

# 遥感影像道路的多点同时快速行进提取方法

杨 康,李满春,刘永学,程 亮,江冲亚

(南京大学地理与海洋科学学院地理信息科学系,江苏 南京 210093)

**摘要:**研究提出了一种基于多点同时快速行进构建最短路径,提取遥感影像道路的方法。该方法依据道路灰度、梯度或边缘特征构建行进速度项,以多个道路特征点作为起始种子点,多点同时快速行进提取遥感影像最小能量图,并以起始种子点为中心点,按照最小能量值对图像区域进行划分,提取相邻区域对应起始点对行进过程中最先接触的鞍点,设定判定准则从鞍点中选取有效鞍点,剔除可能提取的错误捷径,从有效鞍点出发,沿最小能量值减小且梯度变化最快方向逆向搜索至对应起始点对提取最短路径,最终连接最短路径作为提取的道路。研究将该方法应用到ETM+、IKONOS、航空影像等遥感影像数据中,进行不同空间分辨率、不同大小、不同路网条件下道路提取的实验。结果表明该方法仅需少量的道路特征点作为先验知识,即可实现各类型道路信息的提取。提取的道路连续,无需细化、断线连接等后处理,能够实现多条道路的同时提取,具有较高的提取效率。

**关键词:**遥感影像;道路提取;快速行进;最小能量图;最短路径

**中图分类号:** TP 79      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2011)03-0294-09

## 1 引 言

道路作为遥感影像中重要的人工目标,是遥感影像地物信息提取研究的重要内容。现已提出了以基于平行线对、基于二值化和知识、基于窗口模型特征等算法为代表的自动提取方法,以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B样条曲线等为代表的半自动提取方法<sup>[1]</sup>。其中,自动提取方法大都运用人工智能、计算机视觉、模式识别、数学模型等实现某一类型道路的自动提取,全自动识别各类道路尚有困难<sup>[2]</sup>。半自动提取方法通过人机交互获取遥感影像中道路的先验知识,在边缘检测、区域生长等图像处理方法的基础上,由计算机依据遥感影像中道路的形状、拓扑、功能以及上下文等特征进行提取与识别,算法适用性较好,应用较为广泛<sup>[3]</sup>。但目前提出的半自动道路提取方法,通常需要较多的道路先验知识或预先定义的道路匹配模板,并且提取的线状道路并不连续,需要进行断线连接等后续处理,方法较为繁琐,提取效率较低。因此,如何依据更少的道路先验知识,通

过更为简单的后处理,高效便捷地提取出遥感影像中连续的道路信息,是半自动道路提取方法的研究热点。

快速行进(Fast Marching)方法由Cohen与Kimmel<sup>[4-8]</sup>提出,能够实现图像分割及特征提取,被广泛应用于图像分割、路径规划、计算机视觉等领域。该方法应用于线状特征提取的基本原理是利用线状特征与图像背景具有的差异构建速度项图像,使得待提取特征处具有较大的速度项,给定待提取特征上的一个图像单元点作为起始种子点,在速度项图像上利用快速行进方法求解Eikonal方程,获取该点对应的最小能量图(Minimum Energy Image),再以位于待提取特征上的另一单元点作为终止种子点,从终止点出发,逆向搜索至起始点获取最小能量图上两种子点间的最短路径,该路径即是两点间待提取的线状特征。道路在遥感影像灰度、梯度、边缘增强等图中均表现为显著区分于图像背景的线状特征,故研究提出将其作为待提取线状特征,利用快速行进构建最短路径实现道路提取。该方法属于半自动道路提取方法,仅需借助道路特征种子

点作为先验知识,提取的道路为连续的线状特征对象。为了提高道路提取效率,研究提出多点快速行进与最短路径方法,利用多个单元点作为特征种子点快速行进,设定有效鞍点判定准则,同时提取多条道路。

## 2 基于快速行进的两点间最短路径提取方法

### 2.1 最小能量图与两点间最短路径

曲线演化理论是一种进行图像分割与特征提取的有效工具,该方法利用闭合曲线的形变规律,定义度量闭合曲线形变的能量函数(Energy Function),通过最小化能量函数使闭合曲线逐渐逼近图像中目标区域的边缘。主动轮廓模型(Active Contour Model)是该理论的典型应用,它将能量函数设计为依赖于轮廓形状的内部能量与依赖于图像性质的外部能量,通过求解起始轮廓上各点的最小能量问题来迭代逼近目标边界。该方法存在计算不稳定、难于处理闭合曲线的分裂与融合等拓扑问题<sup>[9]</sup>。几何主动轮廓模型(Geodesic Active Contour Model)通过几何能量函数的设定对主动轮廓模型做了改进,但也存在陷入局部最小能量,结果依赖于起始化条件等问题。为了解决几何主动轮廓模型存在的问题,Cohen与Kimmel提出了基于最短路径求取几何主动轮廓全局最小能量的方法。

给定一幅二维图像 $I: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^+$ 和图像内的 $p_1$ 与 $p_2$ 两点,然后通过 $I$ 构建势图(Potential Image) $P: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^+$ , $P$ 在待提取的图像特征处具有较小的值。例如,设定 $P$ 是图像梯度模 $\|\nabla I\|$ 的递减函数,就使图像梯度较大的待提取道路在势图上具有较小的值。能量函数表达为 $E: A_{p_1, p_2} \rightarrow \mathbb{R}^+$ :

$$E(\gamma) = \int_{\gamma} P(\gamma(s)) ds \quad (1)$$

其中: $A_{p_1, p_2}$ 是 $p_1, p_2$ 间路径的集合, $\gamma$ 是两点间的一条路径, $s$ 是长度参数。使能量函数 $E(\gamma)$ 具有全局最小值的 $\gamma$ 称作 $p_1$ 与 $p_2$ 间的最短路径,记为 $C_{p_1, p_2}$ 。为了求取 $p_1$ 与 $p_2$ 间的最短路径,首先需要求取对应于 $p_1$ 的最小能量图 $U_1: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^+$ 。图像上点 $x$ 在最小

能量图上 $U_1$ 的值等于 $x$ 与 $p_1$ 间最短路径对应的能量函数的值:

$$\forall x \in \Omega, U_1(x) = \min_{\gamma \in A_{p_1, x}} \left\{ \int_{\gamma} P(\gamma(s)) ds \right\} \quad (2)$$

$U_1$ 满足Eikonal方程:

$$\begin{cases} \|\nabla U_1(x)\| = P(x), & x \in \Omega \\ U_1(p_1) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

最小能量图 $U_1$ 中仅有一个局部最小点 $p_1$ ,这样就解决了求取几何主动轮廓全局最小能量的问题。得到最小能量图 $U_1$ 后,为了求取 $p_1$ 与 $p_2$ 间的最短路径 $C_{p_1, p_2}$ ,只需从 $p_2$ 出发,沿着 $U_1$ 值变小并且梯度变化最快的方向搜索,直至逆向搜索到 $p_1$ ,具体过程可表达为求解如下差分方程<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dC_{p_1, p_2}(s)}{ds} = -\nabla U_1(C_{p_1, p_2}(s)) \\ C_{p_1, p_2}(0) = p_2 \end{cases} \quad (4)$$

### 2.2 快速行进与两点间最短路径提取

快速行进方法是Sethian<sup>[11]</sup>提出的Eikonal方程的一种数值解法。在式(5)所示的Eikonal方程中, $F(x)$ 表示曲线演化通过图像上点 $x$ 时的速度, $\nabla T(x)$ 表示曲线经过该点的时间梯度。

$$(F(x)) \|\nabla T(x)\| = 1 \quad F(x) \geq 0 \quad (5)$$

Sethian提出用Eikonal方程来反映当闭合曲线演化速度非负时,曲线经过图像上点 $x$ 的时间梯度与该点的速度成反比,在起始曲线上 $T(x) = 0$ 。其将采用快速行进方法求解Eikonal方程作为水平集(Level Set)的快速解法,实现闭合曲线的演化。其核心思想是在行进边界外围构造一个激活窄带,窄带内的点到达时间未定,当前行进边界利用逆向格式将当前边界向外行进,就像水波扩散一样,凡是扩散到的点,冻结其波前到达时间,再根据当前的波前构造新的激活带,如此循环,就可得到图像上每点的到达时间。Cohen提出将最小能量 $U(x)$ 作为曲线经过图像上点 $x$ 的时间,将 $1/P(x)$ 作为曲线经过该点时的行进速度,就可将快速行进方法用于最小能量及最短路径的求算。快速行进利用逆向差分法求解Eikonal方程的稳定解,如式(6)所示。快速行进求取最小能量图方法的实现如表1所示。

$$\left( \frac{\max\{(u_{i,j} - u_{i-1,j}), (u_{i,j} - u_{i+1,j}), 0\}}{h_x} \right)^2 + \left( \frac{\max\{(u_{i,j} - u_{i,j-1}), (u_{i,j} - u_{i,j+1}), 0\}}{h_y} \right)^2 = (P_{i,j})^2 \quad (6)$$

其中: $h_x, h_y$ 为图像 $x, y$ 方向的单元大小。

在快速进进的行进过程中,每次将具有最小能量(最小到达时间)的单元点作为当前行进到的点,

并根据该点的最小能量更新它的四邻域点的最小能量,如此循环,最终得到图像平面内每一点的最小能量。经过图像边缘增强等预处理,或综合遥感影像中

道路具有的光谱、纹理等特征性质,构建势图  $P$ ,使得道路在势图上具有较小的值  $P$ ,从而有较大的行进速度项  $1/P$ ,沿道路快速行进,使得道路在最小能量图上具有较小值(图 1)。

表 1 快速行进求取最小能量图算法  
Table 1 Fast marching algorithm for minimum energy image

定义:
Alive 点:已到达点, $U$ 值已知并且不会改变;Active 点:活动点,即将到达的点, $U$ 值未知;Faraway 点:远离点,到达时间未知; $N_{\text{non-alive}}(x)$ :点 $x$ 的非已到达四邻点; $N_{\text{alive}}(x)$ :点 $x$ 的已到达四邻点; $Q$ 为 Active 点的集合。
起始化:
对图像每个单元点 $x$ ,设定 $U(x) = +\infty$ ;对起始点 $p$ ,设定 $U(p) = 0$ ,标记为 Active 点。加入 Active 点集合中, $Q \leftarrow Q \cup p$ 。
循环:
当 $Q \neq \emptyset$ 时
找到 $U$ 值最小的 Active 点 $x_{\min}$ ,将其标记为 Alive 点;
对于 $\forall x_n \in N_{\text{non-alive}}(x_{\min})$
如果 $x_n$ 是 Active 点,更新 $x_n$ 的 $U$ 值 $U(x_n) = \text{Update}(x_n, N_{\text{alive}}(x_n))$ ;
如果 $x_n$ 是 Faraway 点,将其改标记为 Active 点;
否则,结束循环。
方法:
Update( $x_n, N_{\text{alive}}(x_n)$ )
$\{i, j\} = x_n$ ;
$U_1 = \min\{U_{i-1, j}, U_{i+1, j}\}, U_2 = \min\{U_{i, j-1}, U_{i, j+1}\}$ ;
如果 $ U_1 - U_2  < P(x_n)$
$U(x_n) = \frac{U_1 + U_2 + \sqrt{2P(x_n)^2 - (U_1 - U_2)^2}}{2}$
否则
$U(x_n) = \min\{U_1, U_2\} + P(x_n)$

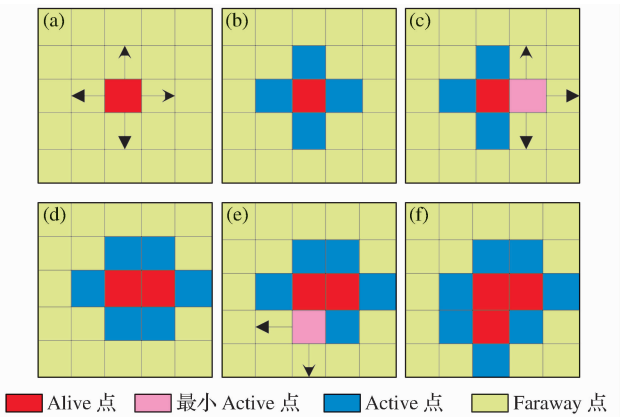


图 1 快速行进过程示意图  
Fig. 1 Fast marching method

得到起始点  $p_1$  的最小能量图后,从终点  $p_2$  出发,沿着最小能量值变小并且梯度变化最快的方向搜索,直到逆向搜索至  $p_1$ ,同时对位于最短路径上的图像单元点进行标记,可得  $p_1$  与  $p_2$  间的最短路径。逆向搜索求取两点之间最短路径的算法如表 2 所示。通过行进速度项  $1/P$  的构建,道路单元点相比于周围图像背景单元点会有较小的最小能量值。因此,当起始点  $p_1$  与终点  $p_2$  均为道路单元点时, $p_1$  与  $p_2$  之间的最短路径

将沿着道路行进,最终提取的最短路径即为  $p_1$  与  $p_2$  之间的道路,从而实现两点间道路的提取。

若求取  $p_1$  的最小能量图仅是为了得到  $p_1$  与  $p_2$  之间的最短路径,在快速行进的循环中不必遍历求算所有单元点的最小能量,而只需求取行进边界到达  $p_2$  时的最小能量图,通过局部行进实现最短路径的提取。在算法实现时,将快速行进求取最小能量图算法中的循环条件改为“当点  $p_2$  不为 Alive 点时”,在行进边界到达  $p_2$ ,将其变为 Alive 点后停止行进。如在图 2 中,道路相比于图像背景具有较大的灰度值,直接以图像灰度图作为行进速度项,以  $p_1$  作为起始单元点,图 2(b)、(c) 分别表示遍历所有图像单元点所得的最小能量图与遍历至终点  $p_2$  后得到的局部最小能量图。从  $p_1$  点出发,沿着  $p_1$  与  $p_2$  间的道路及其附近单元点快速行进,影像中部灰度值较低的区域,行进速度较小,构成了行进的障碍区域。因此,行进会绕开这一区域,从图 2(c) 的局部最小能量图中可以看出,局部行进并不到达这些障碍区域,而是在到达  $p_2$  点之后就停止行进,由此可以看出局部行进明显减少了遍历单元点的数目,提高了最短路径的提取效率。

表 2 逆向搜索求取两点之间最短路径算法

Table 2 Minimum path extraction algorithm with backward search

定义:
$p_1$ :起始点; $U_1$ : $p_1$ 的最小能量图; $p_2$ :终点; $p_{\text{search}}$ :当前搜索点;sign:循环标记; $N_{\text{alive}}(x)$ :点 $x$ 的已到达四邻点; $\text{Path}_{p_1,p_2}$ :位于 $p_1$ 、 $p_2$ 最短路径上的单元点的集合。
起始化:
$p_{\text{search}} = p_2$ ,sign 为 true。
循环:
当 sign 为 true 时
如果 $p_1 \in N_{\text{alive}}(p_{\text{search}})$ ,sign 为 false;
对 $x_n \in N_{\text{alive}}(p_{\text{search}})$ ,找出 $U_1(x_n)$ 最小的点 $x_{\min}$ ,令 $p_{\text{search}} = x_{\min}$ ,将 $x_{\min}$ 加入 $\text{Path}_{p_1,p_2}$ 。

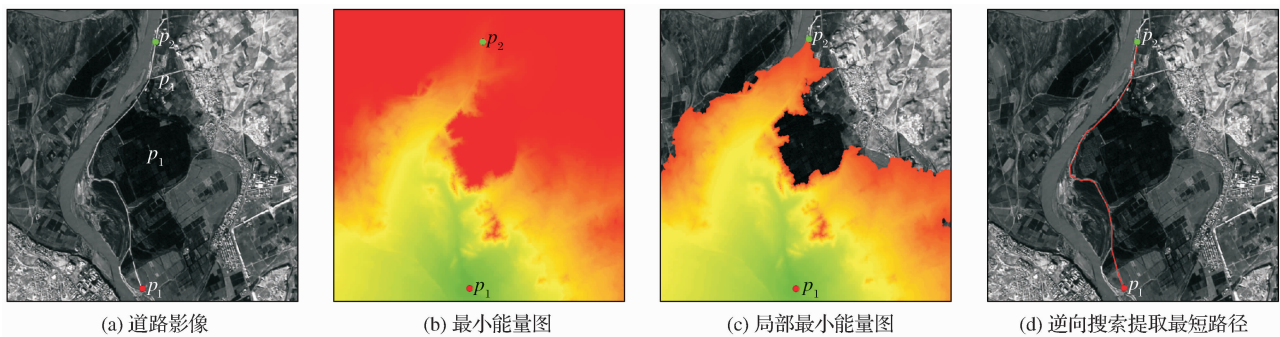


图 2 快速行进两点间最短路径提取

Fig. 2 Fast marching minimum path extraction between two points

### 3 基于多点同时快速行进与最短路径的道路提取方法

遥感影像道路提取方法可以从算法运行效率和人工交互程度两个方面进行评价。基于快速行进的 道路(最短路径)提取方法效率较高,计算复杂度为  $O(N\log N)$ ,其中  $N$  为图像单元点的数目。Liron Yatziv 等<sup>[12]</sup>对快速行进改进后其计算复杂度可降至  $O(N)$ 。但快速行进要求较多的人工交互,在提取 每条道路时,均要求提供道路的起始点和终点,但 相比于其他半自动道路提取方法,该方法不需要其 他道路先验知识和复杂的后处理,方法实现较为简 单。但在使用起始点到终点快速行进提取两点间最 短路径时可能存在如下问题:

- (1) 提取多条道路时的算法运行效率问题。每 提取一条道路,均要求算起始点的最小距离图,如果 不采用局部行进,计算复杂度为  $MO(N\log N)$ , $M$  为 提取道路的数目。
- (2) 提取道路可能存在错误捷径。单元点的到 达时间(最小能量)是由它的行进速度和到起始点的 距离共同决定的,如果给定的起始点和终点间的道 路长度较长,即使沿道路有较快的行进速度,最终提

取的道路也有可能是终点到起始点的另外一条长度 较短、其上行进速度相对较慢的错误捷径,例如 图 3 中待提取的道路图像的梯度图作为行进速度项,提 取  $p_1$ 、 $p_2$  两点间的最短路径时,由于  $p_1$ 、 $p_2$  间道路 较长,因而提取的最短路径会沿其他错误捷径行进, 不能提取正确的道路。解决这个问题最直接的方法 就是提供距离较近的起始点和终点,但这样又会带 来过多的人工交互并且需要提取更多条道路。

为了解决以上问题,研究在前文提出的基于快 速行进与最短路径两点道路提取方法的基础上,采 用多点同时快速行进与最短路径方法提取道路。给 定多个道路特征点作为行进起点同时开始行进,只 进行一次最小能量图的求算,故算法的计算复杂度 仍为  $O(N\log N)$ 。在行进过程中,对每个单元点对 应的行进起点的编号进行标记,实现图像区域划分。 同时求取不同起始点行进边界最先接触的点,从中 选取有效的点进行道路的连接与提取。该算法具有 较高的运行效率,并且减少了人工交互,可以同时实 现多条道路的提取。

#### 3.1 多点同时快速行进与鞍点提取

多点同时快速行进的基本思想是设定多个起始 点同时行进,直到行进边界相互接触并遍历图像所



有单元点。起始点行进边界接触处具有最小能量(最先接触)的边界点称为鞍点(Saddle Point)。以

$p_1$  与  $p_2$  两点同时行进为例,求取  $p_1$  与  $p_2$  间鞍点  $p_{\text{saddlepoint}}$  及最短路径的算法如表 3 所示。

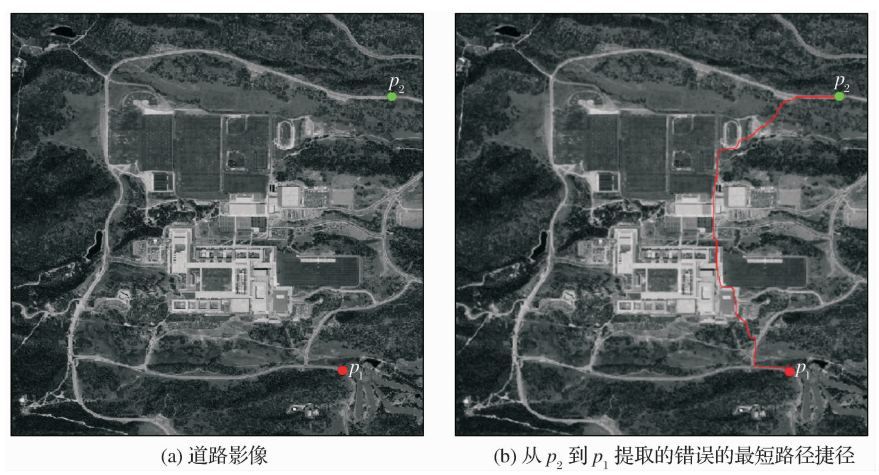


图 3 快速行进道路提取时的错误捷径提取

Fig. 3 Erroneous short cuts extraction with fast marching

表 3 两点同时行进快速行进及鞍点提取算法

Table 3 Two points simultaneous fast marching and saddle point extraction

起始化:
$p_1$ 、 $p_2$ :起始点; $U_1$ 、 $U_2$ : $p_1$ 、 $p_2$ 最小能量图; $p_{\text{saddlepoint}}$ 为 $p_1$ 与 $p_2$ 间的鞍点
运行:
① 快速行进求取最小能量图,分别求取 $U_1$ 、 $U_2$ 直到两者有共同的 Alive 点,该点即为 $p_{\text{saddlepoint}}$ ;
② 按照逆向搜索求取两点之间最短路径算法求取 $p_{\text{saddlepoint}}$ 到 $p_1$ 的最短路径;
③ 按照逆向搜索求取两点之间最短路径算法求取 $p_{\text{saddlepoint}}$ 到 $p_2$ 的最短路径;
④ 连接求取的两条最短路径,得到 $p_1$ 与 $p_2$ 间的最短路径。

相比于自起始点出发到终点的局部行进,多点同时行进时遍历的单元点数目更少。在图像各单元点处行进速度相等时,两点同时行进比起始点到终点行进遍历的单元点数目减半,如在图 4 中,若速度项  $1/P = 1$ , $p_1$  为起始点, $p_2$  为终点行进,遍历区域为图中区域 1,面积为  $\pi(2R)^2$ ,从  $p_1$ 、 $p_2$  同时行进,遍历区域为图中区域 2,面积为  $2\pi R^2$ ,同时行进遍历点数目减半。多点同时行进可通过并行算法实现,效

率有较大提高。

在两点同时行进时,可将找到鞍点  $p_{\text{saddlepoint}}$  作为行进的终止条件,实现优于 2.2 中起始点到终点的局部行进的行进方式(图 5)。图 5 中以图像灰度图作为行进速度项, $p_1$ 、 $p_2$  两点位置与图 2 相同。从两点同时行进,直到找到鞍点,行进遍历的区域如图 5(b) 所示,相比于图 2(c) 中的局部行进遍历,两点同时行进遍历点的数目更少,图 5(c) 所示提取的道路与图 2(d) 相同。

在多点同时行进的过程中,每个起始点的行进边界按照不同的速度向外行进,直到行进边界接触,完成对图像的划分。每个起始点  $p_i$  都对应一个图像区域  $R_i$ 、 $R_j$  中的每个单元点  $x$  到  $p_i$  的最小能量  $U_i(x)$  均小于到其他起始点  $p_j(i \neq j)$  的最小能量  $U_j(x)$ ,按照最小能量实现了图像划分。在图像划分图上邻接的两个图像区域  $R_i$ 、 $R_j$  对应的起始点  $p_i$ 、 $p_j$  的行进边界会相遇,从而存在鞍点,在图像划分图上不相邻的区域对应的起始点间不存在边界点与鞍点。

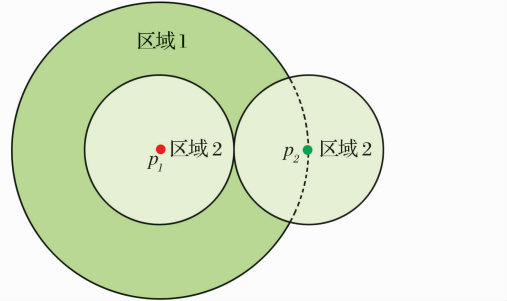


图 4 起始点到终点行进与两点同时行进区域比较

Fig. 4 Comparing start-end points propagation region with two points simultaneous propagation region

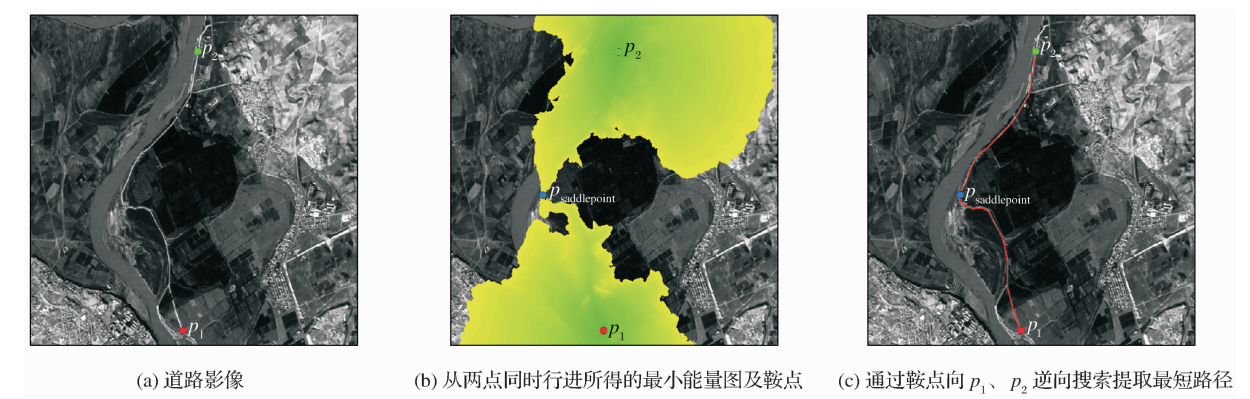


图 5 两点同时快速行进最短路径提取

Fig. 5 Two points simultaneous partial fast marching and minimum path extraction

3.2 基于多点同时快速行进与最短路径的道路提取

通过给定的道路特征点列提取道路网时,可以由多个起始点同时行进,提取相邻图像区域  $R_i, R_j$  对应起始点  $p_i, p_j$  间的鞍点,通过鞍点沿最小能量图梯度变化最快方向分别逆向搜索至对应的起始点  $p_i, p_j$ ,并连接最短路径,实现道路提取。当道路特征点数量较多时,图像区域划分较细,使用该方法可以很好的实现道路网的提取。但在一般情况下,为了尽可能地减少人工交互并提高算法效率,道路特征点的数目有限,分布稀疏,在这种条件下,无道路相连的划分区域也有可能相连并求取鞍点,提取道路。所提取的道路是错误的捷径,可以称为“伪道路”,构成它的单元点具有比道路单元点稍小的速度项。

为了去除这种情况,可以设定一定的判定条件,从求得的鞍点中再次筛选,选择位于道路上的有效

鞍点用于道路的连接与提取。可以作为有效鞍点判定准则的有:

- ① 准则 1: 仅将  $p_i$  和最先与其相遇的起始点  $p_j$  ( $i \neq j$ ) 之间的  $p_{\text{saddlepoint}}$  作为有效鞍点;
- ② 准则 2: 仅将  $U(p_{\text{saddlepoint}}) < U_0$  的  $p_{\text{saddlepoint}}$  作为有效鞍点,  $U_0$  为给定最小能量阈值。

通过有效鞍点判定准则的设定,可以有效剔除可能提取的“伪道路”,对最终提取的道路(最短路径)进行选择与匹配。多点同时快速行进与最短路径道路提取算法具体实现如表 4 所示。图 6 给出了一个多点同时行进按照最小能量划分图像区域并提取最短路径的实例,将图像梯度图作为速度项,4 个起始点同时行进,按照最小能量对图像区域进行划分,并应用有效鞍点判定准则 1 提取最短路径的结果。

表 4 多点同时快速行进与最短路径提取算法

Table 4 Multi-points fast marching and minimum path extraction

定义:
Alive 点: 已到达点; Active 点: 活动点, 即将到达的点; Faraway 点: 远离点; $N_{\text{non-alive}}(x)$ : 点 $x$ 的非已到达四邻点; $N_{\text{alive}}(x)$ : 点 $x$ 的已到达四邻点; $Q$ 为 Active 点的集合; $u(x)$ : 点 $x$ 的最小能量; $v(x)$ : 点 $x$ 的图像划分区域索引; $S_{(i,j)}$ : 起始点 $p_i, p_j$ 之间的鞍点; $S$ : 有效鞍点的集合。
起始化:
对图像每个单元点 $x$ , 设定 $U(x) = +\infty, v(x) = 0$ ; 对每一个起始点 $p_j$ , 设定 $U(p_j) = 0, v(p_j) = j$ , 标记为 Active 点, 加入 Active 点集合中, $Q \leftarrow Q \cup p_j$ 。
循环:
当 $Q \neq \emptyset$ 时
找到 $U$ 值最小的 Active 点 $x_{\min}$ , 将其标记为 Alive 点;
对于 $\forall x_n \in N_{\text{non-alive}}(x_{\min})$
如果 $x_n$ 是 Active 点, 并且 $\exists x_{\text{alive}} \in N_{\text{alive}}(x_n)$ , 使得 $v(x_{\text{alive}}) \neq v(x_n)$ , 则 $x_n$ 是边界点, 若 $S(v(x_{\text{alive}}), v(x_n)) \notin S$ 并且 $\text{IsValidSaddlePoint}(x_n)$ , 则 $x_n$ 是有效鞍点, $S \leftarrow S \cup v(x_n)$ ; 更新 $x_n$ 的 $U$ 值, $U(x_n) = \text{Update}(x_n, N_{\text{alive}}(x_n))$ ;
如果 $x_n$ 是 Faraway 点, $v(x_n) = v(x_{\min})$ , 将其改标记为 Active 点;
否则, 结束循环。
路径提取:
对 $\forall S_{(i,j)} \in S$ , 分别按照逆向搜索求取 $S_{(i,j)}$ 与 $p_i, p_j$ 之间的最短路径 $\text{Path}_i$ 与 $\text{Path}_j$ , 连接两条路径, 得到 $p_i, p_j$ 之间的最短路径。



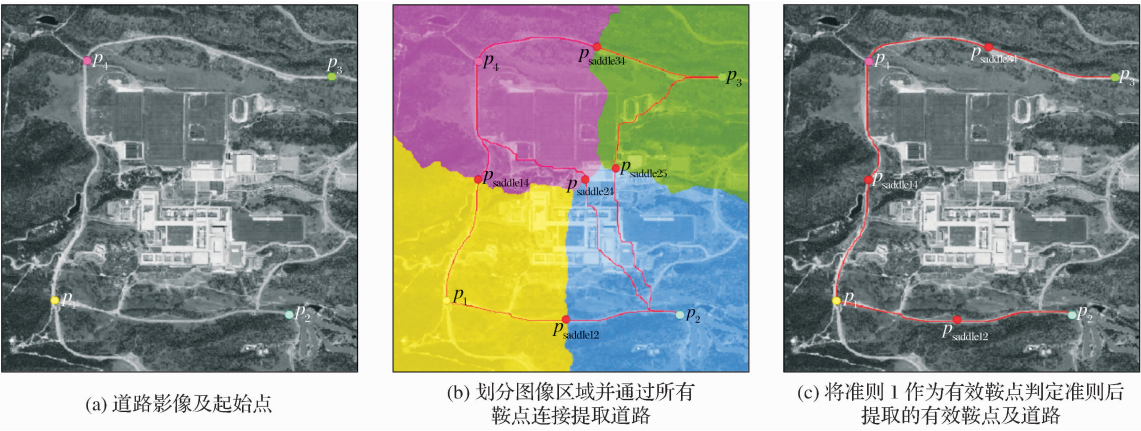


图 6 多点同时快速行进与区域划分最短路径提取

Fig. 6 Multi-points simultaneous fast marching partition and minimum path extraction

4 算法实现与实例验证

采用面向对象的方式在 Visual Studio 平台下设计实现多点同时快速行进与最短路径提取方法，核心类为速度项构建类与快速行进运行类。使用 Gdal 1.60 作为遥感影像读写转换工具，C# 作为编程语言进行算法开发。

研究采用 3 幅影像进行方法验证分析(图 7)。

图 7(a)为 2004 年南京市 ETM+第 7 波段影像，大小为 $161\times 163$ 像素，以影像梯度图作为速度项，以设定最小能量作为阈值进行有效鞍点的判定；图 7(c)为 2004 年南京市 IKONOS 第 1 波段影像，大小为 $1\,653\times 1\,630$ 像素，以影像灰度图归一化后作为速度项，以起始点和与其最先接触的另外 3 个起始点间的鞍点作为有效鞍点，并进行错误捷径的剔除；图 7(e)为 2008 年常州市真彩色航空影像 R 波

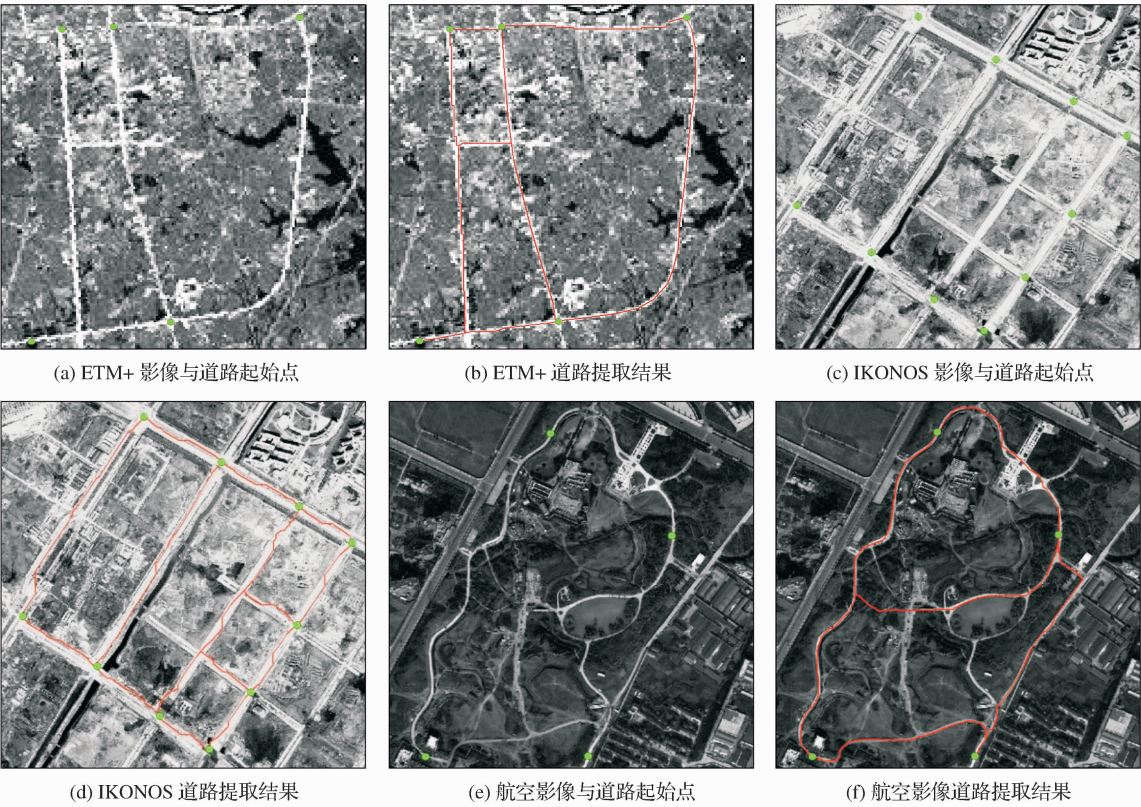


图 7 道路提取实例验证

Fig. 7 Road extraction test and verification

段,以归一化影像灰度图作为速度项,将提取的鞍点均作为有效鞍点。3 幅影像道路提取的结果分别如图 7(b)、(d)、(f)所示。

验证采用不同的速度项构建方式,进行不同空间分辨率、不同大小、不同路网条件下的多源遥感影像道路提取,并对算法运行时间进行了统计分析(表 5)。通过实例验证看出,多起点快速行进最短路径

提取方法具有较好的运行效率,处理大小  $1\,579\times 1\,698$  的航空影像用时 20 s,处理大小  $161\times 163$  的 ETM+ 影像用时 109 ms。其中,多点同时快速行进求取最小能量图占用了绝大部分时间,有效鞍点逆向搜索连接道路用时可以忽略。在起始点数目较多时,多点同时行进只需进行一次最小能量图的求取,显著缩短算法运行时间。

表 5 多起点快速行进最短路径提取方法实例验证

Table 5 Multi-points fast marching minimum path extraction method test and verification

影像类型	影像大小	起始点数目	速度项	有效鞍点判定准则	运行时间
ETM+	161×163	5	影像梯度图	最小能量阈值	109 ms
IKONOS	1 653×1 630	10	影像梯度图	最先接触的 3 个鞍点	21 s
航空影像	1 579×1 698	4	影像灰度图	提取的所有鞍点	20 s

速度项  $1/P$  的构建决定了提取道路的效果,若速度项中噪声较大或待提取道路特征与影像背景对比不明显时,可能提取出错误路径,所以要根据影像及道路特征构建合适的速度项。如图 7(a)ETM+ 影像左上方的居民地,具有与道路相似的灰度特征,若直接以图像灰度图作为速度项,会提取出错误的道路,所以应以其梯度图或边缘增强后的图像作为速度项,同时设定最小能量阈值作为有效鞍点判定条件,通过这样的速度项设定,可以提取原来影像中特征不明显的道路,如图 7(b)中提取的横向短道路。在图 7(e)航空影像中,道路灰度特征明显区别于影像背景,可以直接以影像灰度图作为速度项进行提取。

起始单元点的分布和道路网的形态也会影响提取的结果。对于网状道路的提取,需要给定较多的起始点,如提取图 7(c)IKONOS 影像网状道路时,给定了道路交叉口等位置的 10 个起始点;而对于环形道路,给定较少的起始点即可实现提取,如提取图 7(e)航空影像环形道路时,仅给定了分布较为分散的 4 个起始点。因为网状道路具有比较复杂的路网结构,给定较少的道路端点仅能提取道路网的外部轮廓,无法提取路网内部结构。环形道路结构较为单一,通过给定分布较广的数个起始点去除可能提取错误捷径的影响,就能够实现道路的提取。

道路的宽度也会影响提取结果的质量。在图 7(a)ETM+ 影像中,道路宽度 2~3 个像元,提取的道路较为平滑,但在图 7(c)IKONOS 影像中道路较宽,因而提取的道路会随着道路内部影像梯度的变化而呈现锯齿状,沿道路边缘曲折延伸。

5 结 语

研究提出并实现了基于多点快速行进与最短路径的半自动遥感影像道路提取方法。主要结论如下:① 研究以多个道路特征点作为起始种子点,运用多点快速行进方法提取鞍点与最小能量图,结合有效鞍点判定准则剔除错误捷径,逆向搜索连接最短路径,实现了多条道路的同时提取,提取过程借助了较少的道路先验知识,提取后无需后续处理;② 研究进行了 ETM+、IKONOS、航空影像等遥感影像道路提取的实例验证,结果表明研究提出的方法具有较高的道路提取效率与较好的道路提取结果;③ 方法实现灵活,具有较强的开放性。可以根据待提取影像及道路的特征构建行进速度项,综合利用遥感影像中道路的各种特征性质;有效鞍点的判定准则也较灵活,可以根据起始道路特征点的数量及分布选择不同的判定准则进行错误捷径的剔除。

研究提出的方法需要较少的道路先验知识,具有较高的提取效率,无需后续处理,但仍存在以下问题有待进一步探讨:① 方法需要人工交互输入道路特征点作为行进起始点,在待提取道路较多时工作量较大。通过遥感影像道路特征点检测、道路样本训练等方法实现道路特征点的自动提取,并将其作为多点同时快速行进与最短路径方法的起始种子点,可以实现道路的自动提取;② 将方法用于高空空间分辨率遥感影像中较宽道路的提取时,由于道路特征内部的变化,提取的最短路径会沿道路内部或边缘曲折延伸,如图 7(c)IKONOS 影像中提取的道路,不能准确反映道路的实际特征,将该方法运用于



此类道路的提取时,可借助动态规划等方法提取道路中轴线进行优化。

#### 参考文献(References):

- [1] Shi Wenzhong, Zhu Changqing, Wang Yu. Road Feature Extraction from Remotely Sensed Image: Review and Prospects [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(3): 257-262. [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): 257-262. ]
- [2] Wu Bing, Zhou Shilin, Rou Yi. An Improved Road Extraction Algorithm based on Corner Feature of Remote Sensing Image [J]. *Computer Simulation*, 2006, 23(10): 209-213. [武冰, 周石琳, 柔毅. 一种引入角点特征的遥感图像道路提取方法[J]. *计算机仿真*, 2006, 23(10): 209-213. ]
- [3] Ma Li, Chen Jun. Classification and Application of Context Information in Road Extraction [J]. *Geomatics World*, 2008, 8(4): 58-60. [马力, 陈军. 上下文信息在道路提取中的分类与应用[J]. *地理信息世界*, 2008, 8(4): 58-60. ]
- [4] Cohen L D, Kimmel R. Global Minimum for Active Contour Models; a Minimum Path Approach [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 24(1): 57-78.
- [5] Cohen L D. Multiple Contour Finding and Perceptual Grouping Using Minimum Paths [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2001, 14(3): 225-236.
- [6] Cohen L D, Deschamps T. Grouping Connected Components Using Minimum Path Techniques Application to Reconstruction of Vessels in 2D and 3D Images [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR'01, 2001.
- [7] Cohen L D. Handbook of Mathematical Models in Computer Vision [M]. US: Springer, 2006, 97-111.
- [8] Deschamps T, Cohen L D. Fast Extraction of Minimum Paths in 3D Images and Applications to Virtual Endoscopy [J]. *Medical Image Analysis*, 2001, 5(4): 281-299.
- [9] Jiang Huiyan, Cui Xiaoliang, Zhou Xiaojie, *et al.* Image Segmentation based on Improved Dual Fast Marching Method [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(3): 803-810. [姜慧研, 崔晓亮, 周晓杰, 等. 基于改进的双快速行进法的图像分割方法[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(3): 803-810. ]
- [10] Fethallah B, Cohen L D. Fast Object Segmentation by Growing Minimum Paths from a Single Point on 2D or 3D Images [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2009, 33(2): 201-221.
- [11] Sethian J A. Evolution, Implementation, and Application of Level Set and Fast Marching Methods for Advancing Fronts [J]. *Journal of Computational Physics*, 2001, 169(2): 503-555.
- [12] Liron Y, Alberto B, Guillermo S. O(N) Implementation of the Fast Marching Algorithm [J]. *Journal of Computational Physics*, 2006, 212(2): 393-399.

## Road Extraction Method Using Multi-points Fast Marching and Minimum Paths

YANG Kang, LI Man-chun, LIU Yong-xue, Cheng Liang, Jiang Chong-ya

(Department of Geographic Information Science, School of Geographic & Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** This paper introduced fast marching and minimum path into road extraction from remotely sensed images and proposed a new road extraction method. The work builds on a novel variant of fast marching approach, named as multi-points fast marching. The underlying idea is to calculate minimum action map with multi-points propagating simultaneously. Efficacious saddle points are selected with judgment criterion to exclude potential erroneous shortcuts. The extraction roads are continuous line features between couples of starting points that dispense with thinning and broken lines connection. The programming implementation of the method is given and remote sensing imageries of ETM+, IKONOS and airborne images have been taken as case studies. The test images have different spatial resolution, size and road network conditions. The experiment shows that multi-points fast marching could extract roads from  $161 \times 163$  ETM+ image in 0.10 s,  $1\ 653 \times 1\ 630$  IKONOS image in 21.20s,  $1\ 579 \times 1\ 698$  airborne image in 20.80 s. The results demonstrated that the proposed method can extract multiple roads with high efficiency and little post-processing.

**Key words:** Remote sensing images; Road extraction; Fast marching; Minimum energy image; Minimum path