

中国图形学象报

2013
11
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758 /TB



图像色彩视觉研究 P1536

中国图象图形学报

刊名题字：宋健 | 月刊（1996年创刊）



第18卷第11期（总第211期）

2013年11月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995 010-82614429

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian | Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995 010-82614429

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元

综述

- 多媒体技术研究: 2012——多媒体数据索引与检索技术研究进展
中国计算机学会多媒体专业委员会 1383

图像处理和编码

- 热扩散和整体变分模型自适应调整的图像放大模型
王相海, 艾新南 1398
- 椒盐图像的方向加权均值滤波算法
李佐勇, 汤可宗, 胡锦涛, 林亚明 1407
- 3维自适应最小误差阈值分割法
刘金, 金炜东 1416
- 结构约束和样本稀疏表示的图像修复
康佳伦, 唐向宏, 任澍 1425
- 结合小波变换和自适应分块的多聚焦图像快速融合
刘羽, 汪增福 1435

图像分析和识别

- 飞行时间3维相机的多视角散乱点云优化配准
张旭东, 吴国松, 胡良梅, 王竹萌, 邱维巍 1445
- 采用独立色素浓度分布分割皮损图像
徐舒畅 1452
- 基于CUDA的并行加速渲染算法
刘镇, 郝冬宁, 梅向东 1457
- 连续最大流图像分割模型及算法
杨晓艺, 王小欢, 宋锦萍 1462
- 词袋特征压缩算法比较研究
杨赛, 赵春霞 1468

图像理解和计算机视觉

- 融合对象性和视觉显著度的单目图像2D转3D
袁红星, 吴少群, 朱仁祥, 安鹏 1478

计算机图形学

- 多风格融合的复杂森林场景自适应可视化
董天阳, 夏佳佳, 范菁 1486

遥感图像处理

- 保留结构细节的遥感海表温度图像的采样与重构
崔雪森, 杨胜龙, 伍玉梅, 戴阳, 范秀梅 1497
- 组合四相机拼接影像的颜色平衡
任超锋, 姚娜, 林宗坚 1504
- 复杂背景下多样水体遥感自动解译
夏列钢, 沈占锋, 李均力, 骆剑承 1513

“第十届全国智能CAD与数字娱乐会议”专栏

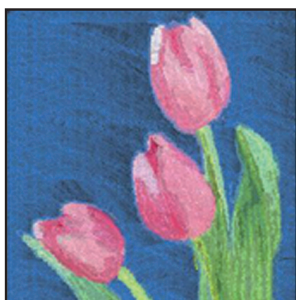
- 3D树木建模技术研究进展
谭云兰, 贾金原, 张晨, 李光耀 1520
- 网格分割的3维网格模型非盲水印算法
杜顺, 詹永照, 王新宇 1529
- 基于放缩系数和均值的多参数颜色迁移
王世亮, 徐岗, 储清林, 胡维华, 汪国昭 1536
- 基于参考图像的色粉画模拟
郑智斌, 张岩, 孙正兴, 杨克微 1542



融合对象性和视觉显著度的单目图像2D转3D(第1478页)



网格分割的3维网格模型非盲水印算法(第1529页)



基于参考图像的色粉画模拟(第1542页)

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Single-view image 2D-to-3D conversion based on objectness and visual saliency(P1478)



Non-blind watermarking algorithm for 3D mesh models based on mesh segmentation(P1529)



Color transfer with multiple parameters by combining the scaling and mean values(P1542)

Review

- Researches on multimedia technology, 2012
Multimedia data indexing and retrieval technology: a review
CCF Multimedia Technology Committee 1383

Image Processing and Coding

- Image magnification model based on adaptive adjustment of thermal diffusion and TV model
Wang Xianghai, Ai Xinnan 1398
Directional weighted mean filter for image with salt & pepper noise
Li Zuoyong, Tang Kezong, Hu Jinmei, Lin Yaming 1407
Three-dimensional adaptive minimum error thresholding segmentation algorithm
Liu Jin, Jin Weidong 1416
Image inpainting by structural constraints and sample sparse representation
Kang Jialun, Tang Xianghong, Ren Shu 1425
Multi-focus image fusion based on wavelet transform and adaptive block
Liu Yu, Wang Zengfu 1435

Image Analysis and Recognition

- Multi-view scattered point cloud optimization registration using a TOF camera
Zhang Xudong, Wu Guosong, Hu Liangmei, Wang Zhumeng, Di Weiwei 1445
Skin lesion segmentation by using independent pigment concentration distribution
Xu Shuchang 1452
Based on the parallel rendering algorithm in CUDA
Liu Zhen, Hao Dongning, Mei Xiangdong 1457
Image segmentation model and algorithm based on continuous max-flow approach
Yang Xiaoyi, Wang Xiaohuan, Song Jinping 1462
Comparative research on compression algorithms of bag-of-features
Yang Sai, Zhao Chunxia 1468

Image Understanding and Computer Vision

- Single-view image 2D-to-3D conversion based on objectness and visual saliency
Yuan Hongxing, Wu Shaoqun, Zhu Renxiang, An Peng 1478

Computer Graphics

- Adaptive visualization of multi-style composition for complex forest scene
Dong Tianyang, Xia Jiajia, Fan Jing 1486

Remote Sensing Image Processing

- Structural detail-reserving method of sampling and reconstruction of remote sensing SST image
Cui Xuesen, Yang Shenglong, Wu Yumei, Dai Yang, Fan Xiumei 1497
Color balancing of the stitched images of a combined four-head camera
Ren Chaofeng, Yao Na, Lin Zongjian 1504
Automatic interpretation of diverse water bodies from remotely sensed images in complex background
Xia Liegang, Shen Zhanfeng, Li Junli, Luo Jiancheng 1513

Issum of CIDE' 2013

- Survey on Virtual 3D Tree Modeling Technologies
Tan Yunlan, Jia Jinyuan, Zhang Chen, Li Guangyao 1520
Non-blind watermarking algorithm for 3D mesh models based on mesh segmentation
Du Shun, Zhan Yongzhao, Wang Xinyu 1529
Color transfer with multiple parameters by combining the scaling and mean values
Wang Shiliang, Xu Gang, Chu Qinglin, Hu Weihua, Wang Guozhao 1536
Image-based pastel simulation
Zheng Zhibin, Zhang Yan, Sun Zhengxing, Yang Kewei 1542

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)11-1462-06

论文引用格式: 杨晓艺,王小欢,宋锦萍. 连续最大流图像分割模型及算法[J]. 中国图象图形学报,2013,18(11):1462-1467. [DOI:11.11834/jig.20131110]

连续最大流图像分割模型及算法

杨晓艺¹, 王小欢¹, 宋锦萍^{1,2}

1. 河南大学数学与信息科学学院, 开封 475004; 2. 河南大学应用数学研究所, 开封 475004

摘要: 最大流模型是图像分割领域强有力的工具。近年来,一种基于连续的最大流模型被提出并有效应用于图像分割。然而,该模型的空间流约束变量为全局常数,未与图像的结构特征相联系。同时,源和汇的初始值计算量大,模型的数值实现效率不甚理想。针对这些问题,结合图像的结构、统计特征和预处理算法(包括分片常数算法和最大类间方差直方图算法),给出了连续最大流图像分割模型及算法。实验结果验证了本文算法的有效性,能够提高分割精度,加快运行速度。

关键词: 最大流;连续;图像分割;分片常数

Image segmentation model and algorithm based on continuous max-flow approach

Yang Xiaoyi¹, Wang Xiaohuan¹, Song Jinping^{1,2}

1. School of Mathematics and Information Science, Henan University, Kaifeng 475004, China;

2. Institute of Applied Mathematics, Henan University, Kaifeng 475004, China

Abstract: The max-flow model is used as a powerful tool to image segmentation problems. In recent years, a new model based on the continuous max-flow approach is presented and well adapted to segment images. However, the constraint of spatial flow in the model is simply set to a global constant, and it is not associated with architectural feature. Meanwhile, the initial terms of the source flow and sink flow need large amount of calculation, and cannot obtain satisfactory segmentation results. In order to overcome these shortages, we combine architectural features and statistical features of the image and a preprocessing algorithm, which include piecewise constant algorithm and Otsu-Histogram algorithm. Experimental results verify that the model is efficient.

Key words: max-flow; continuous; image segmentation; piecewise constant

0 引言

近年来,基于能量泛函的图像分割模型得到了广泛关注,其中最大流与最小割方法是解这类模型的重要手段之一。该方法是根据图像构造网络,将

能量泛函最小化问题转化为最小割问题,利用最大流/最小割理论,将其转化为最大流问题,通过求解最大流问题获得图像分割模型的解^[1]。

最大流方法分为离散和连续两种:离散的方法存在网格偏差、存储信息量大和并行计算比较困难等缺陷^[2];而连续的方法由于具有度量误差小、可

收稿日期:2012-12-18;修回日期:2013-04-30

基金项目:国家自然科学基金项目(11001075);河南省教育厅自然科学基金项目(2009B110006);河南省基础与前沿技术研究计划项目(132300410150)

第一作者简介:杨晓艺(1978—),女,讲师,2003年于河南大学获基础数学硕士学位,主要研究方向为图像处理。E-mail: yxy@henu.edu.cn

并行实现的优点受到了广泛的关注。Strang^[3-4]最先在连续区域中研究了最大流/最小割问题。Appleton 等人^[5-6]提出了用一种连续的最小曲面方法来分割2维和3维物体,并且用偏微分方程(PDE)方法对它进行求解。Chan 等人^[7]提出了用一种凸松弛方法求解如下分割问题,即

$$\min_s \int_{\Omega \setminus S} C_s(x) dx + \int_S C_t(x) dx + \alpha |\partial S| \quad (1)$$

式中, S 为待分割区域, α 为待分割区域周长的正则化参数。并在文献[7]中证明了通过设定 S 的特征函数 $\lambda^*(x) \in [0, 1]$ 而得到式(1)的全局最优解。Chan 的方法被扩展到求解多区域分割问题,并且利用数值优化方法求解^[8-10]。不同于上述方法,Yuan 等人^[11-12]提出用连续的最大流与最小割方法求解问题式(1),该方法具有收敛速度快、参数选取广泛性的优势。然而,文献[11]模型中空间流约束变量为全局常数,并没有考虑图像的结构特征。另外,文献[11]中基于乘子的最大流算法(MBMF),通过求解PDE得到源和汇的初始值 f_1 和 f_2 ,因而受CFL(Courant-Fredrichs-Lewy)条件(判断稳定性和收敛性的一个重要概念)的制约,从而影响 f_1 和 f_2 的精度。

基于问题式(1)和Yuan的工作^[11],提出空间流约束变量为非负函数的连续最大流模型,该方法在对具体的一幅图像用连续的最大流与最小割方法进行分割时,根据待分割图像的目标和背景特征使其空间流约束变量为分片常数。另外,为了使得源和汇的初始值 f_1 和 f_2 具有自适应性,进一步用基于图像结构特征的最大类间方差-直方图算法对这些初始值进行预处理,有效地构造出初始的源和汇。实验结果验证本文优化算法能够提高分割精度,加快运行速度。

1 连续最大流模型及数值算法

1.1 连续最大流模型

令 $\Omega \subset \mathbf{R}^2$ 为闭区域, s 和 t 分别表示流的源点和汇点。 $\forall x \in \Omega$,设经过点 x 的空间流为 $p(x)$,从 s 到 x 的有向源流为 $p_s(x)$,从 x 到 t 的有向汇流为 $p_t(x)$ 。于是,连续最大流模型^[11]为

$$\begin{aligned} \max_{p_s, p_t, p} \{ & P(p_s(x), p_t(x), p(x)) : = \int_{\Omega} p_s(x) dx \} \\ \text{s. t. } & |p(x)| \leq C(x), p_s(x) \leq C_s(x), p_t(x) \leq C_t(x), \\ & \operatorname{div}(p(x)) - p_s(x) + p_t(x) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $C(x)$ 为空间流 $p(x)$ 的容量限制, $C_s(x)$ 为源流的容量限制, $C_t(x)$ 为汇流的容量限制。

显然,该模型是约束优化问题。对于模型中的等式约束,利用拉格朗日乘子法,可将其转化为求解极大极小值问题(鞍点问题),即

$$\begin{aligned} \max_{p_s, p_t, p} \min_{\lambda(x)} \int_{\Omega} \{ & (1 - \lambda(x)) p_s(x) + \\ & \lambda(x) p_t(x) + \lambda(x) \operatorname{div} p(x) \} dx \\ \text{s. t. } & |p(x)| \leq C(x), p_s(x) \leq C_s(x), p_t(x) \leq C_t(x) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\lambda(x)$ 为拉格朗日乘子。

对于连续最大流模型式(2)中的约束变量 $C(x)$,文献[11-12]中取为常数。取 $C(x)$ 为非负函数,则式(3)对应的非凸分割问题为

$$\min_s \int_{\Omega \setminus S} C_s(x) dx + \int_S C_t(x) dx + \int_{\gamma} C(x) ds \quad (4)$$

这里, γ 是集合 S 的边界。可以证明,由式(3)得到的最优解 $\lambda^*(x)$ 的示性函数是式(4)的全局二值解。

1.2 模型式(2)约束条件中参数变量的选取

在连续最大流模型式(2)中,如何选取适当的约束变量 $C(x)$ 、 $C_s(x)$ 和 $C_t(x)$ 是一个重要的研究内容。首先根据图像梯度模的结构特征给出选取 $C(x)$ 为分片常数的数值方法,然后基于最大类间方差一直方图算法给出 $C_s(x)$ 和 $C_t(x)$ 的选取方法。

1.2.1 参数变量 $C(x)$ 的选取

连续最大流模型式(2)中的约束变量 $C(x)$,文献[11-12]直接设定其为常数。该方法虽然简单直观,但是并不能有效地反映待分割区域的结构特征。在图像中,图像的梯度模能很好地反映图像的结构特征。在梯度模比较小的区域,图像的结构特征比较接近,可以把该区域看成一个常数区域;而对于梯度模较大的区域,区域内包含较多的振荡信息。因此取梯度模的均值作为阈值,从而将图像区域分为两类,在同一类中的元素赋以相同的值,进而得到分片常数变量 $C(x)$ 。

算法1 求解分片常数变量 $C(x)$

1) 求出待分割图像的梯度模 $|\nabla f|$,并计算出梯度模均值

$$m = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |(\nabla f)_{i,j}|}{MN}$$

这里假定图像 f 的大小为 $M \times N$, ∇f 采用文献[13]

中的梯度格式,即

$$(\nabla f)_{i,j} = [(\nabla f)_{i,j}^1, (\nabla f)_{i,j}^2]^T$$

式中

$$(\nabla f)_{i,j}^1 = \begin{cases} f_{i+1,j} - f_{i,j} & i < M \\ 0 & i = M \end{cases}$$

$$(\nabla f)_{i,j}^2 = \begin{cases} f_{i,j+1} - f_{i,j} & j < N \\ 0 & j = N \end{cases}$$

$i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N$ 。

2) 以 m 为阈值将图像分为两类区域(分别具有较大梯度模的区域和较小梯度模区域),并计算各自区域的梯度模均值

$$n_1 = \frac{1}{\#(s_1)} \sum_{(i,j) \in s_1} |(\nabla f)_{i,j}|$$

$$n_2 = \frac{1}{\#(s_2)} \sum_{(i,j) \in s_2} |(\nabla f)_{i,j}|$$

这里 $\#(s_1)$ 和 $\#(s_2)$ 分别表示 $s_1 = \{(i,j) \mid |(\nabla f)_{i,j}| \leq m\}$ 和 $s_2 = \{(i,j) \mid |(\nabla f)_{i,j}| > m\}$ 中像素点的个数;

3) 设 $g(i,j) = \begin{cases} n_1 & |(\nabla f)_{i,j}| \leq m \\ n_2 & |(\nabla f)_{i,j}| > m \end{cases}$, 得到二值图像 $g(x)$;

4) 选取适当的正数 a 和 b , 令 $C(x) = \frac{b}{1+ag(x)}$ 。

1.2.2 基于图像结构特征的最大类间方差一直方图算法

在连续最大流模型式(2)中,源 $C_s(x)$ 和汇 $C_t(x)$ 分别是 $f(x) - f_1(x)$ 和 $f(x) - f_2(x)$ 的罚函数,选取

$$C_s(x) = |f(x) - f_1(x)|$$

$$C_t(x) = |f(x) - f_2(x)|$$

式中, $f(x)$ 为待分割图像, $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 是针对两个图像的分割区域给定的初值, 因此如何选取适当的 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 将对分割的精度和算法迭代时间产生重要影响。文献[11]提出一种迭代算法确定 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 的值, 该方法需要大量的迭代才能取得比较理想的初值。

最大类间方差法^[14]是一种有效寻找阈值的方法。该方法是按图像的灰度特征, 将图像分成背景和背景两部分(类)。背景和背景之间的类方差越大, 构成图像的两部分的差别就越大; 当部分目标错分为背景或部分背景错分为目标时, 都会导致两部分差别变小。而图像的直方图能很好地反映图像灰度值出现的频数、灰度分布范围等情况, 因此可以结合最大类间方差法找出图像直方图的阈值, 将图像分为两部分, 进而求出

初值 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 。

算法2 求解分片常数变量 $C_s(x)$ 和 $C_t(x)$

1) 利用最大类间方差法求出最佳阈值 r , 进而求出对应的灰度级 $p_1 = 255 \times r$;

2) 以 p_1 为界点, 分别以灰度级小于等于 p_1 和大于 p_1 的灰度级进行加权平均得到灰度级 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$, 即

$$\text{当 } f(x) \leq p_1 \text{ 时, } f_1(x) = \frac{1}{255d} \sum_{i=1}^{p_1} iu(i)$$

$$\text{当 } f(x) > p_1 \text{ 时, } f_2(x) = \frac{1}{255e} \sum_{i=p_1+1}^{256} iu(i)$$

式中, $u(i)$ 表示图像直方图中灰度级为 $i-1$ 的像素点个数, d 和 e 满足

$$d = \sum_{i=1}^{p_1} u(i), e = \sum_{i=p_1+1}^{256} u(i)$$

3) 取 $C_s(x) = |f(x) - f_1(x)|$, $C_t(x) = |f(x) - f_2(x)|$ 。

1.3 数值算法

连续最大流模型式(2)包含一个等式约束项, 形式上可以应用拉格朗日乘子法式(3)求解。然而, 由于乘子法的收敛速度很慢, 可以用增广拉格朗日方法求解。该方法由于结合了拉格朗日乘子法和罚方法的优点, 因此在约束优化问题中有着广泛的应用。连续最大流模型式(2)对应的增广拉格朗日函数形式为

$$\begin{aligned} \max_{p, p_s, p_t} \min_{\tau(x)} L_c(p, p_s, p_t, \tau) &= \int_{\Omega} p_s(x) dx + \\ &\int_{\Omega} \tau(\operatorname{div} p(x) - p_s(x) + p_t(x)) dx - \\ &\frac{c}{2} \|\operatorname{div} p(x) - p_s(x) + p_t(x)\|_2^2 \end{aligned}$$

$$\text{s. t. } |p(x)| \leq C(x), p_s(x) \leq C_s(x), p_t(x) \leq C_t(x) \quad (5)$$

式中, $c > 0$, τ 为拉格朗日乘子。显然, 若 $(p^*(x), p_s^*(x), p_t^*(x), \tau^*)$ 是式(5)的解, 则

$$\begin{aligned} \min_{\tau} L_c(p^*, p_s^*, p_t^*, \tau) &\leq L_c(p^*, p_s^*, p_t^*, \tau^*) \leq \\ &\min_{p, p_s, p_t} L_c(p, p_s, p_t, \tau^*) \end{aligned}$$

而且 $\operatorname{div}^* p(x) - p_s^*(x) + p_t^*(x) = 0$, 此时 τ^* 对应式(3)中最小值问题的解 λ^* 。然后由 λ^* 可得非凸分割问题式(4)的全局二值解。

算法3 增广拉格朗日方法求解连续最大流问题式(2)

1) 利用算法1和2求出预处理值 $(C(x),$

$C_s(x), C_t(x)$, 选取初值 $(p_s^0, p_t^0, p^0, \tau^0)$, 令 $k=0$;

2) 通过求解

$$p^{k+1} := \arg \max_{|p| \leq C(x)} L_c(p, p_s^k, p_t^k, \tau^k) \quad (6)$$

$$p_s^{k+1} := \arg \max_{p_s(x) \leq C_s(x)} L_c(p^{k+1}, p_s, p_t^k, \tau^k) \quad (7)$$

$$p_t^{k+1} := \arg \max_{p_t(x) \leq C_t(x)} L_c(p^{k+1}, p_s^{k+1}, p_t, \tau^k) \quad (8)$$

$$\tau^{k+1} = \tau^k - c(\operatorname{div} p^{k+1} - p_s^{k+1} + p_t^{k+1}) \quad (9)$$

得到 $(p^{k+1}, p_s^{k+1}, p_t^{k+1}, \tau^{k+1})$;

3) 若 $\operatorname{err}^k = \frac{\|\tau^{k+1} - \tau^k\|}{\|\tau^{k+1}\|} \leq \varepsilon$, 则终止算法, 得出解 τ^* , 否则令 $k = k+1$, 返回执行步骤 2)。

对于算法 3 中的子问题式(6)–(8), 由于目标函数 $L_c(p, p_s, p_t, \tau)$ 偏导数存在且连续可微, 因此可以利用投影梯度法依次求解每一个分量。

事实上, 求解子问题 p^{k+1} 对应着求解优化问题

$$\max_{|p(x)| \leq C(x)} -\frac{c}{2} \|\operatorname{div}(p(x)) - F^k\|^2$$

式中, $F^k = p_s^k - p_t^k + \frac{\lambda^k}{c}$ 。显然, 该问题类似于 ROF (Rudin-Osher-Fatemi) 模型的对偶形式, 因此选取适当的步长利用半隐式梯度下降法^[13]直接求解。

求解子问题 p_s^{k+1} 和 p_t^{k+1} 对应着求解优化问题

$$\max_{u \leq t(x)} \int_{\Omega} [uv - (u - Aw)^2] dx$$

该问题的解可以用简单的阈值方法 $u = \min\left\{\frac{v}{2} + Aw, t(x)\right\}$ 得到, 式中, $t(x)$ 和 v 为已知的函数变量, A 为有界线性算子, w 为某类隶属函数。

2 实验结果与分析

为了验证本文算法的可行性和有效性, 对选取的标准测试图像图 1(a) (238 × 238)、航拍图像图 2(a) (225 × 225)、自然图像图 3(a) (481 × 321) 和医学图像图 4(a) (1 024 × 1 024), 分别进行分割实验。其中实验参数选取值: $\varepsilon = 1 \times 10^{-4}$, $c = 0.3$, 时间步长 $\Delta t = 0.16$ 。实验基于 Matlab 7.0 环境, 实验平台为 PE 1.6 GHZ CPU, 512 M 的微机。实验结果如图 1—图 4 所示。

从实验效果来看, MBMF 算法对图像中细节部分分割有明显不足, 对小目标区域敏感, 易受干扰。从图 1(b) 可以看出, MBMF 算法对摄像机部分的分割效果不够理想, 导致摄像机整体轮廓不够清晰。

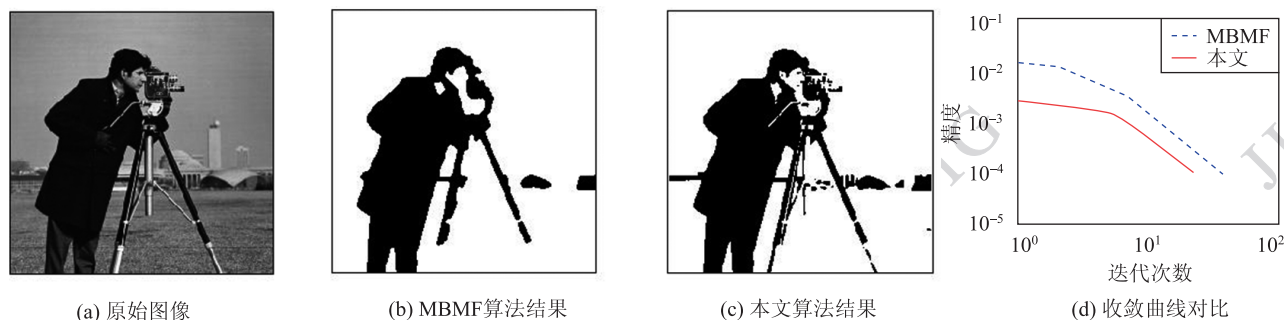


图1 标准测试图像实验结果

Fig. 1 Results of standard test image

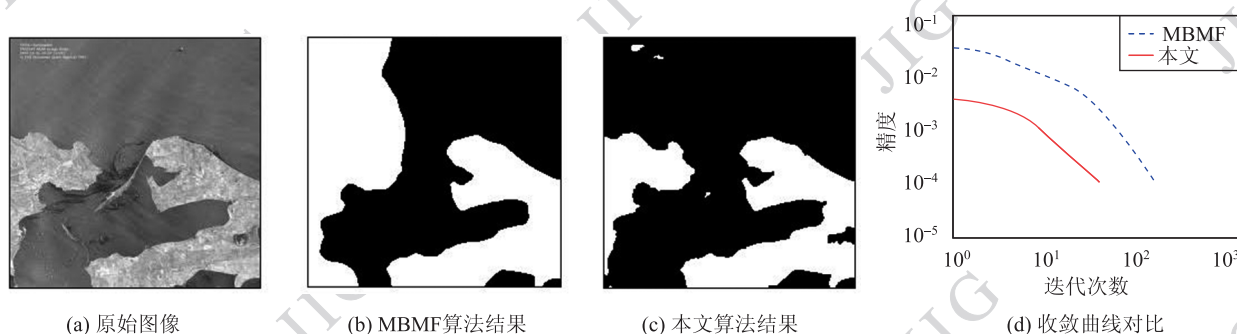


图2 航拍图像实验结果

Fig. 2 Results of aerial image

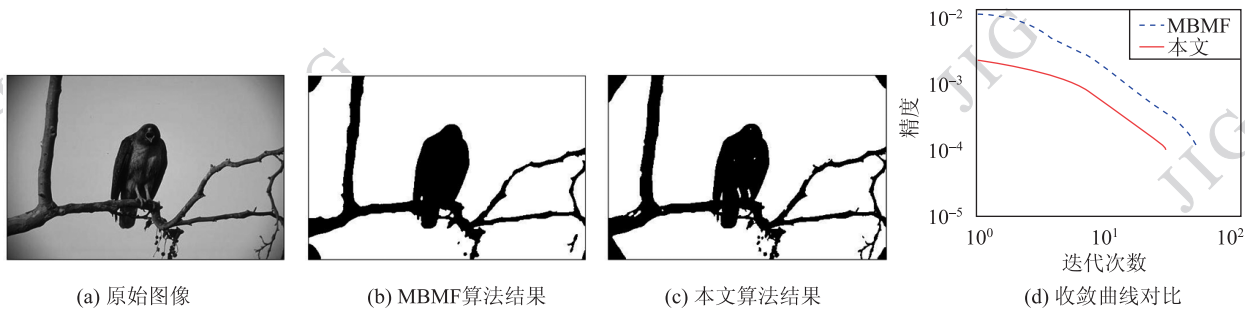


图3 自然图像实验结果
Fig. 3 Results of natural image

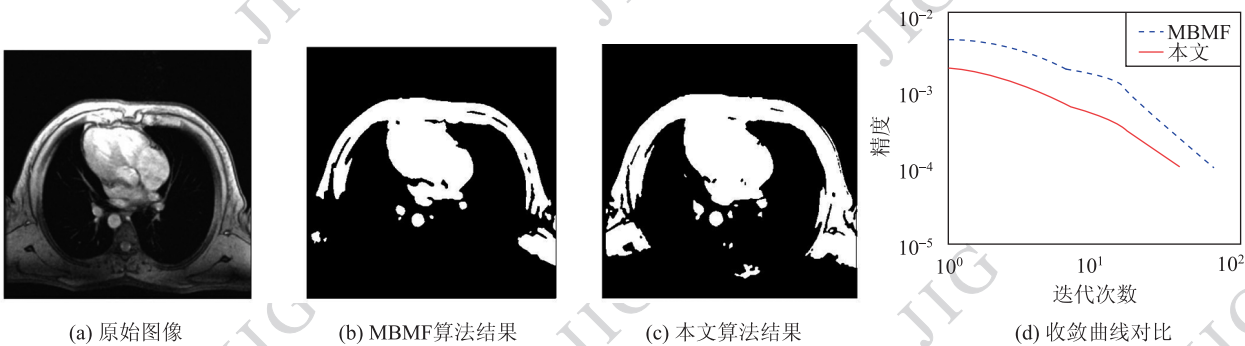


图4 医学图像实验结果
Fig. 4 Results of medical image

以及从图 3(b)中右下方树枝部分、图 4(b)中的目标自身下方区域均可以发现这种情况。且从图 2(b)图像可以看出,由于受到原始图像标注区域的干扰,MBMF 算法对其左上方大片区域不能有效地进行分割。而由图 2—图 4 中(c)可以看出本文

算法能够较好地识别并分割出图像中的细节部分,并且不易受小目标区域的干扰。

表 1 是本文算法与 MBMF 算法收敛速度的对比。从表 1 中可以发现,本文算法时间优势非常明显,实验结果与理论分析相一致。

表 1 收敛速度比较
Table 1 Convergence speed comparison

原始图像	运算时间/s		迭代次数		提高速率百分比/%
	MBMF 算法	本文算法	MBMF 算法	本文算法	
图 1(a)	1.828	1.172	37	22	35.89
图 2(a)	5.469	1.375	134	34	74.86
图 3(a)	8.391	4.718	48	27	43.77
图 4(a)	96.437	56.812	65	38	41.09

3 结 论

针对连续的最大流算法在进行图像分割时,存在以下两个问题:空间流约束变量未与图像的结构特征相联系,且需要通过大量迭代得

到初始源和汇的理想初值。提出了空间流约束变量为非负函数的连续最大流模型及算法,实验结果表明该方法在分割效果、运行时间方面优势明显。参数的设定对图像的分割结果很重要,寻找更简单有效的参数设置方法,将是后续工作的内容。

参考文献 (References)

- [1] Yang J G, Wang X L. Image segmentation approach based on graph cut and level set method[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(3): 195-197 [杨建功, 汪西莉. 一种结合图割与双水平集的图像分割方法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(3): 195-197.]
- [2] Kolmogorov V, Boykov Y. What metrics can be approximated by geo-cuts, or global optimization of length / area and flux[R]. Beijing: ICCV, 2005: 564-571.
- [3] Strang G. Maximal flow through a domain[J]. Mathematical Programming, 1983, 26(2): 123-143.
- [4] Strang G. Maximum flows and minimum cuts in the plane[J]. Advances in Mechanics and Mathematics, 2008, 3(1): 1-11.
- [5] Appleton B, Talbot H. Globally Optimal Surfaces by Continuous Maximal Flows[M]. Digital Image Computing: Techniques and Applications, 2003, 987-996.
- [6] Appleton B, Talbot H. Globally minimal surfaces by continuous maximal flows[J]. IEEE PAMI, 2006, 28(1): 106-118.
- [7] Chan T, Esedoglu S, Nikolova M. Algorithms for finding global minimizers of image segmentation and denoising models[J]. SI-AM Journal on Applied Mathematics, 2006, 66(5): 1632-1648.
- [8] Bae E, Yuan J, Tai X C. Global minimization for continuous multiphase partitioning problems using a dual approach[J]. International Journal of Computer Vision, 2011, 92(1): 112-129.
- [9] Lellmann J, Kappes J, Yuan J, et al. Convex multi-class image labeling by simplex-constrained total variation [R]. Norway: SSVM, 2009, 150-162.
- [10] Pock T, Chambolle A, Bischof H, et al. A convex relaxation approach for computing minimal partitions[R]. Miami: CVPR, 2009: 810-817.
- [11] Yuan J, Bae E, Tai X C. A study on continuous max-flow and min-cut approaches[J]. IEEE CVPR, 2010, 7(10): 2217-2224.
- [12] Yuan J, Bae E, Tai X C, et al. A study on continuous max-flow and min-cut approaches. part I: binary labeling [R]. Los Angeles: UCLA CAM, 2010: 10-61.
- [13] Chambolle A. An algorithm for total variation minimization and applications[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2004, 20(1-2): 89-97.
- [14] Otsu N. A threshold selection method from gray level histogram [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.