

文章编号: 0253-2239(2001)04-504-05

# 组合利用统计和结构信息的道路提取算法

薛 峰 王润生

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘要:** 提出了一种组合利用统计和结构信息从遥感图像中提取道路的算法。这个算法包括三个处理步骤: 利用道路的多种局部统计特性获得道路基元与道路段, 以及利用能量函数提取道路边沿。在检测道路基元时, 用统计分析来表达道路的结构信息, 避免了提取线段来表达, 增强了抗噪性与稳健性; 在检测和拟合道路边沿时, 能量函数中的参数由前面的运算结果确定, 使算法具有自适应能力。

**关键词:** 直线提取; 统计信息; 结构信息; 直方图; 能量函数

中图分类号: TP391 文献标识码: A

## 1 引 言

道路的提取在各类遥感图像中都具有重要的意义。目前道路提取算法, 主要可以分为三类: 基于结构特征、基于统计特征<sup>[1]</sup>以及结构与统计特征相结合。当图像分辨率较高、噪声较小时, 道路的边沿是清晰的, 通过提取直线并结合道路的结构特征可以获得很好的提取效果<sup>[2~4]</sup>, 但当噪声较强时, 这类算法所获得的道路边沿常常是不连续的<sup>[5]</sup>。为了有效提取道路就必须采用具有很高稳健性的统计方法<sup>[6,7]</sup>, 但道路的统计模型往往是复杂的, 模型中常常又具有太多的需要人为确定的参数, 使得这类方法的实用性较差。也有人设想将前两类方法加以组合提取道路, 问题的关键是如何组合, 文献<sup>[8]</sup>在提取合成孔径雷达图像中的道路时提出了一种组合方案, 它是在提取直线<sup>[9]</sup>基础上再利用统计的方法, 解决了后期处理中的抗噪性, 但没有解决直线提取的抗噪性, 所采用的统计模型仍较复杂, 实用性差。

可以看出, 将结构特征与统计特征加以组合应用应当是实现稳健提取道路的有效途径, 关键在于如何组合运用这些特征。本文认为, 首先结构特征是反映道路结构信息的特征, 结构信息可以有多种描述方式, 不一定非要用直线段来反映; 其次不一定只在一个层次上进行两种特征的组合, 可以采用多个层次, 每个层次上的组合方式也可以不一样; 最后算法中采用的统计模型一定要简单, 便于实用。基于上述观点, 本文提出了道路基元、道路段、道路边沿三层提取算法, 前两层采用道路的多种直方图统

计特性来表述道路部分的结构特征, 最后一层采用能量最佳化的方法获得提取结果。前两层采用基于小窗口统计直方图来建立提取道路基元与道路段的模型; 而后一层采用能量函数建立提取道路边沿的模型, 其参数取决于前一层的结果, 所以整个模型都比较简单实用且具有自适应性。由于新算法在检测道路的基本单元上就采用统计分析, 与文献<sup>[9]</sup>中先提直线后用统计模型的方法相比, 无疑具有更高的抗噪能力与稳健性。将此算法用于实际的航空遥感图像, 获得了理想的提取效果。

## 2 道路的基本特性及其特征描述

### 2.1 道路的基本特性

文献<sup>[7]</sup>中对道路的基本特性有很好的表述:

- 1) 道路宽度变化比较小, 并且变化很慢;
- 2) 道路方向变化比较慢;
- 3) 道路内部的灰度比较平稳;
- 4) 道路内部的灰度与背景灰度相差比较大;
- 5) 道路总是具有一定的长度。

### 2.2 道路的特征描述和道路基元的表示

这里所说的道路由道路的两个边沿来表述, 每一个连续的道路边沿是一个道路段, 每个道路段由一些首尾相接的道路基元组成, 道路基元是包括道路和少量背景的一个矩形窗。在本文提出的道路提取算法中, 首先是利用反映道路特性的多种直方图特征获得道路基元, 然后由位置关系连接或合并道路基元获得道路段, 最后由能量最佳化处理获得道路边沿。道路基元的直方图特征是本算法中的关键部分。

道路基元的特性可以从矩形窗内的灰度、梯度方向和幅度等直方图反映出来：

- 1) 因为道路内部的灰度比较均匀，基元的灰度直方图应当仅仅具有一个主峰。
- 2) 在基元中，应当具有一对相对的边，其梯度方向相反，所以在基元的梯度方向直方图中具有对称的双峰，其中梯度方向量化为 64 层。
- 3) 道路与背景的灰度差别反映在基元的梯度

强度直方图上应当是具有一个非零主峰，而这个主峰的中心值反映了道路内部的灰度与背景灰度的差别程度。

- 4) 当存在树影遮挡时上述特征仍然存在，只是峰被展宽，所以有较强的稳健性。

图 1 清楚地表现了道路基元与背景之间在直方图上的差别，其中每一类直方图中 a~ d 为包含道路

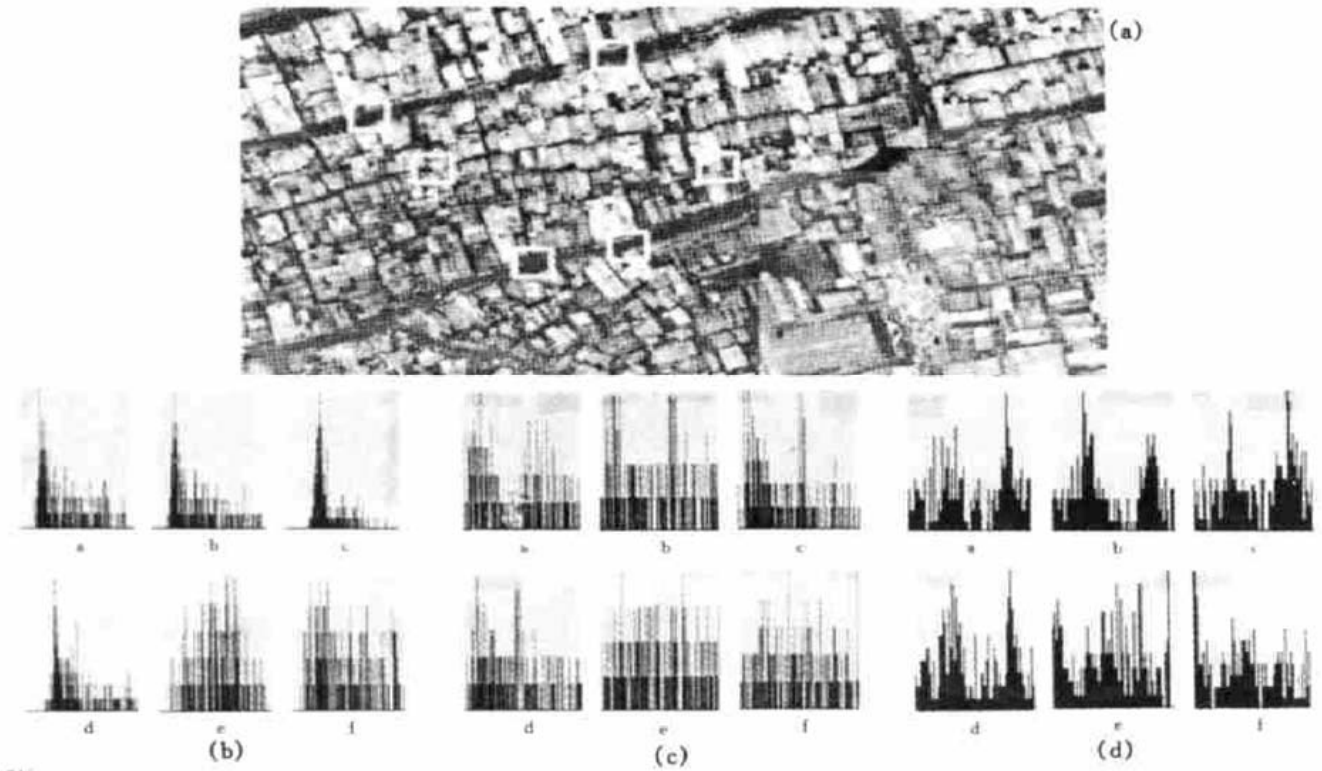


Fig. 1 The statistical feature of road elements

为了形成直方图的参数特征，首先采用了混合高斯分布来拟合直方图<sup>[1]</sup>，其公式如下：

$$H(x) = \sum_{l=1}^K \frac{P_l}{\sqrt{2\pi}\sigma_l} \exp\left[-\frac{(x - \mu_l)^2}{2\sigma_l^2}\right] \quad (1)$$

$x$  表示图像的灰度范围(0 ~ 255);  $H(x)$  表示每一灰度级的发生概率;  $K = 2$  分别表示背景和目标的分布,  $P_1$ 、 $P_2$  分别表示背景和目标的百分比,  $P_1 + P_2 = 1$ ;  $\sigma_l$ 、 $\mu_l$  分别为方差和均值。这些参数可由基元窗口中的图像数据拟合得到，所以可获得峰值位置与谷点位置，获得如下三个参数：

- 1) 峰宽  $w$ ：反应噪声的影响， $w$  越小则道路边沿也越清晰。
- 2) 峰高  $h$ ：反应具有相同属性点的数量，太低时则不认为存在峰。
- 3) 峰的中心位置：判断是否存在对称双峰。

我们使用了灰度、梯度方向和梯度幅度三个直方图，所以有 9 个参数。图 2 给出了梯度方向直方

图、拟合后的直方图及其说明。

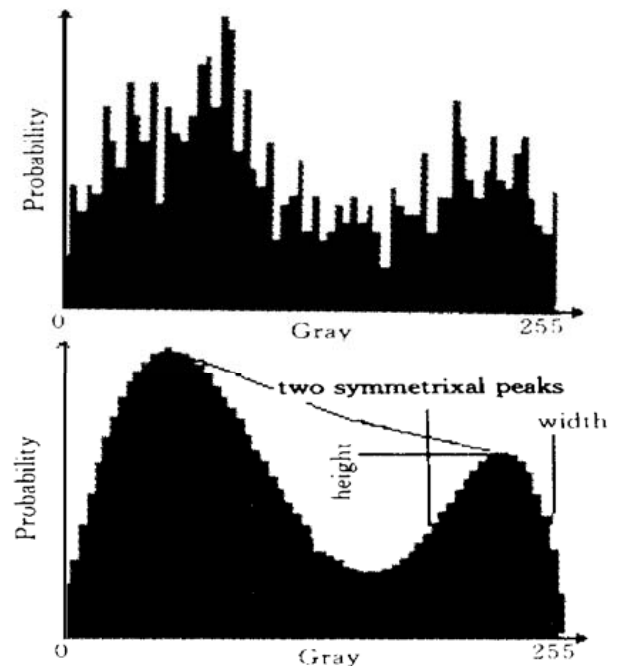


Fig. 2 The gradient direction histogram

### 3 道路提取算法

道路提取算法由三个处理层次组成,其框图如下(图 3):

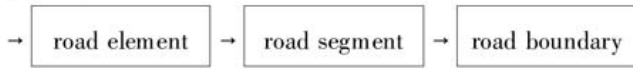


Fig. 3 The flow chart of road extraction algorithm

#### 3.1 道路基元的提取

道路基元提取涉及确定基元尺寸、搜索和判别规则三个方面。

**确定基元尺寸:** 算法中基元尺寸与道路的尺寸与图像分辨率有关,应该是可以改变的。一张图像中常常含有不同尺寸的道路,所以需要不同尺寸的道路基元。设定一个起始基元尺寸  $N_1$  和中止基元尺寸  $N_2$ , 设  $N_2$  小于  $N_1$ , 由大至小进行搜索, 这样可检测介于  $N_1$  和  $N_2$  尺寸之间的道路。如果具有道路的先验信息, 就可以更准确的选取起始和中止基元尺寸, 提高检测速度。应当说明的是, 这里所用的道路基元的形状是矩形窗, 因为道路基元所要确定的仅仅是包含道路的区域, 而道路段基本呈矩形, 其他形状对基元的选择没有太大的好处。

**基元搜索规则:** 采用全图滑动搜索方式搜索道路基元, 为了避免滑动窗口只包含道路一条边而产生漏判, 应当对全图进行两次重叠扫描。

**基元判别规则:** 在判别当前滑动窗口是否是道路基元时, 依次使用梯度方向直方图、灰度直方图、梯度强度直方图进行判别, 具体处理步骤为:

1) 判断梯度方向直方图是否存在对称双峰, 若有则进行下一步, 否则减小基元尺寸继续 1, 直到中止基元尺寸  $N_2$ 。

2) 判断灰度直方图是否存在单一主峰, 若有则进行下一步, 否则减小基元尺寸返回 1。

3) 判断梯度强度直方图是否存在一非零单一主峰, 若有则判为基元, 继续下一窗口, 否则减小基元尺寸返回 1。

#### 3.2 道路段的形成

道路基元只是一些包含道路的分离的小区域, 并没有判断出整幅图像中总共有几条道路及其位置。为此需要连接那些相互重叠或相邻的道路基元以形成连续的道路段。以任意道路基元为起始点, 用所选基元的参数(窗的大小等)进行全图的连接, 直至达到图像的边缘或者是下一区域不存在道路时为止。当检测出道路段后再判断其长度, 若大于预定的最小道路长度  $L$  时, 则认为它是道路, 否则不是。

在这里  $L$  的选择取决算法所处理的图像的大小、分辨率及所期望检测出的道路的长度。图 4 显示了由道路基元确定道路段的过程。

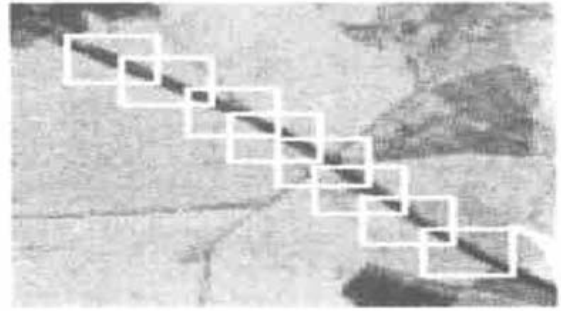


Fig. 4 Determination of road segment by road elements

#### 3.3 道路边沿的确定

在前面两步中, 只是获得了道路段, 即那些包含道路的区域。但是, 并没有获得道路的边沿位置, 采用文献[7]中所提出的算法来获得准确的道路边沿。在文献[7]中, 作者构造了一个能量函数来描述道路存在的可能性, 由于式中的 6 个参数都是经多次实验、比较实验结果后人工选择的, 所以这种算法的实用性受到了很大的限制。本文虽采用同样的确定道路边沿的方法, 但可以由选出道路段的直方图属性确定能量函数的参数, 无需人工介入, 提高了算法的自适应性和稳健性。

所用的能量函数如下:

$$E_i = \alpha_1 \left[ \frac{x_{i,1} + x_{i,2}}{2} - 2 \frac{x_{i-1,1} + x_{i-1,2}}{2} + \frac{x_{i-2,1} + x_{i-2,2}}{2} \right]^2 + \alpha_2 (d_i - d_{i-1})^2 + \alpha_3 \left[ \bar{u}_i - \frac{\bar{u}_{i-1} + \bar{u}_{i-2}}{2} \right]^2 + \alpha_4 (1 - z_{i,1})^2 + \alpha_5 (1 - z_{i,2})^2 + \frac{\alpha_6}{x_{i,2} - x_{i,1}} \sum_{j=x_{i,1}}^{x_{i,2}} (y_{j,i} - \bar{u}_i)^2, \quad (2)$$

式中,  $x$  为基元窗口中道路边沿的坐标;  $d$  为道路宽度;  $\bar{u}$  为道路内部平均灰度;  $z$  为存在明显边界时为 1, 否则为 0;  $y$  为道路内部像素。下标为窗口内从左到右的列号。这些参数的详细说明见文献[7]。

事实上, 从信息融合的角度来说,  $E_i$  可以看作是 6 个特征的加权融合, 只是为了实际的应用, 将它们改造成为递推式, 从而实现动态编程。下面分别简要地解释一下这 6 个参数的意义:

$\alpha_1$  表示道路的直线性;  $\alpha_2$  表示道路宽度变化对能量函数的影响;  $\alpha_3$ 、 $\alpha_6$  分别表示道路内部灰度的平稳性;  $\alpha_4$ 、 $\alpha_5$  分别表示道路内部灰度与外部背景灰度之间的差别程度。

参数的自适应取值方法:

1) 由梯度方向直方图的方差确定  $\alpha_1$

假如梯度方向直方图仅仅只有两根对称的谱线, 那么说明图像中只有同一方向的直线, 所以可以用梯度方向来描述道路的直线性, 当其方差[由(1)式拟合结果得]越小时, 则直线性越好。取  $\alpha'_1 = 1/\sigma_1$ ,  $\sigma_1$  为梯度方向直方图的拟合方差。

2) 由梯度方向直方图的对称性确定  $\alpha_2$

极端情况下, 当有两直线垂直时, 其直方图应当有两对相互对称的峰, 并且这两对峰之间相差  $90^\circ$ , 所以可以由主峰的对称程度确定  $\alpha_2$ 。方法如下:

$c_1, c_2$  表示两峰的坐标位置, 当  $|c_1 - c_2| = 16$  (64 级量化) 时,  $\alpha'_2 = 1$ ;  $|c_1 - c_2| > 10$  时,  $\alpha'_2 = 0$ ; 其余的映射在 0.1 之间。

3) 由基元的灰度直方图确定  $\alpha_3$

$\alpha_3$  表示的是一滑动窗内整体的灰度平稳性, 所以当基元灰度直方图方差越小时, 则越平稳。取  $\alpha'_2 = 1/\sigma_2$ ,  $\sigma_2$  为基元灰度直方图的拟合方差。

4) 由子图中当前处理列的灰度直方图决定  $\alpha_6$   
 $\alpha_6$  表示的是一滑动窗内每一列的灰度平稳性,

所以可以作出每一列的灰度直方图, 由它的方差决定  $\alpha'_6$ 。取  $\alpha'_6 = 1/\sigma_6$ ,  $\sigma_6$  为每一列的灰度直方图的拟合方差。

5) 由子图的梯度幅度直方图决定  $\alpha_4, \alpha_5$

$\alpha_4, \alpha_5$  表示道路内部灰度与背景灰度的差别, 这可以在梯度幅度直方图上反应出, 取  $\alpha'_4 = 1/\sigma_4$ ,  $\alpha'_5 = \alpha'_4$ ,  $\sigma_4$  为每一列的灰度直方图的拟合方差。

将  $\alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3, \alpha'_4, \alpha'_5, \alpha'_6$  作归一化处理。

$$\alpha_i = \frac{\alpha'_i}{\sum_{k=1}^6 \alpha'_k}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 6$$

来确定  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ 。

### 4 实验结果

将本文提出的算法用于美国科学家协会在因特网上提供的实际航空遥感图像, 取得了比较好的实验效果。图 5 和图 6 是其中的两个例子, 其中图 5 (a) 和图 6 (a) 为原始图像, 图 5 (b) 和图 6 (b) 为搜索出的道路基元图, 图 5 (c) 和图 6 (c) 为检测出的道路段, 图 5 (d) 和图 6 (d) 为检测出的道路边沿。

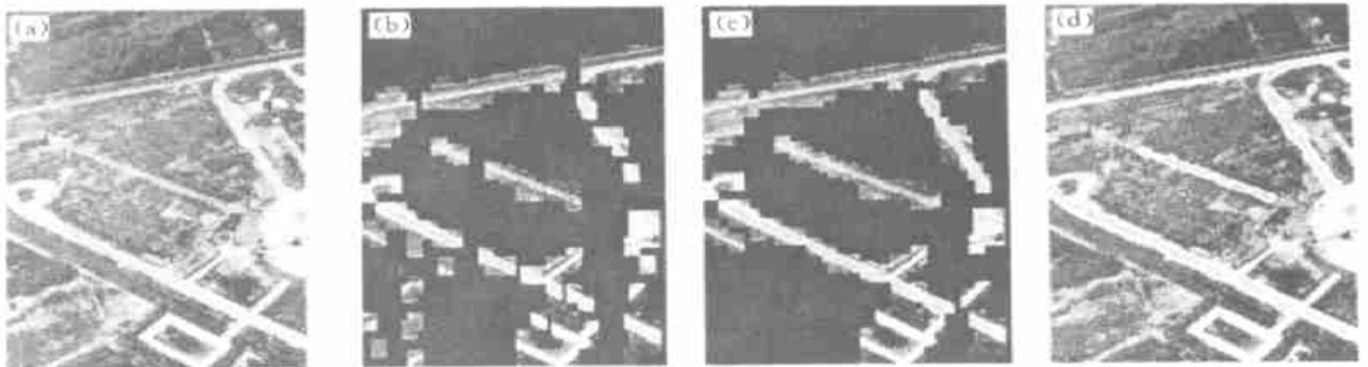


Fig. 5 Road extraction (a) original image (b) road elements (c) road (d) road edge

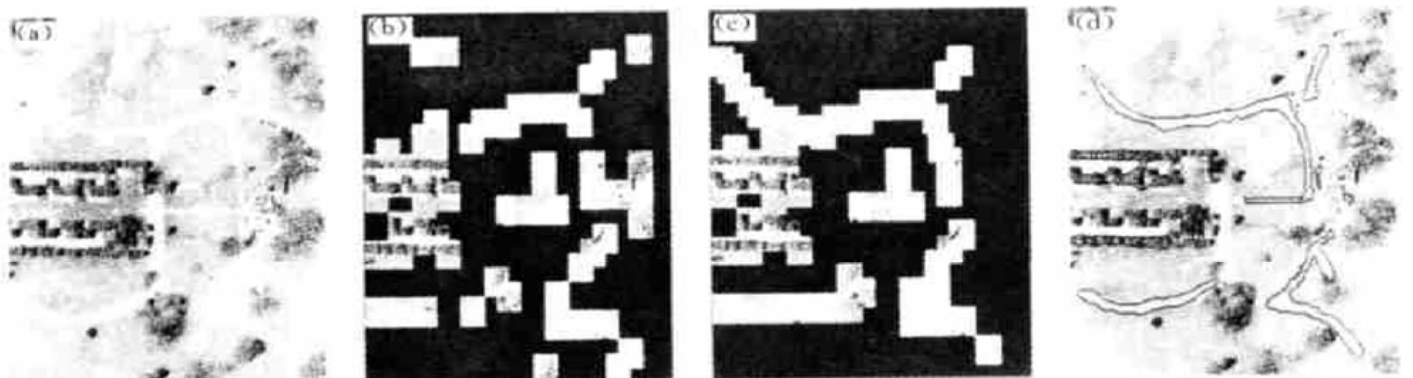


Fig. 6 Road extraction (a) Original image (b) Road elements, (c) Raod, (d) Road edge

算法中起始基元尺寸设为 32, 中止基元尺寸设为 10, 自适应确定的参数列于表 1。在中央处理器为赛扬 300、内存为 64 MHz 的计算机上对图 5 和图

6 中  $256 \times 256$  大小的图像采用文献[7]和本文的算法进行了测试, 其计算时间分别为: 图 4: 144 s、23 s; 图 5: 128 s、17 s。

Table 1 The self-adaptive parameters  $N_1=32, N_2=10$ 

| $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ | $\alpha_5$ | $\alpha_6$ |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.20       | 0.20       | 0.06       | 0.25       | 0.25       | 0.04       |
| 0.15       | 0.15       | 0.10       | 0.30       | 0.30       | 0.10       |

## 参 考 文 献

- [1] 王润生. 图像理解. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998, 88
- [2] Nevatia R, Babu K R. Linear feature extraction and description. *IEEE CGIP*, 1980, 257~ 269
- [3] Netanyahu N S, Philomin V, Rosenfeld A. Robust detection of straight and circular road segments in noisy aerial images. *Pattern Recognition*, 1997, **30**(10): 1673~ 1686
- [4] Huertas A, Cole W, Nevatia W. Detecting runways in complex airport scenes. *Computer Vision, Graphics, and*

*Image Processing*, 1990, **51**(2): 107~ 145

- [5] Geman D, Jedynak B. An active testing model for tracking roads in satellite images. *IEEE PAMI*, 1996, **18**(1): 1~ 13
- [6] Wang Fangju, Newkirk R. A knowledge-based system for highway network extraction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, **26**(5): 525~ 531
- [7] Barzohar M, Vooper D B. Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric-stochastic models and estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, **18**(7): 707~ 720
- [8] Tupin F, Maitre H. Detection of linear features in SAR images: application to road network extraction. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **36**(2): 231~ 243
- [9] Burn J R, Hanson A R, Riseman E M. Extracting straight lines. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, **PAMI-8**(4): 425~ 455

## Road Extraction by Combined Using Statistical and Structural Information

Xue Feng Wang Runsheng

(Institute of Electronic Science and Engineering, National University  
of Defense Technology, Changsha 410073)

(Received 24 August 1999; revised 10 January 2000)

**Abstract:** An algorithm for road extraction from a remote sensing image is presented. It contains three steps: the road elements and the road segments are firstly extracted by using multiple local statistic characteristics of the image, and the road boundaries are extracted by using energy function. Structural information is described by using statistical analysis in detecting the road elements instead of using lines extracted, to enhance the algorithm's robustness; the parameters of energy function are determined from the result of above calculation in detecting the road boundaries to make the algorithm's self-adaptive ability.

**Key words:** line extraction; statistical information; structural information; histogram; energy function