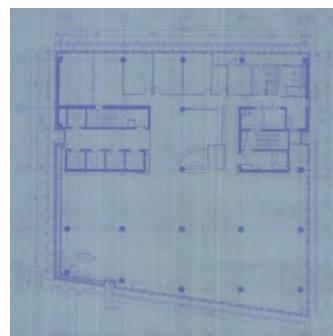
通过不同的多源感知方式可以获得不同维度特征参数的特征值如表 1 所示，其中部分特征参数可以通过不同的感知

方式分别获取特征值，如玻璃面板的第一自振频率可以通过设计施工信息感知和振动测试分析感知分别获取，将获得的两组或多组特征值进行比对，即可在一定程度上反映玻璃幕墙面板的安全状态。同时由于信息获取难度及特征自身特性原因，部分特征参数只能由单种感知方式获得，如玻璃自爆、结构胶表面色泽度等特征值更倾向于使用图像识别融合感知的方式获取。

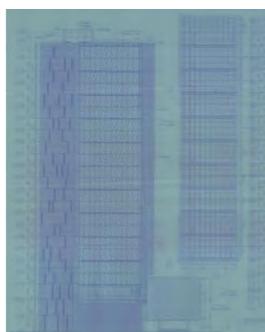
3 某高层建筑幕案例分析

3.1 设计施工信息感知

选取某实际工程，查阅该工程外墙装饰工程送审图纸可知该工程包含单元式幕墙、点玻式双层玻璃幕墙、干挂式石材幕墙、框架幕墙等多种形式，本文主要针对该建筑双层玻璃幕墙进行分析。包含双层玻璃幕墙的典型平面幕墙分格、典型立面幕墙分格及典型立面实景图见图 1。



a 典型平面幕墙分格



b 典型立面幕墙分格



b 典型立面实景图

图 1 双层玻璃幕墙示意图

表 1 玻璃幕墙面板特征参数与多源感知方法

维度		特征参数	设计施工信息	振动测试分析	图像识别融合
玻璃 幕墙 面板	构造 (D_1)	构件材料类型、幕墙构造类型	√		√
	造型 (D_2)	色泽、色斑、尺寸、面板规则度	√		√
	力学 (D_3)	刚度、弹性模量、泊松比、位移、应力、振型、频率、阻尼	√	√	

查阅外墙装饰工程施工总说明可得到构造 D_1 维度的特征参数幕墙构件材料如表 2 所示。

表 2 玻璃幕墙构件材料表

构件名称	材料名称
玻璃面板	10 mm+1.52 mm PVB+10 mm 双层夹胶彩釉玻璃
转接件	Q235B 钢材
螺栓	奥氏体不锈钢 A2-70
密封胶条及胶垫	黑色高密度三元乙丙橡胶 (EPDM) 制品
型材	6063-T5、表面氟碳喷涂

查阅玻璃幕墙大样图得到造型 D_2 维度的特征参数玻璃面板尺寸，部分玻璃面板尺寸如表 3 所示。

表 3 部分玻璃面板尺寸表

面板编号	宽度	高度	厚度	mm
1	1750	4090	21.52	
2	1825	4090	21.52	
3	1750	3770	21.52	
4	1475	3770	21.52	

通过已得到的特征参数的特征值可用计算公式计算力学 D_3 的特征参数玻璃幕墙面板的一阶自振频率，幕墙面板一阶自振频率的计算公式^[10]见式(1)和式(2)：

$$f_{\text{Theory}} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{b^2} + \frac{1}{h^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\rho d}} \quad (1)$$

$$D = \frac{Ed^2}{12(1 - \mu^2)} \quad (2)$$

式中， f_{Theory} 为一阶自振频率计算值； b 为玻璃幕墙面板的宽度； h 为玻璃幕墙面板的高度； D 为玻璃幕墙面板的抗弯刚度； ρ 为玻璃幕墙面板的重度，取 25.6 kN/m^3 ； d 为玻璃幕墙面板的厚度； E 为玻璃幕墙面板的弹性模量； μ 为玻璃幕墙面板的泊松比，取 0.2。

代入幕墙面板 1、2 的参数，可得自振频率计算值，均如表 4 所示。

表 4 玻璃幕墙面板一阶自振频率计算值

面板 编号	计算参数				自振频率计 算值 /Hz
	h/m	b/m	d/m	$E/(N/m^2)$	
1	4.09	1.77	0.02152	7.2×10^{10}	6.45
2		1.825			6.01

3.2 振动测试分析感知

在该建筑的 22 层选取两块幕墙的玻璃面板作为振动数据长期监测对象，上述面板编号 1、2 的面板尺寸即为监测面板 1、2 的实际尺寸。每块面板各布置 3 个三向加速度传感器，分别位于面板中心、面板角部以及支撑钢框中部，如图 2a、图 2b 所示。以传感器 3326F78D 为示例的传感器详图如图 2c 所示，传感器 X 轴为面板平面内水平方向，Y 轴为面板平面内竖直方向，Z 轴为面板平面外方向。



a 面板 1 测点布置 b 面板 2 测点布置



c 传感器 3326F78D 详图

图 2 振动监测传感器布置示意图

幕墙玻璃面板的一阶振型为平面外振动，因此，对两块面板中心的传感器（编号 350E6EFF、3326F78D）记录的 Z 向加速度数据进行分析，以得到幕墙的自振频率。选取自 2023 年 1 月 15 日起的振动数据，每间隔半月取下一次数据，具体参见表 5。

取表 5 中各个日期的 12:00 ~ 12:10 以及 23:00 ~ 23:10 的数据进行分析，其中 2023 年 1 月 31 日，幕墙面板 1 的 Z 向加速度时程图如图 3 所示。

采用 MATLAB 软件的快速傅里叶变换 (FFT) 算法对上述加速度数据进行处理，可得振动数据表对应的幅频曲线，其中 2023 年 1 月 31 日幕墙面板 1 的幅频图如图 4 所示。

表 5 自振频率计算分析表

日期	2023 年							
	1 月 15 日	1 月 31 日	2 月 15 日	2 月 28 日	3 月 15 日	3 月 31 日	4 月 15 日	4 月 30 日
面板 1 自振频率	6.772	6.57	6.617	6.568	6.452	6.582	6.317	6.297
面板 2 自振频率	6.605	6.645	6.668	6.730	6.580	6.592	6.340	6.533

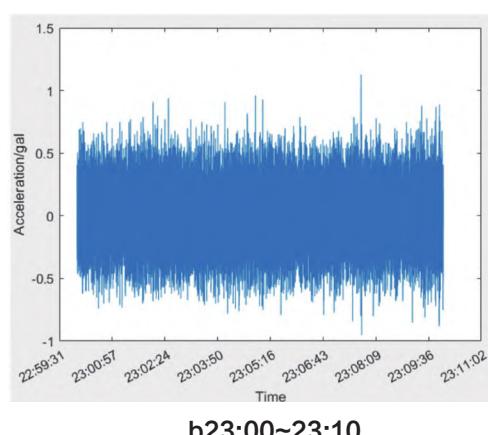
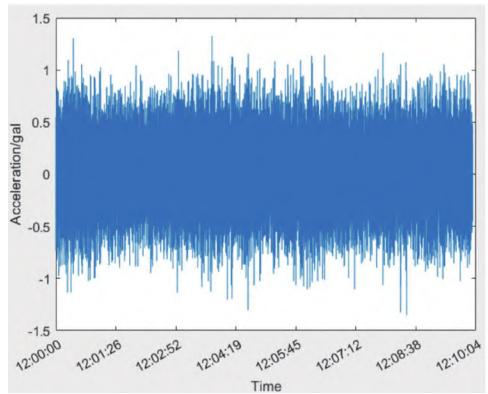


图 3 2023 年 1 月 31 日幕墙面板 1 的 Z 向加速度时程图

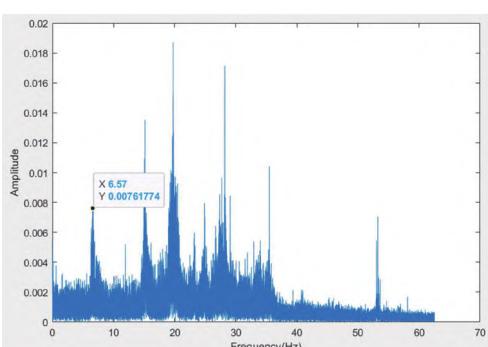
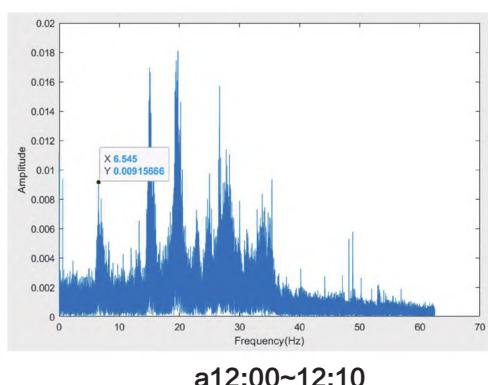


图 4 2023 年 1 月 31 日幕墙面板 1 的幅频图

根据幅频曲线的峰值分布，可确定所有振动数据段对应的玻璃幕墙面板一阶自振频率。

因此可知幕墙面板 1 的自振频率在 $6.297 \sim 6.772$ Hz 范围内波动，幕墙面板 2 的自振频率在 $6.34 \sim 6.73$ Hz 范围内波动。

3.3 图像识别融合感知

3.3.1 玻璃幕墙面板尺寸提取

采取玻璃幕墙区域检测 + 玻璃幕墙语义分割的两阶段方式进行图像分割。其中，采取 YOLOv8-obb 模型获得玻璃幕墙旋转检测框，采取 SAM 图像分割大模型^[11]，将前一阶段旋转检测框作为 prompt 输入 SAM 大模型，从而获得玻璃幕墙块的语义分割结果。两模型的结构关系如图 5 所示。

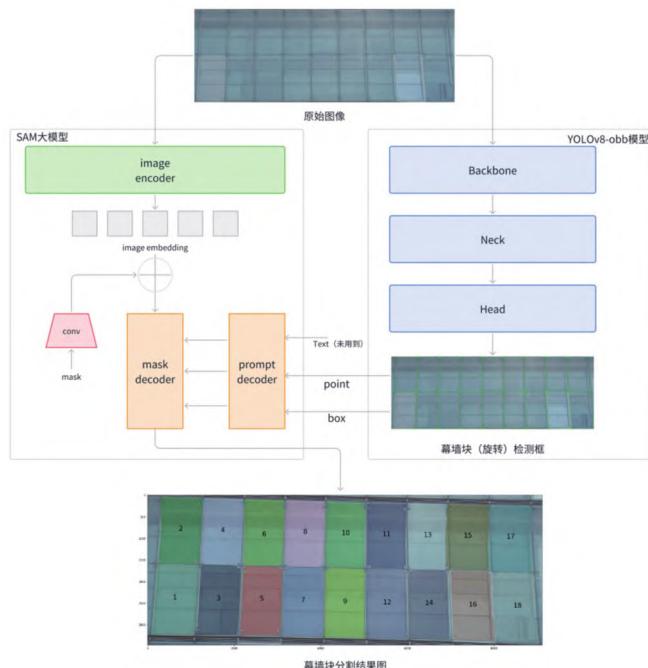


图 5 YOLOv8+SAM 大模型的应用结构

根据幕墙块的分割结果，可得到若干单张玻璃幕墙块的图像，测量其高度和宽度像素值可得到幕墙面板的尺寸参数如表 6 所示，这里列举第二排第 3、4、5、6、7 列共 5 块幕墙面板，上述面板编号 3 的尺寸即为此 5 块玻璃幕墙面板的实际尺寸。

表 6 玻璃幕墙面板尺寸提取

幕墙面板编号	高度 / 像素	宽度 / 像素
2 排 3 列	2047	987
2 排 4 列	2039	966
2 排 5 列	2021	956
2 排 6 列	2057	976
2 排 7 列	2053	955

3.3.2 玻璃幕墙面板亮度提取

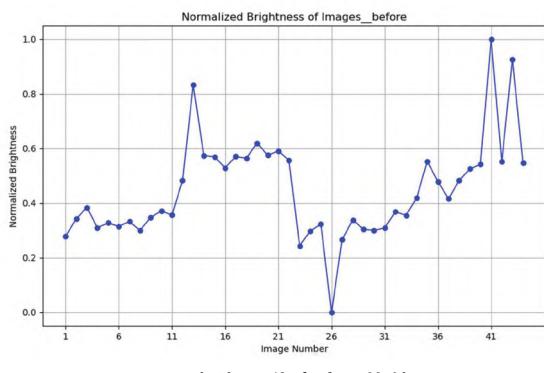
因发生自爆的玻璃面板以及材料特性不同的玻璃面板在图像中的颜色明显区别于其他玻璃面板，故用HSV颜色空间^[12]来表示上述分割得到的单个玻璃面板图片以提取其亮度。其中， V 表示像素的亮度，它与 H （色调）， S （饱和度）相互独立，因而可以更好地度量像素的明暗程度。

首先计算不同幕墙块的平均 V 值，并对同一张照片内的所有幕墙块进行归一化，以减弱光照等因素的影响，归一化方法为 $\text{Normalized Value} = \frac{\text{Value} - \text{Min Value}}{\text{Max Value} - \text{Min Value}}$ 。选取在2022年

12月14日及2023年4月4日在相同位置处所拍摄的两张照片，提取其色泽度并绘制折线图如图6和图7所示。



a 实景照片



b 面板归一化亮度平均值

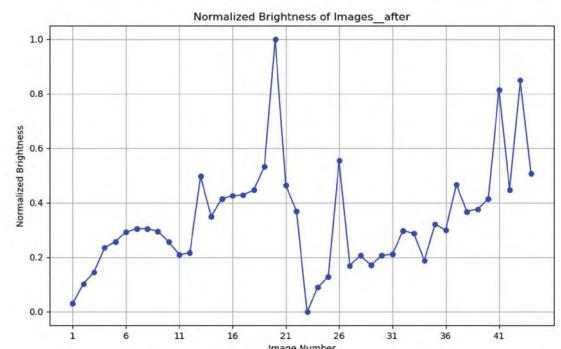
图6 2022年12月14日面板亮度提取

面板编号方式为以左上角的幕墙面板为1号，从左至右，从上至下依次编号。在2022年12月14日，标号为13、41、43的幕墙面板为已更换的幕墙面板，因更换的幕墙面板透光度等材料特性与原幕墙面板不同，故所提取的亮度值明显高于其他幕墙面板，26号面板已发生自爆，所提取的亮度值明显低于其他幕墙面板；在2023年4月4日，标号为20、26、41、43号幕墙面板已被更换，由计算结果可知13、20、26、41、43号幕墙面板均为峰值，其中20、41、43号显著高于其他幕墙面板。

13号幕墙面板在两次的特征值中，峰值坡度较小，分析



a 实景照片



b 面板归一化亮度平均值

图7 2023年4月4日面板亮度提取

其原因为在不同的更换批次中，更换的幕墙面板的部分材料特性区别于原面板的同时也区别于其他批次更换的幕墙面板。

综上，以归一化幕墙面板亮度平均值为特征值，可以在一张图片中通过寻找特征值异常的面板定位发生问题的面板，一般亮度过低为面板发生自爆，亮度过高为面板材料特性不同，可能发生过更换。

3.3.3 结构胶色泽度提取

因结构胶的颜色较为单一，故采用灰度值或RGB值来表征其色泽度；考虑到结构胶可能存在损伤，损伤部位颜色可能较深，故不能直接用图像平均像素值来表征其色泽。

如图8所示，经简单图像分割之后得到的结构胶图像内，像素点可以分为3类：背景、无损伤结构胶和概率有损伤结构胶。其中背景为纯黑色，其灰度值为0；无损伤结构胶的灰度值较为单一，颜色较浅；概率有损伤结构胶的灰度值普遍颜色更深，但是分布并不均匀。

采取kmeans聚类的方式^[13]，将结构胶图像的像素点分为以上3类，定义结构胶的色泽特征值为“无损伤结构胶”像素点集合的聚类中心的灰度（或RGB）值，在无监督聚类时，为充分学习到不同类像素点的特征区别，采用RGB三通道像素值作为聚类依据。伪代码如下：

Plain Text

```
image = imread(image_path, mode = RGB) # 读入图片
```



图8 结构胶示意图



图 9 聚类效果图

表 7 单个结构胶缝特征值提取

特征参数	平均长度	平均宽度	概率损伤区域面积	非损伤区域	非损伤区域
	/ 像素	/ 像素	(像素点个数)	聚类中心灰度值	聚类中心 RGB 值
特征值	1425.14	14.26	1193	119.05	[112.20 122.01 122.94]

```
kmeans = KMeans(n_clusters=3)      # 聚类器
kmeans.fit(image)      # 聚类器无监督拟合
centers = kmeans.cluster_centers_.gray_value      # 获取
聚类中心的灰度值
print(centers.middle_value)      # 获取第二类（即无损伤
结构胶，灰度值大小第二）聚类中心灰度值
```

获得的聚类结果如图 9 所示，黑色代表背景，蓝色代表无损伤结构胶，红色代表概率损伤结构胶。

最终统计得该结构胶缝图像的若干特征参数和灰度特征值如表 7 所示。

以 20 个像素点为一个区间，统计沿结构胶长轴统计区间内损伤部位的像素点个数，绘制了概率损伤部位的像素密度折线图如图 10 所示。折线图显著凸起的部位，即使结构胶大概率发生损伤的部位，在进一步的检测及分析中应重点关注。

以此方法统计结构胶图像，根据特征值可较好区分不同结构胶的色泽差异（注：样本结构胶图像可能不是截取自幕墙块周围的完整结构胶），参见表 8。

事实上，编号为 1、3 结构胶样本均为旧的幕墙块周围的结构胶，而 2、4 结构胶样本为新更换的幕墙面板周围的结构胶，从表 8 中可以看出，新样本的概率损伤区域极少，且颜色较浅，通过聚类中心灰度值或 RGB 值可将新旧两类样本区分开来。

综上，通过提取结构胶非损伤区域聚类中心灰度值，可表征结构胶缝整体色泽状态，并可据此区分新旧结构胶缝，通过提取概率损伤区域面积并绘制像素密度折线图可找到构胶大概率发生损伤的部位在进一步的检测及分析中

应重点关注。

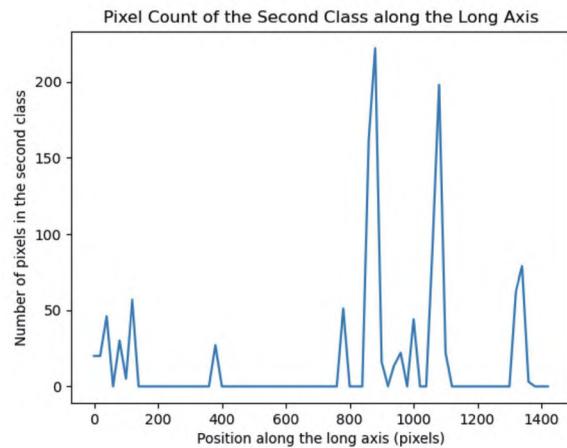


图 10 概率损伤部位像素密度折线图

3.4 多源感知特征分析

通过施工感知、振动测试分析感知、图像识别融合感知 3 种感知方法可以得到玻璃幕墙面板若干特征参数的特征值，其中部分特征参数可通过不同的多源感知方式分别获得，具体如表 9 所示。

对于尺寸长宽比，图像识别融合感知特征值为多个面板及结构胶缝取均值计算，其中玻璃面板长宽比特征值相差 1.1%，吻合度较好，证明通过图像感知玻璃面板尺寸信息具有可行性。结构胶缝长宽比特征值相差 24.9%，吻合度较差，其原因一方面是结构胶宽度值较小，通过图像提取具有一定

表 8 结构胶缝特征值提取

结构胶 样本编号	平均长度 / 像素	平均宽度 / 像素	概率损伤区域面积 (像素点个数)	非损伤区域 聚类中心灰度值	非损伤区域 聚类中心 RGB 值	局部截图
1	1425.14	14.26	1193	119.05	[112.20 122.01 122.94]	
2	1026.53	9.24	0	202.89	[199.70 203.75 205.20]	
3	1000.48	9.06	385	112.09	[103.91 114.60 117.75]	
4	1652.66	11.15	11	207.63	[202.81 208.30 211.78]	

表 9 玻璃幕墙面板部分特征值提取

玻璃 幕墙 面板	维度	特征参数	构件名称	设计施工信息感知	振动测试分析感知	图像识别融合感知
	造型 (D_2)	尺寸长宽比	面板 3	2.15		2.11
			结构胶缝	145.83		116.79
	力学 (D_3)	面板一阶自振频率 /Hz	面板 1	6.45	6.297 ~ 6.772	
			面板 2	6.01	6.34 ~ 6.73	

的误差，两一方面胶缝宽度受实际施工工艺影响较大。

对于面板一阶特征频率，面板 1 的计算值与实际观测值相吻合，面板 2 的计算值比实际观测值略小，分析原因为玻璃幕墙面板的实际边界条件与确定计算公式的玻璃面板的边界条件有所不同，导致计算公式所得结果具有一定的误差。两块玻璃幕墙的频率特征值稳定，在一定程度上表明该幕墙板块处于正常工作状态。

4 结语

本文提出了玻璃幕墙面板的多源感知与特征值提取方法，并结合实际工程案例进行分析验证，得到以下结论。

1) 玻璃幕墙面板的特征参数可划分至 3 个维度构造 D_1 、造型 D_2 、力学 D_3 ，通过不同的多源感知方式可以获得不同维度的特征参数值。

2) 结合实际案例分析可知不同的多源感知方式既有区别又有联系，部分提取的特征参数值之间可以相互验证，同时通过提取的特征值可对玻璃幕墙面板安全功能状态做出初步判断。

3) 提取的特征值可作为玻璃幕墙面板的风险评估以及韧性分析的数据基础，通过持续感知可在时间和空间上不断积累数据以获得更准确、更全面的评价结果。

参考文献

- [1] 简洪树, 金楠, 伍永靖邦, 等. 既有玻璃幕墙检测技术的研究进展 [J]. 工业建筑, 2022, 52(10):9~15.
- [2] 黄宝锋, 卢文胜, 曹文清. 既有建筑幕墙的安全评价方法初探 [J]. 结构工程师, 2006(3):76~79.
- [3] 朱瑞娟, 陈媛媛, 刘继武, 等. 既有玻璃幕墙安全性能检测技术发展现状 [J]. 中国建材科技, 2018, 27(3):1~3.
- [4] LIN J, HONG X, REN Z. Laser in-depth heating thermal wave detection of adhesive debonding in glass curtain walls: Numerical simulation and experiment [J]. Measurement, 2021, 177:109268.
- [5] 郑恒, 张喜臣, 王洪涛, 等. 基于原点频响函数的建筑玻璃幕墙粘接结构损伤检测 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(13):289~298.

- [6] CHOI J, YEUM C M, DYKE S J, et al. Computer-aided approach for rapid post-event visual evaluation of a building façade [J]. Sensors, 2018, 18(9): 3017.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国标准化管理委员会. 建筑幕墙: GB/T 21086—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国标准化管理委员会. 建筑幕墙术语: GB/T 34327—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑门窗幕墙用钢化玻璃: JG/T 455—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 玻璃幕墙面板牢固度检测方法: GB/T 39525—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [11] KIRILLOV A, MINTUN E, RAVI N, et al. Segment anything [J]. arXiv preprint arXiv, 2023:2304.02643.
- [12] FOLEY J D, VAN Dam A. Fundamentals of interactive computer graphics[M]. California: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1982.
- [13] MACQUEEN J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations[C]//Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability, 1967, 1(14): 281~297.

作者简介

刘长儒 (2000 ~)，男，山东济南人，硕士在读，从事玻璃幕墙研究。

基金项目

国家重点研发计划 (2022YFC3002303); 同济大学高峰学科重点项目 (2022-3-ZD-06)