

基于预存储权值矩阵的多尺度 Hough 变换直线提取算法

徐胜华¹, 朱庆², 刘纪平¹, 韩李涛³, 赵雪莲⁴, 张立华⁵

1. 中国测绘科学研究院 政府地理信息系统研究中心, 北京 100039; 2. 武汉大学, 湖北 武汉 430079; 3. 山东科技大学, 山东 青岛 266510; 4. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 5. 海军大连舰艇学院, 辽宁 大连 116018

Straight Line Extraction via Multi-scale Hough Transform Based on Pre-storage Weight Matrix

XU Sheng-hua¹, ZHU Qing², LIU Ji-ping¹, HAN Li-tao³, ZHAO Xue-lian⁴, ZHANG Li-hua⁵

1. Research Center of Government Geographic Information System, Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China; 2. Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China; 4. China University of Geosciences, Wuhan 430079, China; 5. Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China

Abstract: Aiming at the critical time-consuming and accuracy issues of straight line extraction from large-size remote sensed imagery, after briefly reviewing the existing straight line extraction methods, a multi-scale Hough transform method based on the pre-storage weight matrix is proposed, which saves a lot of storage space, takes care of discretization errors, and avoids the abruptness and conglutination of characters that are the drawbacks of the existing straight line extraction algorithms. The improvement of classical Hough transform method in detail is introduced. To optimize speed and precision, the best choice of accumulator based on image size is suggested too. The experimental results show that this algorithm is more efficient in computation and robust to noise, and is rich in feature content and accuracy, especially for large-size images.

Key words: multi-scale Hough transform; weight matrix; pre-storage; straight line extraction

摘要:针对 Hough 变换提取直线算法在速度、精度和影像大小三方面的局限,提出一种基于预存储权值矩阵的多尺度 Hough 变换算法。首先阐述对经典 Hough 变换的改进策略,对参数空间中 ρ 的分辨率和 θ 的分辨率的最佳取值也作了探讨,之后详细说明基于预存储权值矩阵的多尺度 Hough 变换直线提取算法。实验证明,本文提出的算法能显著提高实际影像处理的速度和直线提取的精度,特别是对比较大的影像具有计算量小、抗噪能力强等特点。

关键词: 多尺度 Hough 变换; 权值矩阵; 预存储; 直线提取

1 引言

图像中的直线特征是视觉感知的重要线索和解释图像的基本依据^[1, 2], 图像中的直线描述形式简洁直观, 易于处理、计算, 反映了图像边缘的整体特征。但是直线在图像中是以离散的像素点存在的, 从图像中的像素点到形成几何意义上的直线是一个图形学实现的逆过程, 因此从图像中提取直线存在相当的难度。目前解决这个问题的方法主要有两大类: 第一类是基于图像域的直线提取方法, 是直接

图像空间中对图像的梯度或灰度等信息进行处理; 第二类是基于变换域的直线提取方法, 是在图像的变换域空间中对图像进行间接处理。直线提取主要算法的分类及其评述见表 1。

基于图像域的方法虽然速度较快, 但对噪声敏感, 易产生断裂的短直线, 限制了其实际应用范围, 基于变换域的方法特别是 Hough 变换抗噪性能较好, 适合并行处理, 对部分遮盖现象不敏感, 是计算机视觉、图像处理以及模式识别等领域中的研究热点。近几年来, 很多学者考虑的是

收稿日期: 2006-12-18; 修回日期: 2007-06-06

基金项目: 中国博士后科学基金项目(20070420412); 国家 863 计划项目(2007AA122215); 国家自然科学基金项目(40671158); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-05-0626)

作者简介: 徐胜华(1978-), 湖北大悟人, 博士, 主要研究方向为遥感影像处理, 数字摄影测量, GIS。E-mail: xushenghua@gmail.com

同时优化参数空间和图像空间, Kyrki 等提出的 Extended Connective Randomized Hough Transform 方法一方面利用边缘图像的连续性减少无效采样数据, 另一方面利用精度不高的梯度方向信息减少无效积累的问题^[9]; Chung 等提出的改进斜截式 Hough 变换用 $a-b$ 斜截式参数空间替换经典 Hough 变换的 $\rho-\theta$ 极坐标系参数空间, 避免了

复杂耗时的三角运算^[10]; Song 等提出一种利用特征点的梯度估计加速累积和边界记录器来剔除噪声点的 Hough 变换方法^[11]; Bandera 等提出的 Hough 变换方法分两个步骤, 先根据随机 Hough 变换的方法得到精确的参数空间, 然后根据基于均值平移的非监督法聚类得到的聚类中心代替经典 Hough 变换中耗时的峰值检测^[12]。

表 1 直线提取算法的分类及其评述

Tab. 1 Classification and methods of line extraction

类别	算法	评述
基于图像域的 方法	层次记号编组算法	速度快, 能连接共线短直线, 参数难选择, 分辨率低
	相位编组算法	对灰度变化敏感, 分组误差易造成断裂直线
	启发式连接算法 ^[1]	易产生断裂的短直线, 受噪声影响敏感
	线空间的直线抽取算法 ^[1]	精度高, 计算量大, 需顾及直线段的上下文关系
基于变换域的 方法	快速 Hough ^[3]	硬件成本高, 算法的灵活性较差
	自适应 Hough ^[4]	计算量小, 存储空间大, 受噪声影响敏感
	随机 Hough ^[5]	仅适合边缘像素较少的情况
	模糊 Hough ^[6]	对背景噪声不敏感, 不能得到直线段的完整描述
	多尺度 Hough ^[7]	提取的线段信息量丰富, 精度不高, 耗时长
	权值矩阵 Hough ^[8]	存储空间小, 计算时间短, 直线段精度不高
	Radon 变换	变换过程复杂, 不能得到直线段的全部参数

上述 Hough 变换算法对经典 Hough 变换计算量大的缺点有了明显的改善, 但依然存在着以下几个方面的缺陷: 局限于处理比较小和直线较少的影像^[11]; 不能检测出直线段的端点和长度^[13, 14]; 占用内存大^[14]。针对大规模遥感图像的处理, 基于多尺度变换和权值矩阵等方法在图像处理中的优势, 以下将介绍一种基于预存储权值矩阵的多尺度 Hough 变换算法, 以利于在保证提取直线精度的同时提高运算速度。

2 基于预存储权值矩阵的多尺度 Hough 变换算法

2.1 预存储权值矩阵的 Hough 变换

高隽等根据连续 Hough 变换的公式得到了原点在底边中心的预存储权值矩阵的 Hough 变换公式^[8]。本文对两个地方略加改动: 一是将 Hough 变换公式的原点从原来的底边中心改为图像的中心, 这样能够充分利用图像的对称性, 减少了 Hough 变换的计算量; 二是对其权值矩阵的存储方式略加改进, 由于 Hough 变换中的空间角度、空间距离与参数空间中的 m, n 是一一对应的, 权值矩阵中点的坐标与图像空间中的 i, j 也是一一对应的, 且 m, n 及 i, j 都是无符号整数, 直接存储 m, n, i, j 有利于节省存储空间和编程实现。

2.2 多尺度方法

Elder 等将尺度问题引入到图像处理中, 充分利用不同尺度获取的图像特征的互补性, 大大提高了图像处理结果的精度^[15]。在图像处理领域, 多尺度方法可分为两类: 一类是改变图像分辨率, 图像大小不变; 另一类是对原始图像分块, 而图像分辨率不变。改变图像分辨率一般是对图像进行平滑运算, 这样会导致图像中边缘和其他尖锐不连续部分的模糊, 丢失了重要的边缘信息, 影响了直线段的精度。图像中的直线段有长有短, 以不同大小的分块图像对它们进行研究具有优势, 这就是多尺度处理的魅力所在, 本文采用图像分块的多尺度方法。

当图像增大一倍时, Hough 变换的运算量以立方级增长, 这导致计算效率急剧降低; 同时当图像比较大时, 权值矩阵文件也非常庞大, 造成权值矩阵的存储、读取都不方便。为此出现了多尺度变换的方法, 即将图像分割成一定大小的图像块, 然后对每一块图像都单独进行预存储权值矩阵的 Hough 变换, 这样既降低了运算量, 又保证了图像边缘的精度。当图像大小为 512×512 时, 权值矩阵文件的大小将超过 1 GB, 因此预存储权值矩阵的 Hough 变换的图像大小最大为 256×256 比较合适, 即 $LX_{\max} = 256, IY_{\max} = 256$ 。

2.3 重叠度

分块时若不考虑相邻图像块之间的重叠度,

易造成刚好处于两块之间或跨越两块的直线段漏检,并且图像块与图像块之间共线的直线段在接边处容易断裂。对这个问题的解决方法是在 Hough 变换时使相邻区域图像块之间有重叠部分,重叠部分过多,会造成无谓的计算,重叠部分过少,达不到效果。图像分块时按照从左往右从上向下的顺序进行,经过多次实验发现,在同一尺度空间下,左右相邻图像块和上下相邻图像块的重叠度均为 10% 时比较合适。

2.4 参数量化间隔选取

在参数空间中, ρ 的分辨率 $\Delta\rho$ 和 θ 的分辨率 $\Delta\theta$ 的取值对 Hough 变换的结果影响相当大,若对 ρ 和 θ 量化过细,则计算量相当大,反之,若对 ρ 和 θ 量化过粗,则参数空间的集聚效果差,就不能精确找到描述图像空间中直线的 ρ 和 θ 。Mirmehdi 等经过深入研究提出了 $\Delta\rho$ 和 $\Delta\theta$ 的最优量化值: $\Delta\rho = 1, \Delta\theta = \arctan(1/\max(LX, IY))$ (LX, IY 分别为 Hough 变换时图像的长度和宽度)^[16]。

2.5 参数空间归一化

由于图像上位于不同位置直线的像素点数一般各不相同,使得图像中的不同直线对 Hough 变换参数空间的贡献不均匀,位于图像空间中间的长直线比位于图像角落的短直线对参数空间的贡献要大得多,往往使得检测结果不正确。为此,引入直线长度统计,用于将参数空间归一化。Fitton 等提出了下式的基于直线长度统计的参数空间归一化方法^[17]。

$$h_n(\rho, \theta) = \frac{h(\rho, \theta)}{h_{\max}(\rho, \theta)^{(1/(k+1))}} \varphi_{\max}^{(-k/(k+1))} \quad (1)$$

$h(\rho, \theta)$ 为 Hough 变换中的参数空间, $h_{\max}(\rho, \theta)^{(1/(k+1))}$ 是对全部是黑色的图像(背景色是白色)进行 Hough 变换后的参数空间, φ_{\max} 是 $h_{\max}(\rho, \theta)^{(1/(k+1))}$ 中的最大值, k 是用户定义的用来控制归一化程度的参数, k 增大时归一化程度减弱, $h_n(\rho, \theta)$ 表示归一化后的参数空间。

2.6 双阈值

2.6.1 初始阈值的确定

由于参数空间中将会有很多的噪声点,若不加滤除,将大大增加峰值检测的计算复杂度。初始阈值 t_1 定义为线段的特征点数,由于本文采用多尺度方法,对于较短的线段,在小尺度图像中处理更合适,因此可以根据图像的大小来确定 t_1 , $t_1 = \min(LX, IY) \times r$, 取图像长或宽的最小值与一个比例因子 r 的积。特征点数小于图像最短边的

一半的线段在下一个小尺度空间中就有可能是长线段,更易被检测到,同时也避免了线段在同一个图像块中过度集中检测而耗费大量存储空间,因此通常情况下 $r = 0.5$ 比较合适。

2.6.2 峰值检测的阈值

峰值在图像上表现为局部极大值,因而峰值检测的过程就是在图像中寻找局部极大值的过程。累加器数组中存储的是归一化后的参数空间的像素值,峰值的检测方法通常可分为利用先验知识确定阈值和自动地分析累加器数组中计数值的分布来确定峰值两种,本文采用根据先验知识确定阈值的方法,主要步骤为:

1. 对累加器数组按照从大到小的顺序排序。
2. 若累加器数组中的最大值大于预先定义的阈值 t_2 , 则记录参数空间中的角度所对应的 m 及距离所对应的 n , 然后从累加器数组中删除该最大值;若该值小于阈值,则不存在直线段。
3. 根据 m 和 n 的值从权值矩阵中获得直线段的起点坐标和终点坐标。

2.7 算法步骤

本文算法思想是通过不同大小的图像块进行预存储权值矩阵的 Hough 变换,提取不同尺度空间下的直线段,先对最大的图像块整幅图像进行预存储权值矩阵的 Hough 变换,然后将整幅图像等分为 4 块,对每一块进行预存储权值矩阵的 Hough 变换,依此类推,直到预先定义的最小块为止。因线段至少为 2 个像素,理论上最小的图像块为 2×2 。由于图像中目标的多样性、复杂性,若图像块太小,检测到的图像中会有大量的噪声点和虚假线段,若太大,则很多短直线被遗漏。实际应用中,可根据图像的内容和对提取线段长短的要求来综合确定。图 1 为本文算法提取直线段的流程图。基于预存储权值矩阵的多尺度 Hough 变换直线提取算法的步骤为:

1. 确定参数 $LX_{\min}, IY_{\min}, LX_{\max}, IY_{\max}$, 计算权值矩阵,大小分别为 $LX_{\max} \times IY_{\max}, LX_{\max}/2 \times IY_{\max}/2, \dots, LX_{\max}/2^n \times IY_{\max}/2^n$, 满足 $LX_{\max}/2^n \leq LX_{\min}$ 或 $IY_{\max}/2^n \leq IY_{\min}$ 就停止对权值矩阵的计算;
2. 读入大小为 $LX \times IY$ 的图像,令 $TileSizeX = LX, TileSizeY = IY$, 设定 r, k, t_2 ;
3. 若 $TileSizeX > LX_{\max}$ 或 $TileSizeY > IY_{\max}$, 转 8, 否则直接转 4;
4. 对大小为 $TileSizeX, TileSizeY$ 的影像进行预存储权值矩阵的 Hough 变换,根据 r 计算 t_1 , 若直线段的特征点数最大值 $nCount_{\max} > t_1$, 将所有

大于 t_1 的特征点数和其对应的 ρ, θ 存入累加器数组 $pArrayHough$, 同时将 ρ 和 θ 及其所对应线段的起始点 i_a, j_a, i_b, j_b 存入线段特征数组 $pHoughLine$ 中, 否则不存在直线转 8;

5. 归一化 $pArrayHough$ 后进行峰值检测, 得到极大值, 若极大值 $> t_2$, 则执行 6; 否则不存在直线转 8;

6. 根据极大值所对应的 m, n 在 $pHoughLine$ 中找到线段的起始点坐标 i_a, j_a, i_b, j_b , 并把直线段保存到输出图像中, 然后从 $pArrayHough$ 中删除极大值;

7. 把检测到的直线段从影像中删除;

8. 重新划分影像, 每一块的大小 $TileSizeX = LX/2, TileSizeY = IY/2$, 转 3;

9. 直至 $TileSizeX/2^n \leq LX_{min}$ 或 $TileSizeY/2^n \leq IY_{min}$ 循环全部结束, 直线段将全部保存输出图像中, 算法结束。

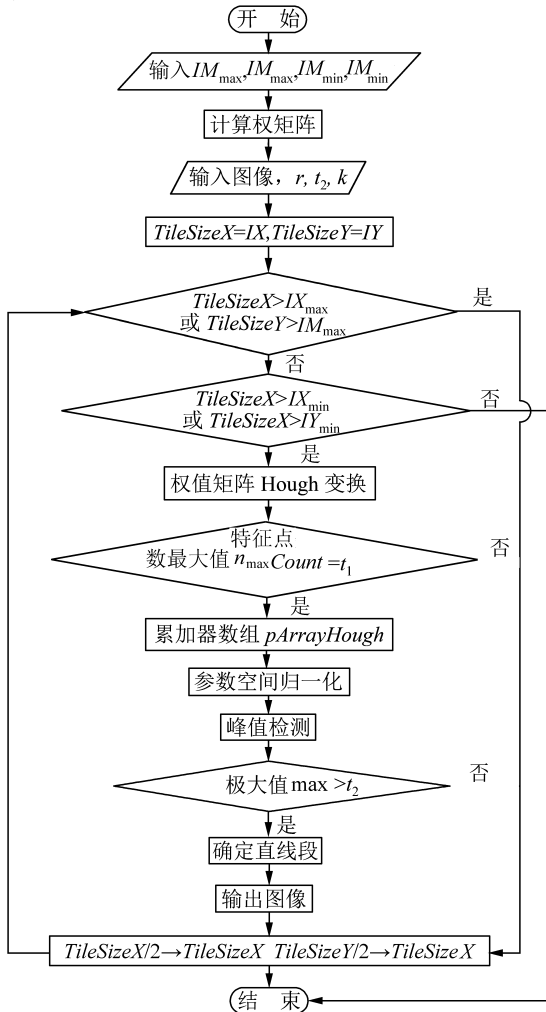


图1 基于预存储权值矩阵的多尺度 Hough 变换直线提取算法流程图

Fig. 1 The flow of the proposed algorithm

3 实验结果与分析

为了验证本文算法的正确性, 先采用 256×256 的图 2(a) 进行算法性能的比较, 再将本文算法应用于信息量比较大的实际航空影像图 3(a)。算法由 VC++ 6 编程实现, PC 机主频 1.98 GHz。

3.1 直线提取结果评价方法

提取线段的精度与从影像中正确识别的线段数目、漏检的线段数目、线段端点的定位精度等因素有关。可以通过两个方面来评价提取的线段精度: 一个是线段检测率, 另一个是线段漏检率。假设原始影像中线段总数目为 m , 正确识别的线段数目为 n , 则漏检的线段数目为 $(m - n)$, 原始影像中第 i 条线段的端点坐标为 $(x_{i-1}, y_{i-1}), (x_i, y_i)$, 则第 i 条线段的长度 $L_i = \sqrt{(x_{i-1} - x_i)^2 + (y_{i-1} - y_i)^2}$, 检测出来的该线段的端点坐标为 $(x'_{i-1}, y'_{i-1}), (x'_i, y'_i)$, 则第 i 条线段的点位误差 $PA_i = \sqrt{(x_{i-1} - x'_{i-1})^2 + (y_{i-1} - y'_{i-1})^2} + \sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2}$, 线段检测率 DR 和线段漏检率 FR 可以根据下式计算:

$$\left. \begin{aligned} DR &= \frac{n}{m} \times \left(1 - \frac{\sum_{i=0}^{m-1} DR_i}{\sum_{i=0}^{m-1} L_i} \right) \times 100\% \\ FR &= \frac{m - n}{m} \times \frac{\sum_{i=0}^{m-1} FR_i}{\sum_{i=0}^{m-1} L_i} \times 100\% \end{aligned} \right\} (2)$$

其中,

$$DR_i = \begin{cases} PA_i & \text{第 } i \text{ 条线段被检测出来} \\ 0 & \text{其他} \end{cases},$$

$$FR_i = \begin{cases} L_i & \text{第 } i \text{ 条线段没有被检测出来} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}.$$

一种好的直线段提取算法应该满足 DR 尽量大, 同时 FR 尽量小, 因此, 直线段提取精度可以定义为

$$DA = DR \times 50\% + (1 - FR) \times 50\% \quad (3)$$

3.2 模拟影像实验

图 2 是三种 Hough 变换算法提取的线段结果, 基于预存储权值矩阵的多尺度 Hough 变换的参数取值见表 2, 表 3 为不同算法的效率, 图 2(b) 是对图 2(a) SUSAN 算子边缘检测后用形态学细化算子细化后的结果。通过比较可以看出: 图 2(c) 中线段同边缘检测中的线段基本吻合, 耗时最少, 定位精度最高, 图 2(d) 由于多尺度

Hough 变换算法无法获取起始点坐标,线段定位精度不高,图 2(e)中有些线段没有检测出来。本文算法耗时最少,多尺度 Hough 变换算法需多次调用经典 Hough 变换,比较费时,预存储权值矩

阵的 Hough 变换算法虽然只调用一次存储权值矩阵的 Hough 变换,但由于没有采用双阈值法对参数空间中的噪声点预先滤除,造成峰值检测时排序时间较长。

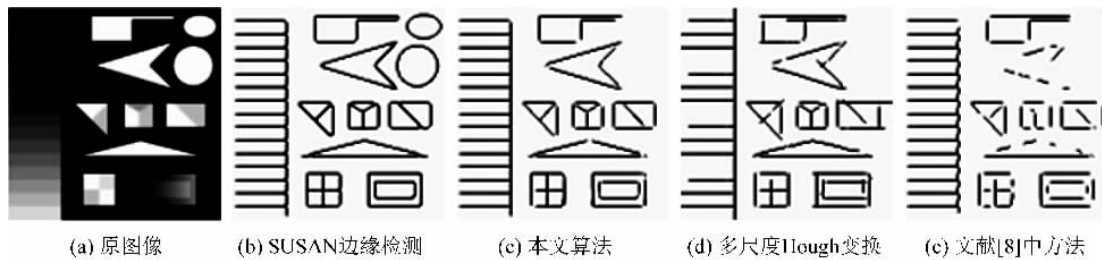


图 2 对一幅实验图像用三种 Hough 变换算法直线提取结果

Fig. 2 Line extraction results of three different HT methods

表 2 基于预存储权值矩阵的多尺度 Hough 变换的参数取值

Tab. 2 Parameters of the proposed method

$I_{X_{min}}$	$I_{Y_{min}}$	$I_{X_{max}}$	$I_{Y_{max}}$	r	k	t_2
16	16	256	256	0.5	2.5	48

表 3 图 2 中不同算法处理的效率

Tab. 3 Efficiency of three different HT methods in Fig. 2

算法	多尺度 Hough 变换算法	预存储权值矩阵的 Hough 变换算法	本文算法
时间/s	299	82	46
精度/(%)	91.125	87.455	96.879

3.3 实际航空影像实验

为了验证较大的航空影像中建筑物目标的直线信息提取效果,选自 ISPRS 官方网站提供的影像 (<http://www.isprs.org/data/avenches/>) 进行实验分析,如图 3(a)所示。基于预存储权值矩阵的多尺度 Hough 变换的参数取值见表 2,影像大小为 $1\ 800 \times 1\ 800$,扫描分辨率为 $15\ \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。在进行 Hough 变换之前,先用 Canny 算子边缘提取,然后用形态学细化算子细化边缘。图 3(b)是对图 3(a)的影像重采样为 256×256 后提取的线段结果,图 3(c)为直接从大小为 $1\ 800 \times 1\ 800$ 的影像中提取的直线段。

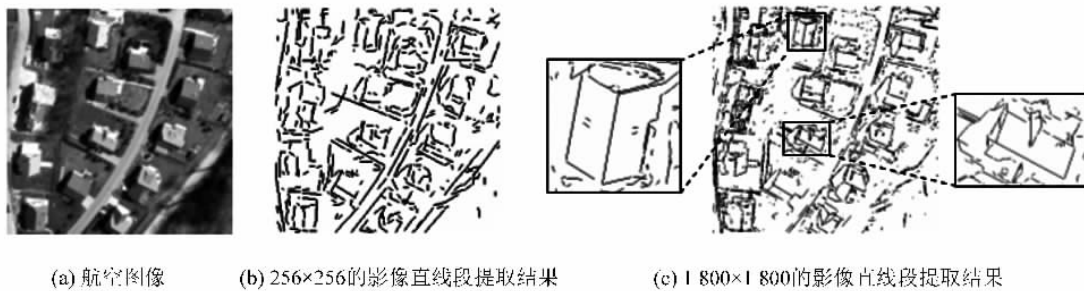


图 3 对一幅航空影像基于预存储权值矩阵的多尺度 Hough 变换的直线段提取结果

Fig. 3 Line extraction results from color aerial image

图 3(b)提取出来的线段数目为 605,图 3(c)提取出来的线段数目为 3 061。可以看出:图 3(c)中屋顶轮廓的主要线段基本上被检测出来了,屋顶边缘线段损失少,线段细节清晰、连续,同时线段保持了较高的定位精度,断裂的短线段很少,已经初步具有了屋顶形状的雏形,而图 3(b)是对图 3(a)进行重采样后提取的结果,很多

细节线段没有提取出来,屋顶轮廓不全,是由于重采样使得在 Canny 算子边缘检测时点的梯度方向误差较大,造成部分边缘损失。

上述两个实验表明,基于预存储权值矩阵的多尺度 Hough 变换算法与预存储权值矩阵的 Hough 变换算法和多尺度 Hough 变换算法相比,不仅可以提高线段完整性,还具有计算量小、

不受图像大小限制、线段提取时间短、占用内存小、检测精度高等优点。

4 结论

本文提出的基于预存储权值矩阵的多尺度 Hough 变换算法能够有效正确地提取直线段特征,具有以下几个特性:

1. 因事先计算好权值矩阵, Hough 变换时避免了复杂耗时的三角运算,只有简单的加减计算,因此计算速度较快;

2. 采用了对图像分块的多尺度方法,使得算法不受影像大小限制,提取的直线段精度较高,在大尺度图像中检测到的线段将在小尺度图像中删除,减少了计算量和存储空间;

3. 峰值检测前利用双阈值法滤除噪声点,实现了图像线段的分布式检测,大大减少了单次 Hough 变换所需的存储空间和峰值检测的时间;

4. 线段检测过程嵌入到 Hough 变换过程中,根据权值矩阵不仅能直接得到直线的角度、到原点的距离和直线长度 3 个参数,还能获得其他 Hough 变换不易得到的线段的起始点坐标。

理论分析和实验表明,基于预存储权值矩阵的多尺度 Hough 变换直线段提取算法是一种简单高效的线段提取算法,可为基于直线段检测的计算机视觉、模式识别和图像处理等提供良好的预处理手段。

参考文献:

- [1] ZHANG Zu-xun, WU Jun, ZHANG Jiang-qing. A Method for Straight-line Extraction Based on Line Space [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(3): 189-194. (张祖勋,吴军,张剑清.一种基于线空间的直线抽取算法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2004,29(3):189-194.)
- [2] LI De-ren, ZHOU Guo-qing. A Feasibility Study of Measurement and Reconstruction Object Primitives Using Line Photogrammetry [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1994, 23(4): 267-275. (李德仁,周国清.用线特征摄影测量对目标体系进行量测和重建的可行性研究[J].测绘学报,1994,23(4):267-275.)
- [3] LI Hung-wen. Fast Hough Transform for Multidimensional Signal Processing [A]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]*, Anchorage: IEEE Press, 1986. 2 063-2 066.
- [4] ILLINGWORTH J, KITTTLER J. The Adaptive Hough Transform [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987, 9(5):690-698.
- [5] XU L, OJA E, KULTANEN P. A New Curve Detection Method: Randomized Hough Transform [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1990, 11(5):331-338.
- [6] SOODAMANI R, LIU Z Q. A Novel Fuzzy Hough Transform for Shape Representation [A]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems [C]*. Anchorage: IEEE Press, 1998. 1 605-1 608.
- [7] ATIQUZZAMAN M. Multiresolution Hough Transform—An Efficient Method of Detecting Patterns in Images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(11):1 090-1 095.
- [8] GAO Jun, LI Cheng. Pre-Weight Matrix Quick Hough Transform [J]. *Computer Engineering*, 2000, 26(6):1-3. (高隽,李成.预存储权值矩阵的快速 Hough 变换[J].计算机工程,2000,26(6):1-3.)
- [9] KYRKI V, KÄLVÄINEN H. Combination of Local and Global Line Extraction [J]. *Real-time Imaging*, 2000, 6(2):79-91.
- [10] CHUNG K L, CHEN T C, YAN W M. New Memory- and Computation-efficient Hough transform for Detecting Lines [J]. *Pattern Recognition*, 2004, 37(5):953-963.
- [11] SONG Ji-qiang, MICHAEL R L. A Hough Transform Based Line Recognition Method Utilizing both Parameter Space and Image Space [J]. *Pattern Recognition*, 2005, 38(4):539-552.
- [12] BANDERA A, PEREZ-LORENZO J M, BANDERA J P, *et al.* Mean Shift Based Clustering of Hough Domain for Fast Line Segment Detection [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, 27(6): 578-586.
- [13] HAN Qiu-lei, ZHU Ming, YAO Zhi-jun. Line Segment Feature Extraction Based on Improved Hough Transform [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 436-439. (韩秋蕾,朱明,姚志军.基于改进 Hough 变换的图像线段特征提取[J].仪器仪表学报,2004,25(4):436-439.)
- [14] TANG Liang, XIE Wei-xin, HUANG Jian-jun, *et al.* Adaptive Fuzzy Hough Transform [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(6):946-949. (唐亮,谢维信,黄建军,等.自适应模糊 Hough 变换[J].电子学报,2004,32(6):946-949.)
- [15] ELDER J H, ZUCKER S W. Local Scale Control for Edge Detection and Blur Estimation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(7): 699-716.
- [16] MIRMEHDI M, WEST G A W, DOWLING G R. Label Inspection Using the Hough Transform on Transputer Networks [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 1991, 15(3):167-173.
- [17] FITTON N C, COX S J D. Optimising the Application of the Hough Transform for Automatic Feature Extraction from Geoscientific Images [J]. *Computers and Geosciences*, 1998, 24(10): 933-951.