

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2012 **6**  
Vol.17 No.

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6月 第17卷 第6期(总第194期)

## 目次

### 综述

人脸图像的年龄估计技术研究 ..... 王先梅, 梁玲燕, 王志良, 胡四泉(603)

图像统计模型参数估计中的期望最大值算法 ..... 李旭超(619)

### 图像处理和编码

鲁棒的梯度驱动图像修复算法 ..... 叶学义, 王靖, 赵知劲, 陈华华(630)

快速去块效应的线性规划方法 ..... 金剑秋, 刘春晓, 王勋, 章志勇(636)

DWT-SVD 域全盲自嵌入鲁棒量化水印算法 ..... 叶天语(644)

Mean-shift 滤波和直方图增强的图像弱边缘提取 ..... 冀峰, 高新波, 谢松云(651)

### 图像分析和识别

梯度点对约束的结构化车道检测 ..... 王永忠, 王晓云, 文成林(657)

多水平外区抑制的轮廓检测 ..... 闫超, 张建州(664)

基于局部投影与块 LBP 特征的图像检索 ..... 邹彬, 潘志斌, 胡森(671)

### 图像理解和计算机视觉

视觉陌生度驱动的增量自主式视觉学习算法 ..... 瞿心昱, 姚明海, 顾勤龙(678)

霍夫空间中多足球机器人协作目标定位算法 ..... 许家铭, 解仑, 王志良, 倪善超(687)

### 计算机图形学

虚拟 CCD 线阵星载光学传感器内视场拼接 ..... 张过, 刘斌, 江万寿(696)

“第八届数字电视与无线多媒体通信国际论坛”会议专栏

追踪盗版者的抗共谋数字指纹 ..... 李晓强, 张煌, 赵洋洋, 汪晶晶(702)

LBP 与鉴别模式结合的热红外人脸识别 ..... 谢志华, 伍世虔, 方志军(707)

电影中复杂事件的检索与识别 ..... 杜吉祥, 郭一兰, 翟传敏(712)

方向特征和网格特征融合的离线签名鉴别 ..... 杨丹凤, 吕岳(717)

视觉关注度的立体图像质量评价 ..... 张艳, 安平, 张秋闻, 张兆杨(722)

低开销的异构数据交换 ..... 赵凯, 赵正德(726)

灵活的多视点视频编码预测结构 ..... 张艳, 蔡灿辉(730)

跨层反馈在无线视频自适应编码中的应用 ..... 王垚中, 郑世宝, 张重阳, 刘勃(736)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 6 期

2012 年 6 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:010-64807995 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

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 6 June 2012

## Contents

### Review

- Age estimation by facial image: a survey ..... Wang Xianmei, Liang Lingyan, Wang Zhiliang, Hu Siqian(603)  
Expectation maximization method for parameter estimation of image statistical model ..... Li Xuchao(619)

### Image Processing and Coding

- Robust gradient driving image inpainting method ..... Ye Xueyi, Wang Jing, Zhao Zhijing, Chen Huahua(630)  
Fast image de-blocking by linear programming ..... Jin Jianqiu, Liu Chunxiao, Wang Xun, Zhang Zhiyong(636)  
Perfectly blind self-embedding robust quantization-based watermarking scheme in DWT-SVD domain ..... Ye Tianyu(644)  
Weak edge detection using Mean-shift filtering and histogram enhancement ..... Ji Feng, Gao Xinbo, Xie Songyun(651)

### Image Analysis and Recognition

- Gradient-pair constraint for structure lane detection ..... Wang Yongzhong, Wang Xiaoyun, Wen Chenglin(657)  
Contour detection based on multilevel inhibition ..... Yan Chao, Zhang Jianzhou(664)  
Image retrieval method based on local projection and block LBP feature ..... Zou Bin, Pan Zhibin, Hu Sen(671)

### Image Understanding and Computer Vision

- Visual novelty driven incremental and autonomous visual learning algorithm ..... Qu Xinyu, Yao Minghai, Gu Qinlong(678)  
Target localization algorithm for cooperative multi-soccer robots based on Hough space .....  
..... Xu Jiaming, Xie Lun, Wang Zhiliang, Ni Shanchao(687)

### Computer Graphics

- Inner FOV stitching algorithm of spaceborne optical sensor based on the virtual CCD line .....  
..... Zhang Guo, Liu Bin, Jiang Wangshou(696)

### Special Issue of the IFIC' 2011

- Anti-collusion fingerprinting scheme capable of tracing pirate ..... Li Xiaoqiang, Zhang Huang, Zhao Yangyang, Wang Jingjing(702)  
Infrared face recognition using LBP and discrimination patterns ..... Xie Zhihua, Wu Shiqian, Fang Zhijun(707)  
Recognize and retrieval complex events in real movies ..... Du Jixiang, Guo Yilan, Zhai Chuanmin(712)  
Off-line signature verification based on combination of direction feature and grid feature ..... Yang Danfeng, Lv Yue(717)  
Stereo image quality assessment based on visual attention ..... Zhang Yan, An Ping, Zhang Qiuwen, Zhang Zhaoyang(722)  
Low overhead of heterogeneous data exchange ..... Zhao Kai, Zhao Zhengde(726)  
Flexible prediction structure for multi-view video coding ..... Zhang Yan, Cai Canhui(730)  
Cross-layer feedback based adaptive coding for wireless video transmission .....  
..... Wang Yaozhong, Zheng Shibao, Zhang Chongyang, Liu Bo(736)

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)06-0630-06

论文引用格式: 叶学义, 王靖, 赵知劲, 陈华华. 鲁棒的梯度驱动图像修复算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(6): 630-635.

## 鲁棒的梯度驱动图像修复算法

叶学义, 王靖, 赵知劲, 陈华华

杭州电子科技大学通信工程学院, 杭州 310018

**摘要:** 数字图像形态特征的修复目前主要采用基于梯度驱动的偏微分方程(PDE)作为计算模型。虽然该类模型对较大区域的形态特征修复具有明显优势,但是修复过程中信息传播方向不确定使得它对修复对象具有选择性。在分析该类模型在图像修复中的计算本质和对应物理意义的基础上,结合典型仿真实验,认为保持信息传播方向始终指向待修复区域之外对修复结果具有决定性影响,并由此提出一种梯度驱动图像修复的新算法。实验结果表明,该算法能够保持信息传播方向的稳定,使得修复具有更强的鲁棒性。

**关键词:** 数字图像修复;偏微分方程;梯度驱动;信息传播方向

### Robust gradient driving image inpainting method

Ye Xueyi, Wang Jing, Zhao Zhijing, Chen Huahua

College of communication engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

**Abstract:** Gradient-driven PDEs (partial differential equations) are the main computing pattern for geometric inpainting models of digital images. Apparently, compared with previous models, gradient-driven computing models have a great advantage to the large-scale regions geometric inpainting, but its performances are not stable to different inpainted objects because the information propagating direction is uncertain in the inpainting process. Based on analyzing the computing essences and the corresponding physical meanings of gradient-driven models, it is decisive to the inpainting result that the information propagating direction always points to the outside of the inpainted regions. Thus, a new method of gradient-driven image inpainting is proposed. Experimental results prove that the method can stabilize the information propagating direction making its inpainting performance is more robust.

**Key words:** image restoration; partial differential equations; gradient driving; information propagating direction

## 0 引言

早期图像修复源自对美术作品中出现的裂缝进行修复的行为<sup>[1-3]</sup>。现在一般认为,待修复图像进行修复,以使得那些并不知道原始图像的人看不出最终的图像是经过修复的结果。图像修复从最初用于修补破损图像和文物保护<sup>[4]</sup>,发展到去除或者增加

图像中的特定目标<sup>[5-6]</sup>等,并随着数字图像修复技术<sup>[7]</sup>的研究,深入到越来越多的应用领域中,尤其是图像重建和信息安全领域。

数字图像修复以一种不易察觉的方式修改图像,由计算机自动对图像的待修复区域进行修复<sup>[1]</sup>。现有的数字图像修复一般可以分为两类:一类是基于几何特征的图像修复(Inpainting<sup>[7]</sup>),另一类是基于纹理合成<sup>[8-9]</sup>的图像修复(Completion<sup>[7]</sup>)。

收稿日期:2011-03-30;修回日期:2011-11-08

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(60802047,60702018);浙江省科技计划重点项目(2008C21092);浙江省自然科学基金项目(R1090138)

第一作者简介:叶学义(1973—),男,副教授,2006年于中国科学技术大学获信号与信息处理专业博士学位。主要研究方向图像处理、模式识别、信息隐藏,已发表论文30余篇,国家授权专利8项。E-mail: xueyiye@hdu.edu.cn

Inpainting 是图像修复领域的研究热点,目前 Inpainting 研究的主要代表算法有: Bertalmio 等人提出的 BSCB 模型<sup>[10]</sup>; Chan 等人提出的全变分修复算法(TV 模型)<sup>[11]</sup>; 曲率驱动扩散修复算法(CDD 模型)<sup>[12]</sup>。从人的视觉角度,数字图像的本质是组成图像的每个像素与其邻域像素值的不同(变化)。因此,虽然上述几种主要的 Inpainting 模型各不相同,但是最终都试图利用像素值的变化所提供的信息来恢复缺失的像素值,从而归结于偏微分方程(PDE)来描述和实现。这几种 Inpainting 算法模型都具有各自的特色和优势,但同时又存在不同程度的缺陷:例如 BSCB 模型的稳定性不好,而且对于大面积的修复效果不理想;TV 模型在较大区域修复的连通性不是很好;CDD 模型没有良好的收敛性,而且对其原因缺乏具体的数学分析和讨论。

本文着眼于梯度驱动的图像修复的计算本质和相应的物理意义,从修复计算的驱动核的角度分析和探讨梯度驱动的计算模型。由于梯度驱动的 PDE 模型<sup>[1]</sup>是 Inpainting 的新近研究成果,是 Bertalmio 在 BSCB 模型的基础上提出的改进模型。它采用信息传播的方法来达到修复图像的目的,其信息传播的过程利用 2 维 PDE 来描述,通过方程求解来完成修复。该模型保留了修复结果的形态特征连续性<sup>[13]</sup>好的特点,并可以修复较大区域,同时具有更加出色的修复效果。但该模型由于信息传播方向的不确定导致对于修复对象具有选择性,对于特定类型的图像(特别是垂直旋转之后的图像)修复效果较差,进而探讨其原因并提出一种新的梯度驱动的修复算法。仿真实验结果表明新算法能够保持信息传播方向的稳定,使算法在图像修复中具有更强的鲁棒性。

### 1 梯度驱动的 PDE 图像修复

假设待修复区域仅包含一个像素  $x_0$ ,如图 1 中所示的白色像素,定义其梯度为  $\nabla I(x_0)$ 。对比 Caselles 等人<sup>[14]</sup>, Bertalmio 等人<sup>[1]</sup>提出的算法认为应该选择  $x_0$  像素的梯度  $\nabla I(x_0)$  为  $x_0$  所在等高线上相邻像素点的梯度的平均,可得

$$\nabla I(x_0) = (DI(x_0 + h \nabla^\perp I) + DI(x_0 - h \nabla^\perp I))/2 \quad (1)$$

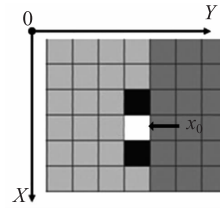


图1 像素修复示意图

Fig.1 Schematic diagram of inpainting

式中,  $\nabla^\perp I$  表示梯度  $\nabla I$  逆时针旋转  $90^\circ$  后的矢量, 泰勒系数  $h$  一般取为 1。这种选择有利于等高线的平滑延伸,在修复时增强几何特征的连通性。式(1)实际上包含两个分量,如式(2)所示,分别表示梯度在 X 和 Y 方向的分量。

$$\begin{cases} D_x I(x_0) = (D_x I(x_0 + h \nabla^\perp I) + D_x I(x_0 - h \nabla^\perp I))/2 \\ D_y I(x_0) = (D_y I(x_0 + h \nabla^\perp I) + D_y I(x_0 - h \nabla^\perp I))/2 \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)中  $D_x I(x_0)$  的  $D_x I(x_0 + h \nabla^\perp I)$  以及  $D_x I(x_0 - h \nabla^\perp I)$  作 2 阶泰勒展开得

$$\begin{cases} D_x I(x_0 + h \nabla^\perp I) = D_x I(x_0) + h(-I_y I_{xx} + I_x I_{xy}) + \frac{h^2}{2}(I_y^2 I_{xxx} - 2I_x I_y I_{xxy} + I_x^2 I_{yyx}) + O(h^3) \\ D_x I(x_0 - h \nabla^\perp I) = D_x I(x_0) - h(-I_y I_{xx} + I_x I_{xy}) + \frac{h^2}{2}(I_y^2 I_{xxx} - 2I_x I_y I_{xxy} + I_x^2 I_{yyx}) + O(h^3) \end{cases} \quad (3)$$

同理将  $D_y I(x_0 + h \nabla^\perp I)$  和  $D_y I(x_0 - h \nabla^\perp I)$  展开,均代入式(1)可得

$$\begin{aligned} D^3 I(\nabla^\perp I, \nabla^\perp I, \nabla^\perp I) &= I_y^2(-I_y I_{xxx} + 3I_x I_{xxy}) - \\ &I_x^2(-I_x I_{yyy} + 3I_y I_{yyx}) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

又因为

$$\begin{aligned} D^3 I(\nabla^\perp I, \nabla^\perp I, \nabla^\perp I) &= D(k|\nabla I|^3) \cdot \nabla^\perp I = \\ &< D(k|\nabla I|^3), \nabla^\perp I > \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $\cdot$  表示内积,  $k$  表示  $x_0$  像素所在等高线的曲率。式(5)为  $k|\nabla I|^3$  在  $\nabla^\perp I$  方向上的方向导数,  $D$  表示偏微分算子,因此可得

$$D(k|\nabla I|^3) \cdot \nabla^\perp I = \frac{\partial(k|\nabla I|^3)}{\partial(\nabla^\perp I)} \quad (6)$$

表示信息沿着等高线梯度逆时针旋转  $90^\circ$  方向传播。

当式(6)为 0 时,表示在等高线切线方向上的

有效信息为0,即图像修复完成。此时式(5)(6)为0,等价于式(1)成立。因此基于这种驱动模型的图像修复,其迭代差异因子 $I_t$ 等于 $D^3I(\nabla^\perp I, \nabla^\perp I, \nabla^\perp I)$ ,当修复完成时,式(7)成立。

$$I_t = D^3I(\nabla^\perp I, \nabla^\perp I, \nabla^\perp I) = 0 \quad (7)$$

式中,迭代差异因子 $I_t$ 表示像素在 $t$ 时刻的迭代值。将式(7)中 $\nabla^\perp I$ 单位化为 $\frac{\nabla^\perp I}{|\nabla^\perp I|}$ ,就可以得到类似BSCB模型的演化原型

$$I_t = \frac{I_y^2(-I_y I_{xxx} + 3I_x I_{xxy}) - I_x^2(-I_x I_{yyy} + 3I_y I_{yyx})}{(I_x^2 + I_y^2)^{3/2}} \quad (8)$$

继续对式(7)推论,可得

$$\begin{aligned} D^3I(\nabla^\perp I, \nabla^\perp I, \nabla^\perp I) = 0 &\Leftrightarrow \\ -D^3I(\nabla^\perp I, \nabla^\perp I, \nabla^\perp I) = 0 &\quad (9) \\ -D^3I(\nabla^\perp I, \nabla^\perp I, \nabla^\perp I) = & \end{aligned}$$

$$D(k|\nabla I|^3) \cdot \nabla^\vee I = \frac{\partial(k|\nabla I|^3)}{\partial(\nabla^\vee I)} \quad (10)$$

式中, $\nabla^\vee I = -\nabla^\perp I$ ,表示梯度 $\nabla I$ 顺时针旋转 $90^\circ$ 后的矢量 $(I_y, -I_x)$ 。此时,取迭代差异因子 $I_t$ 等于 $-D^3I(\nabla^\perp I, \nabla^\perp I, \nabla^\perp I)$ ,同理可得式(11)。表示信息的传播方向与式(8)正好相反。

$$I_t = \frac{-I_y^2(-I_y I_{xxx} + 3I_x I_{xxy}) + I_x^2(-I_x I_{yyy} + 3I_y I_{yyx})}{(I_x^2 + I_y^2)^{3/2}} \quad (11)$$

若取式(8)中的前面部分(即信息沿 $\nabla^\perp I$ 方向传播中的 $X$ 方向分量)与式(11)中的后部分(即信息沿 $\nabla^\vee I$ 方向传播中的 $Y$ 方向分量)相结合,定义迭代差异因子 $I_t$ ,见式(12),如文献[1]中所示,其理由和对应的物理意义在文献中并未解释。

$$I_t = \frac{I_y^2(-I_y I_{xxx} + 3I_x I_{xxy}) + I_x^2(-I_x I_{yyy} + 3I_y I_{yyx})}{(I_x^2 + I_y^2)^{3/2}} \quad (12)$$

由此可得其修复方程

$$I^{n+1}(x_0) = I^n(x_0) + \Delta t \cdot I_t^n \quad (13)$$

式中, $I_t^n$ 是第 $n$ 步迭代中的 $I_t$ 的值, $\Delta t$ 就是每步迭代的时间步长。通过迭代方程来逐渐改变待修复区域里的每个像素值,使之达到修复的效果。

这种基于梯度驱动的修复模型直接利用图像中像素之间的差异导致的梯度信息,即由标量场转化为矢量场来考虑图像修复问题,改善了在修复时对于图像几何特征连通的方向性的考虑,使得即使修复较大区域时,图像中几何特征的连通性也表现得

更加出色。但是文献[1]中的算法,即选择式(12)作为迭代差异因子,在修复时不能保持信息传播方向的稳定,导致利用该算法修复图像对于修复对象具有选择性。

## 2 梯度驱动的PDE修复模型

如前文所述,基于梯度驱动的修复模型,其修复驱动核为式(8)和式(11),由此确定迭代差异因子 $I_t$ ,即 $D(k|\nabla I|^3)$ 与一个方向 $\nabla^\perp I$ (或 $\nabla^\vee I$ )的内积,当该内积为0时,修复结束。

那么,若定义 $\nabla^\wedge I$ 为一个任意方向,令 $\nabla^\wedge I = (u, v)$ , $u$ 为 $\nabla^\wedge I$ 的 $X$ 方向分量, $v$ 为 $\nabla^\wedge I$ 的 $Y$ 方向分量。当取迭代差异因子 $I_t$ 为 $k|\nabla I|^3$ 沿 $\nabla^\wedge I$ 的方向导数时,有

$$I_t = D(k|\nabla I|^3) \cdot \nabla^\wedge I = \frac{\partial(k|\nabla I|^3)}{\partial(\nabla^\wedge I)} \quad (14)$$

若取 $\nabla^\wedge I = \nabla^\perp I = (-I_y, I_x)$ ,则可得式(8);若取 $\nabla^\wedge I = \nabla^\vee I = (I_y, -I_x)$ ,则可得式(11);若取 $\nabla^\wedge I = (-I_y, -I_x)$ ,则可得式(12)<sup>[1]</sup>。

在这种梯度驱动的PDE模型中, $\nabla^\wedge I$ 决定了信息的传播方向,对于修复结果的影响至关重要。下面从一个典型的几何特征待修复图像示意图来说明,如图2所示。图中 $\Omega$ 表示待修复区域, $O$ 表示待修复区域之外的区域, $\partial\Omega$ 即待修复区域的边界。

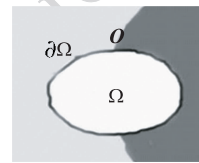


图2 待修复图像示意图

Fig. 2 Schematic diagram of image in need of restoration

根据以上的分析,区域 $O$ 中的信息对修复起到的作用是至关重要的。当修复完成时的状态,可以在数学上表述为

$$D(k|\nabla I|^3) \cdot \nabla^\wedge I = 0 \quad (15)$$

式(15)可以理解为已知区域的信息 $D(k|\nabla I|^3)$ 都沿着 $\nabla^\wedge I$ 方向传播结束,这显然是针对修复区域外而言。在信息传播过程中,方向 $\nabla^\wedge I$ 可以指向修复区域内,也可以指向修复区域外。取边界 $\partial\Omega$ 上一点 $x_0$ 为例,若 $\nabla^\wedge I$ 方向是朝 $\Omega$ 内, $x_0$ 朝 $\nabla^\wedge I$ 方向上的那个点为 $\Omega$ 内的 $x_1$ 点,只要 $x_0$ 点的 $k|\nabla I|^3$ 值和

$x_1$  点的  $k|\nabla I|^3$  值相同,则  $D(k|\nabla I|^3) \cdot \nabla^{\Delta} I = 0(x_0 \rightarrow x_1)$ , 但  $x_1$  点是伪信息,此时达到的稳定状态是虚假的;若  $\nabla^{\Delta} I$  方向朝向区域  $\Omega$  外,此时方向导数  $D(k|\nabla I|^3) \cdot \nabla^{\Delta} I$  体现的就是  $x_0$  点和  $\nabla^{\Delta} I$  方向上的点(在已知区域内)的差异性,当式(15)成立时,真实信息的传播达到稳定状态。

由此可知,在修复过程中,信息传播方向  $\nabla^{\Delta} I$  如果能够始终指向待修复区域外,修复效果会更理想;反之,则会影响修复的效果。文献[1]的算法,即式(12),在梯度  $\nabla I$  确定的情况下,其信息传播方向  $\nabla^{\Delta} I$  也就确定了,在  $\nabla I$  朝向不同象限区域时,  $\nabla^{\Delta} I$  可能与  $\nabla I$  朝向同一个象限区域,如图 3(b),有可能朝向不同的象限区域,如图 3(c)。而  $\nabla I$  在不同的图像待修复区域中也有着不同的朝向,也许朝向待修复区域之外,也许朝向待修复区域之内,由此导致  $\nabla^{\Delta} I$  不能够始终指向待修复区域之外,如图 3 所示。

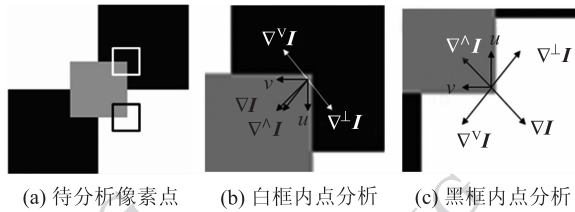


图3 修复时方向  $\nabla^{\Delta} I$  示意图

Fig.3 Schematic diagram of  $\nabla^{\Delta} I$

图 3(a) 是典型的几何特征图像修复的示意图,图中灰色区域为待修复区域,其他为已知区域;分别计算其中白色方框和黑色方框所示区域的边界点在修复时  $\nabla^{\Delta} I$  的示意图,可得图 3(b)(c),因为  $\nabla I = (I_x, I_y)$ , 又取  $\nabla^{\Delta} I = (-I_y, -I_x)$ , 所以根据文献[1]的算法,在修复如图 3(b)(c) 所示的区域时,  $\nabla^{\Delta} I$  将指向待修复区域内。但是,若将图 3(a) 逆时针或者顺时针旋转  $90^\circ$  后,在修复相同区域时,  $\nabla^{\Delta} I$  又会指向待修复区域外。因此,由于驱动核中  $\nabla^{\Delta} I$  不能始终指向待修复区域外,导致文献[1]的算法在修复时对于特定角度具有选择性。

但是若取  $\nabla^{\Delta} I = (I_y, I_x)$ , 根据修复驱动核式(8)(11),取式(8)中的后面部分(即信息沿  $\nabla^{\Delta} I$  方向传播中的 Y 方向分量)与式(11)中的前部分(即信息沿  $\nabla^{\Delta} I$  方向传播中的 X 方向分量)相结合,即  $u = I_y, v = I_x$  时,可得新的梯度驱动图像修复算法,新算法迭代差异因子为

$$I_t = D(k|\nabla I|^3) \cdot \nabla^{\Delta} I = \frac{-I_y^2(-I_x I_{xxx} + 3I_x I_{xxy}) - I_x^2(-I_x I_{yyy} + 3I_y I_{yyx})}{(I_x^2 + I_y^2)^{3/2}} \tag{16}$$

此时,无论如何旋转图 3(a),都可以保证驱动核中  $\nabla^{\Delta} I$  始终指向待修复区域外,因此如式(16)定义的迭代差异因子  $I_t$ , 带入文献[1]的修复算法中,应当获得更加理想的修复效果。下面以上述分析和结论针对几何特征修复的典型实验的结果来加以验证和讨论。

### 3 仿真实验及分析

文献[1]中的迭代差异因子和迭代修复方程如式(12)(13)所示,在数值计算中引入中心差分斜率限制因子 minmod 函数<sup>[1]</sup>,在一定程度上保证了算法的稳定性,具体细节可以参见文献[1]。且在修复过程中每进行 15 次迭代计算后就进行 2 次各向异性扩散计算,具体细节详见文献[1]。

文献[1]算法对图像的几何特征修复有较为理想的效果,满足连接性准则,并使边缘的传播不会出现如 TV 模型那样的“直线效应”,但同时也验证了本文的分析结论,文献[1]的修复算法对于几何特征的修复对象具有选择性。如果修复过程中信息传播方向不能始终朝向待修复区域之外,修复效果就不理想。如图 4 所示。

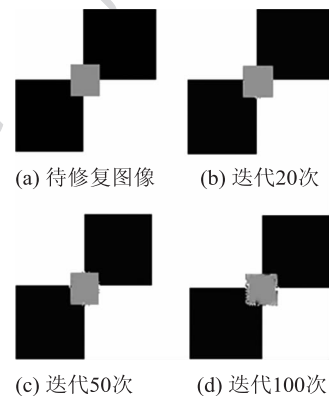


图4 文献[1]算法对图 4(a) 的修复示意图

Fig.4 Schematic diagram of inpainting to Fig.4(a) with algorithm of the reference[1]

从图 4 中可以看出,修复效果都很差。同样对于图 4(a),即图 5(a),若取  $\nabla^{\Delta} I = (I_y, I_x)$ , 采用本文新算法,以式(16)为迭代差异因子,其余采用和

文献[1]相同的方式,新算法的修复结果如图 5 所示,获得了满意的修复结果。

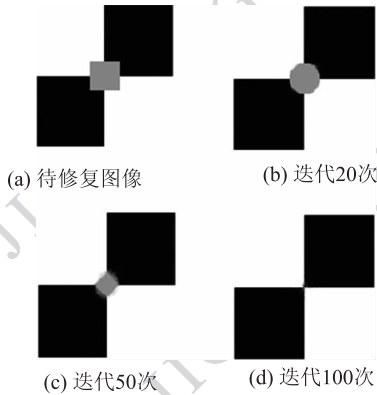


图 5 本文算法对图 5(a)的修复示意图

Fig. 5 Schematic diagram of inpainting to Fig. 5(a) with the new algorithm

其原因在于,按照与图 3 相同的分析方法,当取  $\nabla^{\wedge}I = (I_y, I_x)$  时,在修复过程中待修复区域边界  $\partial\Omega$  上每点的  $\nabla^{\wedge}I$  方向均指向待修复区域之外,如图 6 所示。

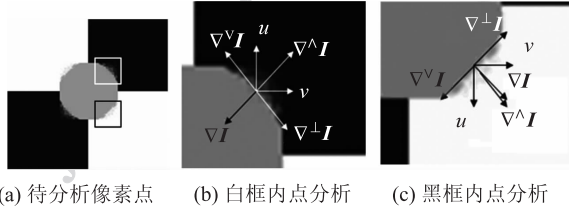


图 6 图 5(a)修复过程中待修复区域边界上  $\nabla^{\wedge}I$  的示意图

Fig. 6 Schematic diagram of  $\nabla^{\wedge}I$  at boundary of inpainted regions of Fig. 5(a)

对于另一种几何特征修复的典型实验,文献[1]的算法表现出相同的结果,而新算法弥补了原算法的不足,如图 7 所示。从该修复结果可以看出,通过新算法可获得较为满意的修复结果。



图 7 修复结果对比示意图

Fig. 7 Comparison of results

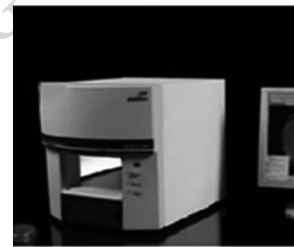
对实际图像的修复实验结果如图 8 所示。图 8(a)

所示的实物图中包含两种待修复区域:几何特征区域(图中的白色圆形部分)和字符干扰区域(图中的白色字母)。从图 8(b)(c)可以看出,文献[1]算法和本文新算法均可以理想地去掉干扰字符;但是对于几何特征区域的修复结果截然不同,新算法效果比原算法更加的理想。



(a) 待修复图像

(b) 文献[1]算法



(c) 本文算法

图 8 实际图像的修复对比

Fig. 8 Comparison of inpainting results of real image

图 9 是利用本文新算法对大区域缺失的实际图像进行修复的实验结果。从图 9 可以看出本文新算法能有效地进行大区域缺失的修复。



(a) 待修复图像

(b) 本文算法

图 9 本文算法对实际图像的修复

Fig. 9 Inpainting of real image with our algorithm

图 10 是利用本文新算法去除图像中主观上不想要的文字的实验结果。即新算法修复结果,获得了满意的效果。

以上的实验结果充分表明,对于几何特征的修复,信息传播方向是否指向待修复区域之外,对于修复结果起决定作用。而本文算法能够保持信息传播方向始终朝向待修复区域之外,使修复结果更加理想。



(a) 待修复图像

(b) 本文算法

图10 本文算法对文字去除效果

Fig. 10 Effect of removal of texts with our algorithm

## 4 结 论

虽然基于梯度驱动的偏微分方程是数字图像形态特征的修复主要采用的计算模型,但该类模型在修复过程中信息传播方向不确定使得它对于修复对象具有选择性。本文在分析该类模型在图像修复中的计算本质和对应物理意义的基础上,结合典型仿真实验认为保持信息传播方向始终指向待修复区域之外对修复结果具有决定性影响。这对于数字图像修复的后续研究具有参考价值。最后针对目前该类修复模式的一种最具代表性算法的不足进行了分析并提出一种梯度驱动的图像修复新算法。实验结果表明该算法能够保持信息传播方向的稳定,使得修复具有更强的鲁棒性。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Bertalmio M. Strong-continuation, contrast-invariant inpainting with a third-order optimal PDE [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(7): 1934-1038.
- [ 2 ] Shih T K, Chang R C. Digital inpainting-survey and multilayer image inpainting algorithm [C]// Proceedings of the Third International Conference on Information Technology and Applications. Taiwan, Taipei: University of Tamkang, 2005: 15-24.
- [ 3 ] Shih T K, Chang R CH, Chen L, et al. Multi-layer inpainting on Chinese artwork restoration application [C]//Proceedings of

IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Taiwan, Tamsui: University of Tamkang, 2004: 21-24.

- [ 4 ] Liu J M, Lu D M. Image inpainting via weighted optimization [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(4): 528-532. [刘建明,鲁东明. 采用加权优化的图像修复 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(4): 528-532.]
- [ 5 ] Patwardhan K A, Sapiro G, Bertalmio M. Video inpainting of occluding and occluded objects [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Minneapolis, MN, USA: University of Minnesota, 2005: 69-72.
- [ 6 ] Wang J F, Hsu H J, Liao S C. A novel framework for object removal from digital photograph [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Taiwan, Tainan, China: University of Cheng Kung, 2005: 73-76.
- [ 7 ] Zhang H Y, Peng Q C. A survey on digital image inpainting [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(1): 1-10. [张红英,彭启琮. 数字图像修复技术综述 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(1): 1-10.]
- [ 8 ] Sarawut T, Akinori N. Exemplar-based image inpainting with patch shifting scheme [C]//Proceedings of IEEE International Conferences on Digital Signal Processing. Tokyo, Japan: Tokyo Inst. of Technol, 2011:1-5.
- [ 9 ] Bugeau A, Bertalmio M, Caselles V, et al. A comprehensive framework for image inpainting [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(10): 2634-2645.
- [ 10 ] Bertalmio M, Vese L, Sapiro G, et al. Image inpainting [C]// Proceedings of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New Orleans, Louisiana, USA: SIGGRAPH ACM, 2000: 417-424.
- [ 11 ] Chan T F, Shen J H. Mathematical models for local non-texture inpainting [J]. SIAM Journal of Applied Mathematics, 2001, 62(3): 1019-1043.
- [ 12 ] Chan T F, Shen J H. Non-texture inpainting by curvature-driven diffusion (CDD) [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2001, 12(4): 436-449.
- [ 13 ] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7): 629-639.
- [ 14 ] Caselles V, Morel J, Sbert C. An axiomatic approach to image interpolation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(3): 376-386.
- [ 15 ] Leer B V. Towards the ultimate conservative difference scheme [J]. Journal of Computational Physics, 1997, 135(2): 229-248.