



遥感技术在震后建筑物损毁检测中的应用

眭海刚¹ 刘超贤¹ 黄立洪¹ 华 丽²

¹ 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

² 华中农业大学资源与环境学院,湖北 武汉,430070

摘 要:建筑物损毁信息提取作为震后损失评估的重要内容,对于及时了解灾情、开展灾害应急响应及灾后恢复重建等具有重要意义。近年来,多平台遥感技术和高分辨率遥感技术的飞速发展,为建筑物损毁信息的精确提取带来新的发展机遇。在介绍建筑物损毁基本特征和分级标准的基础上,总结了目前国内外遥感技术在建筑物损毁检测方面的常见方法,包括基于震后单时相的提取方法、灾前灾后的变化检测方法以及融合多源数据的建筑物损毁信息检测方法,并分析了各种方法本身的局限性与不足。结合目前遥感领域的前沿技术,探讨了如何基于高分辨率遥感技术、合成孔径雷达技术、机载激光雷达技术以及倾斜摄影技术实现震后建筑物损毁信息的提取。

关键词:地震;遥感技术;建筑物损毁;多源遥感影像;三维特征

中图分类号:P237

文献标志码:A

近十年来,全球地震频发,破坏力极大的地震灾害给人类生命财产安全造成了巨大损失^[1-3]。除了关注地震灾害本身的灾变机理以及开展灾前监测预警外,进行震后灾情评估以及及时有效地获取震后灾情信息同样十分重要^[4-5]。而建筑物损毁作为所有震害信息中最为典型的特征,往往被认为是地震灾害最重要的标志。因此,在震后第一时间准确获取建筑物的损毁信息,能够为区域开展震后应急救援、决策指挥以及灾后重建等提供技术支持和决策依据^[6-7]。

传统的震害信息获取的主要手段是现场实地勘察,尽管这种方法获取信息的可信度高,但在较大区域内开展时往往存在工作量大、效率低等不足^[8]。近几十年来,伴随着遥感技术的飞速发展,以遥感数据为基础的技术手段成为准确认识自然灾害、及时开展灾情评估的重要方法^[9]。而遥感技术目前正朝着更高空间分辨率、更高时间分辨率以及更高光谱分辨率的目标不断迈进。借助合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)、激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)、无人机倾斜摄影和视频监控等新型遥感技术,进一步实现多平台、多传感器、多尺度以及多角度观测

能力的提升^[10-11]。正是由于遥感技术与信息技术的飞速发展,为准确快速地开展震后灾情评估提供了丰富的数据源,使得深入开展防灾减灾的相关工作成为可能。目前,遥感技术已在2008年汶川地震、2010年海地地震、2015年尼泊尔地震等大型地震的灾情评估中得到了成功应用^[12-14]。中国面向减灾救灾的重大需求包括天空地一体化协同观测与应急处理、震害遥感综合评估与应用示范、多源海量遥感数据快速处理与灾害损毁实物量评估等在内的一系列专题研究得到成功开展,灾害的遥感监测与评估已然成为震后防灾减灾、应急管理的重要内容^[15-17]。

伴随着遥感技术多平台的发展以及影像分辨率的提升,加上人工智能、大数据、云计算等前沿技术的推动,基于遥感影像的地物目标识别取得了巨大飞跃。因此,遥感技术与这些技术的融合应用成为震害应急响应、震后灾情评估的重要手段^[18]。综合利用现有的视觉词袋模型、神经网络、支持向量机(support vector machine, SVM)、随机森林与Adaboost等人工智能算法进行损毁建筑物影像的特征提取,相比传统的全局特征表示法,其损毁分类方法的平均精度有了一定程度

收稿日期:2019-03-04

项目资助:国家自然科学基金(41771457);国家重点研发计划(2018YFB10046)。

第一作者:眭海刚,博士,教授,主要从事遥感、GIS以及灾害应急的相关研究。haigang_sui@263.net

通讯作者:刘超贤,博士。cx_leo@whu.edu.cn

的提升^[19];此外,综合利用多分辨率(卫星、航空、地面)遥感影像,基于深度卷积神经网络(convolutional neural network, CNN),融合多分辨率深度特征图谱的方法同样能够显著提高建筑物损毁分类的精度,且能加强对影像中损毁信息的特征定位能力^[20]。如何充分利用遥感新技术实现天地协同以及定性、定量与定位相结合的精准评估,开展遥感数据的深度应用,并将其充分应用到震后建筑物损毁的精细化评估中,已成为震后灾情监测评估的重要研究方向。本文在回顾震后损毁建筑物检测发展历程的基础上,总结了国内外常用的损毁检测方法以及最新的研究进展与关键技术,探讨了震后建筑物损毁信息提取技术的未来发展趋势。

1 损毁建筑物的特征与分级

1.1 损毁建筑物的特征

受地震影响程度的不同,建筑物损毁形式往往会表现出复杂性和多样性。开展震后建筑物损毁检测不仅需要了解损毁的各种类型以及对应的遥感影像特征,更需要实现典型特征的定量化描述。损毁建筑物通常在遥感影像上表现出特殊的光谱、纹理以及几何特征^[21]。影像中损毁建筑物的灰度相对较暗,整体几何结构会存在变形,边界不再连续和清晰,整体纹理特征也不再突出^[22]。

需要指出的是,以上特征大多基于遥感卫星的下视影像,获取的往往只是建筑物顶面的特征。但从实际的建筑物损毁情况来看,震害建筑物的典型损毁特征除了光谱、纹理等顶面特征外,还应该包括立面特征和三维结构特征两大类,如立面纹理、体积、高程、坡度等^[23]。通常,震后建筑物损毁最直观的表现是高度和立面特征发生变化,但从普通遥感影像中对建筑物的高度和立面进行观测并不直观,往往需要借助建筑物精细化的三维空间信息才能较好地实现损毁检测。从以上分析不难看出,遥感技术可观测到建筑物损毁的关键信息主要表现在建筑物的高程、面积、倾斜度、顶面和立面纹理上。因此,只有对建筑物实现表面特征、几何轮廓以及三维结构的整体描述,才是其损毁特征的完整表现。

1.2 建筑物的损毁分级

为了实现震后建筑物损毁情况的准确、精细评估,往往需要将建筑物的损毁等级进行具体划分。传统的基于中低空间分辨率的遥感影像的建筑物损毁检测仅从下视角度对建筑物的损毁与否

进行简单抽象的划分,其提取精度十分有限。近年来,随着高分卫星遥感以及无人机航空遥感技术的发展,遥感影像的空间分辨率已经实现从米级到亚米级甚至厘米级的跨越,这也在一定程度上推动了建筑物损毁精细化评估的进一步发展。

建筑物的损毁可以划分为物理损毁和功能损毁两大类。其中,功能损毁是从使用者的角度进行建筑的可用性评估。考虑到结构与非结构构件的破坏往往可导致建筑物的功能损毁,因此需要综合考虑建筑结构构件和非结构构件的破坏,从功能的角度对灾后建筑进行损毁评价。中国面向建筑物震前抗震设计制定的《建筑抗震设计规范》,根据建筑物功能的重要性以及可能的损毁情况,从功能损毁的角度将可能存在损毁的建筑物划分成为甲、乙、丙、丁 4 个类别^[24]。其中,甲类代表可能造成严重灾害后果的建筑物,乙类代表使用功能不能中断且需要尽快恢复的建筑物,丁类代表地震发生时损失较少的建筑,丙类建筑物则是除了甲、乙、丁 3 类之外的其他建筑物。从国内外的研究来看,目前基于建筑物震后功能性损毁的研究还相对较少^[25]。

目前,国际上较为通用的是由欧洲地震委员会于 1998 年发布使用的欧洲地震烈度表(Euro-pean macroseismic scale, EMS-98)^[26]。它通过对不同级别的损毁建筑物分别进行文字和图形的具体刻画来描述其差异,是目前全球相对较为常用的建筑物损毁分级标准。该标准把建筑物损毁分为 5 级,包括完好、轻微损毁、中度损毁、严重损毁和完全损毁。但仅仅依靠图形和文字来制定损毁分级标准显然会给基于普通遥感影像的建筑物损毁分级判定带来困难。因此,研究基于 EMS-98 标准的定量评估模型、损毁特征的定量化表达成为目前损毁建筑物检测中最需要解决的问题。中国在充分利用现有地震调查资料的基础上,根据《建(构)筑物地震破坏等级划分》^[27]方法,将建筑物震害的损毁等级分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和损毁 5 个等级,但该标准主要考虑到不同建筑物类型的承重和非承重构件的破坏程度、修复的难易程度以及结构使用功能的丧失程度来制定。由于该标准主要基于实地调查结果,而对应的遥感影像特征未予以体现,因此震后开展大范围应急损毁评估的难度较大。

近年来,有不少研究在建筑物损毁的具体遥感表征与其对应的损毁等级关系上进行探索,但这种对应关系受影像类型或者空间位置差异的影

响较大^[28-30]。

2 建筑物损毁检测的发展历程

震后建筑物的损毁检测方法受传感器技术、摄影测量技术与计算机视觉等技术的深刻影响而不断发展。伴随着遥感技术的多平台化、影像分辨率的提高以及人工智能技术的飞速发展,新的震后建筑物的损毁检测方法不断涌现,损毁信息的提取精度也不断提高。本文通过总结国内外相关的研究成果,将建筑物的损毁信息提取主要分为以下阶段:

1)萌芽期(20世纪60年代以前)。虽然早在1906年的旧金山大地震,Laurence利用风筝搭载照相机拍摄了地震灾区损坏情况的综合照片,但这只是一些基础尝试。该阶段受限于相关观测手段的限制,主要通过人工现场勘察进行建筑物损毁的具体评估,反馈区域灾情,该方法耗时耗力,损毁信息的检测效率较低。

2)推动期(20世纪60~90年代)。20世纪60年代开始,美国、俄罗斯等国家大力发展航天事业,卫星遥感技术得到快速发展,中低分辨率的光学卫星遥感影像逐渐应用到震后灾情评估与调查中。而到了20世纪90年代,随着ERS-1、RadarSat等一系列雷达卫星的成功发射,从1995年的日本神户地震开始,SAR遥感技术以其全天时、全天候的稳定对地观测优势逐渐在灾情评估中受到青睐^[31]。但该阶段建筑物损毁信息的检测方法主要是依靠直接的目视解译。受限于影像分辨率,计算机图像处理的相关技术应用难以实现。

3)加速期(2000年至今)。国外SPOT/QuickBird/IKONOS等一系列高分辨率商业遥感卫星的发射为震后损毁评估技术提供了新的数据支持^[32],而机器学习方法、面向对象的分析技术也被引入到高分辨率影像的信息提取中,为建筑物损毁信息的提取注入了新的生机与活力。随着机载航空遥感平台的迅速发展,基于倾斜摄影技术与激光雷达技术的震后损毁评估取得了卓越进步。通过采集地面对象的三维信息刻画地形地貌特征来完成建筑物的三维重建,以期实现建筑物的精细化损毁评估。此外,近年来,遥感大数据与人工智能方法开始在建筑物损毁检测中得到了尝试应用。基于多源数据的协同配合,跨平台、多任务协同的空天地一体化损毁检测成为现阶段研究的重要方向^[33]。

3 建筑物损毁检测的常用方法

3.1 基于灾前/灾后影像的建筑物损毁检测

在震前震后影像数据充足的情况下,应用遥感影像变化检测技术实现建筑物损毁对象的提取是最常用的方法^[34-35]。遥感影像的变化检测技术主要包括3方面内容:①确定是否有变化;②确定变化发生的范围;③确定变化发生的具体类型。常见的检测方法包括差值法、比值法、主成分分析法等。近年来,随着对地观测技术与人工智能技术的飞速发展,基于高分辨率遥感影像的目标识别与变化检测技术得到了极大提高。变化检测技术的进步也在一定程度上为建筑物的损毁检测提供了发展契机。但需要指出的是,变化的区域不一定全部是损毁的区域。因此,变化检测只是实现损毁信息提取的基础,具体损毁区域的提取还需要进一步的判断和验证。

尽管目前提出的变化检测方法很多,各国学者从不同的角度出发,归纳出不同类型的分类方法,并且各类变化检测方法已在诸多领域中得到了成功应用,但将其应用到建筑物损毁检测方面,依然存在以下问题:

1)数据源的限制。遥感影像的变化检测方法往往是基于同一传感器不同时相的遥感影像实现的。但在实际地震灾害的应急监测评估中,获得同一传感器的遥感数据的难度相当之大。而且现有的变化检测方法多是基于光学遥感影像进行的,其用在SAR与LiDAR影像的适用性上相对较难;此外,考虑到建筑物本身的三维特性,对建筑物的损毁变化研究实际上是面向三维的变化检测问题,三维数据的缺失也在一定程度上限制了其精细化研究的开展。

2)数据质量的要求严格。大部分变化检测方法的应用效果实际上受到遥感影像数据本身质量的影响。其中,遥感影像的空间分辨率、有无云的影响、灾前灾后影像的辐射度差异以及是否配准等影响较大。

3)先验信息的缺失。遥感影像的变化检测只能算作建筑物损毁检测的第一步,单纯基于遥感影像的变化检测难以实现损毁信息的准确提取。而且在缺乏震区损毁信息的实地调查资料的情况下,这种单纯基于建筑物影像实现的评估缺乏一定的说服力。

3.2 基于灾后影像的建筑物损毁检测

考虑到很多地区震前遥感影像,尤其是高分

分辨率遥感影像的缺失,基于震前震后影像的建筑物损毁检测的难度相对较大。而相比之下,灾后遥感影像数据的获取则相对容易,因此基于灾后遥感影像的建筑物损毁检测逐渐成为近年来的研究热点^[36-37]。伴随着传感器技术与计算机技术的飞速发展,基于灾后遥感影像的建筑物损毁信息的提取经历了从目视解译到半自动提取再到全自动提取的不同阶段。

早期的目视解译方法是基于损毁建筑物在遥感影像上所表征的光谱与纹理等特征,结合专家的先验知识,通过直接判读来实现损毁信息的提取。张德成^[38]早在 1993 年就基于航空拍摄得到的相片,根据航片中建筑物的色调、纹理与形状等信息研究损毁建筑物在影像上所表现的典型特征。除了光学影像之外,震后损毁建筑物在 SAR 影像上同样表现出了典型的特征。尤其随着 SAR 影像分辨率的提高,完好与损毁建筑物在 SAR 影像上表现出的回波特征存在明显差异^[39]。但由于其成像的特殊性,影像中存在的透视、叠掩以及噪声等会对目视解译造成影响。

而近年来伴随着遥感平台的多样化以及人工智能等前沿技术的飞速发展,利用计算机实现建筑物损毁信息的半自动甚至全自动提取同样成为可能。传统的中低分辨率的遥感影像采用基于像素的遥感影像分类方法是较为常见的方法,通过对影像先后进行影像增强和影像分类来提取建筑物的震害信息。由于面向像元的方法提取的损毁信息仅利用光谱特征对像素进行分类,因此应用到高分影像上时,其分类结果的精度往往较低。而随着影像空间分辨率的提高,面向对象的分析方法作为一种新型的影像分析方法,将逐渐取代面向像元的分类方法。该方法充分考虑了地物的光谱、纹理以及几何等特征,借助遥感影像分割实现对象化的影像特征描述,最终提高分类的精度。因此对于遥感影像,基于震后单时相遥感影像的损毁建筑物的典型纹理、形状、灰度等特征,利用机器学习等人工智能方法的相关模型实现损毁评估,目前逐渐成为研究的热点。

3.3 基于多源数据融合的建筑物损毁检测

近年来,随着高分辨率卫星遥感、无人机航空遥感、SAR 遥感以及机载 LiDAR 等对地观测技术的发展,地表对象信息的获取手段不断丰富。而不同遥感数据在地物目标识别上都存在一些缺陷,例如高分遥感卫星获取的建筑物影像中,建筑物的立面与结构特征表现不够、航空影像的空间范围有限、SAR 遥感与 LiDAR 遥感影像的相关

图像处理技术不成熟等。因此,如何充分发挥不同遥感数据源的优势,实现多源数据协同服务,已成为震后损毁检测新的发展方向。Cusicanqui 等^[40]充分考虑到震后相关应急救援的规定限制导致航拍数据的缺乏,提出了一种结合航拍影像和公开视频相结合的损毁提取方法,通过提取视频的关键帧为损毁建筑物的二维与三维损毁研究提供补充数据源,结果验证了基于视频数据的损毁检测方法的实用性;Vetrivel 等^[41]采用深度 CNN 取代手工特征提取方法,自适应地从影像数据中提取深度特征,并基于多核学习框架,联立建筑物的三维结构特征,将灾后建筑物损毁分类的精度提升到 94%;胡本刚^[42]针对震后地物所表现出的光谱、纹理复杂性,提出了综合利用高分辨率遥感影像的光谱与纹理特征和 LiDAR 点云精度较高的空间三维信息,基于面向对象的分析方法实现了建筑物损毁区域的快速检测。

此外,遥感数据与其他地面信息或地理信息数据相结合同样可以辅助损毁信息提取。Turker 等^[43]提出了一种结合震后航空影像的建筑物阴影与建筑物空间关系来判定建筑物损毁情况的方法。Dong 等^[44]在其研究综述中指出,一些被完全损毁的建筑物可以借助灾前的建筑物矢量被识别出来。李强等^[23]基于灾前的建筑物矢量数据和灾后的多视角倾斜影像,对不同建筑物的三维点云进行了三维分割,利用提取的震后建筑物的三维特征,应用分类方法对震后建筑物的损毁情况进行了识别,研究结果表明了灾前建筑物矢量在损毁检测中的价值。

由此可见,基于多源数据融合的方法能够有效利用不同数据源的优势,保证震后灾情评估的有效开展。尤其考虑到震后气候环境的恶劣以及地面损毁情况的复杂,基于多源数据能够保证遥感数据获取的及时有效以及地面损毁信息的相对准确。但异源异构数据往往存在配准和融合的相对困难,这也是该方法在实际推广应用中的难题。

4 建筑物损毁检测的最新进展

4.1 基于高分遥感影像的建筑物损毁检测

对地观测技术的飞速发展使得光学卫星影像的分辨率得到了很大的提高,而基于高分辨率遥感影像的地物目标识别也在相关技术的支持与推动下取得了长足进步,尤其是计算机视觉、人工智能等技术在目标识别、图像分割、场景分类等领域取得了显著突破。因此,基于高分遥感影像的建

建筑物损毁检测成为近年来灾后评估的研究热点。当前,基于高分辨率遥感影像实现的建筑物损毁检测的研究进展主要集中在损毁特征以及检测方法的选择上。

在中低分辨率的遥感影像中,传统的建筑物损毁信息提取主要是基于建筑物的光谱特征,但影像中建筑物与道路、建筑物倒塌前与倒塌后的光谱特征往往相似度较高,区分难度大^[45];而高分辨率遥感影像所包含的丰富的地物细节信息(如纹理特征等),则使得这种区分成为可能。吴鹏天吴等^[46]利用2011年日本地震海啸灾区的WorldView全色影像,基于纹理分维变化的单调性准则,自动检测并识别出建筑物的损毁区域范围。此外,在高分辨率遥感影像中完好的建筑物往往表现出区别于周围其他地物的几何特征、形状特征等。而随着多源遥感数据的发展,基于多特征融合的信息提取技术发展迅速。李祖传等^[47]利用震后高分辨率光学遥感影像的纹理特征与形态特征实现了汶川震后倒塌房屋的自动提取。刘宇等^[48]针对玉树地震震后高分影像的建筑物损毁区域,提出了一种基于几何特征与纹理特征的建筑物损毁检测方法。因此,选择灾前灾后建筑物变化的典型特征成为开展研究的重要内容。

而从检测方法上来看,逐渐完成了从传统的面向像元的方法向面向对象的方法过渡。基于像元的方法作为一种光谱特性的统计方法,无法充分利用高分辨率遥感影像中丰富的形状、纹理等信息。面向对象的图像分析方法不是针对单个孤立像元进行分析,而是对同质像元所组成的多边形对象进行研究和分析,适用于大比例尺高分辨率遥感影像的解译和信息提取。王慧敏等^[49]利用GeoEye影像提取了海地地震中的损毁建筑物,在对影像进行多尺度分割的基础上,综合利用其几何特征与纹理特征,创建损毁规则集以实现损毁信息的提取。吴剑等^[50]针对汶川地震后的建筑物损毁情况,利用IKONOS和QuickBird影像分别采用面向像元和面向对象的分析方法进行损毁建筑物的提取,结果表明面向对象的分析方法可以有效提升损毁信息的提取精度。

近年来,机器学习、深度学习等人工智能方法在图像识别、目标检测等领域得到了成功应用。因此一部分建筑物损毁的检测方法也充分利用了机器学习的相关模型和算法来开展研究。涂继辉等^[51]针对汶川地震后北川县城的航空影像,提出了一种结合视觉词袋模型和SVM对超像素区域中的损毁区域进行检测的方法。此外,近年来在

计算机视觉领域利用CNN实现图像分类和分割很好地展示了其在遥感领域的潜力。最新研究表明,使用深度学习能够显著提升遥感影像的目标识别与检测精度。目前,国外也有少部分学者尝试利用深度学习模型进行建筑物的损毁检测^[52]。但需要说明的是,深度学习往往对目标的样本数量有一定的要求,而考虑到损毁的复杂性,目前的样本数量难以满足深度学习模型的构建要求。但是,随着相关研究的深入与数据的积累,深度学习模型所具备的优越性将使其成为下一阶段建筑物损毁检测的重要方向。

4.2 基于SAR影像的建筑物损毁检测

雷达遥感有别于传统的光学遥感,它具备穿透云雾雪的能力,能够有效避免恶劣环境对观测的影响。基于雷达遥感具有的全天时、全天候的对地观测能力,雷达遥感技术对于震后灾害应急监测与响应具有重要意义。

尽管目视解译方法目前依然是建筑物损毁信息评估的最主要的方法,而且其解译精度较高,但考虑到雷达遥感影像成像的特殊性,通常对解译人员的专业知识要求相对较高,工作量也比较大。因此,目前国内外相关学者尝试基于震后SAR影像的纹理、极化等特征进行损毁信息的自动或半自动提取。陈启浩等^[53]基于玉树地震后的Radsat-2极化数据和日本大地震后的ALOS-1极化数据,考虑到建筑物倒塌前后在SAR影像上会表现出散射与纹理特征的差异,综合利用相干分解得到的极化特征以及基于灰度共生矩阵得到的纹理特征来实现非建筑物、完好建筑物与损毁建筑物的划分,结果验证了极化特征与纹理特征相结合的方法在建筑物损毁检测中的有效性。Guo等^[54]基于北川震后全极化Radarsat-2影像,在重点分析影像中建筑物特征的基础上,提出了一种基于多参数的房屋震害自动提取方法,利用不同的极化参数来实现完好房屋和倒塌房屋的区分。与光学影像进行对比分析,进一步验证了结果的准确性。但以上两种方法都需要进行阈值分割,目前还缺乏可靠的阈值确定方法。总体来看,基于震后SAR影像的纹理特征进行建筑物损毁信息提取时,影像的空间分辨率要求较高,而且对于低矮、高密集度的建筑物损毁提取的精度较低;而基于震后SAR影像的极化特征进行建筑物损毁信息的提取时,往往受限于数据的获取,损毁提取的精度相对较低。此外,基于震前震后SAR影像的强度特征和相干特征的变化检测方法实现的建筑物损毁信息的提取同样取得了一些成果。刘云

华等^[55]基于汶川地震的先进合成孔径雷达影像数据,利用 SAR 幅度图像,借助基于比值法的变化检测方法以及 SAR 干涉相干图像的失相干分析方法检测影像中的建筑物损毁区域,结果表明这两种方法都能快速实现损毁区域的圈定,但受限于数据质量,其检测精度还有进一步提升的空间。由此可见,基于强度变化或相干特征检测的方法虽然相对简单,但对数据质量的要求相对较高,而且提取的精度往往不稳定。

考虑到 SAR 影像成像的复杂性与特殊性,尽管从 SAR 影像实现损毁信息的自动提取的难度相对较大,但随着 SAR 影像空间分辨率的提高以及多极化、多频率雷达数据的不断增多,多数据融合、多特征协同参与损毁信息的提取已成为目前的研究趋势,而面向对象的方法正成为实现这一协同的有效手段。

4.3 基于机载激光雷达的建筑物损毁检测

机载激光雷达作为一种主动式的对地观测技术,通过快速、直接地采集地表高程信息,将复杂的地形表面以离散的海量三维点云形式存储到计算机中,实现地面对象的三维重建。该技术具有自动化程度高、受天气影响小、提取精度高等优点。

传统的基于光学遥感影像开展震后损毁评估,由于视角的限制,难以全面真实地反映建筑物的损毁情况;而且震后建筑物的损毁表现出一定的随机性与不规则性,因此基于普通影像对损毁特征进行数学描述是比较困难的。机载 LiDAR 技术正好可以克服这两点。目前,基于机载 LiDAR 的建筑物损毁检测主要是以获取的三维点云为基础,充分利用其提供的坐标、高程和纹理等特征信息来开展损毁检测。

近年来,国内外有不少学者基于 LiDAR 技术进行建筑物的损毁检测。Vu 等^[56]利用地震前后的 LiDAR 点云数据集提出了一种基于变化检测的建筑物损毁检测方法,通过将点云数据格网化并计算地震前后的直方图变化大小,选取合适的直方图阈值确定建筑物的损毁区域。王彩凤^[57]依据损毁与非损毁建筑物在几何形状和点云粗糙度上的差异,利用区域增长算法对 LiDAR 点云进行分割,并依据得到的分割区域获取损毁特征。但当前的震前 LiDAR 数据在很多地方存在缺失,基于变化检测的方法开展灾害应急难以实现。考虑到高分辨率遥感影像可以提供建筑物精细化的轮廓信息,目前 LiDAR 数据与高分辨率卫星影像或者航空影像的结合已成为目标精确提取的重要方向^[58-59],通过综合运用光学遥感影

像的光谱信息和 LiDAR 数据的三维信息实现地物的精确提取。于海洋等^[60]利用海地地震震后的 LiDAR 点云制作归一化数字表面模型来提取灾区建筑物,并基于航空影像采用面向对象的分析方法和 SVM 来提取损毁建筑物。但在实际应用中,往往由于数据源的差异,造成影像数据的匹配与融合相对较为困难。因此,利用震后单时相机载 LiDAR 数据则可避免多时相数据的数据源匮乏、多源数据的匹配融合等问题,较适合地震应急救援。黄树松等^[61]尝试利用震后机载 LiDAR 点云数据,依据典型建筑物的震害类型,由建筑物点云的高度、坡度和法向量等空间特征,提出了识别建筑物破坏程度的主要特征。王金霞等^[62]结合回波强度、法向量、坡角等已有的机载 LiDAR 点云特征,分析倒塌、未倒塌建筑物以及树木等不同地物点云特征的统计分布情况,筛选区分不同类型的典型特征,并利用最近邻分类方法实现灾区损毁建筑物的检测。

综上所述,机载 LiDAR 点云所具备的高精度三维信息能够为建筑物损毁的三维检测提供重要保证。但是,目前基于机载 LiDAR 技术的建筑物损毁检测研究相对较少,数据预处理以及损毁检测的理论与方法等各方面还不够完善。尽管 LiDAR 遥感技术在灾害监测与评估方面积累了一定的案例,但结合震后损毁建筑物形态的多样性和 LiDAR 预处理的繁琐性,目前在实际应用时的难度相对较大,相关的处理技术和提取方法还有很大的发展空间。

4.4 基于倾斜摄影测量的建筑物损毁检测

常规的卫星遥感影像往往都是以下视角拍摄地物,而地物的立面无法得到体现。考虑到损毁建筑物的立面特征在损毁检测中的重要性,仅根据建筑物的顶面特征进行建筑物的损毁检测显然是不够的。近年来,基于无人机的倾斜摄影测量技术得到飞速发展。通过在同一飞行平台上搭载多个多角度相机,实现对地物目标顶面与立面的三维立体观测。目前,倾斜摄影测量技术主要应用于城市规划设计、水利电力等三维精细建模和应急指挥等方面,而应用该技术进行建筑物的损毁检测还处于起步阶段。Gerke 等^[63]利用倾斜影像所包含的丰富的光谱特征、纹理特征与建筑物高程特征对震后城区建筑物的损毁情况进行评估。Tu 等^[64]基于北川县城地震遗址倾斜影像提供的建筑物立面信息,根据损毁建筑物立面存在的对称性变化特征,利用基尼系数进行建筑物损毁情况的判定。

倾斜影像不仅弥补了传统航天航空影像地物遮挡严重、立面信息缺乏的缺陷,同时为建筑物损毁的精细化研究提供了支持与保障。利用倾斜遥感影像进行人工目视解译是建筑物损毁评估的最基本方法。但人工目视获取的往往是影像上最直观的特征,建筑物的结构损毁情况、整体是否倾斜、高度变化情况等具体定量指标难以获取。针对这些问题,目前国内外软件公司通过开发一系列高效的软件(如法国的 Street Factory、美国的 Pictometry 等)对多视角影像进行关联与三维重建,采用三维建模等以期更加丰富与精细的方式辅助解译人员开展损毁评估^[65-66]。

此外,倾斜摄影还能提供如裂缝等细节特征对象^[67]。一般情况下,裂缝往往是实现完好建筑物与基本完好或者一般损毁建筑物区分的重要特征,根据裂缝的光谱亮度、纹理特征以及形状指数等进行分类提取。实现裂缝信息准确提取的关键是对倾斜影像中的建筑物顶面、立面以及其他信息进行高精度划分。黄敏儿等^[68]采用像素高度图的方法进行建筑物的立面提取。Gerke 等^[63]基于倾斜影像的光谱和纹理在内的 22 种特征,利用监督分类的方法将震后建筑物倾斜影像分为立面、完好的顶面、损毁的顶面和植被共 4 类,对照 EMS-98 进行损毁情况的判定。

除了表面裂缝之外,建筑物的三维结构特征同样可以作为损毁信息提取的重要依据。基于获取的多视角航空影像,依靠空中三角测量、多视影像密集匹配以及纹理映射等倾斜摄影三维建模技术,可以实现损毁建筑物的三维点云、三维模型等产品的制作^[69-71]。基于此,在充分提取建筑物的倾斜度、高程、坡度、体积等特征后,可以进一步实现建筑物损毁的精细化评估。李玮玮等^[72]基于云南鲁甸地震后的倾斜影像,利用三维建模技术生成包括三维模型、数字表面模型与正射影像在内的一系列产品,综合利用建筑物的高度特征以及三维纹理特征实现建筑物损毁信息的提取。李强等^[23]基于北川县城地震遗址的倾斜影像,利用面片的三维多视角立体视觉算法生成三维点云,计算能够表征建筑物顶面、立面以及空间整体结构的特征,并利用 SVM 方法进行损毁分类。

纵观国内外的研究成果,可以发现其研究思路和方法较为单一,部分方法还只是处在实验和验证阶段,在实际震后灾情评估中的运用还十分困难。从数据获取方面来看,目前的倾斜摄影传感器主要部署在无人机的航空平台上,其观测区域相对有限。而且基于无人机的倾斜影像获取需

要提前设计好航线,不同航线飞行拍摄得到的影像的三维模型精度差别较大。此外,无人机飞行拍摄得到的倾斜影像受气候和光照影响较大,在天气恶劣情况下获取的倾斜影像的建筑物细节特征往往不够明显;从倾斜影像的特征提取与处理上来看,由于损毁建筑物的特征表现多样化以及相关算法的限制,目前在目标识别、三维建模等方面还存在一些不足,以至于建筑物损毁信息的提取还存在一定的难度。但从长远来看,倾斜影像具备立面与顶面统一的三维一体化观测模式,这是传统的下视影像无法比拟的。

5 结 语

基于遥感技术实现的建筑物损毁信息提取在震后灾情的及时评估、应急响应的方案制定等方面发挥着重要作用。目前,随着多平台、多传感器遥感技术以及智能化遥感图像信息提取技术的发展,不断有新的数据、新的模型或者算法应用到灾情评估中,建筑物损毁检测的精度也在不断提高。总体来看,建筑物的损毁检测不再是传统的利用中低分辨率影像进行损毁信息的粗提取,而是基于高分辨率的卫星或航空影像实现损毁信息的高精度分级提取;损毁检测所用到的损毁特征不再是传统的二维影像特征,而是基于三维结构特征甚至是二维、三维一体化特征来实现损毁信息的分级提取;损毁检测所用的方法从传统的面向像元的方法发展到面向对象的提取方法,进而发展到利用人工智能的方法进行提取。此外,随着各种遥感技术获取的遥感数据积累,基于多源遥感数据的“星-空-地”大数据网逐渐形成。针对传统的遥感影像建筑物损毁检测无法顾及建筑物结构的立体性和损毁等级的差异性,难以保证检测的精度和可靠性等问题,考虑到建筑物自身结构与损毁的复杂性,全方位的立体监测手段和方法目前逐渐形成。因此,如何从震后的航空多视影像与地面影像的一体化数据处理角度,研究融合空地遥感影像的建筑物三维损毁检测方法将是未来建筑物损毁检测的重要发展方向。

参 考 文 献

- [1] Jin D, Wang X, Dou A, et al. Post-Earthquake Building Damage Assessment in Yushu Using Airborne SAR Imagery [J]. *Earthquake Science*, 2011, 24(5):463-473

- [2] Upreti P, Yamazaki F. Use of High-Resolution SAR Intensity Images for Damage Detection from the 2010 Haiti Earthquake[C]. Geoscience & Remote Sensing Symposium IEEE, Munich, Germany, 2012
- [3] Wang Xiaoqing, Ding Xiang, Wang Long, et al. A Study on Fast Earthquake Loss Assessment and Its Application to 2008 Wenchuan Ms8 Earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2009, 31(2):205-211 (王晓青, 丁香, 王龙, 等. 四川汶川8级大地震灾害损失快速评估研究[J]. 地震学报, 2009, 31(2):205-211)
- [4] Wang Litao. Urgent Monitoring and Analysis on Yushu Earthquake Using Remote Sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(5):1 053-1 066(王丽涛. 青海玉树地震灾情遥感应急监测分析[J]. 遥感学报, 2010, 14(5):1 053-1 066)
- [5] Chang L. Use of High-Resolution FORMOSAT-2 Satellite Images for Post-Earthquake Disaster Assessment: A Study Following the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(13):3 355-3 368
- [6] Xu Z, Yang J, Peng C, et al. Development of an UAS for Post-Earthquake Disaster Surveying and Its Application in Ms7.0 Lushan Earthquake, Sichuan, China[J]. *Computers & Geosciences*, 2014, 68:22-30
- [7] Li Qiang, Zhang Jingfa. Research on Earthquake Damaged Building Extraction by Different Features Fusion[J]. *Journal of Seismological Research*, 2016, 39(3):486-493(李强, 张景发. 不同特征融合的震后损毁建筑物识别研究[J]. 地震研究, 2016, 39(3):486-493)
- [8] Zhao Fujun. Seismic Disaster Information Extraction from Remotely Sensed Imagery[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2010(赵福军. 遥感影像震害信息提取技术研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2010)
- [9] Tao Heping, Liu Bintao, Liu Shuzhen, et al. Natural Hazards Monitoring Using Remote Sensing—A Case Study of 5·12 Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(3):276-279(陶和平, 刘斌涛, 刘淑珍, 等. 遥感在重大自然灾害监测中的应用前景——以5·12汶川地震为例[J]. 山地学报, 2008, 26(3):276-279)
- [10] Yang Bisheng, Li Jianping. Implementation of a Low-Cost Mini-UAV Laser Scanning System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12):1 972-1 978(杨必胜, 李健平. 轻小型低成本无人机激光扫描系统研制与实践[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12):1 972-1 978)
- [11] Zhu Jianzhang, Shi Qiang, Chen Feng'e, et al. Research Status and Development Trends of Remote Sensing Big Data [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2016, 21(11):1 425-1 439(朱建章, 石强, 陈凤娥, 等. 遥感大数据研究现状与发展趋势[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(11):1 425-1 439)
- [12] Pan Gang, Tang Danling. Damage Information Derived from Multi-sensor Data of the Wenchuan Earthquake of May 2008[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(13):3 509-3 519
- [13] Dong Yansheng, Pan Yaozhong, Fang Weihua, et al. Recognition of the Earthquake-Damaged Buildings Based on Object-Oriented Technology [J]. *Journal of Seismological Research*, 2011, 34(3):372-377(董燕生, 潘耀忠, 方伟华, 等. 基于面向对象技术的建筑物震害识别方法研究[J]. 地震研究, 2011, 34(3):372-377)
- [14] Wang D, Lihong X U. Extraction Technology of Remote Sensing Information on Building Damage: A Case Study of Ms8.1 Nepal Earthquake [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(3):124-129
- [15] Shao Yun, Zhao Zhongming, Huang Fuxiang, et al. Precise Emergency Service System Construction and Demonstration Through Synergy Observation of Spaceborne, Airborne, and Ground Remote Sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(6):1 485-1 490(邵芸, 赵忠明, 黄富祥, 等. 天空地协同遥感监测精准应急服务体系构建与示范[J]. 遥感学报, 2016, 20(6):1 485-1 490)
- [16] Lu Cheng, Sun Jianyan. A Survey on Remote Sensing Technology in Post-Earthquake Damage Assessment[J]. *Journal of Zhongzhou University*, 2011, 28(1):114-117(陆程, 孙建延. 基于遥感技术进行震害评估的研究进展[J]. 中州大学学报, 2011, 28(1):114-117)
- [17] Wang Yuxian, Duan Jianbo, Liu Shibin, et al. Remote Sensing Disaster Monitoring and Evaluation Model Based on Crowdsourcing[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2017, 29(2):104-109(王玉娴, 段建波, 刘士彬, 等. 基于众包的遥感灾害监测与评估模型[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(2):104-109)
- [18] Tu J, Sui H, Feng W, et al. Automatic Building Damage Detection Method Using High-Resolution Remote Sensing Images and 3D GIS Model[J]. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2016, 3(8):43-50

- [19] Vetrivel A, Gerke M, Kerle N, et al. Identification of Structurally Damaged Areas in Airborne Oblique Images Using a Visual-Bag-of-Words Approach[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(3):231-253
- [20] Duarte D, Nex F, Kerle N, et al. Multi-resolution Feature Fusion for Image Classification of Building Damages with Convolutional Neural Networks[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1 636-1 662
- [21] Liu Ying, Li Qiang. Damaged Building Detection from High Resolution Remote Sensing Images by Integrating Multiple Features [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2018, 41(6):61-64(刘莹, 李强. 融合多特征的高分辨率遥感影像震害损毁建筑物检测[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(6):61-64)
- [22] Cao Daiyong, Shi Xianzhong, Zhang Jingfa. Study on the Statistical Characteristics of Seismic Disaster Information of Building in Remote Sensing Image [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2001, 13(1):42-46(曹代勇, 施先忠, 张景发. 遥感图像中建筑物震害信息统计特征研究[J]. 国土资源遥感, 2001, 13(1):42-46)
- [23] Li Qiang, Ren Hongxu, Sui Haigang, et al. Damage Assessment of Earthquake-Damaged Houses Based on Three-Dimensional Features[J]. *Geospatial Information*, 2017, 15(10):63-66,69(李强, 任宏旭, 眭海刚, 等. 基于三维特征的遥感影像震害房屋损毁评估[J]. 地理空间信息, 2017, 15(10):63-66, 69)
- [24] China Academy of Building Research. GB 50011—2010 Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010 (中国建筑科学研究院. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010)
- [25] He Siwei. Research on Evaluation Method of Functional Loss of Single Building Under Disaster[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2017(贺思维. 灾害作用下单体建筑的功能损失评估方法研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2017)
- [26] Grunthal G. EMS-98 European Macroseismic Scale 1998 [S]. Luxembourg: European Seismological Commission, 1998
- [27] China Earthquake Administration. GB/T 24335—2009 Classification of Earthquake Damage to Buildings and Special Structures[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009(中国地震局. GB/T 24335-2009 建(构)筑物地震破坏等级划分[S]. 北京:中国标准出版社, 2009)
- [28] Corbane C, Saito K, Dell'Oro L, et al. A Comprehensive Analysis of Building Damage in the January 12, 2010 Mw7 Haiti Earthquake Using High-Resolution Satellite and Aerial Imagery[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2011, 77(10):997-1 009
- [29] Gerke M, Kerle N. Automatic Structural Seismic Damage Assessment with Airborne Oblique Pictometry Imagery[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2011, 77(9):885-898
- [30] Wang Xiaoqing, Huang Shusong, Ding Xiang, et al. Extraction and Analysis of Building Damage Caused by Nepal Ms8.1 Earthquake from Remote Sensing Images [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2015, 10(3): 481-490(王晓青, 黄树松, 丁香, 等. 尼泊尔 8.1 级地震建筑物震害遥感提取与分析[J]. 震灾防御技术, 2015, 10(3): 481-490)
- [31] Jin Dingjian, Wang Xiaoqing, Dou Aixia, et al. A Review on the Methods of Earthquake-Induced Building Damage Information Extraction from SAR Images[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(3):449-457(金鼎坚, 王晓青, 窦爱霞, 等. 雷达遥感建筑物震害信息提取方法综述[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(3):449-457)
- [32] Liu Ying, Tao Chao, Yan Pei, et al. Graph Cut Energy Driven Earthquake-Damaged Building Detection from High Resolution Remote Sensing Images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(7):910-917(刘莹, 陶超, 闫培, 等. 图割能量驱动的高分辨率遥感影像震害损毁建筑物检测[J]. 测绘学报, 2017, 46(7):910-917)
- [33] Fan Yida, Wu Wei, Wang Wei, et al. Research Progress of Disaster Remote Sensing in China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5):1 170-1 184(范一大, 吴玮, 王薇, 等. 中国灾害遥感研究进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5):1 170-1 184)
- [34] Matsuoka M, Yamazaki F. Use of Satellite SAR Intensity Imagery for Detecting Building Areas Damaged Due to Earthquakes[J]. *Earthquake Spectra*, 2004, 20(3):975-994
- [35] Wang Dongming, Xu Lihong. Extraction Technology of Remote Sensing Information on Building Damage: A Case Study of Ms8.1 Nepal Earthquake[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(3):124-129(王东明, 许立红. 破坏建筑物遥感信息提取技术——以尼泊尔 8.1 级地震为例[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(3):124-129)
- [36] Ye Xin, Qin Qiming, Wang Jun, et al. Detecting Damaged Buildings Caused by Earthquake from Remote Sensing Image Using Local Spatial Statistics Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(1): 125-131(叶昕,

- 秦其明, 王俊, 等. 利用高分辨率光学遥感图像检测震害损毁建筑物[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(1): 125-131
- [37] Du Jianxiao. Study of Collapsed Buildings Extraction Based on Morphology and Classification and Implementation[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2015(杜建晓. 基于形态学和分类的倒塌建筑物提取研究与实现[D]. 青岛: 山东科技大学, 2015)
- [38] Zhang Decheng. Preliminary Study on Visual Interpretation Marks of Building Damages Caused by Earthquakes on Aerophotograph[J]. *Earthquake*, 1993(1): 26-30(张德成. 建筑物震害航空照片目视判读标志的初步研究[J]. 地震, 1993(1): 26-30)
- [39] Balz T, Liao M. Building-Damage Detection Using Post-Seismic High-Resolution SAR Satellite Data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(13): 3 369-3 391
- [40] Cusicanqui J, Kerle N, Nex F. Usability of Aerial Video Footage for 3-D Scene Reconstruction and Structural Damage Assessment[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18(6): 1 583-1 598
- [41] Vetrivel A, Gerke M, Kerle N, et al. 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[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 140: 45-59
- [42] Hu Bengang. Object-Oriented Damage Building Extraction Based on LiDAR and High Resolution Remote Sensing Imagery [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013(胡本刚. 基于 LiDAR 点云与高分影像的面向对象的损毁建筑物提取方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013)
- [43] Turker M, Sumer E. Building-Based Damage Detection Due to Earthquake Using the Watershed Segmentation of the Post-Event Aerial Images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(11): 3 073-3 089
- [44] Dong L, Shan J. A Comprehensive Review of Earthquake-Induced Building Damage Detection with Remote Sensing Techniques[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 84: 85-99
- [45] Guo Huadong, Lu Linlin, Ma Jianwen, et al. An Improved Method for Automatically Identifying Remote Sensing Information of Earthquake Disaster Collapsed Houses [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(17): 2 581-2 585(郭华东, 鹿琳琳, 马建文, 等. 一种改进的地震灾害倒塌房屋遥感信息自动识别方法[J]. 科学通报, 2009, 54(17): 2 581-2 585)
- [46] Wu Pengtianhao, Wu Lixin, Shen Yonglin, et al. Disaster Auto-recognition Method Based on HSR-Image's Texture Fractal Monotonous Change[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(2): 9-13(吴鹏天昊, 吴立新, 沈永林, 等. 基于高分影像纹理分维变化的灾害自动识别方法[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(2): 9-13)
- [47] Li Zuchuan, Ma Jianwen, Zhang Rui, et al. Extracting Damaged Buildings Information Automatically Based on Textural and Morphological Features[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(4): 446-450(李祖传, 马建文, 张睿, 等. 利用融合纹理与形态特征进行地震倒塌房屋信息自动提取[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(4): 446-450)
- [48] Liu Yu, Cao Guo, Zhou Licun, et al. Building-Damage Detection Based on Combination of Multi-features[J]. *Journal of Computer Applications*, 2015, 35(9): 2 652-2 655(刘宇, 曹国, 周丽存, 等. 基于多特征结合的损毁建筑物检测[J]. 计算机应用, 2015, 35(9): 2 652-2 655)
- [49] Wang Huimin, Li Yan. Object-Oriented Damage Building Extraction[J]. *Remote Sensing Information*, 2011(5): 81-85(王慧敏, 李艳. 面向对象的损毁建筑物提取[J]. 遥感信息, 2011(5): 81-85)
- [50] Wu Jian, Chen Peng, Liu Yaolin, et al. Method of Earthquake Collapsed Building Information Extraction Based on High-Resolution Remote Sensing[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2013, 29(3): 35-38(吴剑, 陈鹏, 刘耀林, 等. 震害损毁建筑物高分辨率遥感信息提取方法[J]. 地理与地理信息科学, 2013, 29(3): 35-38)
- [51] Tu Jihui, Sui Haigang, Feng Wenqing, et al. Detection of Damaged Areas Based on Visual Bag-of-Words Model from Aerial Remote Sensing Images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(5): 691-696(涂继辉, 眭海刚, 冯文卿, 等. 利用词袋模型检测建筑物顶面损毁区域[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(5): 691-696)
- [52] Cha Y J, Choi W, Büyüköztürk O. Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, 32(5): 361-378
- [53] Chen Qihao, Nie Yuliang, Li Linlin, et al. Buildings Damage Assessment Using Texture Features of Polarization Decomposition Components[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(6): 955-965(陈启浩, 聂宇靓, 李林林, 等. 极化分解后多纹理特征的建

- 筑物损毁评估[J]. 遥感学报, 2017, 21(6):955-965)
- [54] Guo H, Li X, Zhang L. Study of Detecting Method with Advanced Airborne and Spaceborne Synthetic Aperture Radar Data for Collapsed Urban Buildings from the Wenchuan Earthquake Earthquake [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2009, 3(1): 131-136
- [55] Liu Yunhua, Qu Chunyan, Shan Xinjian, et al. Application of SAR Data to Damage Identification of the Wenchuan Earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2010, 32(2): 214-223, 256(刘云华, 屈春燕, 单新建, 等. SAR 遥感图像在汶川地震灾害识别中的应用[J]. 地震学报, 2010, 32(2):214-223, 256)
- [56] Vu T T, Matsuoka M, Yamazaki F. LiDAR-Based Change Detection of Buildings in Dense Urban Areas [C]. IGARSS 2004, Anchorage, AK, USA, 2004
- [57] Wang Caifeng. Detection of Collapsed Building by Classifying Airborne Laser Scanner Data [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013(王彩凤. 利用机载 LiDAR 点云提取损毁建筑物的方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2013)
- [58] Cheng Liang, Gong Jianya. Building Boundary Extraction Using Very High Resolution Images and LiDAR[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(3):391-393(程亮, 龚健雅. LiDAR 辅助下利用超高分辨率影像提取建筑物轮廓方法[J]. 测绘学报, 2008, 37(3):391-393)
- [59] Deng Fei, Xu Guojie, Feng Chen, et al. Building Reconstruction Using LiDAR Data and Airborne Images[J]. *Journal of Geomatics*, 2010, 35(1): 35-37(邓非, 徐国杰, 冯晨, 等. LiDAR 数据与航空影像结合的建筑物重建[J]. 测绘地理信息, 2010, 35(1):35-37)
- [60] Yu Haiyang, Cheng Gang, Zhang Yumin, et al. The Detection of Earthquake-Caused Collapsed Building Information from LiDAR Data and Aerophotograph[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2011, 23(3): 77-81(于海洋, 程钢, 张育民, 等. 基于 LiDAR 和航空影像的地震灾害倒塌建筑物信息提取[J]. 国土资源遥感, 2011, 23(3): 77-81)
- [61] Huang Shusong, Dou Aixia, Wang Xiaoqing, et al. Building Damage Feature Analyses Based on Post-Earthquake Airborne LiDAR Data[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2016, 38(3):467-476(黄树松, 窦爱霞, 王晓青, 等. 基于震后机载激光雷达点云的建筑物破坏特征分析[J]. 地震学报, 2016, 38(3): 467-476)
- [62] Wang Jinxia, Dou Aixia, Wang Xiaoqing, et al. The Ground-Objects Classification Based on Post-Earthquake Airborne LiDAR Data[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2017, 12(3): 677-689(王金霞, 窦爱霞, 王晓青, 等. 地震后机载 LiDAR 点云的地物区分方法研究[J]. 震灾防御技术, 2017, 12(3):677-689)
- [63] Gerke M, Kerle N. Automatic Structural Seismic Damage Assessment with Airborne Oblique Pictometry Imagery [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2011, 77(9):885-898
- [64] Tu J, Sui H, Feng W, et al. Detecting Facade Damage on Moderate Damaged Type from High-Resolution Oblique Aerial Images[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(12): 5 598-5 607
- [65] Wang Y, Schultz S, Giuffrida F. Pictometry's Proprietary Airborne Digital Imaging System and Its Application in 3D City Modelling[J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37 (B1): 1 065-1 070
- [66] Qu Lin, Feng Yang, Zhi Lingmei, et al. Study on Real 3-D Modeling of Photographic Data Based on UAV[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2015, 38(3):38-39(曲林, 冯洋, 支玲美, 等. 基于无人机倾斜摄影数据的实景三维建模研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(3):38-39)
- [67] Xiao J, Gerke M, Vosselman G. Building Extraction from Oblique Airborne Imagery Based on Robust Façade Detection[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 68: 56-68
- [68] Huang Min'er, Du Zhiqiang, Zhu Qing, et al. 3D Building Facades and Roofs Objects Extraction from Pixel Height Map[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39 (10): 1 221-1 224(黄敏儿, 杜志强, 朱庆, 等. 利用像素高度图的三维建筑物屋顶和立面提取方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(10): 1 221-1 224)
- [69] Zhou Xiaomin, Meng Xiaolin, Zhang Xueping, et al. A Method for Urban Real 3D Model Building Based on Oblique Photogrammetry[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(9):159-163(周晓敏, 孟晓林, 张雪萍, 等. 倾斜摄影测量的城市真三维模型构建方法[J]. 测绘科学, 2016, 41(9): 159-163)
- [70] Kim H T, Kim S B, Go J S, et al. Building 3D Geospatial Information Using Airborne Multi-looking Digital Camera System[J]. *Journal of Convergence Information Technology*, 2010, 5(1): 15-22
- [71] Qiu Chunxia, Dong Qiankun, Liu Ming. Using Tilt

- Images to Build 3D Model and Optimization Model [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017 (5):35-39(邱春霞, 董乾坤, 刘明. 倾斜影像的三维模型构建与模型优化[J]. 测绘通报, 2017(5): 35-39)
- [72] Li Weiwei, Shuai Xianghua, Liu Qin. Building Damage Characteristics Analysis Based on the Three-Dimensional Image from Oblique Photography[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(2):152-158(李玮玮, 帅向华, 刘钦. 基于倾斜摄影三维影像的建筑物震害特征分析[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(2):152-158)

Application of Remote Sensing Technology in Earthquake-Induced Building Damage Detection

SUI Haigang¹ LIU Chaoxian¹ HUANG Lihong¹ HUA Li²

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 College of Resources & Environment, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China

Abstract: As one important part of post-earthquake loss assessment, building damage detection has important significance for understanding the disaster in time, implementing the emergency response, and post-disaster reconstructing. In recent years the development of the multi-platform remote sensing and the high-resolution remote sensing technology have provided opportunities to building damage detection with high accuracy. In this paper, firstly, the basic building damage characteristics and the concrete classification criteria are introduced. Then, the common damage detection methods at home and abroad based on the remote sensing technology are concluded, including the single-temporal image detection of the post-earthquake, the change detection between the pre-earthquake and the post-earthquake images, and the damage detection based on the multi-sources data. Limitations and drawbacks of these methods are proposed. Finally, combining with some cutting-edge technologies in remote sensing domain, the latest research progress of building damage detection based on the high-resolution remote sensing technology, synthetic aperture radar technology, light detection and ranging technology, and oblique aerial photography technology are summarized in detail.

Key words: earthquake; remote sensing technology; building damage; multi-source remote sensing images; three-dimensional features

First author: SUI Haigang, PhD, professor, specializes in remote sensing, GIS and disaster emergency response. E-mail: haigang_sui@263.net

Corresponding author: LIU Chaoxian, PhD. E-mail: cx_leo@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41771457; the National Key Research and Development Program of China, No. 2018YFB10046.