

# 一种基于改进 path opening 的道路提取新方法

王 双 曹 国

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)

**摘 要** 提出了一种基于改进 path opening 的高分辨率遥感影像道路提取新方法。为检测曲率较大的道路,构造了新的邻接图;为有效提取有损或有部分遮挡的道路,将 path opening 算法中的最大路径长度与区域的几何特征相结合,建立了道路区域的判定准则,减少了人工干预。通过多组实验结果证明,该方法对于不完整道路的提取有更好的效果。

**关键词** Path opening, 有损道路, 道路提取, 几何特征

**中图分类号** TP751.1 **文献标识码** A

## New Method for Road Extraction Based on Modified Path Opening Algorithm

WANG Shuang CAO Guo

(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract** A novel method for extracting roads from very high resolution remote sensing images based on modified path opening algorithm was proposed in this paper. We constructed new adjacency graph to detect roads with larger curvature at first. Then, we combined the length of the longest path in path opening algorithm with the geometrical feature of the extracted area in order to effectively detect partly damaged or occluded roads. Finally, decision rule was established, which can automatically set the parameter values for road extraction. Experimental results show that the proposed method can greatly improve the extraction result for incomplete roads.

**Keywords** Path opening, Damaged roads, Road extraction, Geometrical feature

## 1 引言

道路信息是一种重要的基础地理信息,从遥感影像中提取道路网络一直是国内外众多学者研究的热点,它对 GIS 数据的更新、影像匹配、目标检测以及灾害监测等具有重要的应用价值。中、低分辨率遥感图像已不适用于高精度的道路提取要求,随着遥感技术的发展,高分辨卫星遥感影像得到了深入应用。

目前道路提取的方法主要分为半自动和自动两大类<sup>[1-3]</sup>。半自动道路提取即利用人机交互的形式进行特征提取和识别,先由人工给出初始道路点或提供初始方向,再交由计算机进行处理识别,同时需要进行适当的交互。半自动道路提取方法主要包括模板匹配法<sup>[4-6]</sup>、Snake 方法<sup>[7-9]</sup>和基于概率论的方法<sup>[10]</sup>等。自动道路提取是遥感图像中道路提取的发展方向 and 最终目标,全自动提取方法往往是多种方法的综合运用,主要有形态学方法<sup>[11,12]</sup>、统计学习法<sup>[13-16]</sup>、几何统计模型法<sup>[17]</sup>、地图匹配法<sup>[18]</sup>等。由于高分辨遥感影像的复杂性,目前还没有一套功能完善的系统能让计算机自动识别并精确提取道路网<sup>[3]</sup>。

路径形态学是在数学形态学的基础上发展而来的<sup>[19-21]</sup>。形态学的基本思想是利用具有一定形态的结构元素,去量测

和提取图像中的对应形状,以达到对图像分析和识别的目的。形态学运算的关键是结构元素的选取。路径形态学<sup>[19]</sup>针对具有狭长、线状结构的物体,构造了一组由细长、定向的结构元素组成的路径算子。与传统的直线型结构元素相比,路径算子的特点在于不是完全笔直的,它们能够灵活地适应直线和略微弯曲的结构。文献[20]通过设定期望路径长度滤除不满足条件的像素点,并为了增加对噪声的鲁棒性,提出了不完整路径算子,以忽略路径上的噪声。使用不完整路径算子的时空复杂度较高,且可能会保留路径两旁的噪声像素。文献[21]将路径形态学方法用于高分辨率遥感图像道路网的提取中,使用粒度测量为每个像素构造一个特征向量,记录通过该像素的最大路径长度,最后设定阈值得到道路信息。文献[22]提出了一种基于 Hough 变换和路径形态学的道路提取方法,根据 Hough 变换检测的结果构造邻接图,克服了路径形态学提取的道路边缘多毛刺的缺点,但对于弯曲较大的道路无法提取。目前路径形态学方法主要应用于完整连续道路的提取,通过设定路径长度阈值滤除噪声像素,保留道路信息。

本文针对已有路径形态学方法无法检测出曲率较大道路的问题,改进了邻接图的构造,并针对有损或有部分遮挡道路的提取,结合高分辨率遥感影像中道路的几何特征,提出了一

到稿日期:2013-04-19 返修日期:2013-06-24 本文受国家自然科学基金项目:基于曲线演化理论的遥感影像变化检测研究(61003108)资助。

王 双(1988-),女,硕士生,主要研究方向为图像处理、模式识别,E-mail:wanguo88@gmail.com;曹 国(1977-),男,博士,副教授,主要研究方向为图像处理、模式识别和计算机视觉。

种基于改进 path opening 的道路提取新方法。通过多组实验结果证明,该方法对于不完整道路的提取有较好的效果。

## 2 path opening

文献[19]详细地阐述了 path opening 理论,本节对该方法做简要的介绍。

### 2.1 定义

在二值图像域  $E$  上定义邻接关系  $x \mapsto y$ ,表示从  $x$  到  $y$  存在一条边。这种关系“ $\mapsto$ ”是非对称的,即它是有方向性的,由图像域  $E$  中的像素点与邻接关系“ $\mapsto$ ”构成一幅有向图。如果  $x \mapsto y$ ,称  $y$  为  $x$  的后继点, $x$  为  $y$  的前继点。利用这种邻接关系,在图像域  $E$  上定义膨胀运算:

$$\delta(\{x\}) = \{y \in E | x \mapsto y\}$$

即  $E$  上子集  $X$  的膨胀由所有  $X$  中结点的后继点组成。如图 1 所示, $b_1, b_2, b_3$  为  $a$  的后继结点,则  $\delta(\{a\}) = \{b_1, b_2, b_3\}$ 。

相应地, $a_1, a_2, a_3$  是  $b$  的前继结点, $\delta(\{b\}) = \{a_1, a_2, a_3\}$ 。

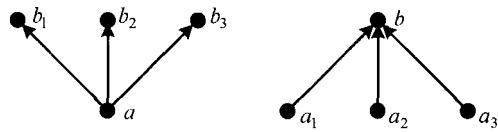


图1 邻接关系

若  $a_k \mapsto a_{k+1}$ ,则称  $a = (a_1, a_2, \dots, a_L)$  为长度为  $L$  的  $\delta$ -路径,相反称  $\bar{a} = (a_L, a_{L-1}, \dots, a_1)$  为长度为  $L$  的  $\bar{\delta}$ -路径。给定  $E$  中的路径  $a$ ,定义  $\sigma(a)$  为路径元素的集合:

$$\sigma(a_1, a_2, \dots, a_L) = \{a_1, a_2, \dots, a_L\}$$

用  $\Pi_L$  表示所有长度为  $L$  的  $\delta$ -路径的集合,把包含在  $E$  的子集  $X$  中长度为  $L$  的  $\delta$ -路径的集合定义为  $\Pi_L(X)$ ,即

$$\Pi_L(X) = \{a \in \Pi_L | \sigma(a) \subseteq X\}$$

定义  $\alpha_L(X)$  为  $X$  中长度为  $L$  的所有路径元素的并集:

$$\alpha_L(X) = \bigcup \{\sigma(a) | a \in \Pi_L(X)\}$$

把  $\alpha_L(X)$  称作 path opening,即路径开运算。图 2 表示长度为 6 的路径开运算的结果,即  $\alpha_6(X)$ ,图中黑点表示  $E$  中的子集  $X$ 。路径闭运算(path closing)与开运算是互补定义的,即调换前景和背景,对图像做路径开运算等价于闭运算。下面只讨论 path opening。

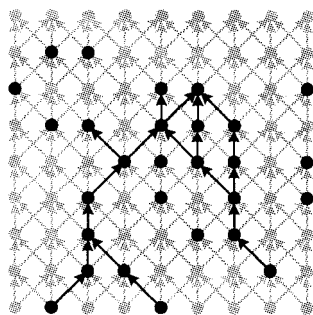


图2 路径开运算

### 2.2 邻接图

路径形态学运用一组路径算子作为结构元素对图像进行 path opening,路径算子在邻接图上定义,它们依赖于图的连接性,因此邻接图应该反映应用需求的各种路径。分别定义南北、东西、西北-东南以及东北-西南 4 个方向的邻接图,如

图 3 所示。以图 3(a)为例,路径以北为主方向,同时每个像素点分别在  $45^\circ, 90^\circ$  和  $135^\circ$  方向共有 3 个邻接点,即路径可在  $45^\circ$  到  $135^\circ$  之间任意延伸。以此邻接图定义的路径算子进行 path opening,可以保留主方向向北、局部允许在  $45^\circ$  到  $135^\circ$  之间弯曲的非笔直路径。图 2 就是根据图 3(a)所示的邻接图进行 path opening 的结果。用这 4 个邻接图分别做路径开运算,并将得到的各方向子图进行合并,就保留了图像中所有可能方向的路径。

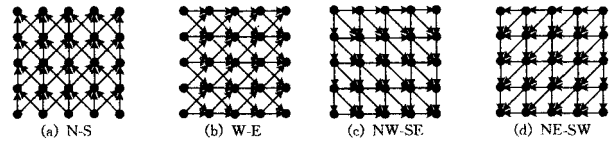


图3 4个方向的邻接图

由上述定义的邻接图可以看出,若不考虑边界点,每个像素有 3 个邻接点,则从任意一点开始,都有  $3^{L-1}$  个不同的长度为  $L$  的路径。路径开运算  $\alpha_L$  实际上是用这些路径作为结构元素进行形态学开运算的集合,显然计算全部路径算子是低效的。Talbot 和 Appleton<sup>[20]</sup> 提出了一种有效的分解算法,使 path opening 算法的时间复杂度为  $O(L)$ 。

## 3 基于改进 path opening 的不完整道路提取算法

在高分辨率遥感影像中,道路表现为路面灰度均匀、具有稳定宽度、曲率变化缓慢的狭长区域。路径形态学方法构造的细长、定向的路径算子能够灵活地适应直线和略微弯曲的结构,而这恰好符合上述道路特点,因此 path opening 方法被应用于高分辨率遥感图像中道路网络的提取<sup>[21]</sup>,并取得了较好的效果。

本文对 path opening 方法<sup>[20]</sup>做出了改进,针对无法检测弯曲较大道路的问题,首先改进了邻接图,然后把路径算子长度与区域的几何特征相结合作为判定道路区域的准则,将其用于有损或有遮挡道路中提取中。

### 3.1 改进的邻接图

path opening 方法根据图 3 所示的邻接图分别定义 4 个方向的路径算子,可得到所有方向的道路,但由于它限制了道路只能在主方向两侧  $45^\circ$  之间即  $90^\circ$  的锥角内延伸,对于有较大弯曲的道路将无法检测,因此本文对邻接图做出了改进,如图 4 所示。

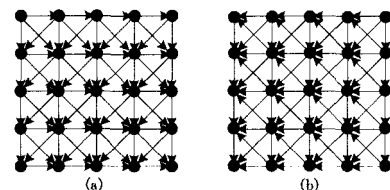


图4 改进的邻接图

从图 4 可见,在本文构造的邻接图中,除了边界点,每个像素都有 4 个邻接点,即在任意一点,路径算子可以在  $135^\circ$  的锥角内任意延伸。相比于原始的 path opening 算法,根据这两个邻接图定义的路径算子进行 path opening 运算,能够检测出曲率更大的道路,且这些路径算子已经包括了各个方向的路径。

本文分别对曲率较大的道路及交叉道路进行了道路提取

实验,如图5、图6所示。其中图5(c)、6(c)为利用图3所示的邻接图构造路径算子的结果,图5(d)、图6(d)则采用了本文改进的邻接图。从实验结果可以看出,利用本文改进的两个邻接图构造路径算子进行 path opening 运算,对于曲率较大道路的提取有更好的效果,并且与图3中4个方向的邻接图一样,可以检测出各个方向的道路。

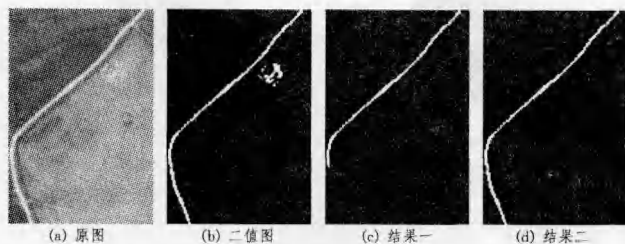


图5 弯曲道路的提取

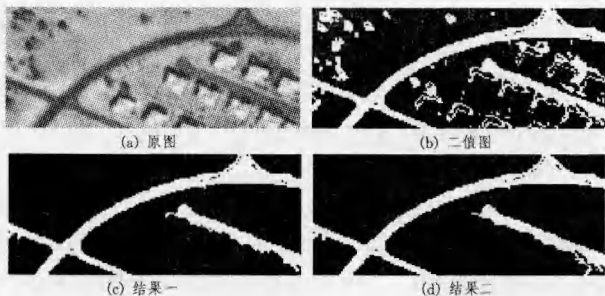


图6 交叉道路的提取

### 3.2 路径开运算用于道路提取

路径算子是由具有给定长度、定向、灵活的结构元素组成,邻接图定义了算子的方向,而算子的长度决定了最终保留的对象大小。若路径算子的长度为  $L$ ,则将滤除长度小于  $L$  的对象,保留长度大于或等于  $L$  的区域。随着路径算子长度不断增大,图像中小于相应长度的对象依次被过滤,最终保留大于路径算子的对象。由此可以得出,当路径算子的长度由  $L$  增加到  $L+1$  时,被过滤区域的最大路径长度为  $L$ 。在遥感影像的道路提取中,由于道路区域的路径长度比非道路噪声区域要大,常以道路区域的路径长度作为阈值  $L_{min}$ ,保留各个方向、路径长度等于  $L_{min}$  的道路信息,滤除其它非道路干扰区域。

本文重点考虑不完整道路的提取,比如道路被树木阴影遮挡或因泥石流等地质灾害冲毁,造成原本完整连续的道路被截成若干段,且有缺失;同时由于遥感影像背景复杂,可能存在大面积的噪声。在这种情况下,各个路段有不同的路径长度,且噪声区域的路径长度可能会大于道路区域的长度,因此只利用路径长度来滤除噪声,需要更多的人工干预以选取合适的阈值,且无法保证在完全过滤噪声的同时保留全部道路信息。

### 3.3 不完整路径开运算

由于路径上可能包含噪声像素,为了减少 path opening 方法对噪声的敏感度,文献[20]提出了不完整路径算子,该算子加入了噪声容差  $K$ , $K$  表示在路径上允许忽略的噪声像素个数,即在长度为  $L$  的路径上的任意位置(包括路径两端),最多有  $K$  个像素缺失。显然,相同长度的不完整路径算子集合比完整路径算子的集合要大得多。文献[20]给出了不完整

路径开运算(IOPO)的算法步骤,并分析了其时间复杂度。IOPO算法的运行时间近似为有序完整路径开运算(OPO)的  $10 * K$  倍,且需要花费与  $K$  成比例大小的存储空间,以统计噪声容差  $0 \sim K$  下通过各个像素的路径长度。

将不完整路径开运算用于遥感图像中有损或有遮挡道路的提取,存在以下3个问题:(1)与OPO相比,IOPO算法的时间复杂度和空间复杂度较高,难以应用于大尺寸的遥感影像;(2)需要估计道路损毁段或遮挡段的长度,以此确定噪声容差值  $K$ ;(3)由于不完整路径算子允许路径上存在若干噪声像素,以其进行开运算很容易将路径旁的噪声保留下来,如文献[20]中图7(e)所示。由于遥感影像背景的复杂性,随着噪声容差  $K$  值的增大,在提取道路区域的同时,可能将更多非道路区域的噪声保留下来。

### 3.4 建立道路区域判定准则

本文针对有损或有部分遮挡道路的提取,巧妙地将 path opening 算法中的最大路径长度  $\lambda$  与区域的几何特征相结合,并建立道路区域的判定准则。考虑以下3个参数:

$$s = \sqrt{\text{area}} / \text{perm}$$

$$t = \text{perm} / \lambda$$

$$r = 2 * \text{area} / \lambda$$

其中,  $\text{perm}$  为区域周长,  $\text{area}$  为区域面积,  $\lambda$  为区域的最大路径长度,则  $s$  为形状指数,道路的形状指数  $s$  通常小于 0.1。  $t$  为区域周长与路径长度的比值,根据所使用的邻接图和道路的几何特征确定  $t$  值。本文使用如图4所示的邻接图,可以得出道路区域的最大路径长度近似等于道路边长的两倍。例如如图7中黑点表示道路区域的像素点,根据图4(b)所示的邻接图定义路径算子,从图中可以看出,黑色实线为该区域的最大路径,长度为12,道路的边长为6。根据道路狭长的几何特征,道路区域的周长近似为边长的两倍,则周长近似等于最大路径算子的长度。因此  $t$  值近似为1,而  $r$  值近似等于道路的宽度。经过实验验证,道路区域的周长与最大路径长度的比值一般在 0.8~1.2 之间,道路宽度可以通过图像分辨率以及感兴趣的实际道路宽度得到,根据道路宽度确定  $r$  的范围  $r_{min} \sim r_{max}$ 。由此,建立如下判定条件:

$$s \leq 0.1$$

$$0.8 \leq t \leq 1.2$$

$$r_{min} \leq r \leq r_{max}$$

在实际应用中,先求得通过各个像素的最大路径长度,并按照路径长度值将像素分类,区域的最大路径长度即为组成该区域像素的路径长度。在得到各区域的最大路径长度之后,分别判断各区域的  $s$ 、 $t$ 、 $r$  值是否满足以上条件,满足则判定此区域为道路区域,否则判定其为非道路区域。

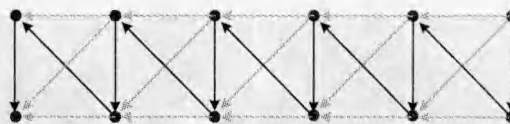


图7 道路边界与最大路径算子

## 4 实验结果与分析

本文基于改进的 path opening 方法对高分辨率遥感影像进行了道路提取实验,主要针对有损或有部分遮挡道路的提取,实验结果如图8—图10所示。

图 8(a)和图 9(a)是两幅灾后图像,其中有一段道路被泥石流冲毁(图中用蓝色矩形框标记),造成损毁段的路面灰度发生了变化。本文首先通过粗略估计道路的灰度范围,对道路进行阈值分割,得到二值图像 8(b)、图 9(b);然后分别运用 OPO、IOPO 算法<sup>[20]</sup>以及本文改进的方法对二值图像进行处理,结果如图 8(c)~图 8(h)、图 9(c)~图 9(e)所示。

(1)从图 8(a)中可以看出,道路在某处曲率较大(图中用红色椭圆标记),图 8(c)为使用图 3 所示的邻接图进行 path opening 的结果,路径长度阈值  $L_{min}$  设为 700。如图 8(c)中红色椭圆标记所示,根据该邻接图定义的路径算子,对于曲率较大的道路将无法检测。

(2)图 8(d)~(e)使用本文改进的邻接图定义路径算子,将曲率较大的道路完整地检测了出来,但难以确定路径长度阈值。如图 8(d)所示,当路径长度阈值  $L_{min}$  等于 1000 时, path opening 保留了全部道路区域,但同时也留下了大量的噪声像素;为了减少噪声,取  $L_{min}$  为图像中的最大路径长度 1471,只能保留一段道路区域,如图 8(e)所示。图 9(c)为  $L_{min}$  取 300 时的结果,同样保留了路径长度较大的非道路区域。路径长度阈值的取值不仅需要人工干预,而且很难得到理想的结果。

(3)图 8(f)~图 8(g)、图 9(d)是对图像做不完整路径开运算的结果,其中图 8(f)采用锥角为  $90^\circ$  的原始邻接图定义路径算子,图 8(g)、图 9(d)采用本文改进的邻接图。可见无论选取何种邻接图,由于道路两旁或图像内存在大片密集的噪声像素,利用不完整路径算子进行开运算,虽然可以得到完整的道路区域,但同时也保留了大量的噪声,且这些噪声尤其是道路两旁的噪声,难以通过后续处理去除。

(4)图 8(h)、图 9(e)为使用本文改进的 path opening 方法的结果。根据图像分辨率以及实际道路的宽度确定  $r$  值的估计范围,图 8 中  $r$  为 9~11,图 9 中  $r$  为 5~7。对比图 8(h)与图 8(c)可见,本文构造的邻接图能够检测出曲率较大的道路,如图 8(h)中红色椭圆标记所示。从最终结果可以看出,本文提出的方法不仅可以在滤除全部噪声的同时检测出完整的道路信息,而且所需的人工干预较少。

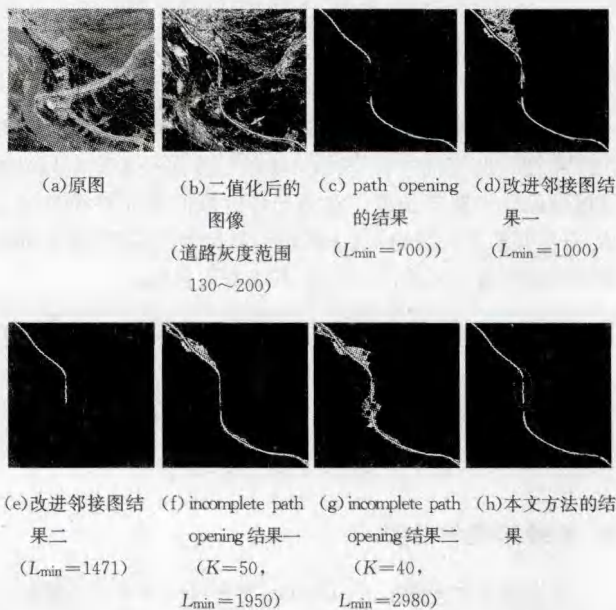


图 8 道路提取实验(一)

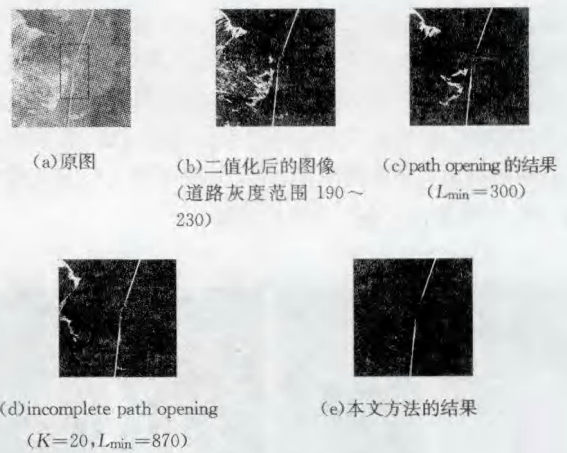


图 9 道路提取实验(二)

图 10(a)是一幅 RGB 图像,道路区域有多处被树木遮挡(图中用红色椭圆标记),造成了道路不连续,图 10(b)是将其转换为灰度图像后再进行二值分割的结果,道路的灰度范围为 100~140。

图 10(c)~图 10(e)是路径长度阈值  $L_{min}$  取不同值进行 path opening 的结果,从图中可以看出,由于噪声区域(用蓝色矩形框标记)的路径长度比中间一段道路区域(用红色矩形框标记)的路径长度要大,因此当阈值  $L_{min}$  取得过小时,不能完全滤除噪声像素;而当阈值取得过大时,滤除噪声的同时,道路区域也被过滤掉了。可见在这种情况下根本无法选取合适的阈值。

图 10(f)~图 10(g)是不完整路径开运算的结果,图 10(f)由于选取的噪声容差值  $K$  小于道路缺失段的长度,因此有部分道路没有得到。图 10(g)将噪声容差设为 60,提取出了完整的道路,从结果可以看出,虽然道路两旁仍然保留了少量噪声,但对于这种不存在大片密集噪声的图像而言, incomplete path opening 运算可以取得较好的效果。然而该方法不仅需要人工判断道路被遮挡段的长度,选取合适的噪声容差,而且适应性不强,例如对于存在密集噪声的图像进行处理会保留难以去除的噪声,如图 8(f)~图 8(g)、图 9(d)所示。

图 10(h)为使用本文改进方法的结果,求得通过各个像素的最大路径长度,满足道路区域判定条件的即为道路信息,其中道路宽度的估计值  $r$  为 11~19。经过比较可以看出,本文的方法既完全滤除了噪声,又保留了全部道路信息,且不需要人工干预选取参数阈值,鲁棒性更强。

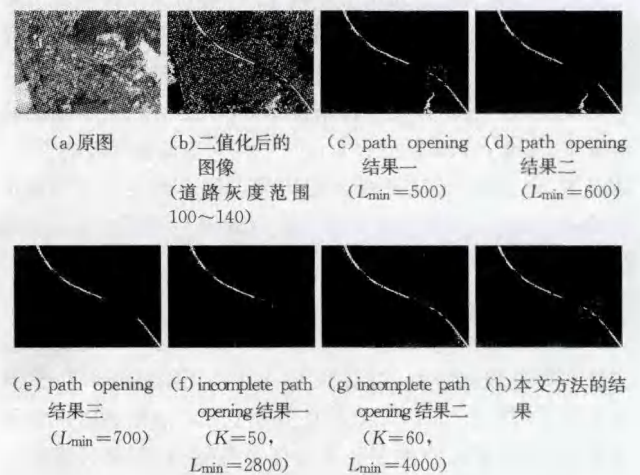


图 10 道路提取实验(三)

表1将本文方法与OPO、IOPO算法<sup>[20]</sup>的运行时间做了比较。运算平台的配置如下:CPU为Intel Xeon E5630 2.53GHz,内存16GB,Windows 7系统,Matlab 7.10.0。从表中可以看出,采用本文改进的邻接图定义路径算子,由于只需

两个方向的路径长度计算,加快了OPO算法的运行速度;而IOPO算法的运行时间远远大于OPO算法,且为OPO算法的 $n * K$ 倍;本文改进的道路提取方法在OPO算法的基础上加入了道路区域的判定,算法运行速度较快。

表1 本文方法与OPO、IOPO算法的运行时间比较

图像	大小	原始邻接图		改进邻接图			本文的方法/s	
		OPO		OPO		IOPO		
		$L_{min}$	时间/s	$L_{min}$	时间/s	K		
实验图一	1000 * 1000	700	72.65	1000	30.78	40	4276.83	49.26
实验图二	600 * 600	300	7.60	300	3.35	20	664.83	5.09
实验图三	2000 * 1400	600	144.76	600	66.40	60	19077.41	164.06

**结束语** 本文根据高分辨率遥感影像中道路的特点,针对有损或有遮挡道路,提出了一种基于改进 path opening 的道路提取新方法。本文为了提取曲率较大的道路,改进了邻接图,并将最大路径长度巧妙地与区域的几何特征相结合,建立了道路区域的判定准则,滤除噪声区域,保留道路信息。该方法解决了 path opening 方法在不完整道路提取中无法选择合适路径长度阈值以及 incomplete path opening 方法易带来噪声、时空复杂度高等问题,且所需人工干预较少。通过多组实验结果证明,本文提出的方法较大地改进了不完整道路的提取效果,为后续毁损道路的提取奠定了良好基础。

### 参考文献

[1] 吴亮,胡云安. 遥感图像自动道路提取方法综述[J]. 自动化学报,2010,36(7):912-922

[2] 李伟. 遥感图像中的道路提取[J]. 自动化博览,2006,23(5):20-23

[3] 李光耀,胡阳. 高分辨率遥感影像道路提取技术与展望[J]. 遥感信息,2008,2008(1):91-95

[4] Lin Xiang-guo, Zhang Rui, Shen Jing. A template-matching based approach for extraction of roads from very high-resolution remotely sensed imagery[J]. International Journal of Image and Data Fusion,2012,3(2):149-168

[5] 林祥国,张继贤,李海涛,等. 基于T型模板匹配半自动提取高分辨率遥感影像带状道路[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2009,34(3):293-296

[6] Movaghati S, Moghaddamjoo A, Tavakoli A. Road Extraction From Satellite Images Using Particle Filtering and Extended Kalman Filtering[J]. IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing,2010,48(7):2807-2817

[7] Laptv I, Mayer H, Lindeberg T, et al. Automatic extraction of roads from aerial images based on scale space and snakes[J]. Machine Vision and Applications,2000,12:23-31

[8] Hu Yang, Zhang Ke-ju. Road Extraction from Remote Sensing Imagery Based on Road Tracking and Ribbon Snake[C]// Pacific Asia Conference on Knowledge Engineering and Software Engineering. China,2009:201-204

[9] Marikhu R, Dailey M, Makhanov S, et al. A Family of Quadratic Snakes for Road Extraction[C]// 8<sup>th</sup> Asian Conference Computer Vision. Tokyo, Japan,2007:85-94

[10] Perez P, Blake A, Gangnet M, et al. Jetstream: Probabilistic contour extraction with particles[C]// Proceedings of International Conference on Computer Vision. Vancouver,2001:524-531

[11] 安如,冯学智,王慧麟. 基于数学形态学的道路遥感影像特征提取及网络分析[J]. 中国图象图形学报,2003,8(7):798-804

[12] 李书晓,常红星. 基于总变分和形态学的航空图像道路检测算法[J]. 计算机学报,2007,30(12):2173-2180

[13] Kirthika A, Mookambiga A. Automated Road Network Extraction Using Artificial Neural Network[C]// International Conference on Recent Trends in Information Technology. Chennai, Tamil Nadu,2011:1061-1065

[14] 汪闽,骆剑承,周成虎,等. 结合高斯马尔可夫随机场纹理模型与支撑向量机在高分辨率遥感图像上提取道路网[J]. 遥感学报,2005,9(3):271-276

[15] Huang Xin, Zhang Liang-pei. Road centreline extraction from high-resolution imagery based on multiscale structural features and support vector machines[J]. International Journal of Remote Sensing,2009,30(8):1977-1987

[16] Soury A H. An Approach to Automatic Road Detection on High Resolution Remotely Sensed Imagery[J]. Elixir Remote Sensing,2013,56(1):13374-13379

[17] Barzohar M, Cooper D B. Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric-stochastic models and estimations[J]. IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence,1996,18(7):707-720

[18] Rellier G, Descombes X, Zerubia J. Local Registration and Deformation of a Road Cartographic Database on a SPOT Satellite Image[J]. Pattern Recognition,2002,35(10):2213-2221

[19] Heijmans H, Buckley M, Talbot H. Path Openings and Closings[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision,2005,22:107-119

[20] Talbot H, Appleton B. Efficient complete and incomplete path openings and closings[J]. Image and Vision Computing,2007,25(4):416-425

[21] Valero S, Chanussot J, Benediktsson J A, et al. Advanced Directional Mathematical Morphology for the Detection of the Road Network in Very High Resolution Remote Sensing Images[J]. Pattern Recognition Letters,2010,31(10):1120-1127

[22] 刘小丹,刘岩. 基于Hough变换和路径形态学的城区道路提取[J]. 计算机工程,2012,38(6):265-268