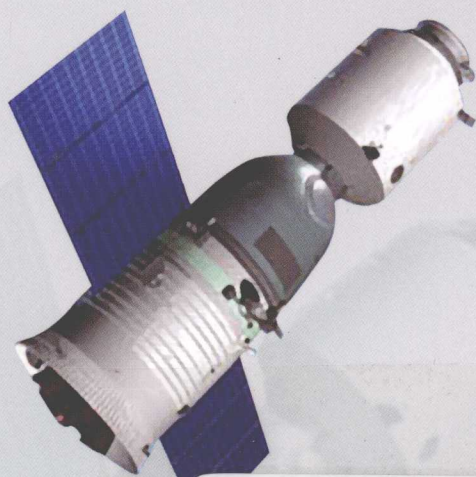


高分辨率遥感图像 分割与信息提取

肖鹏峰 冯学智 等 著



YZLI0890108732



科学出版社

高分辨率遥感图像分割与信息提取

肖鹏峰 冯学智 等 著

国家高技术研究发展计划(863 计划)课题(2008AA12Z106)

国家自然科学基金项目(40801166)

南京大学“985 工程”二期项目

江苏高校优势学科建设工程项目

联合资助



YZLI0890108732

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书总结作者近年来在遥感图像分割方面的研究成果,突出频域分析的鲜明特色,以遥感图像频谱特征为基础,从频谱分析、滤波器设计、全要素地物分割、特定地物目标提取等方面系统地论述高分辨率遥感图像分割的学术思路、关键技术及其实现过程。

全书以“频谱分析—滤波器设计—图像分割—信息提取”为线索进行组织,内容上力求做到深入浅出、通俗易懂,不仅具有一定的深度和广度,而且反映学科的新动向、新问题,介绍学科前沿的新成果和新内容。读者在阅读本书前应具备数字图像处理相关理论基础和专业知识。

本书可作为高等学校遥感相关专业研究生的参考书,也可供遥感相关科技人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

高分辨率遥感图像分割与信息提取/肖鹏峰,冯学智等著. —北京:科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-032824-3

I. 高… II. ①肖…②冯… III. ①高分辨率-遥感图像-图像分割②高分辨率-遥感图像-应用 IV. TP751

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 237728 号

责任编辑:罗 吉 周 丹/责任校对:张凤琴

责任印制:赵 博/封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012 年 1 月第一次印刷 印张:20 1/4

字数:454 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者名单

肖鹏峰 冯学智 王培法 叶 盛
吴桂平 王 珂 张学良

前 言

卫星遥感是人类观察、分析、描述所居住的地球环境的有效手段。近年来,随着传感器技术的发展,卫星遥感呈现出“三高”(高空间分辨率、高光谱分辨率和高时间分辨率)和“三多”(多平台、多传感器和多角度)的发展趋势。其中,高空间分辨率是高分辨率遥感的重要体现之一,也是目前广大遥感应应用工作者普遍关注的指标。当前卫星遥感图像的空间分辨率已达到米级、亚米级,高分辨率卫星遥感所具有的巨大军事价值和经济效益更是引起全球军事和民用领域的高度重视。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》、《航天发展“十二五”规划》等均对发展高分辨率对地观测系统做出了部署,从太空、近太空、航空、地面等多层次立体观测平台获取高分辨率遥感数据。

随着图像空间分辨率的提高,同类地物内部光谱差异逐渐增大,基于像元光谱统计的自动分类技术已经不能满足当前遥感图像信息提取的要求,成为制约高分辨率卫星数据实际应用的主要瓶颈。面向对象的图像分析方法为高分辨率遥感图像信息提取提供了新的思路,其核心问题就在于实现精确的图像分割。高分辨率遥感图像中地物对象的分割是当前国内外的研究热点,它使后续的分析与应用能直接针对同质的对象区域进行。与基于像元的分类技术相比,地物对象的分割能有效提高识别的精度和效率。遥感图像分割新方法的研究,将推进遥感信息提取技术从基于像元的分类过渡到面向对象的识别。

在国家高技术研究发展计划(863计划)课题“高空间分辨率卫星图像分割的新型技术研究”(2008AA12Z106)和国家自然科学基金项目“基于频域特征的高空间分辨率卫星图像多尺度分割方法研究”(40801166)的支持下,作者总结近年来在遥感图像分割方面的研究成果,突出频域分析的鲜明特色,深入分析国内外相关研究进展,以遥感图像频谱特征为基础,从滤波器设计、频域特征识别、全要素地物分割、特定地物目标提取等方面系统地论述高分辨率遥感图像分割的学术思路、关键技术及其实现过程。

全书内容共7章。第1章论述遥感图像分割的学科背景、理论基础和国内外研究进展。第2章基于频谱能量深入阐述地物特征频域识别机理,提出利用低阶频谱能量进行主体色调特征识别,利用高阶频谱能量进行局部细节特征识别。第3章根据典型地物的频谱特征,设计频域滤波器,提取地物的边缘和纹理特征,提出多光谱遥感图像的全要素地物分割方法和监督评价方法。第4章在此基础上提出基于图像内容层次表征的遥感图像多尺度分割方法,并建立非监督评价体系优选图像分割结果。第5~7章提出城市典型地物目标的遥感信息提取技术。其中,第5章分析城市建筑物的纹理特征,提出用匹配滤波器提取建筑物的方法。第6章分析城市道路的频谱特征,提出用线状特征增强滤波器提取道路的方法。第7章分析城市河道的频谱特征,提出用扇环形带通滤波器提取河道的方法。

本书基于典型地物图像的频域表征机理,提出面向高分辨率遥感图像的新型分割方

法,推进地物目标自动识别与提取研究,以满足土地利用精细分类、建筑物自动提取、道路数据库自动更新等应用的迫切需求。根据典型地物图像的频谱特征,提出适合高分辨率遥感图像的滤波器设计方案,对高分辨率遥感图像的目标识别和特征提取具有理论参考价值;根据遥感图像的纹理特征、边缘特征、语义特征,提出多光谱遥感图像的多尺度分割方法和城市典型地物提取方法,对高分辨率卫星数据的分析和利用具有实际应用价值。

本书以“频谱分析—滤波器设计—图像分割—信息提取”为线索进行组织,内容上力求做到深入浅出、通俗易懂,不仅具有一定的深度和广度,而且要反映学科的新动向、新问题,介绍学科前沿的新成果和新内容。因此,读者在阅读本书前应具备相关的理论基础和专业知识。限于篇幅,有关信号处理、图像处理、模式识别等更详细、更全面的内容,读者可阅读各章参考文献和相关教材。

本书是南京大学地理与海洋科学学院地理信息科学系、地理信息系统与遥感实验室师生近五年来共同努力的研究成果,全书由肖鹏峰、冯学智设计大纲并主持撰写。第1章由肖鹏峰、冯学智执笔,第2章由吴桂平、冯学智、肖鹏峰执笔,第3章由肖鹏峰、冯学智执笔,第4章由张学良、肖鹏峰执笔,第5章由叶盛、冯学智、肖鹏峰执笔,第6章由王培法、冯学智、肖鹏峰执笔,第7章由王珂、冯学智、肖鹏峰执笔。最后由肖鹏峰负责全书的统稿、修改和校对,由冯学智负责全书的审阅。此外,实验室教师赵书河、余江峰、都金康、谢顺平,博士研究生徐秋燕、周立国、黄秋燕、李晖、赵好好、巴达卫、陈杰,硕士研究生唐伟、万玮、闻春晶、尹高飞、陆昞丽等参与本书的相关研究工作。本书的撰写得到南京大学“985工程”二期项目、江苏高校优势学科建设工程项目的资助,并得到南京大学地理与海洋科学学院地理信息科学系有关领导、老师的热忱关心与大力支持,在此表示衷心的感谢。

作者在书中阐述的某些学术观点,仅为一家之言,欢迎广大读者争鸣。此外,限于作者的水平和经验,书中错谬之处在所难免,恳请专家和读者批评、指正。

肖鹏峰 冯学智

2011年7月于南京大学东大楼

目 录

前言

第 1 章 遥感图像分割理论与方法概述	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 遥感图像分割的意义	1
1.1.2 频域图像处理的特点	3
1.2 图像分割的原理	4
1.2.1 基于边界的分割	5
1.2.2 基于区域的分割	14
1.3 国内外研究进展	19
1.3.1 国外研究进展	19
1.3.2 国内研究进展	28
1.3.3 研究现状分析	34
参考文献	35
第 2 章 遥感图像特征频域识别机理	49
2.1 频谱能量识别的理论基础	50
2.1.1 帕塞瓦尔能量守恒定理	50
2.1.2 地物特征图谱识别理论	53
2.2 傅里叶变换与频谱能量分析	55
2.2.1 图像的傅里叶变换	55
2.2.2 频谱能量的表达与描述	67
2.3 低阶频谱能量与主体色调特征识别	72
2.3.1 低阶频谱能量识别的可行性	72
2.3.2 主体色调特征识别标志建立	76
2.4 高阶频谱能量与局部细节特征识别	93
2.4.1 局部细节特征的谐波范围确定	93
2.4.2 局部细节特征的识别标志建立	94
参考文献	103
第 3 章 基于频域滤波的遥感图像分割	105
3.1 幅度和相位的信息载荷	106
3.1.1 幅度谱的信息载荷	106
3.1.2 相位谱的信息载荷	107
3.2 典型地物的频谱特征	108

3.2.1	频谱特征描述	108
3.2.2	频谱曲线分析	110
3.3	频域滤波器设计	112
3.3.1	Gabor 滤波器组	112
3.3.2	改进的 log Gabor 滤波器组	121
3.4	基于幅度信息的纹理特征提取	124
3.4.1	纹理特征提取	124
3.4.2	提取结果分析	125
3.5	基于相位信息的边缘特征提取	127
3.5.1	相位一致的计算	127
3.5.2	边缘特征检测与分析	130
3.6	结合边缘和纹理的分水岭分割	137
3.6.1	标记分水岭变换	139
3.6.2	多频段纹理标记边缘特征	142
3.7	基于向量场模型的多光谱分割	146
3.7.1	多光谱图像分割的主要问题	146
3.7.2	基于向量场模型的解决策略	148
3.8	图像分割的精度评价	151
3.8.1	图像分割精度评价的准则	151
3.8.2	基于像元数量误差的评价	152
	参考文献	156
第 4 章	基于层次合并的遥感图像分割	160
4.1	区域邻接图	162
4.1.1	初始分割区域的获取	162
4.1.2	区域邻接图的定义	162
4.1.3	区域邻接图的构建	163
4.2	合并准则	164
4.2.1	马尔可夫随机场的定义	165
4.2.2	特征的选择与定义	166
4.2.3	特征组合与标准化	167
4.3	层次合并	169
4.3.1	层次合并的过程	169
4.3.2	图像内容层次表征的定义	169
4.3.3	图像内容层次表征的应用	170
4.3.4	非监督评价	171
4.4	结果分析与评价	172
4.4.1	实验图像及评价方法	172
4.4.2	初始分割区域的影响分析	173

4.4.3 融入边界像元的作用分析	175
4.4.4 合并准则中的特征作用分析	176
4.4.5 非监督评价准则的有效性分析	177
4.4.6 图像分割精度评价	178
4.4.7 图像分割效率评价	182
参考文献	183
第5章 城市建筑物频域识别与提取	187
5.1 建筑物纹理的图像表征	188
5.1.1 建筑物遥感成像模型	189
5.1.2 建筑物纹理特征描述	190
5.1.3 建筑物频谱特征分析	192
5.2 建筑物纹理的频域识别	194
5.2.1 结构性纹理频谱分析	194
5.2.2 结构性纹理频谱识别	199
5.3 建筑物信息提取与评价	205
5.3.1 建筑物纹理特征提取	205
5.3.2 建筑物边缘特征提取	213
5.3.3 建筑物提取与精度分析	219
参考文献	225
第6章 城市道路频域识别与提取	227
6.1 道路频谱特征分析	228
6.1.1 幅度谱特征分析	228
6.1.2 相位谱特征分析	243
6.2 增强线状特征的频域滤波	247
6.2.1 增强线状特征的滤波器设计	247
6.2.2 图像滤波与纹理提取	251
6.3 道路信息提取与评价	256
6.3.1 道路特征的筛选	256
6.3.2 道路信息的提取	263
6.3.3 提取精度分析	267
参考文献	270
第7章 城市河道频域识别与提取	272
7.1 河道频谱特征分析	273
7.1.1 河道频谱特征描述	273
7.1.2 河道频谱曲线分析	275
7.2 河道边缘特征频域识别	276
7.2.1 纹理边缘的频域识别	276
7.2.2 河道边缘特征识别标志	280

7.3 河道低频信息频域识别	288
7.3.1 低频信息的频域识别	288
7.3.2 河道低频信息识别标志	290
7.4 Butterworth 滤波器设计	293
7.4.1 一维 Butterworth 滤波器定义	293
7.4.2 二维 Butterworth 滤波器设计	296
7.5 河道边缘特征与低频信息提取	301
7.5.1 河道边缘特征提取	301
7.5.2 河道低频信息提取	308
7.6 河道信息提取与精度分析	311
7.6.1 河道信息提取	311
7.6.2 提取精度分析	313
参考文献	314

第1章 遥感图像分割理论与方法概述

本章首先阐述高分辨遥感图像分割研究的意义和频域图像处理的特点。目前高分辨率遥感图像的信息提取已成为遥感应用基础研究的热点,遥感图像分割新方法的探索和研究,将推进遥感信息提取技术从基于像元的分类逐步过渡到面向对象的识别。通过地物频谱分析,基于频域滤波进行遥感图像特征提取,有望实现快速精确的遥感图像分割。

然后简要论述图像分割的原理。图像分割就是基于同质性或异质性准则将一幅图像划分为若干有意义的子区域的过程,它一般是基于亮度值的两个基本特性之一:不连续性或相似性。因此,图像分割方法可以相应地分为两大类:基于边界的方法和基于区域的方法。前者如边缘生长、边界检测,后者如阈值分割、区域生长、区域分裂-合并等。

最后总结国内外的相关研究进展,主要从图像的数学变换、频谱特征分析、频域纹理特征提取、频域边缘特征提取、多特征融合、遥感图像分割等方面对国内外研究进展进行了总结。发现遥感图像的频谱分析和频域特征提取在遥感图像处理领域的理论和应用研究都比较少,滤波器设计的研究也往往针对合成纹理图像或是自然纹理图像,很少有针对遥感图像的滤波器设计方面的研究。而且,现有的图像分割方法都是针对灰度图像或者彩色图像设计的,如果将其应用到遥感图像的处理和识别,必须要解决图像分割模型从单波段图像向多光谱图像扩展的问题。

1.1 研究背景

1.1.1 遥感图像分割的意义

卫星遥感作为综合对地观测的重要组成部分,是国际对地观测技术竞争的关键点之一。它具有不直接接触地物目标而获取信息并能对其进行判读、分类和识别的特点,目前已经成为人类观察、分析、描述所居住地球环境的行之有效的行手段(陈述彭,2002)。近年来,随着传感器技术的发展,卫星遥感呈现出“三高”(高空间分辨率、高光谱分辨率和高时间分辨率)和“三多”(多平台、多传感器和多角度)的发展趋势(李德仁,2003)。其中,高空间分辨率是高分辨率遥感的重要体现之一,也是目前广大遥感应用工作者普遍关注的指标。如美国的 IKONOS、QuickBird 和 WorldView-2 卫星全色图像的空间分辨率分别达到 1m、0.61m 和 0.5m,中国和巴西合作的 CBERS-02B 卫星的 HR 高分辨率相机也已达 2.36m 的分辨率。高空间分辨率卫星遥感所具有的巨大军事价值和经济效益,更是引起全球军事和民用领域的高度重视,已经成为经济建设、国防安全和社会公众信息服务等方面最重要的空间信息源,因而具有广阔的应用前景(徐冠华,2008)。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》、《航天发展“十二五”规划》

等均对发展高分辨率对地观测系统做出了部署,从太空、近太空、航空、地面等多层次立体观测平台获取高分辨率遥感数据,再通过对空间数据产品的规模化加工,建立起综合性的应用与服务系统,从而满足社会各界的广泛应用需求,推动空间信息产业的快速发展。

随着图像空间分辨率的提高,同类地物内部光谱差异逐渐增大(图 1-1),基于像元(Pixel-Based)光谱统计的自动分类技术已经不能满足当前遥感信息提取的要求,成为制约高分辨率遥感图像广泛应用的主要瓶颈。面向对象(Object-Oriented)的图像分析方法为高分辨率遥感图像^①信息提取提供了新的思路,其核心问题就在于实现精确图像分割。

高分辨率遥感图像中地物对象的分割是遥感图像理解、地物识别的关键问题,也是有效利用地物空间信息的基础。开展遥感图像分割的研究,对日益增长的遥感数据处理有着十分重要的意义,它使后续的分析与应用能直接针对同质的对象区域进行,与基于像元的分类技术相比,能有效提高识别的精度和效率。因此,遥感图像分割新方法的探索和研究,将推进遥感信息提取技术从基于像元的分类逐步过渡到面向对象的识别,以满足土地利用精细分类、建筑物自动提取、道路数据库自动更新等应用的迫切需求,它不仅使土地利用、城市规划、环境监测等民用方面有了更便利、更详细的数据来源,而且对于军事目标识别、战场环境仿真来说也有着重要的意义。

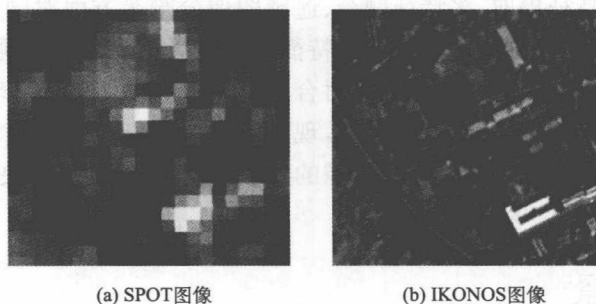


图 1-1 中分辨率 SPOT 图像(20m)与高分辨率 IKONOS 图像(4m)比较

从 20 世纪 60 年代开始,人们就对图像分割进行了大量的研究,至今已提出了上千种针对各种应用的分割算法(Zhang, 1994)。图像分割一般是基于亮度值的两个基本特性之一:不连续性或相似性。因此,图像分割方法可以相应地分为两大类:基于边界的方法和基于区域的方法。前者如边缘生长、边界检测,后者如阈值分割、区域生长、区域分裂-合并等(Gonzalez, Woods, 2002)。通过对各种图像分割算法进行分析(N. R. Pal, S. K. Pal, 1993; Zhang, 1997)可以发现,目前图像分割领域的两个明显特点:一是仍然不存在通用的分割算法;二是合适的分割算法越来越依赖于先验知识的应用。

虽然 Kettig 和 Landgrebe(1976)很早就提出了遥感图像分类过程中的同质对象概念,但图像分割技术进入遥感图像分析领域的时间比较晚,其受关注程度也不如计算机视

^① 本书所述的高分辨率遥感图像是高空间分辨率遥感图像的简称,不包括高时间分辨率遥感图像和高光谱分辨率遥感图像。高空间分辨率的界定是随着传感器技术的发展而不断更新的,目前,普遍将空间分辨率优于 5m 的遥感图像称为高空间分辨率遥感图像

觉领域(Schiewe, 2002)。早期的研究大多是现成图像分割方法的应用,如 Zlotnick 和 Carnine(1993)应用区域生长方法从航空影像提取道路信息,刘少创和林宗坚(1995, 1997)应用 Snake 方法和 OCTOPUS 方法对航空影像进行分割, Ryherd 和 Woodcock (1996)组合光谱和纹理特征进行遥感图像分割。计算机视觉领域的图像分割技术不能直接适用于遥感图像的分析,主要是因为遥感图像的应用有自身的特点(Schiewe et al., 2001):①遥感传感器所获取的数据是多波段甚至是高光谱的图像,与计算机视觉领域的图像相比要复杂得多;②作为重要的数据源,需要从遥感图像中提取附属数据,如 GIS 数据、高程数据等;③遥感图像中的地物具有尺度复杂性;④遥感应应用强调实时与动态的评价。

1999 年,针对高空间分辨率遥感图像的分割软件 eCognition 研制成功。该软件采用分形网络演化方法(FNEA),被认为是一种有效利用光谱信息和空间信息的分析方法(Hay et al., 2003)。近年有大量的相关研究工作报道,或者直接利用 eCognition 软件进行目标识别(Baatz, Schape, 1999),或者在 eCognition 软件辅助下进行面向对象分类方法的探讨(Geneletti, Gorte, 2003)。该方法的主要缺点是多尺度的对象表达不能确定哪一个尺度分割是合理的。因此,遥感图像分割的关键问题在于获得符合地物内在尺度的分割,黄慧萍(2003)、黄慧萍和吴炳方(2006)就此探讨了面向对象图像分析中的尺度问题。

近年来,国内外在该领域的工作主要集中于分割新方法探索、不确定性分析、基于分割的特征提取及面向对象分类应用等方面。存在的主要问题包括:对不同尺度、内部变化不同的地物分割精度显著不同;缺乏统一可靠的图像分割精度评价标准(宫鹏等, 2006)。模糊理论(Pal et al., 2000; 林剑, 2003)、数学形态学(Pesaresi, Benediktsson, 2001; 赵国际等, 2002; 朱长青等, 2004; 纪松等, 2007)、小波特征(Acharyya et al., 2003; 金丽亚, 曹卫国, 2006)、马尔可夫模型(刘伟强等, 1999; 明冬萍等, 2004; Li, Gong, 2005; 曹建农等, 2005; 彭玲等, 2006; 郭小卫, 官小平, 2006)、支持向量机(徐芳, 2004)、分水岭变换(王子煜, 2005; 陈秋晓等, 2006; 陈忠, 赵忠明, 2006; 陈波等, 2007)、边缘生长(刘永学等, 2006)、均值漂移(莫登奎等, 2006; 林辉等, 2006)、区域合并(谭衢霖等, 2007)等方法先后在遥感图像中得到了应用。针对遥感图像的多光谱分割问题,一般是先检测各波段的特征然后进行合并和分割(Kartikeyan et al., 1998; Evans et al., 2002; Li, Xiao, 2007),或者直接利用随机场模型进行分割(Sarkar et al., 2002; 龚衍, 舒宁, 2007a, 2007b)。此外, Hu 等(2005)、崔明等(2005)、Wang 和 Boesch(2007)先后提出了结合多种特征的图像分割方法, Pekkarinen(2002)、陈建裕等(2006)、Lia 等(2007)则提出了针对具体应用的遥感图像分割模式。

1.1.2 频域图像处理的特点

遥感图像目标繁多,其中包含了周期性成分、非周期性成分、噪声和背景,所以要在空域中完全分离和分析这些成分是非常困难的,甚至是不可能的,往往需要进行图像变换。图像变换是指通过某种数学映射,将图像信号从空间域变换到其他域进行分析的手段。常用的图像变换包括图像的频域变换(傅里叶变换)、图像的时频域变换(小波变换)以及

其他各种正交变换如离散余弦变换、沃尔什变换、斜变换等。

利用傅里叶变换可以将图像按频率进行分解,使得不同的周期成分在频谱图中很好地反映出来。频谱作为物质的能量特征之一,与波谱、能谱、重力、磁力等特征一样,都是用来区别物体属性的重要依据(陈述彭,2001)。图像的频谱反映了像元能量的空间分布特征,表征了地物目标的空间频率特性,与地物的色调、纹理、边缘、方向等空间特征均存在着密切的联系。在频域进行地物特征的提取,可以分析地物的空间特征,精确地设计滤波器,实现许多在空域难以实现的图像处理任务。因此,根据频谱信息研究遥感图像的特征提取与图像分割方法是一种非常有价值的学术思路,可为遥感图像的处理和应用方法开辟新的途径,对解决当前高分辨率数据的应用瓶颈具有重要的意义。

本书总结作者近年来在遥感图像分割方面的研究成果,突出频域分析的鲜明特色,以“频谱分析—滤波器设计—图像分割—信息提取”为线索,深入分析国内外相关研究进展,力图以遥感图像频谱特征为基础,从滤波器设计、频域特征识别、全要素地物分割、特定地物目标提取等方面系统地论述高分辨率遥感图像分割的学术思路、关键技术及其实现过程。

1.2 图像分割的原理

简单地讲,图像分割就是基于同质性或异质性准则将一幅图像划分为若干有意义的子区域的过程。对于图像分割的定义,几十年来学者们对它提出了许多不同的解释和表述。本书使用 Gonzalez 和 Woods(2002)给出的基于集合论的比较通用的定义。

令集合 R 代表整个图像区域,对 R 的图像分割可以看做将 R 划分为满足以下 5 个条件的 n 个非空子集(子区域) $R_1, R_2, \dots, R_n$ 的过程:

- (1) $\bigcup_{i=1}^n R_i = R$;
- (2) $\forall i=1, 2, \dots, n, R_i$ 是一个连通的区域;
- (3) $R_i \cap R_j = \emptyset, i \neq j$;
- (4) $\forall i=1, 2, \dots, n, P(R_i) = \text{TRUE}$;
- (5) $P(R_i \cup R_j) = \text{FALSE}, i \neq j$ 。

式中, $P(R_i)$ 是定义在集合 R_i 上的逻辑谓词, $\emptyset$ 表示空集。

条件(1)说明分割必须是完全的,即每一个像元必须属于一个区域;条件(2)要求分割结果中同一区域内的像元应当是连通的;条件(3)说明不同区域必须是不相交的;条件(4)说明属于同一区域的像元应当具有某些相同的特性;条件(5)说明属于不同区域的像元应当具有一些不同的特性。

图像分割一般是基于亮度值的两个基本特性之一:不连续性或相似性。因此,图像分割方法可以相应地分为两大类:基于边界的方法和基于区域的方法。前者如边缘生长、边界检测,后者如阈值分割、区域生长、区域分裂-合并等。

1.2.1 基于边界的分割

1. 边缘检测

数字图像的边缘集中了图像的大部分信息,边缘检测是图像分割、目标识别、形状提取等图像分析的重要基础,图像理解和分析的第一步往往就是边缘检测。边缘检测一直以来都是机器视觉研究领域最活跃的课题之一,在数字图像处理中占有十分重要的地位。

1) 边缘的定义

边缘(Edge)的概念首先应与边界(Boundary)相区别。直观上,边缘是一组相连的像元集合,这些像元位于两个区域的边界上。可见,边缘是一个局部的概念,而区域的边界是一个更具有整体性的概念。

理想的边缘模型如图 1-2(a)所示,根据这个模型生成的边缘是一组相连的像元集合,每个像元都处在灰度级跃变的垂直台阶上,因此理想边缘模型又称为阶跃边缘。但实际上,由于光学系统、采样和其他图像采集的不完善因素,使得获得的边缘是模糊的,因此边缘模型具有斜坡的特点,称之为斜坡边缘,如图 1-2(b)所示。这种情况下,边缘不再

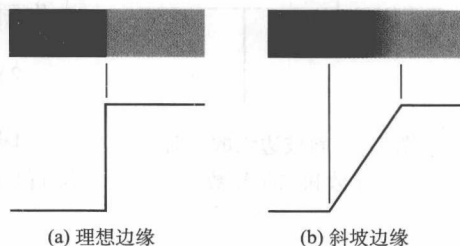


图 1-2 理想边缘模型与斜坡边缘模型

是单像元宽的细线,而是斜坡中的任意点。边缘的宽度取决于从初始灰度级跃变到最终灰度级的斜坡的长度,这个长度取决于斜率,而斜率又取决于模糊程度。

因为边缘的宽度和斜坡的斜率有关,所以可以运用导数运算来研究边缘的特性,这正是边缘检测的经典方法。图 1-3 显示了斜坡边缘模型的一阶导数和二阶导数。当沿着剖面线从左到右经过时,在斜坡部分一阶导数为正,在灰度级不变的区域一阶导数为零;在斜坡与暗区域相接的跃变点二阶导数为正,与亮区域相接的跃变点二阶导数为负,在斜坡和灰度级不变的区域二阶导数为零。

基于导数运算的上述特点,可以得到如下结论:①一阶导数可以用来检测图像中的一个点是否是边缘点,也就是判断一个点是否在斜坡上;②二阶导数的符号可以用来判断一个点是在边缘亮的一边还是暗的一边;③对图像中的每条边缘,二阶导数生成两个值,这种双边缘效应是一个不希望看到的特点;④如果用一条直线连接二阶导数的正极值和负极值,则这条直线将在边缘中点附近穿过零点,这种零交叉(Zero-crossing)特性可以用来确定边缘的中心位置。

因此,根据一阶导数进行定义,如果图像上某点的一阶导数比指定的阈值大,就定义该点是一个边缘点;或者根据二阶导数进行定义,将图像中的边缘点定义为它的二阶导数的零交叉点。一阶导数用梯度算子计算,而二阶导数用拉普拉斯算子计算。一组依据给定的连接准则相连的边缘点就定义为一条边缘,将所有的边缘连接起来就得到图像分割的结果。

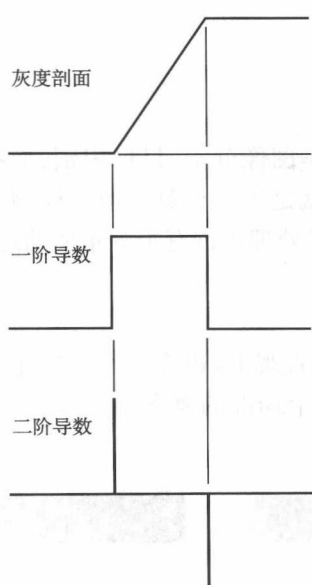


图 1-3 斜坡边缘的一阶导数和二阶导数

此外,噪声对导数运算有着显著的影响。图 1-4 显示了在斜坡边缘图像上分别加入零均值且标准差为 0.1, 1, 10 的高斯噪声后的一阶导数和二阶导数运算结果,表明噪声对于导数运算的敏感性。当 $\sigma=0.1$ 时,一阶导数在斜坡部分仍能保持正值,二阶导数也可以找到正确的正极值和负极值;当 $\sigma=1$ 时,一阶导数出现了较大的振荡,二阶导数已经不能确定正极值和负极值;当 $\sigma=10$ 时,一阶导数和二阶导数都不能准确地检测边缘,而此时噪声对原图像的影响是极其细微的,只是呈现轻微的颗粒状。可见,噪声对导数运算非常敏感,而且二阶导数更是具有几乎不可接受的敏感性。因此,在进行边缘检测之前,一般需要先利用平滑滤波作预处理,去除噪声的影响。

2) 梯度算子

梯度算子对应图像的一阶导数。图像 $f(x, y)$ 在位置 (x, y) 的梯度定义为下列向量:

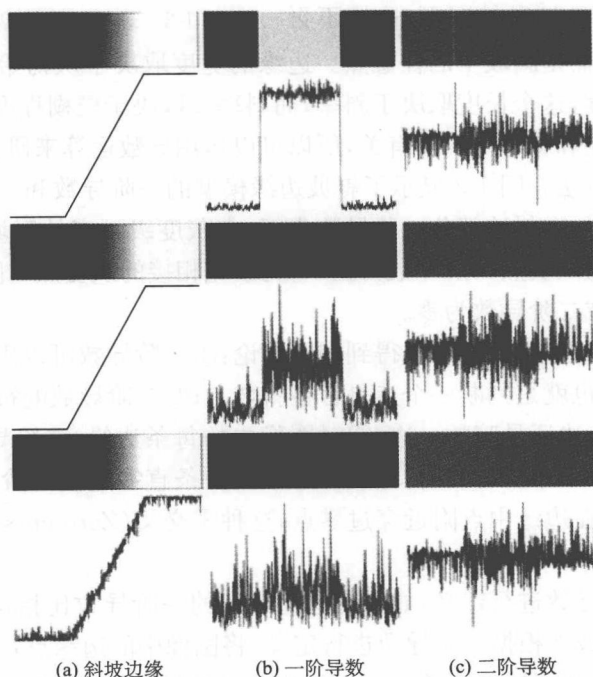


图 1-4 添加 $\sigma=0.1, 1, 10$ 的高斯噪声斜坡边缘及其一阶导数和二阶导数(Gonzalez, Woods, 2002)

$$\nabla f = [G_x \ G_y]^T = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \ \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T \quad (1-1)$$

由向量分析可知,梯度向量指向 f 的最大变化率方向。梯度向量的方向在边缘连接时有重要的作用,它与边缘的方向垂直,可定义为

$$\alpha(x, y) = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (1-2)$$

在边缘检测中,另一个重要的量是梯度向量的幅度或大小,可定义为

$$|\nabla f| = \text{mag}(\nabla f) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (1-3)$$

因为计算平方和平方根需要比较大的计算量,一般使用绝对值对其进行近似:

$$|\nabla f| \approx |G_x| + |G_y| \quad (1-4)$$

由于梯度向量的幅度在边缘检测中频繁使用,因此习惯上将梯度向量的幅度直接简称为梯度,只有在可能混淆的情况下才将梯度向量和它的幅度区分开来。

可见,梯度与边缘在概念上有着明显的区别。梯度定义为一阶导数的近似值,梯度图像上点的值域范围可以是 $[-\infty, +\infty]$ 。而边缘定义为对梯度取阈值的结果,图像上的某点或者是边缘点,或者不是边缘点。边缘图像是一个包含 0 和 1 的二值图像,其值域范围是集合 $\{0, 1\}$ 。

z_1	z_2	z_3
z_4	z_5	z_6
z_7	z_8	z_9

计算图像的梯度要以 x 和 y 方向的偏导数为基础。对于数字图像,这里的偏导数可分别用 x 和 y 方向的差分进行近似。图 1-5 像元的 3×3 邻域
假设有如图 1-5 所示的 3×3 大小的邻域。其中, z 为灰度值。得到 z_5 点处的一阶偏导数的最简单方法是使用下列 Roberts 交叉梯度算子:

$$G_x = z_9 - z_5 \quad (1-5)$$

$$G_y = z_8 - z_6 \quad (1-6)$$

-1	0	0	-1
0	1	1	0

图 1-6 Roberts 算子的模板

使用图 1-6 所示的模板对图像进行空间滤波,即可得到整幅图像的 Roberts 梯度。

2×2 大小的模板由于没有明确的中心点,所以很难使用。使用 3×3 大小的模板的方法由 Prewitt 算子给出:

$$G_x = (z_7 + z_8 + z_9) - (z_1 + z_2 + z_3) \quad (1-7)$$

$$G_y = (z_3 + z_6 + z_9) - (z_1 + z_4 + z_7) \quad (1-8)$$

在这组公式中, 3×3 大小的图像区域的第 1 行和第 3 行的差近似于 x 方向的导数,第 3 列和第 1 列的差近似于 y 方向上的导数。相应的滤波模板如图 1-7 所示,可用来计算这两个公式。

对 Prewitt 算子的一个小的改进,是在中心系数上乘以权值 2,被称为 Sobel 算子:

$$G_x = (z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3) \quad (1-9)$$

$$G_y = (z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7) \quad (1-10)$$

权值 2 通过增加中心点的重要性而实现一定程度的平滑效果,相应的模板如图 1-8