

基于 LiDAR 数据和航空影像的水体自动提取

张永军¹ 吴 磊¹ 林立文¹ 赵家平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:提出将 LiDAR 数据对水体的敏感性与航空影像的高分辨率特征相结合的水体自动提取方法。利用 SIFT 算法对 LiDAR 强度图像和航空影像进行配准,在 LiDAR 高程图像上提取无回波信号的黑色区域,构建几何约束条件,排除由遮挡产生的无效区域;将水体初始位置映射到航空影像上,结合边缘信息进行区域生长,并对生长区域进行数学形态学运算,最终获取水体区域。实验结果表明,该方法可以获得很好的水体提取效果。

关键词:水体提取;LiDAR;航空影像;区域生长;数学形态学

中图法分类号:P237.3

水体是一类常见的地物,其自动提取在矢量图制作、地理信息系统更新、水资源调查、洪灾预测和评估等方面具有广泛的应用价值^[1,2]。目前,用于水体提取的影像数据源较多^[3],中低分辨率遥感影像(如 MODIS)可用于洪水灾害监测^[4];高分辨率遥感影像(如 Landsat TM)可用于主干河流的提取^[5];SPOT 可用于支流水系和内陆湖泊的提取^[6]。数字高程模型也可以作为水域提取的数据源^[7]。

小水体是农业生产、水土保持工作中不可忽视的水源,对于小水体提取方法的研究具有重要的实用性^[5]。用于陆地测量的机载 LiDAR 的工作波长一般为 1 040~1 060 nm^[8],刚好位于水体的强吸收带,由于水体不反射激光脉冲,所以在数据后处理中,这些区域常常赋予特定的黑色用于水体探测。但 LiDAR 数据受点云密度的限制,不能获得连续的地物信息,也就无法得到精确的水体边缘。航空影像分辨率高,纹理丰富,能提供精确的边缘信息,然而,不同水质、不同污染程度以及不同光照条件下的水体在可见光成像的航空影像上一般具有不同的颜色,即水体在可见光成像影像上的多义性给检测带来了困难。因此,本文提出结合机载 LiDAR 数据与航空影像进行精细水体提取的方法。

1 水体提取方案

激光扫描通常用来测距,可快速地获得地形数据。另外,由于地物对特定波长激光的反射能力有所不同,因此,激光回波信号还记录了地物的反射特性。且由于 LiDAR 是主动发射能量集中的激光脉冲,所以跟被动遥感成像相比,它具有更强的抗干扰性。如理论上,水体对波长为 0.70~1.95 μm 的电磁波具有强吸收性,但遥感影像受大气、周围地物的影响以及光谱分辨率的限制,水体在近红外的某一个波段上仍有信号。而 LiDAR 的点云数据上,大部分水体区域是完全没有回波信号的,因此,可从 LiDAR 数据中自动寻找水体区域的初始位置,再结合航空影像进行水体边缘的精确确定。

本文所采取的水体提取方案如图 1 所示,首先利用 LiDAR 数据产生灰度高程图像,由 LiDAR 数据中没有回波信号的区域 N 对应灰度值 0,其余 255 级灰阶则表示不同的高程,由点云正射投影生成的高程图像提供了方便的 2.5 维信息,可将点云检索的三维操作转化为高度图像上的二维操作,同时可以检索黑色区域边界各像素的高度信息,减少了运算量;然后从高程图像中提取无回波信号的黑色区域,并利用高程方向上的

几何约束条件剔除由于地物遮挡所引起的黑色区域,筛选出真正的水体区域;利用扫描线方法找出每一块区域中最优的水体种子点,使其经过配准映射后,以最大的可能落在航空影像上的目标水域内部;通过配准参数确定高程图像上的水体种子点在航空影像上的对应点;最后结合航空影像的边缘信息进行质心区域生长,确定水体的精确边界,并进行腐蚀-膨胀的形态学处理,消除水体区域的孤立噪声,从而完成水体边缘的准确提取。

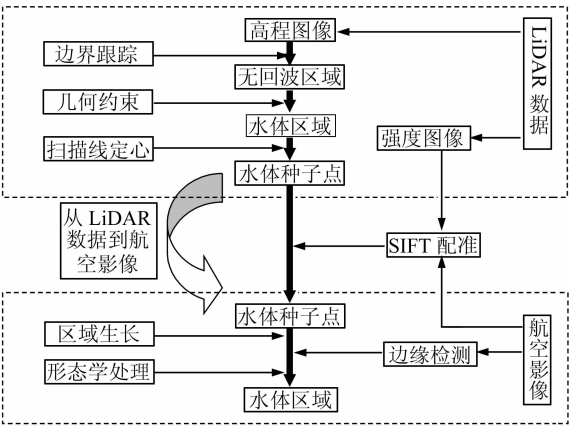


图 1 基于 LiDAR 数据和航空影像的水体提取方案
Fig. 1 LiDAR Data and Aerial Image-based Water Body Extraction

2 LiDAR 数据与航空影像的配准及其精度分析

本文采用 SIFT 算法进行强度图像与航空影像的自动配准。配准前,两种影像归属于不同的坐标系,且强度图像的比例尺和方向具有任意性,而 SIFT 算法通过在 DoG 尺度空间寻找极值点作为特征点,并在邻域计算梯度直方图作为该点的局部特征描述符,能很好地克服两幅影像之间的旋转和因比例尺不一引起的差异。需要指出的是,由 LiDAR 原始数据产生的同一区域的强度图像和高程图像的几何定向关系是完全相同的,只是像素灰度分别表示强度和高度,因此,强度图像与航空影像配准的变换参数同样适用于高程图像与航空影像。而采用强度图像代替高程图像求解变换参数,是因为在一般情况下,强度图像比高程图像具有更好的分辨细节,可以获得更高的匹配精度。

由于配准误差的存在,可能使高程图像上的水体种子点投射到航空影像时越过了其所在水体的边界,从而造成误检。对于同样的配准误差,越小的水体承担着越大的误检风险,因此,本文基于 SIFT+仿射变换配准实验,根据极限误差概念给

出了适合该方案提取的水体形状下限。

3 LiDAR 高程图像中水体种子点的提取

为了确定高程图像上的水体种子点,首先需要进行高程图像的边界跟踪,确定无回波的黑色区域,每一块区域用封闭的边界曲线表示。然后根据水体和遮挡阴影在高程图像上的不同几何约束,排除由信号遮挡造成的黑色区域。最后采用扫描线方法确定水体区域种子点的最佳位置。

3.1 高程图像几何约束的构建

经过边界跟踪,可得到高程图像上所有的无回波区域 $N_i(i=1,2,\cdots,n)$,这些区域中包含以下四类情况:① 水体,集合 Water;② 被建筑物、植被等遮挡形成的无回波区(如图 2(b)中的 s 段),集合 Shade;③ 同时包含遮挡和水体的混合区域(如图 2(a)所示),集合 Mix;④ 对近红外波段具有强吸收作用的其他地物或由镜面反射导致的信号散失,本文不予考虑。

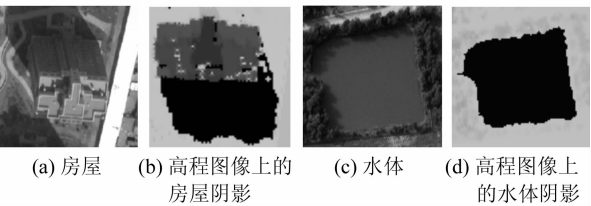


图 2 高程图像上遮挡阴影和水体的区别
Fig. 2 Difference Between Shadow and Water Body on the Elevation Image

由遮挡形成的无回波区域的边界像素在高程影像上具有不同的灰度值,而水体边界在高程影像上具有相同的灰度值,因此很容易区分这两类无回波区(见图 3)。统计 N_i 边界灰度的方差 $\text{var}(N_i)$,当它大于一定阈值 T 时,判定 N_i 为遮挡区域,即

$$\begin{aligned} &\text{Water}\{N_i \mid \text{var}(N_i) \geq T, i = 1, 2, \cdots, n\} \\ &\text{Shade}\{N_i \mid \text{var}(N_i) < T, i = 1, 2, \cdots, n\} \end{aligned}$$

更特殊的情况是遮挡区域位于水体区域内部,即混合区域,此时仅用以上约束,混合区域的水体将被忽略掉,此时需要构建更严格的条件。

结合图 3(a)和图 3(b)可知,在已知遮挡物高度 h 、激光入射角度 α 及遮挡物高程突起处的长度 l 时,可以计算出由遮挡引起的区域边界周长 C' ,当 C' 与跟踪得到的边缘 C 近似相等时,可以判定 $N_i \in \text{Shade}$;反之, C' 远小于 C 时, $N_i \in \text{Mix}$ 。 设

$$\text{ratio}_i = \frac{C'_i}{C_i} = \frac{2(l+s)}{C_i} = \frac{2(l+h \cdot \cot\alpha)}{C_i} \tag{1}$$

则有：

$$\text{Mix}\{N_i \mid \text{ratio}_i \neq 1, i = 1, 2, \dots, n\} \tag{2}$$

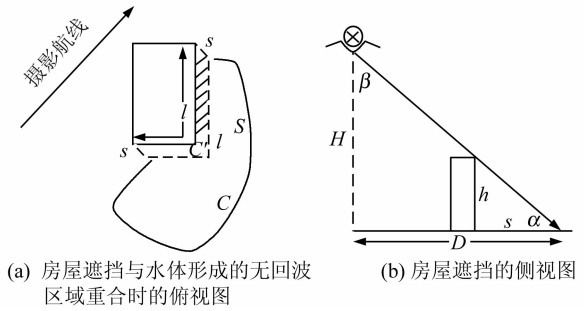


图 3 种子点过滤的几何约束

Fig. 3 Geometric Constraint of Seed Point Filtering

3.2 扫描线确定种子点

本文采用扫描线的方式确定水体区域内部的一个种子点，使其带有误差地映射到航空影像时，其落入目标区域的可能性最大。由于配准前不知道误差的方向，所以必须保证该点与所有边缘点的距离尽量大。最终问题转化为求闭合曲线 N_i 内部的一点 p_i ，使得：

$$\min(|p_i - \text{edge}_{N_i}|) = \max \tag{3}$$

由于水体区域形状的复杂性，闭合曲线很难用参数方程表示，而遍历每一个内部点，计算它与边缘的最小距离将使得计算代价过高，因此，本文采用如下策略确定种子点：① 计算区域外接矩形的中心坐标 $C(p, q)$ ；② 过点 C 作横纵两条扫描线，并计算扫描线与区域边界的交点，横扫描线交点记为 h_1, h_2, \dots, h_m ，纵扫描线交点记为 z_1, z_2, \dots, z_n ；③ 横向交点按从左至右排序，纵向交点按从上至下排序，即 $h_i < h_{i+1}, z_i < z_{i+1}$ ；④ 从第一个交点开始两两配对，每对交点就代表扫描线与区域的一个相交线段，计算这些线段的中点 t_1, t_2, \dots, t_k ，其中， $k = (m+n)/2$ ；⑤ 计算 t_1, t_2, \dots, t_k 与边缘像素的最短距离，取最大的最短距离所对应的 t_i 作为该区域的种子点。

由图 4 可见，任意形状的水体由该方法均能获得较理想的种子点，使其距离边界的最小距离尽可能大，从而避免由配准误差引起的种子点投射越界。

为便于讨论，本文给出如下定义：对于任一水体，其种子点与边界的最短距离称作该水体的形状参数。此步骤结束，可算得高程图像上每块水体的形状参数。

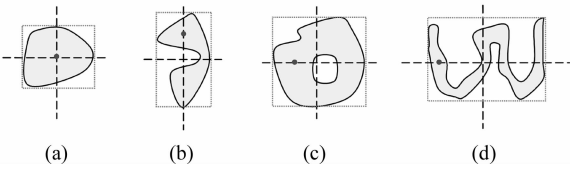


图 4 基于扫描线的水体种子点确定

Fig. 4 Seed Points of Water Body Detection Based on Scan Line Method

4 基于边缘信息的质心区域生长

区域生长是指从种子点开始，计算其邻域像素与种子点的灰度差，把灰度差小于一定阈值的邻域点都纳入该区域，对新加入的像素作上述同样的操作，直到区域不再增长为止^[9]。质心区域增长考虑到了新加入像素的信息，每次计算当前像素与已存在区域的像素灰度均值之差。水体的灰度信息并不确定，导致阈值的选取难以把握。阈值过大，导致生长越界；阈值过小，导致生长不完全。

组合区域与边界信息的方法是影像分割的发展趋势，因为区域信息和边界信息具有良好的互补性。边缘的优点是精确性，缺点是不完整性；区域的优点是封闭性、完整性，但其边界往往是不确定的，因此，本文提出如下区域生长策略：① 对影像进行 canny 边缘提取，生成边缘图像 DE_i ($i=1, 2, \dots, m$)，共 m 条边缘；② 采用保守(小)阈值 T_0 进行深度优先的区域生长，获得生长边缘 GE ，共 n 个边缘点 GE_i ($i=1, 2, \dots, n$)。当 GE_i 的邻域内不存在提取边缘 DE_i ($i=1, 2, \dots, m$) 时，令 $T=T_0+1$ ，看 GE_i 能否找到小于新阈值的邻域像素，如果能，则继续作区域增长；否则，令 $T=T_0+2$ ，直到 GE_i 找到小于新阈值的邻域像素 L ，将 L 归入区域，恢复保守阈值 T_0 ，继续作质心区域生长；③ GE 的每一个边缘点 GE_i 的邻域内存在边缘点，生长结束。

由于噪声的存在，检测出的水体内部有很多本不存在的离散点或小区域，采用形态学处理中的膨胀-腐蚀开运算能改善提取效果。

5 实验结果与分析

实验区大小为 $26.6 \text{ km} \times 3.3 \text{ km}$ 。LiDAR 数据由 Leica ALS50 获取，地面采样间隔约 1 m ，强度图像和高程图像由 TerraSolid 软件生成，图像采样间隔为 2 m ；航空影像由 DSS 322 数码相机获取，像幅大小为 $5\,436 \times 4\,092$ ，像素大小为 9

μm,地面分辨率约 0.36 m,实验区域由一条航带中的 15 张影像完全覆盖。

为估算配准误差对提取精度的影响,必须知道水体种子点经过配准从高程图像化算到航空影像时可能产生的偏差。这里不妨假设高程图像上的任一点经过仿射变换参数纠正到航空影像后产生的偏差为一随机矢量。在实验样区中(一幅航空影像及其对应的强度图像),选取 SIFT 匹配点中分布在四角的 4 对特征点作为控制点,利用最小二乘平差解算仿射变换的 6 个参数,将其余均匀分布于图像的 SIFT 特征点(40 对)作为检查点,统计检查点误差矢量模的中误差为:

$$\sigma_0 = 7.11(\text{像素}) \times \text{GSD} = 2.56 \text{ m}$$

当匹配点不存在粗差时,出现大于 3 倍中误差的偶然误差的概率仅有 0.3%,可以认为图像上任一点的配准误差满足:

$$\sigma_{\forall(x,y)} < 3\sigma_0 = 7.68 \text{ m}$$

由此认定形状参数大于 7.68 m 的水体几乎是绝对可以提取的,因为高程图像任一点的配准误差超过 7.68 m 的概率近似为 0。这里定义 $J_0=3\sigma_0$ 为水体形状下限,显然,本实验场的水体形状下限为 7.68 m。

按照本文构建水体提取方案,一条航带的提取结果如图 5 所示,图中,虚矩形框内为自动提取的水体;实矩形框内为几何约束条件识别的遮挡阴影;三角形区为地面强吸收导致的误检区域;菱形区为信号散失导致的误检区域;圆圈区为漏检

的小水体,其形状参数小于 7.68 m。人工判图结果如表 1 所示。具体情况如下:实验区域内所有的水体包括天然水体(河流、湖泊)、人造水体(储水池、水田、游泳池等),共 104 块,其中形状参数 $J < J_0$ 的水体 4 块, $J \geq J_0$ 的水体 100 块。无回波信号区域中,遮挡阴影 55 块;对红外波段的强吸收区,如橡胶块、煤堆、矿石堆,共 4 块;镜面反射导致的信号散失区域,共 2 块。由表 1 可以看出,对于形状参数大于形状下限的水体,算法能全部检出,遮挡阴影可以完全区分。但地面上对 LiDAR 信号强吸收或散失的区域无法与水体区分,分别归类于 $80 > J > 7.68$ 和 $7.68 > J$ 的水体,造成误检。另外,形状参数小于 J_0 的 1 块水体由于配准误差产生投射越界,而无法检出。所以,由式(4)计算得本文方法水体检测的正确率为 94.2%。由表 1 可知,当不加几何约束条件时,遮挡阴影会当成相同大小的水体误检,降低了水体检测的正确率。

$$R = 1 - |N_d - N_r| / N_r \tag{4}$$

其中, R 为水体检测的正确率; N_d 为检测水体的数目; N_r 为实际水体的数目。

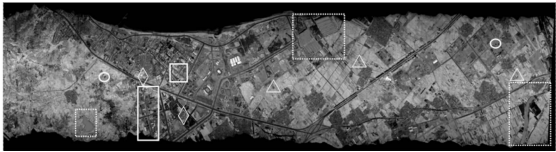


图 5 水体提取成功率
Fig. 5 Success Rate of Water Body Extraction

表 1 无回波信号区域的检测结果/块
Tab. 1 Detection Result in Non-echo Regions/block

	$J > 150$	$150 > J > 80$	$80 > J > 7.68$	$7.68 > J$	阴影	强吸收	信号散失	水体检测正确率/%
人工判图	10	22	68	4	55	4	2	100
自动提取	10	22	68+5	3+1	55	0	0	95.2
无约束自动提取	10	22	85	46	0	0	0	41.3

注:“68+5”中,68 为检测水体数量,5 为强吸收或信号散失导致的误检数量;“3+1”意思同前。

水体提取的细部效果见图 6。以某张航片为例,从图 6(d)可以看出,不同水体由于水质、污染、光照的不同,在彩色航空影像上呈现不同的颜色,基于纯色彩的判断很难区分水体与其他地物;从图 6(c)可以看出,由于分辨率的限制,LiDAR 强度图像的水体边缘模糊不清,不能满足精细水体提取的要求。图 6(d)显示,航空影像上的水体提取边界清晰,与影像线特征能较好地重合。

6 结 语

本文提出的基于 LiDAR 数据与航空影像的

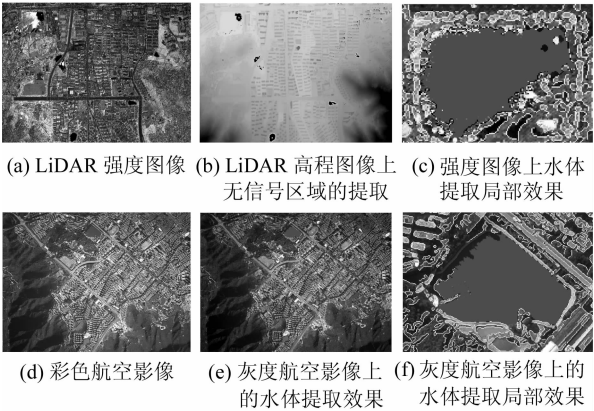


图 6 水体提取效果图
Fig. 6 Result of Water Body Extraction

水体自动提取正是充分利用两种数据各自的优势,结合影像匹配、计算机图形学和数字图像处理的相关技术构建完善的水体自动提取方案。实验结果表明,该方案切实可行,效果良好。另外,对于航空摄影测量而言,水体尤其是有波浪的水域存在匹配多义性,会大大增加同名点的误匹配数量,当误匹配比例较小时,可以被当作粗差顺利剔除;但当误匹配比例太大时,粗差探测方法将失效,导致匹配失败。所以,在 LiDAR 数据的辅助下,自动剔除水体区域,可以有效降低航空影像的误匹配数量,确保影像匹配结果的正确性。

尽管本文提出的水体检测策略能快速准确地定位细小的水体,并能精确检测其水体边界,但仍然存在以下两个问题有待进一步研究:① 当地形起伏较大时,仿射变换模型并不能正确反映 LiDAR 强度图像与航空影像之间的严格关系,配准精度会有所下降,导致水体提取率降低。② 由于 SIFT 算法对辐射畸变的敏感性导致误匹配仍然存在,所以部分影像的配准仍需要适当的人工干预。有待进一步改进或引入针对非同源影像更稳健的匹配算法,方能保证配准精度,这也是本文水体提取方案得以广泛使用的重要前提。

参 考 文 献

[1] 张剑清,朱丽娜,潘励. 基于遥感影像和矢量数据

的水系变化检测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(8): 663-666

[2] 杜云艳,周成虎. 水体的遥感信息自动提取方法[J]. 遥感学报, 2007, 32(8): 663-666

[3] Zhang Zhaohui, Prinet V, Ma Songde. Water Body Extraction from Multi-Source Satellite Images[J]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, 6(6): 3970-3972

[4] 吴赛,张秋文. 基于 MODIS 遥感数据的水体提取方法及模型研究[J]. 计算机与数字工程, 2005, 33(7): 1-4

[5] 李小曼,王刚,田杰. TM 影像中水体提取方法的研究[J]. 西南农业大学学报, 2006, 28(4): 580-582

[6] 曹凯,江南,吕恒,等. 面向对象的 SPOT5 影像城区水体信息提取研究[J]. 国土资源遥感, 2002, 2(72): 27-30

[7] 朱庆,田一翔,张叶廷. 从规则格网 DEM 自动提取汇水区域及其子区域的方法[J]. 测绘学报, 2005, 34(2): 39-43

[8] 舒宁. 激光成像[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005

[9] Adams R, Bischof L. Seeded Region Growing [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(6): 641-647

第一作者简介:张永军,教授,博士,博士生导师,主要从事数字摄影测量与遥感、计算机视觉方面的研究。
E-mail:zhangyj@whu.edu.cn

Automatic Water Body Extraction Based on LiDAR
Data and Aerial Images

ZHANG Yongjun¹ WU Lei¹ LIN Liwen¹ ZHAO Jiaping¹

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

Abstract: A new approach of automatic water body extraction based on LiDAR data and aerial images is proposed. The LiDAR intensity image and aerial images are co-registered by SIFT operator. Transformation parameters from LiDAR image to aerial image can be computed by the matched conjugated points. Black regions that have no reflection on height image generated by LiDAR data are automatically extracted. Geometric constraint conditions are used to remove non-water body areas. Edge information is used for region growing with the projected initial position as initial value. Finally, mathematical morphology techniques are used to get more precise water body areas. Experimental results show that the proposed approach can achieve very good water body information.

Key words: water body extraction; LiDAR; aerial image; region growing; mathematical morphology

About the first author: ZHANG Yongjun, professor, Ph. D., Ph. D supervisor, majors in digital photogrammetry, remote sensing, and computer vision.
E-mail: zhangyj@whu.edu.cn