

粒度 Hough 变换及其在遥感影像直线检测中的应用

巫兆聪¹ 万茜婷¹ 梁 静¹ 周 正¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:在基于 Hough 变换的遥感影像直线检测的过程中引入粒度计算的概念,利用粒度计算具有多角度、多层次观察问题的能力,对遥感影像中的直线边缘特征进行不同粗细的粒度分析,建立粒度计算概念下的直线检测算法,实现对不同长短、粗细直线的识别。真实的 IKONOS 遥感影像机场跑道提取试验证明了该方法的有效性。

关键词:遥感影像;直线检测;粒度计算;Hough 变换

中图法分类号:P237.4

粒度计算是信息处理的一种新的概念和计算范式^[1-2],现已成为人工智能领域研究的热点之一。在对遥感图像进行信息处理的过程中,总是希望能从各种不同的角度、宏观或微观的不同层次来观察、分析、推理进而解决复杂的问题;而问题的不同角度可以看成是不同的粒,观察问题的不同层次可以认为是不同的粒度。粒度计算通过研究不同粒度下的问题分析、各种粒度间的相互转换以及粒度之间计算结果的融合,以实现智能计算^[3],为解决传统 Hough 变换进行直线检测所存在的问题提供了新的途径。

1 Hough 变换直线检测存在的问题

Hough 变换方法检测直线正是利用极坐标变换,将图像中的边缘点变换到参数空间 (ρ, θ) ,然后由所有可能经过该边缘点的直线对其对应参数积累单元进行投票,实际存在的直线参数所对应的积累单元将形成局部峰值,检测局部峰值即可获得直线定位参数。由此,困难的图像空间全局直线检测转化为相对容易的参数空间局部峰值检测^[4-5]。

在实际应用中,边缘点通过变换得到的参数 θ, ρ 与真实的参数之间存在一定的偏差,这导致变换之后,位于同一条直线的数据点所对应的正弦曲线簇在参数空间中并不交于理论上的同一点,

而是在一小区域内相交,而边缘点定位坐标所含误差的具体形式以及 θ, ρ 量化误差的大小决定区域大小。参数空间量化间隔过小,会使同一条直线上的点对相邻积累单元投票,导致将一条直线检测为多条直线;参数空间量化间隔过大,可能使近距平行直线对同一积累单元投票,导致在图像空间中可分辨的直线,在参数空间中不能分辨。

2 粒度 Hough 变换直线检测方法

2.1 Hough 变换直线检测中粒度计算概念的引入

假设直线对应的量化参数为 (ρ_c, θ_c) ,量化间隔为 $(\Delta\rho_0, \Delta\theta_0)$ 。进行 Hough 变换后,图像上的边缘点对每条它所在的直线投一票,因此,直线所在区域的面积与其投票值成正比。如图 1 所示,将 (ρ_c, θ_c) 所对应的图像空间范围记为 1,而 $(\rho_c, \theta_c + \Delta\theta_0)$ 所对应的图像空间范围记为 2。图 2 中阴影部分的面积 $(\Delta\rho_0 \times \Delta\rho_0 / \sin\Delta\theta_0)$ 就是 $(\rho_c, \theta_c + \Delta\theta_0)$ 的投票值,且 $(\rho_c, \theta_c - \Delta\theta_0)$ 和 $(\rho_c, \theta_c + \Delta\theta_0)$ 上的票数相等。而对于 $(\rho_c + \Delta\rho_0, \theta_c)$ 和 $(\rho_c - \Delta\rho_0, \theta_c)$,一般情况下 (ρ_r, θ_r) 上点对两者的投票数为 0。而点 (ρ_c, θ_c) 上的投票可以通过计算 $L \times \Delta\rho$ 得到,其中 L 为待检测的有效直线长度。峰值检测的阈值 η 为:

$$\eta \geqslant (L \times \Delta\rho_0) / (L \times \Delta\rho_0 + \frac{2\Delta\rho_0^2}{\sin\Delta\theta_0}) \quad (1)$$

化简后可得:

$$\eta \geq \frac{L}{(L + 2 \times \Delta\rho_0 / \sin\Delta\theta_0)} \quad (2)$$

式中, η 和有效直线长度 L 有关, 下界为 $1/3$ 。

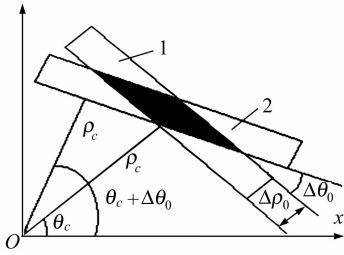


图 1 特定的 (ρ_c, θ_c) 与邻域的投票值在图像空间中的几何关系

Fig. 1 Geometric Relations Between a (ρ_c, θ_c) 's Votes and Its Neighbors Domain's in the Image

下面将粒度计算的基本框架结构, 即粒 (granules)、粒视图及粒水平 (granulated views and levels)^[6] 等概念引入到 Hough 变换检测直线的过程中。

粒的选取, 可理解为选取不同的观察角度, 粒是各个粒度层次上所观察的对象。参数空间量化间隔 $(\Delta\rho, \Delta\theta)$ 、有效直线长度 L 直接影响着局部峰值检测的阈值大小, 因此, $(\Delta\rho, \Delta\theta)$ 和有效直线长 L 就是 Hough 变换直线检测中的粒度。粒度 $\Delta\rho$ 的大小与被检直线的粗细直接相关, $\Delta\theta$ 的大小则与被检直线的数目、定位精度、误检率等有关, 而有效直线长 L 大小影响着被检直线的长度和数目。

粒视图及水平是在某个特定的粒度下所描述问题的视图, 即根据不同粒度分层后所得到的层视图, 每一个粒视图对应一种划分。在直线检测中, 粒视图及水平也就是在某一层上对于一组特定的 $(\Delta\rho, \Delta\theta)$ 进行 Hough 变换所得到的检测结果。在特定的 $(\Delta\rho, \Delta\theta)$ 粒度水平下, Hough 空间中某个 (ρ, θ) 的投票值表示图像空间中对应有区域内有多少个像素点, 该区域被看成一条直线, 所以也可以认为是检测直线的长度, Hough 变换空间中的所有 (ρ, θ) 表示在该粒度水平下检测到的所有直线。 $\Delta\theta$ 与 $\Delta\rho$ 量化间隔过小, 会导致计算量很大, 各组共线点数变少, 增加检测局部峰值所在组的难度; 反之 $\Delta\theta$ 与 $\Delta\rho$ 量化间隔过大, 虽然计算量小, 但参数空间的集聚效果较差, 找不到准确描述图像空间直线的参数值。

通过利用不同粗细的粒度进行直线检测, 就可以从这一系列粒视图及水平的组合与比较中得到对原遥感影像直线信息的较全面的了解。

2.2 粒度 Hough 变换直线检测算法

1) 设置 Hough 变换距离 ρ 、角度 θ 的扫描范围。通过预测图像线段的平均长度作为 L , 参数空间间隔值为 $(\Delta\rho, \Delta\theta)$, 分配相应的参数空间并初始化为 0。

2) 对边缘点逐点进行 Hough 变换, 得到参数空间的积累矩阵 $HT[\rho_j][\theta_i]$ 。

3) 对 $HT[\rho_j][\theta_i]$ 中各数组元素进行扫描, 当 (ρ_j, θ_i) 对应积累单元票数满足:

$$\frac{HT[\rho_j, \theta_i]}{HT[\rho_j][\theta_{i-1}] + HT[\rho_j][\theta_i] + HT[\rho_j][\theta_{i+1}]} \geq \frac{L}{L + 2\Delta\rho/\sin\Delta\theta} \quad (3)$$

(ρ_j, θ_i) 即为有效直线参数, 记录该参数 $(\rho_{\text{eff}}, \theta_{\text{eff}})$ 到 EffectLine 数组中, 并设 N_{seg} 用于记录该直线上线段数, pre 用于判断线段起始点。

4) 对整幅图像的边缘点进行扫描, 提取 EffectLine 记录中有效直线上所有点的坐标。若当前边缘点为有效直线上的点, 则到步骤 5); 否则到步骤 6)。

5) 判断当前点是否为直线 EffectLine 中第 k 条直线的起始点, 若是, 则将当前点直接放入记录该直线上点的对应 vct 数组中; 否则计算当前点与前一点的距离 dist。设置线段距离容忍度 Threshold, 当 dist 大于或等于 Threshold 时, 就认为直线不连续, 该直线上线段数 N_{seg} 加 1, 并标记新线段起始点。最后, 修改 pre 为当前点坐标。

6) 令 k 自增 1, 回到步骤 4)。若针对当前点, $k=n$, 即完成了对所有直线的扫描。扫描下一个边缘点, 直到完成对所有边缘点的扫描。

7) 利用各直线对应的 vct 所记录的点分别对各线段进行拟合。将经过最小二乘拟合后的所有直线段起点和终点坐标存入结果数组 result 中, 并在原始图像上显示出检测的结果。

8) 改变 $(\Delta\rho, \Delta\theta)$ 、 L 及 Threshold 设置, 得到各粒视图及水平, 形成层次结构进行分析比较, 得到最终检测结果。

3 高分辨率遥感影像直线检测试验

试验采用的数据为德国 Frankfurt 机场 2006 年 5 月 IKONOS 高分辨率影像的单波段数据, 如图 3(a) 所示, 影像大小 400 像素 \times 400 像素, 分辨率 4 m。试验目标为提取影像中机场跑道的直线段信息。先对原始影像进行图像增强, 并利用 Canny 算子对遥感影像进行预处理, 如图 3(b)。

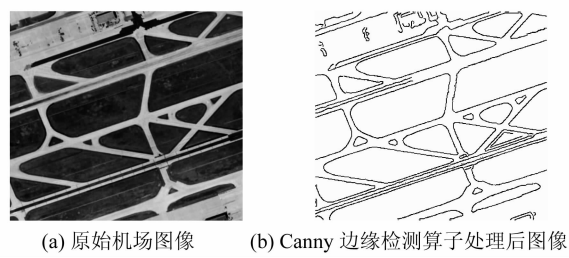


图 2 原始影像与预处理结果图

Fig. 2 Original Image and Preprocessed Image

3.1 各粒度对直线检测结果的影响

图 3、图 4、图 5 为不同粒度下直线段检测部分结果。

由图 3 可看出,当 $(\Delta\rho,\Delta\theta)$ 相同时,随着 L 的减小,检测出的较短直线段数量增多。说明 L 越短,要求峰值与其周围积累单元的投票值差异越小,符合阈值的直线参数就越多。在其他因子相同的情况下, η 与 L 成正比,减小 L 可以提高算法检测短线段的能力。

由图 4 可看出,当 $\Delta\theta$ 、 L 相同的,随着 $\Delta\rho$ 的减小,检测出的直线段随之减少。说明 $\Delta\rho$ 越小,要求峰值与其周围积累单元的投票值的差异越大,Hough 空间中符合阈值的直线参数越少。另外, $\Delta\rho$ 量化过细,会导致峰值票数过分分散,使得检测出来的直线均为短直线段,如图 4(c)所示。并且对于原图像上宽度大于 $\Delta\rho$ 的直线,会被认为是由多条平行的细短直线组成,由于角度分辨

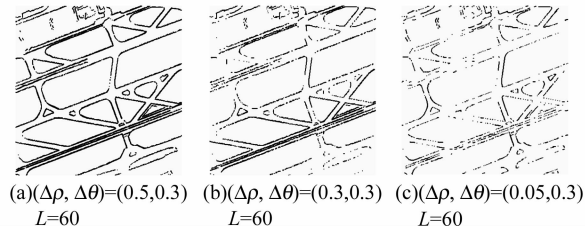


图 4 相同 $(\Delta\theta,L)$ 、不同 $\Delta\rho$ 下直线段检测结果

Fig. 4 Results of Line Detection with Different $\Delta\rho$

通过比较分析发现,Hough 空间划分越细,有效直线长 L 相应减小才能得到比较合理的峰值选取阈值;粒度划分过粗,某些方向上的直线点投票只能归于 Hough 空间中邻近直线参数,而 L 变大导致符合阈值的直线段减少,容易造成漏检和直线定位错误;粒度划分过细,峰值票数分散,容易发生峰值淹没和误检,导致大于该粒度划分的直线段极易形成“虚线”。理论上应投于同一个 Hough 空间网格的票数,因为 $(\Delta\rho,\Delta\theta)$ 量化不当而投在相邻网格中,导致产生峰值扩散^[6]的现象。观察分析 Hough 空间票数分布,发现 θ 量化过

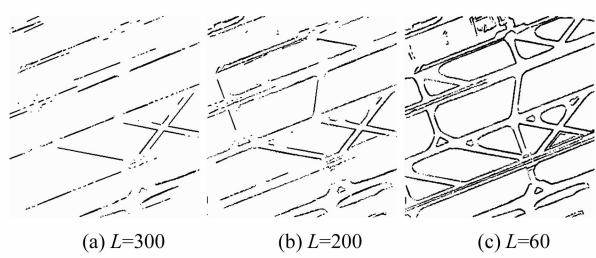


图 3 相同 $(\Delta\rho,\Delta\theta)$ 、不同 L 下直线段检测结果

Fig. 3 Results of Line Detection with Different L

率的关系,这些平行直线与原始直线边缘平行或呈一定的角度,可能导致错误的直线参数。因此,在其他因子相同的情况下, η 与 $\Delta\rho$ 成反比,适当地逐步减小 $\Delta\rho$,提高 Hough 空间中直线宽度的搜索分辨率,可以增强算法检测细线的能力。

由图 5 可看出, $\Delta\rho$ 、 L 相同,随着 $\Delta\theta$ 的量化程度增加,检测的直线段随之增多。说明 $\Delta\theta$ 越小,要求峰值与其周围积累单元的投票值的差异越小,Hough 空间中符合阈值的直线参数也越多。 $\Delta\theta$ 量化过粗,有的方向上的直线边缘无法检测,造成漏检现象,如图 5(a)所示; $\Delta\theta$ 量化过细,宽度大于量化值的直线,会被认为是多条不同方向的细线段,较长和较粗线段的信息不准确。因此,当其他因子相同的情况下, η 与 $\Delta\theta$ 成正比,适当地逐步减小 $\Delta\theta$,提高 Hough 空间中角度的搜索分辨率,可以增强算法检测不同方向直线段的能力。

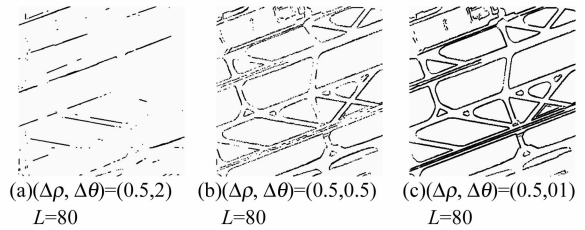


图 5 图 5 相同 $(\Delta\rho,L)$ 、不同 $\Delta\theta$ 下直线段检测结果

Fig. 5 Results of Line Detection with Different $\Delta\theta$

粗, ρ 量化过细,将会导致原有峰值票数的分散,即峰值上票数减少,其 ρ 方向上的相邻网格票数增加; θ 量化过细, ρ 量化过粗,将会导致在原有峰值的 θ 方向上产生多个峰值。对 $\Delta\rho$ 和 $\Delta\theta$ 取不同的值,扩散的程度也不尽相同。

3.2 试验结果

利用本文算法对不同大小的遥感图像进行大量试验,初步结果表明,Hough 变换的理想粒度 $(\Delta\rho,\Delta\theta)$ 的粗细可能只与被检测图像大小有关。对于一幅 $N_1\times N_2$ 的图像来说,为不失一般性,可假设图像的大小为 $N\times N$, $N=\max\{N_1,N_2\}$ 。

为便于比较分析,将 $\Delta\rho$ 、 $\Delta\theta$ 表示为:

$$\Delta\rho=\frac{1}{sf_{\rho}},\Delta\theta=\frac{1}{sf_{\theta}}\tag{4}$$

图像大小 N 与 sf_{ρ} 、 sf_{θ} 的经验关系式:

$$sf_{\theta}(N)=\text{ceil}(\frac{N}{50}),$$
$$sf_{\rho}(N)=\text{ceil}(\frac{N}{30})\tag{5}$$

另外,对于有效直线长度 L ,通过预测图像上直线段的平均长度 \bar{L} 进行取值。而对于用来判断直线段连接与否的阈值 Threshold,在 2~15 的范围内可较好地抑制误检。

对于本文试验,当粒度选取为 $(\Delta\rho,\Delta\theta)=(0.075,0.125)$, $L=50$,Threshold 为 2.5 时,直线段的检测效果较理想,Hough 空间中扩散现象较少。粒度计算概念下的 Hough 变换检测共检测出 2 774 条直线段,检测得到的部分直线段相关参数信息列于表 1。

表 1 检测结果中直线段的定位信息

Tab. 1 Positioning Information of Line Segments in the Result Image

直线段号	$\theta/(^{\circ})$	$\rho/\text{像素}$	长度	起点坐标	终点坐标
1	179.875	-305.625	11	(306,249)	(306,280)
2	178.500	-287.850	11	(297,58)	(289,362)
3	179.875	-274.500	11	(275,198)	(275,219)
...
2 774	45.000	4.03.000	12	(173,3)	(396,226)

另外,本文通过穷举试验,基于图像大小与粒度之间的经验关系选取最佳的粒度参数,因而代价较大,适应性不强。设计直线检测效果的评价指标,并由其确定合适的粒度以及各粒度检测结果的综合,将是下一步研究的方向。

参 考 文 献

[1] 李道国,苗夺谦,张红云. 粒度计算的理论、模型与方法[J]. 复旦学报·自然科学版,2004,43(5):837-841

[2] 张燕平,张铃,吴涛. 不同粒度世界的描述法[J]. 计算机学报,2004,27(3):328-333

[3] Yao Yiyu. Granular Computing: Basic Issues and Possible Solutions[C]. The 5th Joint Conference on Information Sciences, Atlantic,2000

[4] 金术玲. Hough 变换关键问题研究及其在航迹起始方法中的应用[D]. 西安:西北工业大学,2004

[5] 汪哲慎,李翠华. 基于改进 Hough 变换的建筑目标搜索与识别[J]. 中国图像图形学报,2005,10(4):463-467

[6] Yao Yiyu. Perspectives of Granular Computing[C]. 2005 IEEE International Conference on Granular Computing, Beijing, 2005

第一作者简介:巫兆聪,教授,博士,主要从事高分辨率遥感影像信息提取、遥感数据智能处理方面的科研工作。
E-mail:zcwoo@whu.edu.cn

Line Detection in Remote Sensing Images Using Hough Transform

Based on Granular Computing

WU Zhaocong¹ WAN Qianting¹ LIANG Jing¹ ZHOU Zheng¹

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079,China)

Abstract: The concept of granular computing into line detection in remote sensing images using Hough transform is introduced, according to the characteristic of granular computing that it can observe problems at multiple views and levels. An algorithm on line detection based on granular computing is established by analyzing linear edge features with granularity of various sizes. Different quantification interval of corresponding granular level is employed, so as to extract lines with different length and width efficiently. An application on airport runways extraction in the real IKONOS image proves the validity of this algorithm.

Key words: remote sensing image; line detection; granular computing; Hough transform

About the first author: WU Zhaocong, professor, Ph .D. He is concentrated on the research in the information extraction in high-resolution remote sensing images and remote sensing data intelligence processing.
E-mail: zcwoo@whu.edu.cn