

基于数学形态学的道路遥感影像特征 提取及网络分析

安 如^{1),2)} 冯学智¹⁾ 王慧麟¹⁾

¹⁾(南京大学城市与资源学系, 南京 210093) ²⁾(河海大学水资源环境学院地理信息科学系, 南京 210098)

摘 要 如何从遥感图象上提取道路特征已有多种方法,如边缘探测与追踪、线性滤波、利用各种空间关系进行道路特征识别,基于知识的道路网络提取以及数学形态学等,但尚有许多问题有待解决。为了方便 GIS 应用以及地图更新,提出了一种基于数学形态学的道路网络分析方法,用于对遥感图象上已分类的道路信息进行各种处理,以获得所需的道路网络。该方法与步骤为首先将道路影像二值化,同时进行噪音去除、断线连接、细化,并通过将栅格数据转换成矢量形式来得到基本的道路网络;然后对基本道路网络进行分析、连接、选取;最后用 Douglas-Peucker 算法对道路进行平滑处理与表示来得到最终提取的道路网络,并以南京市江宁经济开发区 SPOT、高分辨率 IKONOS 图象为例进行了实验。道路特征提取的结果与目视解译结果进行比较的结果表明,该道路提取方法对道路发展相对较快的区域更为有效,且提取精度较高。该方法对土地管理规划部门非常有价值,是进行 GIS 与地图道路更新的有效方法。

关键词 计算机图象处理(520·6040) 道路特征提取 数学形态学 道路网络分析 遥感分类影像

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)07-0798-07

Road Feature Extraction from Remote Sensing Classified Imagery Based on Mathematical Morphology and Analysis of Road Networks

AN Ru^{1),2)}, FEN Xue-zhi¹⁾, WANG Hui-lin¹⁾

¹⁾(Department of Urban and Resources Science Nanjing University, Nanjing 210093)

²⁾(Geographical Information Science Department of Water Resource and Environment College HoHai University, Nanjing 210098)

Abstract A series researches have been made on how to extract road features from satellite data. The main Methods include edge detection and line finding, line filtering and using spatial relationships to extract road features. Another approach to the extraction of road networks involves the use of GIS and rule- and knowledge-based algorithms. Several workers have examined mathematical morphology as a means of extracting linear features from satellite data. However, many problems are still remained to solve. In this paper, algorithms of mathematical morphology and analysis of road networks are applied to extract road networks digitally from classified imagery to update digital databases and map. The first step involves road image two valued, removes noise data, break line connection, thin and raster convert to vector. The second is analysis the vector networks, connection and selection and eliminate the road arcs. Finally, the Douglas-Peucker algorism is used to smooth the road networks. The test area is Nanjing Jiangning County. The satellite data is SPOT multi-spectral image. IKONOS high-resolution image is tested too. The comparison is made between the results of the extracted road networks and visual interpretation from location accuracy and extraction accuracy. The results described here show that the technique appears to be most effective in areas of recent road development. It is very useful for land managing and planning and is an effective method to update GIS and map.

Keywords Road feature extraction, Mathematical morphology, Road networks analysis, Remote sensing classified image

0 引言

卫星遥感图象能够快速提供地球表面的信息。随着高分辨率卫星遥感技术的发展,已使其成为GIS(Geographic information system)数据库以及地图更新的重要信息源。由于道路光谱与空间特征随着道路的延伸而不断发生变化,因此道路遥感影像特征非常复杂。如今对道路特征的提取已出现了许多方法:主要有边缘探测与追踪、线性滤波、利用各种空间关系进行道路特征识别,基于知识的道路网络提取以及数学形态学方法等。但每种算法均有不同的缺陷。

Wang Jin-fei 对由 SPOT 图象提取到的道路网络用于更新城市边缘地理信息系统数据库进行了研究,文中使用方向梯度剖面分析算法来从 SPOT-PAN 数据中提取道路网络,并将提取的道路与目视判读的结果进行了对比^[1];Peter Doucette 等在遥感图象分类的基础上,提出了基于高分辨率遥感图象的半自动道路提取自组织聚类算法,该算法提供了一种高分辨率遥感图象道路中心线的建立方法,该方法不依赖于传统的边缘定义,并能充分利用多光谱图象的光谱信息^[2];Thierry Toutin 对雷达图象的道路立体制图的潜力进行了研究,对雷达图象用于平面几何特征,如道路的提取的潜力进行了探讨^[3];Rachida Jazoull 等对在采伐过的森林地区,将 SPOT-PAN 数字影像用于道路提取进行了评价^[4];Susan Benjamin 等以红外航空图象为实验数据,研究了以制图为目的的自动道路提取和对影像空间分辨率的要求^[5]。

史文中等对道路遥感影像特征提取的方法进行了总结与展望,认为具有代表性的道路特征提取方法主要有基于像素与背景的算子模型、基于树结构的特征判别模型、基于最小二乘法的 B 样条曲线、基于类与模糊集的半自动道路提取方法以及基于平行线对、基于二值化和知识、基于窗口模型特征等的自动道路提取方法^[6]。高芳琴,吴健平对计算机自动识别提取红外航空图象中的城市道路进行了研究,其道路信息的自动识别提取过程为:首先利用光谱分类方法对道路信息进行初步提取,然后对初步提取的道路信息进行上下文处理,即对图象中的每个像素取一定邻域范围来加权统计邻域中道路像素的出现频率,若出现频率大于某阈值(经验值),则将

中心像素判为道路,并认为基于邻域的上下文处理运算速度极快,效果直接有效;最后,用形状指数来剔除非道路信息。该文未对如何剔除与道路粘连的面状非道路信息提出方法,然而在基于光谱特征的分类中,道路与居民地信息混杂是常见情形^[7]。

经分析发现,尽管道路特征提取已取得了不少的研究成果,但与实际应用的要求还相差较远^[1],其主要表现为提取的自动化程度、算法的速度、适用性、准确性等方面还不尽如人意,还有许多问题有待研究解决。

数学形态学是一门新兴的图象分析学科,由于其是一种研究数字影像形态结构特征与快速并行处理的方法,具有算法简单、可并行处理、速度快、易于硬件实现等特点,因此其在图象处理、医学以及模式识别等方面得到了广泛的应用,并取得了丰硕的成果。数学形态学的主要内容是设计一套变换(运算)概念和算法,用以描述图象的基本特征。该数学工具不同于常用的频域方法,而是建立在积分几何以及随机集论基础之上的方法^[8,9],为此,本文将其用于道路影像特征提取。

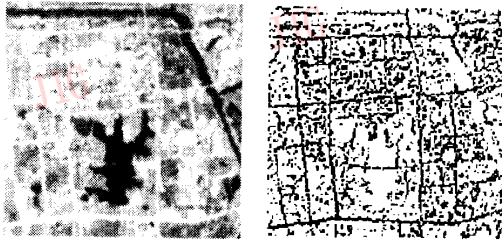
数学形态学方法在扫描地图信息识别与提取中也得到了较好的应用,如 Ansoult 等利用数学形态学方法进行了 GIS 专题图数据的采集^[10];陈晓勇、李德仁将数学形态学方法应用于 CCD 扫描等高线图的自动矢量化和数字高程模型(Digital elevation model, DEM)的建立^[11,12];盛业华等用数学形态学方法进行了矿图扫描图象的地图信息提取,对去除图象的噪声、图象的细化以及跟踪矢量化进行了深入的研究,并得出了有益的结论^[13];郝向阳亦用数学形态学方法对地图信息的识别与提取进行了研究^[14]。这些研究成果均对基于数学形态学的道路遥感影像特征提取有所启迪和帮助。

本文以南京市江宁经济开发区中的某一局部地区的 SPOT 图象为例,对文中方法进行了实验,并给出了各处理阶段的实验结果图象。对高分辨率 IKONOS 图象也做了实验,结论是一致的。应用该方法提取道路,好的道路分类方法是前提,其中噪声去除以及道路网络分析是该方法的核心。

1 基于数学形态学的道路影像特征提取方法与特点

根据光谱特征从遥感图象中(图 1(a))自动提

取的水系、道路、居民地等专题信息,如不加处理,很难直接用于 GIS 系统和地图更新.由于提取到的影像信息,因各种各样的原因而使道路光谱值的一致性与连贯性随道路的延伸而发生变化,并搀杂很多噪声(如居民地信息),因此道路存在断线以及道路边沿存在小凹坑、小凸角,致使道路呈锯齿状线条.如实地呈等宽的道路,在未经处理的二值图上,呈宽窄不一的狭长面状条带.这样的道路信息不能满足地图可视化的要求(如图 1(b)所示).



(a) 实验区 SPOT 图象 (b) 提取的混有噪声的二值道路图象

图 1 实验区 SPOT 图象及提取的混有噪声的二值道路图象

数学形态学的运算种类很多,本文所涉及到的主要有以下几种:

(1) 膨胀和腐蚀是两种最基本和最重要的变换或运算,也是其他变换或运算的基础.在以下公式中, A 为待处理图象, B 为结构元素

$$\text{膨胀: } A \oplus B = \{a+b: a \in A, b \in B\} = \bigcup_{b \in B} A_b$$

$$\text{腐蚀: } A \ominus B = \{a: a+b \in A, b \in B\} = \bigcap_{b \in B} A_b$$

(2) 其他形态学运算都可以由膨胀和腐蚀运算派生,主要有

$$\text{断开: } A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$$

$$\text{闭合: } A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$$

$$\text{击中: } A \otimes (B_1, B_2) = (A \ominus B_1) \cap (A^c \ominus B_2),$$

其中, A^c 为 A 的补集

$$\text{细化: } A \circ B = A - (A \otimes B)$$

用数学形态学方法进行道路遥感影像特征提取,并进行可视化表达的主要方法与步骤见图 2.

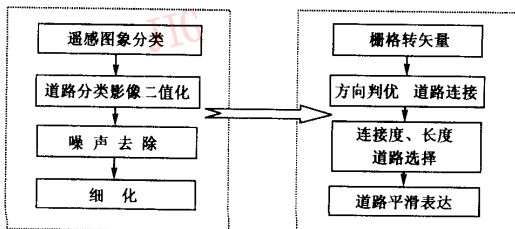


图 2 道路遥感影像特征提取方法及步骤

1.1 基于数学形态学的道路影像特征提取

1.1.1 噪声去除

如图 1(b)所示,在二值化的道路分类图上,由于存在同物异谱和同谱异物的情形,因此在道路影像中存在各种噪声,其中以居民地与道路混杂最为典型.噪声在空间上表现为大小不等的图斑,有的独立存在,有的与道路紧密粘连.由于存在道路光谱的不连续性,致使分类后的有些道路由不连续的像元组成,其在形式上与孤立小图斑噪声相似,因此在噪声消除时,应予以特别注意;另一较难去除的噪声为与道路紧密相连呈大面积面状分布的图斑.以下将针对各种噪声情况给出相应的噪声去除方法.

根据以上分析,针对图 1(b),噪声去除按以下步骤进行:

(1) 计算各图斑面积 a 、图斑周长 p 及形状指数 t ^[15];

(2) 删除满足下式的孤立面状图斑

$$a_1 < a < a_2 \quad \text{和} \quad t > 0.1 \quad (1)$$

其中, $t = \sqrt{a}/p$,这里指图斑像元的个数; p 指图斑边界像元的个数; a_1 为构成不连续道路图斑的最大图斑面积,设置此参数是为了使构成道路的不连续图斑不被删除(见图 3(a)); a_2 为孤立面状图斑的最大面积,其由经验确定.设置形状指数这一条件是为了保留面积小于 a_2 的狭长形道路图斑.这样根据式(1),那些同时满足面积阈值和形状指数两个条件的独立面状噪声就被删除.



(a) 构成道路的不连续图斑 (b) 方向膨胀、道路断线连接的结果

图 3 道路图斑及道路图斑连接

(3) 方向膨胀 道路断线连接

经第 2 步处理,只剩下较小面积的孤立图斑,局部道路依然断断续续.以下用方向多结构元素膨胀方法,将断线道路连接起来.膨胀多采用图 4 形式的结构元素.

(4) 再次删除孤立图斑

经过上述处理,断线道路已连接(见图 3),再用

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	1	1	1	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	0

(a) 水平方向膨胀结构元素

(b) 垂直方向膨胀结构元素

图4 用于方向膨胀的结构元素

面积阈值法删除经过方向膨胀的小噪声图斑,然后用相同的结构元素对上述图象做次数相同的腐蚀运算,以恢复道路长度。上述步骤可反复进行,直到消除全部孤立噪声为止。

(5) 消除与道路紧密粘连的面状噪声

经过步骤(4),仅剩少数与道路相连的面状噪声,其可用手工或用其他方法去除。这样通过对道路网络的分析综合,即基本消除了残留噪声。

(6) 道路边缘凹凸的平滑

经过 3×3 矩形的方向多结构元素的膨胀和腐蚀,对道路边缘已做了部分平滑,但仍不十分规整,可以采用闭运算方法对边缘进行修补和采用开运算去掉道路边缘的小凸角来进一步平滑。

1.1.2 道路细化

将经过净化后的道路特征图象进行细化处理,以便得到道路的中轴线。对目标图象进行细化处理,是指将图象上的文字、曲线、直线等几何元素的线条沿着其中心轴线将其细化成一个像素宽线条的处理过程。

近年来,人们提出了许多细化算法:其中,按细化后的连续性划分,有四邻、八邻和混合连通算法;按细化处理方式划分,有单方向、双方向和四方向(即一次完成轮廓剥离);按细化处理过程分,有串行、并行和串-并行处理。在串行算法中,细化的过程不仅取决于前一次的迭代图象,而且也与当前处理情况有关;而在并行算法中,当前迭代则仅由前一次迭代的结果决定。由于串行算法的处理结果依赖于对图象像素的处理先后顺序,因而其像素点的腐蚀或保留有时不可预测;而用并行算法对图象像素进行腐蚀时,是利用相同的条件同时处理所有像素点,其结果具有各向同一性。正因如此,有人认为并行算法较优。串-并行算法是串行算法和并行算法两者的混合,其性能也界于两者之间。基于数学形态学变换的细化算法,由于它是以几何形态为基础来对图象进行分析,因此,很容易实现并行处理^[16,17]。

在细化处理之前,首先要选择合适的结构元素,

该结构元素应能保证目标图象在细化算法的每一迭代过程中,其结构的连通性,并且能保证整个图形的构造不改变^[9,13,17]。

结构元素确定后,即可进行具体的细化运算。

为了消除细化过程中出现的骨架短枝,还需对最终细化结果再进行删除短枝运算^[13,18]。

在删除细化短支线条过程中,道路相应被缩短,可采用相关算法予以恢复^[14]。

1.2 基于数学形态学的道路图象特征提取分析

在上述道路提取方法中,主要运用数学形态学的方向膨胀算法来解决道路的断线连接问题,与其他断线连接方法相比,该方法简洁有效。另外,对道路凹凸不平边缘的平滑,用数学形态学的开、闭运算也能得到较好的解决。若运用其他方法,则较难做到这一点,而对提取道路的中轴线,数学形态学的细化算法也是很好的工具。该细化算法在很多信息识别与提取中已得到了运用,但怎样用数学形态学方法有效地去除黏附于道路边缘的噪声,则是进行道路图象特征提取有待进一步研究的问题。

2 道路网络综合与平滑表达

由于存在少数黏附于道路上的难于去除的噪声,因此在提取的道路网络中,有较多非道路信息。这些干扰信息,多为与道路主线连接的短小支线;或是孤立的弧段,必须予以删除。若将细化获得的栅格影像转换成矢量形式,则道路可表达为基于节点的一段弧线,由于其没有形成空间上独立完整的道路,因此要实施对非道路信息的删除,首先必须根据道路网络特点将道路连接起来,并分析其特点,在此基础上才能进行道路网络综合。

2.1 基于方向判优的道路连接

通常道路网络在空间上表现为以下几种形式:呈垂直、水平相交的网络(规则格网);由收敛于一点的一组道路和另一组呈环状(或多边形)的道路相交而形成的网络(辐射状格网);由曲折多变的道路组成网络或上述几种形式的混合^[19]。在道路连接前,必须对道路网络特征进行分析,以确定合适的连接方案,最终得到的路网才能反映其本来特征。在实际应用中,可根据辅助信息来确定道路的走向。以下给出的道路连接方法对呈典型辐射状的道路网络连接不很适用,对其余几种道路网络形式均适用。方法如下(见图5)

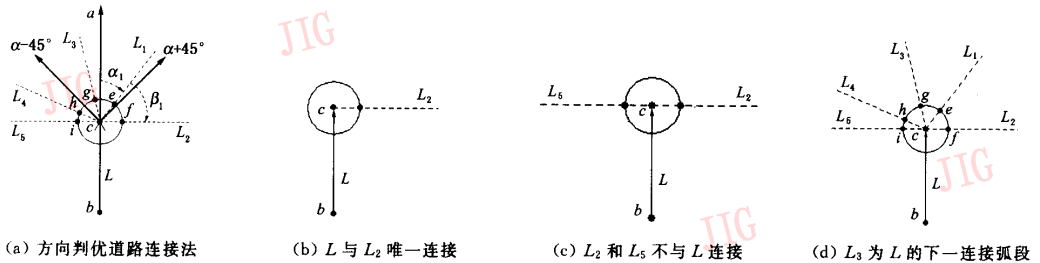


图 5 方向判优道路连接法及道路弧段连接的几种情况

- (1) 搜索道路弧段 L 的起点 b ;
- (2) 确定交于弧段 L 终点的各弧段方向;

以该道路弧段终点 c 为圆心, 以 r 为半径绘圆, 得到交于终点 c 的各弧段与圆的交点 e, f, g, \dots , 点 c 与点 e, f, g, \dots 的连线方向即为交于 c 点的各弧段方向。

- (3) 根据方向判断应连接的下一弧段

首先计算弧段 L 分别与各弧段 $L_1, L_2, L_3 \dots L_N$ 的夹角, 记为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots \alpha_n$ 以及 $L_1, L_2, L_3 \dots L_N$ 之间的两两夹角, 记为 $\beta_1, \beta_2, \beta_3 \dots \beta_m$. 如果 L 仅有一弧段与之相连, 则无论该弧段方向如何, 均连接之(见图 5(b)); 如果有两条以上弧段与之相连, 判断方法如下: 若 $\beta_j \geq 180^\circ \pm 10^\circ$, 则组成 β_j 角的两弧段不成为连接弧段(见图 5(c)); 然后, 将 α_i 中绝对值小于 45° 的角找出, 其中, 与夹角最小者对应的弧段, 即为所要连接的弧段(见图 5(d)); 如无符合条件的弧段, 则完成了道路的连接. 反复进行第 2、第 3 步, 直到无可连接的弧段为止, 即完成一条道路的搜索. 重复上述步骤, 直至所有道路连接完毕。

2.2 基于连结度与长度的道路网络综合

道路连接度(connectivity)定义为与该道路相交的道路数量^[20], 因此连接度可反映出道路的重要性, 即相交道路越多, 连接度越大, 重要性也越高. 由噪声产生的非道路信息, 多为短小枝杈, 连接度低, 根据连接度, 再辅以长度即可剔除非道路信息(见图 7(e)).

2.3 道路网络平滑表达

经细化获得的道路呈具有多个弯曲的锯齿状, B 样条曲线不适于对本文的实验路网进行平滑. 经实验发现, Douglas-Peucker 方法^[21]对道路的简化与平滑更为合适. 现将该方法简述如下: 首先, 将一条道路的首尾相连成一直线, 同时探测偏离该直线最远的点, 即最大偏差点, 如果该点与直线偏差不大于

限差, 则将道路首尾点之间的所有原曲线点全部删除, 然后用首尾相连的那条直线来代替原曲线, 处理结束; 如果该点的偏差大于限差, 则保留该点, 最后以该点为限将曲线分成两段, 再将其分别作为独立曲线重复上述步骤即可. 利用 Douglas-Peucker 方法, 最终被抽取的点是曲线的首末点, 以及曲线各分线段的端点. 由于该方法具有平移、旋转的不变性, 因此很适合于路网的平滑与表达(见图 7(f)).

3 道路网络实验结果分析

实验区包括了南京市江宁经济开发区的主要部分. 影像数据为 1999-01-21 成像的 SPOT-4(XI), 共有 4 个波段数据, 分别为: $B_1(0.50 \sim 0.59\mu\text{m})$, $B_2(0.61 \sim 0.68\mu\text{m})$, $B_3(0.78 \sim 0.89\mu\text{m})$ 和短波红外波段 SWIR($1.58 \sim 1.75\mu\text{m}$). 各处理步骤的实验结果见图 6. 另外, 还对 IKONOS 图象进行了实验, 其道路提取结果见图 7.

江宁经济开发区是近十年发展起来的新兴地区, 该区新建道路光谱亮度高, 与背景反差大, 且连续性较好, 但在开发较早的区域, 道路与背景区分不明显. 在此区域内, 有新建居住区与新建道路光谱接近, 这对道路的分类有干扰作用. 试验区道路影像见图 1(a).

提取道路时, 首先对图 1 进行边缘探测, 然后进行监督分类, 并将道路信息二值化(见图 1(b)), 该图显示所分类的道路信息混有各种噪声.

可用 $15 < a < 80$, 且 $t = \sqrt{a/p} > 0.1$ 的参数来对图 2 进行噪声删除, 结果见图 6(a), 因为很多面积小于 15pixels, 且形状指数小于 0.1 的图斑是位于道路上的断续图斑, 所以可通过设置面积阈值 15pixels 和形状指数 0.1 来保留构成道路线的这些零星图斑, 而面积阈值 80 的设置是为了保证最短道路不被删除.

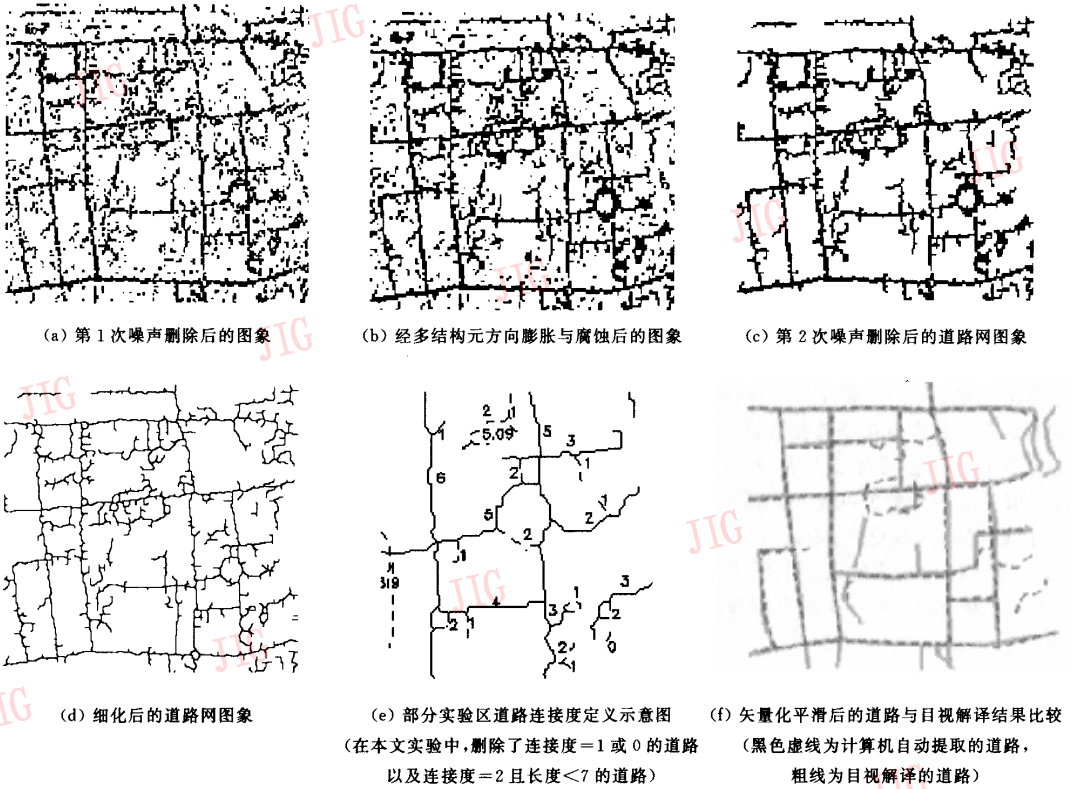


图 6 各步实验结果

在图 6(a)基础上,再用图 4 所示结构元素进行若干次垂直和水平方向的先膨胀后腐蚀运算,直到道路断线得到连接为止(见图 6(b)),同时用进一步删除孤立噪声(结果见图 6(c));然后对图 6(c)做细化,其结果见图 6(d). 最后根据连接度与长度进行

非道路信息消除,其结果见图 6(e). 矢量化平滑处理后道路与目视解译结果的比较见图 6(f). 图 6(f)及图 7 给出了用本方法得到的道路主骨架网络,其效果较为满意.

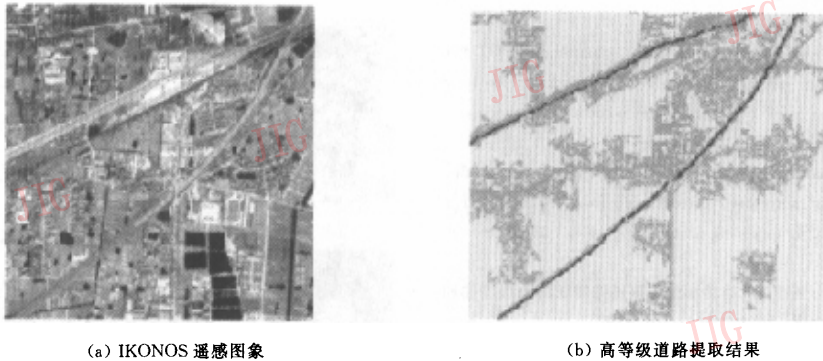


图 7 江宁经济开发区局部 IKONOS 遥感图象高等级道路提取

4 结论

综上所述,基于数学形态学与道路网络分析的遥感道路特征提取的技术对道路发展相对较快的区域较为有效.这是因为新建道路网的光谱具有连续一致性,便于分类.由于土地管理者对新建道路网络最感兴趣,因此这一技术对城市道路网络更新非常有用.该算法的关键是灵活选择结构元素,而如何在噪声去除中既能保持并恢复道路的连续性,又能删除噪声和去除与道路紧密相连的大片面状噪声,则是该算法的难点之一,值得进一步探究.实验证明,道路网络分析是进行道路连接和进一步去除由噪声产生的非道路信息的有效方法,同时表明上述道路特征提取方法较一般的基于多光谱的分类算法更具一般性,研究的区域更大,现具有实用性.但在处理过程中,由于需要一定的人工干预,因而处理时间相应增长.另外,使用这一方法也需要好的道路分类方法.

参考文献

- 1 Wang Jin-fei, Treitz P M, Howarth P J. Road network detection from SPOT imagery for updating geographical information systems in the rural-urban fringe [J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1992, 6(2): 144~151.
- 2 Peter Doucette, Peggy Agouris, Anthony Stefanidis et al. Self-organized clustering for road extraction in classified imagery [J]. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2001, 55(2): 347~358.
- 3 Toutin T. Potential of road stereo mapping with radar sat images [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2001, 67(9): 1077~1084.
- 4 Jazoull R, Verbyla D L, Murphy D L. Evaluation of SPOT Pan chromatic digital imagery for updating road locations in a harvested forest area [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1994, 60(12): 1449~1452.
- 5 Benjamin Susan, Leonard Gaydos. Spatial resolution requirements for automated cartographic road extraction [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1990, 56(1): 93~100.
- 6 史文中,朱长青,王翌. 从遥感影像提取道路特征的方法综述和展望 [J]. 测绘学报, 2001, 30(3): 257~262.
- 7 高芳琴,吴健平. 遥感图象中城市道路信息的自动识别与制图 [J]. 东北测绘, 2001, 24(3): 27~30.
- 8 崔屹. 图象处理与分析-数学形态学方法及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.

- 9 张英琦,张庆林. 数学形态学应用于二值图象的细化 [J]. 焦作工学院学报, 1997, 16(4): 38~43.
- 10 Ansoult Marc M, Soille Pierre J. Mathematical morphology: A tool for automated GIS data acquisition from scanned thematic maps [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1990, 56(9): 1263~1271.
- 11 陈晓勇,李德仁. CCD扫描等高线图的自动栅格-矢量转换方法 [J]. 测绘学报, 1991, 20(1): 16~25.
- 12 李德仁,陈晓勇. 用CCD扫描的等高线图自动生成数字高程模型 [J]. 模式识别与人工智能, 1991, 4(4): 64~70.
- 13 盛业华,郭达志. 一种保形的数学形态学图象细化算法 [J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(3): 71~73.
- 14 郝向阳. 地图信息识别与提取技术 [M]. 北京: 测绘出版社, 2001.
- 15 黎夏. 形状信息的提取与计算机自动分类 [J]. 环境遥感, 1995, 10(4): 279~286.
- 16 Jang B K, Chin R T. Analysis of thinning algorithms using mathematical morphology [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(6): 541~55.
- 17 刘志敏,杨杰,施鹏飞. 数学形态学的细化算法 [J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(9): 15~19.
- 18 杜世宏,杜道生,樊红等. 基于栅格数据提取主骨架线的新算法 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(5): 432~436.
- 19 祝国瑞,尹贡白. 普通地图编制 [M]. 北京: 测绘出版社, 1983.
- 20 Mackaness William. Analysis of urban road networks to support cartographic generalization [J]. Cartography and Geographic Information Systems, 1995, 22(4): 306~316.
- 21 郭仁忠. 空间分析 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000.



安如 1963年生,1984年毕业于南京大学地理系地图学专业,高级工程师,现为南京大学城市与资源学系在职博士生.主要从事地理信息工程、遥感研究与应用等工作.



冯学智 1953年生,教授,南京大学城市与资源学系博士生导师.主要从事地理信息系统与遥感的研究与应用工作.



王慧麟 1963年生,高级工程师.主要从事摄影测量与遥感的研究与应用工作.