



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
12
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB





第20卷第12期（总第236期）

2015年12月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院
主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文
编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会
邮政信箱 北京9718信箱
邮 编 100101
电子信箱 jig@radi.ac.cn
电 话 010-64807995
网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)
印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

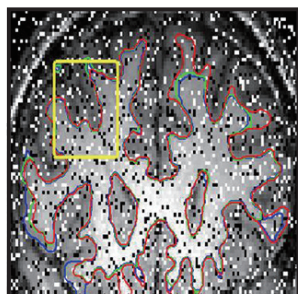
Title inscription: Song Jian | Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

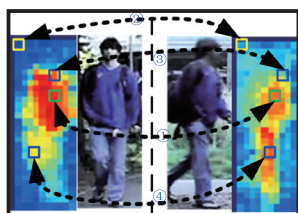
Editor-in-Chief LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics
P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China
Zip code 100101
E-mail jig@radi.ac.cn
Telephone 010-64807995
Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB
ISSN 1006-8961
CODEN ZTTXFZ
国外发行代号 M1406
国内邮发代号 82-831
国内定价 50.00元



融合全局和局部相关熵的图像分割(第1619页)



多方向显著性权值学习的行人再识别(第1674页)



混合编码差分进化粒子群算法及多示例学习的高光谱影像降维与分类(第1689页)

综述

遥感影像变化检测算法综述

佟国峰, 李勇, 丁伟利, 岳晓阳1561

图像处理和编码

紧框架域混合正则化模型在图像恢复中的应用

李旭超, 马松岩, 边素轩1572

色彩熵在图像质量评价中的应用

徐琳, 陈强, 汪青1583

图像分析和识别

字典学习和稀疏表示的海马子区图像分割

时永刚, 王东青, 刘志文1593

阈值标记的分水岭彩色图像分割

张海涛, 李雅男1602

改进K-means活动轮廓模型

张倩颖, 吴纪桃, 谢晓振, 王晓涛1612

融合全局和局部相关熵的图像分割

黄扬, 郭立君, 张荣1619

递进的迭代脉冲噪声检测

孙劲光, 黄旭1629

对数极坐标系下尺度不变特征点的检测与描述

陶涛, 张云1639

子块鉴别分析的路面裂缝检测

钱彬, 唐振民, 徐威, 陶玉婷1652

多尺度构图先验的显著目标检测

王娇娇, 刘政怡1664

多方向显著性权值学习的行人再识别

陈莹, 霍中花1674

基于最大相关熵准则的2维主成分分析

赵丽美, 贾维敏, 王标标, 于强1684

遥感图像处理

混合编码差分进化粒子群算法及多示例学习的高光谱影像降维与分类

高红民, 李臣明, 王艳, 谢科伟, 陈玲慧, 何振宇1689

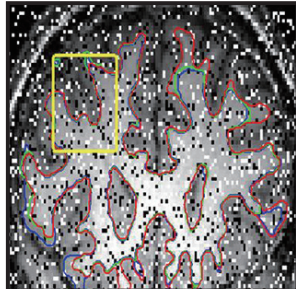
InSAR中应用可靠度导向改进的分级表相位展开算法

宋芳, 李勇, 余涛1699

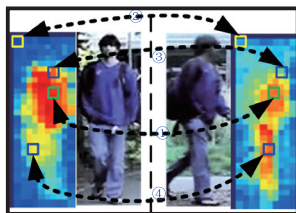
总目次 I

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Integration of global and local correntropy image segmentation algorithm(P1612)



Person re-identification based on multi-directional saliency metric learning(P1674)



Dimension reduction and classification for hyperspectral image based on particle swarm optimization and differential evolution algorithm with hybrid encoding and multiple instance learning(P1689)

Review

Review of remote sensing image change detection

Tong Guofeng, Li Yong, Ding Weili, Yue Xiaoyang 1561

Image Processing and Coding

Applying a hybrid regularization model in a tight frame domain to image restoration

Li Xuchao, Ma Songyan, Bian Suxuan 1572

Application of color entropy to image quality assessment

Xu Lin, Chen Qiang, Wang Qing 1583

Image Analysis and Recognition

Segmentation of hippocampal subfields using dictionary learning and sparse representation

Shi Yonggang, Wang Dongqing, Liu Zhiwen 1593

Watershed algorithm of color image segmentation with threshold mark

Zhang Haitao, Li Yanan 1602

Improved K-means active contours stem

Zhang Qianying, Wu Jitao, Xie Xiaozhen, Wang Xiaotao 1612

Integration of global and local correntropy image segmentation algorithm

Huang Yang, Guo Lijun, Zhang Rong 1619

Progressive iterative impulse noise detection

Sun Jinguang, Huang Xu 1629

Detection and description of scale-invariant keypoints in log-polar space

Tao Tao, Zhang Yun 1639

Pavement crack detection algorithm based on sub-patch discriminant analysis

Qian Bin, Tang Zhenmin, Xu Wei, Tao Yuting 1652

Multi-scale saliency detection based on composition prior

Wang Jiaojiao, Liu Zhengyi 1664

Person re-identification based on multi-directional saliency metric learning

Chen Ying, Huo Zhonghua 1674

Two-dimensional principal component analysis based on maximum correntropy criterion

Zhao Limei, Jia Weimin, Wang Biaobiao, Yu Qiang 1684

Remote Sensing Image Processing

Dimension reduction and classification for hyperspectral image based on particle swarm optimization and differential evolution algorithm with hybrid encoding and multiple instance learning

Gao Hongmin, Li Chenming, Wang Yan, Xie Kewei, Chen Linghui, He Zhenyu 1689

Reliability-guided phase unwrapping algorithm based on improved classification table for InSAR

Song Fang, Li Yong, Yu Tao 1699

中图法分类号: P237 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)12-1561-11

论文引用格式: Tong G F, Li Y, Ding W L, Yue X Y. Review of remote sensing image change detection[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(12): 1561-1571. [佟国峰, 李勇, 丁伟利, 岳晓阳. 遥感影像变化检测算法综述[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(12): 1561-1571.][DOI:10.11834/jig.20151201]

遥感影像变化检测算法综述

佟国峰¹, 李勇^{1,2}, 丁伟利², 岳晓阳¹

1. 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110819; 2. 燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004

摘要: 目的 近年来遥感技术发展迅速, 遥感影像变化检测作为最重要的关键技术之一, 越来越多的应用在国土资源管理、地物变化、农林业的监测等领域。目前依据变化检测的流程的综述相对较少, 大多数综述只针对变化信息提取的方法进行论述, 为使国内外研究者对遥感影像变化检测理论、流程及其现存问题有一个比较全面的认识, 对其进行系统综述。方法 通过对国内外大量的遥感影像变化检测算法进行总结、分类及比较, 按照技术流程的各个环节分别论述, 重点论述了变化信息提取环节中的图像分割、特征提取和分类的发展现状、基本思想及其趋势。结果 目前, 多数变化检测算法主要是针对特定的条件具有较好的效果, 还没有通用性算法, 且现有算法在效率、精度、智能性等方面存在的问题, 大多算法解决的问题及理论相对分散。结合现存问题及目前大数据影响下的技术发展状况, 从数据类型、预处理方法、变化信息提取方法、算法效率、算法理论创新 5 个方面对遥感影像变化检测领域的未来发展趋势进行预测和展望。结论 遥感影像变化检测在多领域具有较高的研究价值, 但针对目前变化检测存在的一些局限性还需要进行深入的研究, 针对变化检测的研究需要从研究热点中挖掘创新思路、引入深度学习等发展趋势。**关键词:** 遥感; 信息提取; 变化检测; 现状; 趋势; 综述

Review of remote sensing image change detection

Tong Guofeng¹, Li Yong^{1,2}, Ding Weili², Yue Xiaoyang¹

1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

Abstract: Objective In recent years, remote sensing technology has developed rapidly. And remote sensing image technology has been applied in more and more fields, especially inland and resources management, earth's surface change, agro-forestry monitoring and other fields. At present, there were relatively few reviews based on change detection process. Most algorithms were only for change information extraction method. In order to make more researchers have a more comprehensive understanding in remote sensing image change detection theory, process and its existing problems, a detailed introduction was reviewed. **Method** a large number of remote sensing image change detection algorithms were summarized, classified and compared. A deep description based on the flow of the change detection technology was given in this paper. And the development status and trends of the image segmentation, feature extraction and classification algorithms in the step of

收稿日期: 2015-05-20; 修回日期: 2015-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(61175031); 国家高技术研究发展计划(863)基金项目(2012AA041402)

第一作者简介: 佟国峰(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 2001 年于东北大学获控制理论与控制工程专业博士学位, 主要研究方向为计算机视觉、3 维重建、遥感影像处理。E-mail: tongguofeng@ise.neu.edu.cn

通信作者: 李勇, 博士研究生, E-mail: 842384077@qq.com

Supported by: National Natural Science Foundation of China(61175031); National High Technology Research and Development Program of China(2012AA041402)

change information extraction were mainly discussed. **Result** Most of the change detection methods have good performance for specified condition. There are no generic algorithm, and the existing algorithms have problems in the perspectives of efficiency, accuracy, intelligent. The majority of algorithms have solved the relatively scattered problems and theories. Combined with the existing problems and the present state of development under the influence of the big data technology, the future development trend of remote sensing images change detection field was forecasted and prospected from five aspects, which are data types, pre-processing method, the change information extraction method, the algorithm efficiency and theoretical innovation. **Conclusion** Remote sensing image change detection has high research value in many areas, but some of the limitations of change detection at the present time also need further research. The study of change detection needs creative thinking from the research hot spot and introducing deep learning and other development trends.

Key words: remote sensing; information extraction; change detection; research situation; prospect; review

0 引言

近年来,我国航空航天技术发展迅速,卫星遥感、无人机航拍、倾斜摄影等遥感技术广泛应用在农、林、地质、海洋、气象、地理、测绘、环保以及军事侦察、导航制导等领域。遥感影像变化检测是指利用不同时期同一区域的遥感影像及相关数据,通过图像处理及数理模型等技术对其进行比较,分析和判断其影像间的变化^[1-4]。遥感影像变化检测技术涉及地理科学、统计科学和计算机科学等多学科交叉的技术,是目前遥感领域研究的热点^[5-6],目前已经在多个领域得到成功应用。如:针对建筑物等人造目标的变化检测算法^[7-10],可以应用在城市规划、建筑监测等领域;针对桥梁、港口和军事基地等目标的变化检测算法^[10],对军事领域的目标识别具有重要意义;针对土地、地貌、河流湖泊、植被变化检测算法^[11],以及基于 MODIS 时序数据的土地覆盖变化情况检测^[12],可以实现地质、农林业监测;应用于湖泊、雪地、植被、街道以及火车站等目标的基于随机场模型的遥感影像变化检测^[13],可以应用在地物状态监测等领域。

遥感影像变化检测的主要任务包括 3 类:确定是否发生变化、判断变化区域的位置以及确定变化类型和特性^[3-4]。目前,一些学者提出了不同遥感影像的变化检测流程,如 Csaba^[9]把变化检测分为图像模型和特征提取、图像分割、变化检测 3 个部分;陈鑫鏢^[14]将变化检测分为:选择数据源、数据预处理、变化信息提取和精度评价 4 个步骤。于海涛^[15]把面向对象的变化检测分为图像分割、特征提取、模式分类 3 个阶段。而上述变化检测流程的划分,都缺乏对变化检测的后处理环节,对于文献[9]和

文献[15]又缺乏变化检测精度评价环节。

然而,当前没有哪一种变化检测流程及方法被普遍认为具有绝对优势,且多数算法解决的问题及理论相对分散,至今大量的学者仍然认为遥感图像变化检测问题还需要对其从原理及技术上进行深入研究^[3-6]。而且,现有的变化检测算法自动化的程度和实时性还难以达到要求,多数算法依靠经验确定一些步骤和参数,在国际上还没有突破性的研究成果。并且,目前依据变化检测的流程的综述相对较少,大多数综述只针对变化信息提取的方法进行论述^[16]。

针对上述现状,本文从技术流程上,将遥感影像的变化检测的过程归纳为:数据选择、数据预处理、变化信息提取、后处理及变化检测输出与分析等 4 个环节,并深入论述和讨论了目前变化检测各个环节的发展现状及技术理论。

图 1 给出了变化检测各个环节所对应的技术手段。其中变化信息提取是关键环节,现有的大多数算法均是针对该环节展开研究的^[3-5,17]。如图 1 所示,变化检测首先选择不同时相的数据源;由于数据源由于其传感器和大气等因素的影响具有一定的误

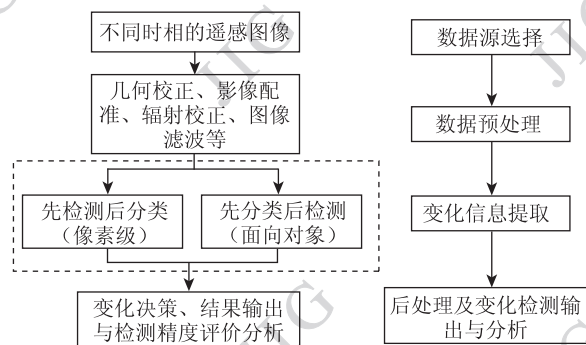


图 1 遥感影像变化检测一般过程

Fig. 1 The process of the remote sensing image change detection

差,并且需要使得对感兴趣区域相匹配,因此,需要对数据源进行预处理,如校正、配准等;然后提取配准后数据的变化信息;由于提取的变化信息受阈值等因素影响,不能直接准确判断变化,因此,需要进一步的后处理及分析,并对变化精度进行评价。其评价结果又可以作为变化信息提取方法、数据源选择等环节的参考依据。

本文首先对现有的研究成果按照变换检测方法的特点进行了分类,并对几类典型的方法进行了对比分析,然后按照遥感影像变化检测的流程对各个环节进行了总结分析;最后,分析了研究现状中存在的问题并发展趋势进行了探讨。

1 遥感影像变化检测研究现状

1.1 遥感影像变化检测方法分类及比较

目前,针对遥感影像变化检测已经提出了大量方法,且有多种分类方式,但还没有一个统一的类型划分方案。因此,总结了图2所示几种常见的变化检测算法分类方法。并对两类主流方法:包括按照输入数

据时相不同的分类方法^[17](如表1所示)和依据变化检测的基本单元的分类方法^[15](如表2所示)从数据类型、方法原理、优缺点等方面进行了对比。

1.2 遥感影像变化检测各阶段方法分析

目前,大部分变化检测算法都是针对特定的应用而设计,且都要经过以下环节:

1.2.1 数据选择

遥感影像变化检测首先需要选择数据源。目前变化检测所利用的数据源有多种,包括低空无人机航拍影像、SAR图像、遥感卫星影像(如高分辨率彩色图像、DSM(digital surface model)、Landsat卫星MSS/TM/ETM等)、红外影像、GIS以及多影像融合数据等;在数据的时相上,有单时相影像、多时相影像;在光谱的波段上,有单波段影像、多波段影像;在数据的类型上,有影像间变化检测、以影像为主源辅助其他数据的变化检测、非影像数据与影像数据综合考虑的变化检测^[26]。在数据选取时,考虑到检测区域的自然特征、光照及光谱信息等因素,最好选择同一传感器的数据,在时空上尽可能使数据减少物候和太阳高度角等因素引起的误差^[14]。



图2 遥感图像变化检测算法分类

Fig. 2 The classification of the remote sensing images change detection methods

表 1 不同时相输入数据的遥感影像变化检测方法总结和对比

Table 1 Summary and comparison change detection methods with different entered images

类别	数据类型	方法原理	优点	缺点	文献
单时相分类比较法	单时相多光谱或连续时相单波段影像融合成的多波段影像	把不同时相影像先分类再比较,进而分析变化区域及类别	简单、应用广泛,可以获得变化类别及时空分布	耗时耗力,地面验证工作难	文献[8, 13, 16]
双时相比拟法	两个时相的多光谱影像或两个时间段长度相同的时序影像	多时相遥感影像两两组合直接进行变化检测,再进行判别分析	理论及应用相对成熟,利用像素级多特征融合,使检测结果更加可靠	变化检测的指标规则、变化阈值难判定,对长时序影像处理能力不足	文献[20-22]
时序分析法	单波段量化参数(多为同时相时序影像)	利用特征统计或影像变换等数学统计方法量化分析地物在时序上的变化趋势和规律,再变化检测分析	有效的挖掘时序变化信息,变化判别指标的制定更加容易,效率及精度较高	遥感数据要有一定的时间积累,对不同时序的影像,不能利用统一的变化阈值判定变化区域及类别	文献[9, 23-24]

表 2 不同基本单元大小的遥感影像变化检测方法总结和对比

Table 2 Summary and comparison change detection methods with different base objects

类别	方法原理	优点	缺点	典型文献
基于像素的变化检测	以像素为检测单元	简单易行、应用广泛	只考虑单个像元的特征,缺少周围像元的光谱特征及邻近像元的空间特征,检测精度较低。对噪声敏感,处理工作量大	文献[10, 18, 28, 32, 32-33]
面向对象的变化检测	以像素簇为检测对象	影像分割时整合了光谱信息和空间信息,能够更好地克服噪声	现有的分割算法具有一定局限性,很难针对同一类研究目标实现最佳分割	文献[8, 12, 16, 19, 23, 25, 29]

根据输入数据的不同,研究者提出了大量不同的算法,如针对建筑物的变换检测,可以利用低空航空影像^[7,27]、DTM (digital terrain model) 和 DSM 数据^[34]、全色图像和 SAR 影像^[35]、ADS40 近红外波段的遥感影像和数字表面模型数据^[37]等,通过提取建筑物区域、高度、颜色等特征进行变化检测;针对城市土地覆盖变化及城市地物变化等检测,可以利用高分

辨率遥感影像^[16,30-31]等、结合 SAR 影像与 TM 的数据^[36]进行变化检测。表 3 对常用的几种数据进行了对比,通过对比可知:基于单一数据的变化检测都会受到数据精度等条件约束,但是种数据又具有其特性,然而,将多种数据源进行融合,可以解决单一数据的一些缺点,使得多源数据相互约束和互补,提高变化检测的精度和应用性,因此,多元融合数据具有广阔的前景。

表 3 不同类型的遥感数据源的优缺点及应用的对比

Table 3 The comparison of advantages、disadvantages and application with different kinds of remote sensing data

类别	优点	缺点	应用
航拍影像	具有彩色信息、分辨率高、视场角大、可提供同一场景多角度影像、纹理丰富、能够反映建筑物等目标的结构信息	无法直接获取三维信息、受到光照、季节、阴影等条件影像较大、畸变相对大、不如卫星稳定、成本较高	广泛应用在建筑物等人造目标的变化检测
高分辨率卫星影像	具有经济性、稳定性、实时性,影像清晰度高、可提供彩色、纹理等信息、较好地反映结构信息、应用范围广	数据量大、处理数据难度大且耗时、卫星影像视场角一般在 15°~20°之间,范围较小	广泛应用在各个领域,且通常与其他数据融合
SAR 影像	不受光照和天气等条件影响、具有多极化和一定的透射能力、分辨率具有距离和方向、有大量强散射,可利用区域的非相似性和纹理均匀性	具有相干乘性噪声、低信噪比、易产生斑点噪声、目标边界比较模糊、侧视成像,使得建筑物等目标结构形状不易直接区分	应用在需要高度信息、受天气影像较大的情况
GIS	提供多源数据、集成分析、丰富的语意和非语义信息、适用复杂影像、可控、可靠性和通用性高	不同来源数据其精度度量常不一致、容易有精度损失、集成层次有待提高	一般与遥感影像融合对建筑物、地标地貌等监测

1.2.2 数据预处理

预处理的过程及方法要根据需求及数据的误差情况选择,如图3所示,一般数据预处理包括:几何

校正、影像配准、辐射校正、图像滤波、图像增强、影像镶嵌等。在预处理中,图像的校正和配准为关键步骤。

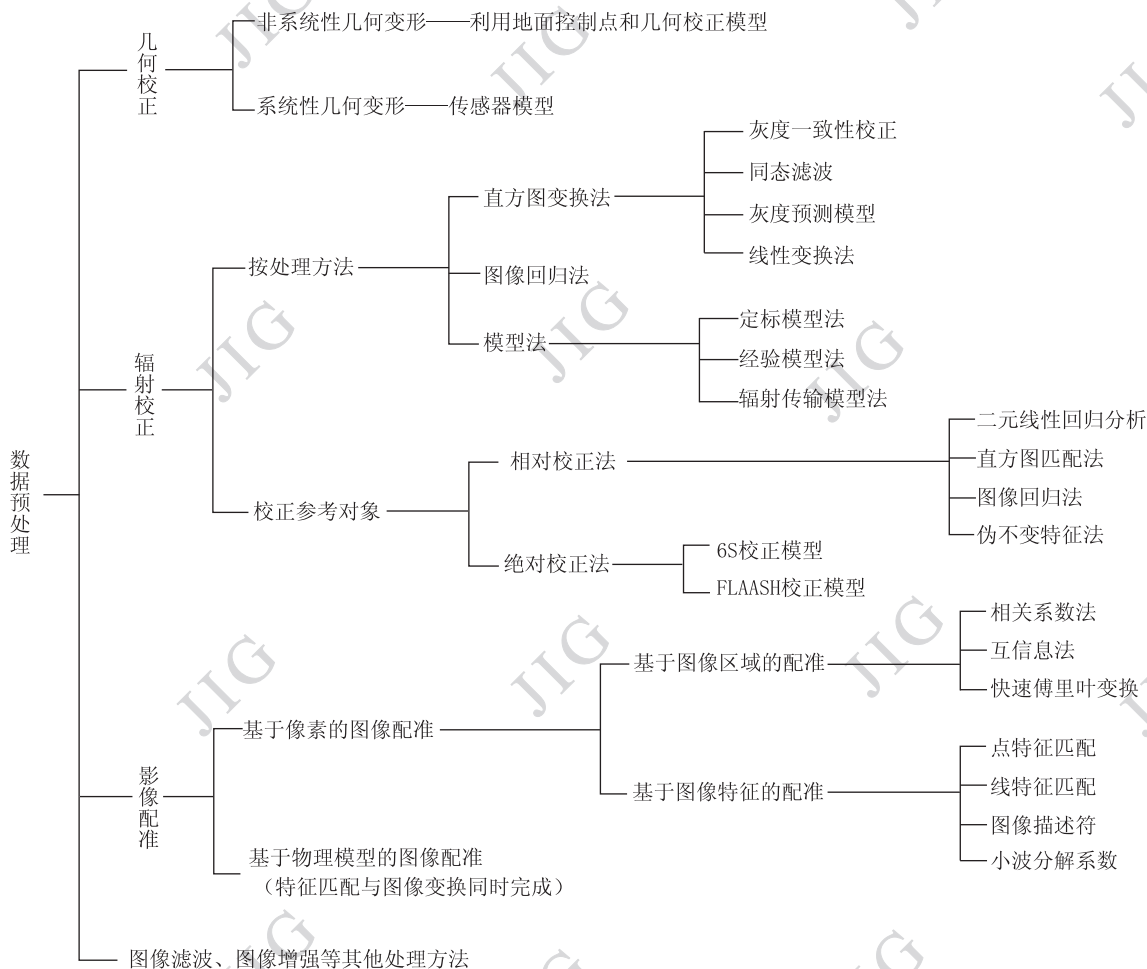


图3 遥感影像变化检测的数据预处理方法体系

Fig. 3 The method system of data pre-processing in remote sensing image change detection

遥感图像的校正可分为绝对校正和相对校正。其中,几何畸变可以通过将不同的遥感图像校正到同一坐标系下或者以其中一幅遥感图像为参考系统,对其他图像进行校正^[14]。辐射畸变为传感器得到的测量值与目标的光谱反射率或光谱辐射亮度不一致^[38]。辐射绝对校正即利用一些绝对的模型进行校正,相对校正即为以一幅影像为基准,对其他影像进行校正。

在进行变化信息提取前需要对图像精确配准,配准不准确则会导致变化检测时产生大量的伪变化区域,严重影响检测的结果。遥感图像的配准主要是通过利用合适的空域变换来实现的。早期的配准方法主要采用多项式配准算法,后来又提出了相关函数的配准算法,近年来又提出了序贯性相似度检

测算法、神经网络配准法等^[39]。目前大多数配准还是需要依据图像中的特征进行匹配,如利用点特征(Moravec算子、Hannah算子、Dreschler算子、Forstner算子、Harris角点、Hog算子、SIFT算子等)、线特征、典型现状或面状地物、特征点和小面元的多源信息等。例如,王东广^[32]通过均匀选取控制点基于二阶多项式的几何变换方法使配准误差控制在0.5个像元以内,然后使用灰度累积直方图累积绝对差值最小法找到相互对应的灰度级,最后进行灰度级映射完成配准。大部分预处理方法主要是基于图3所列出的一些方法及其组合和改进。目前,随着数据的多源化,基于多源信息特征的匹配校准方法越来越受到关注。由于多源数据可通过不同源数据的特征进行匹配而互相约束,使得匹配更加准确。在特

征匹配中,SIFT 算子等特征应用较为广泛。

1.2.3 变化信息提取

变化信息提取是遥感图像变化检测的核心,其提取结果对数据预处理的结果起到反馈作用,同时对变化检测结果精度及后续处理等起到决定性作用。下面主要按照基于像素的变化检测(像素级)和面向对象的变化检测对变化信息提取展开分析:

1) 基于像素的变化信息提取。基于像素的变化检测算法是以像素为处理单元的方法,如王立民^[10]用 D-S(dempster-shafer)证据理论组合多种变化检测算法构成融合差值图,再进行二值判决的一种决策层融合检测算法;Wang 等人^[33]对输入的图像像素进行灰度级归一化,然后针对每个像素利用

线性合成方法生成差异图像及其参数,再结合贝叶斯优化算法和地图技术对参数进行优化,最终检测出变化区域。这类算法一般直接对输入的影像按照像素级的光谱特征、纹理特征等其他具体意义的特征(水体、植被指数等)进行差值或者比值等处理,得到差异图像,然后利用阈值分割的方法对变化信息进行提取。有的算法是利用图像中的每个像素逐一进行比较,然后利用分类器或者机器学习方式进行变化检测。其中,对判断像素是否发生变化是关键步骤,其核心是阈值分割和分类。常用的阈值分割算法如图 4 所示。对于分类器的选择,与面向对象检测的分类提取相似。基于像素的变化检测的优缺点如表 2 所示。

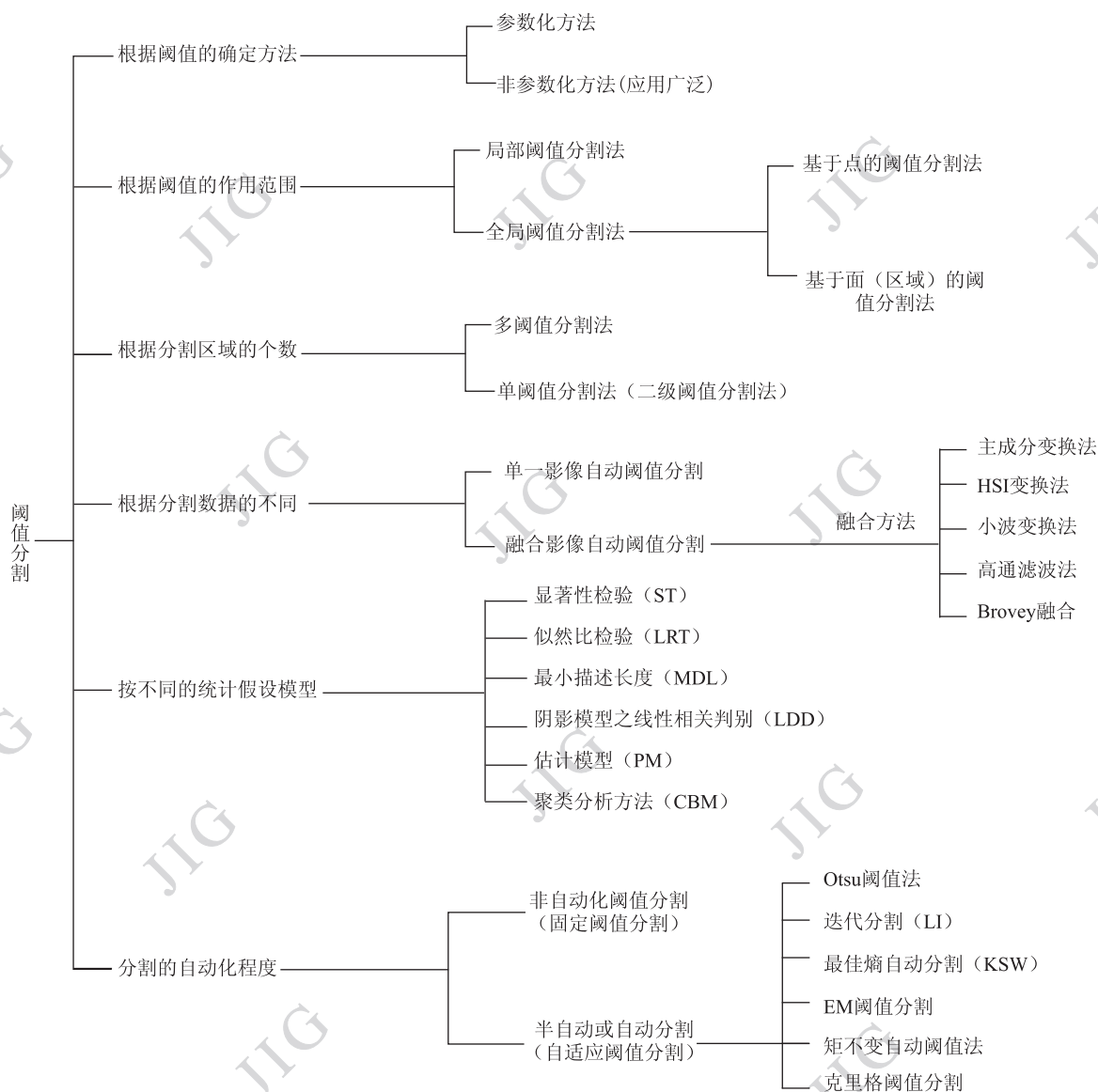


图 4 常用阈值分割方法分类总结

Fig. 4 The classification of the threshold segmentation methods

2)面向对象的变化检测。基于像素的变化检测缺乏邻近像元的空间特征和光谱特征信息,且对噪声敏感。随着遥感技术的发展,遥感影像趋于高分辨率影像,对于像素级变化检测不能满足需求,近年来许多学者提出了面向对象检测的思想。典型的面向对象的检测算法如:汤玉琦^[16]针对高分辨率影像运用多尺度、多方向的形态学操作进行房屋结构、光谱特征描述,并引入线性结构算子(SE)与脉冲耦合神经网络(PCNN)和构建房屋“容错性”变化检测模型相结合的方法,进行房屋变化检测;Desclée等人^[23]首先对多时相遥感影像进行综合分割,然后对分割的各个区域进行变化向量统计和Chi-Square变换进行阈值估计,从而对林地进行变化检测等。这类面向对象的变化检测方法一般先进行图像分割,然后利用特征信息进行分类检测。面向对象的这类算法以图像分割和分类为基础,综合了像元周围的空间和光谱特性,把具有同质性的像素进行组合构成对象,然后以对象为单位进行光谱特征、形状特征、纹理特征、空间上下文邻域关系和具有实际意义的特征(如植被系数等)进行比较,从而进行变化检测。这类方法是目前变化检测的主流方法,在建筑物变化检测、城市土地管理等方面有着广泛的应用,其优缺点如表2所示。面向对象的变化检测与基于像素的变化检测虽然是两类不同的方法,但在检测环节、分割及分类提取上有着一些相似及交叉的地方。

图像分割是面向对象变化检测的关键,也是难点,目前还没有一种具有通用性的分割算法,大多数分割算法都是针对特定的目标进行,而且,由于高分辨率影像中目标的多样性和复杂性,很难实现对遥感图像正确分割,因此,遥感影像分割一直是学者们研究的热点,大量的图像分割算法被提出(图5)。如基于马尔可夫模型的图像分割^[13,29]、基于多尺度分割^[19,40]、基于形态学的分割^[32]、基于区域生长法的图像分割^[41]等。目前,基于单尺度的分割,如区域生长法,由于只针对一个维度的分割,约束条件较少,容易造成遥感影像的过分割和误分割等。而基于多尺度分割的分割充分利用了多个尺度的信息,通过对不同尺度的分割对分割结果进行约束优化,是目前一种较好的变化检测方法,较受认可。如吴一全等人^[40]先基于Contourlet变换、复Contourlet变

换(CCT)、非下采样Contourlet变换(NSCT)等多尺度几何分析对土地遥感图像进行多尺度分解,然后利用ICA分离独立分量,最后采用Otsu阈值分割法进行变化检测。这类多尺度分割是一种自下而上采用异质性最小的区域合并策略的影像分割方法。分割时基于局部最佳相互适配原则,将每个像元逐步合并成较大的多边形对象^[16]。

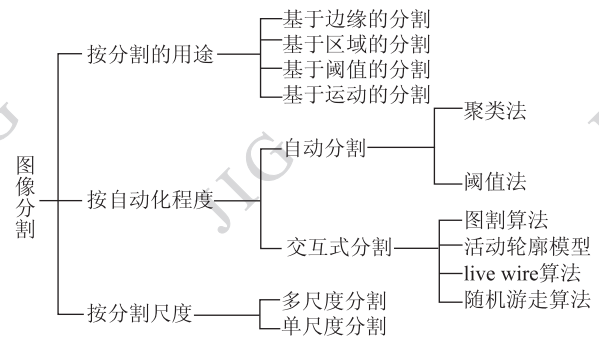


图5 遥感图像分割常用算法分类总结

Fig. 5 The classification of the image segmentation methods

特征提取是遥感影像变化检测的重要环节,基于像素的变化检测算法和面向对象的检测算法都需要利用特征信息进行变化信息提取,只是两类算法所利用的特征信息的类型有所不同。如针对森林等地物变化,利用植被指数等特征进行变化检测;针对建筑物变化检测则利用几何结构特征、纹理特征、边缘特征等特征信息;具有广泛应用性的Gabor纹理、新提出的Log-Gabor纹理信息等。其中,颜色特征对于绿色植被、海洋湖泊、建筑物等目标的变化检测起到重要作用,但其稳定性较差,不具有通用性,在变化检测时容易受到环境条件的干扰;形状特征广泛应用于规则形状的目标如建筑物的变化检测,其应用性具有一定的局限性;光谱特征的提取简单容易,且基于单个像素的特征,没有考虑到像素的空间信息,稳定性较差;纹理特征的信息丰富,充分考虑了像素的空间信息,特征稳定,适用性强,是目前最常用的特征信息,然而,纹理特征的提取一般需要大量的计算。常用的特征类型及特征提取算法,如图6所示。

基于像素的变化检测直接对像素差异图像进行阈值分割进行变化信息提取。而面向对象变化检测中,经过图像分割后,需要基于分割后的对象进行变化信息提取,主要应用分类器、机器学习等方法进行分类。本文针对一些典型的遥感图像变

化信息分类提取方法进行了分类总结,如图7所示。常用分类方法一般是基于监督和非监督的方法,对于监督分类,常常需要根据一些先验的知识构造一些规则,依据规则对待分类的目标分类,这种分类方法不需要大量的训练样本,工作量小,然而,这类方法对规则的制定和规则的有效性和通用性要求较高,容易造成误判,容易受到干扰。对

于非监督的分类方法需要用大量的样本进行训练,通过与训练样本的比较判断类别,无需先验规则,但是对训练样本的选取要求较高,对样本的标记等工作量大。其他常用的分类方法如SVM分类法^[8]、广义高斯模型及KI双阈值法的非监督方法^[28]、基于神经网络(PCNN、HNN)的变化分类算法^[15,36]等。

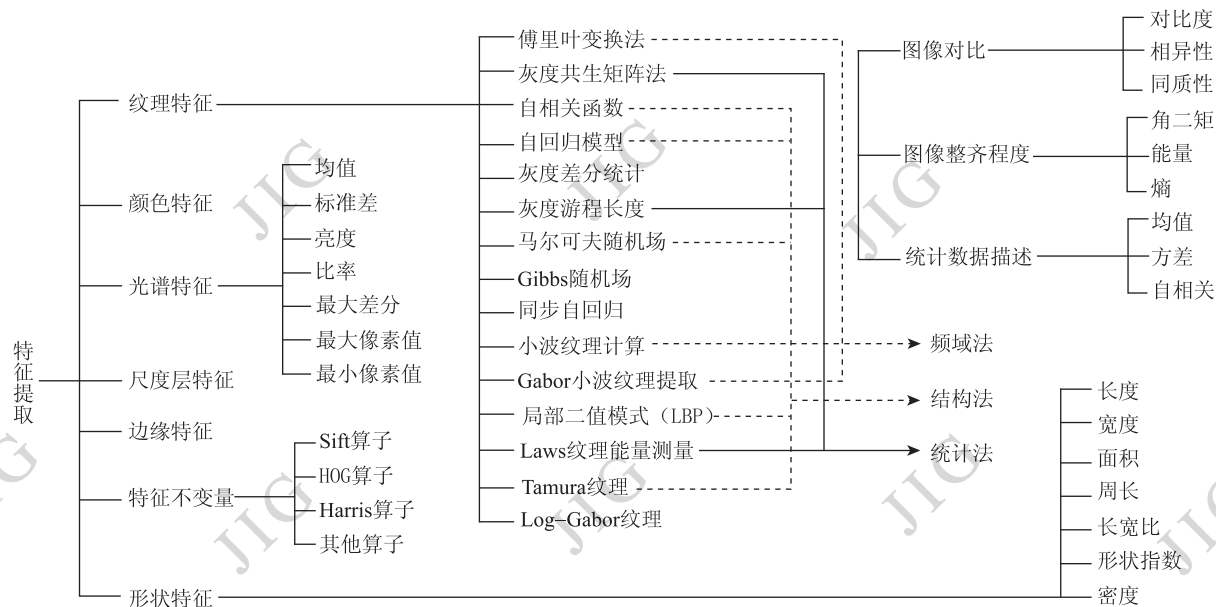


图6 特征类别及提取方法分类总结

Fig. 6 The classification of the feature detection methods

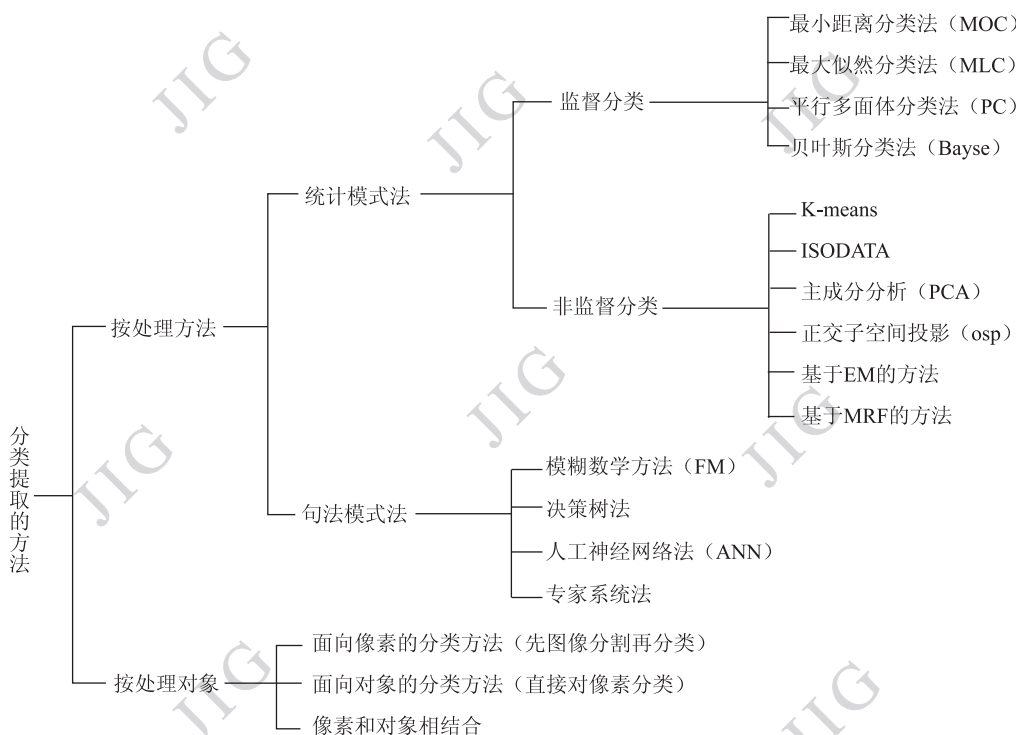


图7 遥感图像变化信息分类提取方法分类总结

Fig. 7 The classification of the change information extraction methods

1.2.4 其他环节

在变化信息提取之后,一般会产生一些很小的图斑等噪声干扰,对后续的变化区域判断产生影像,因此,需要进行后处理对变化检测结果进行优化,提高检测精确度。常用的变化检测后处理优化方法主要有:基于滤波处理的方法、基于区域生长的方法、基于数学形态学处理的方法等。而基于滤波及基于区域生长的方法在计算速度上不及形态学方法,因此,基于形态学的后处理方法的应用相对更为广泛,例如,王东广^[32]利用形态学处理方法对提取的变化信息进行优化,消除变化检测中的噪声,实现检测土地利用的变化。

变化检测性能评价是变化检测流程的重要环节,在变化检测的精度评估中,存在不同层次的两个精度概念。一个是关注变化/未变化两大类,另一个是发生变化地物的类型改变。一般感兴趣的在于是否发生变化以及发生变化的位置等进行定量分析。目前,遥感影像精度评估常用构造误差矩阵的方式评价变化检测的精度,如:总体精度、生产精度、使用精度等^[14]。其中,精度指标一般包括正确检测的变化像素百分比(TP)、正确检测的非变化像素百分比(TN)、虚检率(FR)、漏检率(FN)和 Kappa 系数等。不同的评价指标代表了算法不同方面的特性。通常,在精度评估中,需要综合利用多种评估变化检测的结果精度。有时为了更全面的评价变化检测算法,会引入运行时间来对算法效率进行评价。

2 现存问题分析及发展趋势

基于遥感影像的变化检测过程是复杂的,涉及图像预处理、阈值分割、特征提取、图像分割及分类等环节。现有的算法在各个环节中还不能实现智能化处理,并且每个环节都可能会造成检测误差。目前多数算法仅针对特定的数据或应用领域,没有通用的遥感影像变化检测算法^[14],而且自动化程度低,面对当今的大数据,处理能力有待提高,很难满足实时性。

对于输入数据,影像的分辨率、目标的定位精度等影像数据的质量等对变化检测的误差均产生或大或小的影响,因此,需要增加输入影像的质量;在对影像预处理中,对于影像噪声的直接滤除方法还有待加强,例如在森林监测中对病虫害引起的等变化

检测、在土地覆盖情况检测、海洋面积变化监测等变化较小或者目标较小的变化检测中,需要通过预处理的方式减少噪声干扰;在变化信息提取上所需要改进的方面比较多,如在基于像素的变化检测方法的图像阈值分割中,其自动化程度不够,尤其是目前遥感影像为高分辨率影像,对分割阈值的选取直接影像变化检测的精度。在面向对象的变化检测的图像分割中,还没有一种通用的图像分割算法,其对象的分割效果对变化检测结果影像较大,分割不准确或不完整,很容易造成漏检或者过检情况。在变化检测特征提取及分类上,对特征要求和训练样本都有较高的要求,目前特征的有效性和对特征的降维还有待提高,训练样本也不够完善,而且现有算法无法对变化的类型进行准确判断;在变化检测的理论上不是完备的信息反演,对系统的理论基础研究不足,在3维变化检测需要大量人工干预,因此,自动化的遥感变化检测还需要更深入的研究。在检测效率上,目前遥感影像数据越来越大,而且对于多时相多时段的变化检测很难达到实时性的要求,对处理器的要求也非常高;对于精度评估,现有的大部分是针对像素的精度评估,缺乏面向对象的精度评估。

在未来发展方向上主要从以下几个部分进行研究:

1)从数据源角度,航空影像,尤其是倾斜摄影技术的快速发展,能够提供更清晰更多元化的遥感影像,因此,可以将倾斜摄影技术融入到变化检测。目前遥感技术可以提供多种数据类型,如 SAR 数据、GIS 数据、高分辨率卫星影像数据和多种时间、空间的实测数据,因此,充分利用多源数据,集成检测,互相弥补各类数据的不足,提高变化检测的准确度。同时,对于多源数据融合算法的改进以及基于融合影像和多时相遥感影像的变化检测是未来的重点研究方向。此外,由于目前变化检测主要依赖于2维信息的检测,随着3维重建技术的发展,利用3维数据对建筑等进行变化检测也是未来发展的方向。其中,基于倾斜影响的3维重建及基于航空影像和地面街景影像的空地一体化3维信息获取方法是研究的热点。

2)在预处理方面,要充分考虑到各类畸变,把3维重建中的参数求解、立体匹配等方法引入到配准与变化检测上,减小误差累积与扩散。同时,利用 Low-rank 的方式,选择有效的特征,提高配准的准确

率和快速性。

3)在变化信息提取方面,引入一些新知识和模型,如近年来引入的马尔可夫随机场、人工神经网络、机器学习等方法。在图像分割中,比较趋于采用多尺度分割、多数据融合分割以及多种算法相结合的图像分割方式。目前,深度学习的方法越来越受到关注,并且在基于大数据的特征提取及分类方面展现了无可比拟的优势,因此可以考虑把深度学习引入到变化检测中,由于深度学习不需要指定特征类别,避免了图像分割和变化检测难以选择有效特征的问题,因此可以更好地解决特征提取的有效性、维度问题和机器学习中需要标记大量数据的问题,从而提高变化检测的自动化程度。

4)在算法效率角度,把并行处理引入到算法的设计上,在设计算法时要充分考虑到算法并行化程度,如算法利用 CUDA 或者 GPU 加速。

5)在算法理论创新性角度,充分利用最优化、概率论等数学理论,在理论上降低算法的难度,提高算法的效率及鲁棒性。

参考文献 (References)

- [1] Dai Q, Ma J W, Ouyang Y, et al. Remote sensing change detection using bayesian networks[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(6): 705-709. [戴芹,马建文,欧阳赞,等. 利用贝叶斯网络进行遥感变化检测[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(6): 705-709.] [DOI:10.11834/jig.200506138]
- [2] Deer P. Digital Change Detection Techniques: Civilian and Military Application[M]. London: Taylar & Francis, 1999:1-250.
- [3] Sun X X, Zhang J X, Yan Q, et al. A summary on current techniques and prospects of remote sensing change detection[J]. Remote Sensing Information, 2011, 26(1): 119-123. [孙晓霞,张继贤,燕琴,等. 遥感影像变化检测方法综述及展望[J]. 遥感信息, 2011, 26(1): 119-123.]
- [4] Zhou Q M. Review on change detection using multi-temporal remotely sensed imagery[J]. Geomatics World, 2011, 18(2): 28-32. [周启鸣. 多时相遥感影像变化检测综述[J]. 地理信息世界, 2011, 18(2): 28-32.]
- [5] Celik T, Ma A K. Multitemporal image change detection using undecimated discrete wavelet transform and active contours[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 2(49): 706-717.
- [6] Mei Y, Lu M. Review on the change detection technology based on remote sensing imagery [J]. Geomatics World, 2009, 16(2): 42-47. [梅洋,陆苗. 基于遥感影像的变化检测研究动态[J]. 地理信息世界, 2009, 16(2): 42-47.]
- [7] Yuan Y L. Investigation of identification of unauthorized construction of city based on aerial image[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. [袁延良. 基于航空影像的城市违章建筑识别研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.]
- [8] Su J, Wang G J, Lin X G, et. al. A change detection algorithm for manmade objects based on multitemporal remote sensing images[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(9): 1040-1046. [苏娟,王贵锦,林行刚,等. 基于多时相遥感图像的人造目标变化检测算法[J]. 自动化学报, 2008, 34(9): 1040-1046.]
- [9] Csaba B, Xavier D, Josiane Z. Building development monitoring in multitemporal remotely sensed image pairs with stochastic birth-death dynamics[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(1): 33-50.
- [10] Wang L M. Multi-temporal remote sensing image change detection based on pixel-level[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. [王立民. 多时相遥感图像像素级的变化检测方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.]
- [11] Rajesh S, Devkar D, Kale K V. Change detection in optical images using image fusion technique[J]. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, 2014, 4(8): 226-233.
- [12] Luo W, Li H L. PCA based unsupervised change detection for color satellite images under the quaternion model[C]//International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Chengdu: IEEE, 2010: 1-4.
- [13] Wei L F. The research of the remote sensing image change detection based on random fields[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011. [魏立飞. 基于随机场模型的遥感影像变化检测方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011.]
- [14] Chen X B. A summary of change detection techniques of remote sensing imagery[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2012, 25(9): 38-41. [陈鑫鏢, 遥感影像变化检测技术发展综述[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 25(9): 38-41.]
- [15] Yu H T. Research of remote sensing image classification algorithm based on superpixel region merging[D]. Shenyang: North-eastern University, 2014. [于海涛. 基于超像素区域融合的遥感图像地物分类算法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.]
- [16] Yin S J, Wu C Q, Wang Q, et al. Review of change detection methods using multi-temporal remotely sensed images[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(12): 3339-3342. [殷守敬, 吴传庆, 王桥, 等. 多时相遥感影像变化检测方法研究进展综述[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(12): 3339-3342.]
- [17] Tang Y Q. Object-oriented change detection with multi-feature in urban high-resolution remote sensing imagery[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. [汤玉奇. 面向对象的高分辨率影像城

- 市多特征变化检测研究[D]. 武汉:武汉大学,2013.]
- [18] Wu Y Q, Cao Z Q, Tao F X. Change detection of remote sensing images by multi-scale geometric analysis and KICA[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(1):127-133.
- [19] Duan S X. Research of land using change detection based on many remote sensing images [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013. [段赛仙. 基于多时相遥感影像的土地利用变化检测研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2013.]
- [20] Lambin E F, Strahler A H. Indicators of land-cover change for change-vector analysis in multi-temporal space at coarse spatial scales[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15: 2099-2119.
- [21] Wang L, Chen J, Gong P, et al. Land cover change detection with a cross-correlogram spectral matching algorithm[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(12):3259-3273.
- [22] He C Y, Zhao Y Y, Tian J, et al. Improving change vector analysis by cross-correlogram spectral matching for accurate detection of land-cover conversion [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(4): 1127-1145.
- [23] Desclée B, Bogaert P, Defourny P. Forest change detection by statistical object-based method[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(2):1-11.
- [24] Marchesi S, Bruzzone L. ICA and kernel ICA for change detection in multispectral remote sensing images[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston: IEEE, 2009, 980-983.
- [25] Csaba B, Tamás S. Change detection in optical aerial images by a multi-layer conditional mixed markov model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(10): 3416-3430.
- [26] Lu D, Mausel P, Brondizio E, et al. Change detection techniques[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(12): 2365-2407.
- [27] Mayer H. Automatic object extraction from aerial imagery-a survey focusing on buildings[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1999, 74: 138-149.
- [28] Hu S L. The generalized gaussian model and KI unsupervised threshold method of SAR image change detection[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(1): 116-122. [胡召玲. 广义高斯模型及KI双阈值的SAR图像非监督变化检测[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 116-122.]
- [29] Wang F. Unsupervised change detection on SAR images using triplet markov field model[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 4(10):697-701.
- [30] Feng L. Change detection of urban typical land coverage based on high-resolution satellite remote sensing[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014. [冯磊. 基于高分辨率卫星遥感的城市典型地物变化检测[D]. 沈阳:东北大学, 2014.]
- [31] Zhou W, Troy A, Grove M. Object-based land cover classification and change analysis in the Baltimore metropolitan area using multi-temporal high resolution remote sensing data[J]. *Sensors*, 2008, 8(3): 1613-1636.
- [32] Wang D G. Change detection of construction land from low-altitude aerial imagery[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013. [王东广. 基于低空遥感影像的建设用地变化检测研究[D]. 南京:南京大学,2013.]
- [33] Wang L, Li H L. Soft-change detection in optical satellite images [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(5):879-883.
- [34] Champion N. 2D building change detection from high resolution aerial images and correlation digital surface[J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2007, (1):19-21.
- [35] Zhang Y M. A recognition and change detection method for buildings in remote sensing images[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(4):653-667. [张永梅. 遥感图像建筑物识别及变化检测方法[J]. 电子学报, 2014, 42(4):653-667.]
- [36] Hu H T, Ban Y F. Urban land-cover mapping and change detection with Radarsat SAR data using neural network and rule-based classifiers[C]//Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. Beijing: ISPRS, 2008, 37:1549-1553.
- [37] Zhu L, Shimamura H, Tachibana K, et al. Building change detection based on object extraction in dense urban areas [C]//Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. Beijing: ISPRS, 2008, 37: 905-908.
- [38] Elvidge C D, Yuan D, Weerackoon R D, et al. Relative radiometric normalization of landsat multispectral scanner (MSS) data using an automatic scatter gram-controlled regression[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1995, 61: 1255-1260.
- [39] Zhang B. Registration of airborne remote sensing images based on Harris and QGA[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009. [张博. 基于Harris和QGA的航空遥感图像配准[D]. 沈阳:东北大学, 2009.]
- [40] Wu Y Q, Cao Z Q, Tao F X. Change detection of remote sensing images by multi-scale geometric analysis and KICA[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(1): 127-133. [吴一全, 曹照清, 陶飞翔. 结合多尺度几何分析和KICA的遥感图像变化检测[J]. 遥感学报, 2015, 19(1): 127-133.]
- [41] Yi Y F. Study and application of image segmentation algorithms [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012. [依玉峰. 图像分割算法的研究与应用[D]. 沈阳:东北大学,2012.]