# 遥感图像自动道路提取方法综述

吴 亮 [1,2] 胡云安 [1]

**摘 要** 自动道路提取是遥感图像识别的重要研究领域. 实现自动化、智能化、可靠准确的图像道路提取对地理信息技术发展具有重要的应用价值和意义. 道路的物理属性和功能形成了道路的辐射特征、几何特征、拓扑特征和背景特征. 以该四类特征为线索, 介绍了自动道路提取的典型方法, 侧重于分析四类特征在道路提取中作用和应用方式. 简要介绍了自动道路提取的评估方法和准则, 列举了主流的道路提取软件和遥感图像片源, 展望了该领域的发展方向.

**关键词** 遥感图像, 道路模型, 道路图像特征, 自动道路提取, 效果评估
**DOI** 10.3724/SP.J.1004.2010.00912

## A Survey of Automatic Road Extraction from Remote Sensing Images

WU Liang[1,2] HU Yun-An[1]

**Abstract** Automatic road extraction is one of the most researched fields in object recognition from remote sensing images. It is of high importance to the development of geography information technology to achieve automation, intelligence, robustness, and accuracy in road extraction. Base on the physical properties and functions, there are four road image features: the spectral feature, the geometric feature, the topological feature, and the contextual feature. The major road extraction methods are summarized in this paper according to the four features. Their functions and roles in road extraction of the four features are emphasized. The evaluation method for road extraction is also introduced along with the popular road extraction software and sources of remote sensing image. The trend of the research is outlooked at the end of this paper.

**Key words** Remote sensing image, road model, road image feature, automatic road extraction, performance evaluation

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. 上世纪 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. 另一方面, 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. 国内外对该领域的研究也日益活跃[1−5].

图像的自动道路提取技术主要应用于地理信息系统建立和更新、车辆和飞行器自动驾驶等领域. 其研究涉及图像处理、计算机视觉和人工智能等领域. 相关研究成果多见于《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》(*Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*) 和地理科学和遥感研讨会 (*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 组织的一些会议著作中. 与之相近的研究方向还包括遥感图像中的地物识别和分类、建筑物提取等.

本文在已有文献的基础上, 对道路的图像特征、自动道路提取的过程、分类和方法进行了探讨. 以道路的四类图像特征为自动道路提取方法的分类依据, 详细叙述了自动道路提取的经典方法, 侧重分析了不同层次图像特征在道路提取中的应用方式. 简要介绍了自动道路提取的评估准则和方法, 列举了目前使用的主流道路提取应用软件和遥感图像片源. 最后展望了该领域的发展方向和趋势, 并总结全文.

## 1 道路的图像特征和道路模型

道路提取的方法和道路的图像特征紧密相关. 而道路的图像特征源于其本身的物理特征. 文献 [2] 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.

收稿日期 2009-01-12 录用日期 2009-12-03
Manuscript received January 12, 2009; accepted December 3, 2009

1. 海军航空工程学院控制工程系 烟台 264001 2. 海军驻合肥地区军事代表室 合肥 230088
1. Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001 2. Military Representative Office of Navy in Hefei, Hefei 230088

3) 道路的弯曲程度符合一定要求, 高等级的公路更加平直.

4) 道路的交叉处通常为十字形、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[2].

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: 道路呈现相互平行的双边缘, 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或 T 形.

3) 拓扑特征: 道路成连通的网络, 交叉点是网络的节点.

4) 背景特征: 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; 背景特征也称之为上下文特征[1, 5].

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, 其实质是先验或后验知识. 它们以条件、规则、证据等形式参与道路提取, 应用难度较大. 事实上, 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. 本文依据主要作用的道路图像特征对道路提取方法进行归类划分.

道路模型是道路图像特征的抽象. 常用的道路模型有条带模型、平行双边缘模型和 Snake 模型.

假设道路灰度高于背景灰度, 道路剖面沿道路法向为一定宽度的阶跃信号, 即

$$f(x)=\begin{cases} h, & |x|\le w \\ 0, & |x|>w \end{cases} \tag{1}$$

其中, $w$ 为道路半宽度, $x$ 为沿道路法向的像素坐标, $h$ 为路面像素灰度. 基于条带模型的道路提取方法如文献 [6−7]. 文献 [6] 经推导得出结论, 道路中心点位于沿道路法向的图像一阶导数零点和二阶导数极值点. 文献 [7] 构造一非线性滤波算子提取道路, 并证明该滤波算子的模板大小须满足 2.5 倍道路宽度.

平行双边缘模型以道路边界为模型化对象. 道路由两条相互平行、距离符合宽度要求的边缘构成, 两边缘中间包含的区域图像灰度较为一致, 且边界长度一般大于道路宽度. 文献 [2, 8] 给出基于平行双边缘模型的典型方法.

基于 Snake 的道路提取方法将道路看作由道路边界包围的目标区域. 构造和道路辐射特征、几何特征相关的能量函数, 通过迭代寻找能量函数极小值而使目标轮廓不断接近真实道路.

## 2 自动道路提取的过程及方法分类

文献 [1] 分析了大量自动道路提取文献, 认为道路提取过程可分为图像预处理、边缘提取、道路跟踪和道路连接四个过程. 考虑到预处理可作为特征提取过程的一个环节, 而道路跟踪和道路连接之间的界限模糊, 因此, 本文将道路提取分为特征提取和道路连接两个过程. 特征提取过程利用辐射和几何特征寻找可能的道路点、线或区域, 它们被称为道路种子; 道路连接过程则依据几何、拓扑和背景特征, 利用假设、证实、最小化代价函数等策略, 连接道路种子构成道路网络.

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提取方法.

首先, 图像分辨率决定道路呈现的图像特征. 单个像素大于地面实际距离 2 米的图像为低分辨率图像[9], 此时道路呈现约 1 到 3 个像素宽度的线特征. 基于线特征检测的方法[1, 10−11] 适用于该分辨率下道路提取. 高分辨率图像中道路细节明显, 因此平行边缘检测、条带检测和道路截面分析成为道路提取的重要手段. 文献 [12] 在回顾道路提取方法时, 按照适于低分辨率图像和高分辨率图像的原则进行分类. 低分辨率图像下适用的方法包括模板匹配、动态规划、图像梯度方法; 高分辨率下适用的方法包括道路跟踪和 Snake 方法.

是否有人工参与道路提取也是分类的重要依据. 人工参与道路提取的方式包括标记道路点、交叉点和典型道路区域等. 人工参与的道路提取被称为半自动道路提取, 全自动道路提取无需人工干预. 综述文献 [5, 13] 依据该原则将道路提取方法分为自动和半自动两类.

道路图像的成像方式除了光学成像外, 还有红外成像、合成孔径雷达成像、激光雷达成像[3] 等. 成像方式影响着特征提取算法. 光学图像中噪声是加性的, SAR 图像中噪声是乘性的, 两类图像的中的边缘提取算法也不相同[14−16].

更多的学者还是依据所涉及的图像处理方法对道路提取进行分类. 如文献 [3] 将道路提取方法分为道路跟踪方法、形态学和滤波方法、Snake 和动态

规划方法、聚类和区域分割方法、多尺度和多分辨方法.

## 3 道路图像特征在自动道路提取中的应用

### 3.1 辐射特征

辐射特征是最基本的道路图像特征. 以灰度图像为例, 有的道路提取方法计算道路灰度的统计特征, 有的计算灰度的梯度, 有的用到灰度的二阶导数. 因此, 又可按照统计特征、图像梯度和图像二阶导数三个层次介绍辐射特征在道路提取中的应用.

#### 3.1.1 图像的统计特征

1) 区域分割. 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 [17] 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 [2] 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 $R_2$ 和 $R_1$ 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 [18−20] 采用自适应聚类算法 (Iterative self-organizing data analysis, ISODATA) 分割图像区域. 选取的特征分量为 HIS 空间的 S 分量、RGB 空间的 $(\mathrm{G}-\mathrm{R})/(\mathrm{G}+\mathrm{R})$ 分量和亮度. ISODATA 算法在迭代过程中根据类中各成员的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[21−23] 和遗传算法[24] 在道路区域分割中也有应用.

形态学方法也被用于提取道路. 文献 [9] 利用形态学分水岭方法分割图像中的道路区域. 文献 [3] 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 [20, 25−26] 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. 模板匹配通过计算图像和道路模板间的相似程度提取图像中的道路种子. 相似度函数选择常用的归一化相关系数或者绝对差[27]. Bajcsy 最早提出了适于低分辨率图像的道路提取方法[28]. 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. 模板匹配的最典型的应用是道路跟踪方法[29]. 以当前道路点的一维道路剖面为匹配模板, 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. 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[30], 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.

3) Hough 直线检测. 道路在低分辨图像中呈现较平直的线特征. 因此, 直线检测可用于道路提取. 直接对整幅图像进行 Hough 变换, 只能提取长度较长且平直的道路线. 文献 [31] 采用滑动框 Hough 变换, 将图像均匀分割成多个子图像, 每个子图像进行 Hough 变换, 得到该区域内直线段. 再将相邻子图像的同一直线段连接成完整的道路曲线. 该方法对较短和弯曲道路线的检测效果更好. 文献 [32] 采用类似 Hough 直线检测的方法, 根据道路线和背景反差大、道路区域内灰度一致的特点, 将像素灰度标准差和边缘梯度矢量两项统计特征映射到距离 – 角度空间, 并根据其在空间的峰谷分布规律提取道路线.

#### 3.1.2 图像的梯度

1) 边缘提取. 边缘检测是图像处理的基本方法, 也是许多道路提取方法的重要步骤. 光学图像中的白噪声是加性的, 常见的 Canny 边缘检测方法和梯度算子在光学图像中提取边缘效果良好, 但在 SAR 图像中会产生大量错误提取. 这是由于雷达波的相干特性, 使得 SAR 图像存在较强的斑点噪声, 该噪声为乘性的伽马分布随机噪声. 因此, 应用于 SAR 图像中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[33]. 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, 并和阈值比较以确定图像边缘. 该算子的性能与阈值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, 但也造成细节丢失. 指数加权均值比算子 (Ration of exponentially weighted averages, ROEWA) 可有效改善该问题[33].

基于小波的图像处理算法可以突出道路边缘. 文献 [34] 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 [35] 利用 Matlab 的小波工具箱实现半自动道路提取. 实验对比了 Haar,

Daubechies, Coiflets 和 Symlets 小波函数后发现, Coiflets 小波函数提取道路边缘效果较好. 文献 [36] 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.

2) Snake 方法. 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[37], Ziplock snake[38] 和 Quadratic snake 方法[39]. 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. 总之, Snake 方法同时利用了道路的几何和辐射特征, 但和图像梯度对应的能量项起主要作用, 因此将之归于辐射特征的图像梯度应用类.

设封闭或开放的轮廓为

$$v(s) = (x(s), y(s)), \quad s \in [0, 1] \tag{2}$$

其中, $x(s)$, $y(s)$ 表示轮廓点迹在图像中的坐标, $s$ 为相对弧长. 轮廓的能量为内部能量、图像能量和外部能量之和, 即

$$E_{\text{snake}}(v(s)) = E_{\text{img}}(v(s)) + E_{\text{int}}(v(s)) + E_{\text{ext}}(v(s)) \tag{3}$$

内部能量反映曲线的几何特征. 定义内部能量

$$E_{\text{int}}(v(s)) = \frac{1}{2}\int_0^1 \left[ a(s)\left|\frac{\mathrm{d}v(s)}{\mathrm{d}s}\right|^2 + \beta(s)\left|\frac{\mathrm{d}^2 v(s)}{\mathrm{d}s}\right|^2 \right] \mathrm{d}s \tag{4}$$

其中, $\left|\dfrac{\mathrm{d}v(s)}{\mathrm{d}s}\right|^2$ 项描述了轮廓的刚度, 该项的减小试图使轮廓趋于平直. $\left|\dfrac{\mathrm{d}^2 v(s)}{\mathrm{d}s}\right|^2$ 项描述轮廓的张力, 该项的减小会消除轮廓尖锐的凸凹处, 使轮廓均匀弯曲. $a(s)$、$\beta(s)$ 为调节轮廓刚度和张力的权值. 上述两项对轮廓有不同的平滑作用.

图像能量 $E_{\text{img}}$ 和轮廓位置处的灰度有关, 定义图像能量

$$E_{\text{img}}(v(s)) = -\int_0^1 P(v(s))\mathrm{d}s \tag{5}$$

其中, $P(v(s))$ 称为图像力. 最小化图像能量等同于最大化轮廓所在位置的图像力. 为了寻找明亮或黑暗的位置, 可令 $P(v(s)) = \pm|I(v(s))|$; 为了寻找图像的边缘特征, 可令 $P(v(s)) = |\nabla I(v(s))|$.

Ribbon snake[37] 方法将道路的双边缘梯度约束应用于 Snake 模型. 定义图像力

$$P(v(s)) = (\nabla I(v_L(s)) - \nabla I(v_R(s))) \cdot (n(s)) \tag{6}$$

式中各项定义如图 1 所示. 其中, $v(s)$ 为道路中心线, $v_L(s)$ 和 $v_R(s)$ 分别为道路的左、右边界, $\nabla I$ 为图像梯度, $\boldsymbol{n}(s)$ 为垂直于道路方向的单位向量. 当 $v(s)$ 与道路中心吻合, 且道路区域的灰度高于背景时, $\nabla I(v_L(s)) - \nabla I(v_R(s))$ 最大, 并和 $\boldsymbol{n}(s)$ 方向相同, 由此 $P(v(s))$ 取得最大值.

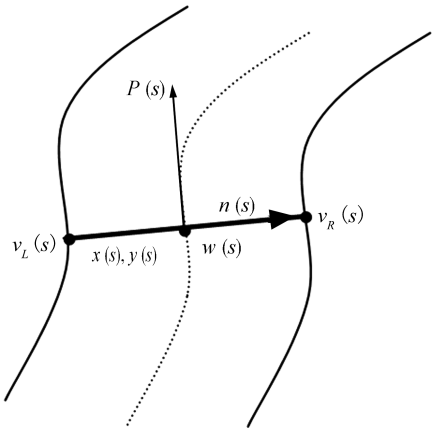



图 1　Ribbon snake 方法示意图

Fig. 1　Schematic diagram of ribbon snake

文献 [12] 采用 Ziplock snake 方法提取道路轮廓. 传统 Snake 方法在迭代过程中, 轮廓各点处的图像力一起作用, 影响轮廓形变. 而 Ziplock snake 将一条非闭合轮廓分为三段: 两头的主动轮廓段和中间一段被动轮廓段, 如图 2 (a) 所示. 计算时只计入两端主动轮廓段的图像力, 且图像力是从轮廓的两端向中间依次释放的. Ziplock 提取道路的方法为先确定位于道路边缘上的两个端点, 并由连接两端点的直线段初始化一条轮廓, 利用上述方法迭代的轮廓将始终依附着道路边缘由两端向中间延伸, 并最终提取道路边缘. 图 2 (b) 和图 2 (c) 显示了 Ziplock snake 方法相对传统 Snake 方法的优势. 易见, Ziplock snake 不易受到图像中强图像力噪声的干扰.

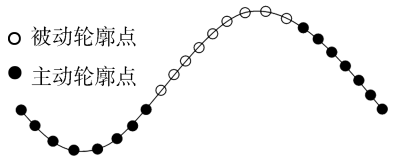
Marikhu 提出了应用于道路提取的 Quadratic snake 方法[39]. 与 Ribbon snake 和 Ziplock snake 相比, 其优点在于无需初始化轮廓, 但是计算量更大. 其轮廓的能量函数定义为

$$E(v(s)) = \int n\nabla I \mathrm{d}s - \lambda \int\int (tt')(\nabla I \nabla I')\psi\left(\|v(s) - v(s')\|\right)\mathrm{d}s\mathrm{d}s' \tag{7}$$

其中, $t$ 为曲线的斜率, $\|v(s) - v(s')\|$ 为轮廓上两点间的欧氏距离, $\boldsymbol{n}$ 为轮廓外法向. 函数 $\psi$ 定义为

$$\psi(x)=\begin{cases}1, & x<d-\varepsilon\\ 0, & x>d+\varepsilon\\ \dfrac{1}{2}\left[\dfrac{\varepsilon-x-d}{\varepsilon}-\dfrac{1}{\pi}\sin\left(\pi\dfrac{x-d}{\varepsilon}\right)\right], & d-\varepsilon\le x\le d+\varepsilon\end{cases} \tag{8}$$

其中, $d$ 为道路的平均宽度, $\varepsilon$ 反映道路宽度的变化范围. 当轮廓的外法向和图像梯度方向相反时, 轮廓能量的第一项最最小; 当轮廓中存在相距约为 $d$、反向平行且图像梯度值较大的点时, 轮廓能量的第二项最小. 显然, 道路的平行边缘特征符合上述描述, 因此该能量函数的最小化使轮廓寻找到道路边界.




(a) Ziplock snake 方法示意图

(a) Schematic diagram of ziplock snake

(b) 传统 Snake 方法提取效果

(b) Extraction effect of traditional snake

(c) Ziplock snake 方法提取效果

(c) Extraction effect of ziplock snake

图 2 Ziplock snake 方法示意图和提取效果对比

Fig. 2 Schematic diagram of ziplock snake and result comparison

### 3.1.3 图像的二阶导数

Steger 在文献 [6, 40] 中结合道路提取应用, 系统地提出了基于图像二阶导数的条带中心线检测方法. 以一维条带特征为例, Steger 证明当采用参数 $\sigma \ge w/\sqrt{3}$ 的高斯算子对图像进行滤波后, 条带中心位置对应曲线一阶导数的零点、二阶导数绝对值的最大值点. $w$ 为条带宽度. 道路是二维条带特征, 设与道路方向相垂直方向单位向量为 $\boldsymbol{n}$, 道路中心位置对应于 $\boldsymbol{n}$ 方向上图像一阶导数零点和二阶导数绝对值最大值点. 且当道路灰度大于背景, 二阶导数取极大值; 当道路灰度低于背景, 二阶导数取最小值. 对于离散的二维图像, Steger 进一步推导出道路中心点 $(p_x, p_y)$ 需满足

$$(p_x,p_y)=\left(-\frac{r_x n_x^2+r_y n_x n_y}{r_{xx}n_x^2+2r_{xy}n_x n_y+r_{yy}n_y^2},\right.$$
$$\left.-\frac{r_y n_y^2+r_x n_x n_y}{r_{xx}n_x^2+2r_{xy}n_x n_y+r_{yy}n_y^2}\right)$$
$$\in([-0.5,0.5],[-0.5,0.5]) \tag{9}$$

其中, $n_x$, $n_y$ 为 $\boldsymbol{n}$ 在 $x$, $y$ 轴向的分量, 由 Hessian 矩阵的最大特征值所对应的特征向量确定; $r_x$, $r_y$, $r_{xx}$, $r_{yy}$, $r_{xy}$ 为图像的一阶、二阶偏导数. 图 3 举例说明了该方法的提取效果. 由于其良好而稳定的提取效果, Steger 的方法被其他道路提取方法利用, 作为下一步精确提取的输入. 如文献 [12] 以 Steger 方法提取的道路中心线为初始轮廓, 结合 Ribbon snake 方法提取道路线和轮廓.

图 3 Steger 的道路中心线提取方法提取效果示例

Fig. 3 Example of Steger′s road extraction effect

## 3.2 几何特征

特征提取和道路连接过程均有可能利用道路图像的几何特征. 因此, 按照几何特征在道路提取过程中的不同应用分别予以介绍.

### 3.2.1 几何特征应用于道路特征提取过程

#### 3.2.1.1 平行双边缘

相距一定宽度的平行双边缘是道路最重要的几何特征. 寻找符合宽度要求的平行双边缘, 是该类道路提取方法的重要环节. 文献 [2] 将提取的边缘模型化为直线段, 确定线段的长度、方向、位置等属性. 由于线段越长, 方向的计算值越准确, 因此, 判断两线段平行的容差随线段长度的缩短而放宽. 选取 $a=\tau+\omega\tau/\max(l_1,l_2)$ 为判断两线段平行的角

度阈值, $l_1, l_2$ 为线段长度, $\tau$ 为设定的角度差阈值, $\omega$ 为随线段长度调节的权值. 道路片段的双边缘不但平行且应重叠, 并间隔约为道路宽度的距离. 将一线段投影至另一线段上, 若存在重叠区域, 则说明两线段可重叠; 求其中一线段两端点至另一线段的距离, 以判断两线段相距是否符合道路宽度要求. 为进一步验证平行双边缘是否为道路边缘, 可利用道路路面灰度的一致性加以证实. 在平行双边缘包含的区域内, 于多处截取道路剖面切片, 若切片灰度的方差在一定范围内, 则可证实道路的存在.

#### 3.2.1.2 模型匹配

文献 [18, 41] 分别利用道路交叉点和道路的形状特征, 构建参数模型和匹配函数, 通过寻找匹配函数的极值检测道路. 文献 [18] 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 形或星型形状的道路交叉口蒙版, 其实质为一个和形状参数有关的模型. 用蒙版模型覆盖二值道路图像, 并调整模型的位置、宽度和方向等参数, 直到得到一组使蒙版覆盖的道路区域超过一定阈值的参数, 也即匹配函数值超过阈值. 该组参数即对应道路交叉点位置、形状和宽度. 为减小计算量, 可采用由粗到精的匹配方法. 文献 [41] 采用同样的方法, 将平直道路区域模型化为一定长度、宽度和方向的长矩形模型, 构造相应的匹配函数, 通过寻找匹配最佳的矩形确定道路区域.

### 3.2.2　几何特征应用于道路连接过程

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 [6] 提取的道路中心线, 包含了道路中心点的位置、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起始道路连接, 根据道路弯曲程度有限原则限制搜索范围, 即下一道路点应当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 $a_1$, 下一个道路点位置为 $p_2$, 道路方向为 $a_2$, 则两道路点距离为 $d = |p_1 - p_2|$, 道路的方向偏转为 $\beta = |a_1 - a_2|$. 在 $p_1$ 沿 $a_1$ 方向的邻域内寻找下一个道路点使 $d + \beta$ 最小, 且 $\beta \in [0, \pi/2]$. 搜索的终止条件为邻域内已无法找到道路强度高于低阈值的道路点, 或找到的下一道路点发生重复, 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, 则继续以之为起点开始道路连接过程.

道路跟踪方法[29] 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断的两个端点, 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. 下一道路点状态的一步预测方程为

$$\begin{bmatrix} r_{t+1|t} \\ c_{t+1|t} \\ \phi_{t+1|t} \\ \dot{\phi}_{t+1|t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_t + \cos\phi_t + \dfrac{\dot{\phi}}{2}\mathrm{d}t \\ c_t + \sin\dfrac{\dot{\phi}}{2}\mathrm{d}t \\ \phi_t + \dot{\phi}\mathrm{d}t \\ \dot{\phi}_{t+1} \end{bmatrix} \tag{10}$$

其中, 状态量 $r, c, \phi, \dot{\phi}$ 分别表示道路点在图像中的坐标、方向和方向变化率. 截取预测道路点横截面上的图像, 并和模板进行匹配, 得到最佳匹配位置在道路垂直方向上的位移 $s$, 则道路位置的估计值为

$$\begin{bmatrix} r_{t+1} \\ c_{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{t+1|t} - s\sin\phi_{t+1|t} \\ c_{t+1|t} - s\cos\phi_{t+1|t} \end{bmatrix} \tag{11}$$

图 4 是道路跟踪方法提取某段道路的示例.

图 4　基于道路剖面相关性的道路跟踪方法示例

Fig. 4　Demonstration of road tracking method based on road profile correlation

除了基于道路剖面相关性的道路跟踪方法, Mckeown 提出基于道路边缘连续性的道路跟踪方法[42]. 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 [42] 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.

## 3.3　拓扑特征

道路网络是由道路线和交叉点组成的连通网络, 这是道路的拓扑特征. 文献 [34] 利用该特征提出了基于动态规划的半自动道路提取方法, 图 5 说明了该过程. 由手动方式输入道路节点位置, 以直线连接道路节点, 作为最初的道路网络. 构造与道路路径 $(p_1, p_2, \cdots, p_n)$ 相关的业绩函数 $E = \sum_{i=1}^{n-1} E(p_i, p_{i+1})$. 从道路点 $p_i$ 到 $p_{i+1}$ 的业绩函数定义为

$$E(p_i,p_{i+1})=[E_1(p_i,p_{i+1})-\beta\times E_2(p_i,p_{i+1})+\gamma\times E_3(p_i,p_{i+1})]\times\frac{1+\cos(a_i-a_{i+1})}{\triangle s_i}\quad(12)$$

其中, $E_1(p_i,p_{i+1})$ 是沿向量 $\boldsymbol{p}_i\boldsymbol{p}_{i+1}$ 的灰度累加, 它反映了道路区域灰度较背景明亮的特性; $E_2(p_i,p_{i+1})$ 是沿向量 $\boldsymbol{p}_i\boldsymbol{p}_{i+1}$ 的灰度均方差累加, 它反映了道路区域灰度的一致性; $a_i$, $\triangle s_i$ 为向量 $\boldsymbol{p}_i\boldsymbol{p}_{i+1}$ 的角度和长度, $\beta$, $\gamma$ 为权重.

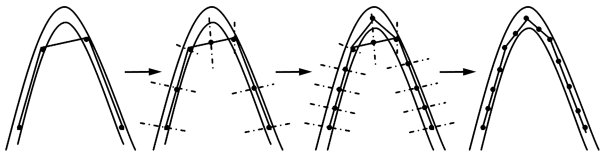


图 5 基于动态规划的道路提取方法原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of road extraction method based on dynamic programming

在路径 $(p_1,p_2,\cdots,p_n)$ 连线的中点上插入新道路点. 新插入的道路点在垂直于道路线的方向上可移动一定范围, 不同的插入位置对应不同路径. 采用动态规划方法计算从 $p_1$ 到 $p_n$ 点沿不同路径的业绩函数, 由业绩函数最大路径确定插入道路点的位置. 按上述方法不断插入新道路点, 直到得到足够平滑的道路曲线.

在文献 [34] 的基础上, 文献 [43] 在业绩函数中增加 $E_4(p_i,p_{i+1},w_{i+1})$ 项. 该项为 $p_{i+1}$ 处沿 $\boldsymbol{p}_i\boldsymbol{p}_{i+1}$ 的法向, 向两侧延伸 $w_{i+1}$ 距离处的灰度梯度, $w_{i+1}$ 为道路半宽度. 其实质是在业绩函数中引入道路双边缘特征. 该方法使得动态规划方法在高分辨率图像的应用中也能取得良好效果.

文献 [18] 同样利用道路的拓扑特征提取道路. 先提取道路交叉点, 从道路交叉点的道路分支上截取图像块作为匹配模板. 以道路交叉点为道路连接的起点, 利用模板匹配方法沿道路方向搜索并连接道路, 直至抵达另一道路交叉点或图像边界.

### 3.4 背景特征

随着自动道路提取研究的不断深入, 研究者意识到由于道路提取问题的复杂性, 很难完全依靠图像特征准确且完备地提取道路. 在图像特征的证据不充分时, 可以利用道路的背景特征改善道路提取的效果.

背景特征反映了道路和道路所处环境间的关系. 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 [9] 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: 市区背景、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, 启发道路提取过程. 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区域强行连接距离较近的道路断点.

文献 [44] 经分析认为, 影响可靠道路提取的主要因素包括: 城市、森林、树木、低对比度、较大的交通标志、桥、道路交叉. 上述因素除了低对比度外, 其余均可以纳入全局 (城市、森林) 或局部 (树木、交通标志、桥、道路交叉) 背景. 因此, 根据不同局部背景, 赋予道路种子不同的权值, 该权值反映了道路存在可能性. 并依据权值大小搜索和连接道路. 试验对比证明, 利用背景信息提高了道路提取的完整性和正确性.

文献 [45] 借助地理信息系统中关于景物的语意描述, 挖掘全局背景知识. 根据全局背景的类别: 开阔地区域、农作物区域、草地区域和聚居区域, 选择不同的道路提取参数. 这些参数包括: 道路灰度阈值, 道路线宽度和道路平均长度等. 文献 [46] 采用贝叶斯方法并引入背景信息提取 SAR 图像中的道路. 道路长度和曲率在不同背景下有不同的概率分布. 特征提取后得到图像中的线特征, 采用贝叶斯方法计算线特征的可分辨因子, 因子越大则线特征为道路的可能性越大. 从图像中可分辨因子最大的线特征开始道路连接, 并试图连接周围可分辨因子较大的线特征. 文献 [47] 将道路背景特征分为三类: 与道路所在环境相关的信息、与道路现实特征有关的信息和道路与周围地物的关联信息. 并举例说明背景特征在道路提取中的应用方式主要为三类: 连接断裂道路、排除非道路区域和验证道路存在.

虽然已有较多关于背景特征应用的文献, 其中涉及语义网络[48]、规则推理[49] 和知识系统[50] 等智能方法. 但是背景特征的提取和应用仍是该领域的难点和前沿.

## 4 自动道路提取方法的评估

为评价道路提取方法的效果, 需要建立有效的评估准则和方法. 文献 [51−53] 对道路提取方法的评估进行了研究, 并比较了若干道路提取方法. 文献 [53] 详细介绍了评估方法和衡量指标. 评估一般分两步: 首先将提取道路与参考道路 (即正确的道路)

进行匹配; 根据匹配结果评估道路提取效果.

匹配是为了将提取道路和参考道路对齐, 为评估提供依据. 参考道路来源于人工提取的结果或已有的地理信息数据. 以参考道路的中心线为轴, 某一宽度为容差范围, 构建一个匹配区域, 提取道路在该范围内, 则认为参考道路和提取道路相匹配.

效果评估可分为三项内容: 道路位置评估、拓扑结构评估、道路交叉点评估. 道路位置评估的指标包括完整性、正确性、道路位置均方差和分叉系数; 拓扑结构评估的指标包括拓扑结构完整性、拓扑结构正确性; 道路交叉点评估指标包括交叉点完整性、交叉点正确性和交叉点位置的均方差. 具体定义如下.

1) 道路位置评估指标

完整性 = 正确匹配的参考道路长度/参考道路长度;

正确性 = 正确匹配的提取道路长度/提取道路长度;

道路位置均方差 = 正确匹配的道路位置和参考道路位置之差的均方根;

分叉系数 = 未正确匹配的提取道路长度/正确匹配的提取道路长度.

2) 拓扑结构评估指标

在参考道路网络中寻找道路中的节点，相连通节点的节点对数量为 CR;

在提取的道路网络中寻找道路节点，相连通的节点对数量为 CE;

在提取的道路网络中寻找正确的道路节点，相连通的节点对数量为 CB;

拓扑结构正确性 = CB/CE;

拓扑结构完整性 = CB/CR.

3) 道路交叉点评估指标

完整性 = 正确匹配的参考道路交叉点数目/参考道路交叉点数目;

正确性 = 正确匹配的提取道路交叉点数目/提取的道路交叉点数目;

道路交叉点位置均方差 = 正确匹配的道路交叉点位置和参考道路交叉点位置之差的均方根.

通常, 计算道路位置的完整性、正确性和道路位置均方差足已反映道路提取的质量. 还可将道路提取的计算量或计算时间列入评估标准.

## 5 自动道路提取应用软件和遥感图像片源

专业的遥感图像处理软件一般都具有地物分析和提取功能, 可以实现道路提取. Visual Learning Systems 公司开发的 Feature analyst 和 Definiens 公司开发的 eCognition 是当前主流的地理影像分析软件. 文献 [54] 详细介绍了 Feature analyst 软件基于样本学习提取道路的原理和方法. 用户设定需要学习的地物类型和学习参数, 并在图像中选取学习样本. 程序提取近似样本的图像特征. 如果提取的结果不满意, 可以人工添加漏检的图像特征或删除虚检的图像区域. 程序将自动更新样本、继续学习、重新提取, 反复上述过程直到得到满意的提取结果

可嵌入 Feature analyst 的 Road tracker 软件是 GeoEye 公司开发的专业道路提取工具. 用户自由输入道路点, 程序将自动连接这些道路点, 并可延伸至与之相连通的其他道路. 它虽然采用了半自动道路提取方法, 但由于交互界面简单快捷, 自动化、智能化程度高, 因而有极高的提取效率. 它还可以自行完成道路交叉点的提取和道路网络的矢量化.

eCognition 软件采用面向对象的分类方法提取地物. 程序依据不同地物的谱特征和形状特征建立知识库, 并采用多种分类算法提取用户指定的地物特征. ORFOE toolbox 是法国太空研究中心开发的地理图像分析软件. 它囊括了大量图像处理算法, 并有基于图像梯度的道路提取工具[55]. 还有一些道路提取方法的研究成果, 可从网上获取示例程序或源代码, 如基于 Quadratic snake 的道路提取方法[56].

遥感卫星为道路提取的研究提供了丰富的图像片源. 常见的图像片源有 Spot 机构发布的 SPOT 影像. SPOT5 观测卫星可提供 2.5 m～5 m 分辨率的全彩色图像和 10 m 分辨率的多谱图像. GeoEye 公司发布有 1 m 分辨率 IKONOS 全彩色和多谱图像. QuickBird 提供 0.61 m 分辨率的黑白影像和 2.44 m 分辨率的多谱影像. USGS 发布的 LandSat 7 卫星拍摄的 15 m 分辨率全彩色图像, 在 Google earth 影像中占的比例最大. 德国 TerraSAR-X 地球观测卫星可提供 X 波段地表 SAR 成像图片. 以上各类型图像均可由互联网获得免费示例图片.

## 6 自动道路提取技术的发展方向

### 6.1 多谱图像

遥感卫星携带的成像传感器工作在多个波段, 可提供多谱高分辨的卫星图像, 如 IKONOS 和 Quickbird 都提供四个波段的多谱图像. 文献 [57] 在多谱图像的各通道单独进行道路特征提取, 经多通道特征融合, 道路特征提取的可靠性得到提高. 文献 [55] 提出了计算谱角度的方法. 该方法可将多谱段的图像转换成灰度图像. 无论是较背景明亮还是较背景灰暗的道路, 在转换后都将呈现局部暗特征, 这为提取不同亮度的道路提供了方便. 文献 [58] 的道路提取利用了配准的 SAR 图像和多谱图像. 它将道路在多谱图像中的光谱和纹理特征与其在 SAR 图像中的后向散射特性及空间自相关尺度进行融合,

实现道路的半自动提取. 不同频段、不同类型目标的反射特性存在差异, 融合各频段特征的图像处理方法可提供更多的地物信息. 因此, 多谱图像的道路提取研究将日益受到重视.

### 6.2 高分辨率图像的多分辨率处理

高分辨率图像虽然提供了更多的细节, 却也不可避免地放大了噪声的影响. 由于细节特征多, 特征的计算和提取也更加复杂. 低分辨率图像虽然丢失了细节, 却恰是对道路特征的进一步的抽象[12], 突出了道路图像特征. 因此, 高低分辨相结合的道路提取方法成为改善道路提取效果的重要手段[9−10, 59]. 高分辨率图像间隔采样得到低分辨率图像, 采用不同方法对高低分辨的两幅图像提取道路, 两种方法提取的结果互相补充、互为证据、进行融合, 可以有效提高道路提取的完整性和正确性.

### 6.3 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[59−60]. 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.

### 6.4 面向对象的道路提取方法

面向对象的图像分析技术已应用于遥感图像处理. 遥感图像处理软件 eCognition 和 Feature analyst 都不同程度采用了面向对象的思想[61]. 和以前基于单一像元的处理方法不同, 面向对象的方法同时利用对象的光谱、纹理、形状特征以及对象和邻近对象、父对象和子对象间的关联, 这些信息被纳入知识库. 利用知识和规则, 基于模糊推理、语义网络等智能方法融合多特征, 产生推理结果. 文献 [62] 提出了面向对象的道路提取方法. 将图像分割成若干同质的分块. 分块有不同的长度, 但具有相似的宽度、光谱和纹理. 根据这些分块的光谱、纹理、形状特征和空间位置构建道路特征知识库, 通过规则连接分块实现道路提取. 面向对象的方法引入了道路的几何和空间特征, 可以有效利用背景特征, 有助于建立可靠、智能的自动道路提取系统.

## 7 结论

道路的图像特征可分为辐射特征、几何特征、拓扑特征和背景特征四个层次, 道路提取可分为道路特征提取和道路连接两个过程. 具体到不同道路提取方法, 道路图像特征在道路提取中的作用不同. 一般来说, 特征提取过程主要基于辐射特征和几何特征; 而几何特征、拓扑特征和背景特征则在道路连接过程中发挥重要作用. 高分辨、多频谱的道路图像已成为主要研究对象, 面向对象的图像分析技术将发挥更大作用. 自动道路提取技术也将和地理信息系统的应用紧密的结合, 并向更加自动化、智能化的方向发展.

## References


1 Fortier M F A, Ziou D, Armenakis C, Wang S. Survey of Work on Road Extraction in Aerial and Satellite Images, Technical Report No. 241, University of Sherbrooke, Canada, 2000

2 Steger C, Glock C, Eckstein W, Mayer H, Radig B. Model-based road extraction from images. In: Proceedings of the International Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. Basel, Schweiz: Springer, 1995. 275−284

3 Mena J B. State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification. *Pattern Recognition Letters*, 2003, **24**(16): 3037−3058

4 Li Guang-Yao, Hu Yang. Road feature extraction from high resolution remote sensing images: review and prospects. *Remote Sensing Information*, 2008, **2008**(1): 91−95
(李光耀, 胡阳. 高分辨率遥感影像道路提取技术研究与展望. 遥感信息, 2008, **2008**(1): 91−95)

5 Li Wei. Road extraction from remote sensing images. *Automation Panorama*, 2006, **23**(5): 20−23
(李伟. 遥感图像中的道路提取. 自动化博览, 2006, **23**(5): 20−23)

6 Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **20**(2): 113−125

7 Liu L, Zhang D, You J. Detecting wide lines using isotropic nonlinear filtering. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, **16**(6): 1584−1595

8 Ravanbakhsh M, Heipke C, Pakzad K. Road junction extraction from high resolution aerial images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2007, **36**(3): 131−138

9 Baugartner A, Steger C T, Mayer H, Eckstein W. Semantic objects and context for finding roads. In: Proceedings of the Conference on Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision III. Orlando, USA: SPIE, 1997. 98−109

10 Destival I, Men L H. Detection of linear networks on satellite images. In: Proceedings of the 8th International Conference on Pattern Recognition. Paris, France: IEEE, 1986. 856−858

11 Fischler M A, Tenenbaum J M, Wolf H C. Detection of roads and linear structures in low resolution aerial images using multi-source knowledge integration techniques. *Computer Graphics and Image Processing*, 1981, **15**(3): 201−223

12 Leptev I. Road Extraction Based on Line Extraction and Snakes, Technical Report, Computational Vision and Active Perception Lab, Royal Institute of Technology, Sweden, 1997

13 Shi Wen-Zhong, Zhu Chang-Qing, Wang Yu. Road feature extraction from remotely sensed image: review and prospects. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2001, **30**(3): 257−262
(史文中, 朱长青, 王昱. 从遥感影像提取道路特征的方法综述与展望. 测绘学报, 2001, **30**(3): 257−262)

14 Touzi R, Lopes A, Bousquet P. A statistical and geometrical edge detector for SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, **26**(6): 764−773

15 Adair M, Guindon B. Statistical edge detection operators for linear feature extraction in SAR images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1990, **16**(2): 10−19

16 Oliver C J. Edge detection in SAR segmentation. In: Proceedings of the Conference on SAR Data Processing for Rremote Sensing. Rome, Italy: SPIE, 1994. 80−91

17 Bajcsy R, Tavakoli M. Computer recognition of roads from satellite pictures. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1976, **6**(9): 623−637

18 Koutaki G, Uchimura K. Automatic road extraction based on cross detection in suburb. In: Proceedings of the Conference on Computational Imaging II. San Jose, USA: SPIE, 2004. 337−344

19 Zhang C S, Baltsavias E, Gruen A. Knowledge-based image analysis for 3D road reconstruction. In: Proceedings of the 21st Asian Conference on Remote Sensing. Taipei, China: Institute of Geodesy and Photogrammetry, 2000. 100−105

20 Zhang C S, Murai S J, Baltsavias E. Road network detection by mathematical morphology. In: Proceedings of ISPRS Workshop, 3D Geospatial Data Production: Meeting Application Requirements. Paris, France: ISPRS, 1999. 185−200

21 Bacher U, Mayer H. Fuzzy classification and ziplock snakes for road extraction from IKONOS images. In: Proceedings of ISPRS/EARSeL Joint Workshop on High Resolution Mapping from Space. Vienna, Austria: ISPRS, 2003. 29−34

22 Dell A F, Gamba P. Detection of urban structures in SAR images by robust fuzzy clustering algorithms: the example of street tracking. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, **39**(10): 2287−2297

23 Yang J F, Hao S S, Chung P C. Color image segmentation using fuzzy C-means and eigenspace projections. *Signal Processing*, 2002, **82**(3): 461−472

24 Xiao Zhi-Qiang, Bao Guang-Shu. Road extract ion in SAR images using genetic algorithm. *Journal of Image and Graphics*, 2004, **9**(1): 94−98
(肖志强, 鲍光淑. 基于 GA 的 SAR 图像中主干道路提取. 中国图象图形学报, 2004, **9**(1): 94−98)

25 Pan Jian-Ping, Wu Ming-Quan. Road detection based on morphology. *Computer Engineering and Applications*, 2008, **44**(11): 232−233
(潘建平, 邬明权. 基于数学形态学的道路提取. 计算机工程与应用, 2008, **44**(11): 232−233)

26 Zhu Chang-Qing, Wang Yao-Ge, Ma Qiu-He, Shi Wen-Zhong. Road extraction from high-resolution remotely sensed image based on morphological segmentation. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2004, **33**(4): 348−351
(朱长青, 王耀革, 马秋禾, 史文中. 基于形态分割的高分辨率遥感影像道路提取. 测绘学报, 2004, **33**(4): 348−351)

27 Brown L G. A survey of image registration techniques. *ACM Computing Surveys*, 1992, **24**(4): 325−376

28 Bajcsy R, Tavakoli M. Computer recognition of roads from satellite pictures. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1976, **6**(9):623−637

29 Vosselman G, Knecht J. Road tracking by profile matching and Kalman filtering. In: Proceedings of Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. Berlin, Germany: Birkhaeuser Verlag, 1995. 265−274

30 Rathinam S, Kim Z, Sengupta R. Vision-based monitoring of locally linear structures using an unmanned aerial vehicle. *Journal of Infrastructure Systems*, 2008, **14**(1): 52−63

31 Zhang Q P, Couloigner I. Comparing different localization approaches of the radon transform for road centerline extraction from classified satellite imagery. In: Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition. Hong Kong, China: IEEE, 2006. 138−141

32 Xie Feng-Ying, Jiang Zhi-Guo, Qing Shi-Yin. Road extraction from high-resolution remotely sensed image in dual space. *Journal of Astronauics*, 2006, **27**(5): 1034−1038
(谢凤英, 姜志国, 秦世引. 对偶空间上的高分辨率遥感影像道路提取. 宇航学报, 2006, **27**(5): 1034−1038)

33 Airouche M, Zelmat M, Kidouche M. Statistical edge detectors applied to SAR images. In: Proceedings of the International Conference on Computers, Communications and Control. Oradea, Romania: Agora University Publishing House, 2008. 144−149

34 Gruen A, Li H. Road extraction from aerial and satellite images by dynamic programming. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1995, **50**(4): 11−20

35 Zhou Chun, Wu Zhao-Cong, Qing Kun. Application of hybrid programming of VC and MATLAB in road extraction from remote sensing image. *Journal of Geomatics*, 2007, **32**(3): 8−10
(周春, 巫兆聪, 秦昆. VC 和 Matlab 混合编程应用于遥感影像道路的提取. 测绘信息与工程, 2007, **32**(3): 8−10)

36 Hu Ping-Guang, Zhang Ming-Cheng. Main road extraction from SAR images using filter team. *Computer Simulation*, 2007, **24**(3): 187−190
(胡平广, 张名成. 滤波器组实现 SAR 图像中主要道路提取. 计算机仿真, 2007, **24**(3): 187−190)

37 Fua P, Leclerc Y G. Model driven edge detection. *Maching Vision and Applications*, 1990, **3**(1): 45−56

38 Neuenschwander W M, Fua P, Iverson L, Szekely G, Kubler O. Ziplock snakes. *International Journal of Computer Vision*, 1997, **25**(3): 191−201

39 Marikhu R, Dailey M N, Makhanov S, Honda K. A family of quadratic snakes for road extraction. In: Proceedings of the 8th Asia Conference on Computer Vision. Tokyo, Japan: Springer, 2007. 85−94

40 Steger C. Extracting curvilinear structures: a differential geometric approach. In: Proceedings of the 4th European Conference on Computer Vision. Cambridge, UK: Springer, 1996. 630−641

41 Zhu Chang-Qing, Yang Yun, Zou Fang, Wang Qi-Sheng. Total rectangle matching approach to road extraction from high resolution remote sensing images. *Journal of Hua Zhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2008, **36**(2): 75−77
(朱长青, 杨云, 邹芳, 王奇胜. 高分辨率影像道路提取的整体矩形匹配方法. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2008, **36**(2): 75−77)

42 Mckeown D, Denlinger J. Cooperative method for road tracking in aerial imagery. In: Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washingtong D. C., USA: IEEE, 1988. 662−672

43 Dal Poz A P, do Vale G M. Dynamic programming approach for semi-automated road extraction from medium– and high-resolution images. *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003, **34**(3): 87−91

44 Wessel B, Wiedemann C, Ebner H. The role of context for road extraction from SAR imagery. In: Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, Germany: IEEE, 2003. 4025−4027

45 Butenuth M, Straub B M, Heipke C, Willrich F. Tree supported road extraction from arial images using global and local context knowledge. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Vision Systems. Graz, Austria: Springer, 2003. 162−171

46 Hedman K, Hinz S, Stilla U. Road extraction from SAR multi-aspect data supported by a statistical context-based fusion. In: Proceedings of the Conference on Urban Remote Sensing Joint Event. Munich, Germany: IEEE, 2007. 1−6

47 Ma Li, Chen Jun. Classification and application of context information in road extraction. *Geomatics World*, 2008, **6**(4): 58−60
(马力, 陈军. 上下文信息在道路提取中的分类与应用. 地理信息世界, 2008, **6**(4): 58−60)

48 Hinz S, Bumgartner A. Urban road net extraction integrating internal evaluation models. In: Proceedings of ISPRS Technical Commission III Symposium. Graz, Austria: ISPRS, 2002. 163−169

49 Straub B M, Weidemann C, Heipke C. Towards the automatic interpretation of images for GIS update. *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, 2002, **33**(2): 525−532

50 Cao W F, Qin Q M. A knowledge based research for road extraction from digital satellite images. *Acta Scientiarum Naturalium University Pekinensis*, 1998, **34**(2): 254−263

51 Heipke C, Mayer H, Wiedemann C, Jamet O. Evaluation of automatic road extraction. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1997, **32**(1): 47−56

52 Wiedemann C, Heipke C, Mayer H. Empirical evaluation of automatically extracted road axes. In: Proceedings of the IEEE Computer Society Workshop on Empirical Evaluation on Methods in Computer Vision. Washington D. C., USA: IEEE, 1998. 1−16

53 Wiedemann C. External evaluation of road networks. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003, **34**(3): 93−98

54 Visual Learning System. Quick start guide [Online], available: http://www.vls-inc.com/feature analyst/support/tutorial manuals/FAQSGuide 4.2 RdExtractWF 012309.pdf, August 1, 2009

55 Christophe E, Englada J. Robust road extraction for high resolution satellite images. In: Proceedings of the International Conference of Image Processing. Thessaloniki, Greece: IEEE, 2007. 437−440

56 Marikhu R. Quadratic snake program [Online], available: http://www.cs.ait.ac.th/m̃daily/papers/QuadraticSnake.tar.gz, December 10, 2009

57 Bacher U, Mayer H. Automatic road extraction from multi-spectral high-resolution satellite images. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2005, **36**(3): 29−34

58 Cao Guang-Zhen, Jin Ya-Qiu. Data fusion of multi-source remote sensing based on level set method and application to urban road extraction. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2007, **29**(6): 1465−1469
(曹广真, 金亚秋. 基于水平集方法的多源遥感数据融合及城区道路提取. 电子与信息学报, 2007, **29**(6): 1465−1469)

59 Baumgartner A, Steger C, Wiedemann C, Mayer H, Eckstein W, Ebner H. Update of roads in GIS from aerial imagery: verification and multi-resolution extraction. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1996, **31**(3): 53−58

60 Zhang Q P, Couloigner I. Automatic road change detection and GIS updating from high spatial remotely-sensed imagery. *Geo-spatial Information Science*, 2004, **7**(2): 89−95

61 Niu Chun-Ying, Jiang Wan-Shou, Huang Xian-Feng, Xie Jun-Feng. Analysis and comparison between two object-oriented information extraction software of Feature Analyst and eCognition. *Remote Sensing Information*, 2007, (2): 66−70
(牛春盈, 江万寿, 黄先锋, 谢俊峰. 面向对象影像信息提取软件 Feature Analyst 和 eCognition 的分析与比较. 遥感信息, 2007, (2): 66−70)

62 Tang Wei, Zhao Shu-He, Wang Pei-Fa. Object-oriented road information extraction from high resolution imagery. *Geo-Information Science*, 2008, **10**(2): 257−262
(唐伟, 赵书河, 王培法. 面向对象的高空间分辨率遥感影像道路信息的提取. 地球信息科学, 2008, **10**(2): 257−262)

**吴 亮** 海军航空工程学院控制工程系博士研究生. 2001 年获海军航空工程学院学士学位. 主要研究方向为图像处理和视觉导航. 本文通信作者.
E-mail: wulianghefei@163.com
(**WU Liang** Ph. D. candidate in the Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University. He received his bachelor degree from Naval Aeronautical and Astronautical University in 2001. His research interest covers image processing and vision navigation. Corresponding author of this paper.)

**胡云安** 海军航空工程学院控制工程系教授. 2004 年获哈尔滨工业大学电器工程及自动化学院博士学位. 主要研究方向为飞行器导航和控制系统设计.
E-mail: hya507@yahoo.com
(**HU Yun-An** Professor in the Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University. He received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2004. His research interest covers aircraft navigation and control system design.)