

中图分类号: TP301.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)02-0221-06

论文索引信息: 王学松, 周明全, 樊亚春, 李鹏. 彩色图像色度距离权值的图论分割算法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(2): 221-226

# 彩色图像色度距离权值的图论分割算法

王学松<sup>1)</sup>, 周明全<sup>2)</sup>, 樊亚春<sup>2)</sup>, 李鹏<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(北京师范大学教育技术学院, 北京 100875) <sup>2)</sup>(北京师范大学信息科学与技术学院, 北京 100875)

**摘要:** 提出利用色度距离特征权重的图论分割算法, 对彩色图像进行区域分割分析。利用图论和 HSI 模型, 解决自然灾害图像的分割问题。针对复杂的自然图像, 将图像像素转换为图论中的节点, 构造基于像素点 HSI 模型的带权无向图; 构建带权无向图的图论分割权函数及分割准则, 形成区域相似度判别方法; 结合实际分割需求, 对图论分割后的离散区域进行二次吸收与合并运算, 获取连续兴趣区域; 对分割的结果与其他算法进行了比较与分析。

**关键词:** 图论理论; 图像分割; 色度距离

## The algorithm of graph cut using HSI weights in color image segmentation

Wang Xuesong<sup>1)</sup>, Zhou Mingquan<sup>2)</sup>, Fan Yachun<sup>2)</sup>, Li Peng<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(School of Education Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875 China)

<sup>2)</sup>(Department of Information Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875 China)

**Abstract:** Segmenting natural image into regions is concerned as an essential issue in computer vision. In this paper, a new weighted graph-cut algorithm which uses HSI color model is presented to solve a natural disaster image segmentation problem. Using graph theory, the color image is firstly translated into weighted graph by mapping each pixel into graph node. Weighted function is defined by combining HSI color and pixel distance factors, and Cut criterion is suggested by using region internal differences and region external similarity. The experimental result is provided to show the effectiveness of the algorithm, and the comparison with other methods results are also given in detail.

**Keywords:** graph theory; image segmentation; HSI distance

## 0 引言

图像分割是图像分析处理和理解的基础工作和重要环节<sup>[1-3]</sup>, 是计算机图像处理和机器视觉领域的研究热点之一。图像的自动分割目前尚有很多困难和问题, 但研究成果已经在相关领域得到了有效应用。比如, 领域专家在自然灾害发生后的分析和研判过程中, 经常需要解读灾害现场照片或遥感影像, 对这些图像的识别和理解, 可以帮助人们获取自然界物体和灾害现场的有用信息<sup>[4]</sup>, 获得的结果有

助于灾害建模和情况预判。

## 1 图像分割及图割算法研究现状

### 1.1 国内外彩色图像分割现状

图像分割的研究方法很多, 但目前还没有通用的、普适的分割方法。主流的图像分割方法包括: 基于区域竞争和合并的分割方法<sup>[3]</sup>、基于图论的分割方法<sup>[5-7]</sup>、基于图谱的分割方法<sup>[8]</sup>、基于目标特征模型的分割方法<sup>[9]</sup>、基于灰度阈值的分割方法<sup>[10-11]</sup>、基于边缘检测的分割方法、基于水平集(Level Set)

收稿日期: 2009-08-03; 修回日期: 2009-09-04

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAD20B02); 北京市自然科学基金项目(4081002)。

第一作者简介: 王学松(1975—), 男。北京师范大学教育技术专业博士研究生, 主要研究方向为信息检索与搜索引擎、图形图像处理与可视化。E-mail: wangxs@bnu.edu.cn。

的分割方法<sup>[12-13]</sup>、基于活动轮廓 (Snake)<sup>[14-15]</sup> 的分割方法。

图像分割效果的好坏直接影响后续的分析 and 理解, 针对不同的图像, 在实际应用中需要选择最适合解决问题的分割方法。对于光照和背景都比较复杂的自然图像, 一般的阈值法、边缘检测法的分割效果难以满足需要, 更多采用聚类的方法、区域的方法, 基于图论和基于图谱的方法目前也成为研究热点, 并取得了不错的效果。灾害现场照片和遥感图像通常都具有复杂的背景和光照情况, 无法通过简单的阈值分割获得。采用图论的分割方法可以将复杂的图像处理问题转换为可计算问题, 形成的方法可通过参数控制分割结果。

灾害现场照片的分割目标是为了寻找火灾、洪水等灾害影响区域, 得出初步的数值和结果分析。对分割结果的要求与通常以物体识别为目标的图像分割任务有所差别, 需要对带有干扰的火灾区域或者带有纹理的水域进行归并形成整体的兴趣区域。图论的分割方法, 可以从整体特征上把握场景的信息, 考虑自顶向下的全局信息完成分割。

## 1.2 国内外图割算法相关研究现状

基于图论的图像分割技术近年来有很大进展, 成为图像分割的新研究热点<sup>[16]</sup>。早期的图割算法采用固定阈值和局部特征进行分割, Zahn<sup>[17]</sup> 采用图的最小生成树的方法, 实现图像分割, 图中边的权重采用像素点的灰度值距离计算得到, 分割的判别准则采用最大权重的最小生成树 (MST) 分割方法。

Wu 和 Leahy<sup>[18]</sup> 提出的一种图分割方法, 利用图的最小割进行图像分割, 将图分割成  $k$  个子图, 并使  $k$  个子图之间的割最小, 主要通过寻找图的最小割, 利用分割的像素之间相似性最小化作为分割标准, 但该方法易造成出现较小的分割。

Shi 和 Malik<sup>[19]</sup> 提出了一种改进的归一化割 Neut (Normalized Cut) 的分割方法, 这种方法也是最小割方法, 但在计算连接时是计算所有连接边的权值在整个图的边集权值中所占的分量, 可以消除 Wu 和 Leahy 方法的较小分割偏向, 不过该方法计算量大, 难以实用。

Grady 和 Schwartz<sup>[20]</sup> 针对 Neut 方法计算复杂、实际应用中受图像大小限制的问题, 提出了等周 (Iso) 分割的方法, 这种方法不需要相似矩阵的重构操作, 运算速度快。

从整体视觉效果考虑, Felzenszwalb<sup>[21-22]</sup> 提出采

用全局信息进行图的分割, 该方法采用区域合并的方法, 并且采用简单有效的权值函数和分割准则, 运算速度快, 非常适合复杂自然场景分割的应用。但方法采用近邻函数和灰度函数作为权值和相似度函数, 精度上受到一定影响。本文对该方法进行改进, 改换权值函数及计算方法, 增加区域合并后处理, 以得到期望的结果。

## 2 图像的图论分割算法原理

### 2.1 图像的图论分割实质

图论的图像分割方法, 实际上把利用阈值完成的模糊问题, 转化成在一定前提下的最优化求解问题, 形成点对聚类的有效结果。

在图像的各种图论分割方法中, 都以像素作为节点, 以像素之间的关联作为边, 把图像转化为带权的无向图处理。图像的分割利用图论的相关知识和特点<sup>[23]</sup>, 利用图的分割算法, 得到图像最佳分割。

### 2.2 图像的 HSI 模型空间表示

图像分割依赖于彩色图像像素的表达, 常用的颜色模型包括 RGB、HSI 等, 由于自然图像的复杂性, 造成图像中灰度区域变化范围大, 变化快, 简单的利用灰度信息, 容易造成过分割或欠分割。而 HSI 模型, 依据人类视觉的特点, 把图像以色度、色饱和度、亮度 3 个分量分别表示, 可以从最接近人类视觉的角度来描述图像。像素的 HSI 表示可以从 RGB 计算得到。

自然灾害中的火、烟、水、雪等区域, 虽然由于亮度和拍摄角度的影响明暗各不相同, 但其色度的统计特征相对比较稳定, 非常适合作为图论的图像分割权值依据。

RGB 到 HSI 的转换函数比较简单假设图像像素点的红绿蓝分量分别表示为  $R, G, B$ , HSI 的 3 个分量表示为  $H, S, I$ , 其转换公式为

$$I = (R + G + B) / 3$$

$$H = \begin{cases} W & B \leq G \\ 2 \times PI - W & B > G \end{cases}$$

$$S = 1 - (3 \times \min(R, G, B)) / (R + G + B)$$

式中,  $W =$

$$\arccos\left(\frac{(2 \times R - G - B)}{(2 \times \sqrt{((R - G) \times (R - G) + (R - B) \times (G - B))})}\right)$$

### 2.3 图像的带权无向图表示

图像数据是一个 2 维像素点的矩阵, 而在图论

范畴中,图是指一系列节点以及连接不同节点间的边所构成的几何图形。图论的图用来表示对象之间的关系,对象本身作为图的节点 $v_i$ ,对象节点之间的连线表示无向边 $e_i$ 。图论算法应用于图像处理需要进行像素点到图的映射<sup>[24-25]</sup>。

对一幅图像 $P$ ,将每个像素点作为顶点 $v_i \in V$ ,集合 $V$ 表示所有顶点的集合;任意两个像素点之间构成一条边 $e(v_i, v_j) \in E$ ,标记为 $e_{ij}$ ,集合 $E$ 表示所有边的集合;整幅图像对应的无向图表示为 $G = (V, E)$ 。

如果图中每个边对应一个相关权重 $w(v_i, v_j) \in W$ ,标记为 $w_{ij}$ ,集合 $W$ 表示所有边权重的集合;整幅图像对应的无向带权图表示为 $G = (V, E, W)$ 。

#### 2.4 图像的图论分割相关定义

图像的图论分割,实际上转化为对带权无向图 $G = (V, E, W)$ 计算图的最小割集问题。由于图的顶点对应了图像 $P$ 中的各个像素点,对图像 $P$ 的分割等价于将顶点集 $V$ 分割成不相交子集。图分割的定义<sup>[26]</sup>可表示为

$$V = \bigcup_{i=1}^k V_i, V_i \cap V_j = \Phi, \text{ 其中 } i \neq j, i, j = 1, 2, \dots,$$

$k$ 称 $S(V_1, V_2, \dots, V_k)$ 为 $V$ 的一个分割, $k$ 为分割的数目。

对顶点集 $V$ 分割的目标是使分割后的子集同一类内节点像素间差异最小,不同分类间节点像素相异性最大。若将图的所有节点分割成 $m$ 个子集 $V_1, V_2, \dots, V_m$ ,分割准则<sup>[26]</sup>为(1)分割后的集合 $V_i$ 内部顶点间关联性和相似性大;(2)不同子集 $V_i$ 和 $V_j$ 相互之间的关联性和相似性低。

将图像分割中,图 $G'$ 属于 $G$ ,将 $G'$ 分割为 $A, B$ 两部分的代价函数为

$$S(A, B) = \sum_{u \in A, v \in B} w(u, v)$$

使代价函数 $S$ 最小的划分对应图 $G$ 的最优二元划分,对图 $G$ 的分割,就对应了原图像的最佳分割。

### 3 图像的色度距离图割算法分割

#### 3.1 图割的色度距离权函数

分割后子集的相似程度需要量化计算和描述,通常以权函数 $w$ 来表示。权函数表示了不同像素节点之间的相似程度,通常以节点间像素的灰度、颜色或距离函数量化计算得到。

权函数和相似度函数可以有多种形式和计算方式,实际上都是把像素点映射到某个特征空间,计算在该空间中的量化距离。

常用的形式是基于像素灰度值的权函数,函数主要利用局部特征分析相似度

$$w_{ij} = |I_i - I_j| \quad (1)$$

$$w_{ij} = \exp\left(-\frac{|I_i - I_j|^2}{\sigma_i^2}\right) \quad (2)$$

自然灾害图像的分析中像素点的距离和颜色信息都很重要,需要综合多种信息才能实现有效分割。我们将每个像素点映射为特征点 $(x, y, h, s, i)$ ,其中 $(x, y)$ 是像素点的位置信息, $(h, s, i)$ 是像素点的色度色相亮度信息。

基于像素间色度色相函数值和邻接距离构造权函数,考虑全局特征和局部特征<sup>[26]</sup>,构造图像像素的色度距离函数

$$w_{ij} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\|F_i - F_j\|_2^2}{\sigma_i^2}\right) \times \\ \exp\left(-\frac{\|X_i - X_j\|_2^2}{\sigma_x^2}\right) & \text{若 } \|X_i - X_j\|_2^2 < r \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中 $F$ 为色度色相亮度的量化函数,用来表示像素的颜色属性; $X$ 表示像素点的位置, $r$ 为指定像素相关联像素的半径(为了避免计算全部 $N \times N$ 个像素)。由于自然图像通常在拍摄过程中会引入人为或采集设备的噪音,在相关处理过程中都会采用高斯方法进行平滑,式中两个 $\sigma$ 值就是颜色和距离的高斯平滑参数。采用距离和像素色度的混合权值函数作为基本计算依据。权值函数表明,两个像素间的色度值越接近则两像素间的相似度越大,两像素间的距离越近,则其相似度越大。

#### 3.2 相似度判别色度距离函数

根据一般分割准则<sup>[19]</sup>,可以定义两个判别函数,分别定义类内相异度函数和类间相似度函数。类内相异度函数定义为

$$Dif\_inner(V_n) = \max_{e_i \in MST(V_n, E)}(e_i)$$

类间相似度函数采用链接各个不同分类之间像素相似度的最小值作为类间距离,定义为

$$Dif\_out(V_m, V_n) = \min_{v_i \in V_m, v_j \in V_n, (v_i, v_j) \in E}(w(v_i, v_j))$$

此处采用Felzenszwalb的算法,以简化计算量,实际效果可以满足分割需要,同时避免出现NP-hard问题,使算法具有针对大规模图像的实际处理

能力。

判断两个区域之间是否存在边界的准则是判断类间的相似度是否大于类内的差别度。两个区域是否分割的判别准则  $D$  可以公式化描述为

$$D(\mathbf{V}_m, \mathbf{V}_n) = \begin{cases} \text{分割} & \text{Dif\_out}(v_i, v_j) > \text{Min\_inner}(\mathbf{V}_m, \mathbf{V}_n) \\ \text{合并} & \text{其他} \end{cases}$$

式中  $\text{Min\_inner}(\mathbf{V}_m, \mathbf{V}_n)$  表示两个区域中比较小的区域内部相异度。

$$\begin{aligned} \text{Min\_inner}(\mathbf{V}_m, \mathbf{V}_n) &= \min(\text{Dif\_inner}(\mathbf{V}_m) + \tau(\mathbf{V}_m), \\ &\quad \text{Dif\_inner}(\mathbf{V}_n) + \tau(\mathbf{V}_n)) \\ \tau(\mathbf{V}_m) &= k / |\mathbf{V}_m| \end{aligned}$$

式中  $|\mathbf{V}_m|$  表示类内像素的数目,  $k$  值表示期望的区块大小。该阈值函数表明, 对于大的区域块, 分割的判定依据是类间距离大于类内距离阈值  $\tau(\mathbf{V}_m)$ ,  $k$  值本身并不指定区块的最小尺度, 大小仅会影响分割的区块大小,  $k$  比较大时, 分割后的区域也相对较大。分割后可以出现比较小的区块, 但是较小区块需要比较大的阈值。

### 3.3 图论分割的求解方法

通常图论的图像分割采用对较大的区域不断分割的方法, 通过逐步求得分拆结果, 即判别函数为判定最小割集使得分割代价最小。该方法由于分割过程中存在不确定性问题, 很难实现优化分割。

我们采用自底向上合并的思想<sup>[22]</sup>, 初始化较小区域, 通过逐步合并的方法, 有效的形成合适的区域分割。对于一个图像对应的带权图  $G = (\mathbf{V}, \mathbf{E}, \mathbf{W})$ , 假设有  $n$  个节点和  $m$  个连接, 要获得对应图像的分割结果。其图论的分割方法如下:

1) 对集合中所有边按权重排序, 得到边的升序集合  $\pi = (\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \mathbf{W}_m)$ ;

2) 初始化系统状态, 将每个像素节点作为一个单独的类, 形成以每个像素为单独区域的分割  $S^0$ ;

3) 循环计算  $k = 1, 2, \dots, m$ , 直到所有的边计算完成;

4) 假设  $S^{k-1}$  为第  $k-1$  次区域合并后的割集, 其中  $C_i^{k-1}$  和  $C_j^{k-1}$  分别是  $S^{k-1}$  中所包含的  $V_i$  和  $V_j$  的分类。如果有  $C_i^{k-1} \neq C_j^{k-1}$ , 并且满足判别条件  $D$ , 即当满足:

$\text{Dif\_out}(v_i, v_j) \leq \text{Min\_inner}(\mathbf{V}_m, \mathbf{V}_n)$  判别公式时, 对分类  $C_i^{k-1}$  和  $C_j^{k-1}$  进行合并, 得到新的分类;

5) 合并后的分类分割记作  $S^k$ , 返回最终的循环计算结果  $S^m$ 。

由于  $\text{Min\_inner}(\mathbf{V}_m, \mathbf{V}_n)$  中的阈值函数  $\tau$  保证了两个待合并类的在差别较小的情况下才会合并。并且对于较小的区块, 如果要独立存在, 需要具有更小的类内差异和更大的类间相似性, 面积较大的类尽量保持独立性, 除非具有更小的类间相似性和更大的类内差异才考虑合并。

### 3.4 图论分割的近距离吸收算法

针对自然灾害照片的图像分割, 注重整体区域的分析, 比如判断洪水和火灾的范围和程度。由于灾害自然图像比较复杂, 容易将区域内部的纹理等分割出来。为消除过细分割状态, 将较大区域包含的微小区域进行合并, 同时设置较大区域和较小区域的上下门限值, 避免出现过度合并。

后处理的区域合并判别准则需要保持原始的分割结果, 同时满足对较小区域进行吸收, 基本准则为 1) 保证类内相异度与类间相似度值, 符合门限阈值  $L$  规定; 2) 较小区域的区域大小要小于较大区域大小的  $1/10$ 。

### 3.5 图论分割的效率参数分析

基于图论的图像分割算法, 从步骤上可以看出, 对于具有  $n^2$  像素点的图像计算复杂度基本符合  $O(n \log n)$ 。主要的计算量在于循环计算区域间的最大相异度和区域内部的最小相似度。

算法的步骤 1) 中权重排序算法计算时间复杂度为  $O(n \log n)$ , 算法的主要计算量集中在步骤 3)、4), 最小权值计算过程中由于权重已经做过预排序, 计算量与  $O(n \log n)$  成正比, 时间为其常数倍。总体的计算复杂度仍然保持为  $O(n \log n)$ 。

对于计算公式中的参数, 需要根据对分割结果的要求, 设置合适的数值, 以保持适当的噪声平滑、区域尺寸。

### 3.6 图像分割的实现流程

图论方法的核心算法在前面已经列出, 对原始图像的处理和分析还需要预处理, 后期区域着色, 格式转换等一系列的辅助工作。总体的算法流程归纳如下:

1) 读取给定图像, 转换数据格式, 构造带权无向图  $G$ ;

2) 对给定的权值函数, 计算权重  $W$  数值;

3) 根据权重  $W$  数值, 计算区域的合并情况, 得到最终的图像区域分割结果;

4) 对区域分割结果进行二次处理, 合并吸收离

散区域点。

5) 对区域分割结果进行分析,以不同颜色输出。

### 4 图像分割结果分析

#### 4.1 图论色度距离分割结果

针对不同的原始自然灾害照片,采用图论的方法进行研究,利用 HSI 颜色模型下的色度距离权值函数,得到了初步分割结果,实验结果高斯平滑参数  $\sigma$  均采用 0.5,最小区域参数取值在 [20, 50] 之间的正整数。洪水图像分割中,光照和水波纹影响较大,容易将同一水域分割成不同的几个区域。本文算法增加被包含小区域独立性门限,以减轻过分割问题,分割结果如图 1 所示。

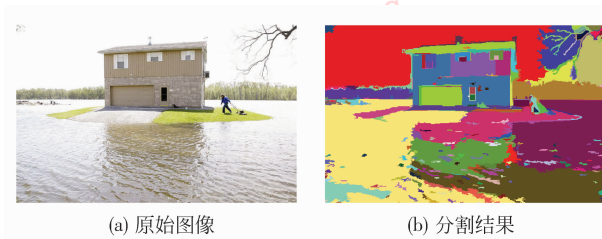


图 1 洪水图像分割结果

Fig.1 Flood image segment results

对于火灾图片,分割过程中主要困难在于图片不同区域的边缘模糊,不同区域存在交错现象。火灾分割的相关图片及结果如图 2 所示。

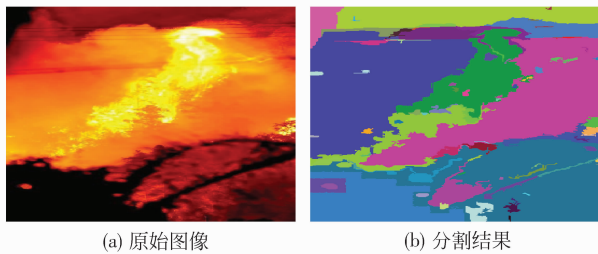


图 2 火灾图片分割结果

Fig. 2 Fire image segment results

#### 4.2 图论分割结果对比分析

为了判断分割方法的有效性,我们对水灾、火灾图片进行不同方法的分割对比。水灾图片分割中,分别采用人工层次阈值法、Felzenszwalb 方法、HSI 色度距离函数方法分割,效果对比如图 3 所示(其中图(b)仍然存在部分区域缺失现象)。

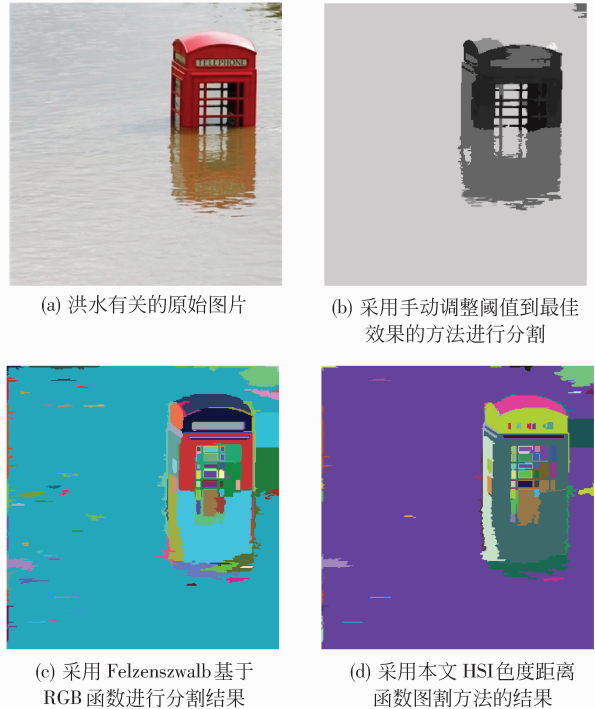


图 3 水灾图片分割结果对比

Fig.3 Flood image segment results comparison

火灾图片分割中,同样分别采用人工层次阈值法、Felzenszwalb 方法、HSI 模型色度距离函数方法进行分割,效果对比如图 4 所示。

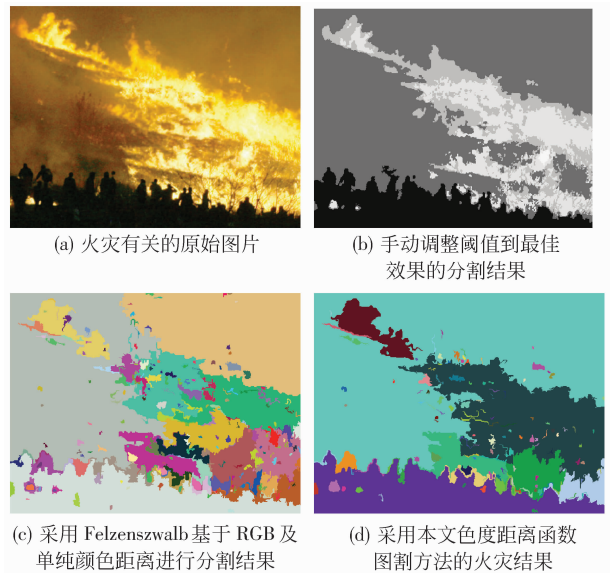


图 4 火灾图片分割结果对比

Fig. 4 Fire image segment results comparison

通过对图像分割的结果与其他方法的比较,在水灾和火灾情况下,可以得到图片分割过程中的正确率和有效性情况,可以发现采用 HSI 模型的区域

分割可以得到更接近人类视觉和人工最优的分割效果。

## 5 结 论

图论用于图像分割能取得较好的效果,实验结果表明,采用 HSI 模型可以获得更符合人类视觉的分割结果。由于灾害图片分析中更注重区域而非较小细节,本文方法比较符合该类图像分析需要,可以有效完成分割。

后续的研究可以根据灾害区域 HSI 的统计特性,利用机器学习的方法,获得不同灾害区域的特征。对分割的图像结果,可以依据统计知识判断分割后的区域块是否隶属于某种灾害类型,用于进一步的分析研判。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Noble J A, Boukerroui D. Ultrasound image segmentation: a survey [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2006, 25(8): 987-1010.
- [ 2 ] Lucchesezy L, Mitray S K. Color image segmentation: a state-of-the-art survey [J]. Image Processing, Vision, and Pattern Recognition, 2001. 67(2): 207-221.
- [ 3 ] Comaniciu D, Meer P. Robust analysis of feature spaces: color image segmentation [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Juan, Puerto Rico: IEEE Computer Society, 1997:750-755.
- [ 4 ] Cooper M C. The tractability of segmentation and scene analysis [J]. International Journal of Computer Vision, 1998, 30(1): 27-42.
- [ 5 ] Urquhart R. Graph theoretical clustering based on limited neighborhood sets [J]. Pattern Recognition, 1982, 15(3):173-187.
- [ 6 ] Shi J, Malik J. Normalized cuts and image segmentation [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Juan, Puerto Rico: IEEE Computer Society, 1997:731-737.
- [ 7 ] Wu Z, Leahy R. An optimal graph theoretic approach to data clustering: theory and its application to image segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(11):1101-1113.
- [ 8 ] Weiss Y. Segmentation using eigenvectors: a unifying view [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Greece: IEEE Computer Society, vol. 2, 1999:975-982.
- [ 9 ] Comaniciu D, Meer P. Mean shift analysis and applications [C] //Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, NY, USA: IEEE Computer Society, 1999: 1197-1203.
- [ 10 ] Ng HuiFuang. Automatic thresholding for defect detection [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(14):1644-1649.
- [ 11 ] Zhang Y J, Gerbrands J J. Transition region determination based thresholding [J]. Pattern Recognition Letters, 1991, 12(1): 13-23.
- [ 12 ] Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations [J]. Journal of Computational Physics, 1988, 79(1):12 - 49.
- [ 13 ] Adalsteinsson B, Sethian J A. The fast construction of extension velocities in level set methods [J]. Journal of Computational Physics, 1999, 148(1): 2-22.
- [ 14 ] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: active contour models [J]. International Journal of Computer Vision, 1988, 1(4):321-331.
- [ 15 ] Li Peihua, Zhang Tianwen. Review on active contour model (snake model) [J]. Journal of Software, 2000, 11(6):751-757. [李培华. 张田文. 主动轮廓线模型(蛇模型)综述 [J]. 软件学报, 2000, 11(6):751-757.]
- [ 16 ] Boykov Y, Jolly M. Interactive graph cuts for optimal boundary & region segmentation of objects in n-d images [C]//Proceedings of IEEE Conf. Computer Vision. Vancouver, Canada: IEEE Computer Society, 2001, 1:105-112.
- [ 17 ] Zahn C T. Graph-theoretic methods for detecting and describing gestalt clusters [J]. IEEE Transactions on Computing, 1971, 20(1):68-86.
- [ 18 ] Wu Z, Leahy R. An optimal graph theoretic approach to data clustering: theory and its application to image segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(11): 1101-1113.
- [ 19 ] Shi J, Malik J. Normalized cuts and image segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(8):888-905.
- [ 20 ] Grady L, Schwartz E L. Isoperimetric graph partitioning for image segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(3):469-475.
- [ 21 ] Felzenszwalb P, Huttenlocher D. Image segmentation using local variation [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Santa Barbara, California, USA: IEEE Computer Society, 1998: 98-104.
- [ 22 ] Felzenszwalb P. Efficient graph-based image segmentation [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 59(2): 167-181.
- [ 23 ] Yuri Boykov, Gareth Funka-Lea. Graph cuts and efficient N-D image segmentation [J]. International Journal of Computer Vision, 2006, 70(2):109-131.
- [ 24 ] Sarkar S, Soundararajan P. Supervised learning of large perceptual organization: graph spectral and learning automata [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(5):504-525.
- [ 25 ] Ding C H Q, He Xiaofeng, Zha Hongyuan. A min-max cut algorithm for graph partitioning and data clustering [C]//ICDM 2001. Los Alamitos, California: IEEE Computer Society, 2001: 107-114.
- [ 26 ] Li Xiaobin, Tian Zheng, Liu Mige. Weighted cut based image segmentation [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(1):76-80. [李小斌, 田铮, 刘密歌. 基于加权割的图像分割 [J]. 电子学报, 2008, 36(1):76-80.]