

# 综合像素级和特征级的建筑物变化检测方法

张永梅<sup>1,2</sup> 李立鹏<sup>1</sup> 姜明<sup>2</sup> 刘海伟<sup>1</sup>

(北方工业大学信息工程学院 北京 100144)<sup>1</sup> (北京大学数学科学学院 北京 100871)<sup>2</sup>

**摘要** 针对单独使用像素级变化检测或特征级变化检测对于高层建筑物检测精度低的问题,提出了一种结合像素级和特征级的建筑物变化检测方法。首先对多个时相的遥感图像进行基于比值法的像素级变化检测,得到包含建筑物变化的候选区域,在候选区域上再进行基于建筑物特征的变化检测。该方法首先利用基于Delaunay三角网约束的快速配准算法配准两个不同时相的多光谱图像,利用建筑物的变化会导致建筑物所在局部区域的纹理分布和色调发生变化的特点,提取对辐射差异和配准误差鲁棒的纹理和色调特征进行变化检测。实验结果表明,该方法可以有效提高建筑物变化检测正确率,降低虚检率。

**关键词** 建筑物,变化检测,评价指标,多光谱图像

**中图分类号** TP751 **文献标识码** A

## Change Detection Method for Buildings Based on Pixel-level and Feature-level

ZHANG Yong-mei<sup>1,2</sup> LI Li-peng<sup>1</sup> JIANG Ming<sup>2</sup> LIU Hai-wei<sup>1</sup>

(School of Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)<sup>1</sup>

(School of Mathematical Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Aiming at the problem that only using pixel-level or feature-level change detection for high-rise building has low accuracy, a method combined pixel-level and feature-level change detection was presented. Detect changes of multi-temporal remote sensing image based on ratio method, obtain the candidate change regions of high-rise buildings, then detect changes in the candidate regions based on building feature. Firstly, a novel fast registration algorithm of constraint-based Delaunay triangulation is used to make registration of multi-spectral images with two different phase. The building will lead to changes of distribution and characteristics of color in the texture of the local area changes, so, robust texture and color characteristics for radiation and registration are extracted to make change detection. Experiment results show that the combination of pixel-level and feature-level of the building change detection method can effectively improve the accuracy, and reduce the false alarm.

**Keywords** Building, Change detection, Evaluation index, Multi-spectral images

## 1 引言

遥感图像的变化检测是对不同时间获取的同一区域的两个或多个时相的遥感图像地物目标的变化情况进行检测,通过对两时相遥感图像的对比分析,获取该区域特定目标的变化信息。

多时相遥感图像的变化检测作为遥感技术的重要研究内容,在民用和军事方面均得到广泛应用。在民用方面,变化检测可用于土地利用和森林植被覆盖情况调查、农作物生长状况监测、城市发展和动态变化监测、资源和环境变化监测、自然灾害中地震、洪水、泥石流和森林大火等灾情监测与评估等。在军事方面,变化检测是对遥感图像中军事目标进行动态监测和战后毁伤评估的最有效手段之一,通过变化检测可以对机场、码头、桥梁、油库等重要军事目标进行打击效果评

价和目标变化情况监测,通过对战场信息动态感知、军事目标变化和兵力部署监测等可以了解对方的主要战斗力量,从而做出正确的战略部署,对加速战役进程、节约战争成本、取得最终战争胜利起着至关重要的作用。

地物目标的变化检测主要集中在人工地物的变化检测上,人工地物种类繁多、形状多变,在遥感图像上一般对应具有特定分布形态结构的区域。人工地物主要包括高层建筑物、桥梁、道路、码头和机场等,高层建筑物主要是指分布在城市或城镇的居民楼、商业区建筑以及工业区厂房等多层建筑物,这样的建筑物高度一般都在5米以上,面积较大,分布紧凑、有条理,而且建筑物所在区域地势比较平坦。在城镇区域的高分辨率遥感图像中高层建筑物目标占据很大一部分,作为地物类别的主要内容,其对高层建筑物进行变化检测具有重要意义。本文就高层建筑的变化检测进行研究。

到稿日期:2012-04-10 返修日期:2012-07-13 本文受国家科技支撑计划项目(2012BAH04F00),北京市高校学术创新团队项目(PHR201007121),北京市图像信息处理与智能识别科研平台建设项目(PXM2012\_014212\_000024),北方工业大学重点研究计划项目资助。

张永梅(1967—),女,博士,教授,主要研究方向为图像处理、人工智能, E-mail: zhangym@ncut.edu.cn; 李立鹏(1985—),男,硕士生,主要研究方向为图像处理; 姜明(1963—),男,博士,教授,主要研究方向为图像处理; 刘海伟(1987—),男,硕士生,主要研究方向为图像处理。

国内外学者对人工地物的变化检测已经进行了大量研究,并提出了多种方法。刘小洲<sup>[1]</sup>提出了一种基于建筑物纹理特征及阴影检测变化检测方法,其首先利用纹理特征检测建筑物的初始变化区域,然后实现建筑物的阴影变化检测,最后去除阴影的影响来提高建筑物的变化检测正确率,这种方法容易受到其他地物阴影的影响。唐朴谦等<sup>[2]</sup>提出一种基于像素比值法的面向对象分类后变化检测方法,其首先用像素比值法检测出变化区域,再对变化区域进行面向对象的分类后变化检测,检测出各个地物类的变化,采用面向对象分类主要是人工参与,过程比较繁琐。Huttas 和 Nevatia<sup>[3]</sup>通过检测线状特征检测出人工地物的变化,对于边缘规则地物目标可以取得满意效果,但是这种方法对于排列比较紧凑的人工地物检测效果不是太好,并且不同的人工地物可能存在相似的线特征。汪闰等<sup>[4]</sup>提出一种多特征证据融合的图像变化检测方法,其通过计算两时相图像的纹理、梯度、边缘 3 种特征的结构相似度来构建 D-S 证据理论并进行证据合成,通过某种规则判定确定变化区域。还有一些商用软件也可以进行变化检测,例如德国 Definiens Imaging 公司开发的智能化影像分析软件 eCognition 采用面向对象的信息提取方法,充分利用了对象特征信息,对于感兴趣目标可以取得较好的检测效果。但目前的研究表明,没有任何一种变化检测方法具有绝对的优势。在实际的应用中,要根据具体的应用目的选取合适的变化检测方法。

传统的遥感图像变化检测方法建立在基于像素级别的光谱信息分析基础上,它们的共同特征是只利用图像灰度值的统计信息<sup>[5]</sup>。变化检测性能受到以下因素的严重制约:图像辐射差异、配准误差和阈值的选取,而且用像素级变化检测的地物变化类型无法确定,得到的是全部地物变化<sup>[6]</sup>。特征级变化检测主要利用某类地物的特征区别于其他地物来进行变化检测,特征在图像上表现一般较稳定,受辐射差异影响较小,不易受遥感图像时相变化的影响。单独使用某一特征进行变化检测有可能造成漏检或虚检<sup>[7]</sup>。

本文提出一种结合像素级和特征级的建筑物变化检测方法,两幅不同时相的遥感图像进行配准后,首先对其进行基于像素比值法的变化检测,得到全部地物的变化区域,这个区域作为建筑物变化候选区域。在用比值法检测出的变化区域上进行基于建筑物特征的变化检测,由于采用一种特征容易造成虚检,因此本文采取了纹理特征和色调特征顺序相结合的方式特征级变化检测,以将建筑物的变化与其他地物的变化区别开来。最后将本文方法与常见方法进行了实验比较,实验结果表明,本文方法可以有效提高建筑物检测的准确率,降低虚检率。

## 2 变化检测方法的分类

按照变化检测所利用的信息层次进行分类,变化检测方法分类为:基于像素的变化检测、基于特征的变化检测、基于目标的变化检测<sup>[8]</sup>。

基于像素的变化检测是对配准后的不同时相的遥感图像在像素的级别上进行比较分析,以判断在每个像素上是否发生变化及变化的类型。该类算法是直接利用原始的像素灰度信息进行的变化检测,是一种最低层次的变化检测,同时也是目前应用最广泛的变化检测技术,比较直观,易于理解,也容

易实现,主要适用于传统的中低分辨率遥感图像变化检测。但其检测结果对配准精度比较敏感,当不同时期的图像没有完全配准时,由于对于像素之间出现位移偏差,往往会产生大量的伪变化信息。阈值的确定是像素级变化检测方法的关键问题,现在还没有有效的确定阈值的方法,而且用像素级变化检测出来的地物变化类型是无法确定的,得到的是全部地物的变化。高空间分辨率遥感所具有的数据量庞大、地物细节明显、光谱混淆现象严重的特点造成单纯依靠像素的变化检测方法变得不太适用。

基于特征的变化检测是利用从不同时相的遥感图像中提取出的特征信息来进行综合比较分析,以检测确定时相间变化的过程。随着遥感图像分辨率的提高,图像提供了更加丰富的结构信息,如何利用这些结构信息正逐渐成为研究热点。该类算法在计算上变得复杂,但由于是利用从不同时期的图像中提取的特征信息进行综合分析比较来检测变化信息,因此其检测结果受配准精度的影响较小。

特征级变化检测主要利用某类地物的特征区别于其他地物来进行变化检测,所能利用的特征有形状、结构、纹理、色调等,特征在图像上表现一般较稳定,受辐射差异影响较小,不易受遥感图像时相变化的影响。不同的视觉特征是反映图像不同侧面并互为补充的图像表征,如纹理描述了图像灰度分布的空间结构,梯度反映了区域内相邻像素的灰度变化程度,边缘代表了目标边界,针对不同的地物分布情况应用不同的特征来进行变化检测。

基于目标的变化检测是在信息表示的最高层次上进行变化信息的提取。将不同时相观测同一目标获得的数据独立完成预处理、特征提取、识别或判断,以获得所观察目标的属性信息,然后通过相关处理、决策判决,最终获得检测结果,从而直接为决策提供依据。该类方法是直接针对目标,充分利用特征提取和识别所得出的目标各类特征信息所进行的变化检测分析,是一种最高层次的变化检测,研究和应用的难度也最大。

通过对上述各种变化检测方法的分析可以发现,目前还没有一种速度快、精度较高、通用性好且易于使用的变化信息提取方法。这主要体现在两个方面:一是由于现有的变化检测方法大多是针对具体应用提出来的,对数据源、检测对象、地面环境等都有特定的要求;二是没有形成系统化理论,变化检测所涉及的一些技术,如数据预处理、变化方法的选择、变化阈值的确定等往往依靠经验。

传统的遥感图像变化检测方法建立在基于像素级别的光谱信息分析基础上,它们的共同特征是只能使用图像的强度量,即灰度值的统计信息。而高分辨率遥感图像则给遥感技术的发展带来了重大的变化,在高空间分辨率的卫星图像上,地物景观的结构、纹理和细节等信息都非常清楚地表现出来,除了地物光谱信息,还可以获得关于地物结构、形状和纹理方面的信息。传统的变化检测处理方法在处理高分辨率图像城市变化检测时遇到了很多困难,归纳起来表现在以下几个方面:

(1)空间分辨率的提高解决了原有传感器的“混合像素”问题,但也引入了新的问题:同种地物的光谱可分性(类内可分性)增加以及不同种类地物之间的光谱可分性(类间可分性)降低,导致了变化检测中变化类和非变化类的可分性降

低。而变化类和非变化类的可分性降低使得传统的像素级的变化检测方法很难将变化类和非变化类正确地区分开来。

(2)城市场景中复杂的生态环境和各种人造目标的复杂性(材料、形状的多样性等),使得传统的像素级的变化检测方法很难有效地描述和比较这些复杂的对象。

特征级算法多用于定性检测,而像素级变化检测可以得到定量检测结果。特征级变化检测通过对不同时相图像上地物的特征分析,可以检测出地物变化的类型以及变化的部分是增加还是减少;而像素级变化检测只能检测出地物的变化,总体的变化可以检测出来,但是具体是什么地物类型发生变化及变化是增加还是减少,都不能通过像素级变化检测出来。在变化检测时,单独使用某一特征进行变化检测有可能造成漏检或虚检,将像素级变化检测和特征级变化检测结合起来进行变化检测,可以有效减少漏检或虚检,并且对辐射、几何配准精度要求较低,对于变化的类型也可以根据地物特征来确定。

### 3 建筑物的特征分析

城市环境受自然因素与社会因素的相互作用,地面建筑有鲜明的人工特征,是一个特殊的生态环境。主要的城市地物类型有建筑物、道路、水体和植被,这些地物类型具有明显的光谱、纹理和空间特征。

无论军事或者民用,人工目标变化检测都有非常重要的应用,典型应用之一是与城市发展变化相关的检测应用。城市是人类生活的聚居地,是社会经济活动的中心,城市化已经成为各个国家的共同趋势,可以说,城市化已经深刻地改变了人类的生存环境和生活方式。如今,许多城市已经把城市信息化建设作为城市发展的新主题和新动力,在组织领导、统筹规划、项目建设等方面进行着卓有成效的实践。当前,我国城市信息化特别强调通过信息化完善城市服务的功能,提高城市服务和城市环境的质量。如何科学而及时地了解我国城市中的违章建筑区域、违章倾堆建筑生活垃圾地区、地面绿化状况、社区分布状况以及道路布局情况等,已经成为我国城市工作中一个迫切需要解决的问题。传统的人工走访调查不仅费时费力,而且有可能发生遗漏的情况,而利用遥感手段可解决城市空间地理信息的采集问题,通过变化检测的途径,可以很方便地解决上述问题。

其典型应用之二是重要军事目标的监测,在军事打击中,建筑物(大楼)往往成为重要的打击目标,它们可能包含敌指挥中心、重要军事目标(如机场、电厂、敌营中的建筑目标),这对于打击敌方指挥、生产以及军事运作能力具有重要意义,能使对方陷入被动挨打的局面。同时在其它的军事目标毁伤识别中也存在建筑目标的毁伤识别,例如机场中的导航台、调度室、油库的泵房等等。在海湾战争中,美军所打击的伊拉克总统府、议会大楼、国防部、内务部等机构的主要设施构成其军事行动中的打击目标。在近几年以美军为进攻主题开展的现代局部战争中,基于遥感图像进行敌境目标侦查、目标变化检测、战场态势跟踪、打击效果侦查等,成为现代遥感技术在军事领域应用的典范。

一般情况下,遥感图像中的人工目标与自然场景的组织结构和纹理分布存在较大差异,并且不同类别的人工目标具有不同的组织结构和纹理分布,同类人工目标在外观或规模

上的不同,也必然导致其对应的组织结构和纹理分布的不同。因此,人工目标的变化可由目标所在局部区域的结构特征和纹理特征的变化进行描述。

人工目标种类繁多、几何形状多种多样,在高空间分辨率遥感图像上一般对应着具有特定分布形态结构的区域。人工地物主要包括高层建筑物、桥梁、道路和码头等,而在城市区域的高分辨率遥感图像中70%的目标是高层建筑物。作为地物类别中的主要内容,对高层建筑物进行变化检测具有重大意义。建筑物变化检测是根据同一地区不同时相的图像检测建筑物的变化情况,包括建筑物的改建、扩建、毁坏。

目前,针对建筑物的变化检测已经有了很多解决方法,取得了较好的实验结果。但是,建筑物变化检测的最终目的是走向实际应用,国外虽然已经出现了一些应用系统,但是距离真正完善的自动系统还存在差距;国内这方面的研究才刚刚起步,建筑物变化检测如何真正走向应用领域依然有待探索和完善。

建筑物像素级变化检测是近年来的研究重点之一。建筑物在遥感图像上呈现丰富的信息,而且种类繁多,主要分为居民区、道路、桥梁、机场、码头等等。不同人工建筑物变化检测的方法不尽相同,本课题研究的建筑物主要是分布在城市或者城镇区域的居民区、工厂厂房等高层建筑物,这样的建筑物高度一般都在5m上,面积较大,分布紧凑、有条理,而且建筑物所在区域地势比较平坦。

建筑物在遥感图像上呈现出来的特征有光谱特征、纹理特征、色调特征、形状特征、空间结构特征等,这些特征在对建筑物进行变化检测时是非常有用的,合理运用建筑物的特征进行建筑物变化检测将会提高建筑物检测的精度和效率。

### 4 基于 Delaunay 三角网约束的快速配准算法

基于 SIFT 描述子的匹配方法已被成功地应用到很多领域,如目标识别、全景图拼接等。然而将 SIFT 算法应用于遥感图像配准的研究还较少。主要原因如下:特征点匹配方面,传统 SIFT 算法采用的是 Lowe 提出的最近邻次近邻距离比值法,阈值凭经验选取,对于特征点匹配情形较复杂的遥感图像而言精确度较低。而匹配点对的精度将直接影响到图像后续的配准精度。

在基于特征点的图像配准中,首先需要考虑特征点的提取问题。提取特征点时,需要保证特征点的显著性和分布均匀,而且数量不能太少。特征点提取的计算比较复杂,需要寻找稳定、有效、简单的特征提取算子。

SIFT 算法有效地解决了由于图像部分遮挡、旋转缩放、仿射变换、尺度变换等引起图像变形等问题,但仍然存在以下不足:

(1)SIFT 算法需要对多尺度空间进行搜索,需要很多次的卷积运算,而且为了产生特征点的描述符,需要多次的直方图加权运算。所有这些操作都包含了大量的浮点数运算,因此相对于其特征点的数量而言,算法的计算复杂度高且运算量大,速度较慢。

(2)SIFT 特征最初应用于目标识别,因而需要能够检测出尽可能多的特征点,然而这些大量的特征会导致特征匹配时间的增加。

(3)SIFT 特征集合不是十分的显著,集合中仍然存在一

些不稳定的点。SIFT 算法检测出的特征点很多不是描述物体轮廓特性的点,其既不是边缘点也不是角点。

对于不同时相、不同分辨率、不同传感器的遥感图像间的配准而言,特征点匹配情况较一般图像更为复杂。传统 SIFT 算法无法排除遥感图像中的一些错误匹配点对。同时,传统 SIFT 方法没有考虑重复匹配、多对一匹配及其他误匹配情况,匹配精度优化空间较大。计算 SIFT 关键点方向时,同一关键点可能有一个主方向、一个或多个辅方向,算法中都将其归为不同的特征点。这些特征点中的全部或部分可能产生正确的匹配点,但它们实际上是同一点,此时就会产生重复匹配现象。SIFT 特征集之间的穷尽搜索匹配还可能产生一对多、多对一的匹配。这些误匹配的存在需要逐一加以消除,否则对后续的图像配准精度将会带来很大影响。雷小群等人通过分析 SIFT 特征点匹配的主要误差来源,逐步消除可能误差,提取尽可能多且精准的匹配点对。利用该匹配点对作为配准用控制点对,分别对不同时相、不同分辨率遥感图像进行仿射变换和小面元微分纠正配准,该算法具有较高的匹配精度。

SIFT 算法在对特征点进行描述时,描述子为 128 维向量,导致在生成描述子以及后续的配准过程中计算量过大。很多学者提出各类基于 SIFT 算法的改进方法,主成分分析法(PCA)将描述子降维,减少计算复杂度。Re 和 Sukthankar 等在归一化梯度场中利用 PCA 方法将描述子降维,稳健性较高,但是在精度上有所下降。SURF 方法在计算量上有所降低,适用于图像分辨变化较大的情况,但是在仿射变换和光照变化下,效果欠佳。Mikeolajczyk 提出了扩展的 SIFT 描述子 GLOH,其增强特征描述子的独特性,但在快速图像匹配的效果上也不尽如人意。王田甲等针对 SIFT 算法的高维描述子进行降维,同时增强关键点邻域像素信息,使其达到了快速匹配的效果。

传统 SIFT 算法对于两幅图像各自提取的特征点进行匹配时,首先计算第一幅图像的每个特征点在第二幅图像中的最近邻匹配,即关键点描述符向量间的最小欧氏距离。传统 SIFT 算法采用 Lowe 的最近邻与次近邻距离比率 ratio 进行特征点匹配。ratio 小于某个阈值的对应点作为正确匹配,否则抛弃。ratio 通常采用 Lowe 的建议值 0.8。对于不同时相、不同分辨率、不同传感器的遥感图像间的配准而言,特征点匹配情况较一般图像更为复杂。虽然传统 SIFT 算法中采用较小的 ratio 值可以取得准确率较好的匹配结果,但本文通过对大量遥感图像进行试验表明,即使采用较小的 ratio 值,仍然无法排除遥感图像中的一些错误匹配点对。同时,传统 SIFT 方法没有考虑重复匹配、多对一匹配及其他误匹配情况,匹配精度优化空间较大。

Delaunay 三角网的外边界是一个凸多边形,它由连接  $V$  中的凸集形成,通常称为凸壳。Delaunay 三角网具有两个非常重要的性质:空外接圆性质、最大的最小角度性质。“空外接圆”是指任何一个三角形的外接圆均不包含其它数据点。“最大的最小角度”是指在所有可能生成的三角网中,Delaunay 三角网中的三角形的最小内角是最大的。这样就有效地保证了 Delaunay 三角网是最接近等角或等边的最优三角网,这两个性质是建立 Delaunay 三角网的基本依据。

这两个性质决定了 Delaunay 三角网具有极大的应用价值。同时,它也是二维平面三角网中唯一的、最好的。Miles 证明 Delaunay 三角网是“好的”三角网;Sibson 认定“在一个

有限点集中,只存在一个局部等角的三角网,这就是 Delaunay 三角网”;Lingas 进一步论证了“在一般情况下,Delaunay 三角网是最优的”;Tsai 认为“在不多于 3 个相邻点共圆的欧几里德平面中,Delaunay 三角网是唯一的”。

这两个性质有效地保证了三角网是最接近等角或等边的三角网,满足了在每一个小三角形中,控制点尽可能均匀分布的要求。

Delaunay 三角网在点分布均匀的情况下,可以避免产生狭长或者过小的锐角三角形。三角网中的三角形应该都是锐角三角形,或者三边大致相等,三角形之间不交叉、不重叠。Delaunay 三角网是最接近于等边的三角网。在各种二维三角网中,只有 Delaunay 三角网才能同时满足全局和局部最优。

本文使用的特征点是作为控制点使用的,而特征点一般集中在特征线上,这与不规则三角网(TIN, Triangulated Irregular Network)的特点是吻合的。TIN 的最大优点就是对复杂地形的准确描述。我们完全可以对整个图像的控制点建立三角网,对起伏较大的区域建立密集的三角网,而对平坦区域建立稀疏的三角网。

常用的构建三角网的方法有角度判断法、泰森多边形与 Delaunay 三角网。不论从图像的什么地方开始构建 Delaunay 三角网,只要特征点没有改变,得到的结果都始终唯一。如果新增特征点或某个特征点消失,则只影响临近的三角形,与其它三角形无关。本文选择了该方法。

本文提出一种改进的基于 SIFT 的图像配准算法,即基于 Delaunay 三角网约束的特征点配准算法,用以实现多个时相多光谱图像的配准。具体步骤如下:

(1)利用 SIFT 算法分别提取多个时相多光谱图像的特征点。

(2)即使采用很小的 ratio 值,仍然无法将错误点对全部排除,且此时提取的特征点数目非常少,不利于后续图像配准。因此,为了提取尽可能多的匹配点对,本文首先利用 Lowe 的建议 ratio 值 0.8,利用最近邻与次近邻方法对多个时相多光谱图像进行初始匹配。

(3)在初始匹配得到的点基础上进行逐一的误差消除。传统 SIFT 方法没有考虑重复匹配、多对一匹配及其他误匹配情况。对于重复匹配和多对一匹配,本文通过比较匹配点对的像素坐标值和遍历对应点对将其全部提取出来,去除利用 SIFT 算法得到的重复匹配和多对一匹配特征点,保证匹配点对的唯一性和一一对应。

(4)对于多个时相多光谱图像,分别构造 Delaunay 三角网,利用 Delaunay 三角网将图像分割为若干个格网区域,保证在每一格网均检测到特征点。采用基于 Delaunay 三角网的配准算法可以使提取到的特征点尽可能均匀分布,将特征点的范围控制在每个小三角形内,可有效地提高配准精度。

(5)利用 Delaunay 三角网修正特征点,利用 Delaunay 三角网去除 3 点共线、4 点共圆的图像特征点对。

(6)引入欧氏距离来确定同名控制点,以减少误匹配率。计算两个特征点描述符之间的欧氏距离,即找出与特征点描述符  $p_i$  欧氏距离最近和次近的两个邻居特征点描述符  $q_i'$  和  $q_i''$ ,然后计算  $p_i$  与  $q_i'$  以及  $p_i$  与  $q_i''$  两组描述符之间欧氏距离的比值  $\alpha$ 。如比值  $\alpha$  小于规定阈值(一般情况下  $0.6 \leq \alpha \leq 0.8$ ,本文取  $\alpha = 0.6$ ),则视为匹配成功,  $(p_i, q_i')$  点对则为图像序列中的一对匹配点,否则匹配失败。

(7)利用同名控制点对,采用最小二乘法求解多个时相多光谱图像之间的仿射变换,得到变换参数,计算配准图像的位置关系,得到配准后的图像。

SIFT 算法检测到的特征点非常多,匹配数量也很多,这正是 SIFT 的特点之一。SIFT 特征最初用于目标识别,而目标识别因为要从大量的图像数据库中匹配较小的目标,所以对较小的目标也需要丰富的特征信息进行描述,而 SIFT 特征的这一特点正好满足。这对于重叠比例较小的图像配准也十分重要,因为这种情况下需要保证在很小的图像重叠部分依然存在足够多的特征点。当然图像配准不同于目标识别,当对两幅图像进行配准时不需要太多的匹配点对,这也正是本算法的改进之处。

本文对提出的配准算法进行了相关实验,即选取不同地形的两个时相多幅图像进行了配准测试,主要选取了城区、公路、机场的多光谱图像,较全面地测试了配准功能。图 1 给出了其中的一组实验图像,以及利用基于 Delaunay 三角网配准以后的图像。本文利用卷帘主观评价配准效果,采用均方根误差作为图像配准效果的客观评价指标。如果不用 Delaunay 三角网对特征点进行修正,直接用提取出来的 SIFT 特征点进行配准,会发现其运行时间较慢。例如对于图 1 两个时相的多光谱图像,用 Delaunay 修正后的配准时间为 20.98s,配准的均方根误差为 0.6524,直接利用 SIFT 的配准时间为 21.25s,配准的均方根误差为 0.6808。

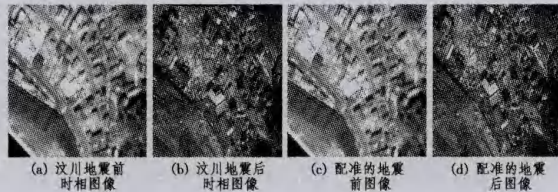


图 1 配准图像

对多幅多个时相多光谱图像分别采用原 SIFT 算法和本文改进的 SIFT 算法进行测试,测试结果如表 1 所列。实验结果表明,本文改进的 SIFT 算法提取的特征点数量已经明显减少,提高了特征点匹配速度,降低了误匹配率,提高了配准的精度。

表 1 两种算法实验结果的对比

性能	原 SIFT 算法	本文改进的 SIFT 算法
正确率	64%	72%
匹配时间(s)	2.87	2.12

实验结果表明,相对于传统的基于 SIFT 特征点的配准算法,该算法在时间效率上有了较大提高,使用该算法选取的控制点均方根误差可以控制在 0.9 个像素以内。图像配准是变化检测中一项关键的预处理过程,处理精度将直接影响变化检测的性能。在变化检测之前,首先利用本文提出的基于 Delaunay 三角网约束的快速配准算法配准两个不同时相的多光谱图像。

## 5 结合像素级和特征级的变化检测

本文提出综合像素级和特征级变化检测的多光谱图像变化检测方法,其通过比值法像素级变化检测,以及对建筑物的纹理、色调特征进行变化检测,可以有效减少漏检或虚检,并且变化的类型可以根据建筑物特征来确定。

### 5.1 像素级变化检测

建筑物在遥感图像上的最基本变化就是像素灰度值的变化,因此,像素灰度值也可以看作是图像的基本特征。像素级变化检测定义为直接对两时相的图像进行像素值的运算,以此构建差值图像,并根据某种判别规则得到变化区域。常用的像素级变化检测方法主要有像素差值法、像素比值法、图像回归法等。像素差值法实现起来简单直接,但是在变化检测时会出现许多小碎片。像素比值法可以减少图像获取时太阳角度和地形的影响,但是比值结果往往是非正态分布。图像回归法的特点是先建立图像间的回归等式,然后相减,这样可以减少大气、入射角和环境差异的影响,但是需要得到准确的回归等式,选择合适的波段。基于遥感图像像素级的变化检测方法检测的是全部地物的变化信息,它不仅包括建筑物的变化,还包括建筑物所在区域其他地物的变化,而且地物变化类型未知,因此如何有效地抑制建筑物周围地物的误检是像素级变化检测面对的主要问题。

基于像素级变化检测的另外一个重要问题是如何区分差异图像的变化区域和非变化区域。通过分析差异图像及其直方图,选取合适的阈值来准确区分各像素属于变化区域还是非变化区域,并对差异图像的像素依据其灰度值进行 0 或 1 的二值化分割(其中 0 代表非变化,1 代表变化,若转化为 8 位的灰度值则分别为 0 和 255),提取变化信息,由此可得到差异图像的代表地物变化的二值图像。

本文采用像素比值法、差值法、图像回归法、主成分分析法 4 种方法进行变化检测,并对这 4 种方法进行比较。综合正确率、虚检率和漏检率 3 个指标来看,比值法是对建筑物检测最好的方法。

本文中像素级变化检测方法采用唐朴谦等提出的基于  $3 \times 3$  的小窗口矩阵像素比值法。具体方法如下:用图像中以某像素为中心的  $3 \times 3$  的小窗口矩阵替代这个像素,并求小窗口中所有像素和来作比值,设在不同时相遥感图像上这样的小窗口矩阵分别为  $M_1$ 、 $M_2$ ,小窗口矩阵中所有像素之和的比值为  $\alpha$ ,则有公式:

$$\alpha = \frac{\sum_{i,j=1}^3 M_1}{\sum_{i,j=1}^3 M_2} \quad (1)$$

得到两个时相多光谱遥感图像的比值差异图像,由于建筑物在变化前后的灰度值相差较大,而不变的建筑物灰度值相差较小,因此可以设定阈值为 0.25,使得比值  $\alpha$  大于 0.25 的像素点标记为变化像素,用 1 来表示;比值  $\alpha$  小于 0.25 的像素点标记为不变像素,用 0 来表示。这样就得到一幅包括所有地物变化的二值图像,用 1 表示变化区域,用 0 表示不变区域。实验图像及结果如图 2 所示。

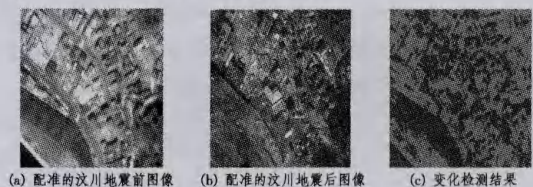


图 2 基于比值法的汶川某区域地震前后变化检测结果

在图 2(c)中,红色区域为建筑物变化区域,蓝色为不变区域。从两幅图中看出,建筑物有一部分完全倒塌,一部分部分损坏,还有一部分完好无损。在用比值法检测后,检测到了全部地物的变化,建筑物的变化基本上能全部检测出来,但是

虚检的建筑物非常多,导致虚检率非常大。

可采用客观评价法对变化检测的结果进行分析,客观评价的指标主要包括变化检测正确率、虚检率、漏检率3个客观评价指标<sup>[9]</sup>。

$$\text{变化检测正确率: } P_{ud} = C_{ud} / C_t \quad (2)$$

$$\text{变化检测虚检率: } P_{jd} = C_{jd} / C_d \quad (3)$$

$$\text{变化检测漏检率: } P_{ld} = C_{ld} / C_r \quad (4)$$

式中,  $C_t$  为遥感图像中建筑物区域真实变化像素点的总和。本文首先对两个不同时相的多光谱图像进行人工判读,给出所有建筑物的位置,利用 eCognition 软件对图像进行合适尺度的分割。再将所有建筑物提取出来,得到两个不同时相多光谱图像的建筑物区域后,利用逐像素比较的方法统计建筑物变化区域的像素点总数  $C_t$ 。

$C_d$  为检测出的建筑物区域变化像素点总和,  $C_{ud}$  为在真实变化像素中检测出的建筑物区域变化像素点个数,  $C_{jd}$  为建筑物区域中实际不变却被检测为变化的虚检像素点个数,  $C_{ld}$  为建筑物区域中漏检的真实变化像素点个数。其中,正确率和漏检率相加结果等于 1.0。经计算得到各个指标的值,如表 2 所列。

表 2 变化检测客观评价结果

评价指标	正确率	漏检率	虚检率
实验结果	64.04%	35.96%	67.26%

图 2(a) 中有 44 栋建筑物,在地震后的第二幅图像中残留着 27 栋建筑物,比值法仅仅检测出 8 栋建筑物有变化。单纯用比值法进行变化检测,能将全部地物变化检测出来,但其包含了大量虚假变化像素点,不能区分是哪类地物发生的变化,如果要检测建筑物的变化,就要结合建筑物区别于其他地物的特征来进行变化检测,以提高变化检测精度。

## 5.2 特征级变化检测

特征级变化检测利用建筑物区别于其他地物的特征来检测建筑物变化,可利用的特征有纹理特征、色调特征、几何特征、空间结构特征等。

图像纹理特征代表物体表面特性,是地物在局部分布无条理,而整体上分布有规则,对于不同地物有不同纹理模式,建筑物在局部一般分布比较整齐,具有一定的纹理特征。建筑物在变化前后呈现不同的纹理特征,因此可以利用纹理特征检测建筑物变化。色调是地物电磁辐射能量在图像上的模拟记录,在黑白图像上表现为灰度,在彩色图像上表现为颜色。在遥感图像上各种地物都有自己的主色调,利用主色调可以将这些地物区别开来,例如植被的主色调是绿色、道路的主色调是灰色、水的主色调是黑色等,建筑物虽然在大范围内色调不同,但是一般在小区域范围内具有稳定的主色调。在多光谱图像中,变化前后的色调一般会有较大的区别,因此,本文主要采用纹理、色调特征进行建筑物的变化检测。

纹理特征的提取方法有很多种,如基于灰度共生矩阵、小波变换以及地学统计学变差函数的纹理特征提取算法等。其中基于灰度共生矩阵的纹理提取算法是应用最为广泛的方法,灰度共生矩阵强调灰度的空间依赖性,其特点是体现了在一种纹理模式下的像素灰度的空间关系。灰度共生矩阵中的元素点  $(i, j)$  的值表示了在一定大小的窗口中一个像素的灰度值为  $i$ , 另一个像素的灰度值为  $j$ , 并且相邻距离为  $d$ , 方向为  $a$  的这样两个像素出现的频率。灰度共生矩阵的各元素值

由下式确定:

$$P_{i,j} = P(i, j, d, a) / \sum_i \sum_j P(i, j, d, a) \quad (5)$$

式中,  $P(i, j, d, a)$  是灰度分别为  $i$  和  $j$ 、距离为  $d$  且方向为  $a$  的像素点对的出现次数。Haralick 等人定义了 14 个用于纹理分析的灰度共生矩阵特征参数,比较常用的有均值、方差、对比度、差异性、角二阶矩、熵、相关性、均一度等。本文比较这几种纹理特征分析参数,选取对于建筑物变化检测精度最高的一种应用到特征级变化检测方法中。

利用纹理特征进行建筑物变化检测首先要计算不同时相遥感图像上每个像素点处的灰度共生矩阵,据此计算出每个像素点处相应的纹理统计特征值,由此构成纹理特征图像。有些学者将纹理特征图像作为原图像的一个逻辑波段加入到原图像中进行分类,由此得到各个地物的类型,再进行变化检测,这样做得到的是所有地物的变化。如果要得到特定目标如建筑物的变化,就必须将建筑物单独作为一类,其他地物合并为一类,将原分类图像分为建筑物类和非建筑物类,再做变化检测,过程比较繁琐。

本文采用图像分割方法进行建筑物的提取,在得到纹理特征图像后,根据图像灰度直方图或根据经验设定合适阈值分别将两个不同时相的纹理图像直接分割为建筑物区域和非建筑物区域,将建筑物区域用 1 来表示,非建筑物区域用 0 来表示,这样就得到两个时相建筑物区域的二值图像。通过对两个时相图像进行逐像素比较的方式检测出两时相二值图像之间所有的不同像素点,并用 1 表示变化区域,用 0 表示不变区域,这样就得到建筑物变化区域二值图像,用红色代表建筑物变化区域,蓝色代表不变区域和其他地物区域,实验图像及结果如图 3 所示。

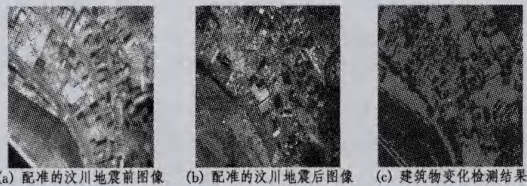


图 3 利用纹理特征对汶川某地区地震前后建筑物变化检测结果

主观来看,利用纹理检测建筑物变化要比比值法精确,建筑物大体上可以检测出来,但还是存在一些虚检的地物,而且一些残留建筑物也会对建筑物的检测精度造成一些影响。地震前建筑物为 44 栋,地震后建筑物为 27 栋,利用纹理特征检测到 10 栋建筑物变化。客观评价结果如表 3 所列。

表 3 建筑物变化检测结果

评价指标	正确率	漏检率	虚检率
实验结果	68.01%	31.99%	55.19%

## 5.3 结合像素级和特征级的变化检测

### 5.3.1 综合像素级和特征级的建筑物变化检测方法

像素级变化检测可以得到全部地物的变化信息,其中包括建筑物的变化,可以利用建筑物区别于其他地物的特征从变化区域中提取变化信息。单独使用纹理特征级的变化检测需要计算整幅图像的纹理特征统计量,再进行分割,提取建筑物,容易造成建筑物分割的错误。本文提出一种结合像素级和特征级的变化检测方法。首先进行像素级变化检测,得到包括建筑物变化在内的候选变化区域;然后在这个建筑物候选变化区域上进行特征级变化检测,即从变化候选区域中提取出建筑物的变化,得到建筑物的变化信息。采用像素级变

化检测得到变化区域的方法可以缩小检测范围,特征级变化检测可以在该候选变化区域上进行,这样可以有效减少未发生变化区域对于变化检测结果的影响。

利用像素比值法将变化区域检测出来后,将其标记在两个不同时相的图像中,使图像在变化区域的信息不变,而在不变区域的值设为0。对两幅图像进行基于建筑物特征的变化检测,计算两时相图像在变化区域的纹理特征统计量,分别得到两个时相的纹理特征图像,再对这两幅纹理图像进行阈值分割,建筑物区域像素点置为1,非建筑物区域像素点置为0,得到建筑物的二值化图像。对这两幅二值图像使用异或方法得到建筑物变化区域,对两个时相二值建筑物纹理图像同一位置处的像素进行逐一比较,同一位置处像素值相同为1或者相同为0,变化图像的值置为0;同一位置处像素值不相同,一个为0,另一个为1,变化图像的值置为1,得到利用纹理检测建筑物变化的图像。

在进行建筑物变化检测时使用单一的特征很容易造成误检,所以本文采用结合纹理和色调特征进行建筑物变化检测的方法。

色调是地面物体的电磁波特性在图像上的反映,在黑白影像上表现为灰度,在彩色影像上表现为颜色。在遥感图像上各种地物都有自己的主色调,利用主色调可以将这些地物区别开来。建筑物虽然在大范围内色调不统一,但是在小区域范围内具有稳定的主色调,而且建筑物在变化前后色调会有较大的区别,这就使利用色调特征检测建筑物变化成为可能。一般图像上显示的是RGB颜色信息,要得到色调信息,须将颜色信息从RGB空间转换到HSV空间。

在用纹理特征检测出建筑物的变化区域后,将这个区域标记在两个时相的图像中,使得图像在建筑物变化区域的信息不变,而在建筑物不变区域的值变为0。将两个时相的图像从RGB空间转换到HSV空间,在HSV空间中,H代表色调,S代表饱和度,V代表纯度。从HSV空间提取H分量,分别得到两时相色调特征图像,对其进行阈值分割,将建筑物从色调特征图像中分割出来,并二值化,得到二值图像,用1代表建筑物,0代表非建筑物,再用异或方法将建筑物的变化检测出来,并将检测结果作为建筑物的最终变化检测结果。结合像素级和特征级进行变化检测的流程图如图4所示。

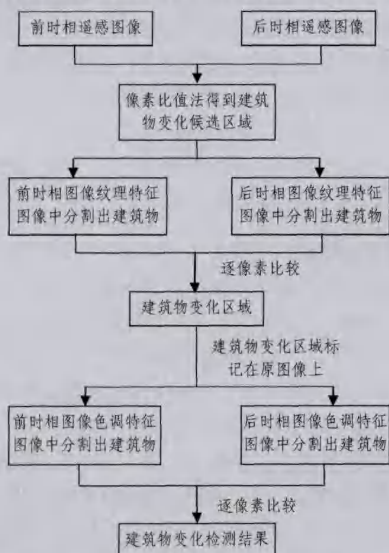


图4 像素级和特征级结合的变化检测流程图

### 5.3.2 实验结果及分析

唐朴谦等提出的基于像素比值法的面向对象分类后变化检测方法首先对两个时相的图像采用基于 $3 \times 3$ 的小窗口矩阵比值法来确定最小的变化区域,最后在这个区域上对两时相遥感图像进行面向对象分类,然后对分类信息进行比较分析,得到不同地物的变化信息。本文参考了唐朴谦提出的像素比值法,在得到最小的变化区域后,没有对这个区域进行分类后比较检测变化区域,而是分别提取了这个区域建筑物的纹理特征和色调特征,采用阈值分割方法获取建筑物区域二值图像,然后比较两个时相二值图像逐像素得到建筑物变化区域。

汪闯等提出的多特征证据融合的变化检测方分别提取了两个时相图像的纹理、梯度、边缘较种特征,并计算了这3种特征的结构相似度,构建了D-S证据理论的基本概率赋值函数并进行证据合成,最后设定合适阈值来判别变化像素与未变化像素。本文方法在进行特征级变化检测时结合了纹理特征和色调特征,没有对建筑物的这两种特征进行融合,而是在利用像素比值法检测出最小区域的基础上提取建筑物的这两种特征。色调特征的提取依据纹理特征检测出的变化区域,降低了未发生变化区域对变化检测结果的影响。

为了验证本文方法的有效性和可行性,采用了多组不同时相的遥感图像进行实验,实验图像包括上海城区、北京鸟巢地区、汶川地区等多组多光谱遥感图像。实验结果表明,综合像素级和特征级的建筑物变化检测方法取得了较好的建筑物变化检测效果。本文利用图2所示的一组图像进行建筑物的变化检测,采用基于Delaunay三角网约束的快速配准算法配准前后时相图像,对比分析两个时相图像可以发现,一部分建筑物倒塌,一部分建筑物完好无损,建筑物发生了较明显的变化。

我们实现了几种不同的变化检测方法,并对比分析了不同方法变化检测结果的有效性。图5分别给出了利用像素比值法、纹理特征法、纹理特征去除阴影法、面向对象分类后比较法、多特征D-S证据融合以及本文方法得到的建筑物变化检测结果。采用纹理特征进行建筑物变化检测时,经提取建筑物不同的纹理特征发现,建筑物方差特征能保持建筑物的边缘清晰,保证建筑物边缘的完整性,因此本文提取建筑物的纹理方差特征来进行变化检测。

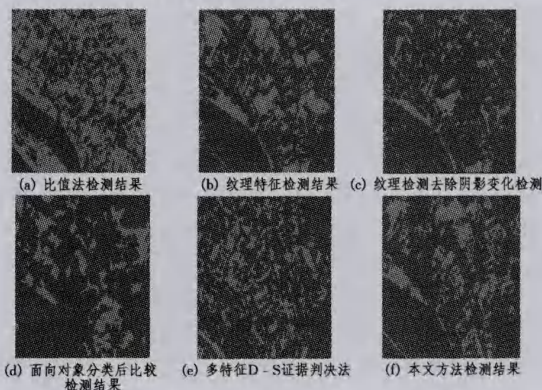


图5 不同方法的实验结果

图5的实验结果图像均采用伪彩色形式表示,将二值图像建筑物变化区域像素点处红色通道的值设为255,其他两个通道的值设为零,即得到用红色表示的建筑物变化区域;其

他区域蓝色通道的值设为 255, 红绿两个通道的值设为零, 即得到用蓝色表示的非建筑物变化区域。

对比分析以上 6 种方法的实验结果可以看到, 单独使用像素比值法进行变化检测得到的变化区域范围最大, 它不仅包含了建筑物的变化, 而且包含了建筑物周围其他地物的变化。从两个时相原图像可以看到, 建筑物周围地物如道路、植被等都有较大变化, 单独利用图像像素信息进行变化检测无法获取建筑物变化信息。提取纹理特征进行建筑物变化检测之效果明显优于像素比值法, 首先提取建筑物在两个时相上的纹理特征, 再对提取出的建筑物区域逐像素比较进行变化检测。这种方法充分利用建筑物在图像上的特征来检测建筑物的变化, 但是图像上存在一些纹理特征和建筑物相似的区域, 进行阈值分割后, 这些区域被当作建筑物区域保留下来, 并参与了逐像素比较过程, 这些区域构成了变化检测虚检的部分。检测建筑物阴影的变化并在纹理特征变化图像中去除阴影的影响, 可以在一定程度上减少虚检率, 这种方法适用于建筑物阴影较多的图像, 阴影的影响比较大, 而且其他地物阴影的影响应当非常小; 在建筑物排列较密集的区域, 建筑物阴影被建筑物遮挡, 阴影的影响有限, 这些区域建筑物面积远远超过阴影面积, 仅仅消除阴影对变化检测的影响不能有效提高检测效果。面向对象分类后比较法首先对图像采用像素比值法检测变化区域, 再利用图像的光谱特征对变化区域地物进行分类, 图像上地物共分两类, 建筑物类作为一类, 其他地物合并为一类, 再进行变化检测。由于遥感图像存在同物异谱和同谱异物的现象, 对一些光谱特征相近的地物进行分类很容易造成分类混淆, 如道路和部分建筑物的光谱比较相似, 单纯利用光谱进行分类容易出现分类混淆。从实验结果可以看出, 建筑物和道路以及建筑物和建筑物废墟之间出现了分类混淆的现象, 影响了变化检测正确率。多特征证据融合采用纹理、梯度、边缘 3 种特征进行证据融合, 构建两个时相图像的结构相似度再进行证据判别, 得到变化区域。由于后时相图像在地震后建筑物和非建筑物的边缘特征不是很显著, 道路被倒塌的建筑物覆盖掉, 结合 3 种特征进行变化检测出现了很多孤立的离散小区域, 虚检信息较多, 因此这些区域主要是图像中道路和倒塌建筑物区域带来的影响。

表 4 不同变化检测方法的评价结果

评价指标	正确率	虚检率	漏检率
像素级	50.32%	66.15%	49.68%
特征级	58.01%	55.19%	41.99%
去除阴影	58.01%	41.08%	41.99%
面向对象分类后比较	59.94%	35.37%	40.06%
多特征 D-S 融合	54.97%	35.37%	45.03%
本文方法	65.17%	24.68%	34.83%

结合像素级和特征级变化检测的方法首先利用像素比值法对两个时相图像进行变化检测, 得到全部地物变化信息, 在这个变化区域上再进行特征级变化检测, 这样缩小了特征级变化检测的范围, 降低了非变化区域对检测结果的影响; 在进行特征级变化检测时采用了纹理特征和色调特征相结合的方式, 建筑物和其他地物在这两种特征上的差异性, 降低了分类中的同物异谱和同谱异物的影响; 建筑物阴影的色调和建筑物本身的色调区别明显, 提取建筑物的色调特征减少了建筑物阴影的影响; 采用色调特征和纹理特征相结合降低了对建

筑物边缘的依赖性, 有效地提高了建筑物的检测正确率, 降低了检测的虚检率。表 4 给出了不同变化检测方法的评价结果。从表 4 可以看到, 相对于单独使用像素级变化检测和单独使用纹理特征变化检测, 结合像素级变化检测和特征级变化检测的方法正确率分别提高了 15% 和 7% 左右。虚检率明显降低, 分别降低了 41% 和 31% 左右, 由于特征级变化检测针对的是感兴趣目标的变化, 因此虚检率比像素级要低得多, 将像素级和特征结合可以减少非变化区域的影响, 可以达到比较好的检测效果。由于建筑物阴影在图像上只是很小一部分, 因此去除阴影的方法还是有一定的局限性; 与多特征 D-S 融合法相比, 本文方法正确率有一定提高, 虚检率也有所下降; 与面向对象分类后比较相比, 将像素级和特征级结合起来后变化检测正确率提高了 5%, 虚检率则减少了 10% 左右, 在一定程度上减少了与建筑物光谱相似的地物对变化检测的影响。

**结束语** 目前高分辨率遥感图像变化检测方法的研究还很不成熟, 远远不能满足实际需要。本文提出一种结合像素级和特征级的建筑物变化检测方法, 相比单独使用像素级变化检测或者单独使用特征级变化检测, 该方法可以获得较好的变化检测效果。首先用像素级变化检测得到变化区域, 并对这个区域进行特征级变化检测, 以有效减少未发生变化区域对检测结果的影响。在建筑物特征中将纹理特征和色调特征结合, 提高了建筑提取的精度, 减少了建筑物的漏检。提取建筑物特征时采用阈值分割的方法而不是分类, 这样可以有效减少分类过程中光谱信息相似的地物分类混淆的现象, 提高建筑物提取效率。本文所采用的建筑物和非建筑物的分割阈值主要是靠经验和直方图来设定, 今后的工作重点应该是自适应设定阈值来区分目标和背景。

## 参 考 文 献

- [1] 刘小洲. 高分辨率遥感图像的变化检测技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007
- [2] 唐朴谦, 杨建宇. 基于像素比值的面向对象分类后遥感变化检测方法[J]. 遥感应用, 2010, 1: 69-72
- [3] Huttas A, Nevatia R. Detecting changes in aerial views of man-made structures[J]. Image and Vision Computing, 2000, 18(8): 583-596
- [4] 汪闽, 张星月. 多特征证据融合的遥感图像变化检测[J]. 遥感学报, 2010, 14(3): 564-570
- [5] Wang Wen-jie, Zhao Zhong-ming, Zhu Hai-qing. Object-oriented Change Detection Method Based on Multi-scale and Multi-Feature Fusion[J]. Urban Remote Sensing Event, 2009, 3: 1-5
- [6] 李淑坤, 李培军, 程涛. 加入多时相纹理的遥感变化检测[J]. 国土资源遥感, 2009, 3: 35-39
- [7] 贾振红, 余银峰, 杨杰, 等. 一种新的无监督的卫星影像变化检测算法[J]. 光电子·激光, 2011, 22(3): 461-463
- [8] 吴柯, 牛瑞卿, 王毅, 等. 基于 PCA 与 EM 算法的多光谱遥感影像变化检测研究[J]. 计算机科学, 2010, 37(3): 282-284
- [9] Radke R J, Andra S, Al-Kofahi O, et al. Image change detection algorithms: a systemtic survey[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2005, 14(3): 294-307