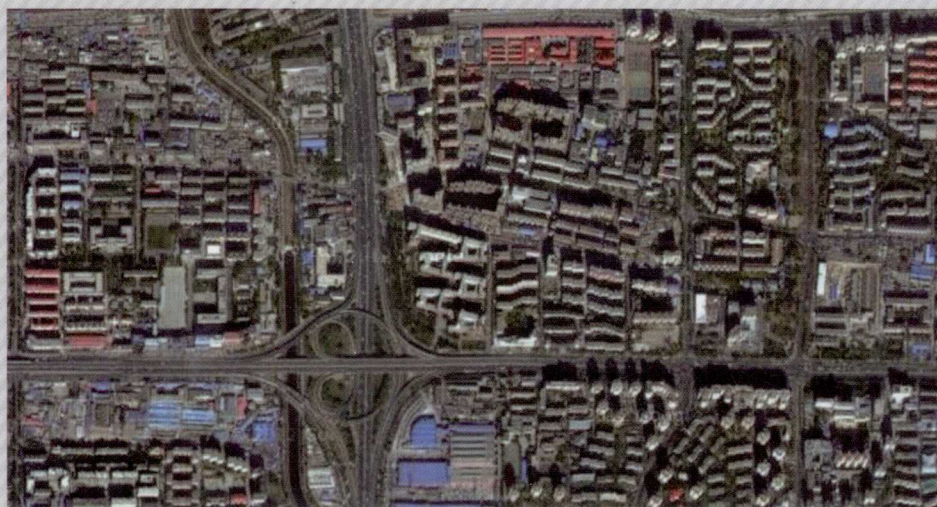




测·绘·科·学·与·技·术 著作系列

高分辨率遥感影像中 道路提取方法的研究

周绍光 著



科学出版社

1498199

测绘科学与技术著作系列

高分辨率遥感影像中道路 提取方法的研究

周绍光 著



淮阴师院图书馆 1498179



科学出版社

北 京

内 容 简 介

道路是一种重要的地理专题信息,高分辨率遥感影像为道路信息的及时更新提供了一条有效的途径。从高分辨率遥感影像中提取道路网已成为摄影测量与遥感、地理信息系统及计算机视觉等领域的研究热点。

在高分辨率影像中,道路呈现出复杂的特征,提取道路牵涉许多问题。本书介绍了与道路提取有关的多个方面的内容,包括国内外研究现状,弱对比道路边缘线的提取,路面一维纹理,分割路面点的马尔可夫随机场模型,解算随机场能量函数的图割方法和置信传播方法,分割路面点的模糊C均值模型和感受野模型,道路条带的修整、连接和矢量化等。

本书可供从事基础地理信息更新、城市地形图导航等研究工作的科技人员阅读,也可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高分辨率遥感影像中道路提取方法的研究/周绍光著. —北京:科学出版社, 2012

(测绘科学与技术著作系列)

ISBN 978-7-03-035237-8

I. ①高… II. ①周… III. ①高分辨率-遥感图像-图像处理-方法-研究 IV. ①TP751

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第175018号

责任编辑:童安齐 王珏/责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012年8月第一次印刷 印张:11 1/4

字数:217 000

定价:50.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(双青))

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62138978-8212

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

作为城市骨架的道路无疑是一种最重要的地物，道路信息在军事、测绘、交通、导航等诸多领域得到广泛的应用。城市建设速度的加快，使得我们必须定期地更新旧的道路信息，以保证其实时性和有效性。日新月异的遥感技术为更新旧的 GIS 信息提供了一种便捷、低成本的途径，所以世界范围内有许多研究者都在设法解决“从遥感影像中提取城市道路”这一极具挑战性的课题。

不同地区、不同城市的遥感影像中的道路往往呈现出很不相同的特点，道路提取方法因此而具有针对性，针对所选择的影像类别，一种方法可能较为有效，但利用同一方法处理不相似的另一类影像时，效果则可能很差。由于难以得出一种普遍适用的道路提取方法，我们在几年前开始这一课题研究时，便选择中国东部城市的高分辨率遥感影像作为研究对象，对从这些影像中提取道路所出现的问题作深入的理论分析，进而得出相应的解决措施。

通过检测道路的双边缘线实现道路提取是传统的做法。作者曾经将一些经典的边缘线检测方法作用于所选的影像，结果均无法识别受噪声影响较重的弯曲边缘线，后来通过整合相位编组法原理及动态规划原理的优点并加以改进，完成了对无理想边缘道路的提取，这便是本书第二章的内容。

仅仅依靠边缘信息很难提取出绝大部分道路，意识到这一道理之后，作者将主要的精力用于解决路面的分割问题。为了取得好的分割效果，需要找到有利于区分路面与背景的分割特征值；同时需要设计合理的分割模型。只利用多光谱数据和灰度值作为分割特征值往往难以分割出清晰完整的道路条带。纹理数据是分割复杂影像的较有效的特征值，不过道路的宽度尺寸较小，计算纹理数据的传统方法不适合路面纹理的计算，本书第三章阐述了用于计算道路纹理数据的新方案。模糊 C 均值 (FCM) 是一种应用广泛的基于聚类的分割模型，我们研究了应用此模型分割道路的效果；经过适当的改进，经典的 FCM 模型可以加入邻近像素类别趋于一致、邻近路面点方向趋于相同的约束，从而提高所得路面的质量。对 FCM 和改进的 FCM 应用于分割道路的研究内容见第四章和第五章。马尔可夫随机场 (MRF) 无疑是迄今为止理论最严密、效果最好的分割模型之一，此模型可以自然地引入多种约束以使分割达到预期的结果。使用马尔可夫随机场模型的一个困难是其能量函数最小化的解算。模拟退火法可解算任何形式的能量函数，但速度非常慢；置信传播法 (BP) 和图割法 (graph cuts) 解算效率较高，但使用此两种解法时对能量函数的形式有限制，这无疑会妨碍设计分割能量

函数的自由。第六章和第七章描述了使用 BP 法和图割法分割路面的原理和流程。

在研究路面分割的过程中,我们偶然发现一种模仿视觉神经感受野的滤波器可以将条带状地物与其他地物区分开来,尽管需要更多的道路条带确认步骤,但此方法总体而言很简单,且有时能将上述手段均不起作用的道路识别出来。这一偶然发现的结果就是第八章所介绍内容。

任何一种分割方法得到的道路条带均可能包含孔洞、毛刺和断裂等缺点,还可能附着有粘连块,所以对分割所得的结果必须进行填补孔洞、平滑边缘、连接断裂等后处理。在后处理的基础上,需要将一条条不同的道路区分开来,这样才能真正地得出矢量化的道路信息。本书第九章详细地说明了这部分内容。

道路提取是一项非常复杂的任务,其他研究者或多或少地也会遇到本书所分析的问题,期望书中介绍的方法能为同类研究提供一些帮助。

国家自然科学基金项目“高分辨率遥感影像中城市道路网的提取方法研究”(项目批准号:41271420/D010702)和江苏省测绘科研项目“利用高分辨率遥感数据更新主要地物信息方法研究”(项目批准号:JSCHKY201201)为书中的研究内容提供了部分资助。

感谢近几年作者所指导的研究生赵建泉、徐勇、黎瑾慧、李昊、刘娟娟、孙超、王婧、何双剑参与了部分程序编写及算法性能实验工作;田慧、陈超、廖敏、张竹林、浮丹丹等完成了文字录入、修改、检校工作,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 道路的图像特征	2
1.3 道路提取算法中的共同问题	2
1.4 国内外研究现状	3
第二章 道路边缘线的提取方法研究	11
2.1 经典直线提取方法	11
2.1.1 启发式连接法	11
2.1.2 层次记号编组法	12
2.1.3 Hough 变换	12
2.1.4 相位编组法	13
2.2 利用动态规划和改进的相位编组法提取道路边缘线	15
2.2.1 动态规划的基本概念	15
2.2.2 动态规划模型的基本要素	16
2.2.3 动态规划模型的建立	18
2.2.4 动态规划的求解方法	19
2.2.5 用于边缘检测的动态规划模型	19
2.2.6 改进的编组区获取法	21
2.2.7 利用动态规划理论从组合编组区中检测道路外边缘线	28
2.3 总体实验结果与分析	32
2.3.1 影像选取	32
2.3.2 实验中参数值的设定	32
2.3.3 实验结果分析	33
2.3.4 精度评价	33
第三章 分割道路影像特征值的获取	37
3.1 图像分割的必要步骤	37
3.2 常用的道路分割特征值	37
3.3 一维道路纹理特征的提取	40
3.3.1 角度-纹理特征的基本原理	40

3.3.2	一维 Gabor 滤波器设计	41
3.3.3	确定道路方向	44
第四章	FCM 分割模型	47
4.1	引言	47
4.2	数据集的 c 划分	47
4.3	聚类目标函数	48
4.4	基于 FCM 的图像分割算法	51
4.4.1	HCM 算法	51
4.4.2	FCM 算法	52
第五章	结合空间信息的 FCM 算法	54
5.1	引言	54
5.2	结合空间信息的 FCM 分割理论	54
5.2.1	现有的两种基于空间信息的 FCM 分割算法 (SFCM)	54
5.2.2	改进的空间信息 FCM 分割算法	58
5.3	分割方法的对比实验及分析	60
第六章	基于 MRF 的图像分割模型	63
6.1	引言	63
6.2	马尔可夫随机场理论	63
6.3	常用的 MRF 模型	66
6.3.1	自生模型	66
6.3.2	多层逻辑模型	67
6.3.3	高斯马尔可夫随机场	68
6.4	MRF 分割模型	69
6.5	能量优化算法	70
6.5.1	模拟退火法	70
6.5.2	条件迭代算法	73
6.5.3	置信传播算法	73
6.5.4	EM 估算参数	75
第七章	利用 Graph Cuts 方法分割道路	78
7.1	引言	78
7.2	网络图与流量网络	78
7.2.1	图的相关定义	79
7.2.2	图的矩阵表示	79
7.2.3	流量网络	81
7.3	最大流的解算方法	82

7.3.1	割与最大流最小割定理	82
7.3.2	最大流的求解流程	83
7.3.3	传统最大流解算方法	84
7.4	图割方法	86
7.4.1	算法的基本流程	87
7.4.2	交换移动与扩展移动	92
7.5	基于图割的道路分割方法	94
7.5.1	图割方法用于面状对象的分割	95
7.5.2	改进的图割方法用于道路条带自动分割	100
7.6	道路分割实验与精度评定	104
7.6.1	改进方法与原有图割方法的比较	104
7.6.2	改进方法与其他代表性方法的比较	104
第八章	基于感受野模型的路面点分割方法	109
8.1	引言	109
8.2	几种视觉神经元感受野的性质	109
8.2.1	光感受器的感受野	109
8.2.2	水平细胞的感受野	110
8.2.3	双极细胞的感受野	110
8.2.4	无足细胞的感受野	110
8.3	经典感受野模型的描述及本书模型的提出	110
8.4	各向同性道路检测算子设计	112
8.5	对检测所得路面点的后处理	117
第九章	道路条带的修整和矢量化	119
9.1	引言	119
9.2	数学形态学方法	119
9.3	改进的直线段匹配法	121
9.3.1	原始直线匹配法	121
9.3.2	改进直线段匹配法	123
9.3.3	改进直线段匹配法对简单城市道路影像的实验	124
9.3.4	阶梯状地物的剔除	128
9.4	道路条带转换为距离图的两种方法	129
9.4.1	欧氏距离变换	129
9.4.2	圆形相位模板	130
9.5	脊线跟踪搜索道路中心线	133
9.5.1	脊线跟踪原理	133

9.5.2 改进的脊线跟踪算法	135
9.6 张量投票连接断裂的道路段	136
9.6.1 张量的定义和性质	136
9.6.2 张量投票算法	137
9.6.3 张量编码	139
9.6.4 张量投票	139
9.6.5 张量分解	141
9.6.6 断裂道路的连接	141
9.7 基于 MRF 原理的道路段的组织和连接	143
9.7.1 简述	143
9.7.2 MAP-MRF 道路段组织模型	143
9.7.3 道路段上下文组织	145
9.8 一种新的道路网获取策略	148
9.8.1 搜索中心线	148
9.8.2 优化道路中心线	150
9.8.3 连接道路中心线	156
9.8.4 提取道路双边缘线	160
9.9 获取矢量化道路的 Clode 方法	162
第十章 总结与展望	164
参考文献	166

第一章 绪 论

1.1 引 言

卫星遥感技术是现代最优秀的科研成果之一,借助遥感手段获取信息具有周期短、信息量丰富等优势。传统的中、低分辨率的卫星影像用于提供 GIS 信息、地图更新、目标识别等任务时具有一定的局限性。高分辨率卫星的发展使得遥感影像的深入应用成为可能,从而为 GIS 数据的更新、GIS 的应用提供了有利的条件;对于地图更新、影像匹配、目标检测等也具有重要意义。与此同时,如何从海量影像数据中及时、准确地获取所需要的信息并加以利用,则成了必须解决的重大问题。完全依靠人工判读和识别,效率和精度都难以保证,所以利用计算机对遥感影像目标进行识别便成为当前遥感信息处理的主要发展方向。

道路作为重要的人造地物是现代交通体系的主体,具有重要的地理、政治、经济意义,道路也是地图和地理信息系统中主要的记录和标识对象。20 世纪 70 年代中期,由于数字化地理交通信息的需要,图像自动道路提取技术随之出现并逐步发展。如今,多谱高分辨率的遥感卫星、成像雷达、无人驾驶飞机的出现,使得对地观测手段更加完备,地理图像数据日益丰富。另外,地图绘制、地理信息系统更新、城市观测和规划等诸多应用需求的出现和不断增长,促使自动道路提取技术不断发展。利用计算机从遥感影像中提取道路引起包括测绘、图像处理、计算机视觉等领域学者的广泛关注,在过去的几十年的时间里发表了大量的论文,相应的理论和技术都取得了长足的发展和进步。

有关道路提取的研究成果多见于《地理科学和遥感学报》(*IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*)、《图像处理学报》(*IEEE Transactions on Image Processing*)、《摄影测量和遥感》杂志(*Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*)和地理科学与遥感研讨会(International Geoscience and Remote Sensing Symposium)、图像处理学术年会(International Conference on Image Processing)、模式识别学术年会(International Conference on Pattern Recognition),以及 SPIE 组织的一些会议中。对现有代表文献的分析和总结可以为我们提供极大的帮助和借鉴。

1.2 道路的图像特征

道路提取的方法和图像特征紧密相关,而道路的图像特征源于其本身的物理特征。文献[1]总结了道路的物理特征并归纳如下:

- (1) 道路由水泥或者沥青铺设,其表面坚固平坦。
- (2) 道路的宽度满足一定要求,一般不随距离发生较大变化,高等级的公路更加宽阔。
- (3) 道路的弯曲程度符合一定要求,高等级的道路更加平直。
- (4) 道路的交叉处通常呈十字形、T形或其他不规则形状。
- (5) 道路将城市、区域、建筑物、设施连接起来,道路的等级和其连接区域的重要性有关;较窄的道路通常汇聚到较宽的道路。
- (6) 城市的道路分布密度和道路网络复杂程度远大于乡村。

道路的物理特征经传感器成像后,形成了道路的图像特征,可按不同层次将之分为以下四类^[1]。

- (1) 辐射特征。路面的颜色通常较周围更为明亮,灰度或纹理较为一致。
- (2) 几何特征。道路具有平行的双边缘,宽度基本保持不变;道路的弯曲程度在适当范围内;道路的交叉处通常呈现十字形或T形。
- (3) 拓扑特征。道路形成连通的网络,交叉点是网络的节点。
- (4) 背景特征。又称上下文特征,道路的穿越地区有不同的地缘特征;原野、乡村和城市中的道路,其宽度、密度、弯曲程度、网络复杂程度和提取的难度均不同。

不同的道路图像特征在道路提取中的作用不同。辐射特征和路面像素的灰度或色彩紧密相关,几何特征源于道路的形状,两者相对直观,且易于计算。拓扑特征和背景特征较抽象,应用难度较大。许多道路提取方法都是利用了多种道路图像特征而不是单纯依靠其中的某一类。由于阴影及噪声等因素的影响,遥感影像中的许多道路并不具备上述的全部特征,这正是道路提取非常困难的最根本原因。

1.3 道路提取算法中的常见问题

基于路面信息的道路提取算法必然包括的环节有分割出路面点、修整道路段条带、连接道路段生成道路网。基于边缘信息的方法则包含边缘线段的获取、匹配边缘线生成道路段、连接道路段生成道路网。

粗看起来,道路跟踪法似乎并不包含上面的典型环节,但利用道路截面作为

模板进行跟踪时,其实就是进行定向的路面区域增长,而利用边缘线进行跟踪时就是同时检测并匹配道路的双边缘线。

有的算法在分割出道路条带或生成道路边缘线对后并没有进行连接、修整工作,这些方法所选的实验影像一般较为简单,分割出的结果看起来已经比较理想。可是大部分的城市道路影像均很复杂,直接分割的结果必然包含大量的错误。剔除错分结果,将分割出的图案修整成道路形状,以及连接道路段均为必需的处理步骤。

有不少的研究者同时利用路面点和边缘点的信息来获取道路,这些道路提取策略也会以不同的方式包含上述的几个基本环节。

如果将检测边缘线也作为分割,将匹配边缘线归为修整,则提取道路算法的共同环节就是分割、修整和连接。不同的方法研究的重点不同。

1.4 国内外研究现状

尽管已有多位研究者对道路提取的现状进行综述^[2,3],但是对道路提取方法进行细致分类是较困难的,其原因是道路提取应用条件的多样决定了方法的多样。图像分辨率、是否有人工参与、图像的成像方式等因素,都不同程度地影响着道路的提取方法。这里依据道路提取算法所侧重的环节及所采用的相应策略进行分类。

1. 基于区域分割的道路提取方法

已知道路区域的灰度统计特性,可以直接利用阈值分割道路区域。文献[4]利用高低两个灰度阈值和道路宽度阈值分割图像中的道路区域。道路宽度阈值由图像分辨率和道路实际宽度计算得到,高低灰度阈值由直方图分析确定。文献[1]利用全局和局部的灰度统计特征分割图像。首先利用高低两个灰度阈值分割出区域 R_1 ,再利用高斯滤波器对图像进行平滑滤波,高于局部灰度均值的像素点被分割出来得到区域 R_2 ; R_3 为 R_1 和 R_2 的交集;对 R_3 进行形态学骨架处理得到道路曲线集合 S_3 ;对 S_3 中各曲线上的点进行局部极大值检验,在和曲线相垂直的一定宽度的线段上,该点的灰度若为局部最大值,则该点为道路点。如果 S_3 中某条曲线上存在的道路点超过一定比例,则认为该曲线是一道路曲线。

文献[5—7]采用自适应聚类算法(iterative self-organizing data analysis, ISODATA)分割道路图像。选取的特征分量为 HIS 空间的 S 分量、RGB 空间的 $(G-R)/(G+R)$ 分量和亮度。ISODATA 算法在迭代过程中根据类中距离方差和类间距离自动合并或拆分现有的聚类,对地物分类的效果较好。模糊聚类^[8—10]和遗传算法^[11]在区域分割中也有应用。

形态学方法也被广泛应用于提取道路。文献 [12] 利用形态学分水岭方法分割图像中的道路区域。Mena^[13] 在图像预处理后, 采用如下四步提取道路曲线: 闭操作去除局部较暗区域; 开操作提取长度满足要求的区域; 闭操作去除孤立暗点; top-hat 操作去除宽度过大的块状区域。保留下来的图像特征即为可能道路区域。文献 [14, 15] 基于形态学的各种操作配合适当的结构元素, 连接断裂的道路点、增长道路区域和去除非道路点。将这些操作按顺序组合起来实现道路提取。

2. 模板匹配

一些模板匹配法实际上是利用局部道路的形状先验知识来分割并修整道路段, 通过计算图像和道路模板间的相似程度来获取道路点。相似度函数常选用归一化相关系数或绝对差^[16]。Bajcsy 最早提出适于低分辨率图像的道路提取方法^[2]。利用灰度阈值将图像分割成道路区域和非道路区域的二值图像, 分割后的图像与 52 个预先定义的道路曲线模板比较, 以确定可能的道路曲线。根据道路曲率和长度的约束条件, 删除虚假道路曲线、连接道路曲线, 最终提取道路网络。

前已述及, 用道路截面作为模板进行道路跟踪其实是利用道路的延展性进行区域增长, 增长出条带状目标。以当前道路点的一维剖面为匹配模板, 道路预测点的一维剖面为待匹配图像, 计算两者的相似程度, 以确定下一道路点^[17]。随着道路的延伸, 以一定的权值淘汰旧模板, 加入当前道路剖面, 以适应道路图像的变化。Rathinam 提出的无人机跟踪道路飞行方案^[18], 为满足实时处理要求, 也以道路剖面为一维匹配模板, 在景象中搜索道路。

朱长青等^[19]利用整体矩形匹配方法提取道路。林祥国等^[20]则基于 T 形模板匹配进行道路提取。

3. 基于边缘的道路提取方法

从边缘上看, 道路的本质特征是一组平行线, 由此产生许多相关的道路提取方法。Steger 提出一种微分几何方法^[21], 可应用于边缘不平行的条带结构提取, 自然也可以提取道路。Trinder 等^[22]在 Marr 的视觉理论上研究了基于人工智能的自动识别道路的方法, 其关键在于在连接好的边缘线中产生表示道路的平行线对以及判定线对是否为道路的策略。Amini 等^[23]提出一种基于对象的道路边缘自动提取方法。Heipke 等用三个准则来控制平行线的提取^[24]。Baumgartner 扩展了 Heipke 的方法^[25]。Mayer 在 Heipke 和 Steger 所给出方法的基础上进行了改进^[26]。

边缘线非常接近于运动物体的轨迹, 所以许多研究者提出了基于边缘线跟踪

的道路提取方案。McKeown 提出基于道路边缘连续性的道路跟踪方法^[27]。道路跟踪的起点是已确定的道路边缘,沿当前道路边缘的延伸方向寻找下一道路点,选取的依据为:边缘特征大于一定阈值,该点在沿道路法向上的某邻域内道路特征最强,且该点使道路方向发生的改变小于某阈值。文献 [27] 同时利用基于道路剖面相关性和道路边缘连续性的两个跟踪器提取道路。在一个道路跟踪器的道路证据消失时,另一个依旧可以正确提取道路,因此结果更加可靠。

道路边缘经常受到噪声的影响,因而在提取边缘线同时减弱噪声的作用也是许多算法的研究重点。SAR 图像中存在较强的斑点噪声,应用于 SAR 图像的边缘检测算子常基于灰度的比值。均值比算子 (ratio of average, ROA) 是典型的 SAR 图像边缘提取算子。该算子以模板中心为分界线,计算纵横和两个对角四个方向上两侧灰度均值的比值,并与阈值比较以确定图像边缘。此算子的性能与阈值的选择和模板大小有关。模板越大则抑制斑点噪声的效果越好,但同时丢失细节也越多,指数加权均值比算子 (ration of exponentially weighted average, ROEWA) 可有效改善这一问题^[28]。

基于小波的图像处理算法可以突出道路边缘。文献 [29] 采用小波方法增强道路曲线的强度,抑制和道路无关的边缘。文献 [30] 选择适当的滤波窗,在滤除噪声的同时保持道路边缘;再通过二次二维方向滤波和去枝滤波提取道路。

4. 综合使用多种道路特征的方法

前面提到,道路不仅有光谱和几何特征,还有拓扑及上下文特征,将多种特征有机地结合起来,可以取得事半功倍的效果,其中以综合使用路面辐射特征和边缘梯度特征以及边缘线形状特征的算法最多。

自 Kass 于 1988 年提出 Snake 方法以来,该方法被广泛应用于图像的目标提取。其在道路提取中的应用主要有 Ribbon Snake 方法^[31]、Ziplock Snake^[32] 和 Quadratic Snake 方法^[33]。Snake 方法中定义的能量项既包含对应辐射特征的图像能量,也包含对应道路低曲率几何特征的内部能量。Ribbon Snake 和 Quadratic Snake 方法将道路的平行双边缘特征也纳入能量项。与 Quadratic Snake 方法有点相似的近几年提出的高阶主动轮廓 (HOAC)^[34-37] 法,也可将道路的辐射特征和几何形状特征同时纳入统一的能量方程之中,取得了令人鼓舞的道路提取效果。

5. 侧重于道路基元修整的方法

在提取道路网的三个主要环节中,绝大部分算法的研究重点是第一环节,即分割出路面点或获取道路边缘线对。由于阴影、噪声、车辆、交通设施的干扰,分割出的道路条带必然会包含孔洞、毛刺,甚至会附有很大的粘连块,大部分的

道路都会出现断裂情况,必须设法填补孔洞,切除毛刺和大的粘连块。我们将这一步工作称为道路段的修整。一个道路提取的完整算法应包含上述的三个环节,但有些文献重点研究了道路段修整这一步骤。Shi 等^[38]用一阈值将遥感影像二值化,然后采用直线段匹配法修整分割出的道路条带,填充小孔洞,切除路边的不规则块和毛刺,最后利用形态学手段获取道路中心线。这一条带修整方案简单、易行、有效,经过改进后,还能切除粘连化道路上的较大斑块。文献 [15] 用形态学方法实现影像的二值化,后续处理步骤与文献 [38] 相似。Zhang 等^[7]首先用传统的 K 均值聚类法将含有道路的混合类分割出来,然后利用模糊逻辑分类原理识别道路类,最后用角度纹理方案进一步细化道路类像素,其中第二步利用了路面点的光谱统计特点,而第三步则利用了路面像素的几何形状特征,其算法较好地剔除了误分的道路点,达到了切除不规则粘连块的目的。

Hough 变换及其改进方法也常被用于提取道路。文献 [39] 通过改进的 Hough 变换手段获取子图像中现状特征的主要方向,沿着此方向进行滤波,滤波结果与预先设定的道路段原型进行比对,去除非道路的斑块,进而以模糊 Hough 变换获取路表面的线段,这一步与直线段匹配法^[38]很相似,可修整道路条带。最后通过连接断裂的道路段构成道路网。

文献 [5] 利用自适应聚类算法分割图像,得到包含大量噪声的二值道路图像。构造十字形、T 形或星形的道路交叉口模板,其实质为一个与形状参数有关的模型。用模板覆盖二值道路图像,并调整模板的位置、宽度和方向等参数,直到得到一组使模板覆盖的道路区域超过一定阈值的参数,即匹配函数值超过阈值。该组参数对应道路交叉点位置、形状和宽度。这一过程利用道路交叉口的形状先验知识完成提取工作,对初始的分割结果实现了修整。

6. 道路的连接和组织

启发式搜索是最常见的道路连接方法,搜索的原理基于道路的几何特征,即道路通常平直,弯曲程度有限。文献 [21] 提取的道路中心线,包含道路中心点的位置、延伸方向和道路强度信息。设置高低两个阈值,从道路强度高于高阈值的点开始道路连接,根据道路弯曲程度有限原则限制搜索范围,即下一道路点应在当前道路点延伸方向的某邻域内。假设当前道路点位置为 p_1 ,道路方向为 α_1 ,下一个道路点位置为 p_2 ,道路方向为 α_2 ,两道路点间距离 $d = |p_1 - p_2|$,道路的方向偏转 $\beta = |\alpha_1 - \alpha_2|$ 。在 p_1 沿 α_1 方向的邻域内寻找下一个道路点使 $d + \beta$ 最小,且 $\beta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ 。搜索的终止条件为邻域内已无法找到强度高于低阈值的道路点,或找到的下一个道路点发生重复,该重复点被标记为道路交叉点。一条道路的连接过程中止后,若还有道路强度超过高阈值的道路点,则以之为新起点

开始道路连接过程。

道路跟踪方法^[17]也是利用了道路曲率有限的几何特征,并采用了模板匹配方法。由人工标记一道路片段的两个端点,两点间的道路截面被存储为模板。建立扩展卡尔曼滤波器,根据当前道路方向预测下一道路点的位置。截取预测道路点横截面上的图像,并和模板进行匹配,得到最佳匹配位置。跟踪法提取道路的过程中同时完成了道路段的连接和组织工作,可以抗一定程度的断裂。除了基于道路剖面相关性的道路跟踪方法,基于道路边缘连续性的道路跟踪方法^[27]也同样具有道路连接功能。

由于可以方便使用各种先验的知识,基于 MRF 的模型已被广泛应用于道路网络识别中,最成功的应用是将真伪混杂的道路候选段组织成道路网。马尔可夫原理对直线段进行组织的能力早在 Marroquin^[40]及 Krishnamachari^[41]的文章里就得到了体现。Tupin^[42,43]将该方法发展,运用到 SAR 影像的道路组织,取得了令人鼓舞的效果。文献 [44] 试图用图割原理解算 Tupin 的道路段组织模型,为了解算需要,该文对团的结构进行了适当的简化,同样取得了较好的效果。Sterger 等^[45]将提取出的道路段表示为一幅图,在图中确立一些显著结点,如道路与影像边框的交点或长道路段的端点,用模糊集理论来评价各种连接的优劣,最后得到连接而成的道路网,同时丢弃较短的错误检测结果。

7. 多尺度和多分辨率分析

很多道路提取方法均利用了多分辨率分析的优点。多尺度方法为融合多尺度下的信息提供了一个合适的框架。这对高分辨率图像尤为重要,在低分辨率下,道路检测更为容易,因为背景被同化为噪声,而道路仍相对清晰地与背景区分开来,当然,高分辨率道路定位更为准确。用低分辨率下的提取结果作为辅助,整个道路提取任务可被大大简化。

Peng^[34]为了处理高分辨率影像中存在信息的复杂性,提出多分辨率统计数据模型,以及多分辨率约束的先验模型,二者可综合不同分辨率下的分割结果。Baumgartner 等^[25]将道路网看成由道路交叉口及连接交叉口的路段组成。通过纹理分析将影像分割为不同的上下文区域。在高分辨率下提取边缘,在减低了分辨率的影像上提取线条。两种分辨率下的信息和道路的先验知识同时用于生成候选的道路边框。这些边框构成了四边形的道路块以及表示交叉口的多边形。串联起邻近的道路块得到道路段,借助上下文知识组织道路段获取道路网。

Mayer 等^[46]分三个方向研究道路提取问题:首先是组合多尺度下的道路特征;其次是利用道路和背景的关系确定道路类别;最后是利用 Ribbon Snake 法在高分辨率下精确地提取出道路。文献 [47] 利用多分辨率分析、模板匹配理论及双蛇模型提取快鸟影像中的道路。文献 [48] 提出了一种利用航空影像更新

GIS数据的新策略,在地面分辨率 25cm 的影像上提取双边缘线,而在低分辨率影像上将道路作为一条线提取,融合两套提取结果,可去除单一分辨率下产生的大部分错误。

8. 利用地理信息系统的道路信息

道路提取的结果常用来更新或者建立地理信息系统中的道路数据库。如果图像覆盖部分已建立了道路数据库,则原有道路数据可指导道路提取^[48-50]。已知的道路曲线或区域可直接作为道路提取的初始输入;从已知的道路区域提取的道路片段可作为道路模板;已知的道路拓扑结构和位置可以指导道路连接过程;地理信息系统提供的道路背景信息可以用来启发道路提取和道路连接的策略。总之,利用好地理信息系统中的道路信息可以提高道路提取的自动化程度和可靠性。

9. 基于特定理论的道路提取方法

随着科学技术的不断发展,功能强大的新理论越来越多地被用于提取道路网,这些算法也牵涉分割、修整、组织等必要环节,也需要利用道路的某些固有特征来达到提取目的,但将新理论用于解决问题的技巧更能代表方法的特色。

汪闽等^[51]利用随机场纹理模型与支持向量机方法提取高分辨率遥感影像上的道路网;吴学文等^[52]在水平集框架下,将影像的梯度特征、绿光与近红外波段的差值数据及 Gabor 小波的纹理特征结合起来构造速度函数,利用快速行进(fast marching)方法提取 IKONOS 多光谱影像中的主干道。

10. 利用背景特征提取道路

背景特征反映了道路和道路所处环境的关系,一般将背景特征分为全局和局部两类。全局背景描述了道路所在区域的总体地缘特征,如城市、乡村或森林等;局部背景描述道路和地物间的关系,如运动车辆和道路间的依存关系,树木、建筑物阴影与道路断点间的因果关系等。文献[12]在道路提取中尝试应用了道路的全局、局部背景和语义理解方法,其中定义了三种全局背景、树林背景和乡村背景,另外还定义了和局部背景相关的知识——背景概要模型,它是描述道路和背景区域间关系的知识模型。每一种全局背景对应若干背景概要模型。全局背景由地理信息系统提供,也可以由图像的纹理分析获得。利用和全局背景对应的局部背景概要模型,指导道路提取过程。如在乡村区域的全局背景中,图像中的道路断点可能由局部背景——树木阴影遮挡或者连接农田的小路引起,对应的道路连接策略允许在树木较多的区域强行连接距离较近的道路断点。

文献[53]认为影响可靠道路提取的主要因素包括城市、森林、树木、低对