

遥感技术在城市房屋建筑安全监测的应用

杨 阳*, 谭 磊, 单秉强, 杨晓辉, 张 硕, 柳 飞

北京市市政工程研究院 北京

【摘要】城市房屋建筑数量庞大、服役年限差异显著,且长期受到软土固结、地下水开采、地铁与基坑施工、极端气候、地震灾害和不规范改造等因素影响。传统房屋安全监测主要依赖人工巡查、沉降观测、裂缝计、倾角计和局部无损检测,具有精度高、结论直接等优点,但在城市尺度上存在成本高、覆盖范围有限、历史追溯能力弱和应急响应慢等不足。遥感技术以非接触、广覆盖、周期性和可追溯为特点,正在成为城市房屋建筑安全监测的重要补充。本文系统梳理遥感技术的发展、原理、优缺点及其在城市房屋建筑安全监测中的应用,结合国内外典型案例讨论沉降、倾斜、裂缝与灾后倒塌识别等应用场景,并提出“卫星 InSAR(干涉合成孔径雷达)广域筛查、光学/无人机快速识别、激光雷达三维精查、现场检测最终判定”的分级技术路线。最后指出现有研究在结构安全判据、跨尺度数据融合、模型泛化、标准化验证和工程闭环应用方面仍存在不足,未来应面向城市房屋安全治理构建多源融合、可解释、可验证、可持续运行的遥感监测体系。

【关键词】城市房屋安全;遥感监测;光学遥感;激光雷达;InSAR

【基金项目】北京市财政专项科技研发项目“TomoSAR 增强的天地协同 InSAR 房屋风险评估技术研究”(YCZ202602A001)

【收稿日期】2026 年 3 月 15 日 **【出刊日期】**2026 年 4 月 19 日 **【DOI】**10.12208/j.aes.20260009

Application of remote sensing technology in urban building safety monitoring

Yang Yang*, Lei Tan, Bingqiang Shan, Xiaohui Yang, Shuo Zhang, Fei Liu

Beijing Municipal Engineering Research Institute, Beijing

【Abstract】 The number of urban housing buildings is huge, with significant differences in service life, and they are long-term affected by factors such as soft soil consolidation, groundwater extraction, subway and foundation pit construction, extreme weather, earthquake disasters, and non-standard renovations. Traditional housing safety monitoring mainly relies on manual inspections, settlement observations, crack gauges, inclinometers, and local non-destructive testing, which have the advantages of high accuracy and direct conclusions. However, at the urban scale, there are shortcomings such as high cost, limited coverage, weak historical traceability ability, and slow emergency response. Remote sensing technology, characterized by non-contact, wide coverage, periodicity, and traceability, is becoming an important supplement to urban building safety monitoring. This article systematically reviews the development, principles, advantages and disadvantages of remote sensing technology and its application in urban building safety monitoring. Combining typical cases at home and abroad, it discusses application scenarios such as settlement, tilt, crack and post disaster collapse recognition, and proposes a graded technical route of “satellite InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar) wide area screening, optical/unmanned aerial vehicle rapid recognition, laser radar 3D precision inspection, and on-site detection final judgment”. Finally, it is pointed out that there are still shortcomings in current research on structural safety criteria, cross scale data fusion, model generalization, standardization verification, and engineering closed-loop applications. In the future, a multi-source fusion, interpretable, verifiable, and sustainable remote sensing monitoring system should be constructed for urban housing safety governance.

*通讯作者: 杨阳

【Keywords】Urban housing safety; Remote sensing monitoring; Optical remote sensing; LiDAR; InSAR

1 引言

城市房屋建筑安全关系到居民生命财产安全和城市运行韧性。随着城市更新和高密度开发推进,大量老旧住宅、历史建筑、高层建筑和地下空间周边建筑同时进入存量治理阶段。房屋安全风险往往具有隐蔽性和渐进性:地基沉降可在数月数年内缓慢发展,差异沉降可能进一步导致墙体裂缝、结构倾斜和附属构件破坏;地下工程降水、盾构掘进和基坑开挖可能诱发周边建筑不均匀变形;地震、洪水、台风和火灾等灾害则可能在短时间内造成大范围建筑损伤。传统监测方法虽然能够提供直接、可靠的局部结构信息,但难以在城市尺度上连续覆盖所有建筑,也难以回溯灾前或施工前的长期形变过程。

遥感技术为这一问题提供了新的观测维度。高分辨率光学卫星影像、航空影像和无人机影像能够直观记录建筑屋面、外立面及灾后损毁特征,已广泛应用于地震建筑损伤评估和灾害应急制图^[1,21-24]。SAR 影像具有全天时、全天候观测能力,在灾害场景和多云多雨地区具有独特优势;SAR 强度、相干性和极化信息可用于灾后建筑破坏识别,而 InSAR 时序技术可用于城市地表和建筑散射点形变监测^[2,6-17]。激光雷达与摄影测量点云则从二维影像扩展到三维几何,可服务于建筑立面变形、倾斜、构件残余变形及建筑信息模型更新^[3-4,27-33]。近年来,深度学习、点云处理、BIM/GIS(建筑信息模型/地理信息系统)和多源数据融合的发展,使遥感从“看见异常”逐步走向“解释异常”和“支撑风险分级”^[5,24-26,33]。

需要强调的是,遥感监测并不等同于结构安全鉴定。遥感能够发现形变、变化和表观病害,但结构安全等级仍需结合建筑年代、结构体系、地基条件、材料性能、荷载历史和现场检测结果综合判定。因此,本文将遥感定位为城市房屋安全治理中的“筛查、定位、追踪和辅助诊断”工具,而非替代结构工程师现场鉴定的单一手段。

2 常用遥感技术介绍

2.1 光学遥感

光学遥感主要利用可见光、近红外和多光谱影像获取地表反射信息。早期建筑安全相关应用多集中在灾后目视判读和变化检测,随着 IKONOS、QuickBird、

WorldView、GeoEye 等高分辨率商业卫星以及无人机低空摄影的发展,光学遥感逐渐能够支持单体建筑尺度的屋顶破坏、倒塌轮廓、墙体暴露、临时加建和建筑物变化识别^[1,22-24]。在算法上,方法也从人工判读、像元分类、面向对象分析发展到卷积神经网络、孪生网络和多时相语义变化检测^[5,24-26]。

光学遥感的优势在于影像直观、空间分辨率高、解释性强,适合应急部门和工程人员快速理解现场状态。对于地震、台风、火灾等灾后场景,灾前与灾后影像对比可以快速识别倒塌、屋面破坏和建筑轮廓变化;无人机倾斜摄影还能补充立面信息,用于外墙裂缝、饰面脱落和构件破坏巡检^[3,22-24,43]。其不足也很明显:光学影像受云雾、夜间、阴影和遮挡影响较大;卫星多从近垂直视角成像,难以观察街巷内立面和底层构件;轻微裂缝、内部损伤、钢筋锈蚀和地基病害通常无法直接识别。即使在灾后损伤评估中,光学遥感对倒塌和严重破坏较敏感,对中轻度损伤容易漏判或低估^[23]。

2.2 激光雷达

激光雷达(LiDAR)通过主动发射激光脉冲并记录回波时间或相位,获取高密度三维点云。按平台可分为空载激光雷达、车载/移动激光扫描、地面三维激光扫描(TLS)和无人机激光雷达。对于房屋建筑安全监测,激光雷达的核心价值在于精确描述建筑物三维形态,进而通过多期点云配准和变化检测识别倾斜、鼓胀、位移、构件残余变形以及局部缺损^[27-32]。同时,TLS 强度信息和影像纹理结合,可用于石材风化、墙面病害和历史建筑材料劣化识别^[31]。

激光雷达的优点是三维几何信息直接、精度高、适合复杂立面和构件级分析。TLS 在近距离条件下可达到毫米级至厘米级测量能力,适用于重点建筑、历史建筑、灾后危险建筑和地下施工影响区的精细复测^[29-32]。其局限在于设备和作业成本较高,遮挡、测站布设、点云配准误差和坐标基准会直接影响变形识别;同时,点云主要反映表面形态,对内部裂缝、钢筋锈蚀和材料强度衰减并不敏感。因此,激光雷达更适合作为精查工具,常与影像、热红外、BIM 和现场检测联合使用^[4,30-33]。

2.3 InSAR 技术

InSAR 通过比较两景或多景 SAR 影像的相位

差,提取地表或目标沿雷达视线方向(LOS)的位移信息。D-InSAR 是差分干涉的基础形式,通常利用两期 SAR 影像并扣除地形相位来获取地表形变。该方法在地震同震形变、火山、滑坡和快速沉降监测中具有里程碑意义^[6-9]。D-InSAR 处理相对直观,适合形变量较大、时间间隔较短、相干性较好的事件,但在城市长期缓慢变形监测中容易受到时间失相干、大气延迟、轨道误差和相位解缠误差影响^[8-10]。

PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR)通过识别长时间序列中相位稳定的永久散射体,估计其长期位移速率和时序变化。城市建筑的墙角、屋顶边缘、金属构件等常形成稳定散射点,因此 PS-InSAR 特别适合城市建成区沉降和建筑变形监测^[11,16,18-20]。PS-InSAR 的优点是可获得高精度时序结果,能够利用历史 SAR 档案追溯多年变化;缺点是对稳定散射点依赖强,在植被、水体、低矮或复杂遮挡区域点密度不足,对单栋建筑的完整解释还受 SAR 侧视几何、叠掩和阴影影响^[16,18-19]。

SBAS-InSAR (Small Baseline Subset InSAR)通过构建短时间基线和短空间基线的干涉对网络,降低失相干和地形误差影响,适合区域尺度连续形变监测^[12,17]。相比 PS-InSAR,SBAS 对分布式散射目标更友好,在软土区、填海区、山地城市和较大范围沉降监测中应用较多;但其空间分辨率和单体建筑散射点解释能力通常不如高分辨率 PS-InSAR。后续发展还包括 SqueeSAR、分布式散射体 InSAR、多轨融合、升降轨分解、时序聚类 and 机器学习异常检测等方向^[15-17,20]。

InSAR 的优势是广覆盖、周期性、可追溯和对毫米级缓慢形变敏感,尤其适合城市房屋安全中的沉降、差异沉降、施工扰动和区域风险筛查^[16-20,36-42]。其不足是观测量主要为 LOS 方向位移,单轨结果难以直接分解垂向与水平位移;SAR 几何导致叠掩、阴影和散射点定位误差;InSAR 反映的是几何位移而非结构承载能力,必须结合现场检测、地质资料和结构模型解释。

3 遥感技术在房屋建筑安全领域的应用案例

3.1 城市建筑沉降监测: PS-InSAR 与精密水准对比

Karila 等在芬兰 Turku 市开展建筑基础沉降监测,将 PS-InSAR 结果与建筑基础精密水准观测进行对比,验证了 PS-InSAR 在城市建筑沉降速率测量中

的可用性^[36]。该类研究说明,在建筑物具有足够稳定散射点、SAR 影像时序充足、参考点选择合理的条件下,PS-InSAR 可以作为传统水准测量的补充,用于发现沉降速率异常的建筑群。其工程意义在于:传统水准适合少量重点建筑的高精度复核,PS-InSAR 则适合在城市尺度上先筛出疑似异常区域,再安排现场复测。

3.2 地下施工影响区建筑风险评估: 香港、深圳与韩国案例

地下工程是城市房屋安全监测中的高风险场景。Ma 等将多时相 InSAR 与数值模型结合,用 TerraSAR-X、COSMO-SkyMed 和 Sentinel-1 监测香港九龙和深圳福田的地面沉降,并进一步利用角变形等指标评估建筑风险等级;研究中,九龙 807 栋建筑中有 10 栋、福田 145 栋建筑中有 2 栋被识别为中等风险,并通过数值反演分析地下施工与建筑荷载影响^[37]。Karunathilake 等和 Ramirez 等分别在东京密集居住区和韩国 Dangjin 盾构隧道施工区使用 Sentinel-1 PS-InSAR 监测施工诱发沉降,其中 Dangjin 案例发现局部沉降速率超过 40 mm/a,最大累积沉降约 200 mm,并与水准测量结果具有一致性^[40-41]。这些案例表明,InSAR 不仅能监测“哪里在沉降”,还可以与工程时序、降水、盾构推进和地层资料结合,解释“为什么沉降”和“哪些建筑更需要复查”。

3.3 建筑倾斜与差异沉降: 从单栋建筑到高层建筑群

建筑安全关注的不只是整体沉降,更关注差异沉降和由此导致的倾斜。Gernhardt 与 Bamler 使用米级分辨率 TerraSAR-X 数据研究单栋建筑形变,指出高分辨率 SAR 能够在建筑立面上获得密集 PS 点,为建筑尺度形变监测提供可能^[18];Gernhardt 等进一步分析建筑立面 PS 点的出现特征与定位精度,说明散射点几何解释是单体建筑监测的关键^[19]。在中国高密度城市中,Huang 等利用 Sentinel-1 影像研究广州-佛山都市区高层建筑结构健康及影响因素,将 InSAR 形变与建筑高度、地质背景和城市建设因素联系起来^[42]。这类研究说明,对于高层建筑群和软土地区,InSAR 适合发现区域性倾斜和差异沉降线索;但若判断建筑是否达到危险倾斜等级,仍需结合水准、倾角计、全站仪或激光扫描复核。

3.4 建筑倒塌风险线索: 埃及亚历山大 PS-

InSAR 案例

Mohamadi 等以埃及亚历山大为例, 融合 Sentinel-1 升降轨 PS-InSAR 结果并开展时空热点分析, 研究已倒塌建筑周边的垂向形变模式。其结果显示, 在 2015 年 5 月至 2018 年 12 月的 68 栋倒塌建筑中, 有 66 栋在倒塌前出现“新冷点”或“新热点”等时空异常模式, 并用 2019 年 1 月至 5 月的 4 栋倒塌建筑进行验证^[38]。该案例具有启发意义: InSAR 可以用于建立城市建筑倒塌风险的时空预警线索, 尤其适用于老旧建筑密集、现场巡查资源不足的城市。但也必须谨慎理解, 倒塌通常由结构缺陷、违规加建、材料劣化、火灾、地基沉降和维护缺失共同作用, InSAR 异常只能作为风险提示, 不能单独作为倒塌预测或安全判定依据。

3.5 历史建筑与重点建筑监测: 罗马 Palazzo Primoli 案例

Bonaldo 等提出将 MT-InSAR 用于建筑结构健康监测的方法, 并应用于意大利罗马 16 世纪历史建筑 Palazzo Primoli。他们使用 2011 年至 2019 年的 COSMO-SkyMed 数据, 通过 SBAS-DInSAR 获取长时间位移序列, 并结合建筑裂缝图、历史资料、温度相关分析和异常检测方法解释结构位移^[39]。该案例说明, 历史建筑和重点保护建筑往往难以布设大量接触式传感器, 而 InSAR 可提供长期、非接触和可回溯的形变信息。若与裂缝调查、结构图纸、材料检测和温度效应分离结合, 可更好地区分季节性热胀冷缩与不可逆损伤发展。

3.6 灾后建筑损伤与裂缝识别: 光学、SAR、UAV 与点云融合

灾后建筑安全评估强调快速性和覆盖范围。Corbane 等对 2010 年海地地震后高分辨率卫星与航空影像建筑损伤评估进行了系统分析^[22]; Booth 等对海地地震遥感损伤结果进行验证, 指出遥感评估容易低估重损和倒塌建筑比例, 对中轻度损伤识别尤其困难^[23]。xBD 数据集进一步提供多灾种灾前/灾卫星影像、建筑轮廓和损伤等级标注, 推动深度学习在建筑灾损识别中的发展^[24]。在更精细的裂缝与表观病害层面, UAV (无人驾驶飞行器) 影像和计算机视觉可用于混凝土裂缝、剥落和锈蚀识别, Cha 等基于 CNN (卷积神经网络) 实现裂缝损伤检测, Dong 与 Catbas、Spencer 等综述了计算机视觉在结构健康监测中从局部裂缝到整体位移测量的应用

[5,25,45]。点云方面, Vetrivel 等利用倾斜航空影像生成的三维点云与深度学习特征进行灾害损伤检测, Xiu 等进一步探索仅基于三维点云倒塌建筑识别^[33,44]。这些研究表明, 灾后场景宜采用“光学快速判读+SAR 全天候补充+UAV/TLS 重点精查+AI 辅助分级”的组合路线。

3.7 热红外与近景多源诊断: 渗漏、空鼓和材料劣化

热红外遥感虽然不是本文三类核心技术之一, 但在房屋安全维护中具有重要补充价值。Balaras 与 Argiriou 较早系统总结了红外热成像在建筑诊断中的应用, Fox 等则梳理了建筑热缺陷检测方法^[34-35]。对于房屋安全, 热红外可用于发现渗漏、潮湿、保温层缺陷、热桥、表层空鼓和材料热异常; 但其结果受太阳辐射、风速、环境温差、材料发射率和拍摄角度影响较大。Adamopoulos 与 Rinaudo 指出, 建筑遗产诊断中应将热红外、摄影测量、激光扫描和其他无损检测数据融合, 以减少单一传感器解释的不确定性^[4]。

4 结论与展望

综合现有研究, 城市房屋建筑安全监测中的遥感技术应按问题类型和管理阶段选择。第一, 若目标是城市尺度常态化筛查, 尤其是软土区、填海区、地下水开采区、地铁沿线和基坑密集区, 优先采用 Sentinel-1、TerraSAR-X、COSMO-SkyMed 等 SAR 数据开展 PS-InSAR 或 SBAS-InSAR 时序监测; 其中 PS-InSAR 适合建成区稳定散射点密集的建筑群和单体建筑线索提取, SBAS-InSAR 适合区域性沉降场和分布式散射目标监测。第二, 若目标是灾后快速评估, 优先采用高分辨率光学卫星、航空影像和无人机影像; 遇到云雨、夜间或需要快速补充信息时, 使用 SAR 强度、相干性或极化特征辅助识别。第三, 若目标是单栋重点建筑、历史建筑或危险建筑的精细诊断, 宜采用 TLS、无人机摄影测量或 UAV LiDAR 获取三维点云, 并与裂缝调查、倾角观测、热红外和现场无损检测联合。第四, 若目标是外墙裂缝、饰面剥落、渗漏和空鼓等表观病害, UAV 光学影像、近景摄影测量和热红外更合适, 但应通过现场核验确认病害性质。第五, 若涉及结构安全等级判定, 遥感只能作为风险线索和监测证据, 必须与规范化房屋安全鉴定、结构计算和现场检测闭环。

当前研究仍存在若干不足。其一, 遥感指标与

结构安全指标之间缺少统一映射。InSAR 提供毫米级位移, 却不能直接给出承载力、裂缝深度或构件安全储备; 光学和点云能够识别外观损伤, 却难以判断内部损伤。其二, 多数研究停留在案例验证, 缺少跨城市、跨结构类型、跨传感器的统一阈值和工程标准。其三, AI 模型对地区、影像源、灾种和建筑风格存在明显域迁移问题, 训练数据标注成本高, 模型可解释性不足。其四, InSAR 在单体建筑尺度仍受 LOS 方向、叠掩、阴影、散射点定位和温度效应影响, 异常解释需要工程知识参与。其五, 多源数据融合仍偏“后处理叠加”, 尚未形成面向房屋安全治理的统一数据模型、误差传播模型和风险分级框架。

未来研究可从五个方向推进: 一是构建面向房屋安全的多源基准数据集, 将 InSAR 时序、UAV 影像、TLS 点云、热红外、建筑属性、地质资料和现场鉴定结果统一组织; 二是发展可解释的遥感-结构耦合模型, 把沉降速率、差异沉降、角变形、裂缝分布和结构易损性联系起来; 三是推动卫星遥感与城市数字孪生、BIM 和 GIS 平台融合, 实现建筑风险的动态更新; 四是建立分级预警流程, 将遥感异常分为关注、复核、重点巡查和专业鉴定等等级, 减少误报造成的管理负担; 五是加强长期运行验证, 把遥感监测从科研案例转化为城市房屋安全治理的常规工具。总体而言, 遥感技术的最佳角色不是替代现场鉴定, 而是在城市尺度上更早、更广、更连续地发现问题, 并把有限的工程检测资源引导到最需要的位置。

参考文献

- [1] Dong, L., & Shan, J. (2013). A comprehensive review of earthquake-induced building damage detection with remote sensing techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 84, 85-99.
- [2] Ge, P., Gokon, H., & Meguro, K. (2020). A review on synthetic aperture radar-based building damage assessment in disasters. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111693.
- [3] Kerle, N., Nex, F., Gerke, M., & Duarte, D. (2020). UAV-Based Structural Damage Mapping: A Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(1), 14.
- [4] Adamopoulos, E., & Rinaudo, F. (2021). Close-Range Sensing and Data Fusion for Built Heritage Inspection and Monitoring-A Review. *Remote Sensing*, 13(19), 3936.
- [5] Dong, C.-Z., & Catbas, F. N. (2021). A review of computer vision-based structural health monitoring at local and global levels. *Structural Health Monitoring*, 20(2), 692-743.
- [6] Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B7), 9183-9191.
- [7] Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., & Rabaute, T. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364, 138-142.
- [8] Bamler, R., & Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14(4), R1-R54.
- [9] Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E., & Goldstein, R. M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3), 333-382.
- [10] Hanssen, R. F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers.
- [11] Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8-20.
- [12] Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383.
- [13] Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23), L23611.
- [14] Hooper, A., Segall, P., & Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*,

- 112(B7), B07407.
- [15] Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., & Rucci, A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9), 3460-3470.
- [16] Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-Gonzalez, M., Devanthery, N., & Crippa, B. (2016). Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78-89.
- [17] Osmanoglu, B., Sunar, F., Wdowinski, S., & Cabral-Cano, E. (2016). Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 90-102.
- [18] Gernhardt, S., & Bamler, R. (2012). Deformation monitoring of single buildings using meter-resolution SAR data in PSI. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 73, 68-79.
- [19] Gernhardt, S., Auer, S., & Eder, K. (2015). Persistent scatterers at building facades-Evaluation of appearance and localization accuracy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 100, 92-105.
- [20] Zhu, M., Wan, X., Fei, B., Qiao, Z., Ge, C., Minati, F., Vecchioli, F., Li, J., & Costantini, M. (2018). Detection of Building and Infrastructure Instabilities by Automatic Spatiotemporal Analysis of Satellite SAR Interferometry Measurements. *Remote Sensing*, 10(11), 1816.
- [21] Matsuoka, M., & Yamazaki, F. (2004). Use of satellite SAR intensity imagery for detecting building areas damaged due to earthquakes. *Earthquake Spectra*, 20(3), 975-994.
- [22] Corbane, C., Adams, B. J., Piard, B. E., Huyck, C. K., Lallemand, D., Bjorgo, E., Ghesquiere, F., Evans, G. B., Lemoine, G., Toro, J., Saito, K., Dell'Oro, L., Senegas, O., Shankar, R., Spence, R. J. S., Eguchi, R. T., Gartley, R. A., Ghosh, S., Gill, S. P. D., Kemper, T., & Svekla, W. D. (2011). A comprehensive analysis of building damage in the 12 January 2010 Mw7 Haiti earthquake using high-resolution satellite and aerial imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 77(10), 997-1009.
- [23] Booth, E., Saito, K., Spence, R., Madabhushi, G., & Eguchi, R. T. (2011). Validating assessments of seismic damage made from remote sensing. *Earthquake Spectra*, 27(1_suppl1), 157-177.
- [24] Gupta, R., Goodman, B., Patel, N., Hosfelt, R., Sajeew, S., Heim, E., Doshi, J., Lucas, K., Choset, H., & Gaston, M. (2019). Creating xBD: A dataset for assessing building damage from satellite imagery. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. https://openaccess.thecvf.com/content_CVPRW_2019/papers/cv4gc/Gupta_Creating_xBD_A_Dataset_for_Assessing_Building_Damage_from_Satellite_CVPRW_2019_paper.pdf
- [25] Cha, Y.-J., Choi, W., & Buyukozturk, O. (2017). Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(5), 361-378.
- [26] Brunner, D., Lemoine, G., & Bruzzone, L. (2010). Earthquake damage assessment of buildings using VHR optical and SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(5), 2403-2420.
- [27] Vosselman, G., & Maas, H.-G. (Eds.). (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing. https://www.whittlespublishing.com/Airborne_and_Terrestrial_Laser_Scanning
- [28] Shan, J., & Toth, C. K. (Eds.). (2009). *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. CRC Press.
- [29] Olsen, M. J., Kuester, F., Chang, B. J., & Hutchinson, T. C. (2010). Terrestrial Laser Scanning-Based Structural Damage Assessment. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(3), 264-272.
- [30] Lindenbergh, R., & Pietrzyk, P. (2015). Change detection and deformation analysis using static and mobile laser scanning. *Applied Geomatics*, 7(2), 65-74.
- [31] Armesto-Gonzalez, J., Riveiro-Rodriguez, B., Gonzalez-Aguilera, D., & Rivas-Brea, M. T. (2010). Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings. *Journal of Archaeological Science*, 37(12), 3037-3047.

- [32] Shen, Y., Wang, J., Lindenbergh, R., et al. (2023). A review of terrestrial laser scanning (TLS)-based technologies for deformation monitoring in engineering. *Measurement*, 223, 113684.
- [33] Vetrivel, A., Gerke, M., Kerle, N., Nex, F. C., & Vosselman, G. (2018). Disaster damage detection through synergistic use of deep learning and 3D point cloud features derived from very high resolution oblique aerial images, and multiple-kernel-learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 140, 45-59.
- [34] Balaras, C. A., & Argiriou, A. A. (2002). Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings*, 34(2), 171-183.
- [35] Fox, M., Coley, D., Goodhew, S., & de Wilde, P. (2014). Thermography methodologies for detecting energy related building defects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 296-310.
- [36] Karila, K., Karjalainen, M., Hyypä, J., Koskinen, J., Saaranen, V., & Rouhiainen, P. (2013). A comparison of precise leveling and persistent scatterer SAR interferometry for building subsidence rate measurement. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2(3), 797-816.
- [37] Ma, P., Zheng, Y., Zhang, Z., Wu, Z., & Yu, C. (2022). Building risk monitoring and prediction using integrated multi-temporal InSAR and numerical modeling techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114, 103076.
- [38] Mohamadi, B., Balz, T., & Younes, A. (2020). Towards a PS-InSAR based prediction model for building collapse: Spatiotemporal patterns of vertical surface motion in collapsed building areas-Case study of Alexandria, Egypt. *Remote Sensing*, 12(20), 3307.
- [39] Bonaldo, G., Caprino, A., Lorenzoni, F., & da Porto, F. (2023). Monitoring displacements and damage detection through satellite MT-InSAR techniques: A new methodology and application to a case study in Rome (Italy). *Remote Sensing*, 15(5), 1177.
- [40] Karunathilake, A., Ohashi, M., Kaneta, S., & Chiba, T. (2024). Tunnel-induced land subsidence assessment in a densely populated residential area using Sentinel-1 PS-InSAR. *Discover Geoscience*, 2, 81.
- [41] Ramirez, R. A., Lee, G.-J., Choi, S.-K., Kwon, T.-H., Kim, Y.-C., Ryu, H.-H., Kim, S., Bae, B., & Hyun, C. (2022). Monitoring of construction-induced urban ground deformations using Sentinel-1 PS-InSAR: The case study of tunneling in Dangjin, Korea. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108, 102721.
- [42] Huang, D., Qi, Z., Lin, S., Gu, Y., Song, W., & Lv, Q. (2024). Investigating the Structural Health of High-Rise Buildings and Its Influencing Factors Using Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar Imagery: A Case Study of the Guangzhou-Foshan Metropolitan Area. *Buildings*, 14(12), 4074.
- [43] Morgenthal, G., & Hallermann, N. (2014). Quality Assessment of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Based Visual Inspection of Structures. *Advances in Structural Engineering*, 17(3), 289-302.
- [44] Xiu, H., Shinohara, T., Matsuoka, M., Inoguchi, M., Kawabe, K., & Horie, K. (2020). Collapsed Building Detection Using 3D Point Clouds and Deep Learning. *Remote Sensing*, 12(24), 4057.
- [45] Spencer, B. F., Jr., Hoskere, V., & Narazaki, Y. (2019). Advances in Computer Vision-Based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring. *Engineering*, 5(2), 199-222.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS