

文章编号: 1007 4619(2006)03 0350 07

# 基于边缘的多光谱遥感图像分割方法

刘永学, 李满春, 毛 亮

(南京大学 城市与资源学系, 江苏 南京 210093)

**摘 要:** 从 Marr 视觉计算理论和 Tobler 地学第一定律出发, 提出了基于边缘的多光谱遥感图像分割方法。在基于边缘的多光谱遥感图像分割方法中, 由边缘检测、边缘综合、边缘生长、区域标号等环节组成。该遥感图像分割方法在可视化开发平台 Delphi 中予以编程实现。将之应用于日本熊本市 (Kumamoto) 的 Quickbird 多光谱遥感图像中, 并与多种遥感分割算法进行了比较: (1) 从多光谱遥感图像各波段亮度信息利用的程度上看, 提出的遥感图像分割方法能充分利用多波段亮度信息; (2) 从遥感图像分割结果上看, 由于分别对不同的波段进行边缘检测, 并在此基础上进行边缘综合、边缘生长, 遥感图像中的细节特征得到了充分体现, 遥感图像分割效果更理想; (3) 从计算复杂度和计算效率上看, 基于边缘的多光谱遥感图像分割法较其他分割方法有一定的优势。

**关键词:** 边缘检测; 边缘生长; 多光谱遥感图像; 图像分割

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A

## An Algorithm of Multi Spectral Remote Sensing Image Segmentation Based on Edge Information

LIU Yongxue, LIManchun, MAO Liang

(Department of Urban & Resources, Nanjing University, Jiangsu Nanjing 210093, China)

**Abstract** According to the first geographic law of Tobler and the Marr's machine vision theory, an algorithm to segmenting multi spectral remote sensing imageries has been put forward based on the edge information extracted from them. This algorithm consists of four steps listed below: (1) Detecting edge information in each band of remote sensing imageries using a improved Canny method; (2) Integrating edge information in each band of remote sensing imageries into a binary image by methods such as overlay technique in GIS technology and then thinning edges in the binary image by techniques of mathematical morphology using a rectangle probe; (3) conjoining disconnected edges according to the characteristics of processing edge such as length, direction and so on, to close each region; (4) at last, labeling region and remove abundant edges that do not compose region. Then, the multi spectral remote sensing imageries of Quickbird covering the Kumamoto city, Japan, have been taken as a case study for this algorithm, and the result has been compared with other segmentation algorithms such as Multi-Threshold Gray Slice Approach (MTGSA), Iterative Self-Organized Data Analysis Technology Algorithm (ISODATA) image segmentation algorithm, Watershed Segmentation Algorithm (WSA), Fractal Net Evolution Approach (FNEA) and so on. Based on the comparative analysis, conclusions could be drawn out that (1) In term of utilizing brightness information of each band, the scope that the algorithm proposed in the paper is the most comprehensive one, and MTGSA and WSA can only use single band of multi spectral remote sensing image; (2) The result of this algorithm could be the most satisfied, as it detects edge information of each spectral band respectively, and then integrates as well as connects them together maximally.

收稿日期: 2004-12-06; 修订日期: 2005-04-07

基金项目: 浙江省“遥感与 GIS 在标准农田建设与管理中的应用研究”, 教育部高校青年教师奖项目和南京大学科研启动基金资助。

作者简介: 刘永学 (1976—), 男, 博士, 讲师, 南京大学地图学与地理信息系统专业毕业, 研究方向为遥感与 GIS 研究及应用, 已发表论

文 10 余篇。E-mail: yongxue@nju.edu.cn

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

digging out the detailed features in remote sensing images. (3) In the aspect of computational duration, this algorithm is relatively a bit faster than others under the same environment. As the same as the other three approaches, the algorithm proposed in the paper has also confronted the common difficulty of how to confirm the coefficient in the image segmentation procedure.

**Key words** edge detection; edge link; multi spectral remote sensing image; image segmentation

## 1 引言

遥感图像分割 (Remote Sensing Image Segmentation) 可定义为将遥感图像分解成若干各具特性、互不相交像元集合的过程<sup>[1]</sup>。遥感图像分割是面向对象的遥感信息提取模式的基础环节, 只有通过遥感图像分割生成图像对象 (Image Object), 进一步的遥感图像分析和理解 (如面向对象的特征分析、地物判别规则提取等) 才能开展<sup>[2]</sup>。

将计算机视觉领域的图像分割算法应用于遥感图像分割过程中, 已开展了较多的研究<sup>[3-6]</sup>, 但这些应用大多是针对单波段遥感图像 (灰度图像) 的, 针对多光谱遥感图像的分割方法尚不多见。

## 2 实现思路

Marr的视觉计算理论把边缘的获取看作机器视觉的早期阶段<sup>[7]</sup>, 通过对人类视觉系统的研究亦表明, 仅凭粗略的边缘轮廓线就能够识别出一个物体<sup>[7,8]</sup>。依据 Tobler地学第一定律——“地理学空间自相关定律”, 地理空间实体是相互关联的, 空间相近的地理实体有着更高的相关性<sup>[9]</sup>。该定律反映在遥感图像上, 则表现为相同的地物有着相同或者相似的特征 (如灰度值、纹理等)。可以说, 反映在遥感图像中地物的边缘是遥感图像局部特征不连续性 (灰度突变、颜色突变等) 的反映, 标志着一个区域的终结和另一区域的开始。提取反映在遥感图像中不同地物之间的边缘, 即可构建不同地物之间的界线, 从而取得不同地物的分布信息。因此, 可将多光谱遥感图像中各波段的边缘信息作为遥感图像分割的依据, 将边缘检测作为遥感图像分割的基础。本文所提出的基于边缘的多光谱遥感图像分割方法, 可细化为边缘检测——边缘综合——边缘生长——区域标号等环节。具体实现思路为: (1) 边缘检测。直接提取多光谱遥感图像中地物边缘比较困难, 本文先通过边缘检测算法提取遥感图像中各单波段遥感图像中的地物边缘信息。(2) 边缘综

合。在检测出各波段此边缘信息的基础上进行综合, 以充分利用多光谱遥感图像中的光谱信息。(3) 边缘生长。通过边缘检测、边缘综合环节得到的边缘有可能是断裂、不连续的, 并不能保证区域的封闭性, 因此采用边缘生长的手段连接边缘图像中断裂的边缘。(4) 区域标号。在边缘生长的基础上, 进行区域标号, 消除不构成区域的边缘, 生成标号图像对象, 得到最终多光谱遥感图像分割结果。

## 3 具体实现

### 3.1 单波段边缘检测

Canny (1986年) 从边缘模型及噪声模型出发, 提出了边缘检测的最优滤波器<sup>[10]</sup>, 取得了较好的效果。本文在其提出的平滑、增强、非极值抑制、滞后阈值化处理等边缘检测经典步骤的基础上, 加以改进, 用以提取单波段遥感图像中的边缘信息。具体步骤如下:

#### 3.1.1 图像平滑

由于遥感图像一般都含有较多的高斯噪声和非高斯噪声<sup>[11]</sup>, 且边缘和噪声在空间域上均表现为亮度有比较大的起落; 在频域上则同反映为高频分量, 因此在边缘检测之前, 需对单波段遥感图像先进行平滑处理, 以减少噪声对边缘检测的影响。Canny算子通过高斯滤波器来抑制噪声, 如果噪声强度过大, 则必须增大高斯空间系数  $\sigma$ , 从而影响到边缘的定位精度, 造成边缘位置偏移<sup>[12]</sup>。本文采用自适应平滑法抑制噪声: 先计算遥感图像中当前处理像元  $3 \times 3$  窗口内 8邻域平均值  $ave$  和方差  $var$ ; 若像元灰度和 8邻域平均值的差值大于 1.5倍方差, 则判定该像元为噪声; 以其 8邻域中灰度位于  $[ave - var, ave + var]$  范围内的像元平均值作为该像元的灰度值。

#### 3.1.2 梯度计算

常规边缘检测微分算子大小是固定的, 往往并非最优, 需要另行设计可动态调节的边缘检测微分算子。研究表明: 微分检测算子  $W$  可将之分解为两个一维序列  $s(i), d(j), i, j = -m, \dots, 0, \dots, m$  的外积, 即  $W = sd^T$ 。通过 Krawtchouk 多项式可

构建这两个一维序列,并设计出不同大小的边缘检测微分算子  $W^{131}$ 。像元梯度幅值由式  $g = (\text{trace}^2[W^T A] + \text{trace}^2[WA])^{1/2}$  计算而来,由式  $\theta = \tan^{-1}(\text{trace}[WA] / \text{trace}[W^T A])$  可计算出梯度方向(以正北方向为起始,顺时针方向开始计算)。对单波段遥感图像中每个像元进行梯度计算可得到梯度幅值图像。

### 3.1.3 非极值抑制

通过梯度计算得到的结果中,对梯度幅值较大的像元集合形成较亮的屋脊带,采用非极值抑制进行细化。图 1 为梯度幅值图像中的  $3 \times 3$  大小窗口,  $p$  为当前处理像元。在非极值抑制过程中,需要利用梯度计算过程得到的梯度方向信息  $\theta$  分析沿其边缘方向  $(90 - \theta)$  的两个邻域  $Q_1$  与  $Q_2$  的梯度幅值(可通过其两侧邻接像元  $P_{31}$ 、 $P_{32}$  或  $P_{12}$ 、 $P_{13}$  的梯度幅值线性内插而来)。定义以下非极值抑制规则进行细化:如  $p$  大于  $Q_1$ 、 $Q_2$ , 则说明  $p$  为窗口内区域极大值,保留该点;反之,则说明  $p$  并非为窗口内区域极大值,将之标记,并删除该点。

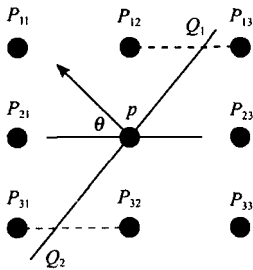


图 1 非极值抑制示意图

Fig. 1 Draft of nonmaxima suppression

### 3.1.4 滞后阈值处理

对梯度幅值图像分别取两次阈值 ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_1 = 0.4 \times T_2$ )。将梯度值小于  $T_1$  的像元设为 0 可得到弱边缘图像  $A$ ; 将梯度值小于  $T_2$  的像元设为 0 得到强边缘图像  $B$ 。由于  $T_1$  较低, 图像  $A$  中残留了较多的噪声; 由于  $T_2$  较高, 图像  $B$  中保留较少的噪声, 但同时也是以部分边缘信息丧失为代价的, 因此在  $A$ 、 $B$  两图中, 所得结果或是零散、不连续的, 或是包含了过多的虚假边缘, 需要综合两幅图像的强弱边缘信息, 本文以图像  $B$  为基础, 以图像  $A$  为补充进行形态学连接<sup>[14]</sup>。

## 3.2 边缘综合

因不同地物反射光谱的差异, 多光谱遥感图像

数据中不同的波段对地物的表现能力不尽相同。为充分利用多光谱遥感图像信息, 本文先对多光谱遥感图像中各波段进行边缘提取, 在此基础上进行边缘综合, 可得到反映在多光谱遥感图像中地物的边缘信息。方法如下:

### 3.2.1 边缘叠加

要充分利用多光谱遥感图像中的边缘信息, 最简单的方法是将各波段的边缘信息综合到一幅二值图像中。本文采取类似 GIS 叠置分析的方法综合提取各波段的边缘信息: 设多光谱遥感图像有  $l$  个波段, 各波段的边缘提取结果分别以矩阵  $E_k(x, y)$  ( $1 \leq k \leq l$ ) 表示(矩阵元素值为二值: 1 表示边缘, 0 表示背景), 建立与多光谱遥感图像相同大小的标记矩阵  $N(x, y)$  ( $N(x, y) = 0$ ); 逐像元累加各波段的边缘提取结果, 如若累加结果  $\geq 1$ , 则令该矩阵元素为 1, 反之, 则令该矩阵元素为 0 遍历整个图像, 直至每个像元均被处理。

### 3.2.2 边缘细化

经上一步骤得到的边缘信息, 边缘的宽度并不是单像元宽度, 不利于多光谱遥感图像的分割和特征提取, 有必要对所得边缘综合结果作进一步的细化。为保证边缘单像元宽度, 在数学形态学的理论基础上<sup>[14]</sup>, 运用矩形结构元素模板(本文采用的结构元素模板大小为 3)对边缘图像进行击中运算, 不断剥离图像中的边缘点, 得到遥感图像中地物边缘的中心骨架, 达到细化的目的。

## 3.3 边缘生长

在以上各单波段遥感图像边缘检测中, 只使用了遥感图像中的局部信息(通常只是边缘检测微分算子窗口内的遥感图像信息), 且应用全局阈值于边缘点判别中, 检测出的边缘可能是断裂、不连续的, 即使经过边缘综合, 仍不能保证边缘的连续性。因此以上边缘提取过程并不是一个完整意义上的图像分割过程; 需要对边缘信息进行后续处理, 才能完成分割任务。以下提出边缘生长算法, 使不连续边缘按一定准则进行生长, 最大程度地保证边缘的封闭。

该算法基于以下考虑: (1) 边缘生长应充分考虑到检测出边缘图像的性质(如边缘走向、周围最近邻边缘点的分布), 以避免产生“虚假边缘”。(2) 边缘生长还应考虑到断裂边缘的长度。如果对所有的边缘均按相同准则进行生长, 生长尺度过大则有可能形成过多、破碎的区域, 产生“过分割”现象; 生

长尺度过小则有可能保证不了边缘的连续性、封闭性。基于此,在边缘生长过程中,生长尺度与边缘长度呈正相关,断裂边缘的长度越长,搜索范围越大。边缘生长分为两个步骤:

### 3.3.1 边缘图像中的断裂边缘端点检测

为减少程序计算量,在边缘生长过程中,首先查找边缘图像中断裂边缘的端点,在此基础上,进行边缘生长。由于细化得到的边缘图像连接类型为完全 4 邻域邻接,可统计出断裂边缘端点共有 16 种类型(图 2 黑色像元为断裂边缘的端点,白色像元为断裂边缘上的内邻接点)。构建 16 个与图 2 中端点类型一致的结构元素模板(“探针”),逐一匹配,可检测出边缘图像中所有断裂边缘的端点,并将之标记。

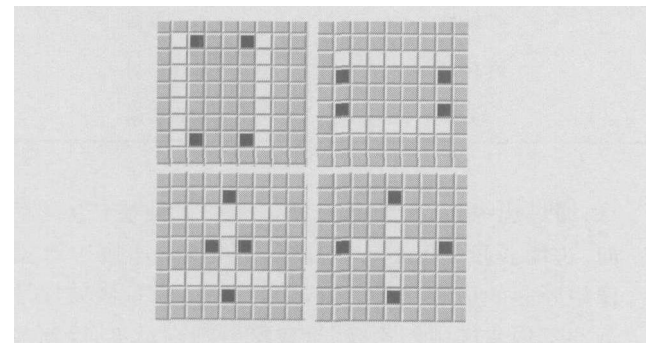


图 2 不同边缘的端点类型

Fig 2 Different types of nodes on edges

### 3.3.2 边缘生长

分别以上文查找的边缘端点为起点,通过链表跟踪的方法统计出每条断裂边缘的长度;并计算距端点最近的  $n$  点走向  $\theta_1$ (图 3 以  $X$  轴起按逆时针方向计算);搜索以断裂边缘端点为端点半径为  $r$ ( $r$  取值与断裂边缘长度  $k$  呈正相关)范围内是否有边缘点(像元值为 1,不包括当前处理的断裂边缘)存在。如没有边缘点存在,则不进行任何边缘生长;如搜索范围内有边缘点存在(边缘点个数  $n_1 \geq 1$ ),则分别计算待连接边缘点与断裂边缘端点的走向  $\theta_2'$ ,

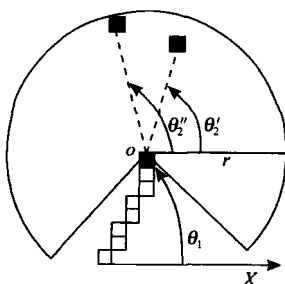


图 3 边缘生长示意图

Fig 3 Illustration of edge link

$\theta_2'' \dots$ ,若有  $n_2$  个待连接边缘点生长走向与最紧邻  $n$  点的走向 ( $\theta_1$ )之差小于一定的阈值,即有  $ABS(\theta_1 - \theta_2) < T$  则从待连接边缘点集合中选取距离断裂边缘端点  $o$  最近的待连接边缘点,将之与断裂边缘端点相连。遍历整幅边缘图像,直至图像中所有的断裂边缘的端点均被处理完毕。

### 3.4 区域标号

经边缘生长后,可保证绝大多数边缘的封闭性,少数边缘因在搜索范围内没有适合的边缘点不能进行边缘生长,从而存在极少数不构成区域的边缘类型(图 4 白色像元表示不构成区域的边缘)。此类边缘数量极少,可不考虑由此所造成的差异。

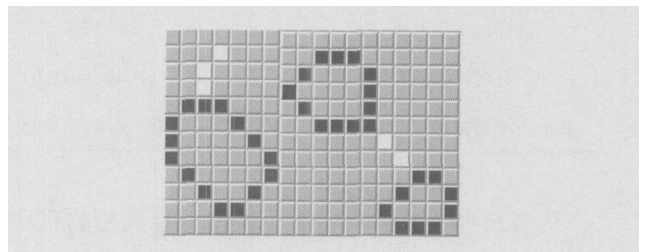


图 4 不构成区域的边缘

Fig 4 Two types of unclosed edges

经过边缘生长和细化后的边缘图像,本文提出区域标号算法将不同区域分别标识。区域标号通过递归进行:(1)将边缘图像以矩阵形式表示(0为背景,1为边缘);遍历矩阵,找到背景像元(值为 0);(2)初始化标号值(标号值为全局变量);(3)在 4 邻域方向上查找与该像元相邻的背景像元(值为 0);用相同标号值标识;(4)递归调用第(3)步,直至该封闭区域均被相同标号值填充;累加标号值;(5)遍历整个矩阵,直至所有像元均被标号。

分析标号图像中的不构成区域的边缘,发现其边缘上下或左右两侧的标号值是相同的,据此规则可消除不构成区域的边缘,从而得到最终多光谱遥感图像的分割结果。

## 4 遥感图像分割算例

基于边缘的多光谱遥感图像分割方法,通过可视化开发平台 Delphi 中编程予以实现,并将之应用于日本熊本市(Kumamoto)的 Quick bird 多光谱遥感图像(美国 DigitalGlobe 公司分发的示例数据:含 4 个波段,遥感图像空间分辨率为 2.44m)。实验使用的参数为:边缘检测模板大小为 5,边缘检测中梯

度阈值为 [0.1 0.25]; 边缘生长方向阈值  $T=90$ ; 边缘生长搜索范围  $r=1 \beta \times K$ 。使用多阈值分割、流域分割算法、迭代自组织数据分析、分形网络演化法等算法对相同图像进行分割; 多阈值分割法在遥感处理软件 Envi 中实现, 设定 8 个阈值 (分别为 212 435 734 1125 1308 1547 1792 2039); 迭代自组织数据分析法在遥感处理软件 ERDAS 中实现 (分为

10 类, 迭代 15 次, 迭代阈值为 0.98); 分形网络演化法在 eCognition 软件中实现 (分割尺度为 20 形状权重 0.8 颜色权重 0.2); 流域分割算法通过可视化开发平台 Delphi 通过 OLE 方式调用数学软件 Matlab 编程实现 (结构元素模板为圆盘, 大小为 15)。在 PIV 2.80GHz 1GB 内存、Windows XP 环境下, 分割结果见表 1 和图 5。

表 1 各遥感图像分割算法运行时间比较

Table 1 Time expenses in different algorithms of RS image segmentation

遥感图像分割算法	实现方式	运行时间 /ms	备注
多阈值分割	Envi4.0	小于 1000	仅能处理单波段数据
流域分割算法	DelphiOLE调用Matlab6.0	1906	仅能处理单波段数据
迭代自组织数据分析	ERDAS 8.7	约 11000	多波段数据
分形网络演化法	eCognition3.0	约 14000	多波段数据
基于边缘的遥感图像分割算法	Delphi编程实现	9975	多波段数据

从多光谱遥感图像各波段亮度信息利用的程度上看, 多阈值分割法和流域分割法仅能处理单波段遥感图像 (即灰度图像), 不能充分利用多光谱遥感图像信息; 而迭代自组织数据分析、分形网络演化法、基于边缘的遥感图像分割算法则能充分利用多光谱遥感图像信息。

从计算耗时上看, 对于大小为  $1000 \times 1000$  的多光谱遥感图像 (本文所用遥感图像的大小), 基于边缘的遥感图像分割算法运行速度为 9975ms (边缘检测 2943ms 边缘综合、边缘生长 3821ms 图像标号 3211ms), 速度较分形网络演化法、迭代自组织数据分析算法快。

从分割效果上看, 基于边缘的遥感图像分割方法较其他四种分割方法而言, 效果更理想, 遥感图像中的细节特征得到了充分体现; 主要表现在图像左下角的地物和上中部的沙洲分割比较清晰; 分割结果与遥感图像中的地物实体有着相当不错的一一对应关系。

## 5 结 论

本文从 Marr 视觉计算理论和 Tober 地学第一定律出发, 提出了基于边缘的多光谱遥感图像分割方法。在该方法中, 在 Canny 算子的基础上加以改进, 以检测反映在单波段遥感图像中的边缘信息; 通过边缘综合, 充分利用多光谱遥感图像中的边缘信

息; 通过边缘生长, 充分考虑边缘图像性质 (边缘走向、边缘长度、边缘点分布等) 等因素, 连接边缘图像中断裂的边缘, 保证区域的封闭性; 通过区域标号消除不构成区域的边缘, 生成标号图像对象, 得到多光谱遥感图像分割结果。该遥感图像分割方法在可视化开发平台 Delphi 中予以编程实现。与其他多种遥感图像分割算法所得分割结果相比, 本文所提出的基于边缘的多光谱遥感图像分割方法得到的分割结果, 能够更好地体现出遥感图像中的细节特征。

基于边缘的多光谱遥感图像分割方法与其他分割方法相比, 其分割效果有了较大改善, 但在分割过程中仍然存在参数确定的问题: 边缘检测微分算子大小多少比较合适? 如何选择边缘生长的参数? 类似的问题同样也存在于其他遥感图像分割方法中: 通过多阈值分割法进行遥感图像分割, 方法简单, 处理速度很快, 但效果差, 主要表现在阈值选取比较困难, 阈值过低、过高, 生成的区域往往有着很大的差异; 通过流域分割算法进行遥感图像分割, 结构元素和结构元素大小选择不合适, 往往得不到规则的边界, 并容易产生“过分割”现象; 通过迭代自组织数据分析法进行遥感图像分割, 分割结果较流域分割法有所改善, 但在遥感图像分割之前, 需要提供地物的类别数, 这在实际操作中往往很难给出一个确切的答案; 通过分形网络演化法进行遥感图像分割, 其尺度选择、形状颜色权重确定亦比较困难。

在本文实验中, 均通过多次尝试确定各分割方

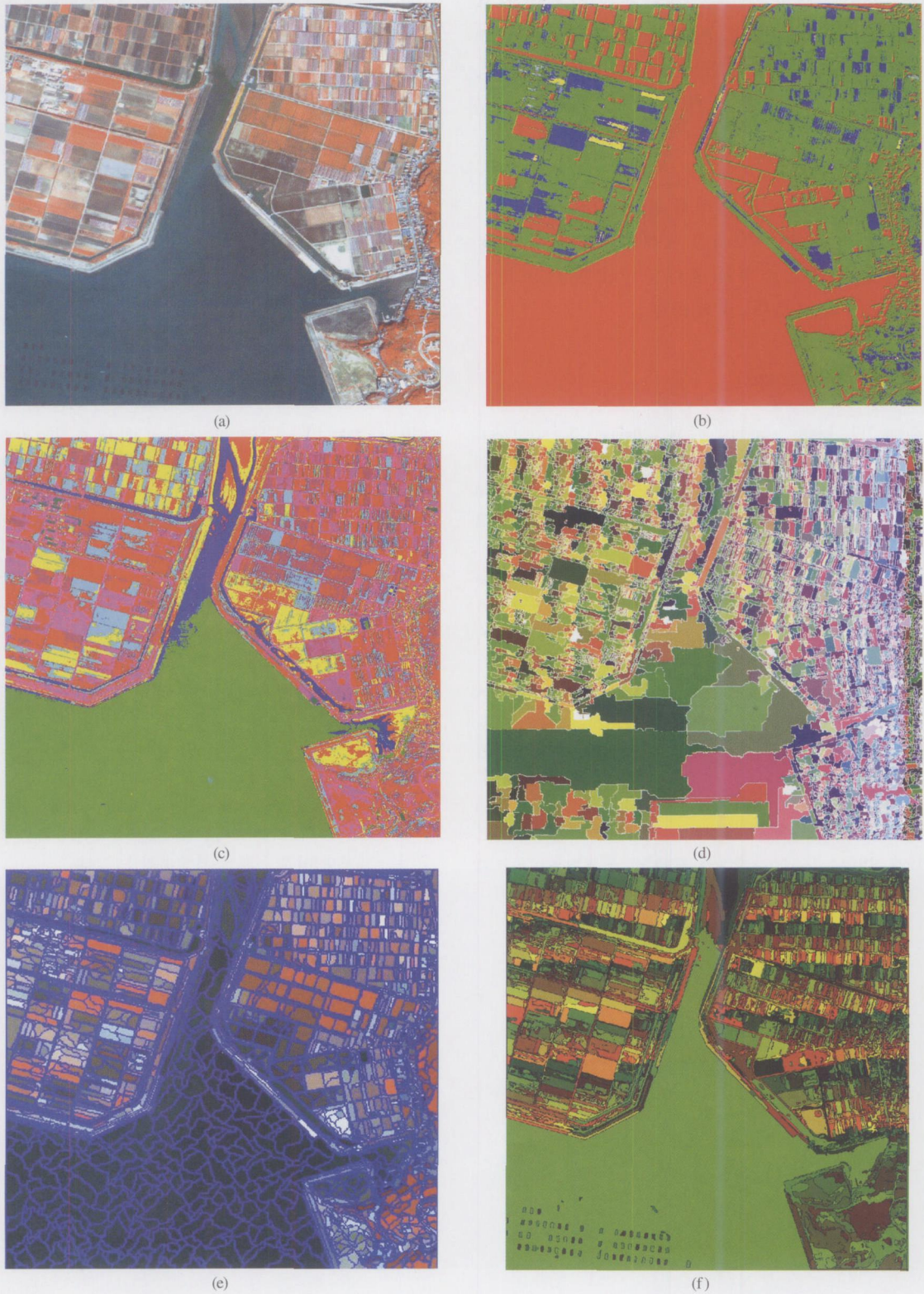


图 5 遥感图像分割算法结果比较

(a) 日本熊本市 Quick bird 遥感图像(4 3 2); (b) 多阈值法遥感图像分割结果(第二波段); (c) 迭代自组织数据分析法遥感图像分割结果;  
(d) 流域分割法遥感图像分割结果(第二波段); (e) 分形网络演化法遥感图像分割结果; (f) 基于边缘的多光谱遥感图像分割结果

Fig 5 Comparison of RS image segmentation result

(a) Quick bird Remote Sensing Imagery of Kumamoto (b) Segmentation Result by Multi threshold Slice (c) Segmentation Result by FODATA;  
(d) Segmentation Result by Watershed (e) Segmentation Result by FNEA; (f) Segmentation Result by Based on Edge Information

法中最佳参数。从分割结果上看,本文所提出的基于边缘的多光谱遥感图像分割方法效果较佳。但如何更多地从图像自身的性质出发,确定合理的参数,减少研究人员的主观参与程度,是接下来的研究重点。

致 谢 南京大学冯学智教授、田庆久教授、张万昌教授、中国科学院南京地理与湖泊研究所江南研究员、南京师范大学地理科学学院黄家柱教授在写作中给予悉心指导,谨致谢意。

## 参 考 文 献 (References)

- [ 1 ] Zhang Y J. Image Segmentation [ M ]. Beijing: Science Press, 2000. [ 章毓晋. 图像分割 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2000. ]
- [ 2 ] Wang R S. Image Understanding [ M ]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1994. [ 王润生. 图像理解 [ M ]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1994. ]
- [ 3 ] Wang A M, Shen L S. Study Surveys on Image Segmentation [ J ]. *Measure and Control Technology*, 2000, 19(5): 1-6, 16. [ 王爱民, 沈兰荪. 图像分割研究综述 [ J ]. 测控技术, 2000, 19(5): 1-6, 16. ]
- [ 4 ] Li S D, Zhang G, Wang Z Z. SAR Image Segmentation by Likelihood Criterion [ J ]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(2): 118-124. [ 酃苏丹, 张翠, 王正志. 基于相似性准则的 SAR 图像分割方法 [ J ]. 遥感学报, 2003, 7(2): 118-124. ]
- [ 5 ] Liu W P, Chen W J. A Segmentation Method for Airport Object in Remote Sensing Images [ J ]. *J. Infrared Millim. Waves*, 1999, 18(1): 73-76. [ 刘文萍, 陈维军. 遥感图像中机场目标的图像分割方法 [ J ]. 红外与毫米波学报, 1999, 18(1): 73-76. ]
- [ 6 ] Liu W Q, Chen H. Segmentation and Description of Satellite Image Based on Markov Random Field [ J ]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 1999, 29(11): 11-15. [ 刘伟强, 陈鸿. 基于马尔可夫随机场的遥感图像分割和描述 [ J ]. 东南大学学报, 1999, 29(11): 11-15. ]
- [ 7 ] Marr D, Hildreth T. Theory of Edge Detection [ A ]. In: *Proceeding of the Royal Society [ C ]. Series B*, 1980, 207: 187-217.
- [ 8 ] Zheng N N. *Computer Vision and Pattern Recognition* [ M ]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. [ 郑南宁. 计算机视觉与模式识别 [ M ]. 北京: 国防工业出版社, 1998. ]
- [ 9 ] Tobler W R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region [ J ]. *Economic Geography*, 1966, 46: 234-240.
- [ 10 ] Canny J F. A Computational Approach to Edge Detection [ J ]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679-698.
- [ 11 ] Yang S B, Peng F Y, Zhang Z C. Research on Omni-Directional Edge Detection Algorithm Based on Morphology in Remote Sensing Image [ J ]. *Remote Sensing Information*, 2003, (1): 2-3. [ 杨述斌, 彭复员, 张增常. 基于形态学的遥感图像全方位边缘检测算法研究 [ J ]. 遥感信息, 2003, (1): 2-3. ]
- [ 12 ] Milan Sonka, Vaclav Hlavag, Roger Boyle. *Image Processing Analysis and Machine Vision* 2nd Ed [ M ]. Brooks Cole, 1998.
- [ 13 ] Meer P, Georgescu B. Edge Detection with Embedded Confidence [ J ]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, 23(12): 1351-1368.
- [ 14 ] Cui Y. *Image Processing and Mathematical* [ M ]. Beijing: Science Press, 2000. [ 崔屹. 图像处理与分析数学形态学方法及应用 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2000. ]