

基于改进分水岭变换的遥感图像建筑物提取

任晓娟 肖双九 彭小鹏

(上海交通大学软件学院 上海 200240)

摘要 遥感图像的分割是遥感信息提取与目标识别的基础和关键。以高分辨率城镇地区遥感图像为研究对象,提出一种基于全局阈值的多级分水岭算法,用于遥感图像的分割。该算法通过引入差异度函数,在执行传统分水岭算法的过程中对图像中存在的噪声区域进行修正,并通过使用全局阈值有效的控制欠分割问题。首先基于全局阈值的多级分水岭算法对高分辨率遥感图像进行初始分割,然后综合利用分割对象的颜色和形状特征信息,进行区域合并和梯度边缘提取,得到最终的建筑物提取结果。实验结果表明,所提出的基于全局阈值的多级分水岭算法较好地避免了过分割和欠分割现象,结合区域合并和梯度提取,能够快速准确地对城镇遥感图像中的建筑物进行提取。

关键词 全局阈值 多级分水岭 建筑物提取

中图分类号 TP753 文献标识码 A

BUILDING EXTRACTION FROM REMOTE SENSING IMAGE USING IMPROVED WATERSHED TRANSFORM

Ren Xiaojuan Xiao Shuangjiu Peng Xiaopeng

(School of Software, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract The segmentation of remote sensing image is the basis and key of information extraction and target identification. The paper uses remote sensing image of high resolution in urban areas as the research object and does study on the segmentation of buildings in images. We proposed a multistage watershed algorithm based on global threshold. The algorithm decreases the noise of images in the implement process of watershed algorithm through the introduction of a differential function and overcomes the problem of over-segmentation in traditional watershed algorithm effectively. In addition, we control the problem of under-segmentation through the global threshold. Firstly, we implement pre-segmentation by using the improved watershed algorithm; then implement the region merging and gradient computing to get the final building extraction. It shows that the multistage watershed algorithm that we proposed can avoid the phenomenon of under-segmentation and realize the extraction of city remote sensing image quickly and accurately.

Keywords Global threshold Multistage watershed Building extraction

0 引言

遥感图像是三维城市地图中建筑物的重要数据来源,基于遥感图像的建筑物轮廓提取是近年来三维城市地图研究的热点。遥感图像具有多灰度级、信息量大、目标结构复杂等特征^[1],至今没有一种算法能够有效分割获取途径不同的遥感图像。

近年来,基于边缘检测或区域分割方法形成了很多遥感图像分割算法,如利用边缘检测结果根据空间关系重组边缘线段,得到符合建筑物空间结构的轮廓^[2,7],但该类型算法受噪声、光照等因素影响较严重,易产生不连续边缘点造成重要边缘缺失。多尺度区域分割^[3]是目前提取效果较好的方法,该算法可结合光谱、纹理及上下文信息,有效提取高分辨率图像地物轮廓信息,但该算法占用内存大、计算时间长,并且随着遥感数据量的增大进一步加剧^[4]。

分水岭变换法是以数学形态学作为基础的一种区域分割方法,近年来广泛应用于遥感图像的分割。分水岭算法具有完整性和简易性^[5],即能够对图像进行完整分割,当目标区域分辨率低

且具有弱边缘时仍能够提供闭合的轮廓线,同时该算法易于理解和实现。但在存在大量噪声时会产生严重过分割。过分割的解决主要有分水岭变换前处理和分水岭分割后处理两种基本思想^[5]。前处理主要有滤波降噪、设定阈值和标记重建等方法,需要额外的滤波过程且不能有效利用分水岭执行过程中的中间信息;后处理主要是合并过分割的区域,但是区域合并准则是个难点。

本文提出了基于全局阈值的多级分水岭分割算法,该算法通过设计邻域最小差异函数,并使用全局阈值对此差异度函数进行限制,对传统快速分水岭分割算法^[5]进行了改进。此改进算法在一定程度上解决了快速分水岭算法导致的过分割和欠分割问题,保证了高分辨率遥感图像建筑物信息提取的完整性。本文首先使用基于全局阈值的多级分水岭算法对高分辨率遥感图像进行初始分割,为提取建筑物,在分割结果的基础上进行了区域合并和梯度边缘提取以得到最后的建筑物轮廓信息。

实验表明,使用基于全局阈值的多级分水岭分割算法对高分辨率遥感图像进行分割具有较好的精确度和简易性,可以保

收稿日期:2010-10-11。任晓娟 硕士生,主研领域:数字媒体与艺术。

证有效提取建筑物信息。

1 高分辨率遥感图像分割

1.1 快速淹没型分水岭变换数学模型

基于模拟淹没分水岭算法^[6]的基本思想来源于地形学的知识,将图像像素的灰度值比拟为高度,具有不同灰度值的区域比拟为山峰和山谷盆地,再通过模拟水进入地形的过程将地形划分为不同的区域。假设在每个局部区域最小值位置上打一个洞,并让水以均匀的上升速度从洞中涌出,从低到高淹没整个地形。当处在不同汇聚盆地中的水将要聚合在一起时,修建的大坝阻止聚合,在水淹没到最高高度的时候,每个孤立的水盆对应图像中独立的区域,而水盆之间的大坝则对应图像中的边缘。由于图像中的边缘点通常出现在灰度值变换大、梯度绝对值高的点,为了得到正确的分割结果,分水岭变换通常作用在梯度绝对值图像,而不是直接作用在灰度图像上^[5]。

快速淹没型分水岭变换的形式化定义为:

定义一幅灰度图为 $I \in Z$, 假设 $G \in Z^2 \times Z^2$ 为灰度图 I 中的四邻域或者八邻域网格, $D_I \in Z^2$ 为 I 中的一个连通区域, A 为灰度图 I 中待淹没的区域, 做如下定义:

定义 1 A 中像素点 a 到像素点 b 的路径 $P(a, b)$:

$P(a, b)$ 是由 A 中连接像素 a 和像素 b 的一系列临界像素 $(p_0, p_1, p_2, \dots, p_n)$ 组成的路径轨迹, 长度为 l :

$$P(a, b) = P(p_0, p_1) + P(p_1, p_2) + \dots + P(p_{i-1}, p_i) \quad (1)$$

其中 $p_0 = a, p_l = b, \forall i \in [1, l]$ 。

定义 2 A 中从像素点 a 到像素点 b 的测地距离 $d_A(a, b)$:

$d_A(a, b)$ 是 A 中从像素点 a 到像素点 b 的最短路径:

$$d_A(a, b) = \min_{m \in A} (P(a, m)) \quad (2)$$

定义 3 A 中从像素点 a 到 A 的子集 B 的测地距离 $d_A(a, B)$: $d_A(a, B)$ 是 A 中从像素点 a 到子集 B 中像素点 b 的最短测地距离:

$$d_A(a, B) = \min_{m \in B} (d_A(a, m)) \quad (3)$$

定义 4 A 的第 i 个子集 B_i 的测地影响区域 $iz_A(B_i, B)$:

设 B 由 k 个连通域组成, $i = 1, 2, \dots, k$, 设 $B_i \in A$ 是第 i 个连通域, 那么 A 的第 i 个子集的测地影响区域定义为:

$$iz_A(B_i, B) = \{p \in A \mid d_A(p, B_i) < d_A(p, B \setminus B_i)\} \quad (4)$$

定义 5 A 的子集 B 的测地影响区域 $IZ_A(B)$:

$IZ_A(B)$ 是 B 的所有子集的测地影响区域的并集:

$$IZ_A(B) = \bigcup_{i=1}^k iz_A(B_i, B) \quad (5)$$

定义 6 A 的子集 B 在 A 中的测地影响区域的骨架 $SKIZ_A(B)$: $SKIZ_A(B)$ 是 A 中 B 的测地影响区域的补集:

$$SKIZ_A(B) = A \setminus IZ_A(B) \quad (6)$$

根据逐层淹没思想, 可将 B 视为 k 个极小值点 B_i 的集合, $i = 1, 2, \dots, k$, 以每个极小值为盆底的水盆可视为 B_i 在 A 中的测地影响区域 $iz_A(B_i, B)$, B 表示全部水盆集合, 而 $SKIZ_A(B)$ 则用来表示全部分水线的集合。

故基于模拟逐层淹没的分水岭算法可以形式化为: 按照灰度级别, 在每个灰度级对一个二值图像求 $SKIZ$ 。在数字灰度图像 I 中, 设 h_{\min} 和 h_{\max} 为 I 的最小值和最大值, MIN_h 表示淹没高度为 h 时的区域极小值集合, X_h 表示在淹没高度为 h 时形成的所有水盆的集合。

定义 7 图像中阈值为 h 的像素点 T_h :

T_h 是图像中位于灰度级 h 以下像素点的连通集合:

$$T_h = \{p \in D \mid I(p) \leq h\} \quad (7)$$

整个分水岭变换可定义为 h 从 h_{\min} 到 h_{\max} 的递归, 递归过程的形式化定义为:

定义 8 传统淹没型分水岭变换迭代过程:

$$A_{i,j} = \begin{cases} X_{h_{\min}} = \{p \in D \mid I(p) \leq h_{\min}\} = T_{h_{\min}}(I) \\ X_{h+1} = MIN_{h+1} \cup IZ_{T_{h+1}}(X_h) \quad h \in [h_{\min}, h_{\max}] \end{cases} \quad (8)$$

该算法每升高一个灰度层便淹没该层像素点, 再根据其邻域像素的灰度进行标记; 且在对 T_{h+1} 集合中的元素进行标记时, 只能利用 T_h 中像素信息, 不能利用 T_{h+2} 中像素信息。由于实际图像中通常会存在大量噪声, 该传统分水岭方法也将对噪声进行标记而造成过分割。本文提出的改进分水岭分割算法引入一个差异度函数, 使分水岭算法在对 T_h 中像素信息进行标记时可检查 T_h 上层信息是否存在噪声, 若存在, 则对噪声处的灰度信息进行修改以从根本上减少过分割。

1.2 基于全局阈值的多级分水岭变换的数学模型

基于全局阈值的多级分水岭变换引入了差异函数, 应对相关定义进行更新。

定义 9 阈值为 h 的多级像素点集 T'_h :

$$T'_h = \{p \in D \mid I(p) \leq h + Diff(p, h)\} \quad (9)$$

其中, $Diff(p, h)$ 是关于像素点 p 和淹没高度 h 的差异度函数, T'_h 中包括了灰度级从 h 到 $h + Diff(p, h)$ 的所有像素点。

定义 10 T'_h 中像素影响点集合 $MP(N_c, h)$:

$$MP(N_c, h) = \{q \mid q \in N_c(p), p \notin T_h \cap I(q) = h\} \quad (10)$$

N_c 表示像素点 q 的 G 邻域, $MP(N_c, h)$ 表示邻域 N_c 中存在于灰度值与当前淹没高度 h 相同的像素点, 且自身的灰度值与当前灰度值不同的像素点的集合。

本文提出基于全局阈值的多级分水岭变换迭代公式如式 (11)。

定义 11 基于全局阈值的多级分水岭变换迭代过程:

$$A_{i,j} = \begin{cases} X_{h_{\min}} = \{p \in D \mid I(p, h) \leq h_{\min}\} = T'_{h_{\min}} \\ X_{h+1} = MIN_{h+1} \cup IZ'_{k+1}(X_h) \quad h \in [h_{\min}, h_{\max}] \end{cases} \quad (11)$$

1.3 差异度函数

差异函数主要用于将由噪声引起的额外极小值路径即不连续路径修改为无噪声的平滑路径。本文中采用了基于邻域最小差异函数 $Diff(p, h)$ 。

$$Diff(p, h) = \min [I(p, h) - I(q, h)] \quad q \in N_c(p) \cap I(q) \geq I(p) \quad (12)$$

$Diff(p, h)$ 表示像素点 p 与其邻域 q 中所有灰度值大于 p 的像素点的灰度值差的最小值。

1.4 全局阈值限定

差异函数将噪声引起的额外极小值路径修改为平滑路径虽然去除了噪声影响, 但可能修改了与噪声相近的真正边缘, 导致分割信息的丢失。因此, 本文引入了全局阈值限制, 即将所得差异度函数值与给定的阈值进行比较。若不连通路径上的像素点的差异度函数值大于该阈值, 则在逐层淹没的时候不对该路径上的像素点做修改; 反之则修改。

引入全局阈值限定后, 分水岭变换的数学模型调整为式 (13) 和式 (14)。

定义 12 基于全局阈值的多级像素点集 T''_h :

$$T_h^* = \begin{cases} p \in D \mid I(p) - Diff(p, h) \leq h & Diff(p, h) < sldThrsh \\ p \in D \mid I(p) \leq h & Diff(p, h) \geq sldThrsh \end{cases} \quad (13)$$

定义 13 基于全局阈值的多级分水岭变换:

$$A_{i,j} = \begin{cases} X_{h_{min}} = \{p \in D \mid I(p) - Diff(p, h_{min}) = h_{min}\} = T_{h_{min}}^* \\ X_{h+1} = MIN_{h+1} \cup IZ'_{T_{h+1}^*}(X_h) & h \in [h_{min}, h_{max}] \end{cases} \quad (14)$$

1.5 基于全局阈值的多级分水岭分割算法

在使用该方法进行分割之前,首先求得待分割图像的梯度。基于全局阈值的多级分水岭分割算法的执行过程主要包含排序和浸没两个步骤。

(1) 排序

对图像中的全部像素按灰度值进行升序排列,在浸没时可以直接访问需要浸没的点,见公式(7),避免每次浸没时处理全部点。

(2) 浸没

利用排序后的图像,按图像像素灰度值依次访问每一级的像素点。设排好序的像素灰度值共有 N 层,对 N 层像素点逐层遍历。设 $\forall h \in (0, 1, 2, \dots, N-1)$,对第 h 层进行遍历时,首先把像素值为 h 的像素点加入 T_h^* ,如定义 12 所示,然后根据定义 10 计算 $MP(N_c, h)$,再取 $MP(N_c, h)$ 中像素点 q ,并根据公式(12)计算出点 q 的 $Diff(p, h)$,程序动态选定全局阈值 $sldThrsh$ 。若 $Diff(p, h) < sldThrsh$,则修改 q 的灰度值为 $I(q) = I(q) - Diff(q, h)$,同时将 q 点加入 T_h^* ,最后使用循环队列为扩展后的像素点集 T_h^* 进行标记。程序循环,开始对 $h+1$ 层重复执行 h 层的操作,算法迭代过程见公式(14)。

算法实现的伪代码如下:

```

使用快排算法对图像中的像素进行从小到大的排序
for h = h_min to h_max {
    将灰度值为 h 的像素加入本次被浸没的点集 T_h^*
    //对 T_h^* 进行更新,直到遍历完 T_h^* 中的所有像素点
    计算像素影响点集合 MP(N_c, h)
    While( q in MP(N_c, h) ) {
        求出 Diff(p, h)
        if Diff(p, h) < sldThrsh then
            修改 q 值为 I(p) = I(p) - Diff(p, h) 并将 q 更新到 T_h^*
    }
    对扩展后的 h 层的浸没点集 T_h^* 进行标记
    h = h + 1
}
    
```

2 实验及分析

2.1 实验环境和数据

为进行基于全局阈值的多级分水岭分割算法对遥感卫星图像中的建筑物提取实验,本文选取了两组彩色遥感卫星图像数据。第一组数据是上海交通大学思源湖畔教学群楼的多光谱高分辨率遥感卫星图像,大小为 561×694 。第二组数据是三波段的高分辨率遥感图像,大小为 772×531 。

本文中实验硬件平台为基于 AMD Athlon 64 3200 + 1.99 GHz CPU 及 1.00GB 内存的 PC 系统。

2.2 实验步骤

本文实验的主要步骤如下:

- (1) 计算原始图像的形态学梯度;

- (2) 使用基于全局阈值的多级分水岭算法对梯度图像进行全分割;

- (3) 从全分割结果中选取目标区域,并对选取的目标区域进行提取;

- (4) 采用形态学梯度的方法对目标区域进行边缘提取获得最终结果。

为了验证本文所提出算法的精确性和鲁棒性,在 2.3 节和 2.4 节对分割结果进行验证和分析,同时将分割结果与传统的分水岭变换进行了对比。

2.3 实验结果

实验 1

求取第一组图像数据的梯度图,如图 1(b),并使用传统分水岭算法对所得梯度图进行分割,得到分割结果,如图 1(c)。使用本文提出的改进分水岭分割算法对梯度图进行分割,得到分割结果,如图 1(d) 所示。

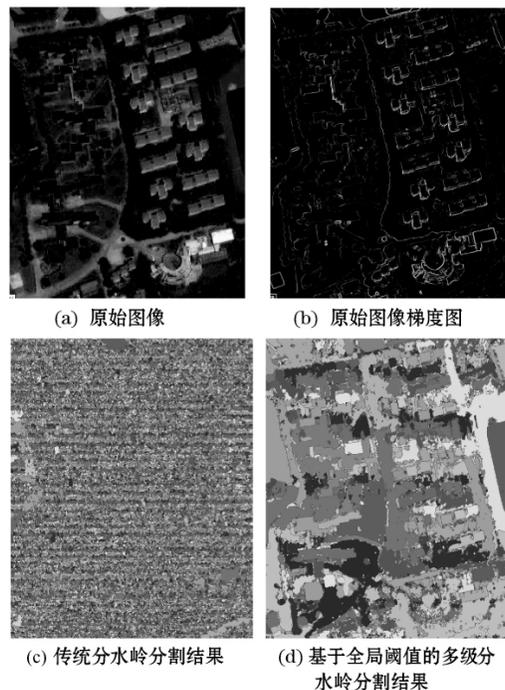


图 1 高分辨率遥感图像分割算法效果图

由图 1 所示实验结果可以明显看出,传统分水岭算法不能对实验中所用的高分辨率遥感卫星图像产生有效分割,基于全局阈值的多级分水岭分割算法可以把感兴趣的建筑物识别为特定的统一区域,能够进行有效分割。

在基于全局阈值的多级分水岭分割结果的基础上,选取建筑物区域进行合并,提取结果如图 2(a) 和图 2(b) 所示;利用梯度算子提取建筑物区域边缘,提取结果如图 2(c) 所示。

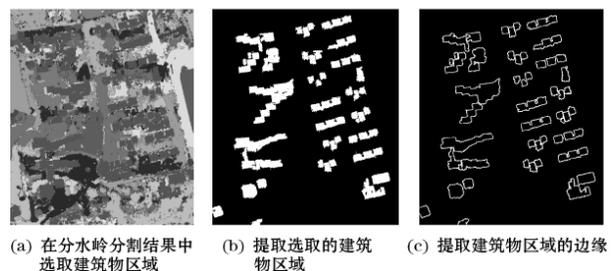


图 2 高分辨率遥感图像建筑物轮廓提取结果

由图 2 所示实验结果可知,利用基于全局阈值的多级分水岭分割算法的分割结果,可以提取出规则的建筑物轮廓边缘。

实验 2

为检验基于全局阈值的多级分水岭分割算法对其他不同特性的遥感图像也具有较好的分割效果,选用三波段的高分辨率遥感图像如图 3(a) 所示,重做实验 2,实验结果如图 3 所示。

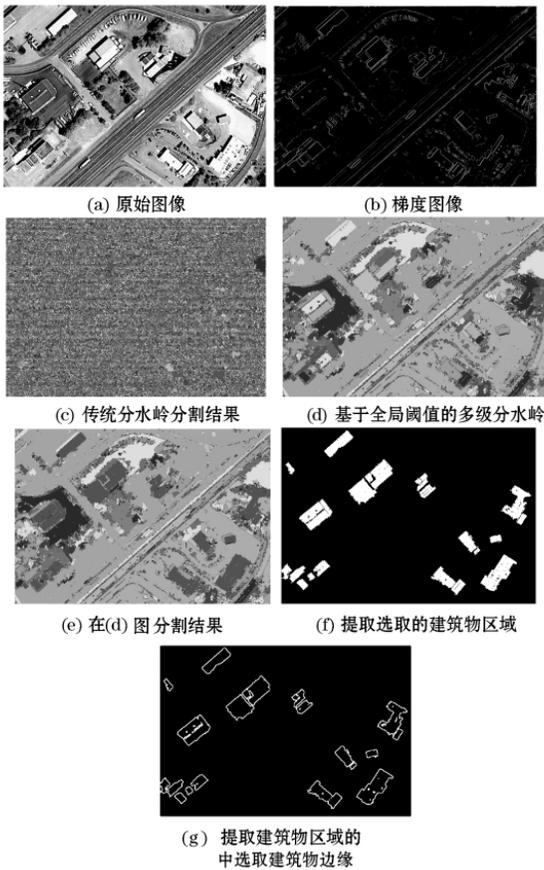


图 3 三波段高分辨率图像分割效果图

由图 3 所示实验结果可知,本文提出的算法对实验中所用的三波段高分辨率遥感图像也可以分割出统一的目标区域,并提取到规则的建筑物边缘。

由以上三组实验可知,使用基于全局阈值的多级分水岭分割算法可以对高分辨率遥感图像进行有效分割,选取建筑物区域进行合并后可以获得建筑物较准确的边缘。由实验结果可知,本文所提出的算法可以有效对高分辨率遥感图像处理。

2.4 实验结果评价

(1) 基于全局阈值的多级分水岭算法的分割结果评价

表 1 高分辨率遥感图像分割结果评价

方法	图像编号	分割区域数	分割时间(ms)
传统	1	39988	813
	2	64253	859
改进	1	3180	879
	2	6541	915

从表 1 中可以看出,和传统分水岭分割相比,基于全局阈值的多级分水岭分割算法可以使图 1 所示结果的过分割减少 92%,图 2 分割结果中的过分割减少 90%,同时从分割时间可

以看出,本文提出的算法并没有显著增加分割时间,说明分割效率比较高。

(2) 基于改进分割算法分割结果的建筑物轮廓提取精确度评价

为进一步验证本文所提出算法的有效性,对文献[8]给出的遥感图像建筑物提取评价标准进行修改,以建筑物对象数量为标准,对建筑物轮廓提取结果做出的效果评价,评价结果如表 2 所示。

表 2 高分辨率遥感图像建筑物提取效果分析

NB	TNB	TP	NTP	FP	FN	BDP	QP
1	21	18	3	2	0	100%	90%
2	10	7	3	1	1	89%	78%

说明: NB-实验图片编号 TNB-图片中建筑物总数
 TP 识别完整性 $\geq 90\%$ NTP-识别完整性 $\leq 90\%$
 FP-背景识别为建筑物 FN-建筑物识别为背景
 BDP-提取正确率 QP-分割质量

由表 2 可知,本文所提出的算法对实验中所用高分辨率遥感图像的提取正确率分别为 100% 和 89%,分割质量分别为 90% 和 78%,提取正确率及分割结果基本满足要求。

3 结 语

本文通过设定全局阈值,使用基于全局阈值的多级分水岭方法对图像进行了区域分割,并通过区域合并方法提取出建筑物,最后使用梯度微分算子得到建筑物边缘。其中,对差异函数添加全局阈值限制,修正了分割过程中的噪声区域,解决了欠分割问题,提高了传统分水岭算法分割的精确性。实验表明,本文提出的基于全局阈值的多级分水岭分割算法,对高分辨率图像中的多种目标区域均有良好的分割效果。

参 考 文 献

[1] 孔凡壮,刘芸. 遥感图像分割算法的研究与应用[D]. 长沙: 国防科技大学,2005.

[2] 陶文兵,柳健,田文金. 一种新型的航空图像城区建筑物自动提取方法[J]. 计算机学报,2003 26(7):865-873.

[3] Leila M G Fonseca, Laercio M Namikawa, Emiliano F. Castejon. Digital Image Processing in Remote Sensing[C]//2009 Tutorials of the XXII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing. 2009:59-71.

[4] 吴炜,沈占锋,骆剑承. 均值漂移高分辨率遥感影像多尺度分割的集群实现[J]. 计算机工程与应用 2009 34(6):7-9 24.

[5] 冈萨雷斯,等. 数字图像处理[M]. 阮秋琦,等译. 2 版. 北京: 电子工业出版社,2003.

[6] Vincent L, Soille P. Watershed in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1991 ,13(6):583-598.

[7] Lina C, Nevitia R. Building detection and description from a single intensity image[J]. Computer Vision and Image Understanding. 1998 72(2):101-121.

[8] Jefferey A Shufelt, Member. Performance Evaluation and Analysis of Monocular Building Extraction From Aerial Imagery[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1999 ,21(4):311-326.