刘定操,尚展垒.利用遥感图像对震损建筑结构变形检测的识别研究[J].地震工程学报,2019,41(5):1380-1384.doi:10.3969/j.issn.1000－0844.2019.05.1380
LIU Dingcao,SHANG Zhanlei.Recognition of Deformation Detection of Earthquake-damaged Building Structures Using Remote Sensing Images[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(5):1380-1384.doi:10.3969/j.issn.1000－0844.2019.05.1380

利用遥感图像对震损建筑结构变形检测的识别研究

刘定操[1], 尚展垒[2]
(1. 河南经贸职业学院 计算机工程学院, 河南 郑州 450000;
2. 郑州轻工业大学 工程训练中心, 河南 郑州 450000)

摘要: 为识别震后建筑变形损坏状况,提出震损建筑结构变形检测的遥感图像识别分析方法。利用无人机采集震灾区域的遥感图像,将建筑结构变形检测问题转变为构件间坐标测量问题,提取所采集遥感图像中样本矢量点,将其划分为不同种类区域,在此基础上对图像进行聚类分割,以获得震后图像的不同类别建筑结构特征,实现识别不同样本矢量点的地震受灾情况。通过实验分析发现,所提出的图像识别分析方法在一定程度上可以识别出损毁建筑物,但仍需要进一步研究,以提高其识别精度。

关键词: 图像序列分割; 震损; 结构变形; 检测; 遥感图像
中图分类号: TU317 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000－0844(2019)05－1380－05
DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2019.05.1380

Recognition of Deformation Detection of Earthquake-damaged Building Structures Using Remote Sensing Images

LIU Dingcao[1], SHANG Zhanlei[2]
(*1.College of Computer Engineering, Henan Vocational College of Economics and Trade, Zhengzhou 450000, Henan, China;*
2.Engineering Training Center, Zhengzhou Light Industry University, Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: To identify deformation and damage to buildings after an earthquake, a remote sensing image recognition and analysis method for deformation detection of earthquake-damaged buildings is proposed. Remote sensing images of earthquake disaster areas were collected by UAV, and the problem of building structure deformation detection was transformed into a problem of coordinate measurement between components. Sample vector points in the collected remote sensing images were extracted and divided into different kinds of regions. On this basis, the images were clustered and segmented to obtain the characteristics of different types of building structures in post-earthquake images, thus identifying the earthquake disaster situation of different sample vector points. Through the experimental analysis, it was found that the proposed image recognition and analysis method can identify the damaged buildings to a certain extent, although further research

收稿日期: 2018-12-26
基金项目: 国家自然基金(47852366)
第一作者简介: 刘定操(1976－),男,河南长葛人,硕士研究生,讲师,研究方向:计算机图像处理。E-mail:andund@126.com。

is needed to improve recognition accuracy.

Keywords: image sequence segmentation; earthquake damage; structural deformation; detection; remote sensing image

0　引言

地震发生之后，有关部门会及时开展地震损失评估活动。评估内容主要包含人员伤亡、经济损失和建筑物损坏变形等[1]。在建筑结构损坏变形评估中，结构损伤变形的检测是前提，其能够辅助有关部门迅速确定区域损毁程度，并为政府采取相应补救措施提供支撑。

在实际检测中，相关专家或者工作人员会对震后建筑结构进行实地走访调查[2-3]，并对其具体评定，但过程中需要将所得数据调出进行分析处理，费时费力。当前有关强力下结构损伤变形检测方法较多，如李宏男等[4]以提升大型结构损伤变形检测效率为目的，将静力虚拟变形法引入至结构损伤变形检测中，同时融合序列二次规划法对损伤变形位置予以确定。依据 VDM 运行基本理论，推导出损伤变形因子和虚拟变形之间存在的关联。构建损伤变形应变和实际损伤变形应变目标函数，通过 SQP 算法对目标函数进行优化，以此实现结构损伤变形检测。周泽林等[5]将强震之后的隧道变形与破坏当作检测对象，并对震后隧道的变形和破坏机理进行一系列分析。经分析表明，地震区域的隧道变形空间分布均衡性差，隧道变形空间效应主要局限在 2D 至 3D 之间，且在开挖面限制范围之内，变形产生的主要原因为空间效应与时间效应之间耦合的结果，隧道不同位置变形和破坏模式关联程度很高。

为此，提出了震损结构变形检测的图像识别分析方法，利用无人机拍摄得到的震后遥感图像，对震区受灾情况进行识别研究，以期为震损结果评估以及震区修复提高参考依据。

1　震损建筑结构变形检测

在发生地震的区域，一般震后会采用无人机拍摄震后图像，以此为基础分析受灾区域的震损程度[6]。以 2008 年的汶川地震为例，无人机采集得到的地震灾害后遥感图像如图 1 所示。

对所获取的震后遥感图像进行视觉分析，发现建筑物顶部灰度分布特点发生了不同程度的变化，震损严重的建筑物纹理不规则，且不再具有建筑轮廓；而震损较小的建筑仍具有完整的轮廓，纹理特征较为明显[7]。由此，可以依据图像的纹理特征和灰度变化进行相似度判断，从而聚类处理震后图像。以下主要阐述遥感图像的样本矢量点提取和聚类分割方法，其余细节由于篇幅原因未一一列出。

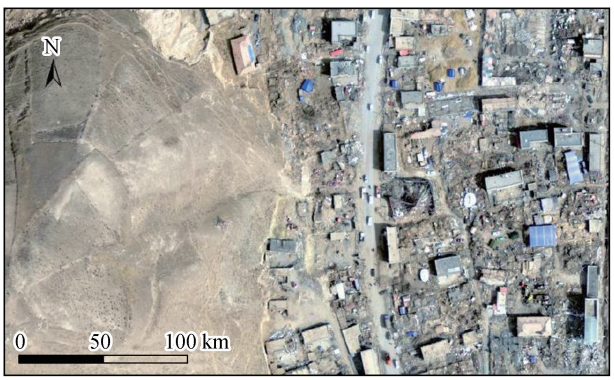

图 1　汶川震后遥感图像

Fig.1　Remote sensing image after Wenchuan earthquake

1.1　震后样本矢量点提取

将结构变形检测问题转变为构件间坐标测量问题，同时采用射影几何有关知识，实现地震后样本矢量点的提取[8-9]。

假设 $x_1,\cdots,x_{n'},y_1,\cdots,y_{n'}$ 分别代表横、纵坐标中已经识别出的边缘点，将其二维坐标当作两个变量，同时减去各自的均值获取的坐标值为：

$$x=[x_1,\cdots,x_{n'}] \tag{1}$$

$$y=[y_1,\cdots,y_{n'}] \tag{2}$$

根据式(1) 和式(2) 计算 x 与 y 协方差矩阵：

$$\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix}\mathrm{cov}(x,x) & \mathrm{cov}(x,y)\\ \mathrm{cov}(y,x) & \mathrm{cov}(y,y)\end{bmatrix} \tag{3}$$

对式(3) 矩阵 $\boldsymbol{F}$ 特征值 λ_1、λ_2 及相应特征向量 $\boldsymbol{e}_1$、$\boldsymbol{e}_2$ 进行计算，则有：

$$\lambda_1=\frac{\boldsymbol{F}}{\boldsymbol{e}_1^2} \tag{4}$$

$$\lambda_2=\frac{\boldsymbol{F}}{\boldsymbol{e}_2^2} \tag{5}$$

对特征值 λ_1、λ_2 进行对比，假设 $\lambda_1>\lambda_2$，那么特征向量 $\boldsymbol{e}_1$ 即为数据主成分。将与最大特征值相应的特征向量 $\boldsymbol{e}_1$ 当作直线方向，并用其确定需要识别检测的直线，以降低变形相关数据的获取难度。

由于真实拍摄过程中很难保障拍摄平面与结构投影平面相互平行，一般拍摄采集到的影像是透视影像，度量特性较差[10]。综上，在测量前，要利用矫正方式将其转换成平行影像。

透视成像过程中通常透视影像与平行影像间有射影转换相关性，在射影平面上利用齐次坐标 $p''=(x_1,x_2,x_3)$、$l''=(l''_1,l''_2,l''_3)$ 分别代表透视影像面上点与直线，$p'''=(x'''_1,x'''_2,x'''_3)$、$l'''=(l'''_1,l'''_2,l'''_3)$ 分别代表平行影像面上点与直线。综上，射影转换相关性可表示为：

$$p'''=H'\cdot p''\cdot\lambda_1 \tag{6}$$

$$l'''=H'\cdot l''\cdot\lambda_2 \tag{7}$$

式中：H' 代表三阶单应矩阵，其能够分解成以下形式：

$$H'=\frac{H'_{\mathrm{p}}H'_{\mathrm{A}}H'_{\mathrm{s}}}{U} \tag{8}$$

式中：H'_{p}代表射影转换矩阵；H'_{A}代表仿射转换矩阵；H'_{s}代表相似转换矩阵。

射影转换矩阵能够将透视影像矫正成平行的影像，不过无法矫正图像中存在的度量特征。仿射转换矩阵仅能够矫正度量特征，不会改变影像和物体正投影层面之间存在的关联，相似转换矩阵仅对图像进行旋转与平移等变换操作，不会影响到度量特征和结构正投影面的相关性。综上，在角度识别检测过程中，不考虑相似转换矩阵，也就不需要考虑归一化所产生的影响。

依据上述计算与分析，要对图像进行射影转换。转换矩阵能够利用与平行影像中两组互相不存在平行特性的线组进行相应直线构建，并对两组平行线消隐点进行计算。这两个消隐点能够判断为一条直线 $l''=(l''_1,l''_2,l''_3)$，则该直线与平行影像面上无穷远直线相互对应。

根据式(8) 可以实现无穷远直线恢复，同时矫正了直线之间相互平行的相关性。至此，直线之间角度相关性还没有被完全恢复，要利用仿射转换予以矫正。

通常情况下，射影几何中随机两条直线 $l''=(l''_1,l''_2,l''_3)$ 与 $m''=(m''_1,m''_2,m''_3)$ 之间的夹角 θ' 余弦计算可表示为：

$$\cos\theta'=\frac{p'''l'''m''V}{\sqrt{(l''C^*_\infty m'')(m''C^*_\infty m'')}} \tag{9}$$

式中：C^*_∞ 代表二次曲线。

假设 $l'''=(l'''_1,l'''_2,l'''_3)$ 和 $m'''=(m'''_1,m'''_2,m'''_3)$ 代表平行影像中两条互为垂直的线，那么有：

$$l'''C^*_\infty m'''=0 \tag{10}$$

假设 $l^{\mathrm{p}}=(l^{\mathrm{p}}_1,l^{\mathrm{p}}_2,l^{\mathrm{p}}_3)$、$m^{\mathrm{p}}=(m^{\mathrm{p}}_1,m^{\mathrm{p}}_2,m^{\mathrm{p}}_3)$ 代表两条直线在仿射影像面中相应直线，那么有：

$$(H'_A C^*_\infty)m^{\mathrm{p}}=l^{\mathrm{p}}\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}\cos\theta' \tag{11}$$

在影像平面上两条直线 $l''=(l''_1,l''_2,l''_3)$、$m''=(m''_1,m''_2,m''_3)$ 历经射影和仿射两方面的转换实现矫正后，也就恢复了和平行影像中相应直线之间存在同样的夹角相关性，从而得到角度表达式：

$$\cos\alpha=\frac{l^{\mathrm{A}}_1m^{\mathrm{A}}_1+l^{\mathrm{A}}_2m^{\mathrm{A}}_2}{\sqrt{(l^{\mathrm{A}}_1+l^{\mathrm{A}}_2)(m^{\mathrm{A}}_1+m^{\mathrm{A}}_2)}}(H'_A C^*_\infty)m^{\mathrm{p}} \tag{12}$$

式中：l^{A}_1、l^{A}_2 与 m^{A}_1、m^{A}_2 代表两条直线在相似影像中的相应直线。利用式(12) 所得夹角实现结构震损变形特征检测，按照不同角度得到不同的样本矢量点，在本文中，设置样本矢量点为植被、道路裸地、建筑物(包括完整建筑物和损毁建筑物)、阴影等五个部分。

1.2 震后遥感图像分割

在提取得到样本矢量点后，对其进行聚类。聚类可将一组给定的震损结构图像中未知类别样本进行聚类，依据图像的纹理特征或灰度，使同一类样本具备较高相似程度而不同于其他类别样本。目前，C 均值聚类法是一种通用性很强的聚类方法，其运行的原理为：先给定一个准则函数，同时任意选取 C 个初始聚类中心，再基于样本和聚类中心之间聚类将样本分至不同类别中，并对该聚类中心进行计算。不断迭代上述过程，一直到准则函数变为最小。通常准则函数会选取样本与聚类中心平方误差值总和。比较典型的分类方法划分界限比较清晰，但在实际操作过程中很少运用这种方法，大多情况下是各类间有一个模糊界限。由此，大多数分类为模糊分类过程，将模糊定义引入至聚类过程中，结合 C 均值聚类法即产生了模糊分类法 FCM。

利用 FCM 聚类法对地震震损结构图像序列进行分割的过程如下所示：

(1) 初始化：对于给定的初始聚类中心数量 C，有 $2\leqslant C<n$，其中 n 代表数据数量。假设迭代停止阈值为 ε，初始化的聚类中心为 V_0。

(2) 更新类别划分矩阵初始聚类 $\boldsymbol{U}^b=[u_{ij}]$：

$$[u_{ij}]=\left[\sum_{n=1}^{C}\left(\frac{C}{V_0}\right)^{1/(n-1)}\right]^{-1} \tag{13}$$

(3) 更新聚类中心 V_{b+1}：

$$V_{b+1}=\frac{\sum_{i=1}^{n}V_0^n}{[u_{ij}]}(1\leqslant i<C) \tag{14}$$

(4) 当 $|V_0-V_{b+1}|\leqslant\varepsilon$ 时，聚类停止，同时输出样本聚类划分矩阵 $\boldsymbol{U}$ 与聚类中心 V。

利用 FCM 对震损结构图像序列进行分割，即利用迭代优化图像像素点与 C 类中心相似程度的目标函数得到局部最大值，以此获取最佳分类结果的过程。当整个过程进行收敛，能够获取各个聚类中心与各个样本隶属各类的隶属值，以隶属值为分割依据，即可完成震损结构图像序列分割。

利用上述震损结构图像序列分割初步提升检测精度，以获得震后图像的不同类别结构特征，为震损结构变形检测奠定基础。

2　实验结果与分析

对上章节得到的震后损伤图像进行 1.1 节和 1.2节的聚类处理和震损结构特征提取等，具体实验步骤为：(1)利用 Arc Map 导入采集得到的遥感图像，构建样本矢量点，分别设置为植被、道路裸地、建筑物(包括完整建筑物和损毁建筑物)、阴影等五个部分，具体分布图如图 2 所示；(2)利用 1.1 节中所提到的聚类方法对震后遥感图像进行分割；(3)对分割后得到的样本进行训练，以纹理特征、灰度等作为训练特征；(4)获取震后图像的震损结构特征，判断震后损伤情况。

图 2　样本矢量点分布图

Fig.2　Distribution map of sample vector points

聚类分割中设置分割尺度为 72，对提取出样本矢量点的图 2 进行分割，得到聚类分割结果如图 3 所示。其中，完好或轻度受损建筑物的分割效果较好，而震损程度较高的建筑结构分割结果较差。道路由于与周边的建筑具有明显的差异，因此可以较好地分割出道路特征。受地震损伤较多的建筑物，如已倒塌建筑或损坏严重的建筑由于几何形状发生了变化，使得其外观变得十分不规则，由此得到的震后图像纹理特征紊乱，因此得到的分割结果不具有统一形状，其形态各异，但依然具有一定的规律性，与完好或受轻微损伤的建筑具有明显的区分。依据该分割结果得到的震后图像震损结构识别结果如图 4 所示。

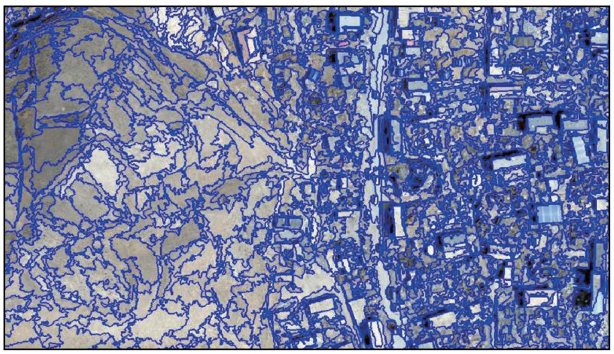

图 3　遥感图像的聚类分割结果

Fig.3　Clustering segmentation results of remote sensing images

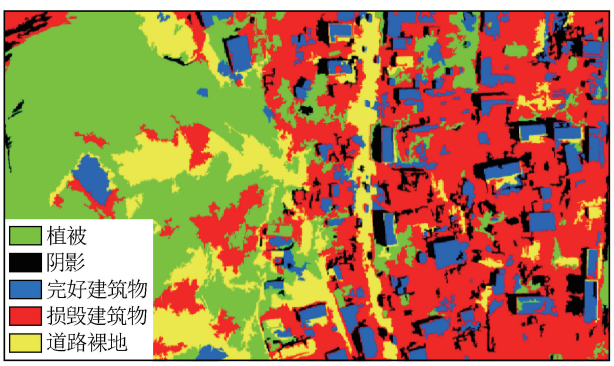

图 4　震后图像结构特征识别结果

Fig.4　Recognition results of image structure features after earthquake

如图 4 所示，由于震损遥感图像中的部分损伤较为严重的建筑或损毁建筑纹理特征较乱，使得图 4 存在一定的错误识别现象。如损毁的建筑物与其他样本均存在不同程度的错误识别，其中，损毁建筑物被误识别为植被或者裸地的现象较多，而阴影部分也容易被错误识别为损毁建筑物，而其他样本(植被、完好建筑物、道路裸地)也有不同程度的现象被错误识别为损毁建筑物。其原因可能是在 2008 年汶川地震发生的地区多数完全损毁的建筑物均为土木结构，致使在房屋倒塌后易将其错误识别为植被或裸地。同时，由于部分地区的植被覆盖率较低，使得图像被分割识别为裸地或植被的结果精度较差。

综上，本文所提出的震损建筑结构特征识别方法在前人研究基础上稍微加深了一些，探讨了一种震损建筑结构的检测识别方法，为同类研究提供初步参考借鉴，但仍有较多需要继续研究之处。

3 结束语

震损建筑结构变形精确检测利于震后损失评估,也利于后续建筑修建。为此,提出震损结构变形检测的图像识别分析方法。采用无人机拍摄震后遥感图像,以此为基础分析受灾区域的震损程度,将建筑结构变形检测问题转变为构件间坐标测量问题,提取地震后样本矢量点,利用 FCM 法对震损结构图像进行分割,以获得震后图像的不同类别结构特征,实现震损建筑结构的检测。实验发现所提方法可以初步识别出损毁建筑物,但其精度仍有待提高,文章水平有限,还有不足之处需要加强。因而后续工作将尽可能多采集震后遥感图像,并进行试验,以进一步完善震损结构识别的相关理论。

参考文献(References)

[1] 王新妮,吴海波.钢筋混凝土建筑在连续震动下的壁板结构破坏程度分析[J].地震工程学报,2017,39(6):1018-1023.
WANG Xinni, WU Haibo. Damage Analysis of Panel Structures in Reinforced Concrete Buildings Subjected to Continuous Vibration[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6):1018-1023.

[2] 许立强.混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力评估[J].地震工程学报,2018,40(1):14-19,47.
XU Liqiang. Evaluation of Earthquake Damage and Anti-Destruction Ability of Concrete High-Rise Building Structures[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1):14-19,47.

[3] 王一峰.三维激光扫描技术在世茂深坑酒店异形钢结构变形监测中的应用[J].施工技术,2017,46(16):114-116.
WANG Yifeng. Application of 3D Laser Scanning Technology in Deformation Monitoring of Special-Shaped Steel Structure in Shimao Chasm Hotel[J]. Construction Technology, 2017, 46(16):114-116.

[4] 李宏男,林世伟,伊廷华.基于静力虚拟变形法的结构损伤识别研究[J].建筑科学与工程学报,2016,33(5):1-6.
LI Hongnan, LIN Shiwei, YI Tinghua. Study on Structural Damage Identification by Static Virtual Distortion Method[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(5):1-6.

[5] 周泽林,陈寿根,赵玉报,等.强震后软岩隧道变形与破坏机制分析[J].地下空间与工程学报,2017,13(3):796-803,857.
ZHOU Zelin, CHEN Shougen, ZHAO Yubao, et al. Analyses of Deformation and Failure Mechanism of Soft Rock Tunnel in Meizoseismal Areas[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(3):796-803,857.

[6] 戴靠山,罗明艳,徐一智,等.三维激光扫描灰度信息在结构变形场计算中的应用[J].建筑结构学报,2017,38(3):151-157.
DAI Kaoshan, LUO Mingyan, XU Yizhi, et al. Application of Gray Information in LiDAR Scan Point Cloud Data for Structural Deformation Field Calculation[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(3):151-157.

[7] 信春雷,高波,闫高明,等.跨走滑断层隧道地震破坏特征与抗减震措施研究[J].振动工程学报,2016,29(4):694-703.
XIN Chunlei, GAO Bo, YAN Gaoming, et al. Seismic Damage Characteristics and Anti-Seismic Damping Measures for Tunnel across Strike-Slip Faults[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(4):694-703.

[8] 张鹏,王艺环,秦国晋.非随机过程的地震激励下埋地压力管道的非概率可靠性分析[J].中国安全生产科学技术,2018,14(6):134-141.
ZHANG Peng, WANG Yihuan, QIN Guojin. Non-Probabilistic Reliability Analysis of Buried Pressure Pipeline under Non-Random Process Earthquake Excitation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(6):134-141.

[9] 王飞剑,刘如山,马朝晖.独立式窑洞在地震作用下损伤指标的分析[J].科学技术与工程,2018,18(15):281-286.
WANG Feijian, LIU Rushan, MA Zhaohui. Damage Measures Analysis of Independent Cave Dwelling under Earthquake[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(15):281-286.

[10] 陆进保.主余震作用下混凝土桥梁地震灾害损失评估方法[J].华南地震,2018,38(2):29-34.
LU Jinbao. Seismic Disaster Loss Assessment Method of Concrete Bridge under Main Aftershock[J]. South China Journal of Seismology, 2018, 38(2):29-34.