

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2012  
Vol.17 No.

4

中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会主办  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年4月 第17卷 第4期(总第192期)

## 目次

### 综述

图像分割中的模糊聚类方法 ..... 李旭超, 刘海宽, 王飞, 白春艳(447)

### 图像处理和编码

GPU 辅助的希尔伯特变换轮廓术 ..... 周波, 赵小敏, 王东平(459)

引入连续性强度和置信度因子的快速图像修复 ..... 李开宇, 孙玉刚(465)

自适应的有效非局部图像滤波 ..... 许光宇, 檀结庆, 钟金琴(471)

改进的 PMD 距离图像超分辨率重建算法 ..... 张旭东, 沈玉亮, 胡良梅, 陈菁菁(480)

压缩感知在 Micro-CT 图像超分辨重建中的应用 ..... 王丽艳, 韦志辉, 罗守华, 顾宁(487)

对偶四元数单片空间后方交会算法 ..... 姬亭, 盛庆红, 王惠南, 刘微微(494)

利用运动强度判据的高效自适应运动估计算法 ..... 郭晓珉, 姚睿, 刘智跃, 王友仁(504)

### 图像分析和识别

核空间散度阈值法 ..... 吴成茂(512)

近邻自适应局部尺度的谱聚类算法 ..... 孔万增, 孙昌思核, 张建海, 胡三清, 杨灿(523)

LUV 色彩空间中多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类算法 ..... 刘雅蓉, 汪西莉(530)

结合图像增强的心血管内超声中-外膜边缘检测 ..... 邱璇, 黄靖, 杨丰, 邢栋, 涂圣贤(537)

融合图像特征的一致点匹配方法及其应用 ..... 张久楼, 李春丽, 冯前进, 陈武凡, 阳维(546)

### 图像理解和计算机视觉

多蚁群动态协作优化的道路图像分割算法 ..... 林丽莉, 周文晖(553)

篮球比赛视频中持球队员行为预测 .....	王千,夏利民,谭论正(560)
利用 Principal Warps 评估颅面几何相似度 .....	朱新懿,耿国华,温超(568)

### 计算机图形学

图形处理器空间插值并行算法的实现 .....	赵艳伟,程振林,董慧,方金云(575)
------------------------	---------------------

### 虚拟现实与增强现实

面向 GPU 的批 LOD 地形实时绘制 .....	张兵强,张立民,张建廷(582)
----------------------------	------------------

### 遥感图像处理

光学遥感舰船目标识别方法 .....	杜春,孙即祥,李智勇,滕书华(589)
自适应超完备字典学习的 SAR 图像降噪 .....	杨萌,张弓(596)

---

第 18 届中国遥感大会征文通知 .....	封 2
第 33 届亚洲遥感会议征文通知 .....	封 2

## 中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 4 期

2012 年 4 月 16 日出版

**主管单位** 中国科学院  
**主 办** 中国科学院遥感应用研究所  
 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  
 北京 9718 信箱 邮编 100101  
 电子信箱:jig@irsa.ac.cn  
 电话:010-68407995 010-82614429  
 网 址:www.cjig.cn  
**印刷装订** 北京北林印刷厂  
**广告经营许可证** 京朝工商广字第 0346 号  
**总 发 行** 北京报刊发行局  
**订 购** 全国各地邮局  
**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
 (中国国际书店)  
 (北京 399 信箱 邮编 100044)

**Superintended by** Chinese Academy of Sciences  
**Sponsored by** Institute of Remote Sensing Application,  
 CAS China Society of Image and Graphics  
 Institute of Applied Physics and Computational  
 Mathematics  
**Chief editor** LI Xiaowen  
**Editor, Publisher** Editorial and Publishing Board  
 of Journal of Image and Graphics  
 (P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)  
 E-mail: jig@irsa.ac.cn  
**Distributed by** Beijing Bureau for Distribution of Newspapers  
 and Journals  
**Domestic** All Local Post Offices in China  
**Foreign** China International Book Trading Corporation  
 (P. O. Box 399, Beijing 100044, China)  
**Printed by** Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

## 第 18 届中国遥感大会征文通知

“第 18 届中国遥感大会”将于 2012 年 10 月 19 日-23 日在武汉召开。本届会议由中国遥感委员会主办,中国测绘学会摄影测量与遥感专业委员会和武汉大学承办。会议将围绕“遥感—全方位的社会服务”这一宗旨,以遥感学界院士与知名专家的特邀报告,分会场专题技术交流与技术讲座,重点项目研讨汇报、技术展览,新技术与新产品发布,专业委员会理事会等多种形式开展,同时举行“第 7 届中国青年遥感辩论会”和“第 2 届全国高分辨率遥感数据处理与应用研讨会”。

会议将全方位地展示遥感(RS)、全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)等方面的最新成果,为专家、学者和政府主管部门搭建联系纽带,为研发和用户提供技术交流平台,共同促进遥感科技的发展、遥感产业化的推进和大遥感体系的建立。

本届会议围绕大会主题将就遥感新理论、技术、方法和应用进行征文,范围包含但不限于以下方面:

- 1) 国家遥感中长期发展战略、国际遥感前沿与进展;
- 2) 航天、航空、低空、地面遥感技术及系统;
- 3) 光学、红外、高光谱及激光遥感技术;
- 4) 主、被动微波及雷达遥感技术;

- 5) 数字摄影测量与制图;
- 6) 高分辨率遥感数据处理与应用;
- 7) 地理空间数据处理技术与方法;
- 8) 地理国情监测(土地、农业、林业、矿产、环境、地质及水资源等);
- 9) 海洋、气象与全球变化;
- 10) 遥感、地理信息系统与导航定位系统(3S)集成与应用;
- 11) 智慧城市与数字地球;
- 12) 深空探测与行星测绘;
- 13) 教育、培训与社会公共事业。

征文采用在线方式投稿;

投稿要求:论文内容不涉密,且未在国内外学术刊物或正式学术会议上发表过;被录用的全文将收入大会论文集(送 ISTP 检索),并精选 70~90 篇口头报告论文编辑出版英文 SPIE 会议文集;大会将评选青年优秀论文(参加口头报告),论文将直接进入英文 SPIE 会议文集。

论文摘要截止日期为 2012 年 5 月 15 日,全文截稿日期为 2012 年 6 月 15 日。

会议相关信息,请查阅会议网址:<http://rsgis.whu.edu.cn/18ccrs/index.html>

“第 18 届中国遥感大会”组委会

## 第 33 届亚洲遥感会议征文通知

“第 33 届亚洲遥感会议”将由泰国地理信息和空间技术发展局(GISTDA)、科技部(MOST)和亚洲遥感协会(AARS)联合主办,于 2012 年 11 月 26-30 日,在泰国芭堤雅市宗滴恩酒店举行。这是亚洲遥感协会每年一届的系列学术会议。本届大会征文包括传感器与平台、算法和图像处理、GIS 与 Web GIS、全球导航卫星系统、灾害、自然资源、环境科学、教育和宣传、健康科学、制图、其他等方面。

会议重要日期:

- 论文摘要提交截止:2012 年 5 月 15 日;
  - 论文接收通知:2012 年 7 月 1 日;
  - 论文全文提交截止:2012 年 9 月 30 日;
  - 网上注册截止:2012 年 10 月 26 日;
  - 会议召开日期:2012 年 11 月 26-30 日。
- 会议还将组织学生专场和技术展览,其他信息请访问会议网站:<http://acrs2012.gistda.or.th>

与往年一样,中国遥感委员会仍将鼓励中国遥感科研人员和企事业单位参加会议,并组团参加学术交流和会议展览。

中国遥感委员会

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 4 April 2012

## Contents

### Review

The survey of fuzzy clustering method for image segmentation ..... Li Xuchao, Liu Haikuan, Wang Fei, Bai Chunyan (447)

### Image Processing and Coding

GPU assisted Hilbert transform profilometry ..... Zhou Bo, Zhao Xiaomin, Wang Dongping (459)

Fast image inpainting algorithm introducing continuous strength and confidence factor ..... Li Kaiyu, Sun Yugang (465)

Adaptive efficient non-local image filtering ..... Xu Guangyu, Tan Jieqing, Zhong Jinqin (471)

Improved super-resolution reconstruction algorithm for PMD range image  
..... Zhang Xudong, Shen Yuliang, Hu Liangmei, Chen Jingjing (480)

Image superreconstruction for Micro-CT based on compressed sensing ..... Wang Liyan, Wei Zhihui, Luo Shouhua, Gu Ning (487)

Dual quaternion of space resection with single-image ..... Ji Ting, Sheng Qinghong, Wang Huinan, Liu Weiwei (494)

Efficient adaptive motion estimation algorithm based on motion intensity ..... Guo Xiaomin, Yao Rui, Liu Zhiyue, Wang Youren (504)

### Image Analysis and Recognition

Divergence thresholding method in kernel space ..... Wu Chengmao (512)

Spectral clustering based on neighboring adaptive local scale  
..... Kong Wanzeng, Sun Changsihe, Zhang Jianhai, Hu Sanqing, Yang Can (523)

Adaptive spectral clustering algorithm based on Nyström method with multi-level structure in LUV color space  
..... Liu Yarong, Wang Xili (530)

Image enhancement based media-adventitia border detection in intravascular ultrasound images  
..... Qiu Xuan, Huang Jing, Yang Feng, Xing Dong, Tu Shengxian (537)

Coherent point drift registration combined with image feature and its application  
..... Zhang Jiulou, Li Chunli, Feng Qianjin, Chen Wufan, Yang Wei (546)

### Image Understanding and Computer Vision

Dynamic multi-colony ant cooperative optimization schemes for road image segmentation  
..... Lin Lili, Zhou Wenhui (553)

Behavior prediction of ball carriers in basketball match videos ..... Wang Qian, Xia Limin, Tan Lunzheng (560)

Estimate of craniofacial geometry shape similarity based on principal warps  
..... Zhu Xinyi, Geng Guohua, Wen Chao (568)

### Computer Graphics

Realization of GPU parallel spatial interpolation method  
..... Zhao Yanwei, Cheng Zhenlin, Dong Hui, Fang Jinyun (575)

### Virtual Reality and Augmented Reality

GPU-based real-time terrain rendering algorithm using batched LOD  
..... Zhang Bingqiang, Zhang Limin, Zhang Jianting (582)

### Remote Sensing Image Processing

Method for ship recognition using optical remote sensing data  
..... Du Chun, Sun Jixiang, Li Zhiyong, Teng Shuhua (589)

SAR images de-speckling algorithm via an adaptive over-complete learning dictionary  
..... Yang Meng, Zhang Gong (596)

中图法分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)04-0465-06

论文引用格式: 李开宇, 孙玉刚. 引入连续性强度和置信度因子的快速图像修复[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(4): 465-470

# 引入连续性强度和置信度因子的快速图像修复

李开宇, 孙玉刚

南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016

**摘要:** 传统的基于偏微分方程的迭代式图像修复算法的运算量较大, 修复所耗时间较长, 使得这些修复技术很难实际应用。而基于水平集的快速行进法可以快速有效地修复数字图像中的破损区域, 但对图像的边缘信息保持不佳。针对这一问题, 提出一种改进方案。在权函数设计时引入连续性强度来保持边缘信息, 并采用等照度线方向来评估两像素点的位置关系。在对单点进行修复时, 引入置信度因子对插值点进行加权。实验结果表明, 该算法在保证运行效率的同时, 很好地提高了修复效果。

**关键词:** 图像修复, 快速行进法, 连续性强度, 像素位置评估, 置信度因子

## Fast image inpainting algorithm introducing continuous strength and confidence factor

Li Kaiyu, Sun Yugang

College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

**Abstract:** The traditional iterative image inpainting algorithm which is based on partial differential equations can hardly be used in practice, for its complicated computation and unsatisfied time consumption. The fast marching method (FMM) which is based level set can inpaint the damaged area fast and effective, but it can not prevent the edge well. To solve this problem, an improved algorithm is presented. Continuity strength is introduced when weight function is designed and the factor which contains isophote is adopted to estimate the position between each pixels. When inpainting a single pixel, confidence factor is introduced to weight the interpolating point. Experiments show that the proposed algorithms can ensure the computation efficiency, and at the same time, it well improves the inpainting quality.

**Key words:** image inpainting; fast marching method; continuous strength; pixel position estimation; confidence factor

## 0 引言

数字图像修复 (inpainting) 是当前计算机图形学、计算机视觉和图像处理领域的研究热点之一, 其目的是对图像中缺失的部分进行修补或者移除图像中的多余目标, 从而使得图像看上去自然。数字图像修复技术在图像压缩、视频通信的错误隐匿、图像超分辨率分析、图像缩放等方面有着重大的应用价值。

图像修复这一问题首先由 Bertalmio 等人在

2000 年的 SIGGRAPH 会议上提出<sup>[1]</sup>, 并引入偏微分方程 (PDE) 的分析方法, 提出了他们的 BSCB 模型。Chan 等人在此研究基础上提出了 TV (全变分) 模型<sup>[2]</sup> 和 CDD (曲率驱动扩散) 模型<sup>[3]</sup> 等。由于扩散模型是平滑的重构图像信息, 所以该类方法主要应用于缺损尺度较小或者非纹理图像的修复, 当修复纹理信息相对丰富的图像时, 修复结果将造成不自然的模糊, 无法达到修复效果。Criminisi 等人在纹理合成技术的基础上, 提出了基于样例的修复算法<sup>[4]</sup>, 该类方法以样本采样的纹理合成为核心, 主

收稿日期: 2011-03-24; 修回日期: 2011-10-14

第一作者简介: 李开宇 (1969—), 男, 副教授, 2004 年于南京航空航天大学获测试计量技术及仪器专业博士学位, 研究方向为数字信号处理、数字图像处理和数据采集。E-mail: hcq@zju.edu.cn

要思想是按照一定的优先顺序,以图像块为单位,在已知区域中寻找与待修复块最匹配的的图像块,并将其复制到待修复块对应区域,以完成修复工作。这类算法中的核心部分就是修复顺序的确定,Criminisi 算法中的修复顺序取决于待修复块中心点的等照度线和边界法向的位置关系,文献[6]对 Criminisi 算法的修复顺序提出改进,采用 TV 算法中的扩散因子作为数据项,使得修复顺序仅依赖于中心点的梯度方向。

近年来,图像修复技术已经成为众多数学家和图像工作者的研究热点,修复技术也得到不断改进。然而,虽然目前的修复技术在解决大多数修复问题时都可以得到满意的效果,但大多数方法都比较复杂,处理速度非常慢,无法实际应用。如对于小尺度缺损的图像,TV 和 BSCB 方法通过多次迭代总是可以得到比较满意的效果,但是这两种方法在修复很小的一幅图像时,就要消耗大量的时间。而实际应用时,通常对处理速度有一定的要求,因此,如何快速有效地修复破损的图像是当前急需解决的问题。随着学者对这一问题的认识,出现了一些旨在提高修复速度的算法<sup>[7-15]</sup>,其中,Telea 所提出的快速行进法(FMM)最为典型。与基于偏微分方程的迭代式方法不同,FMM 算法是一种快速的非迭代式的修复方法,应用快速行进法将待修复区域的边界往里逐步推进,推进的同时修复各个边界上的离散像素点,直到整个待修复区域全部被修复为止。但 FMM 算法对像素点位置评估不够合理,并对已知像素采用同等信任,导致信息传递误差的积累,且对边缘信息保持不佳。

本文对 FMM 算法进行了改进,采用含有等照度线方向的因子评估像素的位置关系,同时在权函数中加入连续性强度来保持边缘信息,并引入置信度因子对插值点进行加权。实验结果表明,该算法在保证运行效率的同时,很好地提高了修复效果。

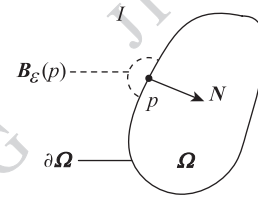
## 1 基于快速行进(FMM)的修复算法

### 1.1 修复模型

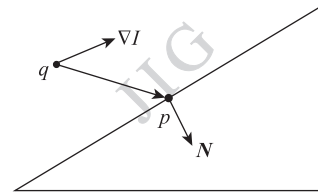
如图1所示, $I$ 为整幅图像, $\Omega$ 为待修复区域, $\partial\Omega$ 为待修复区域的边界, $p$ 为 $\partial\Omega$ 上的一点。以 $p$ 为中心,在已知区域上取半径为 $\varepsilon$ 的邻域 $B_\varepsilon(p)$ ,在 BSCB 模型的描述中, $p$ 点的像素应当由 $B_\varepsilon(p)$ 中邻近 $p$ 点的已知像素的点决定。当 $\varepsilon$ 足够小时, $p$ 点像素值的一阶近似 $I_q(p)$ 由下式确定:

$$I_q(p) = I(q) + \nabla I(q)(p - q) \quad (1)$$

式中, $q$ 为 $B_\varepsilon(p)$ 中的一点, $I(q)$ 和 $\nabla I(q)$ 分别为 $q$ 点的像素值和梯度值。



(a) FMM修复模型



(b) 单个像素修复示意图

图1 FMM 修复模型示意图

Fig. 1 FMM inpainting model

因为 $p$ 点像素由 $B_\varepsilon(p)$ 中所有已知像素点 $q$ 决定,所以, $p$ 点的像素可以由 $B_\varepsilon(p)$ 中所有已知像素的点加权得到

$$I(p) = \frac{\sum_{q \in B_\varepsilon(p)} w(p, q) I_q(p)}{\sum_{q \in B_\varepsilon(p)} w(p, q)} \quad (2)$$

式中, $w(p, q)$ 为归一化加权函数,可以看出,该算法为线性算法。

加权函数 $w(p, q)$ 应该能够保证让图像的轮廓信息和平滑信息正确地扩散至待修复区域,因此权函数的设计至关重要。Telea 将权函数设计为

$$w(p, q) = dir(p, q) \cdot dst(p, q) \cdot lev(p, q) \quad (3)$$

$$dir(p, q) = \frac{p - q}{\|p - q\|} \cdot N(p)$$

$$dst(p, q) = \frac{d_0^2}{\|p - q\|^2}$$

$$lev(p, q) = \frac{T_0}{1 + |T(p) - T(q)|}$$

式中, $d_0$ 和 $T_0$ 分别为距离参数和水平集参数,一般都取为1。其中,方向因子 $dir(p, q)$ 保证了靠近法线方向 $N = \nabla T$ 的像素点对 $p$ 点的贡献最大,即邻近于算法信息传播方向的像素点对待修复点 $p$ 的贡献高于远离法向的像素点;几何距离因子 $dst(p, q)$ 保证了离 $p$ 点越近的已知像素点对其贡献越大,而远离 $p$ 点的已知像素则认为相关性很小,对 $p$ 点的作用也就很小;水平集距离因子 $lev(p, q)$ 保证了离经过点 $p$ 的待修复区域的轮廓线越近的已知像素点

对点  $p$  的贡献越大。可以看出,权函数是依据破损区域的几何特征而设计的。

### 1.2 行进过程

整个修复的过程是通过多次使用式(1)完成的,首先对边界  $\partial\Omega$  的初始位置  $\partial\Omega_i$  上的所有离散点使用式(1)进行修复,继而将  $\partial\Omega$  向待修复区域  $\Omega$  内推进,直到整个区域被修复。修复像素的顺序由像素点  $p$  与边界的距离决定,即距离已知像素点最近的点予以最先修复,这与手工修复是一致的。

该算法中采用快速行进法将边界  $\partial\Omega$  向待修复区域  $\Omega$  内部推进,事实上,快速行进算法就是对待修复区域内部的点解 Eikonal 方程:

$$|\nabla T| = 1 \quad (4)$$

式中,  $T$  表示  $\Omega$  中的点与边界  $\partial\Omega$  的距离,当待修复点在  $\partial\Omega$  上时,  $T=0$ 。上述方程的有限差分形式为

$$D^-x T(i,j) = T(i,j) - T(i-1,j)$$

$$D^{+x} T(i,j) = T(i+1,j) - T(i,j)$$

$y$  方向的差分与  $x$  方向同理。

快速行进法的基本思想是在传播边界外围构造一个活动窄带,即当前即将修复的边缘  $\partial\Omega$ ,对于窄带上的每一个点,记录其  $T$  值和像素值,以及当前的状态  $flag$ 。

在描述快速行进法之前,需要建立一个符号标志  $flag$ ,它有以下3种状态。

**BAND:** 窄带上的像素点,即将被处理的像素点,其  $T$  值正在更新;

**KNOWN:**  $\partial\Omega$  外已知像素的点,其  $T$  值和像素值已知;

**INSIDE:**  $\partial\Omega$  内部的点,属于等待修复的区域,其  $T$  值和像素值位置。

那么快速行进修复算法的具体步骤为

#### 1) 初始化

首先设定待修复区域边界  $\partial\Omega$  上和边界外的  $T$  值为0,而边界内部设为一个非常大的值(实际中取  $10^6$ ),并按照上述  $flag$  状态标准初始化所有像素的状态。

#### 2) 信息传播

(1) 提取出窄带上  $T$  值最小的点  $p$ ;

(2) 通过增加新像素点的方法将边缘  $\partial\Omega$  向  $\Omega$  内部行进;

(3) 修复点  $p$ ;

(4) 通过式(4)将  $p$  的  $T$  值传递给它邻近点;

(5) 重复上述步骤,直到整幅图像修复完成(即所有的点都被标识为 KNOWN)。

## 2 改进算法

FMM 算法在设计权函数时,考虑的是破损区域的结构特征,所以并不能准确地保持图像的边缘信息。并且对已知点采用同等的信任,导致修复时误差的积累,使得待修复区域产生模糊效应。本文在设计权函数时引入连续性强度,同时采用含有等照度线方向的因子评估像素的位置关系,并引入置信度因子对插值点进行加权。

### 2.1 权函数的设计

FMM 算法中使用切线方法  $N(p)$  来评价已知像素点对待修复点贡献的大小,即距离经过待修复点的法向  $N(p)$  近的点对待修复点的贡献较大,反之,则贡献较小。考虑的是破损区域的结构特征而不是图像本身的结构特征。

由于 Telea 的图像修复方法是只根据图像破损区域的几何特征确定向内修复的,常导致信息向内的错误传递,并且有不连续的现象,因此本节将采用等照度线方向来评价像素位置的关系,并引入连续性强度来保持图像的边缘信息。

将权函数设计为

$$w(p,q) = \mu D(p,q) \cdot dst(p,q) \cdot lev(p,q) \quad (5)$$

$$D(p,q) = \frac{p-q}{\|p-q\|} \cdot \nabla I^\perp \quad (6)$$

式中,  $\nabla^\perp I$  表示  $I$  的等照度线方向

$$\nabla^\perp I = \left( -\frac{\partial I}{\partial y}, \frac{\partial I}{\partial x} \right)$$

$dst(p,q)$  和  $lev(p,q)$  的定义同 FMM 算法,  $\mu$  为连续性强度。可以看出,  $D(p,q)$  与 FMM 算法的  $dir$  不一样,采用了离等照度线方向越近贡献越大的原则,考虑了图像已知区域的结构特征,可以有效地保持等照度线方向信息传输的有效性,如图2所示。

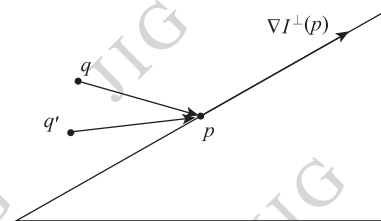


图2  $p, q$  位置关系示意图

Fig. 2  $p$  and  $q$  position

图2中  $q'$  对  $p$  点的贡献将大于  $q$  对  $p$  点的贡献。连续性强度  $\mu$  由 Bornemann 等人引入,用以保

持图像的边缘的连续性。 $\mu$ 可由结构张量求得,具体方法如下:

对于图像  $I$ ,其结构张量为一个  $2 \times 2$  的半正定矩阵,定义为

$$J_\rho(\nabla I_\sigma) = K_\rho * (\nabla I_\sigma \nabla I_\sigma^T), I_\sigma = K_\rho * I$$

其特征值为  $\lambda_1, \lambda_2$ , 并且满足  $0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2$ , 对应的特征向量为  $w_1$  和  $w_2$ , 对于秩为1的矩阵  $J_0(\nabla I_0) = \nabla I \nabla I^T$ ,  $\nabla I \neq 0$ , 那么有  $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = |\nabla I|^2, w_1 = \nabla^T I / |\nabla I|, w_2 = \nabla I / |\nabla I|$ , 所以, 得出连续性方向为

$$c = w_1 \quad (7)$$

$w_1$  为矩阵  $J_\rho(\nabla I_\sigma)$  较小特征值对应的归一化特征向量, 由上述得出的  $w_1$  方向可知, 连续性方向  $c$  为等照度线方向  $\nabla^T I_\sigma$  的一种平滑。

如果  $\lambda_1 \approx \lambda_2$ , 结构张量对应的特征向量的测定将会是病态的。事实上, 当  $\lambda_1 = \lambda_2$  时, 结构张量将变成单位矩阵与任意正交向量的乘积, 即特征向量可以是任意正交向量。那就意味着,  $w_1$  不再含有有用的信息, 即说明连续性强度很小。因此, 可以用下面的方法来确定连续性强度:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \lambda_1(x) = \lambda_2(x) \\ 1 + \kappa \exp\left(\frac{-\delta^4}{(\lambda_2(x) - \lambda_1(x))^2}\right) & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\delta$  表示量化的分辨率, 即相邻两灰度值的差值,  $\kappa$  为常系数。由上式可知,  $1 \leq \mu(x) \leq 1 + \kappa$ 。权函数  $w(p, q)$  (如式(5)所示) 取较大的  $\mu$  值(即较强的连续性强度), 可以保证沿着  $c$  方向具有较小的扩散强度, 而较小的  $\mu$  值(即较弱的连续性强度,  $\mu \approx 1$ ) 将产生非常大的扩散强度。因此, 在修复过程中, 应当自适应地获取  $\mu$  值以获得最佳效果。

## 2.2 置信度因子

FMM 算法在对图像进行修复时, 同等地对待原始的已知像素的点和修复后的已知像素点, 因为修复过程本身就是一个估计过程, 难免会有误差, 而再利用修复后的点对未知像素点进行插值, 势必会造成误差的积累。事实上, FMM 方法在修复时, 将所有的像素点视为两种类型, 即已知像素点和未知像素点, 如果将已知像素看做1, 未知像素为0, 修复过程中只存在1和0。由上面所述, 这种方法显然是不合理的, 将图像中的像素点看成3种类型, 即原始已知像素点, 修复之后已知像素点和未知像素点。

如图3所示, 设  $I$  为原始待修复图像,  $\Omega$  (实线圈内) 为待修复区域,  $\Omega'$  (虚线圈内) 为修复一段时

间之后尚未修复好的区域,  $\Omega - \Omega'$  为已经修复好的区域。 $\Omega$  与  $\Omega'$  的边界为即将被修复的窄带,  $p$  为窄带上的一点。

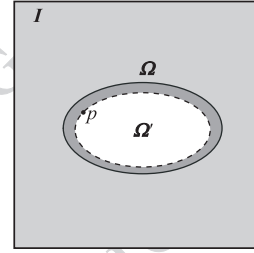


图3 3种类型像素点示意图  
Fig. 3 The three types of pixels

设  $I - \Omega$  区域, 即最原始的已知像素置信度为1;  $\Omega'$  区域, 即待修复区域内的置信度为0;  $\Omega - \Omega'$ , 即当前已修复好的区域, 置信度在  $0 \sim 1$  之间, 但是每一点的置信度不一定是相同的, 这取决于每一点在修复时, 所利用的点的来源。例如, 该区域中有一点  $Q$ , 在修复时利用了以  $\varepsilon$  为半径的邻域内的  $k$  个点, 那么该点的置信度为

$$P_Q = \frac{\lambda \sum_{i=1}^k P_i}{k} \quad (9)$$

式中,  $\lambda$  为置信度递减系数,  $P_i$  分别为这  $k$  个点的置信度, 计算方法同  $P_Q$ , 这样就是一个递归问题。

通过上式对使用到的点进行加权之后, 使得修复时更加信任最初的已知像素点, 给予最高的信任度, 这样就可以减小误差的积累。

## 2.3 修复步骤

通过以上分析, 带插值点的像素计算方法为

$$I(p) = \frac{\sum_{q \in B_\varepsilon(p)} w(p, q) I_q(p) P_q}{\sum_{q \in B_\varepsilon(p)} w(p, q)} \quad (10)$$

那么修复过程为:

### 1) 初始化

首先设定待修复区域边界  $\partial\Omega$  上和边界外的  $T$  值为0, 而边界内部设为一个非常大的值(实际中取  $10^6$ ), 并按照上述  $flag$  状态标准初始化所有像素的状态, 并初始化所有像素点的置信度(此时只有0和1两种)。设定置信度递减系数  $\lambda$ 。

### 2) 信息传播

- (1) 提取出窄带上  $T$  值最小的点  $p$ ;
- (2) 通过增加新像素点的方法将边缘  $\partial\Omega$  向  $\Omega$

内部行进;

- (3)修复点  $p$ , 并更新点  $p$  的置信度;
- (4)通过式(4)将  $p$  的  $T$  值传递给其临近点;
- (5)重复上述步骤,直到整幅图像修复完成(即所有的点都被标识为 KNOWN)。

图4为改进后的算法流程图。

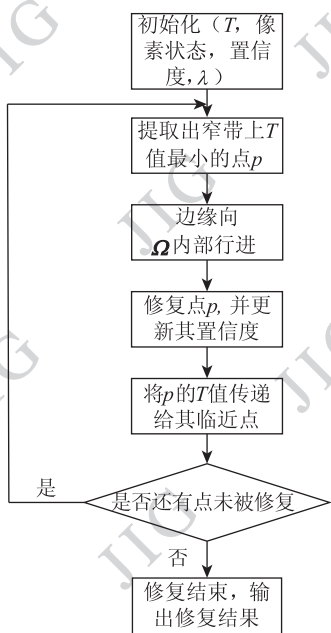


图4 算法流程图

Fig.4 Flow chart of the new algorithm

### 3 实验与分析

算法以 MatlabR2009 为平台,在 PC 机(Core(TM) Duo,1G 内存)上实现。实验中将以上算法与 FMM、BSCB 算法在修复效果和时间内作对比,由于快速算法主要用于小尺度缺损的图像修复,所以采用的实验图片也将采用划痕等破损方式作为仿真。而待修复图像则是在常见的 Lena 和 Pepper 图像上添加人工划痕得到。数字图像修复效果现阶段还没有一个统一的标准评价指标,本文采用图像恢复中常见的评价指标峰值信噪比(PSNR),即

$$PSNR = 10 \times \lg\left(\frac{255^2}{MSE}\right)$$

其中,MSE 是原图像与修复后的图像之间的均方误差,若设  $I_i$  为原图像的像素值, $J_i$  为修复后图像的像素值, $N$  表示图像的像素数,MSE 的计算方法为

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i - J_i)^2}{N}$$

PSNR 虽不是图像修复效果的标准评价指标,但是对于小尺度缺损的图像修复,是可以反映出修复效果的。

实验方法 将待修复图片分别使用 BSCB、FMM 和本文算法进行处理,BSCB 的迭代次数是逐渐增加的,直到其修复效果与本文算法相当时,统计其时间消耗。最后将本文算法与 BSCB、FMM 算法的修复效果和时间消耗统计于表 1。

从图 5 中可以看出,本文算法在边缘的保持上明显好于 FMM 算法。而对表 1 进行分析后,可以得出:在达到相同修复效果的前提下,本文算法所消耗的时间要远远少于 BSCB 算法;而与 FMM 算法相比,同样是单次修复,本文算法的修复效果明显优于前者,虽然本文的时间消耗略多于 FMM 算法,但处于同一量级。因此,综合修复效果,本文算法优于 FMM 算法。

### 4 结论

基于偏微分方程修复算法运行速度较慢,而 Telea 的快速行进法修复时可能造成区域的模糊并且对边缘信息保持不佳。针对这一问题,本文提出了一种新的快速算法,在设计权函数时引入连续性强度,同时采用含有并引入置信度因子对插值点进行加权。并引入置信度因子对插值点进行加权。实验结果表明,该算法在保证修复效率的同时,很好地提高了修复效果,达到了“快速有效”的修复目的。

表 1 3 种算法的修复结果对比

Table 1 Comparison of inpainting results of the three methods

实验图片	BSCB 算法		FMM 算法		本文算法	
	PSNR	时间消耗/s	PSNR	时间消耗/s	PSNR	时间消耗/s
Baboon	45.03	204.78(1 000 次)	39.81	2.61	44.75	4.68
Pepper	45.66	215.22(1 100 次)	38.13	2.69	45.16	5.11

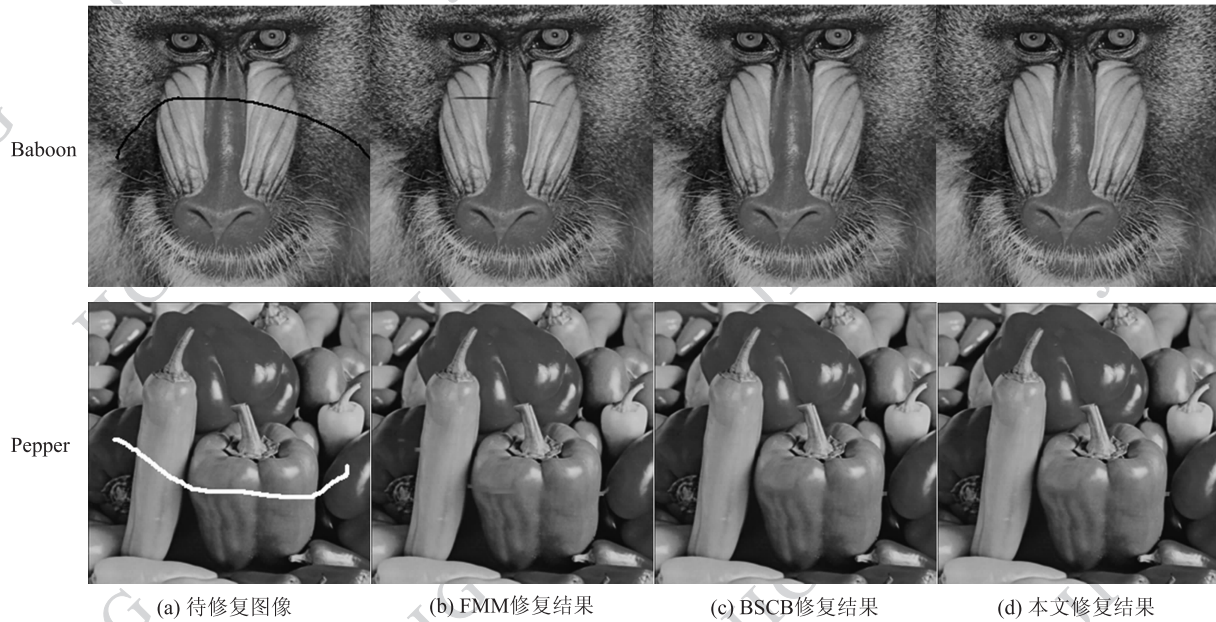


图 5 3 种算法修复结果

Fig. 5 Inpainting results of the three methods

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V, et al. Image inpainting [ C ]// Proceedings of SIGGRAPH. New York, NY, USA: ACM Press, 2000:417-424.
- [ 2 ] Chan T, Shen J. Mathematical models for local nontexture inpaintings [ J ]. SIAM J. APPL. Math, 2001, 62 ( 3 ) : 1019-1043.
- [ 3 ] Chan T, Kang S, Shen J. Euler's Elastica and Curvature-Based Inpainting [ J ]. SIAM J. APPL. Math. 2002, 63 ( 2 ) : 564-592.
- [ 4 ] Criminisi A, Pérez P, Toyama K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting [ J ]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13 ( 9 ) : 1200-1212.
- [ 5 ] Drori I, Cohen-Or D, Yeshurun H. Fragment-based image completion [ J ]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22 ( 3 ) : 303-312.
- [ 6 ] W J Y, Ruan Q Q. Object removal by cross isophotes exemplar-based inpainting [ C ]// Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition. Hong Kong, China: IEEE Computer Society, 2006, 3:810-813.
- [ 7 ] Telea A. An image inpainting technique based on fast marching method [ J ]. Graph Tools, 2004, 9 ( 1 ) : 23-34.
- [ 8 ] Oliveira M M, Bowen B, McKenna R, et al. Fast digital image inpainting [ C ]// Proceedings of International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing. Marbella, Spain: ACTA Press, 2001:261-266.
- [ 9 ] Wei L Y, Marc Levoy. Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization [ C ]// Proceedings of Siggraph. New York, NY, USA: ACM Press, 2000:479-488.
- [ 10 ] Xu J, Feng D M, Wu J, et al. An image inpainting technique based on 8-neighborhood fast sweeping method [ C ]// Proceedings of 2009 WRI International Conference on Communications and Mobile Computing. Yunnan: IEEE Computer Society, 2009:626-630.
- [ 11 ] Huan X L, Murali B, Ali A L. Image restoration based on the fast marching method and block based sampling [ J ]. Computer Vision and Image Understanding, 2010, 114 ( 8 ) : 847-856.
- [ 12 ] Hou Z X, He Y Q, Xu W. A fast algorithm of image inpainting [ J ]. Journal of image and graphics, 2007, 12 ( 10 ) : 1909-1912. [ 侯正信, 何宇清, 许微. 一种快速的图像修复算法 [ J ]. 中国图象图形学报, 2007, 12 ( 10 ) : 1909-1912. ]
- [ 13 ] Raymond H C, Wen Y W, Andy M. A fast optimization transfer algorithm for image inpainting in wavelet domains [ J ]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18 ( 7 ) : 1467-1476.
- [ 14 ] Wei S H, Zhang R R, Hao P Y et al. A fast texture matching algorithm based on multi-resolution and partition [ C ]// Proceedings of 2009 Fifth International Joint Conference on INC, IMS and IDC. Seoul, Korea: IEEE Computer Society, 2009: 1240-1245.
- [ 15 ] Peng K Y, Dong L F. A fast image inpainting algorithm based on average G ray value [ J ]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15 ( 1 ) : 50-55. [ 彭坤杨, 董兰芳. 一种基于图像平均灰度值的快速图像修复算法 [ J ]. 中国图象图形学报, 2010, 15 ( 1 ) : 50-55. ]