

DOI:10.13203/j.whugis20150490



文章编号:1671-8860(2019)01-0125-07

利用高分辨率光学遥感图像检测震害损毁建筑物

叶昕¹ 秦其明¹ 王俊¹ 郑小坡¹ 王建华¹

¹ 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京, 100871

摘要:地震发生后,利用高分辨率遥感图像进行建筑物损毁检测,有利于快速评估灾害损失。在分析损毁建筑物梯度分布的基础上,提出了一种利用梯度局部空间统计检测震害损毁建筑物的方法。首先用 Prewitt 算子提取图像梯度信息;然后对梯度图像进行局部空间统计,统计各建筑物屋顶内部梯度的空间相关性,得到初步损毁检测结果;最后,在先验知识的指导下进行极小值分析和阴影检测,进一步修正建筑物损毁检测结果。分别以玉树地震后的 Quickbird 卫星遥感图像和盈江地震后的光学航空图像为例进行实验,结果表明,利用梯度局部空间统计检测震害损毁建筑物的方法效果优于传统损毁检测方法,总体精度达到 80% 以上,能够有效检测损毁建筑物。

关键词:损毁建筑物;遥感图像;梯度;局部空间统计;地震

中图分类号:P237.3

文献标志码:A

地震是一种严重危害人类生命财产安全的自然灾害,能够在短时间内造成巨大破坏。同时,地震导致的建筑物损毁也会给城市地区带来威胁^[1]。遥感技术能够第一时间提供大尺度灾区图像数据,帮助人们及时准确地获取灾区信息。目前,利用高分辨率遥感图像检测地震后的损毁信息已成为研究的热点^[2],该方法不仅能够帮助救灾人员快速进行灾情应急评估,还有利于后续救灾工作的组织开展。

现有的遥感建筑物损毁检测方法包括对地震前后多时相遥感图像进行变化检测,或者直接从地震后图像中检测损毁建筑物两种方法。由于数据源和时效性的限制,合适的震前数据往往难以快速获取^[1],因此,发展仅利用地震发生后的高分辨率遥感图像来判断的方法显得尤为重要。此方法大致可分为三类:阴影检测方法、边缘检测方法以及纹理提取方法。阴影检测方法是通过分析遥感图像中建筑物与其阴影之间的关系来判断建筑物是否受损。如 Tong 等^[3]首先利用地理信息数据中存储的建筑物面积、高度等信息构建三维模型,然后根据太阳高度角计算出建筑物的理论阴影区域,与图像中的实际阴影区域进行对比,以此检测损毁建筑物,取得了较高的精度;Turker

等^[4]根据梯度信息将图像中的阴影边缘与建筑物矢量多边形进行叠加,通过检测建筑物边缘处的阴影是否完整进行建筑物损毁检测;Iwasaki 等^[5]根据阴影长度,利用几何关系计算建筑物在地震发生前后的高度变化,并以此判断建筑物是否受损,该方法需要事先手动划定阴影范围。阴影检测方法要求准确提取建筑物阴影信息,在房屋密集的城市区域,遮挡覆盖的情况严重,阴影提取难度很大,精度难以保证。如果采取人工标记阴影的方法,将大大降低算法效率。不仅如此,只有部分严重损毁甚至完全损毁的建筑物会出现阴影变化,其他类型的损毁建筑物难以通过阴影分析方法提取出来。边缘检测方法主要利用建筑物边缘处的图像梯度特征,通过分析建筑物边界的完好程度进行建筑物损毁检测。如 Turker 等^[6]在建筑物边缘的内、外邻域中分别洒下种子点,通过分水岭分割结果分析建筑物边缘的完整性,进而检测损毁建筑物;Guler 等^[7]首先对遥感图像进行线段提取并编组,将结果与建筑物矢量边界进行对比,判断建筑物的边界是否受损。边缘检测方法容易受到噪声的干扰,鲁棒性有待提高,并且未考虑建筑物的内部破损状况。由于建筑物倒塌会产生大量的破损瓦砾,导致建筑物的纹理规则性

收稿日期:2017-09-12

项目资助:高分辨率对地观测系统重大专项(11-Y20A05-9001-15/16, 11-Y20A32-9001-15/17);国家高技术研究发展计划(863 计划)(2012AA121305)。

第一作者:叶昕,博士,主要从事遥感图像处理研究。lanlang524@126.com

通讯作者:秦其明,博士,教授。qminqinpu@163.com

受到破坏,其纹理密度、纹理方向等都会有较大变化。因此,可以利用纹理空间展布的各种物理量作为特征参数,对震害图像进行空间纹理分析,提取震害信息^[8]。如 Duan 等^[9]利用灰度共生矩阵提取图像纹理信息,基于纹理变化与面向对象方法,从灾后遥感图像中自动识别损毁建筑物;Summer 等^[10]在分析了损毁建筑物的梯度分布情况后,提出利用梯度方向方差作为描述损毁建筑物纹理信息的特征参数,设定参数阈值检测建筑物损毁信息;李祖传等^[11]研究了不同尺度下的共生概率纹理特征和形态剖面导数特征,提出了一种融合纹理与形态特征提取地震倒塌房屋信息的方法;Vu 等^[12-13]提出了一种基于边缘的纹理特征,结合形态学多尺度分析下的无监督分类将其用于损毁区域的提取。纹理提取方法具有最广的应用范围,适用于大多数类别的损毁建筑物。但在高分辨率图像中,地物细节清晰可见,地物内部或周围目标都可能构成和损毁建筑物相似的纹理特征。由于邻域统计特征的纹理分析方法中的各个参数必须经过具体实验才能确定特征参数的有效性,因此目前尚处于经验性参数阶段,无确定有效的特征参数可用^[14]。

本文通过分析损毁建筑物在高分辨率遥感图像中的梯度分布特性,提出了一种基于梯度局部空间统计的建筑物震害损毁检测方法。一般来说,对于完好建筑物,其内部光谱分布均匀,梯度值较小且呈现低值聚集状况;而对于损毁建筑物,其屋顶受损,光谱分布杂乱,空间相关性遭到破坏。本文通过统计梯度图像的局部空间相关性,改进了传统局部莫兰指数(local Moran's I, LMI)^[15]参数的计算方式,并引入新型特征参数梯度局部莫兰指数(gradient local Moran's I, GLMI),用以检测建筑物损毁状况。分析发现,完好建筑物的 GLMI 数值较大,而损毁建筑物的 GLMI 数值较小,建筑物目标的 GLMI 数值能够用于判断其是否受损。此外,对于一些特殊情况,还将采用极小值分析和阴影检测方法进一步对结果进行修正。实验结果表明,本文方法比现有方法精度更高,能够有效地从高分辨率遥感图像中检测出损毁建筑物。

1 损毁检测算法流程

梯度信息能够较好地反映遥感图像光谱值变化的程度。对于完好建筑物,其屋顶光谱均一,梯度值较低且分布规则,具有较强的空间相关性;而

损毁建筑物的光谱变化较大,梯度分布杂乱,空间相关性不显著。本文提出的方法流程如图 1 所示,主要分为 3 个步骤:① 梯度计算:利用 Prewitt 算子获取图像的梯度信息;② 梯度局部空间分析:叠加梯度图像与建筑物矢量,进行局部空间统计,根据统计结果计算各建筑物目标的值并检测损毁状况;③ 后处理:针对部分误判情况,采用极小值分析与阴影检测两种后处理方法对结果加以修正,得到最终建筑物损毁检测结果。利用目视解译方法对检测结果进行精度评价,以验证本文方法的有效性。

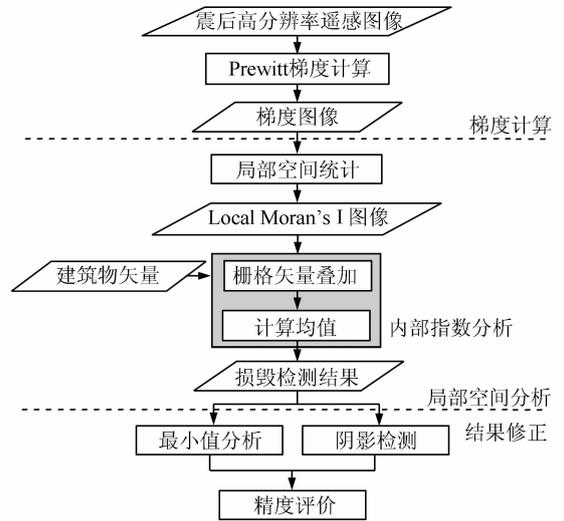


图 1 建筑物损毁检测方法流程图

Fig. 1 Flowchart of Building Damage Detection

1.1 图像梯度计算

本文选用 Prewitt 算子计算遥感图像的梯度值。Prewitt 算子是一种离散的一阶微分算子,其原理是在图像空间利用两个方向模板(水平方向、垂直方向)与图像进行邻域卷积,从而获得遥感图像的梯度信息。

设遥感图像坐标 (x, y) 处的光谱值为 $I(x, y)$,梯度的水平分量为 $H(x, y)$,垂直分量为 $V(x, y)$,则梯度值 $G(x, y)$ 的计算式为:

$$G(x, y) = \sqrt{H(x, y)^2 + V(x, y)^2} \quad (1)$$

$H(x, y)$ 与 $V(x, y)$ 的计算式分别为:

$$H(x, y) = [I(x+1, y-1) + I(x+1, y) + I(x+1, y+1)] - [I(x-1, y-1) + I(x-1, y) + I(x-1, y+1)] \quad (2)$$

$$V(x, y) = [I(x-1, y-1) + I(x, y-1) + I(x+1, y-1)] - [I(x-1, y+1) + I(x, y+1) + I(x+1, y+1)] \quad (3)$$

经过本步骤计算得到梯度图像,在此基础上进行建筑物灾损检测。

1.2 图像局部空间特征分析

在遥感图像中,损毁建筑物的梯度分布杂乱,而完好建筑物的梯度分布均一,空间相关性高且呈现低值聚集现象。本文采用 LMI 来衡量相邻像素梯度值间的相关程度。LMI 主要用于探测空间地物聚集状况,当 LMI 值大于数学期望并且有统计学意义时,提示存在局部的正空间相关。反映在图像中的特征为,若存在极大/极小值聚集的情况,则对应区域的 LMI 值较大,局部空间统计结果图像中对应的灰度值较高。因此,本文通过计算梯度图像的 LMI 值来评价相邻像素梯度值之间的空间相关性。LMI 值的计算式为:

$$LMI(d) = \frac{\sum_i \sum_j c_{ij} w_{ij}}{s^2 \sum_i \sum_j w_{ij}} \quad (4)$$

式中, s^2 为空间权矩阵内属性值的方差; d 为间隔距离; w_{ij} 为空间权重矩阵,其值为 1 和 0,代表空间单元 i 和 j 之间的影响程度; c_{ij} 为空间单元 i 和 j 的属性值与间隔范围内平均属性值之差的乘积^[16]。在本文研究中,空间单元为遥感图像像素, i, j 代表像素在图像中的位置,间隔距离 $d = 1$,空间权重矩阵选择上、下、左、右 4 个方向的相邻像素进行统计,则有:

$$w_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & / & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

与传统计算方法不同,本文在计算指数时,用单个建筑物内部的梯度方差替代全图梯度方差,这使得统计结果能够更好地反映单个建筑物内的相关性。在得到局部空间自相关统计结果图像后,将其与建筑物边界矢量进行叠加,并计算各建筑物内部的 GLMI 均值 ($GLMI_{mean}$)。如上文所述,由于完好建筑物内部梯度分布规则,空间相关性高,存在低值聚集现象,对应的 $GLMI_{mean}$ 较大;损毁建筑物内部梯度分布杂乱,空间相关性低,则 $GLMI_{mean}$ 较小。设定阈值 $GLMI_T$,对于图像中的第 i 个建筑物,如果其 $GLMI_{mean} > GLMI_T$,则判断该建筑物为完好目标;否则,判断其为损毁目标,得到初始建筑物灾损检测结果。

1.3 初始结果修正

建筑物损毁类型多样,对于一些特殊的损毁类型建筑物,仅对 $GLMI_{mean}$ 设定阈值难以准确识别。对结果进行分析发现,误判的主要原因是对于部分轻微损毁的建筑物,屋顶的大部分区域保持完好,仅有少部分垮塌或破坏, $GLMI_{mean}$ 高于严重损毁或完全损毁的建筑物,容易被错误检测为

完好建筑物。将建筑物内 GLMI 值显著低于 $GLMI_{mean}$ 的像素称为 GLMI 极小值像素,分析建筑物内的极小值像素个数,能够减少误判。此外,建筑物内部的阴影也会带来干扰,其梯度空间相关性较强,提高了建筑物的 $GLMI_{mean}$,因此针对内部阴影也需要进行判断。本文采用极小值分析和阴影检测两种后处理方法来减少误判问题,对初始结果进行修正,后处理流程图如图 2 所示。

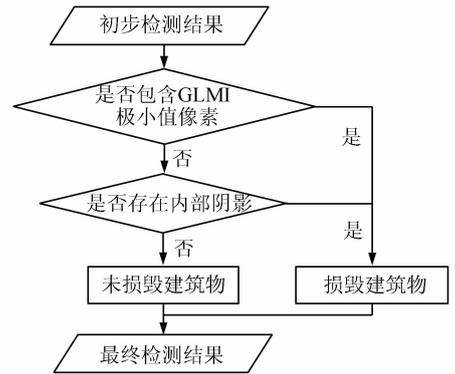


图 2 初始结果修正流程图

Fig. 2 Flowchart of Initial Result Correction

1) 极小值分析

尽管部分损毁建筑物总体 $GLMI_{mean}$ 较高,但损毁区域内往往存在 GLMI 值低的像素,如图 3 所示。

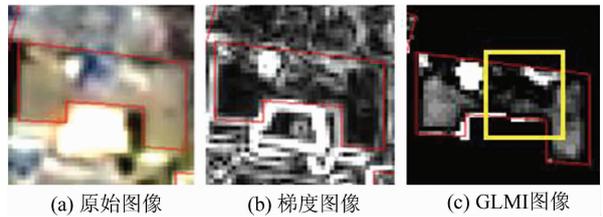


图 3 存在极小值的部分损毁建筑物

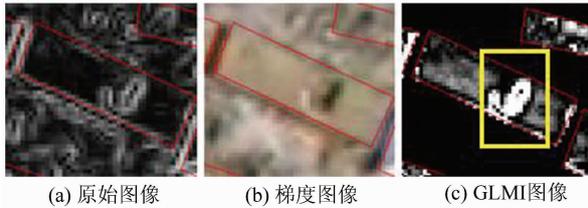
Fig. 3 Partly Damage Building with Minimum Value

从图 3(c) 黄框所示的损毁区域可以看出,存在大量 GLMI 值极低的像素。因此,设定 GLMI 阈值 $GLMI_{min}$,极小值像素满足 $GLMI \leq GLMI_{min}$ 。统计各建筑物内部 GLMI 极小值像素的数量 N_{min} ,同时设定建筑物内部 GLMI 极小值像素数量阈值 T_n ,对于第 i 个建筑物,当满足条件 $N_{min} \leq T_n$,则判断为完好建筑物,否则为损毁建筑物。

2) 阴影检测

还存在一种特殊的损毁建筑物类型,即建筑物内部垮塌,屋顶出现空洞,这类损毁建筑物会在坍塌区域出现阴影,如图 4 所示。

图 4(c) 黄框中标记出了建筑物垮塌部分及其对应的阴影区域。可以看出,由于阴影较强的



(a) 原始图像 (b) 梯度图像 (c) GLMI图像

图4 有阴影的部分损毁建筑物

Fig. 4 Partly Damage Building with Shadow

空间相关性,而导致屋顶受损区域的GLMI值明显大于屋顶完好的区域。与建筑物自身的阴影不同,屋顶垮塌空洞导致的阴影往往不存在遮挡等干扰因素,相对更容易提取,因此,可以利用阴影检测辅助判断建筑物的损毁状况。遥感图像中的阴影像素具有光谱值较低和LMI指数较大等特征。这是因为阴影在遥感图像中的相邻像素间具有较高的空间相关性,存在低值聚集现象。需要说明的是,此处的LMI值是原始遥感图像灰度值的局部空间统计结果,而检测损毁建筑物时选用的是图像梯度的局部空间统计结果。设定光谱值阈值 T_{gray} 和LMI指数阈值 T_{LMI} ,对于遥感图像中 (x, y) 处的像素点,当同时满足条件 $G(x, y) \leq T_{\text{gray}}$ 和 $\text{LMI}(x, y) > T_{\text{LMI}}$ 时,将其标记为阴影像素。统计各建筑物内部阴影像素数量 N_{shadow} ,设定建筑物内部的阴影像素数量阈值 T_{shadow} ,对于第 i 个建筑物,当满足条件 $N_{\text{shadow}} \leq T_{\text{shadow}}$ 时,标记其为完好建筑物,否则为损毁建筑物。经过上述两个步骤,得到最终建筑物损毁检测结果。

2 震害建筑物损毁检测

为了验证本文方法的有效性,设计了震害建筑物损毁检测实验,并参考目视解译结果对本文方法进行精度评价。

2.1 实验数据

本文选用了7.1级玉树地震后结古镇的Quickbird卫星遥感图像(图5(a))和5.8级盈江地震后县城周边的航空光学遥感图像(图6(a))作为数据源开展实验。Quickbird卫星图像的空间分辨率为0.61 m,区域内共有101栋建筑物,其中损毁建筑物46栋和完好建筑物55栋;航空图像空间分辨率为0.1 m,区域内共有28栋建筑物,其中损毁建筑物12栋和完好建筑物16栋。本文研究区内同时存在平屋顶建筑物和坡屋顶建筑物,同时,建筑物的损毁类型多样,包括瓦砾破碎、结构倒塌等^[17]。

2.2 实验步骤与结果

利用Prewitt算子计算得到梯度图像,然后进行局部空间统计,得到梯度LMI图像。在LMI图像中,完好建筑物的灰度值较高,损毁建筑物的灰度值较低。本文通过迭代法设定GLMI阈值,迭代法的思路是:首先求出指数的最大值和最小值,初始阈值为两者均值;然后根据初始阈值进行分类,分别计算两类均值并求出新阈值,迭代上述操作直到阈值不再变化。对于第 i 个建筑物,如果其 $\text{GLMI}_{\text{mean}}$ 大于阈值,则判断其为完好目标;否则为损毁目标,得到初步检测结果。

分析发现,大部分建筑物能够被正确检测,但存在一些误判的情况,有部分损毁建筑物被错误识别为完好建筑物。对初步检测结果按如下步骤进行修正。

1) 设定GLMI极小值阈值 GLMI_{min} ,建筑物内部GLMI极小值像素数量的阈值 T_n (超过全部屋顶像素个数的15%),将建筑物内GLMI极小值像素数量过多的建筑物标记为损毁建筑物;

2) 设定光谱值阈值 T_{gray} (取图像灰度分布的前5%)、光谱LMI阈值 T_{LMI} (取图像灰度分布的后5%)以及建筑物内部的阴影像素数量阈值 T_{shadow} (取全部屋顶像素个数的5%),检测出遥感图像中的阴影像素,将建筑物内阴影像素过多的建筑物标记为损毁建筑物,得到最终建筑物损毁检测结果,如图5(b)、6(b)所示,其中损毁建筑物标记为红色,完好建筑物标记为蓝色。

2.3 精度评价与算法对比

采用误差矩阵对检测结果进行精度评价,将算法检测结果与目视解译结果进行比对。

本文方法从两个实验区共129栋建筑物中正确检测出了108栋,包括49栋损毁建筑物,59栋完好建筑物,总体精度达到83.72%。其中,实验区5(a)中101栋建筑物中正确检测出了84栋,包括38栋损毁建筑物,46栋完好建筑物,精度为83.17%;实验区6(a)中28栋建筑物中正确检测出了24栋,包括11栋损毁建筑物,13栋完好建筑物,精度为85.71%。

为了更加直观地显示本文方法的精度评价结果,将被正确检测的损毁建筑物标记为红色,被正确检测的完好建筑物标记为蓝色,被漏检的损毁建筑物标记为紫色,被误检的完好建筑物标记为黄色,结果如图5(c)、6(c)所示。

为了进一步证明本文方法的有效性,还与现有的两种经典的建筑物损毁检测方法(Turker等^[4]方法、Sumer等^[10]方法)进行了对比,这两种

方法与本文方法输入的数据相同(地震后遥感图像和建筑物矢量数据),具有较强的可比性。其中,Turker 等^[4]提出的方法通过分析边界的梯度强度判断建筑物是否完好,Sumer 等^[10]提出的方法通过分析屋顶的光谱值和梯度方向的分布情况检测损毁建筑物,两者损毁检测结果分别如图 5(d)、5(e)和图 6(d)、6(e)所示。

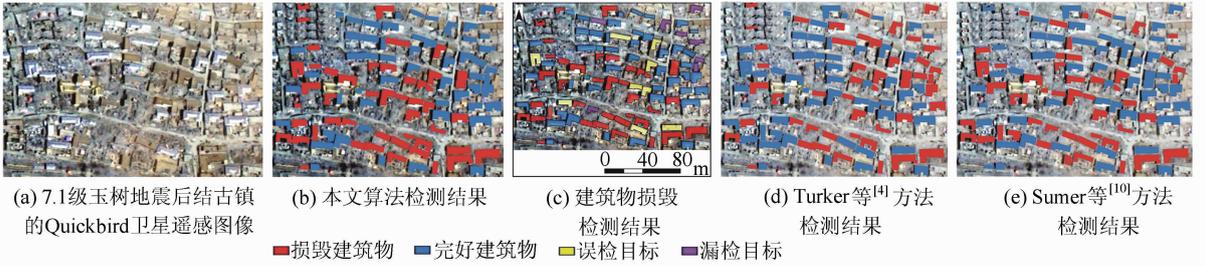


图 5 研究区 1 遥感图像及其检测结果

Fig. 5 Remote Sensing Image of Study Area 1 and Its Detection Results

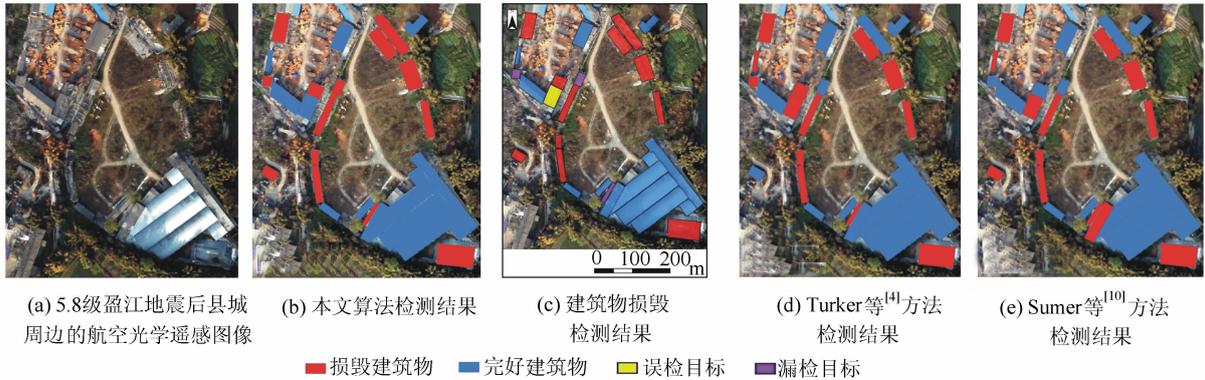


图 6 研究区 2 遥感图像及其检测结果

Fig. 6 Remote Sensing Image of Study Area 2 and Its Detection Results

表 1 本文方法与现有方法精度对比

Tab. 1 Comparison of the Performance

检测结果	Turker 等 ^[4] 方法	Sumer 等 ^[10] 方法	本文方法
损毁建筑物/栋	44	41	49
未损毁建筑物/栋	55	50	59
合计/栋	99	91	108
Kappa 系数	0.53	0.41	0.67
总体精度/%	76.74	70.54	83.72

3 结 语

本文根据高分辨率遥感图像中建筑物屋顶的梯度分布特征,提出了一种震害损毁建筑物检测方法。实验结果表明,本文方法精度达到 80% 以上,优于同类经典方法,能够有效检测损毁建筑物。

结果分析发现,本文方法对屋顶结构简单的平顶建筑物具有很好的识别效果。但对结构复杂的坡顶建筑物,由于其梯度的局部空间相关性不

显著,容易被错误识别为损毁目标。如何提高本文方法对复杂屋顶结构的检测精度,是后续研究的方向。此外,建筑物的尺寸对检测结果也存在一定影响,对于较大的建筑物,空间相关性更显著,即使存在少量图像噪声,也能够取得准确的结果;而较小的建筑物受到噪声的影响更大,结果精度有所降低。同时,在后处理步骤中,较大的建筑物的极小值检测和阴影提取效果都更准确,而小型建筑物出现误判的情况则相对更多。此外,从两组不同空间分辨率图像的实验中还发现,尽管高空间分辨率带来了更多的细节信息,同时也引入了更强的空间异质性,这对低矮瓦房的检测结果影响尤为明显。因此,使用面向对象方法,将屋顶图像分割成若干有语义信息的像素块后再进行处理^[17],有望优化算法效果。另外,本方法涉及多个阈值的选取,尽管给出了不同阈值的设置方法,但其有效性和通用性还有待进一步分析。后续工作将围绕简化参数设置、提高方法自动化程度的

方向开展。

除此之外,由于数据源的限制,本文方法只能检测建筑物屋顶的损毁状况,而对建筑物的高度不敏感,不适用于检测屋顶完好但结构受损的 pancake collapse^[18]类型损毁建筑物。该类建筑物的承重结构已被破坏,建筑物墙面彻底倒塌,但屋顶仍然完好,难以仅从垂直观测的可见光遥感图像中进行判别。有学者融合可见光图像和合成孔径雷达图像来进行检测^[19],倾斜摄影技术也被用于提取建筑物立面的损毁信息^[20]。在未来的研究中,将进一步分析损毁建筑物在不同数据源中的表现特征,结合多源、多维度遥感数据,提出适用范围更广的建筑物损毁检测方法。

参 考 文 献

- [1] 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(7): 85-99
- [2] Sui Haigang, Hua Feng, Fan Yida, et al. Road Damage Extraction from High-Resolution SAR Image Road Based on GIS Data and Bayes Network [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(5): 578-583 (眭海刚, 华凤, 范一大, 等. 利用 GIS 与贝叶斯网络进行高分辨率 SAR 影像道路损毁信息提取[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(5): 578-583)
- [3] Tong X, Lin X, Feng T, et al. Use of Shadows for Detection of Earthquake-Induced Collapsed Buildings in High-Resolution Satellite Imagery[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 79(5): 53-67
- [4] Turker M, San B T. Detection of Collapsed Buildings Caused by the 1999 Izmit, Turkey Earthquake Through Digital Analysis of Post-Event Aerial Photographs [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(21): 4 701-4 714
- [5] Iwasaki Y, Yamazaki F. Detection of Building Collapse from the Shadow Lengths in Optical Satellite Images[C]. The 32nd Asian Conference on Remote Sensing, Taipei, China, 2011
- [6] 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
- [7] Guler M A, Turker M. Detection of the Earthquake Damaged Buildings from Post-event Aerial Photographs Using Perceptual Grouping[J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2004, 35(B3): 1-4
- [8] Chen Wenkai, He Shaolin, Zhang Jingfa, et al. A Review on Methods of Extracting Earthquake Damage Information Using Remote Sensing Technology[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2008, 30(1): 88-93 (陈文凯, 何少林, 张景发, 等. 利用遥感技术提取震害信息方法的研究进展[J]. 西北地震学报, 2008, 30(1): 88-93)
- [9] Duan F, Gong H, Zhao W. Collapsed Houses Automatic Identification Based on Texture Changes of Post-Earthquake Aerial Remote Sensing Image[C]. The 18th IEEE International Conference on Geoinformatics, Beijing, China, 2010
- [10] Sumer E, Turker M. Building Damage Detection from Post-Earthquake Aerial Imagery Using Building Grey-Value and Gradient Orientation Analyses [C]. The 2nd IEEE International Conference on Recent Advances in Space Technologies, Istanbul, Turkey, 2005
- [11] 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)
- [12] Vu T T, Ban Y. Context-based Mapping of Damaged Buildings from High-Resolution Optical Satellite Images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(13): 3 411-3 425
- [13] Yamazaki F, Vu T T, Matsuoka M. Context-based Detection of Post-Disaster Damaged Buildings in Urban Areas from Satellite Images [C]. The 4th IEEE Urban Remote Sensing Joint Event, Paris, France, 2007
- [14] Dou Aixia. Study on Seismic Damage Change Detecting Technique Based on Remote Sensing Images [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2003 (窦爱霞. 震害遥感图像变化检测技术研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2003)
- [15] Anselin L. Local Indicators of Spatial Association—LISA[J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115
- [16] Zhu Zhongzheng, Su Wei. The Analysis of the Classification of SPOT 5 Image Based on Local Spatial Statistics [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(5): 957-972 (朱钟正, 苏伟. 基于局部空间统计分析的 SPOT 5 影像分类[J]. 遥感学报,

2011, 15(5): 957-972)

- [17] 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, doi:10.13203/j.whugis20150665 (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, doi:10.13203/j.whugis20150665)
- [18] Schweier C, Markus M. Classification of Collapsed Buildings for Fast Damage and Loss Assessment [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2006, 4 (2): 177-192
- [19] Zhang Bin, Ma Guorui, Yu Jian, et al. Change Detection of Low Buildings After Earthquake Using

Very-High Resolution Pre-event Optical and Post-event SAR Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(2): 239-243 (张斌, 马国锐, 余健, 等. 利用灾前光学影像和灾后 VHR SAR 影像对地震低层建筑物进行变化检测[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2014, 39(2): 239-243)

- [20] Tu Jihui, Sui Haigang, Lv Ruipeng, et al. Building Facade Damage Detection Based on the Gini Index from Oblique Aerial Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, doi:10.13203/j.whugis20150376 (涂继辉, 眭海刚, 吕柄蓬, 等. 基于基尼系数的倾斜航空影像中建筑物立面损毁检测[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2017, doi:10.13203/j.whugis20150376)

Detecting Damaged Buildings Caused by Earthquake from Remote Sensing Image Using Local Spatial Statistics Method

YE Xin¹ QIN Qiming¹ WANG Jun¹ ZHENG Xiaopo¹ WANG Jianhua¹

¹ Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: Damaged buildings detection from high-resolution remote sensing image helps to quick disaster losses evaluation after the earthquake. This paper presents a new method to detect damaged buildings using spectral gradient local spatial statistics, based on the analysis of gradient distribution characteristics of damaged buildings in the high-resolution remote sensing image. Firstly, spectral gradient image is obtained by Prewitt gradient operator. Secondly, local spatial statistics is used to evaluate the spectral gradient correlation within the roofs, and to generate the preliminary results. At last, the post processing steps, including minimal value analysis and shadow detection, are taken to optimize preliminary results and obtain the final results. The experiment results using a Quickbird image of Yushu earthquake and optical aerial image of Yingjiang earthquake demonstrate the effectiveness of the proposed method, which provides an overall accuracy of higher than 80%, are better than traditional methods.

Key words: damaged building; remote sensing image; gradient; local spatial statistics; earthquake

First author: YE Xin, PhD, specializes in remote sensing image processing. E-mail: lanlang524@126.com

Corresponding author: QIN Qiming, PhD, professor. E-mail: qmqinpk@163.com

Foundation support: China National Major Project of High-Resolution Earth Observation, Nos.11-Y20A05-9001-15/16, 11-Y20A32-9001-15/17; the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China, No.2012AA121305.