



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Remote Sensing Change Detection Based on
Enhanced Spatial Information

郝明 史文中 邓喀中 著

空间信息准确性 增强遥感变化检测



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

空间信息准确性增强 遥感变化检测

Remote Sensing Change Detection Based on
Enhanced Spatial Information

郝明 史文中 邓喀中 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 中国矿业大学环境与测绘学院 2017

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 简 介

本书对现有变化检测方法存在的不确定性进行深入分析,针对不同空间分辨率的遥感影像,分别在像素级、对象级和特征级进行研究,通过增强空间信息的准确性,提出可靠性的光谱与空间信息结合的变化检测方法,降低遥感数据本身与变化检测方法的不确定性对变化检测结果的影响,最终提高变化检测精度。研究成果分别在像素级、对象级和特征级为光谱与空间信息结合的变化检测提供新的思路,在遥感变化检测和遥感应用等方面具有重要理论意义与应用价值。

本书主要读者对象为地学领域的研究人员、相关领域的研究生,也可供从事测绘、遥感和地理信息系统的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

空间信息准确性增强遥感变化检测/郝明,史文中,
邓喀中著. —北京:测绘出版社,2017. 5

ISBN 978-7-5030-4012-2

I. ①空… II. ①郝… ②史… ③邓… III. ①测绘—
遥感技术 IV. ①P237

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 294615 号

责任编辑	雷秀丽	封面设计	李 伟	责任校对	孙立新	责任印制	陈 超
出版发行	测 绘 出 版 社			电 话	010—83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010—68531363(编辑部)		
电子邮箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	8.5			字 数	167 千字		
版 次	2017 年 5 月第 1 版			印 次	2017 年 5 月第 1 次印刷		
印 数	001—800			定 价	36.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-4012-2

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

遥感变化检测技术已成为一种有效的地表变化监测手段。然而,由于自然环境本身的复杂性、与遥感波谱相互作用的复杂性以及传感器本身的局限性,使得获取的遥感影像中存在大量的混合像素、“同物异谱”和“同谱异物”等现象。此外,遥感影像预处理与变化检测算法本身存在的不确定性也降低了变化检测的精度。研究表明,光谱与空间信息结合的变化检测方法可以在一定程度上解决上述问题,但多数方法对空间信息的描述和利用还不够准确。基于此,在“江苏高校优势学科建设工程资助项目(测绘科学与技术)”和“测绘地理信息科技出版资金”的资助下,本书对现有变化检测方法存在的不确定性进行深入分析,针对不同空间分辨率的遥感影像,分别基于像素级、对象级和特征级方法增强空间信息的准确性,提出可靠的光谱与空间信息结合的变化检测方法,降低遥感数据本身及变化检测方法的不确定性对检测结果的影响,提高变化检测精度。研究成果将为结合光谱与空间信息的变化检测提供新思路。

针对遥感影像中存在的混合像素及模糊边界问题,本书提出一系列新的基于主动轮廓模型的变化检测方法:①在像素级层上,假设差分影像符合混合高斯分布,用最大期望(expectation-maximization, EM)算法估计未变化和变化像素的灰度平均值,并将其引入主动轮廓模型中建立新的能量函数,增强未变化和变化像素的区分程度,提高了变化检测精度;②在特征级层上,提出对小尺度和大尺度变化检测图进行优势融合的策略,保留不同轮廓长度参数下变化检测图的优势,在一定程度上减弱了轮廓长度参数对变化检测结果精度的影响;③在对象级层上,以震前的矢量数据提供的建筑物轮廓作为初始轮廓,利用主动轮廓模型处理震后的高分辨率遥感影像,检测倒塌建筑物,避免了设置阈值带来的不确定性,提高了检测结果的精度和稳定性。

在像素级层上,本书提出了基于空间邻域信息准确性增强的马尔可夫随机场(Markov random field, MRF)变化检测方法:①通过空间引力模型将模糊 C 均值(fuzzy C-means, FCM)聚类算法计算得到的隶属度信息引入到 MRF 中,增强了像素空间邻域关系的准确性,得到了更高精度的变化检测结果;②根据估计的变化和未变化类别的中心像素灰度值设置阈值 T_1 和 T_2 ,将差分影像分为未变化、不确定是否变化和变化三部分,并分别设计不同的空间信息权重计算策略,减弱了传统方法对空间邻域信息的过度利用,提高了变化检测精度。

在对象级层上,本书通过充分考虑地物类的特点,确定与不同地物类变化相适应的最佳分割尺度,提出了两种利用对象的空间特征和多尺度信息进行变化检测的方法:①利用统计区域融合(statistical region merging,SRM)算法生成的分割结果对主动轮廓模型生成的初始变化检测结果进行精化,减弱了分割尺度和主动轮廓模型中轮廓长度参数的影响,提高了变化检测结果的精度及稳定性;②将基于像素和面向对象的变化检测结果结合,对分割结果存在的尺度不确定性进行分析,利用更精细的分割结果对不确定是否变化的图斑进行后处理,减弱了分割不确定性对变化检测结果的影响,提高了变化检测精度。

在特征级层上,本书提出了边缘密度匹配指数,同时引入了灰度共生矩阵(gray level co-occurrence matrix,GLCM)纹理、Gabor 纹理和高斯马尔可夫随机场(Gaussian Markov random field,GMRF)纹理三种纹理特征,通过提出的最优特征选取策略对纹理特征进行选择,并将选择的特征与光谱信息组合,同时利用小波变换对特征进行分解,通过 DS 证据理论和优势融合策略提取变化信息。通过实验表明光谱、纹理、边缘特征组合可以在提高变化检测精度,且不同的特征组合对变化检测精度的提高程度不同。此外,光谱、Gabor 纹理和边缘特征的融合方法比较稳定且效果较好。

本书以提高空间信息利用的准确性为途径,分别在像素级、对象级和特征级提出增强空间信息准确性的方法,最终提高遥感变化检测精度。本书力求做到内容上既有一定的深度,表达上又通俗易懂,介绍变化检测前沿及本书的研究成果。由于影响遥感变化检测精度的因素很多,且提高空间信息准确性的方法和途径有很多,即使在书稿即将出版之际,也还有需进一步研究并改进的地方。限于作者的水平 and 经验,观点和文字方面难免有不妥之处,恳请专家和广大读者批评、指正。

最后,感谢国家自然科学基金重点项目(41331175)和国家测绘局科技领军人才科技资助专项资金(R2014A039)的资助,感谢关心和支持本书研究课题的单位,对参与书稿审核工作的学者以及为本书出版做出贡献的同志表示诚挚的感谢!

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究进展	2
第 2 章 基于主动轮廓模型的遥感影像变化检测	10
2.1 主动轮廓模型	10
2.2 EM 算法与主动轮廓模型结合的变化检测方法	14
2.3 基于主动轮廓模型的优势融合变化检测方法	22
2.4 利用主动轮廓模型检测由地震引起的倒塌建筑物	32
第 3 章 基于马尔可夫随机场的遥感影像变化检测	39
3.1 模糊 C 均值聚类算法	39
3.2 马尔可夫随机场模型	40
3.3 基于模糊 C 均值聚类算法和马尔可夫随机场的变化检测	42
3.4 基于对比敏感 Potts 模型的自适应马尔可夫随机场变化检测	47
第 4 章 面向对象的多尺度遥感影像变化检测	54
4.1 统计区域融合分割方法	54
4.2 统计区域融合与主动轮廓模型结合的面向对象的变化检测	55
4.3 基于对象尺度不确定性分析的变化检测	65
第 5 章 融合多特征的遥感影像变化检测	85
5.1 遥感影像多特征提取	85
5.2 遥感影像特征小波分解	93
5.3 融合光谱、边缘和纹理的遥感影像变化检测方法	96
5.4 实验结果与分析	98
5.5 结 论	113

第 6 章 结论与展望	114
6.1 研究结论	114
6.2 研究展望	115
参考文献	116

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Background	1
1.2 Research Progress at Home and Abroad	2
Chapter 2 Change Detection Using Active Contour Model for Remotely Sensed Images	10
2.1 Active Contour Model	10
2.2 Chang Detection by Combing EM and Active Contour Model	14
2.3 Chang Detection Using Active-contour-based Advantage Fusion	22
2.4 Chang Detection of Earthquake-collapsed Buildings Using Active Contour Model	32
Chapter 3 Change Detection based on Markov Random Field for Remotely Sensed Images	39
3.1 Fuzzy C-means Clustering Algorithm	39
3.2 Markov Random Field Model	40
3.3 Chang Detection Using FCM and MRF	42
3.4 Chang Detection Using Contrast-sensitive Potts Model Based Adaptive MRF	47
Chapter 4 Object Based Multi-scale Change Detection for Remotely Sensed Images	54
4.1 Statistical Region Merging for Segmentation	54
4.2 Object Based Change Detection Using SRM and Active Contour Model for Remotely Sensed Images	55
4.3 Change Detection Using Multi-scale Information to Reduce the Uncertainty of Segmentation	65

Chapter 5 Change Detection by Fusing Multiple Features for Remotely Sensed Images	85
5.1 Multi-feature Extractions for Remotely Sensed Images	85
5.2 Decomposition of Multiple Features Using Wavelet Transform for Remotely Sensed Images	93
5.3 Change Detection by Fusing Spectral, Edge and Texture Features for Remotely Sensed Images	96
5.4 Experimental Results and Analysis	98
5.5 Summary	113
Chapter 6 Conclusions and Future Work	114
6.1 Conclusions	114
6.2 Future Work	115
References	116

第1章 绪论

1.1 研究背景

地球是人类赖以生存的家园。但由于地球自然环境的复杂性,自然界中会发生地震、海啸、洪水、火灾、滑坡、泥石流等多种自然灾害,给人类的生命和财产造成巨大的损失。此外,人类的活动也不断地改变和影响地球,耕地面积的减少、工业化、城市的快速发展,以及人类多年来对森林的砍伐、草原的开垦、资源的开采都在很大程度上改变了地球。因此,我们需要进行对地观测,监测地球表面的变化,判断其对人类的影响。我国已于2013年启动了全国地理国情监测工作,对地形、水系、交通、地表覆盖等要素进行动态和定量化、空间化的监测。

近年来,随着航空、航天、卫星等技术的发展,遥感变化检测技术已成为一种有效的监测地球表面变化的手段,也是遥感领域的研究热点之一。遥感变化检测技术是一种通过分析同一地区的前期数据(如遥感影像、矢量数据)和后期的遥感影像,发现地表变化的技术(李德仁,2003;Coppin et al,2004;Tewkesbury et al,2015)。经过多年的发展,遥感影像变化检测技术无论是在理论还是技术方面都日益成熟,并广泛应用于土地利用和覆盖变化、森林和植被变化、灾害评估、湿地变化、森林火灾、景观变化、城市发展、环境变化等方面(Lu et al,2004)。

由于自然环境本身及其与遥感波谱相互作用的复杂性,从传感器记录的光谱信号中提取的关于地表的信息中,总是存在不确定性,如同物异谱、同谱异物、混合像素等现象。同时,在遥感影像变化检测过程中,包括遥感数据尺度问题、遥感影像配准、变化检测算法的选取及精度评价等各个方面,每一个环节都不可避免地引入不同程度的不确定性,降低变化检测结果的精度(Singh,1989;Yetgin,2012)。传统的仅利用光谱信息的变化检测方法无法有效处理遥感数据本身存在的模糊边界、混合像素、同物异谱及同谱异物等问题。现有研究表明,光谱和空间信息结合的变化检测方法既可以在一定程度解决上述遥感数据本身存在的问题,也可以提高变化检测方法的精度。但现有方法存在空间信息利用不准确的问题,无法最大限度地降低遥感数据本身及变化检测过程的不确定性和提高变化检测结果的精度。在利用遥感数据提取地物变化信息时,需要科学并准确地利用空间信息,提出可靠的光谱与空间信息结合的变化检测方法,降低遥感数据的模糊边界、混合像素、同物异谱、同谱异物等因素在变化检测中带来的不确定性,得到准确的地表变化信息。

1.2 国内外研究进展

利用遥感影像进行地物的变化检测兴起于 20 世纪 60 年代,随着航空、航天技术的发展,人类实现利用卫星(EOS、MODIS、MSS、TM、ETM+、SPOT 等)对地观测后,遥感变化检测技术得到了迅速发展。特别是随着 World-View-2、IKONOS、QuickBird、ZY-3、TerraSAR-X 和 Radarsat-2 等一系列高分辨率卫星的成功发射和影像处理技术的进一步发展,使遥感变化检测技术有了更大的进步和更广泛的应用。遥感变化检测的过程大概可以分为数据预处理、选择变化检测方法提取变化信息、精度评定和产品输出(孙家柄,2003; Bovolo et al,2005)。

1.2.1 变化检测数据预处理

遥感影像在成像过程中容易受自身传感器精度和外部条件(如大气条件、太阳光入射角度和地球曲率等)的影响,在多数情况下,不同时相获取的遥感影像很难达到空间分辨率和辐射分辨率完全一致。因此,大部分利用遥感影像的变化检测方法都需要通过数据预处理使同一地物在不同时相遥感影像中的空间位置和光谱特性保持一致。一般预处理过程包括:影像配准、辐射校正、地形校正、大气校正等(罗旺,2012;赵英时,2003)。

影像配准是变化检测过程中最重要的预处理步骤之一。事实上,要想达到遥感影像的完全配准几乎是不可能的,但影像配准误差极易引起虚假变化,严重降低了结果的可靠性。如何提高配准精度,降低配准不确定性造成的虚检错误是提高变化检测精度的关键问题之一(Townshend et al,1992),很多学者已在配准误差是如何影响变化检测精度和降低这种影响上做了大量的研究工作。Dai 等(1998)研究发现,当配准精度高于 0.2 个像素时,变化检测精度才会高于 90%,并且发现虚假变化主要分布在遥感影像中地物的边缘附近,而漏检测像素的空间分布多离边缘较远。Stow 等(1999,2002)提出一种能够补偿配准误差的模型进行变化检测,用来降低配准不确定性对变化检测结果的影响。Sundaresan 等(2007)经过试验发现,基于马尔可夫随机场(Markov random field, MRF)的变化检测方法比差分方法和差分之后再滤波等方法对配准误差的敏感性低,得出了利用空间邻域信息可以在一定程度上降低配准不确定性的影响。Brown 等(2007)通过建立航空传感器数据中几何误差和配准误差模型的方法来降低几何和配准误差对变化检测结果的影响。Bruzzone 等(2003)通过将两时相遥感数据的变化矢量变换到 M-D 空间,对不同配准精度下差分向量的分布进行统计,并结合其 8 邻域信息的方法检测地表变化,认为当同一区域的概率达到一定数值时才为真实的变化,否则为配准

误差产生的虚假变化,在一定程度上降低了配准误差的影响。Stow 等(2003)提出一种基于“框架中心”的配准方法,通过提高配准精度来提高变化检测的精度。Ding 等(2010)利用稳定核主成分方法进行配准,在此基础上进行面向对象的变化检测。Marchesi 等(2010)将多时相遥感影像变化矢量变换到一个量化的极坐标空间,利用不同尺度的极坐标空间结合每个像素的空间邻域信息进行变化检测,结果表明对配准不确定性造成的变化检测误差有较好的抑制作用。徐丽华等(2006)提出了一种基于区域变化率的变化检测方法,认为只有当区域中变化像素的比例达到一定程度时该区域才发生变化,不然就是配准误差或其他原因造成的变化,在一定程度上降低了配准误差带来的影响。申邵洪等(2011)研究了配准误差对高分辨率遥感影像变化检测精度的影响,并针对配准误差对变化检测精度的影响是否与影像波段、地类复杂度有关进行了研究,结果表明配准误差对每个波段影响不一致性,并且对高地类复杂度区域影响更明显。Chatelain 等(2007)基于二值 Gamma 分布对影像进行配准和变化检测,并对模拟数据和真实遥感数据进行试验,结果表明该方法降低了配准误差对变化检测的影响。

1.2.2 变化检测方法

遥感影像变化检测是通过定量分析不同时期的遥感数据,确定地表变化的过程,是遥感领域中的研究热点,被广泛地用于更新地理数据、灾害评估、监测土地覆盖与利用、环境变化和研究城镇发展,对国家决策、抢险救灾、服务民生和国家建设具有重要意义。目前主要的变化检测方法主要包括算术运算法、变换法、分类后比较法、高级模型法、GIS(geographic information system)集成法、视觉分析法和和其他方法(周启鸣,2011;Lu et al,2004)。

常用的算术运算法包括影像差分法、影像回归法、影像比值法、归一化植被指数差值法、变化矢量分析法(change vector analysis, CVA)等。Muchoney 等(1994)利用影像差分方法检测森林变化,Sohl(1999)利用差分方法对地表覆盖变化进行检测,Bruzzone 等(2000)利用高斯模型估计对重新构建差分影像,自动确定变化阈值,并在此基础上提出了基于 MRF 的变化检测方法,利用空间邻域信息提高变化检测精度。Metternicht(1999)利用模糊集和模糊关系函数代替阈值选择,进行变化检测,Patra 等(2011)利用差分影像方法,对几种常用的模糊和非模糊的阈值确定方法进行了比较,最终得出模糊熵方法是最稳定的方法。Jha 等(1994)利用影像比值法检测热带雨林变化。Prakash 等(1998)利用影像差分、影像比值和归一化植被指数检测煤矿区的变化,结果表明三种方法并没有明显的区别。Lyon 等(1998)对不同植被指数进行变化检测进行了比较,发现归一化植被指数在检测植被变化方面能取得最好的结果。Chen 等(2003)利用改进的变化矢量分析法对土地利用和地表覆盖变化进行检测。Lambin(1996)利用变化矢量分析

法检测土地利用变化。Johnson(1994)利用变化矢量分析法对灾害进行评估。刘臻等(2005)以高空间分辨率影像为数据源,通过将变化向量分析与相似度验证方法相结合,对城市中的街道和建筑物等目标进行自动变化检测。Allen 等(2000)利用变化矢量分析法对针叶林变化进行检测。

对于变换法,主要包括主成分分析法(principal components analysis, PCA)、独立成分分析(independent component analysis, ICA)、缨帽变换、正交变换和 Chi-square 变换。由于主成分分析方法可以有效地去除冗余信息,降低数据的相关性,被广泛地应用于变化检测。Deng 等(2008)利用主成分分析方法对多时相数据进行土地利用变化检测,并与分类后比较法相比,主成分分析法具有更高的变化检测精度。Li 等(1998)利用主成分分析方法对城镇发展进行检测,结果表明该方法可以有效地减少变化检测的误差。邓劲松等(2009)利用多时相主成分分析光谱增强和多源光谱分类器相结合的方法进行城市土地利用变化检测,结果表明多时相主成分分析光谱增强后得到的前 3 个主成分集中了绝大部分光谱信息,其中第一主成分和第二主成分增强了土地利用未发生变化的光谱信息,而变化信息主要集中在第三主成分,变化检测结果精度有了较大的提高。此外,经过研究表明标准主成分分析方法比非标准主成分分析法更能有效地进行变化检测,故多利用相关系数阵代替方差矩阵的标准主成分分析方法进行变化检测(Eastman et al, 1993; Fung et al, 1987; Singh et al, 1985)。武辰等(2012)利用独立成分分析方法对高光谱遥感影像进行变化检测,对差值影像进行基于偏斜度的独立成分分析,在不同组分图中分别显示单一地物的变化情况,进而提取变化信息,试验表明检测效果优于传统方法。Seto 等(2002)利用缨帽变换进行土地利用的变化检测。Collins 等(1994, 1996)利用正交变换进行森林的变化检测,取得了较好的结果。Ridd 等(1998)利用 Chi-square 变换对城镇环境进行了变化检测。

分类后变化检测不但能够检测变化,而且能够提供变化类型,也是常用的土地利用和土地覆盖变化检测的方法。Im 等(2005)利用决策树分类和邻域相关影像分析进行变化检测,使变化检测精度有了很大提高, Liu 等(2004)利用分类后比较法进行土地利用覆盖的变化检测, Serra 等(2003)利用分类后比较的方法对不同传感器获取的数据进行变化检测,证明了分类方法对处理不同传感器数据的优越性, Walter(2004)利用面向对象的方法对高分辨率遥感影像先进行分割,然后进行面向对象的分类,取了较好的效果, Munyati(2000)利用分类后比较法对湿地变化进行检测。此外,人工神经网络分类方法也被用来对多时相遥感影像进行分类,在此基础上进行分类后的变化检测(Alvanitopoulos et al, 2010; Liu et al, 2002; Woodcock et al, 2001),同时支持向量机(support vector machine, SVM)方法被广泛应用于遥感影像处理, Habib 等(2009)利用支持向量机分类方法进行非监督的变化检测。

高级模型方法主要包括:Li-Strahler 反射模型,主要用来计算针叶林树冠范围,进行针叶林的变化检测(Macomber et al,1994);光谱混合模型,主要用来进行陆地覆盖变化检测(Adams et al,1995;Ustin et al,1998);生物物理参数模型,主要用来检测热带森林的变化(Lu et al,2002)。

近年来,GIS集成方法也是常用的变化检测方法之一。通过GIS系统集成多源数据(航空影像、TM、SPOT和专题地图等)进行变化检测(Mouat et al,1996;Salami,1999;Weng,2002),Lo等(1990)利用GIS方法通过集成多时相航空数据估计香港新发展城镇对社会环境的影响,Yang等(2002)首先利用聚类的方法处理影像,然后利用GIS方法进行空间精化,最后利用分类后比较的方法进行变化检测,结果证明GIS方法在对多源数据处理中优势明显。

视觉分析法也主要是通过不同波段的数据进行RGB融合,通过目视解译进行变化检测(Jensen et al,1987)。Ulbrichta等(1998)利用目视解译方法对海岸区域的变化进行检测,Sader等(1992)利用视觉分析方法检测森林的变化。此外,视觉分析法还被用来监测采伐区的变化(Asner et al,2002;Stone et al,1998),Salter等(2000)利用该方法对地表覆盖进行了变化检测。

上述都是传统的变化检测方法,算术运算方法虽然计算简单也比较直接,但是没有考虑邻域信息并且多数方法需要确定变化阈值,设置阈值的不确定性导致变化检测结果容易产生大量的误差;变换方法能够在一定程度上去除冗余信息,但是变化后的处理手段多是人工视觉分析或者通过确定阈值来检测变化,缺乏自动性;分类后比较方法虽然能够提供变化类别信息和对多源数据适用性较强,但变化检测精度受分类精度影响较大,且对地面参考数据要求较高;视觉分析方法在一定程度上直接反映了变化信息和区域,但人工干涉过多,费时费力且增加了检测结果的不确定性。

针对传统的差分方法难以确定阈值的不确定性问题,对差分影像进行后处理的方法被大量地研究,通过利用模式识别和智能计算中的方法处理差分影像进行变化检测,并取得了较多的研究成果。有些学者假设由两时相影像生成的差分影像符合混合高斯分布,通过对其进行参数估计进行变化检测(Bazi et al,2005;Celik,2010,2011),Ghosh等(2007,2009,2011,2013)利用神经网络进行变化检测,遗传算法、小波变换、形态学、支持向量机(Volpi et al,2013)等方法也被用于变化检测。针对现实情况中不同数据源的问题,许多学者研究如何将多源数据有效地进行集成,从而实现高效和可靠的变化检测,提出了许多有效的集成方法(Gungor et al,2010;Gong et al,2011;Petit et al,2001),如GIS和RS结合(Baboo et al,2010)、遥感影像与LiDAR数据结合(Chen et al,2010)及DSM、多光谱、高光谱遥感影像结合。

除上述方法外,光谱与空间信息结合的变化检测也是降低遥感数据本身及变

化检测不确定性、提高变化检测结果精度的重要途径之一,主要分为像素级(较典型的有主动轮廓模型和 MRF 方法)、对象级(面向对象的变化检测方法)和特征级(融合多特征的变化检测方法)三类。

主动轮廓模型最早是由 Kass 等于 1987 年提出的,它由轮廓内部灰度值差异能量和外部灰度值差异能量决定,主动轮廓线的形状及其在影像中的位置等空间信息决定了模型的能量。轮廓内外的像素匀质性越强,会得到越小的局能量,在局部能量最小化原则下,驱动主动轮廓移动和演化,最终轮廓线停在要提取的物体边缘附近,可以通过调节轮廓长度参数得到不同平滑程度的变化检测结果。Jing 等(2011)利用全局最小的主动轮廓模型检测海面浮油边界,取得了较好的结果。Shi 等(2014)提出利用模糊主动轮廓与遗传算法结合提取两时相 SAR(synthetic aperture radar)数据中变化信息的方法。Li 等(2015)在主动模型中加入局部统计信息,通过在传统的主动轮廓能量中加入模糊长度和模糊惩罚系数能量,提高变化检测精度。Bazi 等(2010)提出一种多尺度主动轮廓模型策略,提高主动轮廓模型在变化检测时的稳定性和检测结果精度。小波分解与主动轮廓模型结合的变化检测方法也被提出并用于变化检测。首先,利用小波分解处理差分影像,生成多尺度的差分影像,然后,利用主动轮廓模型对多尺度数据进行变化检测(Celik et al,2011; Chen et al,2013)。Ardila 等(2012)利用主动轮廓模型检测城市树木变化并用于更新城市树冠基础数据,并验证了方法的有效性。虽然利用主动轮廓模型进行变化检测的方法取得了一定的成果,但是传统的主动轮廓模型中初始轮廓和轮廓长度控制参数的设置严重影响了变化检测结果的精度,这一问题还未得到有效的解决。

MRF 方法以马尔可夫模型和贝叶斯理论为基础,利用马尔可夫模型将不确定性描述和先验知识结合,并针对初始变化检测结果,根据最优准则确定变化检测的目标函数,在此基础之上求解达到这些条件的最大可能分布,最终通过光谱和空间信息结合完成对初始变化检测结果的精化,通过求解最优问题实现变化检测。MRF 方法可以用于对多种变化检测结果进行融合(Melgani et al,2006;Xiong et al,2012),也可直接用于两时相影像的变化检测(Jin et al,2009)。宋研等(2009)提出一种扩展的 MRF 方法,江利明等(2006)利用最大期望(expectation maximization,EM)算法与 MRF 结合对 SAR 影像进行变化检测。Benedek 等(2009)利用多层条件混合马尔可夫模型,通过集成全局灰度统计与局部的对比特征进行变化检测。Wang 等(2013)在 MRF 中加入除光谱和标记场之外的光谱相似能量用于提高变化检测的精度。Moser 等(2009)利用 EM 算法估计参数,通过 MRF 将两时相 SAR 影像各波段的邻域像素之间的空间信息结合,进行变化检测。Chen 等(2013)提出首先提取差分影像中的边缘,然后根据 MRF 中邻域像素灰度级的区别建立自适应的先验能量系数,用于变化检测。Tso 等(2005)提出根据模糊边

缘定义 MRF 中空间信息惩罚系数的分类方法,用于减弱对边缘的过度平滑。Gong 等(2014)通过引入模糊 C 均值(fuzzy C-means,FCM)聚类的隶属度信息,利用空间邻域信息加入新的多项式,从而修改邻域像素的隶属度,提高变化检测的精度。现有研究表明,传统的 MRF 对像素的空间邻域关系定义不够准确,容易造成边缘等细节的过度平滑,并且现有的方法对差分影像中所有像素设置相同的空间信息权重,极易造成空间信息的过度利用,造成细节变化的漏检。

随着遥感技术的发展,高分辨率传感器的发射使高分辨率遥感影像的获取变得相对容易,成为变化检测领域中的新数据。然而传统的算法是针对中、低分辨率的影像,不适用于高分辨率影像,因此面向对象的遥感影像处理方法应运而生,它可以利用光谱和空间信息将高分辨率影像进行分割,以分割后的图斑为对象进行分析(Benz et al,2004;Blaschke,2010;Ouma et al,2008)。王慕华等(2009)提出一种利用区域特征实现特定目标的变化检测方法,对伊朗的标志性建筑巴姆古城在 2003 年地震前后的变化进行检测,检测结果的精度为 89.73%。申邵洪等(2009)以图斑为基本分析单元,结合差异影像法和支持向量机分类后比较法对高分辨率遥感影像进行变化检测,提高了检测精度,并能提供变化类型。赖祖龙等(2009)根据光谱特性对影像进行分割,然后以图斑为基本单元,利用 t 检验方法,并与相关系数法相结合进行变化检测研究。Pacifici 等(2010)利用脉冲耦合神经网络对高分辨率遥感影像进行面向对象的变化检测。Tang 等(2011)利用面积对象的思想首先对影像进行分割,然后对分割后的对象尺度进行调整,最后利用 Kolmogorov-Smirnov 检验进行高分辨率遥感影像的变化检测。Lu 等(2011)利用面向对象的变化检测进行滑坡的快速检测,用户精度达到 81.8%。Al-Khudhairy 等(2005)利用面向对象的变化检测方法,在分割和分类的基础上对军事行动后的结构损坏进行变化检测。多数针对高分辨率遥感影像的变化检测方法以面向对象的分割为前提,但分割尺度的不确定性极易在变化检测过程中引入噪声,降低变化检测结果可靠性。

由于遥感数据本身存在“同谱异物”和“同物异谱”现象,使仅利用灰度信息提取变化信息存在着很多不确定性。针对这一现象,很多学者从遥感数据中提取更多的空间信息,提出多特征融合的变化检测方法,并取得了较好的效果(杜培军等,2012;张永梅等,2013)。有些研究利用小波变换生成多尺度的特征,在此基础上提出针对多尺度特征的融合策略进行变化检测(Benz et al,2004;Bovolo et al,2005;Celik et al,2011;Cui et al,2012;Gong et al,2012),有些研究对不同确定阈值方法生成的多种初始变化检测结果进行融合,来增强变化检测结果的可靠性(Du et al,2012,2013;Ma et al,2012),还有利用光谱与纹理特征结合进行变化检测的方法(陈志鹏等,2002;韩晶等,2012;朱朝杰等,2006)。基于 Dempster-Shafe(DS)证据理论融合光谱和纹理特征的变化检测也是一种有效的变化检测方

法(汪闽等,2010;Le Hégarat-Masclé et al,2004,2006)。除此之外,方圣辉等(2005)结合边缘特征和灰度信息进行变化检测研究,该检测方法对于检测线状目标变化具有较好的效果。袁修孝等(2007)提出了综合应用光谱和纹理特征的建筑物变化检测方法,提高了检测的精度,改善了投影差异所产生的误检测现象。季顺平等(2007)通过将阴影视为提取目标,其他地物视为背景来提取建筑物的阴影,在此基础上利用阴影对建筑物进行变化检测。Bouziani等(2010)利用现有的地理数据提供地物信息并建立相应模型,对高分辨率遥感影像进行分类,利用建立的模型将分割后的对象与现有数据进行比较,检测建筑物的变化并进行地形图的更新。虽然基于多特征融合的变化检测方法已取得一些研究成果,但如何更好地提取有效特征、选取更可靠的融合方法都需要进一步研究。

从上述研究可以看出,光谱与空间信息结合的变化检测方法可以降低遥感数据本身和变化检测方法等不确定性对变化检测结果的影响,但总体来说还不够成熟,需要进一步深入研究,通过增强空间信息的准确性,提出更可靠的光谱与空间信息结合的变化检测方法,提高变化检测结果精度。

1.2.3 变化检测结果精度评价

对于变化检测结果精度的评价,目前主要采用将变化检测结果与地面参考数据进行比较的方式,精度越高的变化检测结果越可靠。利用变化检测误差矩阵的形式,如表 1.1 所示,基本指标有虚检率、漏检率、总错误率和 Kappa 系数(Bovolo et al,2010)。

(1)漏检像素(missed detection,MD):参考数据中的变化像素被错误地检测为未变化像素的数目。

漏检率(percentage of missed alarms,PMA)可由 $P_m = MD/N_0 \times 100\%$,其中 MD 为漏检像素数目, N_0 为参考数据中变化像素的数目。

(2)虚检像素(false alarms,FA):参考数据中未变化的像素被错误地检测为变化像素的数目。

虚检率(percentage of false alarms,PFA)可由 $P_f = FA/N_1 \times 100\%$,其中 FA 为虚检像素的数目, N_1 为参考数据中未变化像素的数目。

(3)总错误像素(total errors,TE):总的检测错误的像素数目,包括漏检像素和虚检像素。

总错误率(percentage of total errors,PTE)可由 $P_t = (MD + FA)/N \times 100\%$,其中 N 为总的像素数目。

(4)Kappa 系数可根据 $Kappa = (P_0 - P_c)/(1 - P_c)$ 计算,表示检测结果与参考数据的一致性, $P_0 = (TC + TU)/N$, $P_c = (N_0 \times N'_0)/N^2 + (N_1 \times N'_1)/N^2$,其中 TC 为检测正确的变化像素数目,TU 为检测正确的未变化像素数目, N'_0 是检测为