

文章编号:1001-1595(2008)03-0301-07

中图分类号:TP75

文献标识码:A

在高分辨率遥感影像中提取无清晰连续边缘线的道路

周绍光, 徐 勇  
河海大学 测绘工程系, 江苏 南京 210098

To Extract Roads with No Clear and Continuous Boundaries in RS Images

ZHOU Shao-guang, XU Yong  
*Department of Surveying and Mapping Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*

**Abstract:** Much attention has been paid on road extraction in RS images in recent years, and a lot of algorithms have been developed. Many existing algorithms are implemented by using the information of outside boundaries of roads, and they can be performed well if only the roads' boundaries are clear and continuous. However, in high resolution RS images there are always some parts of a city where the contrast is low. The roads' boundaries in these areas are weak, and they may even be broken as being influenced by vehicles and shadows of trees and buildings. It is very difficult to extract the roads with this type of edge lines. To solve this problem a new strategy for road extraction is presented in this paper. The first step in the proposed scheme is to produce edge line-support regions with the aid of an improved Burns' method and to link them. Dynamic programming principle is then used to detect edge lines in the linked regions, and the detected edge lines are smoothed. Based on these smoothed edge lines road segments are formed. The final output is generated by connecting road segments. Experiments on high-resolution satellite images show that our approach can extract most of the roads with weak and broken boundaries, and can get more satisfying results in high contrast areas.

**Key words:** edge detection; road extraction ;phase-grouping ;dynamic programming

**摘 要:** 现有的许多道路提取算法均利用道路的外边缘线信息来实现道路的提取,当边缘线清晰连续时,采用这些方法都可以取得很好的提取效果。不过,在高分辨率的城市遥感影像中,常常会存在一些低对比度区域,处于其中的道路边缘线非常之弱,以致难以直接检测出单个的边缘点。如果受到树木、房屋及车辆的干扰,这些原本就很弱的边缘还会发生断裂。通过现有方法提取具有如此边缘线的道路难度很大。本文给出一种旨在解决这一问题的新方法。首先借鉴相位编组原理形成边缘线支持区并对其进行连接;然后利用动态规划方法从支持区中检测出边缘线并对这些线进行平滑;最后连接由边缘线构成的道路段,得出道路提取结果。实验表明,本方法可以较好地提取出无清晰连续边缘线的道路,对于边缘对比度较大的道路则可取得更为令人满意的结果。

**关键词:** 边缘检测;道路提取;相位编组;动态规划

1 引 言

出于地理信息系统快速获取和更新数据的需要,近 20 年来,从遥感影像中提取道路已成为一个研究热点。道路的一个重要特点是具有较长的对称边缘线,已产生的许多道路提取算法都利用了这个特征,一些作者曾对此作过部分归纳<sup>[1]</sup>。文献[2]对高分辨率遥感影像和航空影像研究了

基于人工智能的自动识别道路的方法,其思想源于 Marr 的视觉理论,重点在于从链接好的边缘中产生表示道路的平行线对,以及识别平行线是否为道路。Carsten Steger<sup>[3]</sup>提出了新的可以提取不同宽度直线条带的方法,道路也被视为可提取对象之一。此算法给出了新的直线模型,可以同时提取出道路的边缘线和中心线。文献[4]介绍了一种半自动道路提取手段,系统先利用纹理

收稿日期: 2007-09-05; 修回日期: 2008-01-28  
基金项目: 国家自然科学基金项目 (40771137)  
作者简介: 周绍光(1966-),男,江苏淮阴人,博士,副教授,主要从事摄影测量与遥感和数字图像分析。  
E-mail:zhousg1966@yahoo.com.cn

滤波识别潜在的路面点,以 Canny 算子完成边缘检测,然后用改进的方法完成边缘线的细化和分裂,同时对所获取的线段进行连接,最后根据边缘线的几何特点和路面点的纹理特点进行道路跟踪。钟家强等<sup>[5]</sup>在研究道路网变化检测问题时应用边缘线构成道路网。蔡涛等<sup>[6]</sup>在每一波段中利用相位编组法检测边缘线,然后融合多波段的检测结果生成道路网。还有一些算法<sup>[7,8]</sup>在提取道路时或多或少地应用了边缘信息。

假如道路边缘质量比较理想,则上述方法均可取得较好效果。然而实际的边缘质量却是千差万别。较窄的路面只有两条外边缘线;较宽的路面上往往存在有相互平行的多条边缘线,包括两条外边缘线、分道线、路面中间的分离栏等。噪声、车辆和阴影会造成这些边缘的断裂。在低对比度区域,边缘点本身便难以检测,更不必说检测出由其构成的边缘线。提取存在断裂的弱对比度边缘线具有较大难度,现有的算法在提取具有这样边缘线的道路时往往难以取得理想效果。本文提出的新方法可以部分解决这一难题。以下说明其总体思路和简单的研究背景。

现有的研究成果表明,检测弱对比度边缘的一条有效途径是利用边缘点的梯度信息,相位编组法<sup>[9]</sup>(Burns 方法)是这一方面的代表算法。但这一方法直接用于检测道路边缘线存在两个问题:一是经常无法生成完整的边缘线支持区;二是无法从形状复杂的支持区内取得边缘线。通过反复试验,本文给出了一种改进的相位编组思路,解决了第一个问题,可以获得较长的支持区;同样经过多次的比较和筛选,本文算法决定利用 1 维动态规划原理从每一支持区中提取出边缘线,解决了第二个问题。单独使用相位编组法和动态规划法均无法自动获取道路的弱边缘线,将二者结合并加以适当改进后则可取得满意的效果,这是本方法和现有算法的最大不同之处。

相互平行的两条边缘线确定一段条带,路面可能由一条或多条并行的条带构成。先搜寻由相邻平行边缘线构成的条带,然后聚合并行的条带形成道路段,再根据外轮廓线的方向、位置及路面灰度相似情况对断裂的路段进行连接,得出最终结果。

此方法可粗分为如下几个步骤:① 获取并连接边缘线支持区;② 利用 1 维动态规划方法从支持区中获取边缘线并进行平滑;③ 搜寻道路外轮

廓线;④ 连接不同道路段,形成最终结果。

2 获取并连接边缘线支持区

2.1 初始支持区的取得

相位编组法已被证明是提取弱对比度边缘的好方法,其获取直线支持区的大致流程如下:

- 1. 计算图上各点的梯度;
- 2. 根据梯度方向将像素划分为若干类(通常分 8 类),见图 1;
- 3. 定义梯度模大于阈值的像素为边缘点;
- 4. 梯度方向处于同一区域且相互连通的边缘点构成一块原始的支持区,这样的支持区通常也称作相位编组区。

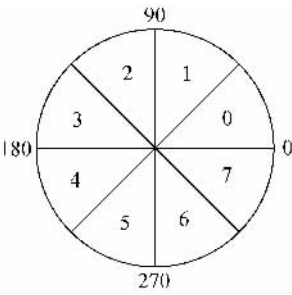


图 1 梯度方向划分

Fig. 1 The division of the gradient direction

将这一方法用于提取含有噪声的道路边缘时,必须作适当的改进。原有算法中采用两个相互垂直模板计算两个方向上的灰度差分值,进而由此两个差分值算得梯度方向。这一做法常常得不出准确的梯度方向,使得同一边缘线的支持区支离破碎。

本文用图 2 所示的 8 个模板检测边缘方向。用这些模板与原始影像进行卷积运算时,每一模板都会对与之方向一致的边缘产生最强响应。因此,用产生最大响应的模板方向作为一点的边缘方向,其垂直方向作为该点的梯度方向。

改进后算法的运行效果与原始方法有明显不同。增大模板尺寸也会影响编组区的质量。通过简单实验便可看出三者之间的差别。图 3(a)是一局部道路影像,图 3(b)是原始相位编组法产生的垂直方向的编组区,图 3(c)是用图 2 所示的 8 个模板所产生的同方向支持区。显然,支持区的完整性已有很大改进。不过断裂现象依然存在,而且图像中的一些弱对比度边缘也没有检测出来。为了进一步提高边缘线

支持区的质量,我们可以适当加长模板长度,利用邻近多点的整体作用来平滑局部噪声的影响。当采用 8 个长度为 5 的模板检测边缘方向

的同时,可得到图 3(d)所示垂直方向支持区,此图中,支持区的完整性比图 3(c)更好,同时也得出了弱对比边缘线的支持区。

$$\begin{aligned} &\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} & \frac{1}{5} \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & -2 & 0 \end{bmatrix} & \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} & \frac{1}{5} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & -2 \\ 0 & -2 & -1 \end{bmatrix} \\ &\frac{1}{4} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \frac{1}{5} \begin{bmatrix} 0 & -2 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 2 & 0 \end{bmatrix} & \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} & \frac{1}{5} \begin{bmatrix} -1 & -2 & 0 \\ -2 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

图 2 用于检测边缘方向的模板

Fig. 2 The templates used to detect the direction of the edge

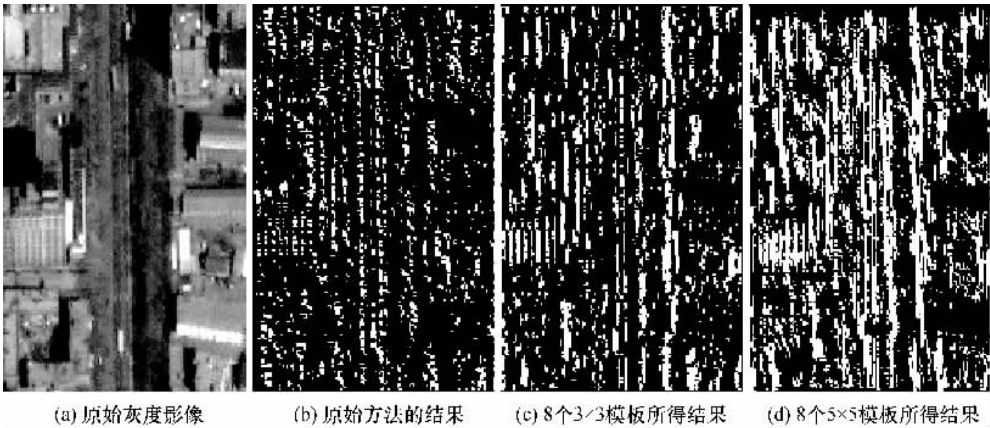


图 3 不同方法生成的支持区

Fig. 3 The line-support regions obtained with different methods

模板长度不可以太长,否则,边缘线与边缘线之间,以及周围地物与边缘线之间会相互影响,以致于无法获得有用的支持区。大量实验表明,长度为 5 的模板在大多数 IKONOS 影像中可取得相对较好的效果。

图 2 中的模板可以生成相应的 8 种不同类型的编组区。如果增加模板数,则编组区的种类随之增加,原本属于同一编组区的边缘点很可能被划归为不同的区,使得边缘线支持区断裂更严重;反之,若减少模板数,则会减少支持区的种类,原本属于不同支持区的边缘点可能被合并到同一支持区内,导致更为严重的粘连现象出现。将边缘线方向分为 8 组被证明是一种较好的折衷选择。

2.2 初始支持区的连接

用改进的方法获得的编组区仍然会存在断裂,从断裂的编组内只能获得断裂的边缘线,为了提取出完整的道路,必须对断裂的编组区域边缘

线进行连接。

由 2.1 节所得到的初始编组区中,有一部分非常短,这些短编组区有的属于道路边缘,有的则是房屋或其他地物的边缘线。通过连接初始支持区,尽可能地增加支持区的长度,可以利用长度将较多的道路边缘与其他边缘区分开来,从而有效地减少后续环节的工作量。

连接时将初始的支持区近似地看作为直线条带,求出其拟合线,利用两条拟合线的相互关系决定是否连接相应的支持区。

同一支持区内的点具有相同的梯度方向,沿此方向测量每一截面的宽度,参见图 4。将宽度大于阈值  $W_1$  截面去除,这样便去除了支持区上的不规则块(图中虚线所围区域)。用剩余点进行直线拟合,并用拟合直线与支持区相交,得到两个端点。

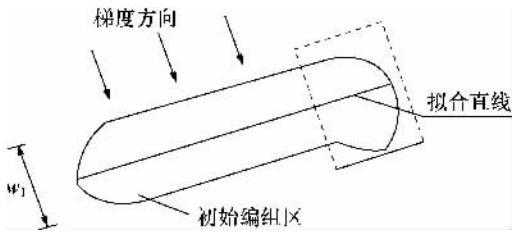


图 4 初始编组区及其拟合直线

Fig. 4 An original grouping region and its fitting line

设同方向支持区 I 和 II 的拟合直线段分别为  $l_1$  和  $l_2$ ,  $l_1 \geq l_2$ ,  $l_1$  和  $l_2$  上两个接近的端点分别为  $P_{12}$  和  $P_{21}$ , 如图 5 所示。  $P_{21}$  到  $l_1$  的垂直距离为  $dp$ , 而  $P_{21}$  沿  $l_1$  方向离开  $P_{12}$  的距离为  $da$ ,  $l_1$  与  $l_2$  间夹角为  $\theta$ , 如果满足条件: ①  $da \leq W_{da}$  和  $dp \leq W_{dp}$ ; ②  $|\theta| \leq T\theta_1$ , 则以  $P_{12}P_{21}$  为中轴宽度将  $W_1$  条状区域和支持区 I, II 标记以同一符号, 以实现对此两个支持区的连接。 根据以上原则, 连接起所有可连接的支持区。

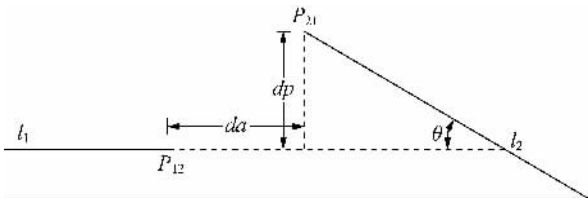


图 5 两条拟合直线间的关系

Fig. 5 The relationship between two fitting lines

有些编组区形状较复杂, 与直线条带相去甚远, 此时的拟合线已不能表达区域的方向和位置特点, 本步骤内无法连接这些编组区。

3 边缘线搜索及平滑

前面已提及边缘线支持区形状不规则的问题, 连接后的支持区更长, 弯曲程度可能更为严重, 不同位置的宽度相差可能很大, 不规则的附着依然存在。 毫无疑问, 直线或曲线拟合方法无法从这样的支持区内得到准确的边缘线。 利用 1 维动态规划方法可以从中搜索出全局最优的道路边缘线。

动态规划原理常常被应用于提取边缘线, 它可以在总体最优化的原则下提取出弱边缘线, 不过大多用于半自动提取的场合<sup>[10,11]</sup>, 也即由人工定出首尾两点, 然后通过迭代搜索出两点之间的边缘线。 此方法计算耗时较多, 将搜索区域限制在边缘线支持区内极大地减弱了这一致命缺点。

经过适当改进, 动态规划法可以从支持区内自动提取出边缘线。

以动态规划方法检测边缘线, 必须解决好三个关键问题, 一是确定目标函数, 二是划分阶段, 三是确定起点和终点。

目标函数的确定以代价阵为基础, 代价阵中每个元素值就是该位置的代价值, 以边缘线上各点的累加代价值作为目标函数。

假若一支持区的水平投影比垂直投影长, 则称之为近水平的, 否则称之为近垂直的。 在近水平支持区内搜索边缘线时, 以每一列作为一个阶段, 而对近垂直支持区则以每一行作为一个阶段。

利用动态规划方法检测边缘线的实质就是找出两点之间的最小代价路径, 这两个点必须事先确定。 前已提及, 现有方法中, 多数通过人工手段定出边缘线的首尾两点。 本文以两个虚拟点  $(x_0, y_0)$ ,  $(x_N, y_N)$  作为起始点和终点。 假定起点  $(x_0, y_0)$  位于第一阶段之前, 它与第一阶段内所有点均相邻, 自身的代价值等于 0; 假定终点  $(x_N, y_N)$  位于最后一个阶段之后, 与最后一个阶段内的所有点均相邻, 自身代价值为 0。

在一个支持区内搜索一条边缘线的过程为

1. 根据

$$C(x,y)=\max(G)-G(x,y) \tag{1}$$

计算代价阵  $C$  中的每一个元素值,  $G(x,y)$  是原始影像的梯度图  $G$  中的相应元素,  $\max(G)$  是  $G$  中的最大值。

2. 初始化最小累加代价阵

$$cum_0(x,y)=\begin{cases} 0 & x=x_0,y=y_0 \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \tag{2}$$

3. 令  $k$  为已搜索完的阶段数, 由递推关系

$$cum_{k+1}(x,y)=\min[C(x,y)+cum_k(i,j)] \quad (i,j) \in N(x,y) \tag{3}$$

计算  $k+1$  阶段的各点的累积代价,  $N(x,y)$  是点  $(x,y)$  的邻域,  $C(x,y)$  是该点的代价值。 本步骤反复进行, 直到计算完终点  $(x_N, y_N)$  的累积代价值为止。

4. 以点  $(x_N, y_N)$  作为首个确认的边缘点, 重复以下操作: 在上一阶段中, 寻找与已确认边缘点邻接且累加代价值最小的点作为下一个边缘点。 此步骤进行到起点  $(x_0, y_0)$  为止。 所有找出的点构成本支持区内的边缘线。

搜索完一条边缘线后,将相应的支持区去除,继续从下一个支持区中搜寻另一条边缘线。

车辆、噪声及阴影使得检测出的边缘线甚为粗糙,这样的形状与道路的实际边缘显然不相似。为了后续处理的方便,采用滑动平均法对其进行修匀。平滑时只用到部分边缘点,经过反复试验后的修匀方案为:① 在原有边缘线上以间隔  $W$  选择一系列离散点;② 对所选的点进行五点滑动平均。

4 道路段的形成

顺次以当前最长边缘线(设其长度为  $p$ )为中轴建立宽度为 3 像素的检测窗口,见图 6 所示,在当前边缘线两侧  $W_r$  的搜索区内逐像素地平移窗口,以  $i$  表示窗口经过的任一位置,计算每一位置上落入窗口内的边缘点数目  $S_i$ 。

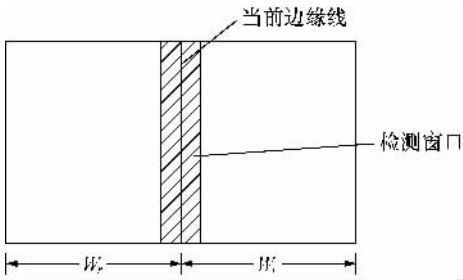


图 6 平行边缘线的搜索区域

Fig. 6 The area for searching parallel edges

若  $(S_i = \max \{S_{i-2}, S_{i-1}, S_i, S_{i+1}, S_{i+2}\}) \& (S_i \geq p/2)$ , 则认为  $i$  位置处存在与当前边缘线平行的有效边缘线。路面较宽时,往往会检测出多条相互平行的边缘线。

假如相邻两有效边缘线间的图像的灰度方差不大于  $G_v$ ,且其灰度均值处于区间  $[G_{\max}, G_{\min}]$  之内,则认为其为路面条带。由当前边缘线位置出发向两边合并灰度均值之差小于  $G_v$  的路面条带,确定出本段道路的外轮廓位置。两条外轮廓线所包围的区域即为本段道路段。道路段内所包含的边缘不再参与后续计算。

5 道路段的连接

利用轮廓线拆分技术将外边缘线表示成分段直线。按照总长度大小依次选择每一条道路段作为当前道路段。延长当前道路段,如图 7 所示。如果在给定距离  $D_f$  之内接触到另一道路段的端部,且二者之间满足:① 边缘线交角  $|\theta| \leq T\theta_2$ ;

② 交叠宽度  $O_L$  不小于较窄路宽的一半;③ 端部灰度均值之差小于  $G_v$ ,则将二路段连为一体。

按照这一原理连接起所有可连接的道路段。

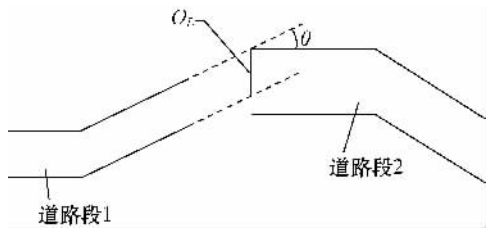


图 7 道路段的连接

Fig. 7 Connection of road segments

6 试验

算法完成后,对许多影像进行了试验。本节以两幅 IKONOS 全色影像为例,展示算法的效果。进行这些试验时,  $W_{da} = 7, W_{dp} = 2, W = 5, D_f = 20, T\theta_1 = 6^\circ, T\theta_2 = 4^\circ$ , 这几个值经过反复试验、调整取得,且在多次试验中未作改变;通过量测最宽路面的宽度,取定  $W_r = 18$ ;与路面灰度有关的几个阈值,是在观测路面的最大值和最小值后,通过调整和比较获得的,具体为:  $G_v = 5, G_{\max} = 10, G_{\min} = 3$ 。

第一幅影像中的道路情况非常复杂,既有较宽的主干道,更多的则是居民区内的小路。主干道上有多条边缘线,小路的边缘处往往对比度很弱,而且经常发生断裂,部分边缘线呈弧状。应用本文算法后,提出了其中的大部分道路,提取的结果见图 8 所示。作为参照,同时也给出了目视解译的结果。原始图像中,有些很像小路的区域实际上是建筑物间的空地或是一片树木。对这一幅影像,用原始的相位编组法取得的边缘线,以及 canny 算子得出的边缘线见图 9 所示。可以看出许多道路边缘线无法检测出来,也从反面说明本方法的有效性和可行性。

第二幅试验图像中道路边缘清晰,路面灰度比较均匀,提取结果与目视解译结果见图 10。显然,错误很少。试验时,太细的条带没有作为道路输出。

按照文献[12]给出的指标定义:

$$\text{准确度} = \frac{\text{正确提取的线性目标长度}}{\text{线性目标的总长}}$$

两幅影像的道路识别准确度分别为 80.3%, 90.4%。

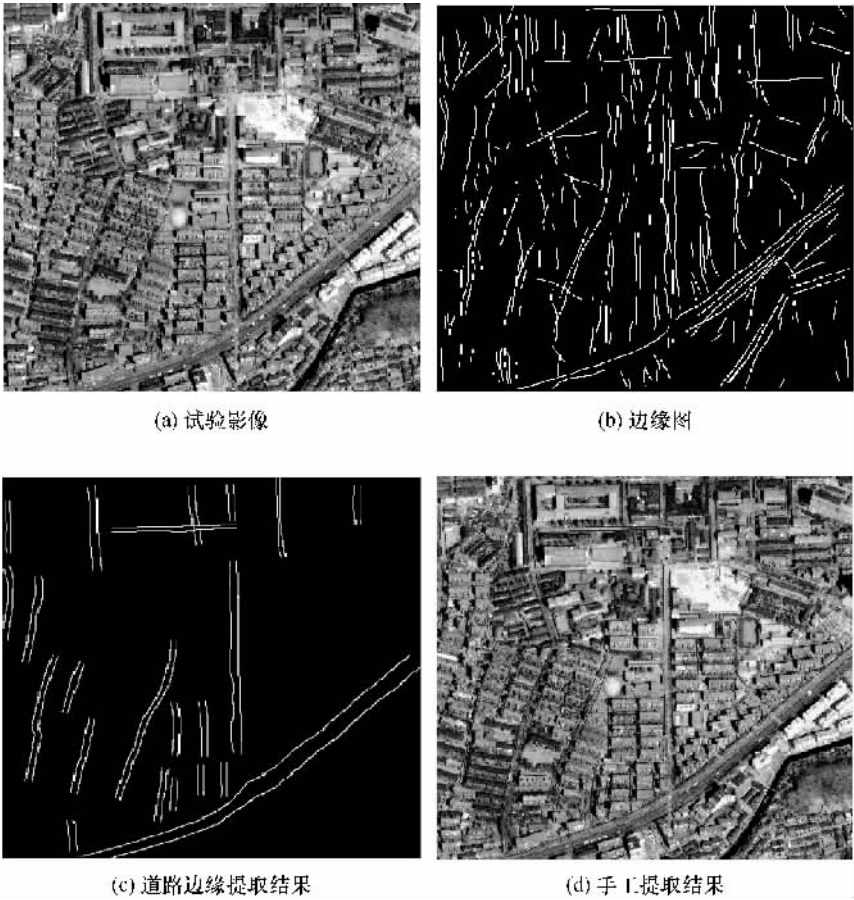


图 8 对影像 1 的实验结果  
Fig. 8 The experimental result of image 1

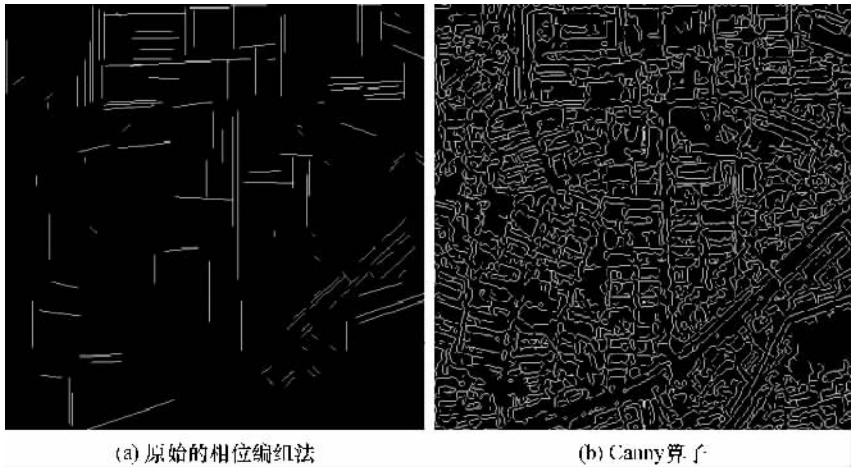


图 9 用其他方法从影像 1 提取的边缘线  
Fig. 9 Edge lines extracted in image 1 using other methods



图 10 对影像 2 的试验结果

Fig.10 The experimental result of image 2

## 7 结 论

相位编组法利用相位信息和像素间的连通关系可得出弱边缘线的支持区,但无法从中提取出非直线边缘线;动态规划方法可在总体最优的准则下提取出任意形状的弱边缘线,但无法在大范围内自动提取出多条边缘线。本文提出的新方法综合了二者的优点,它利用相位编组原理获取每条边缘线的支持区,用动态规划思想在每一支持区内自动搜索一条边缘线,经过适当的连接和组合构成道路。用新方法对两幅 IKONOS 影像进行了试验,结果表明本算法在周围地物密集、噪声大、对比度小且边缘线断裂严重的不利情况下可提取出大部分道路,而对边缘清晰的道路影像则有非常好的提取效果。

## 参考文献:

- [1] SHI Wen-zhong, ZHU Chang-qing, Wang Yu. The Review and Prospect of Extraction Road Features from Remote Sensing Images[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30 (3): 257-261. (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[J]. *测绘学报*, 2001,30(3): 257-261.)
- [2] TRINDER J, WANG Y, SOWMYA A, *et al.* Artificial Intelligence in 3D Feature Extraction[A]. *Automatic Extraction of Man-made Objects from Aerial and Space Images(2)* [C]. Basel, Birhaeuser Verlag, 1997. 257-265.
- [3] STEGER C. An Unbiased Detector of Curvilinear Structures[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(2): 113-125.
- [4] XIAO Yong-guan, TAN Tiow-seng, TAY Seng-chuan. Utilizing Edge to Extract Roads in High-resolution Satellite Imagery[A]. *ICIP[C]*. [s. l.]:[s. n.], 2005. 637-640.
- [5] ZHONG Jia-qiang, WANG Run-sheng. A Road Network Change Detection Algorithm Based on Linear Feature[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(1): 27-32. (钟家强,王润生.一种基于线特征的道路网变化检测算法[J]. *遥感学报*, 2007, 11(1): 27-32.)
- [6] CAI Tao, WANG Run-sheng. An Algorithm for Extracting Road Network from Multi-band Remote Sensing Images[J]. *Journal of Software*, 2001, 12(6): 943-948. (蔡涛,王润生.一个从多波段遥感图像提取道路网的算法[J]. *软件学报*, 2001, 12(6): 943-948.)
- [7] BARZO HAR M, COOPER D B. Automatic Finding of Main Roads in Aerial Images by Using Geometric-stochastic Models and Estimation[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18(7): 707-720.
- [8] PETERI R, CELLE C, RANCHIN T. Detection and Extraction of Road Networks from High Resolution Satellite Images[A]. *IEEE International Conference on Image Processing[C]*. Barcelona: [s. n.], 2003. 301-304.
- [9] BURNS J, HANSON A, RISEMAN E. Extracting Straight Lines[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(4): 425-455.
- [10] POPE D L, PARKER D L, GUSTAFSON D E, *et al.* Dynamic Search Algorithms in Left Ventricular Border Recognition and Analysis of Coronary Arteries[A]. *IEEE Proceedings of Computers in Cardiology[C]*. [s. l.]:[s. n.], 1984. 71-75.
- [11] WANG He, ZHUANG Tian-ge, JIANG Da-zhong, *et al.* Rapid Optimal Edge Detection for Medical Images [J]. *Chinese Journal of Computers*, 1997, 20(12): 1 063-1 068. (王 合,庄天戈,将大宗,等.医学图像的快速最优边缘检测[J]. *计算机学报*, 1997, 20(12): 1 063-1 068.)
- [12] SHI Wen-zhong, ZHU Chang-qing. The Line Segment Match for Extracting Road Network from High-resolution Satellite Images[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(2): 511-514.

(责任编辑:雷秀丽)