

SAR 图像自动道路提取

贾承丽 匡纲要

(国防科学技术大学电子科学与工程学院一系,长沙 410073)

摘要 提出了一种新的快速有效的低分辨率 SAR 图像自动道路提取算法。算法使用道路特征检测算子检测道路边缘,利用一系列模板进行边缘像素的标定和短线段的连接,最后使用动态规划技术进行道路曲线段的连接。使用低分辨 RadarSat SAR 图像进行实验,实验结果证明了该算法的有效性。

关键词 SAR 图像 道路提取 边缘检测 动态规划

中图分类号: TP775 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2005)10-1218-06

Automatic Extraction of Roads from Low Resolution SAR Images

JIA Cheng-li, KUANG Gang-yao

(Department 1, School of Electronic Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073)

Abstract A fast and efficient algorithm of automatic extraction of roads from low resolution SAR images is described here. First, a road feature detector is applied to the images to obtain the edges of roads. Then a series of templates is used for labeling the edge pixels and linking the short lines. Finally by the dynamic programming technique, the gaps between the curves of candidate roads are connected. Low-resolution SAR images of RadarSat are used to illustrate our method, and the performance is satisfactory.

Keywords synthetic aperture radar image, road extraction, edge detection, dynamic programming

1 引言

近年来,从图像中提取道路特征受到人们的关注,道路特征检测可用于多传感器图像配准、绘图学、地貌研究应用等方面。经过 20 多年国内外研究人员在此领域中不懈的努力,已经发展了提取道路影像特征的各种各样方法,有局部的、全局的、人工智能、计算机视觉、模型识别、数学模型等。已有的道路提取算法大多都针对不同的影像类别,即航空影像或卫星遥感影像,不同的比例尺(影像分辨率),不同区域的影像(如城区、乡区或郊区)和不同的道路类型,如乡村路、街道、高速公路、高等级公路等。但这些方法几乎全部是针对光学的航空图像或卫星遥感影像进行的。

由于 SAR(合成孔径雷达)是可以全天候、全天候工作的主动遥感系统,与光学图像相比,SAR 图像具有自己的特点和优势,所以从 SAR 图像上提取道路特征近年来尤其受到重视。但是由于 SAR 图像表面固有的相干斑,使得 SAR 图像的道路提取困难非常大。SAR 图像的道路目标提取与光学图像的不同之处在于:

(1) 由于乘性噪声的影响,适用于光学图像的边缘检测算子不再适用,必须开发适合于 SAR 图像乘性噪声并有利于下一步连接处理的边缘检测算子。

(2) 由于乘性噪声的影响,即使使用了适合于 SAR 图像的边缘检测算子,检测到的线段的连续性也很差,无法与光学图像相比,这就大大加大了边缘跟踪、线段连接的难度,必须使用稳定性、抗噪性较强的连接算法。

基金项目:“十五”国防预研项目(41322020401)

收稿日期:2004-09-13;改回日期:2005-03-03

第一作者简介:贾承丽(1980~),女。2001 年于国防科学技术大学获工学学士学位,2001 年至 2002 年于国防科学技术大学攻读硕士学位,2003 年于国防科学技术大学提前攻读博士学位。主要研究方向为 SAR 图像解译。E-mail: jclnudt@163.com

到目前为止,道路提取在 SAR 方面的研究还刚刚起步,国外研究者提出的主要方法包括:将两种局部边缘检测算子融合起来进行边缘检测,得到潜在道路段后将其组织成连接图,通过 MRF 完成道路网的提取^[1];改进文献[1]的方法,并引入形态学方法选择道路区域^[2];首先检测道路的曲线结构,然后通过遗传算法将曲线结构组织成道路段,最后利用蛇模型完成道路网的提取^[3]。这些方法在一定程度上完成了道路提取的任务,但是算法复杂度大,计算时间长,而且算法对参数敏感。国内的典型方法是引入公路结构特征的先验信息,构造方向势能函数(DPF),通过 DPF 最小化,来对提取的线基元进行组织,获得宏观的线性结构^[4,5]。该方法基本能够从 SAR 图像中提取出公路网,但抗噪性能差,提取的虚假边缘较多,而且计算量也相当大。

针对低分辨率的 SAR 图像自动道路检测算法,首先在 SAR 图像中使用道路特征检测算子(road feature detector)检测道路边缘点;然后分别使用两种模板进行线段标定和连接,以提取道路支持区;最后使用一个简化的动态规划函数进行道路网连接。实验结果证明,该算法较好地提取了低分辨率图像中的道路。其主要优点是方法简单、计算速度快、实用性强。

2 低分辨率 SAR 图像道路模型

中低分辨率($\geq 9\text{m}$)的 SAR 图像,其道路特性为

- (1) 道路在图像上呈现黑色细线。
- (2) 道路的宽度变化小并且宽度变化很慢。
- (3) 道路的方向变化慢。
- (4) 道路和背景的灰度层变化较大。
- (5) 道路不会很短。

3 SAR 图像线特征检测

Canny 算子、零交叉算子等差分算子在光学图像的处理中获得了满意的边缘检测效果,但在雷达图像的处理中效果不佳,因为 SAR 成像时所固有的斑点噪声,对图像的质量影响非常大。差分算子进行边缘检测通常依赖这样一个假设:图像受加性噪声污染,而这一点在 SAR 图像中是不合适的。由于 SAR 图像的噪声是乘性的,差分算子对于 SAR 图像来说不是恒虚警的^[6],而是随着图像像素点的强度值

变化而变化,这样就在亮点处检测出虚假边缘,而暗区中则丢失很多真实边缘。为了解决这个问题,出现了专门针对乘性噪声的基于统计信息的比率边缘^[7](ROA)检测算子。但由于道路在低分辨率图像上呈现为一条黑色的细线,而 ROA 检测细线边缘会造成边界定位不准,将一条边缘检测成了两条边缘,并且最重要的是 ROA 无法检测出细线边缘。因此,使用一个道路特征检测算子^[8]。

如图 1 所示,一个 $n \times n$ 的窗可以分为 3 个平行的邻域:A、B 和 C,其中每个邻域包含 N 个独立的样本像素。

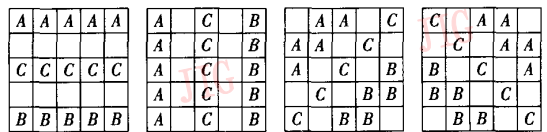


图 1 道路特征检测算子
Fig. 1 Road feature detector

T_1, T_2, T 是预设门限值,对于图像上的暗线特征,检测公式为

$$R_1 = \frac{\sum_{i=1}^N C_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad R_2 = \frac{\sum_{i=1}^N C_i}{\sum_{i=1}^N B_i}$$

定义道路边缘对比度分值函数为

$$F_i(x) = \begin{cases} 1 & R_i > 1 \\ R_i & T_1 < R_i \leq 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

当 $R_i > 1$ 时,认为该点不是边缘点;当 $R_i \leq T_1$ 时,认为该点是边缘点;当 $T_1 < R_i \leq 1$ 时,该点对应一个介于 0 和 1 之间的值; T_1 的选择可以通过估计图像上道路与周围图像灰度的对比度的大致范围确定。

$$R_c = \frac{\sum_{i=(1+N)/2}^{(N-1)/2} C_i}{\sum_{i=(N+1)/2}^N C_i}$$

$$R_c = \min(R_c, 1/R_c)$$

道路均匀度分值函数定义为

$$G(x) = \begin{cases} 1 & R_c > T_2 \\ R_c/T_2 & \text{其他} \end{cases}$$

定义道路边缘点评价函数为

$$H(x) = (1 - F_1(x))(1 - F_2(x))(G(x)) \quad (1)$$

如果 $H(x) > T$,则该点为边缘点。门限 T 的选取可

以根据期望得到的边缘量来选取,如果 T 较大,则得到的边缘量较少,道路线断裂较严重;如果 T 较小,则得到的边缘量较多,虚假边缘点增多,应根据实际情况折衷。

4 线特征组织

通过实验可以发现,局部方法检测到的线单元并不是真正的道路,其中存在大量虚假检测,而且线是破碎的。必须通过有效的方法组织线片段,获得有意义的线特征。本文的方法主要分 3 步:在第 1 步,基于一定的模板标定每个边缘点,在小范围内将属于同一直线的点标记出来,并得到关于这条直线属性描述的一个结构体;在第 2 步,基于一定的准则对这些线段做进一步连接;在第 3 步,定义一个代价函数,通过动态规划技术寻找最佳线段连接。

4.1 提取道路支持区

通过预检测获得的边缘点有些是孤立的,有些

是相邻的(八连通)。如果以这些边缘点为基础进行线特征的组织,会使情况变得比较复杂。必须将组织的基础建立在更高的层次上。因此,先将相邻的具有一致方向的边缘点组织成线支持区,并进一步拟合成线单元。

对全图进行从上到下搜索扫描。对于每一个边缘像素点,根据其方向,选择使用不同的模板(如图 2 所示)来检测它是否与前邻域中的点在同一条直线上,如果是,那么认为当前边缘点与邻域点在同一条直线上,被赋为与邻域点相同的标记。如果当前像素与邻域不匹配,那么认为此点是一条新线段的开始,将其赋上一个新的标记。进行标定时,采取整数计数法,即第 1 条线段记为 1,第 2 条记为 2,如此排列下去。在进行标定的同时,将线段的属性记录在一个结构体矩阵中,包括线段的起点、终点、方向、长度,矩阵的下标为线段的标号。图 3 给出了数据结构的解释。

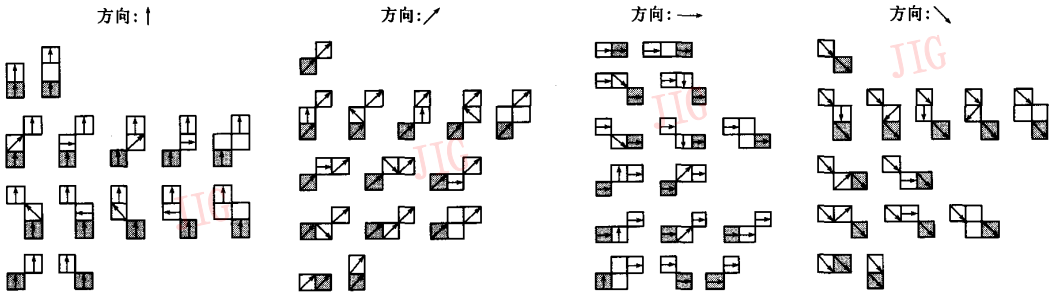
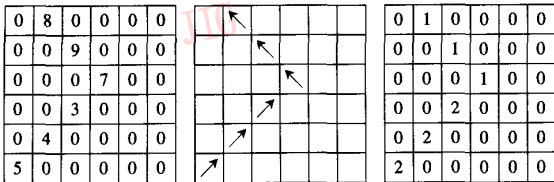


图 2 标定过程的邻域模板
(小方框表示像素点,灰色方框代表当前像素,箭头表示边缘方向)

Fig. 2 Neighborhood templates for labeling

(the small box denote image pixel, the gray one denotes current pixel, the arrow denotes edge direction)



(a) 边缘幅度图 (b) 边缘方向图 (c) 线段标定

```
Line[1] = {Start_Row 0; Start_Col 1; End_Row 2; End_Col 3;
Direction 135; Length 3}
Line[2] = {Start_Row 3; Start_Col 2; End_Row 5; End_Col 0;
Direction 45; Length 3}
```

图 3 解释数据结构

Fig. 3 Data structure interpretation

标定过程结束后,得到对线段的两种描述:在像素层,同一标记所对应的像素在同一条直线上;在线段层,对于每一个线段标记,有一个数据结构记录这条线段的属性。

4.2 连接线段

首先定义一条线段的前邻域,如图 4 所示,对于线段方向落于图 4(a)阴影内的线段,定义其前邻域为如图 4(b)所示区域,其中灰色的方格表示线段的起始点,同理,对于方向落于图 4(c)阴影内的线段,它的前邻域如图 4(d)所示。对于在上一步结构体中记录的每一条线段,检查它的前邻域,如果线段 2 的终点落于线段 1 的起点的前邻域中,并且线段 2

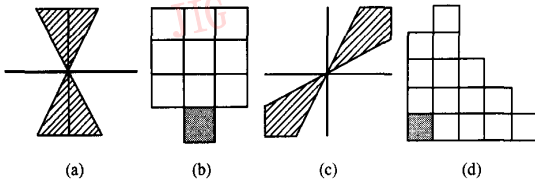


图 4 连接过程的邻域模板

(如果一条直线的方向在图(a)的阴影范围内,则其起始点具有如图(b)所示的线连接搜索邻域,对于图(c)同理可推)

Fig. 4 Neighborhood Templates for linking

(If direction of a line is in the shadow of Fig(a), the start point of the line has search region as Fig(b) for linking, and the same to the line which has the direction in the shadow of Fig(c))

的方向与线段 1 一致,那么将线段 2 并入线段 1,用线段 2 的 Start_Row 和 Start_Col 代替线段 1 的 Start_Row 和 Start_Col,线段 2 的 Length 被设为 0,以表示线段 2 被线段 1 合并。线段 1 的结构体的其他项也被相应更新,同时将标定为 2 的像素更新为 1。

反复利用上述算法对线段进行多次连接。随着线段的增长,它代表的道路也越来越长,道路可能会出现一些弯曲,继续用直线来描述道路会造成较大的误差。第 1 次连接后连接成的长线段仍然有较好的方向一致性,仍然用直线来表示;其后的连接用高阶多项式来表示,这时曲线段的方向为端点的线段方向。一般经过两次组织就可以获得较好的效果。由第 2 节定义的道路模型可知,太短的线段极有可能不是道路段。为了提取特征比较显著的线,删去相对比较短并且两端一定范围内没有其他线段相邻的线段。

由于在标定过程中,是由上到下搜索的,这样线段的起点在上,线段的终点在下,如果线段为水平方向,则起点在左,终点在右。那么线段之间建立了序关系,即对于线段 l_i, l_j , 如果 $i < j$, 则 l_i 的起点在 l_j 的起点上边或左边,这样就大大减少了线段连接的计算量。

4.3 道路网的连接

前面将检测到的道路支持区抽象成离散的曲线段,在这一步中利用曲线段之间的相互关系,定义一个代价函数,通过一个简化的动态规划技术完成曲线的组织,将道路段之间的断裂连接起来。

对于任何一条曲线段,图 5(a)定义了一个端点

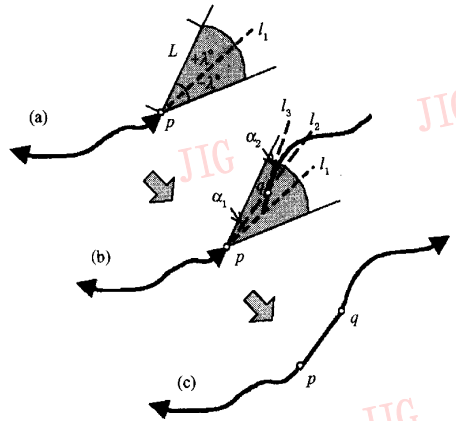


图 5 道路段连接

Fig. 5 Road segment linking

的搜索空间,其中 L 和 λ 是给定的两个门限,其中, L 表示距离, λ 是角度, l_1 是线段 e_p 沿 p 点方向的延长线。假定 q 是落于搜索空间内的另一条边缘线段 e_q 上的点(如图 5(b)), l_2 是连接 p 和 q 的线段, l_3 是线段 e_q 在 q 点的切线, α_1 是 l_1 和 l_2 的夹角, α_2 是 l_2 和 l_3 的夹角。定义代价函数如下:

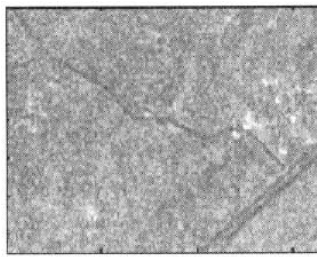
$$E(q) = |\alpha_1| + |\alpha_2| \quad (2)$$

如果边缘点像素 q 产生最小的代价 $E_{\min}(q)$, 并且 $E_{\min}(q) < t$ (t 为门限值), 那么将 e_p 与 e_q 连接起来(如图 5(c))。

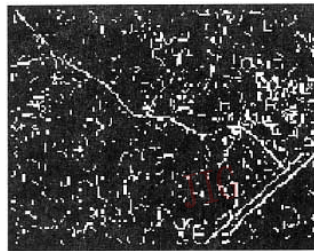
5 实验结果

使用 RadarSat 9m 分辨率汉城 SAR 图像不同地区进行实验(图 6)。在实验中,道路特征检测算子所取的参数值分别为 $T_1 = 0.25, T_2 = 2, T = 0.15$, 道路网连接的门限 t 取值为 10° 。

由实验结果可见,图像上的大部分道路被提取出来了。但提取出的道路上仍然存在断裂、虚警。通过观察发现,断裂的出现主要是由于图像上存在不可避免的干扰,如车辆、树木、建筑物等,这些干扰使得道路的灰度分布不均匀,因此在检测道路边缘时出现边缘断裂,对于较小的断裂,在线特征组织时可将其连接起来,而对于较大的断裂,线特征组织失效,而且由于边缘检测的原理是根据图像上点的一个邻域窗口中的灰度变化判断边缘点的出现,因此道路处未被检测出来。道路虚警的出现主要是边缘



原图

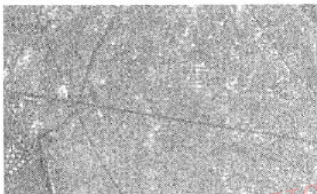


边缘检测

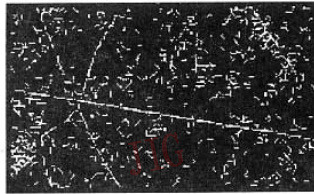


提取的道路

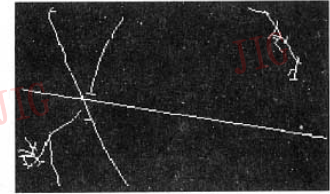
(a)



原图

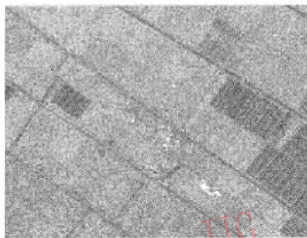


边缘检测

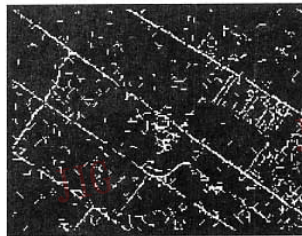


提取的道路段

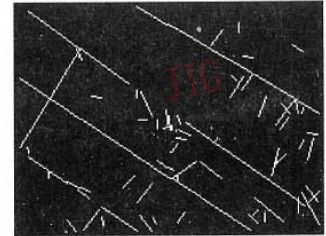
(b)



原图



边缘检测

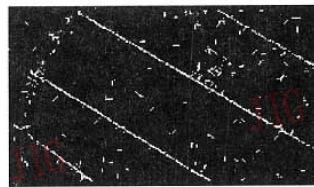


提取的道路段

(c)



原图



边缘检测



提取出的道路段

(d)

图 6 实验结果

Fig.6 Experiment result

提取算法的自适应性还不够好造成的。边缘检测的结果与阈值的选取关系很大,门限条件放宽,检测出边缘点较丰富,在边缘图中道路的形状保持得较完整,但同时虚警也较多;否则,检测出的边缘点较少,虚警也较少,但同时边缘图中道路的形状保持得不好,断裂较严重。为了尽可能地检测出道路,实验中对边缘检测的门限设置较宽松,因此道路检测结

果中出现了虚警。因此,今后还应该对边缘提取算法做进一步的优化和改进,还可以结合光学图像或 GIS 信息解决这些问题。

6 结 论

快速实用有效的 SAR 图像自动道路提取算法。

使用道路特征检测算子进行边缘检测,克服了 ROA 边缘检测的缺点;使用预先定义的模板进行边缘像素的标定和短线的连接,简化了搜索过程中像元之间可能出现的复杂关系,而且由此而自然形成的线段标记的序排列也大大减小了计算量;在对潜在道路段的抽象表征方面,由线段较短时的直线表示转为线段较长时的曲线拟合,降低了拟合误差,更准确地表示线段;最后使用一个简化的动态规划连接曲线道路段之间的断裂,效果非常好。本文的道路提取结果可用于多传感器图像配准、绘图学、地貌研究应用等方面。

参考文献 (References)

- 1 Tupin F, Matre H, Mangin J F, *et al.* Detection of linear features in SAR images; Application to road network extraction [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, **36** (2): 434 ~ 453.
- 2 Kartantzis A, Sahli H, Pizurica V, *et al.* A model-based approach to the automatic extraction of linear features form airborne images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, **39**(9): 2073 ~ 2079.
- 3 Jeon B, Jang J, Hong K. Road detection in spaceborne SAR images using a genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, **40**(1): 22 ~ 29.
- 4 LI Su-dan, WANG Zheng-zhi, ZHANG Cui. Road network detection in SAR images [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, **23**(1): 59 ~ 65. [酈苏丹, 王正志, 张翠. SAR 图像中道路的检测[J]. 国防科技大学学报, 2001, **23**(1): 59 ~ 65.]
- 5 LI Su-dan, ZHANG Cui, WANG Zheng-zhi. A study of road network detection method for SAR images[J]. Journal of Astronautics, 2002, **23**(1): 17 ~ 24. [酈苏丹, 王正志, 张翠. SAR 图像中道路检测方法研究[J]. 宇航学报, 2002, **23**(1): 17 ~ 24.]
- 6 Bovik A C. On detecting edges in speckle imagery [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1988, **36**(10): 1618 ~ 1627.
- 7 Touzi R, Lopes A, Bousquet P. A statistical and geometrical edge detection for SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, **26**(6): 764 ~ 773.
- 8 Gray Geling, Dan Jonescu. An edge detection operator for SAR images[A]. In: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering[C], Canada, 1993, **2**: 707 ~ 709.