

基于道路交叉点的高分辨率 SAR 图像道路提取

田 腾^{1,2} 陆萍萍^{1,2} 魏一搏^{1,2}

(1. 中国科学院电子学研究所航天微波遥感系统部 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100039)

摘要: 道路网络是城区 SAR 图像的重要组成部分,在灾后应急响应、图像匹配、GIS 更新等方面有着重要作用。道路特征在高分辨率 SAR 图像上通常表现为区域特性,在道路片段的提取过程中会在道路交叉点附近发生断裂。提出一种道路片段连接的新方法。首先利用形态学处理提取道路交叉点,再利用道路交叉点将断裂的道路片段连接起来,从而提取出完整的道路网。使用 0.5 m 分辨率的机载 SAR 图像进行切片实验,结果证明该方法不仅可以有效地将断裂的道路片段连接起来,并且能够有效地去除误提取的非道路片段,得到与实际情况相符合的道路网络。实验表明,该方法具有良好的正确率和品质因数。

关键词: 合成孔径雷达;高分辨率;道路提取;道路交叉点

中图分类号: TP753 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.810

Road extraction in VHR SAR image based on road junction

Tian Teng^{1,2} Lu Pingping^{1,2} Wei Yibo^{1,2}

(1. Department of Space Microwave Remote Sensing System, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Road network is the important part of the urban SAR image, and it has major roles in emergency response, GIS database updating, and image matching, and so on. Roads in very high resolution(VHR) SAR image are dark areas, they will break around the road junction when extracting road segment. Road junction could be extracted by different method from road extracting method since they have different characters. Current road extracting method do not use road junction. This paper proposed a new method to connect road segments. Firstly, road junctions are extracted by morphological transformation. Secondly, connect broken road segments by using road junctions. In 0.5 m high-resolution airborne SAR image experiment, the result indicates that the method not only connect road segments effectively, but also wipe out false road segments validly; the method could get the road network in agreement with the reality. The experimental results show good performance with correctness and quality.

Keywords: SAR; VHR; road extraction; road junction

1 引言

作为一种主动式微波遥感设备,合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)克服了光学遥感设备易受天气和光照条件等因素影响的缺点,可以对观测目标实施全天候、全天候的监控,在现代侦测任务中发挥着至关重要的作用^[1]。道路网络作为一类重要的地物目标,在灾后应急响应、影像匹配、城市交通控制、地理信息系统(geography information system, GIS)数据库更新等方面有着重要

的应用。

道路网络的提取过程一般根据 Marr 视觉理论分为低层处理、中层处理、高层处理 3 个主要步骤^[2]。低层处理是从 SAR 图像中检测出潜在的道路点;中层处理是从检测到的潜在道路点中提取出直线,以描述道路的线结构,方便进一步处理;高层处理是将中高层处理得到的断裂的道路片段连接起来,并剔除被误提取的非道路片段,从而得到完整的道路网络。

在高分辨率 SAR 图像中,道路表现为区域特性,是具

收稿日期:2015-02

有一定宽度的线状结构,因此低层处理的经典方法是基于道路线特征为模型进行检测。然而,多条道路的交汇区域形成道路交叉口,道路交叉口区域连接多条道路,不符合道路的线特征模型,在低层处理时道路交叉口区域的道路点不能被提取出来。因此,中层处理得到的线结构是在道路交叉口附近断裂的道路片段。为了得到完整的道路网络,国内外学者提出了众多的处理方法。其中包括利用马尔科夫随机场理论,根据图像的先验知识将道路片段连接起来形成完整的道路网络^[3]。通过改进低层算子进行道路点提取,得到较为完整的道路网络^[4-5]。利用多尺度的方法从不同的尺度上进行道路提取,融合得到较为完整的道路网络^[6]。通过对 SAR 图像建立语义模型进行道路提取^[7]。利用 SAR 图像与光学图像相结合的方法提取完整的道路网络^[8]。Sigurjonsson 等提出利用模板匹配将道路片段连接起来的方法^[9]。

上述方法均只利用了道路片段信息建立道路网络,而没有考虑将道路交叉点引入高层处理步骤,用于指导道路网络的建立。道路交叉点是指道路交叉口的中心点,它作为道路网络的一个重要特征,如果可以正确提取,则将大大提升道路网络提取的质量^[10]。通过从图像上提取道交叉口即可得到道路交叉点。Negri 等人利用多特征值判别道路交叉口^[11],但存在阈值设置多,依赖经验,因而自动化程度不高的问题。Nehdi 等人首先借助于外部数据,获取交叉口的大致位置及连接道路数量等信息,然后提取道路交叉口^[12],该方法需要依赖外部 GIS 数据。考虑到在道路网规划中,道路交叉口的设置、形状、规模等都有具体规定,具有特定的形态学特征,可以利用形态学处理先提取出道路交叉点^[13]。

为了在高分辨 SAR 图像中提取出正确的道路网络,提出了一种道路交叉点驱动的道路网络建立算法。首先,利用均值比率算子(ratio of averages,ROA)与交叉相关算子(cross correlation,CC)相融合的方法进行道路片段提取,提出了利用直方图均衡化进行 2 个算子检测结果的融合,该方法在简化了融合步骤的同时提高了融合质量;接着,利用 Hough 变换从道路片段中提取出矢量化的道路线段,提出了用双阈值 Hough 变换进行直线检测,提高了直线的检测质量;然后,利用形态学处理提取道路交叉点,提出了利用交叉口区域确定局部检测范围,提高了算法的自动化程度;最后,利用提取到的道路交叉点将断裂的道路片段连接起来,得到完整的道路网络。该方法简单易行,并通过实验证明拥有良好的正确率和品质因数。

2 低层处理

低层处理采用 Tupin 等提出的均值比率检测算子与互相关算子相融合的方法。该方法不受 SAR 图像相干斑噪声的影响,具有恒虚警率特性,是进行道路片段提取的经典算法^[14]。均值比率算子利用道路区域与非道路区域的灰度对比度进行道路检测,而交叉相关算子则利用这两

类区域的灰度相关性进行道路检测。两者从不同的角度进行道路提取,因而二者融合的结果可以进一步提高道路特征提取的正确性。

在处理过程中,提出在对 2 个算子的提取结果进行融合之前使用直方图规范化处理。直方图反映图像的灰度分布情况,直方图规范化(histogram specification, HS)处理是指将 1 幅图像的直方图分布情况调整为与指定图像的直方图一致。经过该直方图规范化操作后,再对二者进行如下的操作。

$$\sigma(x, y) = \frac{xy}{1 - x - y + 2xy}, x, y \in [0, 1] \quad (1)$$

即可得到最终的融合结果。其中 x 表示均值比率算子的检测结果, y 表示直方图规范化处理后得到的互相关算子的检测结果, σ 表示融合的结果。该方法不同于原文中提出的融合方案,即分别对两个算子的提取结果 x 和 y 选择阈值 x_{\min} 和 y_{\min} , 低于阈值的部分置零,再将高于阈值的部分调整动态范围为 $\max[0, \min(1, \rho - \rho_{\min} + 0.5)]$ 之后再融合,其中, ρ 为 x 或 y 。该文增加的直方图规范化操作,使得不需要进行阈值选择即可实现结果融合,提高了低层处理的自动化程度。

3 中层处理

由于部分阴影、水体等目标在 SAR 图像中呈现的特征与道路目标很相似,经过低层处理有可能被误检测为道路,成为后续处理的干扰。因此,在直线提取之前先对低层处理的结果进行去除干扰的操作。根据道路具有连贯性,在图像上具有较大的联通区域,因此首先对低层处理的结果进行形态学处理,剔除图像上面积较小的区域,从而对低层处理的结果去除一定的干扰区域。通过 Hough 变换从底层处理得到的道路特征中提取直线。Hough 变换是从图像中进行直线提取的经典算法^[15]。Hough 变换的基本原理是利用点与线的对偶性,将图像空间的曲线检测问题转化为参数空间的峰值检测问题。在利用 Hough 变换提取直线时需要选择提取道路长度的阈值,由于 SAR 图像中的道路长短不一,通过单阈值的 Hough 变换提取直线存在缺陷:在选择高阈值时,会无法提取出部分直线;在选择低阈值时,会得到大量断裂的线段。针对这一情况,提出采用双阈值 Hough 变换进行中层处理,即先通过大阈值得到图像上较长的道路线段;再通过低阈值提取出较短的道路线段,补充到道高阈值处理得到的结果中。将 2 种阈值得到的结果融合在一起,得到了更好的直线提取结果。

4 高层处理

4.1 提取道路交叉点

在高分辨率 SAR 图像中,由于道路的后向散射系数很低,道路交叉口表现为明显的暗区域,并且有着独特的形态特征,可以通过一定的形态学处理将道路交叉口检测出来,提取道路交叉口的中心点即可得到道路交叉点。阴

影、水体等也具有很低的后向散射系数,在高分辨率 SAR 可能与道路交叉口具有相似的形态特征,在形态学处理过程中也可能被误检测为道路交叉口,因而得到被误提取的道路交叉口。然而,道路交叉口连接着多条道路,这是其他目标不具备的独特形态特征,可以利用这一特点将道路交叉口进一步辨别出来。

通过全局区域检测与局部形状识别 2 个步骤进行道路交叉口提取。首先通过低帽变换进行全局形态检测,找到道路交叉口所在的区域,再通过形态学处理找到该区域的中心点,标记为候选道路交叉口。随后,通过局部形状识别计算各道路交叉口是否连接着多条道路,从而剔除因阴影、水体等误提取出的候选道路交叉口,得到最终的提取结果,具体步骤可参照文献[16]。其中,在局部形状识别过程中,原文使用先验的搜索长度,提出由道路交叉口的直径确定搜索范围,提高了处理的自动化程度。

4.2 利用交叉点连接道路

通过低层和中层处理,得到了孤立的道路矢量片段,为了得到完整的道路网络,还需引入全局信息,如通过 MRF(markov random field)、GA(genetic algorithm)等建立能量函数,优化性能函数得到最终的道路网络。不同于上述思路,提出了一种道路交叉点驱动的道路网络全局连接算法,通过预先提取到的道路交叉点将这些分离的道路片段关联起来,如图 1 所示。

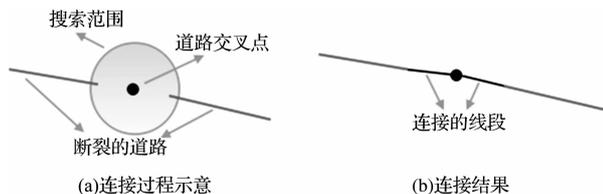


图 1 利用交叉点连接道路

道路连接过程如下。

1) 遍历提取到的道路交叉点,搜索道路交叉点周围一定范围内是否存在道路片段。该搜索半径由道路交叉点所在的道路交叉口的直径确定。

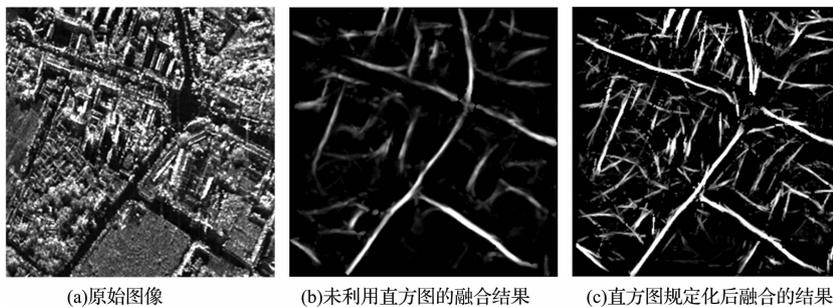


图 2 低层处理的结果

中层次的处理结果如图 3 所示,其中,图 3(b)和图 3(c)分别给出了采用单阈值 Hough 变换进行直线提取

2) 若该搜索范围内存在道路片段,则将这些线段标记为正确提取到的道路片段,相应地,将该道路交叉点标记为正确提取的道路交叉点,同时,将该道路交叉点与检测到的道路片段连接,连接得到的道路片段也标记为正确提取到的道路片段。

3) 若搜索范围内不存在道路片段,则将该道路交叉点标记为非道路交叉点。上述步骤充分利用了提取到的道路交叉点和道路线段互为补充的特性,同时考虑到了有可能存在误提取的道路交叉点和道路片段的情况,可以得到良好的道路连接效果。

连接好的直线显示图像上抽象出来的的线状道路网,并不能反映高分辨率 SAR 图像道路的区域特性。为了得到图像上的道路区域,将线状道路网通过膨胀操作得到位置模板,给出真实道路所在的大致位置,从潜在的道路点中提取出真实道路网络。膨胀操作的参数设置为图像中主干道的宽度。潜在的道路点由去除干扰后的低层处理结果给出。由于低层处理会在道路交叉点附近发生断裂,去除干扰后的低层处理结果并不能包括全部的道路区域。为了补充道路交叉点附近的道路点,以形态学处理得到的道路交叉点为中心,一定半径的圆形范围内的点均标记为潜在的道路点。该半径由道路交叉点所在道口交叉口的区域直径确定。

5 实验结果及分析

为了验证本文所述算法的有效性,采用中科院电子所提供的 0.5 m 分辨率的机载高分辨率 SAR 图像切片进行实验。原始 SAR 图像的大小为 857×851 。

低层次的处理结果如图 2 所示,其中,图 2(b)显示了未对图像进行直方图规定化处理,直接对均值比率线检测算子与交叉相关检测算子检测得到的结果进行融合得到的结果,图 2(c)显示了对交叉相关检测算子检测得到的图像进行直方图规定化处理后与均值比率线检测算子检测得到的结果进行融合得到的结果。对比可以看出,使用直方图规定化处理进行融合的方法使得不仅不需要进行阈值选择即可实现结果融合,并且融合的结果具有更高的图像质量。

时采用高阈值和低阈值处理得到的结果,可以看到高阈值时,会无法提取出部分直线;在选择低阈值时,会

得到大量断裂的线段,不利于后续处理。图3(d)给出了双阈值 Hough 变换进行直线提取的结果。对比以看

出,双阈值 Hough 变换能够得到质量更高的直线提取结果。

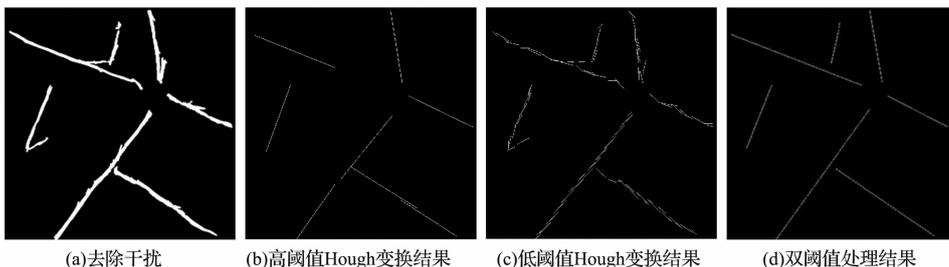


图3 中层处理的结果

道路交叉点的提取结果如图4所示,其中,图4(a)给出了全局检测得到的道路交叉口所在的区域,提取道路交叉口的中心点即为道路交叉点,如图4(b)所示。由于阴影等的干扰会误提取出一些交叉点,因此进行局部形状识

别,检测交叉点连接道路的个数,从而对全局检测提取到的道路交叉点进一步判别,得到最终的道路交叉点提取结果如图4(c)所示。图4(c)中红色星形图标代表被确认为道路交叉点;青色十字图标代表被判断非道路交叉点。



图4 形态学处理提取道路交叉点

交叉点驱动的道路片段连接结果如图5所示,其中,图5(a)显示了将形态学处理得到的道路交叉点与中层处理得到的道路片段进行连接得到的线状道路网络。图5(b)是利用线状道路网络通过膨胀制作得到的位置模板,

标记真实道路存在的大致范围。图5(c)利用去除干扰的低层处理结合道路交叉点制作的潜在道路区域。利用位置模板可以从潜在道路区域中提取出真实的道路网络,最终提取的结果如图5(d)所示。

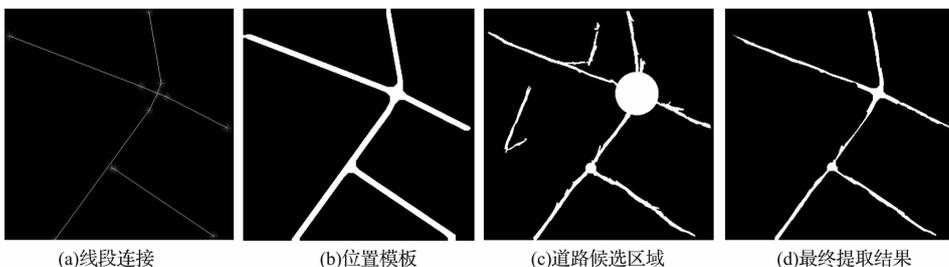


图5 利用交叉点建立道路网络



图6 交叉点处理前后对比图及真实道路网络

图6对比展示了利用交叉点建立道路网络前后的道路提取结果并给出了手动提取出的真实道路网络。其中,图6(a)显示了未利用交叉点连接时道路提取的结果,可以看出道路片段在交叉口处发生明显的断裂;并且某些非道路区域被误检测为道路区域。图6(b)显示了使用本文提出的交叉点驱动的道路片段连接方法后得到的道路网络,由实验结果可知,该方法不仅可以有效地将断裂的道路连接起来,并且能够有效地去除被误提取的道路区域。图6(c)给出了手动提取出的真实道路网络。结合手动提取出的真实道路网络,如表1所示选取提取率、正确率和品质因数3个参数对交叉点处理前后的提取结果进行了量化评估,结果表明该方法的有效性。

表1 道路交叉点处理前后提取结果的量化 (%)

	提取率	正确率	品质因数
交叉点处理前	69.43	59.73	49.06
交叉点处理后	94.15	98.94	86.35

6 结论

为了提取高分辨率 SAR 图像中的道路目标,将道路交叉点信息引入道路网络连接步骤中,提出了一种道路交叉点驱动的道路网络建立方法,其过程主要包含低层次的道路特征提取、中层次的道路基元提取、道路交叉点提取以及高层次的道路网络连接4个步骤。传统道路提取方法根据提取到的道路片段连接道路网络,没有考虑使用道路交叉点信息。在实际处理图像的过程中,低层处理得到的道路片段会在道路交叉点附近发生断裂,利用交叉点信息进行道路片段连接具有实用价值。该文的创新点如下:1)改进了道路提取算子的融合过程,免去了2个阈值选择过程;2)提出了一种基于双阈值 Hough 变换的道路基元提取方法,提高了道路基元的完整性;3)提出了道路交叉点驱动的道路网络建立方法,优化了基于形态学处理的道路交叉点提取的方法。该方法充分利用了道路形态特征和道路的功能性特性,可以提取到图像中90%以上的道路,并具有良好的正确率和品质因数的结果。

参考文献

- [1] 陈少华,韩冰,雷斌. SAR 海冰 MRF 分割精度与图像质量的关系研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(3):31-35.
- [2] 贾承丽. SAR 图像道路和机场提取方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2006.
- [3] 赵青,孔繁兴. 基于 MAP-MRF 模型的 SAR 图像道路提取[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(10): 2028-2030.
- [4] 杨道莲,鲁昌华,张金良,等. 基于 ROEWA 与 Hough 变换的 SAR 图像边缘检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(6):543-548.
- [5] 宋瑞华,王宏伟,薛强飞. 基于优化蚁群算法的图像边缘

检测改进算法[J]. 电子测量技术, 2013, 36(8):56-60.

- [6] HE C, LIAO Z X, YANG F, et al. Road Extraction from SAR imagery based on multiscale geometric analysis of detector responses[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, 5(5): 1373-1382.
- [7] WANG J L, QIAN J H, MA R B. Urban road information extraction from high resolution remotely sensed image based on semantic model[C]. IEEE Conference Publications, Geoinformatics, 2013: 2287-2291.
- [8] HE C, YANG F, YIN S, et al. Stereoscopic road network extraction by decision-level fusion of optical and SAR imagery[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 6(5): 2221-2228.
- [9] SIGURJONSSON S O, BENEDIKTSSON J A, SVEINNESSON J R. Street tracking based on SAR data from urban areas[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005: 2255-2262.
- [10] RAVANBAKHS M, HEIPKE C, PAKZAD K. Road junction extraction from high resolution aerial imagery [J]. The Photogrammetric Record, 2008(23):405-423.
- [11] NEGRI M, GAMBA P, LISINI G. Junction-aware extraction and regularization of urban road networks in high-resolution SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(10):2962-2971.
- [12] RAVANBAKHS M, HEIPKE C, PAKZAD K. Knowledge-based road junction extraction from high-resolution aerial images [C]. Urban Remote Sensing Joint Event, 2007: 1-8.
- [13] 程江华,高贵,库锡树,等. 高分辨率 SAR 图像道路交叉口检测与识别新方法[J]. 雷达学报, 2012(1):100-108.
- [14] 史俊峰. SAR 图像道路提取方法研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2011.
- [15] 宋晓宇,袁帅,郭寒冰,等. 基于自适应阈值区间的广义 Hough 变换图形识别算法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5):1109-1117.
- [16] CHENG J, JIN T, KU X, et al. Road junction extraction in high-resolution SAR images via morphological detection and shape identification [J]. Remote Sensing Letters, 2013, 4(3):296-305.

作者简介

田腾, 1991 年出生, 在读硕士研究生。主要研究方向为合成孔径雷达图像处理。
E-mail: TianTengIECAS@126.com