

# 基于形态分割的高分辨率遥感影像道路提取

朱长青<sup>1,2</sup>, 王耀革<sup>3</sup>, 马秋禾<sup>2</sup>, 史文中<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 测量与地球物理研究所, 湖北 武汉 430077; 2. 解放军信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052; 3. 解放军信息工程大学 理学院, 河南 郑州 450052; 4. 香港理工大学 土地测量与地理资讯学系, 香港)

## Road Extraction from High-resolution Remotely Sensed Image Based on Morphological Segmentation

ZHU Chang-qing<sup>1,2</sup>, WANG Yao-ge<sup>3</sup>, MA Qiu-he<sup>2</sup>, SHI Wen-zhong<sup>4</sup>

(1. Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430077, China; 2. Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China; 3. Institute of Science, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China; 4. Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

**Abstract:** Based on grey level mathematical morphology, this paper presents a newly developed approach to extract road network from high-resolution remotely sensed image. First, the image is segmented based on grey level morphological characteristics, and basic road network can be obtained. Then final road network is extracted from the basic road network by line match method. The proposed approach in the paper can be adapted for road extraction from the remotely sensed image where road cannot be differentiated with background clearly. And the experiments also indicate that the proposed approach is efficient for extracting road network from remotely sensed image.

**Key words:** road network extraction; high-resolution remotely sensed image; grey level morphology; characteristic segmentation; line match

**摘 要:** 基于灰度形态学, 提出一种从高分辨率遥感图像提取道路网络的方法。首先利用灰度形态特征对遥感影像进行分割, 进而得到基本的道路网络轮廓。然后在此基础上, 利用线段特征匹配方法提取道路网络。提出的方法能适应于从道路和背景区别不很清楚的遥感图像中提取道路。实验结果也表明, 本文方法能有效地从遥感影像中提取道路网络。

**关键词:** 道路网络提取; 高分辨率遥感影像; 灰度形态学; 特征分割; 线段匹配

## 1 引 言

随着空间信息科学的发展, 地理信息系统(GIS)已广泛应用于众多领域。可是, GIS应用存在一个瓶颈问题——即如何快速提取目标信息、更新GIS数据问题。在摄影测量与遥感领域, 目标提取识别也是生产中急需、但离生产应用仍有

一定距离的技术热点之一, 是国际摄影测量与遥感界关注的焦点之一<sup>[1]</sup>。因此, 影像的目标提取具有重要意义。影像的目标通常分为点状目标、线状目标(如道路、河流等)和面状目标(如建筑物等), 其中线状目标提取在目标提取中具有承上启下的作用, 而道路网络的提取在线性目标提取中占有重要地位。

收稿日期: 2003-08-21; 修回日期: 2004-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(40176032)

作者简介: 朱长青(1962), 男, 江苏阜宁人, 教授, 博导, 主要研究方向为遥感、空间数据处理和小波分析。

道路网络提取已有许多研究<sup>[2]</sup>。例如,文献[3]用种子点和动态规划研究了航空影像线性目标提取。文献[4]从 SAR 影像上利用随机场模型等方法研究了道路特征提取方法。文献[5]利用模糊融合技术研究了 SAR 影像的线性目标检测。文献[6]基于多尺度检测与几何约束边缘检测相结合的方法,研究了航空影像的道路提取。文献[7]提出了线段特征匹配的方法用于高分辨率遥感影像的道路网络提取。

进一步地,本文研究了高分辨率遥感影像的道路网络提取方法,方法是基于灰度形态学的特征分割和线段特征匹配方法<sup>[7]</sup>。第 2 节简要描述了基本的灰度形态运算。第 3 节利用灰度重建运算,构造基于形态特征的影像分割,在分割基础上利用线段特征匹配方法提取道路网络。第 4 节给出了本文的总结。

## 2 灰度形态学基本运算

本节首先简要介绍灰度形态学的基本运算,有关的细节运算可见相关的文献[8]和文献[9]。

### 2.1 基本灰度形态运算

设  $f(p)$  是灰度影像,  $N$  为结构元, 则有如下的灰度形态运算。

灰度腐蚀:

$$\varepsilon_N f(p) = \min_{q \in N} \{f(p+q) - N(q)\} \quad (1)$$

灰度膨胀:

$$\delta_N f(p) = \max_{q \in N} \{f(p-q) + N(q)\} \quad (2)$$

测地灰度膨胀:

$$\delta_{(1)}^X f(p) = \delta f(p) \cap f(p) \quad (3)$$

$n$  重测地灰度膨胀通过连续  $n$  次测地灰度膨胀获得

$$\delta_{(n)}^X f(p) = \delta_1^X \delta_1^X \delta_1^X \dots \delta_1^X f(p) \quad (4)$$

同样可得到测地灰度腐蚀和  $n$  重测地灰度腐蚀

$$\varepsilon_{(1)}^X f(p) = \varepsilon f(p) \cap f(p)$$

$$\varepsilon_{(n)}^X f(p) = \varepsilon_1^X \varepsilon_1^X \varepsilon_1^X \dots \varepsilon_1^X f(p)$$

### 2.2 灰度重建开和重建闭运算

由  $n$  重测地灰度膨胀的定义,可以得到从图像  $Y (Y \subset X)$  到图像  $X$  的重建  $\rho^X(Y)$

$$\rho^X(Y) = \bigcup_{n \geq 1} \{ \delta_n^X(Y) \mid \delta_{(n)}^X = \delta_{(n+1)}^X \} \quad (5)$$

对于一个运用扁平结构元的灰度图像,合并运算(即  $\cup$ ) 等价于上确界运算。此时,灰度重建开运算  $\rho(J)$  是图像  $I$  从  $J$  获得的

$$\rho(J) = \bigcup_{n \geq 1} \{ \delta_{(n)}^J(J) \mid \delta_{(n)}^J = \delta_{(n+1)}^J \} \quad (6)$$

同样,在  $I$  上从  $J$  到  $I$  的对偶灰度重建(即重建闭运算)  $\rho^{*I}(J)$  是

$$\rho^{*I}(J) = \bigcap_{n \geq 1} \{ \varepsilon_{(n)}^J(J) \mid \varepsilon_{(n)}^J = \varepsilon_{(n+1)}^J \} \quad (7)$$

灰度形态重建形成了一种非常重要的形态滤波器——重建滤波器。由式(6)和式(7)可以看出,重建滤波器是一种十分重要的形态连接滤波器。重建滤波器对图像处理十分有用,因为他们不传入中断的信号,可以保留输入图像中要检测的形状类型。

### 2.3 水平算子

利用式(1)和式(6),重建开运算被定义如下

$$\Psi_N^* f(p) = \rho^{(p)}(\varepsilon_N f(p)) \quad (8)$$

同样,利用式(2)和式(7),重建闭运算被定义如下

$$\Phi_N^* f(p) = \rho^{*f(p)}(\delta_N f(p)) \quad (9)$$

基于重建开和重建闭运算的组合算子称之为水平算子(Leveling)<sup>[8,9]</sup>。水平算子用重建开运算和重建闭运算的定义就是

$$g = \begin{cases} f: & X \cup Y \\ \Psi^* f: & X \\ \Phi^* f: & Y \end{cases} \quad (10)$$

水平算子用来分割原始的影像。进一步地,还有高水平算子  $liv^+$  和低水平算子  $liv^-$ 。

函数  $g$  是  $f$  的高水平算子(当且仅当作用于一对相邻像素  $(p, g)$  时),即

$$liv^+ : g_p > g_q \Rightarrow g_p \geq g_q \quad (11)$$

同样,称函数  $g$  是  $f$  的低水平算子,对  $(p, g)$ , 即有

$$liv^- : g_p > g_q \Rightarrow g_p \geq g_p \quad (12)$$

如果函数  $g$  既是  $f$  的高水平算子又是  $f$  的低水平算子,那么,称函数  $g$  等于  $f$ 。

在高水平算子中,若  $g > f$ , 在低水平算子函数中,若  $g < f$ , 那么,这样的连接成分被认为是扁平的特征。

## 3 基于形态分割的道路网络提取方法

本节,基于灰度形态学基本运算,提出一种基于形态特征的分割图像方法,并通过分割图像得到二值化图像,进而达到提取道路的目的。

### 3.1 形态特征分割

提出的方法是把图像中一个结构或目标定义

为有相同形态特征的像素类型。基本的思想是用原始图像和它的水平算子的差去测量这些特征。为了定义形态特征, 提出了一种可供选择的基于水平算子运算法则: 比较形态开运算(形态闭运算)与原始图像的剩余, 把它解释为度量结构的明亮关系(或黑暗关系)。这样, 对于一个给定的空间领域, 就可以简单而直观地把形态特征分为: “凸特征”、“凹特征”、“扁平特征”。然后, 一个成员函数  $\hat{\mu}$  被定义成与凸类有关的函数, 另一个成员  $\mu$  是凹类的函数。就有

$$\hat{\mu} = f - \gamma^*(f) \tag{13}$$

$$\mu = \varphi^*(f) - f \tag{14}$$

水平算子运算法则则可被重新定义为

$$g = \psi(f) = \begin{cases} \gamma^* f: & \hat{\mu} > \mu \Rightarrow f - \gamma^*(f) > \varphi^*(f) - f \\ \varphi^* f: & \mu > \hat{\mu} \Rightarrow \varphi^*(f) - f > f - \gamma^*(f) \\ f: & \hat{\mu} = \mu \end{cases} \tag{15}$$

在这个观点中, 给定图像有一个水平函数  $f$  和一个结构元  $SE = N$ , 分割图像特征  $S$ , 就可被简化成如下 3 类不同的特征: 凸类  $\hat{k}$ 、凹类  $\mu$  和扁平类  $k$ 。此时

$$S = \Phi_N(f) = \begin{cases} \hat{k}: & \phi(f) < f \\ \mu: & \phi(f) > f \\ k: & \phi(f) = f \end{cases} \tag{16}$$

对这种图像分割中, 低水平算子的灰素值低于原始图像  $f$  的灰素值的部分标记为  $\hat{k}$ , 高水平算子的灰素值高于原始图像  $f$  的灰素值的部分标记为  $\mu$ , 低水平算子、高水平算子与  $f$  有相同的灰素值的部分, 把它标记为  $k$ 。在分割处理中, 结构元对分割结果有重要影响, 因为分割中算子运算依赖于结构元。关于结构元的选取, 有许多研究, 但研究的重点主要是结构元的分解。在实际应用中, 结构元的选取主要取决于研究对象、目的和试验分析。

图 1 是一幅 1 m 分辨率城市卫星遥感图像, 图 2 是利用形态特征分割方法对图 1 处理的结果。形态特征分割中, 白色、黑色和中间色分别对应于凸类  $\hat{k}$ 、凹类  $\mu$  和扁平类  $k$ 。感兴趣的道路被标记为凹类特征, 而建筑物被标记为凸类特征, 图像中的大部分商用建筑被标记为扁平的特征。在分割中, 结构元采用的是八边形的, 直径为 7 个

像素。这种选取的依据是基于处理影像的目标特征主要是道路网络特征, 以及试验分析的结果。通过图 2 可以发现, 利用选取的结构元进行形态特征分割, 相关的区域基本上能够正确地检测出来。



图 1 一个 1 m 分辨率卫星遥感影像

Fig. 1 A 1 m resolution satellite remotely sensed image



图 2 图 1 的形态分割结果

Fig. 2 The results of morphological segmentation for Fig. 1

### 3.2 道路网络的提取

将图 1 得到的关于白色、黑色和中间色的像素分割, 作进一步处理:

$$\text{影像值} = \begin{cases} 1, & \text{白色和中间色} \\ 0, & \text{黑色} \end{cases}$$

这样就得到一个二值化图像(图 3)。二值化图像较好地表示了原影像上的道路网络轮廓。



图 3 图 2 的二值化影像

Fig. 3 The binary image for Fig. 2

对图 3 所示的二值化影像, 进一步再用文献 [7] 的线段特征匹配方法提取道路网络。该方法是基于线段特征匹配思想。首先, 人工设定阈值,

对影像二值化。然后对二值化影像按不同方向、不同位置检测具有一定长度和方向的线段,将提取道路转化为提取直线段,从而得到基本的道路网络。然后再进行形态闭运算、细化等处理,得到最终的道路网络。本文中,利用形态特征分割取代文献[7]中人工设定阈值进行二值化的处理。利用线段特征匹配方法,得到如图4所示的道路网络。

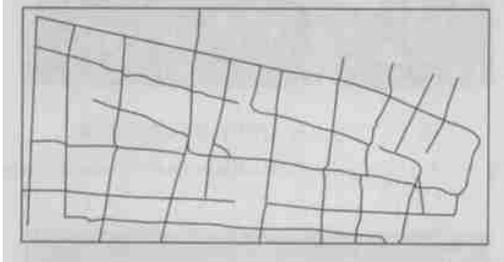


图4 图1中的道路最后提取结果

Fig. 4 The final extracted road network from Fig. 1

### 3.3 评价与分析

为了说明本文方法的效果,把提取出来的道路网络(图4)与原始图像(图1)重叠,结果如图5。



图5 提取出来的道路网与原始图像(图1)重叠的结果

Fig. 5 Overlay of the extracted road network on the top of the original image of Fig. 1

进一步地,利用本文提出的算法,给出另一幅影像的检测结果,结果如图6所示。



图6 另一幅影像提取出来的道路网络与原始图像重叠的结果

Fig. 6 Another extracted road network overlapped with the original image

从图5、图6结果所示,原始图像中大部分主要的道路,从位置和方向两方面上看,都能被很好的提取出来。而且,各条道路包括直线道路和曲线道路都能较好地提取出来。提取的道路网和原始图像中的道路网之间的位移较小。

另外,给出一种定量分析的指标,即道路提取正确率——正确提取的道路长度除以实际的道路长度。图6的道路提取正确率为92.23%,图7的道路提取正确率为91.45%。

进一步分析可以发现,提取的道路交叉口变形较严重,主要原因是在对利用线段特征匹配算法后,进行形态闭运算和细化产生的。这种情况可以通过对提取的道路网络进一步处理如曲线拟合加以改进。另外,提取的是道路中心线,由于图像质量的影响及算法存在的不足,有些道路中心线还没能很好地提取出来。

## 4 结论

本文提出了一种从高分辨率遥感图像中提取道路网络的方法。该方法是利用灰度形态学对灰度图像进行分割,进而得到二值图像。在此基础上,利用线段特征匹配方法提取道路网。该方法不像半自动提取那样要求预先提供种子点,因此它是某种意义上的自动道路提取方法。也不像文献[7]那样,需要人工对图像进行二值化处理。

根据高分辨率遥感图像特征,首先利用灰度形态特征对灰度图像进行分割。本文所提出的形态分割方法是形态开、闭运算的延伸。试验表明该方法性能优于传统的分割方法。特别地,提出的方法在形状描述上比传统的方法好,它能保留小的但在图像中占有重要地位的区域,这能减少传统形态分割中引人注目的超分割问题。因此,这里提出的方法有利于处理非常细小的、封闭又必须保留的图像以及结构和目标/背景的不明确的图像,例如高分辨率遥感图像。

研究结果表明,分割后的图像,结合线段特征匹配方法,能够较好地提取道路网络。因此,提出的方法具有好的效果。但由于阴影等的影响,也有一些道路没有能够正确地提取出来。另外,一些道路交叉口存在着位移,这些问题将做进一步的研究。本文发展的方法对于遥感影像目标提取、GIS数据更新、地图自动化、汽车导航、数学形态学的应用等领域都具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] LI De-ren, *et al.* Public Earth Spatial Information-The Technological Report of 19th ISPRS[J]. Remote sensing information, 2000(4): 2-7. (in Chinese)
- [2] SHI Wen-zhong, ZHU Chang-qing, Wang Yu. The Review and Prospect of Extraction Road Features from Remote Sensing Images[J]. Acta Geodatica et Cartographica Sinica, 2001, 30(3): 257-261. (in Chinese)
- [3] GRUEN A, LI H. Semi Automatic Linear Feature Extraction by Dynamic Programming and LSB-Snakes [J]. PE&RS, 1997, 63: 985-995.
- [4] TUPIN F, MAITRE H, *et al.* Detection of Linear Features in SAR Images: Application to Road Network Exeraction[J]. IEEE Trans Geos&RS, 1998, 36: 434-453.
- [5] CHANUSSOT J, MAURIS G, LAMBERT P. Fuzzy Fusion Techniques for Linear Features Detection in Multi-temporal SAR Images [J]. IEEE Trans Geos&RS, 1999, 37: 1 292-1 305.
- [6] LAPTEV I, MAYER H, *et al.* Automatic Extraction of Road from Aerial Images Based on Scale Space and Snakes[J]. Machine Vision and Applications, 2000, (12): 23-31.
- [7] SHI W Z, ZHU C Q. The Line Segment Match Method for Extracting Road Network From High-resolution Satellite Images [J]. IEEE Trans Geos&RS, 2002, 40(2): 511-514.
- [8] SERRA J. Image Analysis and Mathematical Morphology[M]. London: Academic Press, 1982.
- [9] SERRA J. Image Analysis and Mathematical Morphology[M]. London: Academic Press, 1998.

## 《测绘学报》刊出论文荣获首届中国科协期刊优秀学术论文奖

为促进我国学科发展、科技进步、人才成长,充分调动科技人员的积极性,进一步提高学术论文质量,中国科协举办了第一届优秀学术论文评选活动。第一届中国科协期刊优秀学术论文评选活动是由中国科协所属全国性学会、协会、研究会主办的学术期刊编辑部和三名同行专家个人推荐,刊物主办学会组织专家对推荐的论文进行初审后上报中国科协,经中国科协期刊优秀学术论文专家评审委员会无记名投票评选和中国科协学术交流工作委员会审定后评选出的。首届中国科协期刊优秀学术论文共评选出99篇,并在中国科协网上进行了14天的公示。

根据中国科协的精神,中国测绘学会和《测绘学报》编辑部组织有关专家对1998年~2002年《测绘学报》刊出的论文进行了认真的评审,最后评选出1998年第1期刊出的,陈俊勇、刘经南等人撰写的“分布式广域差分GPS实时定位系统”一文,作为中国测绘学会优秀学术论文上报中国科协。经中国科协评选、审定等程序,该篇论文荣获第一届中国科协期刊优秀学术论文奖。

今年2月10日召开的中国科协六届四次全委会议的闭幕式上颁发了“第一届中国科协学术期刊优秀学术论文奖”,并对刊物主办学会和学报编辑部颁发了荣誉证书。中国测绘学会秘书长李根洪同志代表中国测绘学会、学报编辑部和论文作者领取了获奖证书。