



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

2013
09
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



城市交通规划 P1197



第18卷第9期（总第209期）

2013年9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

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

2013 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@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995 010-82614429

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@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995 010-82614429

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

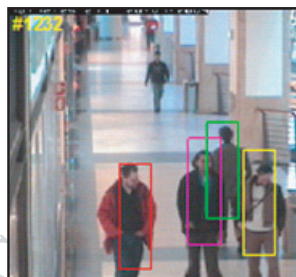
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

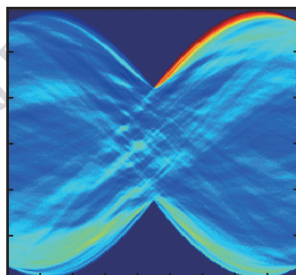
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

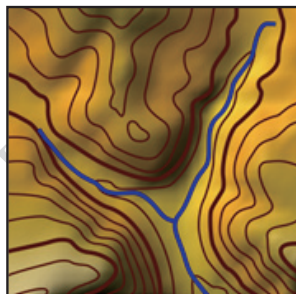
国内定价 50.00元



等级关联的粒子群迭代多目标检测跟踪(第1107页)



归一化Radon变换和统计测度的超声图像肌束方向自动跟踪(第1164页)



DEM保真精度量化描述模型(第1206页)

综述

高分辨率遥感影像空间结构特征建模方法综述

秦昆, 陈一祥, 甘顺子, 冯霞, 任文力

1055

简缩极化SAR数据信息提取与应用

张红, 谢镭, 王超, 张波, 吴樊, 汤益先

1065

图像处理和编码

融合CCCTI码和谱系聚类的仿射配准

张桂梅, 江少波, 刘丕玉, 张松

1074

面向虚拟视点绘制的深度图滤波及上采样方法

高凯, 陈贺新, 赵岩, 耿英楠, 王钢

1085

图像分析和识别

包空间多示例图像自动分类

王科平, 杨艺, 王新良

1093

表情和姿态的双模态情感识别

闫静杰, 郑文明, 辛明海, 邱伟

1101

等级关联的粒子群迭代多目标检测跟踪

程旭, 李拟珺, 张索非, 吴镇扬

1107

改进后的TLD视频目标跟踪方法

周鑫, 钱秋朦, 叶永强, 王从庆

1115

多特征稳健主成分分析的视频运动目标分割

甘超, 王莹, 王向阳

1124

融合全局最好和声搜索算法的模糊C均值聚类图像分割

崔兆华, 高立群, 欧阳海滨, 李文娜

1133

从运动中恢复目标结构的改进因子分解法

邱少华, 文贡坚, 回丙伟, 张鹏

1142

计算机图形学

并行扫描转换结构中的状态管理

殷诚信, 韩俊刚, 黄虎才

1149

医学图像处理

3维颅骨表面模型的复杂孔洞修补

包佳蕊, 梁荣华, 吴福理, 黄鲜萍, 蒋莉, 陈矛

1156

归一化Radon变换和统计测度的超声图像肌束方向自动跟踪

李乔亮, 李振宇, 张会生, 张小飞, 陈昕, 陈思平, 汪天富

1164

遥感图像处理

改进的多光谱双边滤波图像融合

吴川, 杨冬

1170

长度归一化扫描的合成孔径雷达图像船舶尾迹恒虚警率检测

南杰, 张红, 王超, 吴樊, 张波

1176

地理信息技术

3D可视化输电线路中杆塔空间挂点计算

何国辉, 周聪

1184

地图符号服务与地图服务的耦合

焦东来, 张海涛, 闫国年, 姜杰

1190

不同表达粒度对城市路网结构健壮性评价的影响

段滢滢, 陆锋

1197

DEM保真精度量化描述模型

张锦明, 游雄

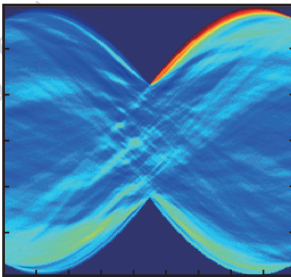
1206

CONTENTS

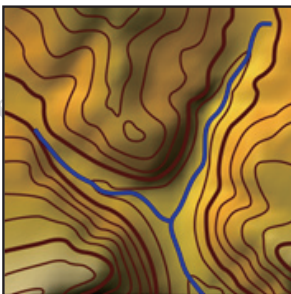
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Hierarchical associative multi-target detection and tracking with particle swarm optimization(P1107)



Automatic tracking of muscle fascicle orientation in ultrasound images: a approach based on a normalized Radon transform and statistical measure (P1164)



Quantitative descriptive model of DEM fidelity accuracy(P1206)

Review

Review on methods of spatial structural feature modeling of high resolution remote sensing images

Qin Kun, Chen Yixiang, Gan Shunzi, Feng Xia, Ren Wenli 1055

Information extraction and application of compact polarimetric SAR data

Zhang Hong, Xie Lei, Wang Chao, Zhang Bo, Wu Fan, Tang Yixian 1065

Image Processing and Coding

Affine registration based on CCCTI and hierarchical clustering

Zhang Guimei, Jiang Shaobo, Liu Piyu, Zhang Song 1074

Depth map filtering and upsampling method for virtual view rendering

Gao Kai, Chen Hexin, Zhao Yan, Geng Yingnan, Wang Gang 1085

Image Analysis and Recognition

Automatic classification of multiple-instance image based on the bag space

Wang Keping, Yang Yi, Wang Xinliang 1093

Bimodal emotion recognition based on body gesture and facial expression

Yan Jingjie, Zheng Wenming, Xin Minghai, Qiu Wei 1101

Hierarchical associative multi-target detection and tracking with particle swarm optimization

Cheng Xu, Li Nijun, Zhang Suofei, Wu Zhenyang 1107

Improved TLD visual target tracking algorithm

Zhou Xin, Qian Qiumeng, Ye Yongqiang, Wang Congqing 1115

Multi-feature robust principal component analysis for video moving object segmentation

Gan Chao, Wang Ying, Wang Xiangyang 1124

Improved fuzzy C-means clustering combined with the global best harmony search algorithm for image segmentation

Cui Zhaohua, Gao Liqun, Ouyang Haibin, Li Wenna 1133

Improved factorization method for structure from motion

Qiu Shaohua, Wen Gongjian, Hui Bingwei, Zhang Peng 1142

Computer Graphics

Efficient state management for parallel rasterization

Yin Chengxin, Han Jungang, Huang Hucai 1149

Medical Image Processing

Various hole repairing algorithm for 3D mesh surface models of human skull

Bao Jiarui, Liang Ronghua, Wu Fuli, Huang Xianping, Jiang Li, Chen Mao 1156

Automatic tracking of muscle fascicle orientation in ultrasound images: a approach based on a normalized Radon transform and statistical measure

Li Qiaoliang, Li Zhenyu, Zhang Huisheng, Zhang Xiaofei, Chen Xin, Chen Siping, Wang Tianfu 1164

Remote Sensing Image Processing

Improved multispectral bilateral filter video fusion algorithm

Wu Chuan, Yang Dong 1170

Ship wake constant false alarm rate detection algorithm in synthetic aperture radar images based on length normalized scanning

Nan Jie, Zhang Hong, Wang Chao, Wu Fan, Zhang Bo 1176

Geoinformatics

Tower hanging point calculation for transmission line on three-dimensional visualization

He Guohui, Zhou Cong 1184

Coupling of map symbol web service and web map service

Jiao Donglai, Zhang Haitao, Lv Guonian, Jiang Jie 1190

The impact of different granularity representations on robustness evaluation of city road network

Duan Yingying, Lu Feng 1197

Quantitative descriptive model of DEM fidelity accuracy

Zhang Jinming, You Xiong 1206

中图法分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)09-1055-10

论文引用格式: 秦昆, 陈一祥, 甘顺子, 冯霞, 任文力. 高分辨率遥感影像空间结构特征建模方法综述[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(9): 1055-1064. [DOI:10.11834/jig.20130901]

高分辨率遥感影像空间结构特征建模方法综述

秦昆, 陈一祥, 甘顺子, 冯霞, 任文力

武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079

摘要: 高分辨率遥感影像能够提供详细的地面信息, 具有复杂的空间结构特征。有效地描述和建模这种结构特征对实现影像解译、目标识别与提取以及场景理解等具有重要的作用。首先介绍了高分影像结构特征的概念和内涵, 将结构特征划分为像元结构、目标结构和场景结构 3 个层次; 然后对高分影像结构特征描述与建模方法进行了系统的综述, 介绍了这些方法的基本思想、分析了其研究现状, 并指出了存在的一些问题; 最后给出了总结和展望。

关键词: 高分辨率遥感影像; 空间结构特征; 特征描述; 特征建模

Review on methods of spatial structural feature modeling of high resolution remote sensing images

Qin Kun, Chen Yixiang, Gan Shunzi, Feng Xia, Ren Wenli

School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University 430079, China

Abstract: The high resolution remote sensing images can provide detailed ground information, and they have complex spatial structural features. Effectively describing and modeling them will play an important role in better realizing the tasks such as image interpretation, object recognition and extraction, scene understanding, and so on. This paper firstly introduces the concept and properties of spatial structural features, and divides the spatial structural feature into three levels: pixel structure, object structure and scene structure. Then, a systematic review on recent development of spatial structural feature description and modeling methods is presented. The review focuses on the basic principles and research status of these methods, and some advantages and drawbacks are pointed out. Finally, conclusions are drawn and future research directions are discussed.

Key words: high resolution remote sensing image; spatial structural feature; feature description; feature modeling

0 引言

近年来, 高空间分辨率(简称为高分辨率或高分) 对地观测技术得到了迅猛发展, 并已在城市规划、灾害管理、环境监测和军事等领域发挥了重要的

作用。高分辨率商业卫星(IKONOS、QuickBird、GeoEye-1、WorldView-2 等) 影像的空间分辨率已达到米级或亚米级的水平, 因此它能够获取更详细的地面信息。

相对于中低分辨率影像, 高分辨率遥感影像主要有以下特点: 地物的几何结构更加明显, 地物的空

收稿日期: 2013-01-15; 修回日期: 2013-03-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973) 基金项目(2012CB719903); 高分辨率遥感交通应用示范项目(07-Y30A05-9001-12/13); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(201121302020010)

第一作者简介: 秦昆(1972—), 男, 教授、博导, 2004 年于武汉大学遥感信息工程学院获摄影测量与遥感专业博士学位, 主要研究方向为图像分割与特征建模、空间分析与数据挖掘、智能空间信息处理。E-mail: qink@whu.edu.cn

通讯作者: 陈一祥, E-mail: chen-yixiang168@163.com

间布局更加清晰,纹理和尺寸等信息更加精细,地物的3维立体属性更加丰富^[1]。在高分影像上不仅包含建筑区、道路网、林地等大尺度的对象,一些细小的对象如单个的建筑物、街道、甚至汽车等也清晰可见,这增加了高分影像的应用价值,但同时也给影像的解译与信息提取带来了困难。特别地,分辨率的提高也导致高分影像同类地物的光谱异质性增强,不同地物的光谱差异性降低,这降低了不同地物类在光谱域的统计可分性^[2],使传统的基于多光谱的影像解译与信息提取方法应用于高分影像时难以获得令人满意的结果。

许多研究表明,充分利用高分影像的几何、纹理和上下文等空间信息是提高影像解译与信息提取能力的有效途径。空间结构特征是高分影像最显著的特征之一,高分影像上的各种地物类型都表现出不同程度的结构特征。与光谱特征相比,地物的结构特征会更稳定,更能够反映地物内部的组织特性以及与外部环境的空间关系。因此,结构特征对于高分影像的解译与信息提取具有重要的作用。

对于高分影像的空间结构特征以及基于空间结构特征的影像解译与信息提取,国内外已有相关的研究。例如 Huang 等人^[3]提出了一个结构特征集(SFS)来描述高分影像像元的空间特性,提取的空间特征与光谱特征融合显著改善了传统的基于光谱特征分类的不足。Ünsalan 等人^[4]使用影像的直线结构特征对土地的发展水平进行分类,该方法使用一个窗口来提取直线,对直线的长度、空间分布等特征进行统计分析,并基于这些特征来提取居民区。Erus 等人^[5]关注于高分影像中复杂地理目标的结构建模与识别,使用基于外观(appearance-based)的统计学习框架来学习复杂目标的结构基元的空间布局与组织关系。陶阳宇等人^[6]定义了两种建筑物的元结构,利用统计学习的方法来构建复杂建筑目标的贝叶斯结构模型,实现航空影像中复杂建筑物的提取。

但是,这些研究都具有很强的针对性(针对某个问题而选择使用某种方法),对于结构特征的系统性、综述性的研究文献还没有。本文首先对空间结构特征的概念及其内涵进行了探讨,并给出了空间结构特征的定义。为了对空间结构特征的内涵与建模方法有更清晰的认识和理解,在该定义的基础上,将结构特征划分为像元结构、目标结构和场景结构3个不同的层次,然后对各层次下的现有结构特

征描述与建模方法进行了综述。本文的研究对于更好地认识和利用高分影像的结构特性,进而基于空间结构特征来实现高分影像的解译、目标识别与提取以及场景理解等应用具有很好的指导作用。

1 空间结构特征

对于什么是影像的空间结构特征,目前文献上还没有明确的定义。对于“结构”的定义,它一般要涉及两方面的内容:一是结构的组成元素,二是这些元素之间的相互关系。按照这种思路,认为影像的空间结构特征是指影像中各元素在空间的不同分布、排列或布局而形成的空间分布模式。这里的“元素”是结构分析的基本单元,它与人的认知尺度息息相关。对于影像,其最基本的组成元素是像元(pixel),像元的不同排列与分布构成了不同的影像结构。对于高分影像,基于像元的光谱分析方法已不能满足影像解译的要求,近年来面向对象的分析方法被提出,其分析的基本单元是通过分割获得的具有一定意义的影像对象(object)或区域(region)。这些对象的内部或对象之间的不同组织会使其具有不同的空间结构特征,这为影像的解译提供了光谱以外的额外信息^[7]。

分辨率的提高,使得人们开始关注于影像中更小尺度的地物目标(如建筑物、道路等)的识别与提取。这些地物目标一般具有明显的几何结构特征,对于这些目标结构特性进行分析时其基本的分析元素通常是构成目标的边缘、线段、角或区域等结构单元(又称为基元)。基元在空间的不同布局与组织,就构成了不同属性的地物目标。进一步地,在更大的尺度上,目标与目标之间因不同的空间布局也会形成不同的空间结构,构成一定的场景。

因此,要研究影像的空间结构特征要明确两个基本问题:一是要确定结构的“元素”是什么,二是要研究这些“元素”的空间关联方式或布局形式。对于影像,“元素”具有尺度特性,它与人的认知特点和影像的空间分辨率息息相关,“元素”的多尺度特性也就导致影像结构特征的多尺度性。“元素”之间的空间结构关系通常是复杂多样的,其差异性也就导致了结构特征的差异。根据当前人们对高分影像的处理方式,将影像中的空间结构划分为像元结构、目标结构和场景结构3个不同的层次,各结构层对应的基本元素分别为像元、结构基元和目标

(图 1)。在像元层次,像元与其近邻像元的空间关联性会形成一定的像元结构,在基于像元的分析中,这种像元邻域空间信息能一定程度上弥补光谱信息的不足;在目标层次,目标基元按照一定的空间关系组织成具有一定结构的目标(如房屋、道路),这里的基元包括点基元(如角点)、线基元(如直线段、弧线)和面基元(如区域);在场景层次,多个目标对象之间按照一定的空间关系或空间布局构成一定的场景结构(如居民区、公园)。

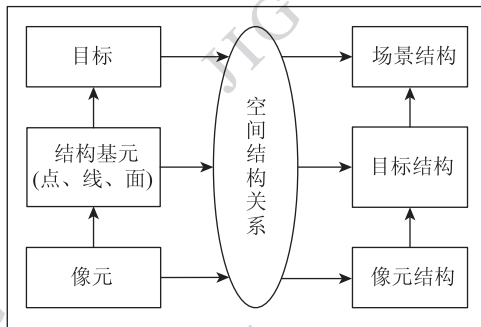


图 1 不同层次的空间结构

Fig. 1 Spatial structures in different levels

2 空间结构特征描述与建模方法

将目前文献中出现的分析和建模高分影像结构特征的代表性方法总结为以下几类:空间统计分析方法、数学形态学方法、Markov 随机场、图理论方法、感知编组法以及其他方法。

2.1 空间统计分析方法

空间统计分析方法将影像中的每个像元值看成是区域化变量,它是一个具有随机性和结构性的随机变量。区域化变量的一个主要特征在于它的空间依赖性(spatial dependence),即变量的取值不是独立的,而是相互关联的,这种关联性又叫空间自相关性(spatial autocorrelation)。空间自相关通常与空间距离有关,距离越近,变量的取值越相似;反之距离越远,变量的取值就越相异^[8-9]。空间统计方法的内容很多,对于高分影像空间结构特征的描述与建模,空间半变差函数和空间自相关统计量是目前比较流行的两种空间统计分析方法。

2.1.1 空间半变差函数

空间半变差函数(又叫空间变异函数)是目前常用的建模影像像元空间依赖关系的空间统计方法。经验半变差函数被定义为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中, $z(x_i)$ 和 $z(x_i + h)$ 都是区域化变量,分别代表了位置 x_i 和位置 $x_i + h$ 的变量的属性值,滞后 h 是位置 x_i 到位置 $x_i + h$ 的距离, $N(h)$ 是位置 x_i 和位置 $x_i + h$ 之间像元对的数目。半变差函数描述了在距离为 h 的两个位置属性的平均变异程度。

半变差函数有 3 个基本的参数(图 2):块金值、基台值和变程。块金值(nugget)是像素内部变异程度的度量,反映了图像数据中的系统噪声或信噪比;半变差是距离 h 的递增函数,并且在某个位置时开始趋于稳定,这个位置叫做基台值(sill),它反映了空间变异或空间相关的幅度,其值越大,结构性就会越差;变程(range)是半变差达到基台值时的滞后距离,它是空间依赖或空间同质性的度量^[10],反映了影像像元空间相关的距离,即当像元的空间距离不超过变程时,则认为它们具有空间相关性,反之则认为它们不具有空间相关性^[8-9]。对于 3 个基本参数的计算,一般由理论半变差函数模型(如球状模型、幂函数模型、孔穴效应模型等)通过数据拟合来获取。

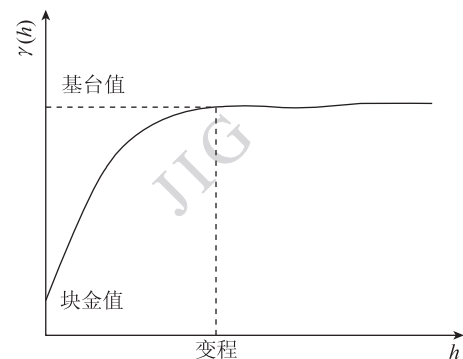


图 2 半变差函数曲线

Fig. 2 Semi-variogram

半变差函数模型已被大量用于建模影像的纹理和结构特征。对于影像中的不同区域或对象类,由于其像元空间分布的不同,也就对应了不同的半变差函数模型。最初半变差主要用于分析中低分辨率影像,近年来它也被用于建模高分辨率影像的空间纹理结构特征。例如,Chen 等人^[11]提出了一种自动获取半变差函数的参数(变程和基台值)的方法,避免了半变差函数模型的拟合,自动获取的参数用于刻画 IKONOS 影像的结构特征,并基于此实现影像的分类。程承旗等人^[12]根据半变差函数的参数

提出了建筑物分布的空间结构性指数,对高分辨率城区影像中居住单元的拥挤程度进行环境评价。Wu 等人^[13]使用半变差函数来刻画航空影像中不同建筑区域的结构特征,并基于此实现不同建筑区域的分类。Balaguer 等人^[14]使用半变差函数来建模高分影像中不同的目标对象,并定义了 14 个特征参数来表征半变差函数,提取目标对象的结构特征。

半变差函数是区域化变量空间结构的一种形式化表达,是空间统计学的核心内容之一,其在遥感领域的应用也是目前的一个热点。但是一些基本的问题如半变差函数模型的选择、参数的自动获取等问题需要进一步完善和解决。

2.1.2 空间自相关统计量

具有相同灰度直方图的两幅影像,因内部像元空间排列次序的差异可能使它们具有不同的空间结构。在图 3 所示的 3 幅二值图像中,白色像元与灰色像元的数目是相同的,但因空间排列次序的不同导致它们具有不同的空间结构性。

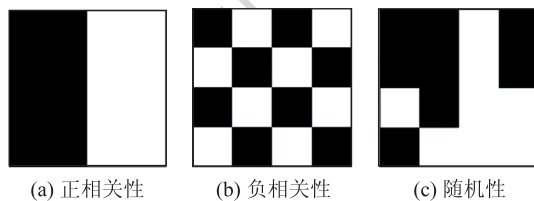


图 3 不同的空间相关性

Fig. 3 Different spatial correlations

空间自相关统计量,包括全局空间统计量和局部空间统计量,可用于对影像像元间的这种空间相关性进行定量描述。全局空间统计量(包括全局 Moran's I、全局 Geary's C 和全局 Getis)可对一定区域内像元属性的空间相关性进行总体的概括性度量,但它难以揭示局部的空间变异性^[15]。针对全局空间统计量的局限性,局部 Moran's I、局部 Geary's C 和局部 Getis 3 个局部空间统计量分别被提出,以此来度量局部的空间相关性,识别局部的空间变异模式^[16-18]。尽管这些统计量最初用于分析空间点数据,但是近些年来一些研究人员开始将其用于分析遥感数据,描述像元或目标对象的空间结构性^[19-21]。

在影像中,自相关统计量即可描述目标区域的内部结构性,又可使用一个以像元为中心的窗口,获取该像元的局部空间依赖性。不同于半变差函数,自相关统计量获取的仅仅是对空间自相关结构的一

种统计性度量,因此它比较适合进行结构的分析与评价。另外,对于自相关统计量中的空间权矩阵,目前使用的主要是简单的二元权矩阵,这常常会把问题简单化,使用更复杂的空间权矩阵有望更好地描述和度量影像像元的空间相关性。

2.2 数学形态学方法

数学形态学 (mathematical morphology) 诞生于 1964 年,该理论最初被用于铁矿核的定量岩石学分析。数学形态学的基本思想是用具有一定形态的结构元素 (structuring element) 去量度和提取图像中的对应形状和结构以达到对图像进行分析和识别的目的。其基本运算包括腐蚀和膨胀,这些基本运算可进一步进行复合构成更复杂的运算(如开闭运算),使用这些基本或复合运算便可实现图像的滤波、分割、边缘检测、纹理分析、特征生成、骨架抽取、形状分析等处理任务。Soille 和 Pesaresi 对形态学在地理信息科学与遥感领域的进展进行了综述,指出了它在高分辨率影像空间结构分析的潜能,特别地,它可以直接从图像中探测结构而不需要对图像进行预先的分类^[22]。因此数学形态学可用于高分影像结构特征的描述与提取。

对于高分影像,数学形态学既可用于在像元层次提取结构信息,又可在目标层次描述目标的结构。在像元层次,目前最流行的是 Pesaresi 等人^[23]提出的微分形态学 (DMP) 算法,该算法使用一系列尺寸逐渐增大的结构元,利用形态学重建开闭 (morphological opening and closing by reconstruction) 运算来提取像元邻域的空间结构信息。对于高分辨率影像结构信息提取,DMP 算法及其改进算法已成为近十年来研究的热点,新的研究文献还在不断出现^[24-26]。

在目标层次,形态学可以对目标的形状结构进行处理。例如,在高分影像的道路提取过程中,对分割后的道路进行细化、去除冗余、填充凹洞等^[27-29]。使用形态学可以提取目标对象的骨架^[30],由于提取的骨架保留了目标对象内在的拓扑关系,因而它能够很好地反映目标对象的内部结构。例如,Shackelford 等人^[31]在进行高分影像面向对象的分析时使用形态学方法提取分割对象的骨架,并用连接骨架端点的多边形来近似原始的目标对象,进一步基于模糊规则实现影像的分类。数学形态学还可以实现目标的形状结构表示。例如,Yu 等人^[32]在进行目标的形状结构建模

时,首先将目标的形状分解为几个凸的子部分,然后对每个凸的子部分使用基本的结构元利用形态学运算进行表示;Zhao 等人使用形态学方法来构建复杂的 3D 建筑物模型^[33]。

数学形态学获取图像结构和形状的能力对结构元的选取具有很大的依赖性,因此在实际处理中需要根据待解决的问题合理地选择结构元的形状和大小。由于目标形状结构的复杂性和多样性,有时也会使用多类型多尺度的结构元。

2.3 MRF 方法

马尔可夫随机场(MRF)模型是一种描述图像结构的概率模型,其突出特点是通过适当定义的邻域系统引入结构信息,提供了一种用来表达空间上随机变量之间相互作用的模型。

MRF 认为在空间上一个元素的特性只与其近邻元素的特性有关。设 $X = \{X_s | s \in S\}$ 是定义在元素位置集合 S 上的随机变量, $x = \{x_s | s \in S\}$ 是 X 的实现, $x_s \in A$, $A = \{1, 2, \dots, L\}$ 为离散状态集合, $N(s)$ 为元素位置 s 的近邻集合,当且仅当下面两个概率条件^[34]成立时,则称 X 为定义在 S 上的关于近邻 N 的 MRF。

$$1) P(X = x) > 0, \forall x \quad (2)$$

$$2) P(X_s = x_s | X_t = x_t, \forall t \in S - \{s\}) =$$

$$P(X_s = x_s | X_t = x_t, \forall t \in N(s)), \forall s \quad (3)$$

MRF 不仅可以通过图像元素的邻域系统引入空间结构信息,还可以建立在 Bayes 框架上,充分利用图像的各种特征和先验知识,并按统计决策和估计理论中的最优准则确定问题的解。在实际计算中,MRF 的先验概率和邻域的局部空间关系一般很难确定。Hammersley-Clifford 定理建立了 MRF 与 Gibbs 分布之间的等价性^[35],从而可以利用 Gibbs 分布来求解 MRF 中的概率分布。

MRF 因其强大的建模邻域上下文空间结构关系的能力,使其广泛应用于图像处理与分析的众多领域。Li^[34]对 MRF 在计算机视觉领域的应用进行了广泛而又深入的研究,并将 MRF 的应用分为 low-level 和 high-level 两个不同的层次。在图像 low-level 的应用包括图像复原、图像纹理分割、边缘检测和光流(optical flow)处理,主要利用了像元的局部结构特征;在图像 high-level 的应用包括目标匹配与识别、目标姿态计算(pose computation),主要用于建模一个目标(或场景)的特征点、线或面之间的几何结构关系。

近些年来,MRF 也越来越多地应用于高分辨遥感影像,分别用于建模像元以及人工目标(建筑物和道路)基元之间的邻域结构关系,并进一步实现影像的纹理分割与分类以及典型人工目标的检测与识别等任务。

在像元层次,Lorette^[36]考虑了像元局部结构的异向性,建立 8 方向的 MRF 模型,模型的参数用来表征纹理结构特征,利用该特征可进一步实现不同分辨率影像中城市区域的提取;Tso 等人^[37]基于 MRF 研究了影像的上下文分类方法,该方法在使用 MRF 模型建模像元的上下文结构关系时,先使用小波变换提取多尺度的边缘线,对于边线像元不再考虑上下文信息,避免了分类中的边界平滑现象;Zhong 等人^[38]在进行高分影像的城市区检测时,分析了城区影像中存在的不同尺度的空间结构信息,并引入条件随机场(CRF)来融合这些多尺度的结构信息,最终实现城区的检测;Zhang 等人^[39]提出了距离加权的 MRF 模型,建模高分影像的局部空间结构关系,并提取空间信息用于影像的分类。

在目标层次,王琰等人^[40]在进行高分影像的变化检测时,使用 MRF 模型来建模变化像斑(region)的邻域空间关系,实现变化像斑的分类判别。余长慧等人^[41]利用 MRF 来建模高分影像分割区域的空间近邻关系,实现 QuickBird 影像的道路提取。Katartzis 等人^[42]使用 MRF 模型来建模高分影像中 3D 建筑物基元(直线段)之间的结构关系,并使用层次化的编组策略实现 3D 建筑物的提取。

MRF 不仅可在像元层次建模上下文结构,还适合在目标层次建模目标的基元结构关系,实现地物(如建筑物和道路)的提取。进行目标结构建模时它还常常与图理论方法以及感知编组方法结合,建立图上的 MRF 以及实现基于 MRF 的感知编组。在具体实现时,一般会使用与其等价的 Gibbs 分布转化成能量函数进行求解,并可以与当前的最优化技术(如模拟退火、进化计算)进行结合,具有很大的应用潜能。因此,在实际应用中,如何根据图像的特征与空间结构关系构造能量函数,并求得能量函数的最优解是解决问题的关键和难点。

2.4 图理论方法

现实世界中的各种事物是相互联系的,图理论(graph theory)是建模这种联系的强大数学工具。在图像处理与分析领域,图可用于表达图像中各元素之间的空间关系,实现图像的结构化表示。不同

于 MRF, 图不仅可以描述元素的近邻关系, 还可以建模其他更复杂的结构关系。一个图用 $G = (V, E)$ 来表示, 节点 $v \in V$ 代表图像的元素, 边 $(v_i, v_j) \in E$ 代表元素 v_i 和 v_j 之间的空间关系, 并且每个边 $e_{ij} = (v_i, v_j) \in E$ 对应一个权值 $w(v_i, v_j)$, 用于表达对空间关系的定量描述(图 4)。

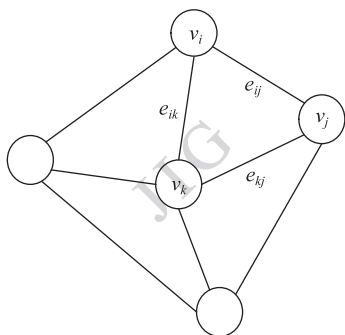


图 4 用节点和边表示的图

Fig. 4 A graph with its nodes and edges

对于不同的图像元素, 图建模的空间关系是不同的, 也就对应不同的图结构。在像元层次, 可以构建图像的像元图, 其主要的应用是进行图像分割。代表性的分割方法有基于最小扩张树(minimal spanning tree)的方法^[43]、图谱聚类的方法^[44]等, 更多基于图理论的图像分割方法可参看文献^[45]。对于高分辨率遥感图像, 也有相关的基于图的分割方法, 例如崔卫红^[46]对基于图论的面向对象的高分辨率遥感影像分割方法进行了系统的研究。

对于图像中的人工目标, 因其具有规则的几何结构, 图理论可根据目标中部分与整体的关系, 构建目标的结构模型, 这在结构模式识别领域应用的比较多。代表性的研究有: Kim 等人^[47]使用图来建模矩形建筑物的结构, 建筑物的边线对应于图的节点, 边线之间的拓扑关系对应于图的边, 通过进一步的假设与验证, 实现了航空影像中建筑物目标的提取。Inglada 等人^[48]使用空间推理技术来分析高分辨率遥感影像, 首先对影像进行多尺度分割, 然后使用属性关系图(ARG)来对区域的空间及属性关系进行表达, 图的节点代表了每个分割的区域, 图的边用来代表区域连接演算(region connection calculus)关系, 进一步通过图匹配实现飞机、建筑物等目标的检测与识别。Sirmacek 等人^[49]基于 SIFT(scale invariant feature transform)算子和图理论研究了高分影像中城市区域及城区建筑物的检测方法, 该方法用

SIFT 算子来提取影像的特征点, 并将其用图的节点表示, 特征点之间的距离以及灰度关系用图的边来表达, 最后分别使用多子图匹配(multiple subgraph matching)法和图割法来检测城市区和城区建筑物。Korting 等人^[50]关注于高分辨率遥感影像中矩形目标的检测, 首先对图像进行过分割并构建区域邻接图(RAG), 然后根据矩形性度量进行影像的再分割, 获得了较好的矩形目标。

在场景层次, 主要是应用在图像的检索、匹配或场景理解等方面, 完成这些任务一般会考虑图像的内容以及相关的语义信息, 因此在建模场景结构时一般会使用带有属性信息的图, 如属性关系图、语法图(parse graph)等。例如 Aksoy^[51]使用 ARG 来建模遥感图像场景内容, 实现场景的检索。Wang 等人^[52]使用 ARG 来建模场景中的道路网结构, 实现影像数据与矢量数据的匹配。朱松纯团队研究了基于图语法(image parsing)的场景结构特征描述方法, 并将其建立在自上而下和自下而上的贝叶斯框架上, 实现图像的场景理解^[53-54]。

图理论在建模目标结构或场景结构时, 一般采用结构模式识别的方法, 其困难主要在于目标基元或场景目标的检测以及目标或场景空间关系的获取上, 对于后者一般会与统计模式识别方法结合, 采用机器学习的方法来获取。图理论的另一个问题是计算代价一般会很高, 因此在实际处理中一般不使用像元而是用更高层次的图像元素作为节点。

2.5 感知编组法

面对复杂的图像, 人可以迅速、准确地识别出目标并标出目标轮廓, 找出显著而有意义的区域, 而对于计算机来说仍然是非常困难的。人能快速地完成物体识别、目标搜索等复杂的视觉任务, 先决条件是存在视知觉组织能力, 即人类的视觉机制具有将图像中的基本结构组织成完整目标的能力^[55]。

感知编组(perceptual organization)是一种视觉认知的计算方法, 它的理论基础是德国心理学家 Wertheimer、Koffka、Kohler 等人在 20 世纪 20 年代创立的 Gestalt(格式塔或称完形)心理学^[56]。Gestalt 心理学派提出了一套适合于感知组织的规律, 如邻接律(proximity)、相似律(similarity)、封闭律(closure)、连续律(continuity)、对称律(symmetry)等, 这些组织规律表明图像中的目标是一种“有序的(orderly)”、“基于规则的(rule-governed)”、“非随机的(nonrandom)”结构^[56]。

感知编组早期的研究主要在计算机视觉领域,并且针对的主要是普通自然场景图像,对于 1999 年以前的相关工作可参看文献[56-57]。目前出现的感知编组方法主要有基于概率统计的方法(以 MRF 和贝叶斯推断为主)、基于张量投票的方法、基于图论方法、基于主动轮廓模型的方法以及基于机器学习的方法等^[55, 58-59]。

随着分辨率的提高,高分辨率遥感影像接近自然场景的成像质量,这为引进计算机视觉技术来分析遥感图像提供了有力支持,使得将机器视觉领域的理论与方法引入高分辨率遥感图像理解中具备了可行性^[1]。近十年来无论是对自然图像还是高分辨率遥感图像,感知编组的方法都得到了较大的发展,代表性工作主要包括:Zhu^[60]提出了一个 2D 目标形状建模和学习的框架,学习的形状模型为定义在 MRF 上的吉布斯(Gibbs)分布,MRF 的近邻结构对应于 Gestalt 规则。Iqbal 等人^[61]使用感知组织提取图像的结构特征,并根据提取的结构特征对图像进行分类,进一步实现图像的检索。Elder 等人^[62]提出了一个在目标轮廓编组中使用先验知识的框架,该框架将目标外观(appearance)的先验概率知识与轮廓编组的概率模型相结合,利用该方法实现了全色 IKONOS 影像中湖泊边界的精确提取。Park 等人^[63]提出了一种使用目标模型对线结构进行感知编组的方法,并用于 3D 多面体的提取。Michaelsen 等人^[64]采用产生式规则来表达目标的先验知识,并将其引入感知编组算法,实现从高分辨率 SAR 图像中提取人工地物。Hu 等人^[65]提取了一种层次化的感知编组策略,进行高分辨遥感影像道路中心线的提取。Zlatoff 等人^[66]将 Dempster-Shafer 证据理论用于编组过程,改善图像的分割。Katartzis 等人^[42]提出了一个随机性框架用于识别高分影像中的 3D 建筑物,该方法使用了层次化的编组策略和 MRF 模型,实现了建筑物结构的组织。

比较以上研究可以发现,近十年来的这些结构编组方法更强调先验知识的作用、目标模型的使用、编组过程的有效控制策略以及在 3D 深度数据(range data)的应用等,这也将成为未来一段时间的发展趋势。对于影像中目标对象的结构编组,结构基元的获取与基元结构关系的建模这两个基本的问题目前虽然没有根本解决,但感知编组方法利用了人类视觉的认知规律和对目标结构的组织能力,为问题的解决提供了新的线索和途径。

2.6 其他方法

上文提到的描述和建模高分影像空间结构特征的方法是近年来比较有代表性的,其背后大多有系统的数学理论支持,并且在很多情况下这些方法也不是单独使用的,而是和其他方法结合来共同解决问题。例如,在进行目标结构的感知编组过程以及基于图理论模型的后续处理中,常常会涉及优化问题的求解,一些最优化方法如模拟退火、进化计算等常被使用。

针对于高分影像的特殊应用问题,一些新的描述与建模影像目标或场景结构的方法被提出,例如随机几何中标记点过程(marked point process)的方法^[67-68]、贝叶斯方法^[6]、GIS 空间分析法^[69]、尺度空间和视觉拓扑的方法^[70]、基于视觉语法(visual grammar)的方法^[71]等等,这些方法虽然和前面所述的方法有一些交叉,但也具有新的意义。例如基于视觉拓扑的方法^[70],它根据人类视觉认知的特点,强调目标结构的整体性和拓扑性,即先整体后局部,该思想对传统的计算机视觉方法提出了挑战,但这种方法目前具体的实现算法还比较少,在未来它有可能获得更大的发展。

3 结 语

高分辨率遥感影像具有明显的结构特性,本文对高分影像的结构特征以及当前国内外的相关研究进行了探讨。从元素及其空间结构关系的角度来认识高分影像的结构特性,并指出构成影像的“元素”和“元素之间的空间结构关系”是结构特征的两个方面。“元素”包括像元、结构基元和目标,相应地对应的结构包括像元结构、目标结构和场景结构 3 个不同的层次。进一步地,对目前高分影像空间结构特征分析与建模的代表性方法进行了系统的综述分析。

通过对现有工作的总结和分析,本文结论和对未来的展望主要包括以下几个方面:

1) 高分辨率遥感影像的空间结构具有多尺度特性,对影像空间结构特征的描述与建模可在影像的不同尺度下进行。空间统计方法更适合在像元层次建模空间结构关系,而数学形态学方法、MRF 既可以在像元层次又可以在目标层次对像元或目标的结构进行建模,感知编组方法更适合建模目标结构,而图理论则更适合在目标或场景层次来进行结构的

建模。

2) 从模式识别的角度来看, 空间统计学、像元层次的数学形态学(如 DMP 算法)以及像元层次的 MRF 建模的空间结构特征可以用特征向量来表示, 因此更接近统计模式识别的范畴; 而目标或场景层次的数学形态学、MRF、图理论和感知编组方法, 更侧重于对结构关系的描述, 一般不易用一个特征向量来表示, 因此更接近结构模式识别的范畴。对于后者, 在解决问题时一方面会利用结构模式识别的思想, 另一方面会与统计模式识别、机器学习以及最优化方法进行有机结合共同构建结构模型, 这也成为结构特征建模的一个重要发展趋势。

3) 目前的方法更多地还是从图像处理的角度来认识影像中的结构, 与人对结构特性的认识还有很大的差距, 不能有效发挥人的先验知识的作用, 在未来认知科学、机器学习、人工智能等领域的方法有望对结构特性的认识与建模发挥更大的作用。

4) 高分影像已接近自然场景中的图像, 在更小的尺度上更细致地描述和建模地物目标的几何结构及其上下文关系, 进而实现影像的人工目标检测、识别和 3 维重建以及目标所在场景的理解也成为当前以及未来的重要研究课题和发展方向。

参考文献 (References)

- [1] Sun X, Fu K, Wang H Q. High Resolution Remote Sensing Image Understanding[M]. Beijing: Science Press, 2011. [孙显, 付琨, 王宏琦. 高分辨率遥感图像理解[M]. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [2] Bruzzone L, Carlini L. A multilevel context-based system for classification of very high spatial resolution images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(9): 2587-2599.
- [3] Huang X, Zhang L P, Li P X. Classification and extraction of spatial features in urban areas using high-resolution multispectral imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 4(2): 260-264.
- [4] Ünsalan C, Boyer K L. Classifying land development in high-resolution panchromatic satellite images using straight-line statistics[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(4): 907-919.
- [5] Erus G, Loménie N. How to involve structural modeling for cartographic object recognition tasks in high-resolution satellite images? [J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(10): 1109-1119.
- [6] Tao Y Y, Liang L S, Xu Y Q, et al. Complex shape building extraction with Bayesian structure model[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(4): 547-653. [陶阳宇, 梁林孙, 徐迎庆, 等. 利用贝叶斯结构模型的复杂形状建筑物提取[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(4): 547-653.]
- [7] Benz U, Hofmann P, Willhauck G, et al. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2004, 58(3-4): 239-258.
- [8] Stein A, Bastiaanssen W G M, Bruin S D, et al. Integrating spatial statistics and remote sensing[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(9): 1793-1814.
- [9] Meer F V D. Remote sensing image analysis and geostatistics[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(18): 5644-5676.
- [10] Franklin S E, Wulder M A, Lavigne M B. Automated derivation of geographic window sizes for use in remote sensing digital image texture analysis[J]. Computers & Geosciences, 1996, 22(6): 665-673.
- [11] Chen Q, Gong P. Automatic variogram parameter extraction for texture classification of the panchromatic IKONOS imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(5): 1106-1115.
- [12] Cheng C Q, Yu X, Guo S D, et al. Analysis of the crowd degree of building for communities based on high spatial resolution remote sensed images[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis, 2005, 41(6): 875-881. [程承旗, 喻新, 郭仕德, 等. 城市居住单元建筑拥挤度环境遥感分析——以厦门市为例[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2005, 41(6): 875-881.]
- [13] Wu S H, Xu B, Wang L. Urban land-use classification using variogram-based analysis with an aerial photograph[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2006, 72(7): 813-822.
- [14] Balaguer A, Ruiz L A, Hermosilla T, et al. Definition of a comprehensive set of texture semivariogram features and their evaluation for object-oriented image classification[J]. Computers & Geosciences, 2010, 36(2): 231-240.
- [15] Wulder M, Boots B. Local spatial autocorrelation characteristics of remotely sensed imagery assessed with the Getis statistic[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(11): 2223-2231.
- [16] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA[J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115.
- [17] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. Geographical Analysis, 1992, 24(3): 189-206.
- [18] Ord J K, Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application[J]. Geographical Analysis, 1995, 27(4): 286-306.
- [19] Myint S W, Wentz E A, Purkis S J. Employing spatial metrics in urban land-use/land-cover mapping: comparing the Getis and

- Geary indices[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007, 73(12): 1403-1415.
- [20] Johnson B, Xie Z. Unsupervised image segmentation evaluation and refinement using a multi-scale approach[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2011, 66(4): 473-483.
- [21] Su W, Li J, Chen Y, et al. Textural and local spatial statistics for the object-oriented classification of urban areas using high resolution imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(11): 3105-3117.
- [22] Soille P, Pesaresi M. Advances in mathematical morphology applied to geoscience and remote sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(9): 2042-2055.
- [23] Pesaresi M, Benediktsson J A. A new approach for the morphological segmentation of high-resolution satellite imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(2): 309-320.
- [24] Aytikin O, Ulusoy I. Automatic segmentation of VHR images using type information of local structures acquired by mathematical morphology[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2011, 32(13): 1618-1625.
- [25] Akcay H G, Aksoy S. Automatic detection of geospatial objects using multiple hierarchical segmentations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(7): 2097-2111.
- [26] Bellens R, Gautama S, Martinez-Fonte L, et al. Improved classification of VHR images of urban areas using directional morphological profiles[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 2803-2812.
- [27] An R, Feng X Z, Wang H L. Road feature extraction from remote sensing classified imagery based on mathematical morphology and analysis of road networks[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(7): 798-804. [安如, 冯学智, 王慧麟. 基于数学形态学的道路遥感影像特征提取及网络分析[J]. *中国图象图形学报*, 2003, 8(7): 798-804.]
- [28] Zhu C, Shi W Z, Pesaresi M, et al. The recognition of road network from high-resolution satellite remotely sensed data using image morphological characteristics[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(24): 5493-5508.
- [29] Mohammadzadeh A, Tavakoli A, Valadan Zoej M J. Road extraction based on fuzzy logic and mathematical morphology from pan-sharpened IKONOS images[J]. *The Photogrammetric Record*, 2006, 21(113): 44-60.
- [30] Maragos P A, Schafer R W. Morphological skeleton representation and coding of binary images[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1986, 34(5): 1228-1244.
- [31] Shackelford A, Davis C. A combined fuzzy pixel-based and object-based approach for classification of high-resolution multi-spectral data over urban areas[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 41(10): 2354-2363.
- [32] Yu L, Wang R S. Shape representation based on mathematical morphology[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2005, 26(9): 1354-1362.
- [33] Zhao J, Zhu Q, Du Z Q, et al. Mathematical morphology-based generalization of complex 3D building models incorporating semantic relationships[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 68: 95-111.
- [34] Li S Z. *Markov Random Field Modeling in Image Analysis*[M]. New York: Springer-Verlag, 2001.
- [35] Besag J. Spatial interactions and the statistical analysis of lattice systems (with discussion)[J]. *Journal of Royal Statistician Society*, 1974, 36(2): 192-236.
- [36] Lorette A. Texture analysis through a markovian modeling and fuzzy classification: application to urban area extraction from satellite images[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2000, 36(3): 221-236.
- [37] Tso B, Olsen R C. A contextual classification scheme based on MRF model with improved parameter estimation and multiscale fuzzy line process[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(1): 127-136.
- [38] Zhong P, Wang R S. Using combination of statistical models and multilevel structural information for detecting urban areas from a single gray-level image[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(5): 1469-1482.
- [39] Zhang Q, Zhang L P, Huang X. Classification of high-spatial resolution imagery based on distance-weighted markov random field with an improved iterated conditional mode method[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(24): 9843-9868.
- [40] Wang Y, Shu N, Gong Y. Determination of new class properties of the changed image segments using MRF graph model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(5): 542-545. [王琰, 舒宁, 龚龔. 利用马尔柯夫随机场图模型的变化像斑类别判定方法[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2012, 37(5): 542-545.]
- [41] Yu C H, Yi Y H. Object-based road extraction in remote sensing image using markov random field[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(5): 544-547. [余长慧, 易尧华. 利用 MRF 方法的高分辨率影像道路提取[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2011, 36(5): 544-547.]
- [42] Katartzis A, Sahli H. A stochastic framework for the identification of building rooftops using a single remote sensing image[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 259-271.
- [43] Zahn C T. Graph-theoretic methods for detecting and describing gestalt clusters[J]. *IEEE Transactions on Computing*, 1971, 20(1): 68-86.
- [44] Shi J, Malik, J. Normalized cuts and image segmentation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(8): 888-905.
- [45] Peng B, Zhang L, Zhang D. A survey of graph theoretical approaches to image segmentation[J]. *Pattern Recognition*, 2013, 46(3): 1020-1038.

- [46] Cui W H. Research on graph theory based on object oriented high resolution image segmentation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. [崔卫红. 基于图论的面向对象的高分辨率影像分割方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.]
- [47] Kim T, Muller J P. Development of a graph-based approach for building detection[J]. *Image and Vision Computing*, 1999, 17(1): 3-14.
- [48] Inglada J, Michel J. Qualitative spatial reasoning for high-resolution remote sensing image analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(2): 599-612.
- [49] Sirmacek B, Unsalan C. Urban-area and building detection using SIFT keypoints and graph theory[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(4): 1156-1167.
- [50] Korting T S, Dutra L V, Fonseca G L M. A resegmentation approach for detecting rectangular objects in high-resolution imagery[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 621-625.
- [51] Aksoy S. Modeling of remote sensing image content using attributed relational graphs[C]//*Proceedings of International Workshop on Structural and Syntactic Pattern Recognition*. Berlin: Springer-Verlag, 2006, 4109: 475-483.
- [52] Wang C, Stefanidis A, Agouris P. Spatial content-based scene similarity assessment[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2012, 69: 103-120.
- [53] Han F, Zhu S C. Bottom-up/top-down image parsing by attribute graph grammar[C]//*Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Computer Vision*. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2005, 2: 1778-1785.
- [54] Porway J, Wang Q C, Zhu S C. A hierarchical and contextual model for aerial image parsing[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2010, 88(2): 254-283.
- [55] Luo S W. *The Perception Computing of Visual Information*[M]. Beijing: Science Press, 2010. [罗四维. 视觉信息认知计算理论[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [56] Sarkar S, Boyer K L. Perceptual organization in computer vision: a review and a proposal for a classificatory structure[J]. *IEEE Trans. on System Man Cybernet*, 1993, 23(2): 382-399.
- [57] Boyer K L, Sarkar S. Perceptual organization in computer vision: status, challenges, and potential[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1999, 76(1): 1-5.
- [58] Dong H Y, Shen Z K, Luo J, et al. Survey of perceptual organization[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(14): 9-13. [董鸿燕, 沈振康, 罗军, 等. 感知编组综述[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(14): 9-13.]
- [59] Guo Q, Tu D. Survey of contour grouping[J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(10): 3629-3636. [郭强, 涂丹. 轮廓编组综述[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(10): 3629-3636.]
- [60] Zhu S C. Embedding gestalt laws in markov random fields[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(11): 1170-1187.
- [61] Iqbal Q, Aggarwal J K. Retrieval by classification of images containing large manmade objects using perceptual grouping[J]. *Pattern Recognition*, 2002, 35(7): 1463-1479.
- [62] Elder J H, Krupnik A, Johnston L A. Contour grouping with prior models[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(6): 661-674.
- [63] Park I K, Lee K M, Lee S U. Perceptual grouping of line features in 3-D space: a model-based framework[J]. *Pattern Recognition*, 2004, 37(1): 145-159.
- [64] Michaelsen E, Soergel U, Thoennessen U. Perceptual grouping for automatic detection of man-made structures in high-resolution SAR data[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, 27(4): 218-225.
- [65] Hu X Y, Tao V. Automatic extraction of main road centerlines from high resolution satellite imagery using hierarchical grouping[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007, 73(9): 1049-1056.
- [66] Zlatoff N, Tellez B, Baskurt A. Combining local belief from low-level primitives for perceptual grouping[J]. *Pattern Recognition*, 2008, 41(4): 1215-1229.
- [67] Ortner M, Descombes X, Zerubia J. Building outline extraction from digital elevation models using marked point processes[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2007, 72(2): 107-132.
- [68] Lafarge F, Descombes X, Zerubia J, et al. Automatic building extraction from DEMs using an object approach and application to the 3D-city modeling[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, 63(3): 365-381.
- [69] Liu Y, Guo Q H, Kelly M. A framework of region-based spatial relations for non-overlapping features and its application in object based image analysis[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, 63: 461-475.
- [70] Luo S W. *Information Processing Theory of Visual Perception*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. [罗四维. 视觉感知系统信息处理理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.]
- [71] Aksoy S, Koperski K, Tusk C, et al. Learning Bayesian classifiers for scene classification with a visual grammar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(3): 581-589.