



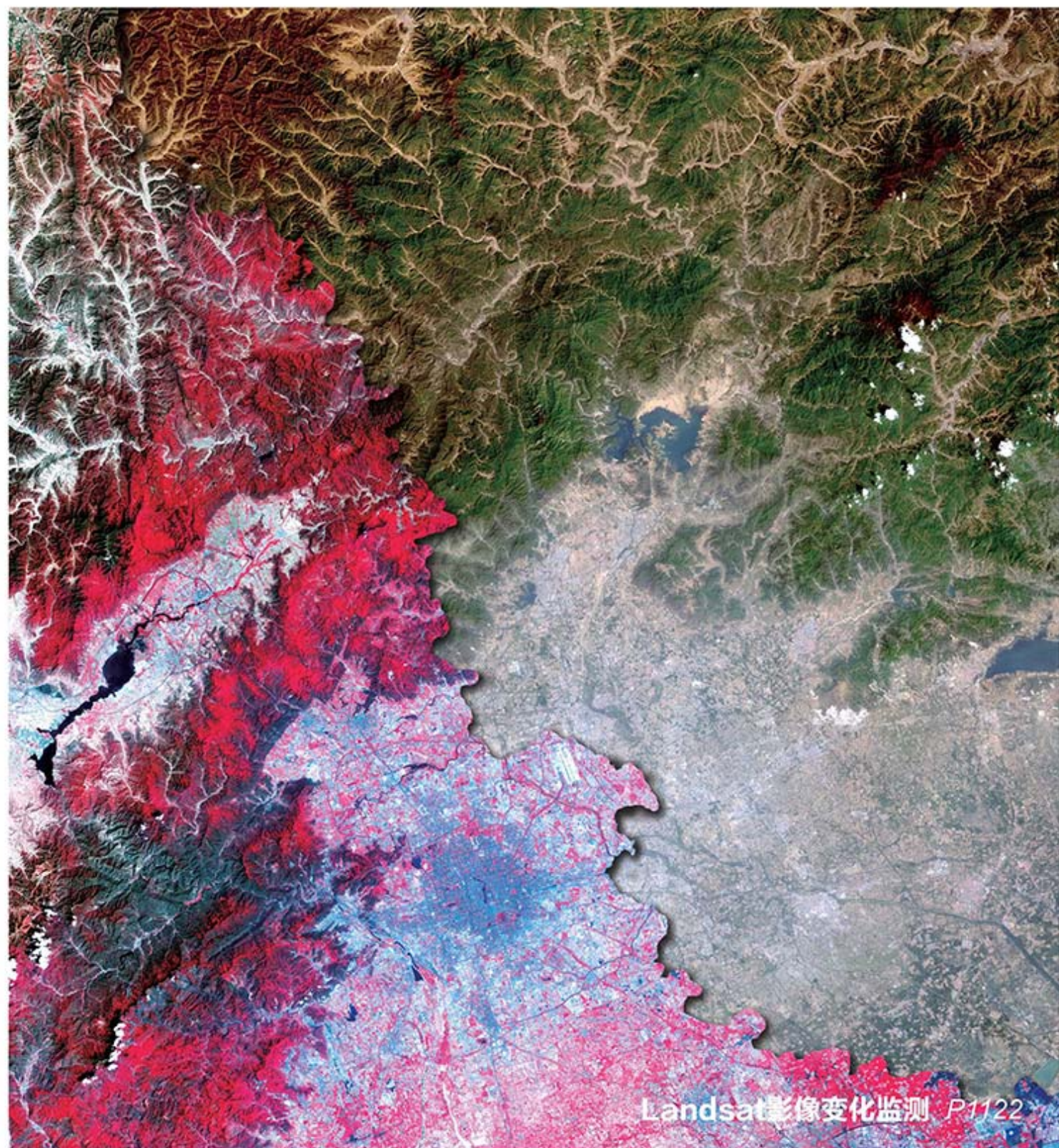
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 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

中国图象图形学报

2015
08
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



Landsat影像变化监测 P1122



第20卷第8期（总第232期）

2015年8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
中文核心期刊

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

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@radi.ac.cn

电 话 010-64807995

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@radi.ac.cn

Telephone 010-64807995

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

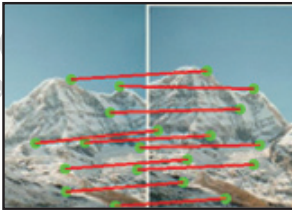
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

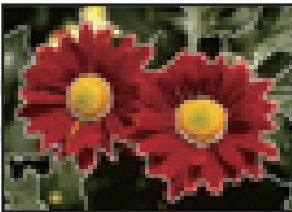
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

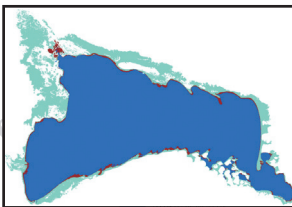
国内定价 50.00元



利用Hough变换的匹配对提纯
(第1017页)



结合格式塔完形规则的自然图像分割(第1026页)



利用长时间序列Landsat分析博斯腾湖面积变化(第1122页)

图像处理 and 编码

CRT显示图像的色彩管理新模型

黎新伍, 王根生 0993

邻域窗口权重变分的图像修复

王猛, 翟东海, 聂洪玉, 王佳君 1000

自适应滤波窗实现距离加权图像椒盐噪声滤除

林亚明, 李佐勇, 林叶郁, 徐戈 1008

利用Hough变换的匹配对提纯

谢亮, 陈姝, 张钧, 田金文 1017

图像分析和识别

结合格式塔完形规则的自然图像分割

曾接贤, 王玉 1026

融合Kernel PCA形状先验信息的变分图像分割模型

杨建功, 汪西莉, 李虎 1035

基于2维灰度熵阈值选取快速迭代的图像分割

吴诗姘, 吴一全, 周建江, 孟天亮, 戴一晃 1042

基于图像线特征和点云面特征的水下人造目标定位

解则晓, 潘成成, 迟书凯, 魏征 1051

熵能量堆煤图像的定位与识别

袁姮, 王志宏, 姜文涛 1062

时空运动显著性的目标跟踪

谢昭, 刘玉敏, 张骏, 段士雷 1070

结合整体一致性和局部差异性的图像目标显著性检测

张小祥, 马儒宁 1083

基于Radon-经验模式分析的纹理分类

徐卓飞, 张海燕, 刘凯, 侯和平, 徐倩倩, 李利峰 1091

遥感图像处理

四叉树分块的高光谱图像分布式无损编码

王相海, 张智迪, 宋传鸣 1102

基于流形学习的彩色遥感图像分维数估算

王洪波, 罗贺, 王晓佳 1110

利用长时间序列Landsat分析博斯腾湖面积变化

孙爱民, 冯钟葵, 葛小青, 罗宇, 李山山, 闫芳, 冯旭祥 1122

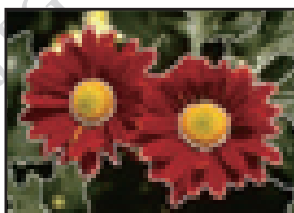
封面图片由中国科学院遥感与数字地球研究所卫星地面系统工程部李山山副研究员提供

CONTENTS

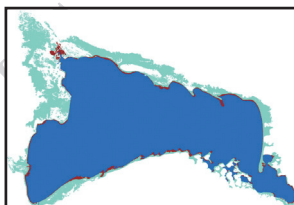
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Purifying algorithm for rough matched pairs using Hough transform (P1017)



Natural image segmentation method based on Gestalt rules (P1026)



Bosten Lake surface area changes analysis using long temporal Landsat image series (P1122)

Image Processing and Coding

- Color management model for CRT color image
Li Xinwu, Wang Gensheng 0993
- Image inpainting with weight variation of neighborhood window
Wang Meng, Zhai Donghai, Nie Hongyu, Wang Jiajun 1000
- Distance-weighted approach based on self-adaptive windows to remove salt and pepper noise in images
Lin Yaming, Li Zuoyong, Lin Yeyu, Xu Ge 1008
- Purifying algorithm for rough matched pairs using Hough transform
Xie Liang, Chen Shu, Zhang Jun, Tian Jinwen 1017

Image Analysis and Recognition

- Natural image segmentation method based on Gestalt rules
Zeng Jiexian, Wang Yu 1026
- Variational image segmentation incorporating Kernel PCA-based shape priors
Yang Jiangong, Wang Xili, Li Hu 1035
- Image segmentation based on the fast iteration for two-dimensional gray entropy threshold selection
Wu Shihua, Wu Yiquan, Zhou Jianjiang, Meng Tianliang, Dai Yimian 1042
- Underwater man-made object localization based on line feature of image and surface feature of point cloud
Xie Zexiao, Pan Chengcheng, Chi Shukai, Wei Zheng 1051
- Coal pile location and recognition method based on entropy energy
Yuan Heng, Wang Zhihong, Jiang Wentao 1062
- Spatio-temporal motion saliency for object tracking
Xie Zhao, Liu Yumin, Zhang Jun, Duan Shilei 1070
- Image target saliency detection by combining the global consistency and local difference
Zhang Xiaoxiang, Ma Runing 1083
- Texture classification based on Radon-empirical mode decomposition analysis
Xu Zhuofei, Zhang Haiyan, Liu Kai, Hou Heping, Xu Qianqian, Li Lifeng 1091

Remote Sensing Image Processing

- Lossless distributed source coding of hyperspectral images based on quadtree segmentation
Wang Xianghai, Zhang Zhidi, Song Chuanming 1102
- Estimation research for fractal dimension of color remote sensing image based on manifold learning
Wang Hongbo, Luo He, Wang Xiaojia 1110
- Bosten Lake surface area changes analysis using long temporal Landsat image series
Sun Aimin, Feng Zhongkui, Ge Xiaoqing, Luo Yu, Li Shanshan, Yan Fang, Feng Xuxiang 1122

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)08-1000-08

论文引用格式: Wang M, Zhai D H, Nie H Y, Wang J J. Image inpainting with weight variation of neighborhood window[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(8): 1000-1007. [王猛, 翟东海, 聂洪玉, 王佳君. 邻域窗口权重变分的图像修复[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(8): 1000-1007.] [DOI:10.11834/jig.20150802]

邻域窗口权重变分的图像修复

王猛¹, 翟东海^{1,2}, 聂洪玉¹, 王佳君¹

1. 西南交通大学信息科学与技术学院, 成都 610031; 2. 西藏大学工学院, 拉萨 850000

摘要: **目的** 传统的基于样本块的图像修复算法对于破损区域周围既含有几何结构信息又含有丰富纹理信息的情形, 修复过程中易出现纹理延伸现象和错误样本块问题, 该研究旨在改进传统的修复算法, 提出基于邻域窗口权重变分的图像修复算法。 **方法** 该算法利用领域窗口总变分和内在变分构造出权重变分, 通过对 Criminisi 算法中的优先级测度进行加权, 提高了对几何结构信息和纹理信息的辨识能力, 使几何结构信息得到优先修复; 同时, 在像素块的匹配过程中, 通过引入整体结构差异算子, 并与传统的颜色匹配相结合, 提高了匹配精度。 **结果** 改进的算法很好地克服了原算法中的纹理延伸和误匹配问题, 保持了修复结果的视觉连通性, 其峰值信噪比相比原算法提高 2 ~ 3 dB。 **结论** 相比于 Criminisi 算法及其相应的改进算法, 本文算法能够对既含有几何结构又含有丰富纹理信息的破损区域取得更好的修复效果, 同时, 也能高效修复一般的破损区域, 从而具有更好的普适性。

关键词: 图像修复; 优先权; 权重变分; 最佳样本块

Image inpainting with weight variation of neighborhood window

Wang Meng¹, Zhai Donghai^{1,2}, Nie Hongyu¹, Wang Jiajun¹

1. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Engineering, Tibet University, Lhasa 850000, China

Abstract: **Objective** This study aims to overcome the challenges of traditional image inpainting algorithms, wherein texture extension may occur and some incorrect samples may be selected as candidate patches when sample-based algorithms are employed to inpaint the damaged region with complex geometric structure and rich texture. **Method** An image inpainting method based on weight variation of neighborhood window is proposed. In the method, so-called weight variation is introduced by combining total variation and intrinsic variation in a neighborhood window to modify the priority measure in Criminisi's algorithm. With the proposed method, the ability of identifying geometric and texture information has been improved and geometric information can be urgently inpainted. Meanwhile, matching accuracy has been improved by introducing structure difference operator in combination with pixel color comparison. **Result** Compared with other recent algorithm, the proposed algorithm can settle the problem of texture expansion and block mismatching and can maintain visual connectivity. Moreover, the peak signal-to-noise ratio (PSNR) of its inpainting result is improved by 2 dB to 3 dB. **Conclusion** Compared with the original Criminisi's algorithm and its improved algorithms, the proposed algorithm can achieve better result in inpainting the damaged region with both geometric structure and rich texture, as well as in inpainting some ordinary dam-

收稿日期: 2014-12-25; 修回日期: 2015-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61461048); 国家社会科学基金项目(12EF119); 西藏自治区科技厅科技计划重点项目(Z2013B28G28/02)

第一作者简介: 王猛(1989—), 男, 西南交通大学信号与信息处理专业在读硕士研究生, 主要研究方向为数字图像修复。

E-mail: wangdream.ok@qq.com

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61461048)

aged region. Thus, the proposed algorithm has generality.

Key words: image inpainting; priority; weight variation; optimal match

0 引言

图像修复是当前计算机图形学和计算机视觉中的一个研究热点,它利用破损区域周围的完好区域信息对破损图像进行修复,目的在于恢复图像的完整性和原有的视觉连通性。图像修复技术已经被广泛用于旧照片修复、影视特效制作、文物保护等多个领域,目前在这方面的研究大致可以分为3类:基于偏微分方程(PDE)的图像修复算法、基于稀疏的图像修复算法和基于样本的图像修复算法。

基于PDE的图像修复算法通常是从已知区域向破损区域扩散图像信息,Bertalmio等人^[1]提出了一种沿着等照度线从破损区域外面扩散信息到破损区域的创新性算法。Chen和Shen^[2]提出了TV模型修复局部非纹理图像。这些基于PDE的图像修复算法对于局部小破损区域的非纹理图像具有很好修复效果,对于大破损区域含有几何结构的图像会产生错误修复和模糊现象。基于稀疏的图像修复算法主要是通过一系列变换的稀疏组合表示图像,破损区域的像素可以通过自适应更新稀疏表示被填充。Cai等人^[3]使用小波紧框架提出了基于framelet波的图像修复算法,Elad等人^[4]使用MCA(morphological component analysis)提出了纹理和结构同时修复,这种方法把图像分解成纹理层和结构层,每层可以通过字典稀疏表示。Yu等人^[5]使用结构稀疏性的方法修复图像,这些方法同样会产生图像模糊现象。基于样本的图像修复方法通过从样本块的已知区域向破损区域修复,纹理合成^[6]的方法对于纯纹理图像具有很好的修复效果。Criminisi等人^[7]提出的基于最佳样本的图像修复算法,通过优先级的设定使破损区域的结构部分被优先修复,取得了较好的修复效果。任澍等人^[8]提出利用纹理和边缘特征的Criminisi改进算法,通过引入差别因子,有效地增强了利用优先级识别几何结构信息的能力。Xu等人^[9]提出了一种基于块的稀疏性的优先级的计算方法,该算法通过计算待修复块在其邻域中的结构稀疏性来决定块的修

复顺序,此种方法在修复纹理图像方面效果显著。Cao等人^[10]提出了一种基于结构指导的样例图像修复算法。Arias等人^[11]提出了变分框架的样例图像修复算法,这种方法考虑了局部和非局部内容。Florinabel等人^[12]提出了新的图像修复方法,通过破损边缘模板块的DCT系数来决定填充顺序,Zhang和Lin^[13]提出了基于向上颜色分布的优先权计算。基于样例的图像修复算法对于大区域修复和目标去除具有很好的效果,但是具有贪婪性,一旦优先权的计算和样本块的选择不合适,将会导致随后样本块误匹配。

在以上算法研究成果的基础上,提出邻域窗口权重变分的图像修复算法,主要是利用权重变分的方法计算破损区域边缘像素的优先权大小;同时在像素块的匹配过程中,除比较像素块对应的颜色值外,还引入了整体结构差异算子进一步提高匹配精度。实验结果表明,改进的算法更加合理,修复效果满足视觉连通性。

1 Criminisi 算法的优先级计算

Criminisi等人提出的基于优先权的图像修复算法(简称Criminisi算法)借鉴了纹理合成方法中寻找最佳匹配样本块并复制的思想。如图1所示,

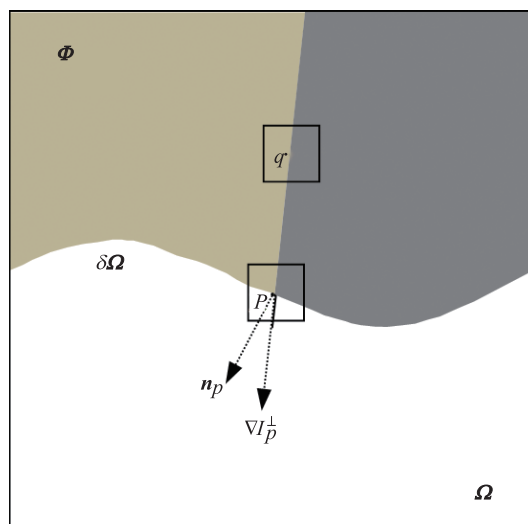


图1 Criminisi 算法示意图

Fig. 1 Criminisi algorithm schematic

其中, Φ 为输入图像已知区域, Ω 为输入图像待修复区域($\delta\Omega$ 为其边缘)。Criminisi 算法关键在于提出了待修复区域模板块优先级的计算方法, 一定程度上保全了图像的纹理和几何结构信息。优先级计算为

$$P(p) = D(p)C(p) \quad (1)$$

式中, $C(p)$ 和 $D(p)$ 分别为置信度项和数据项, 即

$$C(p) = \frac{\sum_{q \in \Psi_p \cap \Phi} C(q)}{|\Psi_p|} \quad (2)$$

$$D(p) = \frac{|\nabla I_p^\perp \cdot \mathbf{n}_p|}{\alpha} \quad (3)$$

式中, $|\Psi_p|$ 为模板块的像素个数, α 为归一化系数(灰度图像 $\alpha = 255$), $\mathbf{n}_p$ 为待修复区域边缘 $\delta\Omega$ 上像素点 p 的法向量, $\nabla I_p^\perp$ 为等照度线的方向。在初始时, $p \in \Phi$ 时, $C(p) = 1$; $p \in \Omega$ 时, $C(p) = 0$ 。

首先, 计算出破损边缘优先级最高的像素点 $\hat{p}$, 它的模板块为 $\Psi_{\hat{p}}$, 然后在完好区域搜索出和模板块最相似的样本块 $\Psi_{\hat{q}}$, 通过此样本块的相应的像素填充模板块未知像素, 最后更新已修复像素的置信度 $C(q)$, 即

$$C(q) = C(\hat{p}), \forall q \in \Psi_{\hat{p}} \cap \Omega$$

重复以上步骤, 直到破损区域修复完毕为止。

2 优先级的改进

2.1 Criminisi 算法的不足

Criminisi 算法, 使得破损区域周围已知像素比例大且几何结构信息强的模板块被优先修复。由于该算法简单有效, 出现了大量相关改进算法。然而该算法的优先级计算存在局限性, 对于既存在几何结构又存在丰富纹理的图像, Criminisi 算法不能有效地辨别结构, 很容易导致图像中丰富纹理信息优先修复, 从而导致纹理延伸等现象, 不能满足图像视觉连通性。由于文献[14]的启发, 本文的一个重要贡献就是在 Criminisi 算法中引入邻域窗口的权重变分算子, 可以有效地解决图像中存在丰富纹理的优先级计算问题, 使图像中几何结构信息优先于丰富纹理信息修复, 从而满足视觉连通性。

2.2 权重变分

在采用 Criminisi 算法修复过程中, 一个重要的方面是依据破损区域边缘像素点的优先级来进

行修复, 而且, 根据视觉连通性和人类经验, Criminisi 算法赋予含有几何结构信息的边缘像素点以更高的优先级从而保证含有几何结构的破损区域优先修复。但对于破损边缘既存在丰富的纹理信息又存在几何结构信息的情况, 靠近丰富纹理区域的边缘像素点的梯度一般大于靠近几何结构区域的边缘像素点的梯度, 从而导致靠近纹理区域的边缘像素点的数据项值大于靠近几何结构区域的边缘像素点的数据项值, 进而纹理信息丰富的区域优先于几何结构区域修复。由此可见, 原始的数据项 $D(p)$ 不能有效地区分几何结构和丰富纹理信息, 因此, 需要寻找一种有效的方法、解决同时存在纹理比较丰富的区域和几何结构区域中破损区域边缘像素点的优先级计算问题。

在一幅图像中, 含有几何结构信息的区域与含有丰富纹理信息的区域有着明显不同的特性差异。图 2 是不同的邻域窗口图像的矢量特征表示, 图 2(a) 为平滑的等强度图像, 所有像素的强度变化矢量值都很低; 图 2(b) 为含有主要结构的图像, 强度延 x 方向增加, 则 $\sum \partial_x S$ 、 $\sum |\partial_x S|$ 比较高; 图 2(c) 为延 x 方向正负变化的纹理图像, 只有 $\sum |\partial_x S|$ 值很高, 其他值都很低。对于图像的破损区域, 为了辨别纹理信息和几何结构信息, 提出邻域窗口总变分为

$$T(p) = \sum_{q \in N(p) \cap \Phi} \frac{g_{p,q} (|\partial_x S|_q + |\partial_y S|_q)}{N_q} \quad (4)$$

式中, $N(p)$ 是以破损边缘像素 p 为中心的邻域窗口, 尺寸为 19×19 , N_q 是邻域窗口内完好区域的像素数量, $|\partial_x S|_q$ 和 $|\partial_y S|_q$ 分别是邻域窗口内的像素在 x 方向和 y 方向的导数, $g_{p,q}$ 是一个空间距离的高斯加权函数, 即

$$g_{p,q} = \exp\left(-\frac{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

式中, (x_p, y_p) 为破损边缘像素 p 的空间坐标, (x_q, y_q) 为破损边缘像素 p 的邻域完好区域的像素 q 的空间坐标, σ 控制着邻域窗口的空间尺度, 离破损边缘像素 p 越近的像素 q 的 $g_{p,q}$ 值越大。对于只存在纹理信息的图像, 通过 $T(p)$ 可以有效地辨别出丰富纹理信息的像素; 对于只存在结构信息的图像, 通过 $T(p)$ 可以有效地辨别强几何结构信息的像素。

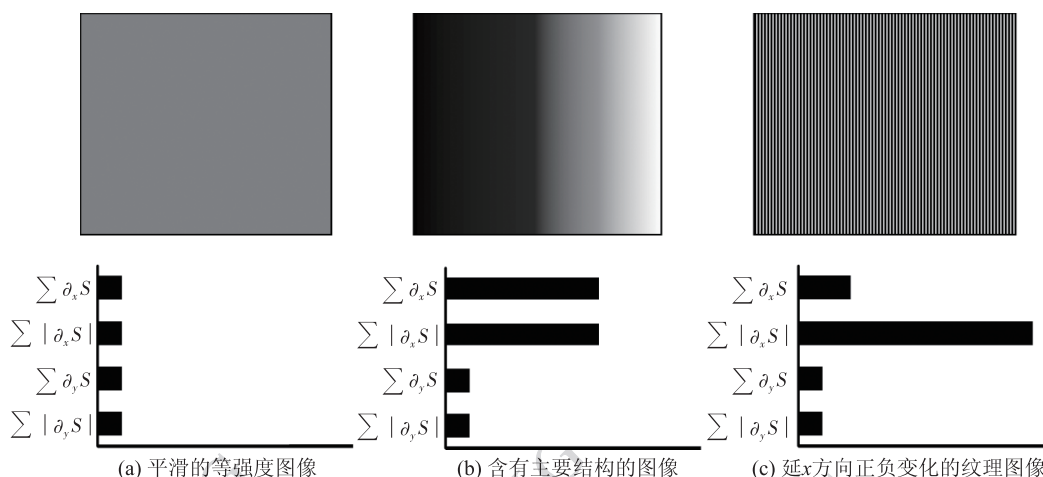


图2 不同的邻域窗口图像的矢量特征表示

Fig. 2 Feature vector representation of different neighborhood window

对于图像破损区域边缘既存在丰富纹理信息又存在主要几何结构信息,由于纹理区域的 $T(p)$ 值和结构区域的 $T(p)$ 值都很大,因此 $T(p)$ 不能有效地辨别出主要的几何结构信息,为了能够使强几何结构信息的像素优先修复,本文在 $T(p)$ 基础上进一步提出邻域窗口内在变分

$$H(p) = \left| \frac{\sum_{q \in N(p) \cap \Phi} g_{p,q} \cdot ((\partial_x S)_q + (\partial_y S)_q)}{N_q} \right| \quad (6)$$

窗口内在变分 $H(p)$ 是评价窗口内像素的内在变化情况,对于存在纹理信息的图像,邻域窗口内像素的梯度既有正值又有负值,邻域窗口内 $H(p)$ 值相对较小;对于存在几何结构信息的图像,邻域窗口内的像素梯度具有一致性,邻域窗口内 $H(p)$ 值相对较大,所以通过 $H(p)$ 可以有效的凸显出邻域窗口的几何结构信息,这是由于邻域窗口内几何结构信息的像素具有一致的梯度方向,而邻域区域的纹理信息的像素梯度方向通常是正反方向交替出现。

为了提高图像信息的辨别能力和算法的普适性,尤其是提高对邻域窗口内纹理信息和几何结构信息的辨识能力,结合邻域窗口总变分 $T(p)$ 和窗口邻域内在变分 $H(p)$,构造了权重变分作为显著性度量,其计算为

$$W(p) = \frac{H(p)}{T(p) + \varepsilon} \quad (7)$$

式中, ε 是一个很小正数,为了防止窗口内在变分 $T(p)$ 的值为零时影响算法的有效性。本文提出的

权重变分 $W(p)$ 不仅简单而且可以有效地从纹理区域中辨别重要的几何结构,权重变分 $W(p)$ 的变化范围(0, 1),在破损区域周围的完好区域,当邻域窗口处在平滑区域, $T(p)$ 和 $H(p)$ 值很小,但是 $T(p)$ 和 $H(p)$ 的值很接近,则 $W(p)$ 值接近于 1;当邻域窗口处在强几何结构区域, $T(p)$ 和 $H(p)$ 值很大,但是 $T(p)$ 和 $H(p)$ 值很接近,则 $W(p)$ 值接近于 1;当邻域窗口处在纹理区域, $T(p)$ 值很大,而 $H(p)$ 值很小, $T(p)$ 和 $H(p)$ 值相差比较大,则 $W(p)$ 值相对较小;当邻域窗口内既含有几何结构信息又含有纹理信息,由于分母 $T(p)$ 计算的是纹理和主要几何结构值,则 $T(p)$ 值很大,分子 $H(p)$ 计算的是主要几何结构的值,纹理的值很小,则 $H(p)$ 值相对较大, $T(p)$ 和 $H(p)$ 的值比较接近,最终 $W(p)$ 值相对较大。通过比较,强几何结构区域的 $W(p)$ 值最大,既存在纹理信息又存在几何结构信息区域 $W(p)$ 值次之,丰富纹理区域的 $W(p)$ 值最小,这显然满足几何结构区域优先修复的条件。

如图 3 所示,图 3(a) 中破损图像周围存在较少的几何结构信息和丰富纹理信息,但是存在一定噪声;图 3(b) 中破损图像周围主要存在几何结构信息;图 3(c) 中破损图像周围主要存在丰富纹理信息;图 3(d) 中破损图像周围既存在丰富纹理信息又存在主要的几何结构信息(复杂区域)。表 1 分别计算图 3 中破损区域优先级最高的边缘像素的 $T(p)$ 、 $H(p)$ 、 $D(p)$ 和 $P(p)$ 值,由于 $D(p)$ 的值太小,为了方便比较,本文在仿真过程中增加了 $D(p)$ 数量级。从表 1 可以看出,纹理区域(图 3(c))

$D(p)$ 值大于几何结构区域(图3(b))和复杂区域(图3(d)) $D(p)$ 值,这显然是不满足几何结构区域优先修复的条件;然而几何结构区域(图3(b)) $W(p)$ 值大于复杂区域(图3(d))的 $W(p)$ 值,复杂区域 $W(p)$ 值大于纹理区域(图3(c)) $W(p)$ 的值,这显然满足几何结构优先修复的条件。 $W(p)$ 可以有效地从纹理中辨别几何结构,使含有强几何结构信息的破损区域优先修复。而且权重变分 $W(p)$ 对于图像中含有噪声或奇异值具有很好的稳定性,不会影响算法的优先权计算。通过视觉效果和客观评价指标可以看出,本文算法相比 Criminisi 算法具有很大的优越性。

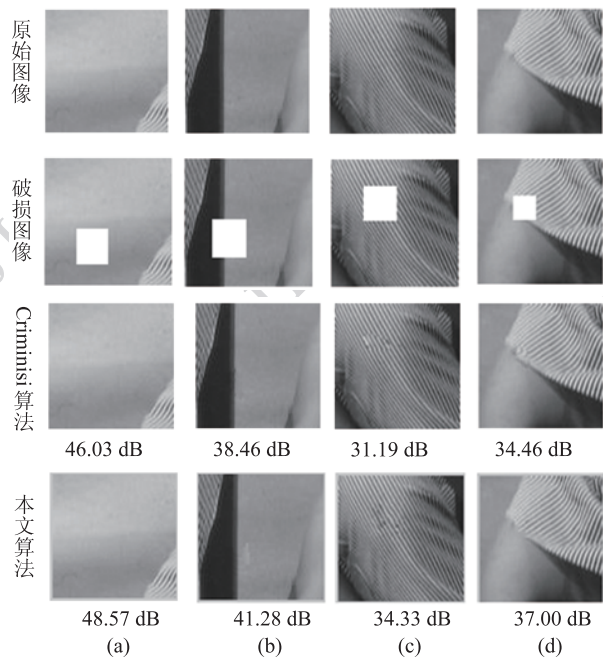


图3 不同区域修复效果

Fig. 3 The repair effect of different region

表1 不同破损区域的优先级

Table 1 The priority of different areas

	图3(a)	图3(b)	图3(c)	图3(d)
$T(p)$	1.763 8	14.222 2	62.333 3	24.013 9
$H(p)$	0.291 6	13.138 9	13.250 0	11.902 8
$W(p)$	0.878 4	0.992 3	0.421 8	0.946 6
$D(p)$	0.026 9	0.269 1	0.353 7	0.199 9
$P'(p)$	0.013 0	0.132 4	0.055 1	0.059 8

2.3 合理的优先权计算

考虑到算法的有效性和普遍性,本文将权重变

分 $W(p)$ 引入到 Criminisi 算法中,权重变分作为 Criminisi 优先权计算的权重因子,则改进后的优先权为

$$P'(p) = W(p)D(p)C(p) \quad (8)$$

权重变分 $W(p)$ 作为权重制约着数据项 $D(p)$,对于存在丰富纹理信息的破损边缘,由于数据项 $D(p)$ 一般使纹理优先修复,而权重变分 $W'(p)$ 的引入弱化了 $D(p)$ 使纹理信息优先修复的能力,从而使重要的几何结构信息优先修复;对于存在几何结构信息的破损边缘像素,权重变分 $W(p)$ 的引入强化了数据项 $D(p)$ 区分几何结构信息的能力。从表1中可以明显看出,改进后的优先权 $P'(p)$ 更加合理有效,不仅适合破损区域存在丰富纹理信息和几何信息(图3(d)),而且对于破损区域周围存在噪声或者奇异值(图3(a)),都能很好地辨别出主要几何结构信息。

3 样本块的合理匹配

Criminisi 算法在搜索最佳样本匹配块时,采取全局式搜索方式,可以保证在整幅图像中得到最佳匹配样本块,使得对于目标物体的去除和破损区域的填充有良好的效果。全局搜索通常采用误差平方和(SSD)来比较待修复模板块 ψ_p 的完好区域像素和搜索到的样本块 ψ_q 对应的区域像素的大小,由于SSD仅仅对每个单独像素的差异进行比较,没有考虑破损区域周围模板块的整体结构差异。这种全局搜索很容易找到多个候选样本块,如果从这些候选样本块中选择最佳匹配块的方法不当,很容易产生误匹配,从而导致后面的匹配也发生错误,最终达不到满意的修复效果。

本文采用SSD衡量样本块和模板块的匹配程度的同时,还引入整体结构差异算子来衡量样本块和模板块的匹配程度,匹配算子为

$$D(\psi_p, \psi_q) = \alpha_1 D_1(\psi_p, \psi_q) + \alpha_2 D_2(\psi_p, \psi_q) \quad (9)$$

式中, α_1 、 α_2 权值系数, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。 $D_1(\psi_p, \psi_q)$ 为模板块 ψ_p 和样本块 ψ_q 中相对应的像素误差平方和,即

$$D_1(\psi_p, \psi_q) = \sum_{p \in \Phi \cap \psi_p} (p(i, j) - q(i, j))^2 \quad (10)$$

式中, $p(i, j)$ 为模板块 ψ_p 的完好区域像素值, $q(i,$

j) 为样本块 ψ_q 中与之对应的像素值。 $D_2(\psi_p, \psi_q)$ 为模板块 ψ_p 和样本块 ψ_q 的整体结构差异算子, 即

$$D_2(\psi_p, \psi_q) = \sum_{p \in (\Phi \cap \psi_p)} (|(\partial_x S)_p| - |(\partial_x S)_q|)^2 + (|(\partial_y S)_p| - |(\partial_y S)_q|)^2 \quad (11)$$

$|(\partial_x S)_p|$ 和 $|(\partial_y S)_p|$ 分别是模板块 ψ_p 内的完好区域像素在 x 方向和 y 方向的导数, $|(\partial_x S)_q|$ 和 $|(\partial_y S)_q|$ 分别是样本块 ψ_q 内与之对应像素在 x 方向和 y 方向的导数。

改进的搜索匹配方式是在 SSD 匹配的基础上引入整体结构差异, 由于 $D_2(\psi_p, \psi_q)$ 不但可以衡量结构的大小还可以衡量结构的方向, 所以改进后的搜索匹配在比较像素差异的同时也比较了结构差异, 使搜索到的最佳样本块更加准确, 从而也避免了后面的误匹配, 使修复效果更加满足视觉连通性。

4 实例验证

为了验证本文算法的有效性, 在计算机上进行了仿真实验。实验环境为 MATLAB 2009b 版本。在仿真实验中, 与相关改进算法进行了性能比较。另外, 还采用了峰值信噪比 (PSNR) 和结构相似性 (SSIM) 作为修复效果的客观评价标准。PSNR 值越大表明修复效果越好, 其值为

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{255^2}{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (U(i, j) - U_1(i, j))^2} \quad (12)$$

式中, U 为原图, U_1 为修复后的图像, M 和 N 分别为图像的行数和列数。可以看出, PSNR 值越大, 修复后图像与原始图像的差距越小。

图 4 分别给出了文献[8]算法、文献[9]算法以及本文算法对 barb 图像 (512×512) 的修复效果。文献[8]算法在修复破损区域时, 在胳膊处产生了纹理延伸的同时引入了误匹配。文献[9]算法的纹理延伸没有文献[8]那么明显, 但是产生一定的误匹配。本文算法很好地避免了纹理延伸, 同时消除了误匹配, 具有很好的视觉效果。

本文也对彩色图像进行了处理, 图 5 分别给出了文献[8]算法、文献[9]算法以及本文算法对 Baboon 图像 (512×512) 的修复效果。可以看出, 文献[8]算法在修复 a 区域时, 产生了纹理延伸, 在修复 b 区域时, 造成了误匹配。文献[9]算法在修复 a、b 区域时, 一定程度上消除了纹理延伸, 同时对误匹配也得到了很好控制。本文算法很好地克服了以上缺点, 具有很好的视觉连通性。

本文也对彩色图像的划痕消除进行了仿真, 图 6 分别给出了文献[8]算法、文献[9]算法以及本文算法对 bird 图像 (190×264) 的修复效果。文献[8]算法在修复破损区域时, 在小鸟的嘴边产生了纹理延伸的同时引入了误匹配。文献[9]算法的纹理延伸没有文献[8]算法那么明显, 修复效果也不错。本文算法更好地避免了纹理延伸, 同时消除了误匹配, 具有很好的视觉效果。

本文也对彩色图像的物体去除进行了仿真, 图 7 分别给出了文献[8]算法、文献[9]算法以及本文算法对 beach 图像 (350×262) 物体移除效果。可以看出, 文献[8]算法在移除物体的过程中导致纹理延伸, 同时海岸的结构不自然, 文献[9]算法也造成了一定的纹理延伸, 同时产生了一定的误匹配。本文算法的移除效果比较好, 使海岸的几何结构连接的比较自然, 避免了纹理延伸和误匹配。



图 4 Barb 的修复效果比较

Fig. 4 The repair effect compare figure of Barb



图5 baboon 的修复效果比较
Fig. 5 The repair effect compare figure of baboon

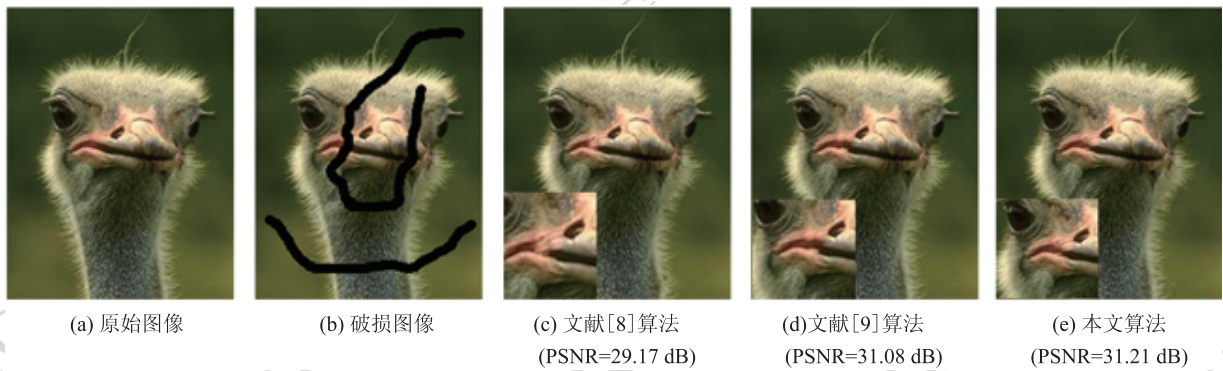


图6 bird 图像划痕消除后的效果
Fig. 6 The effect of bird image scratch removal

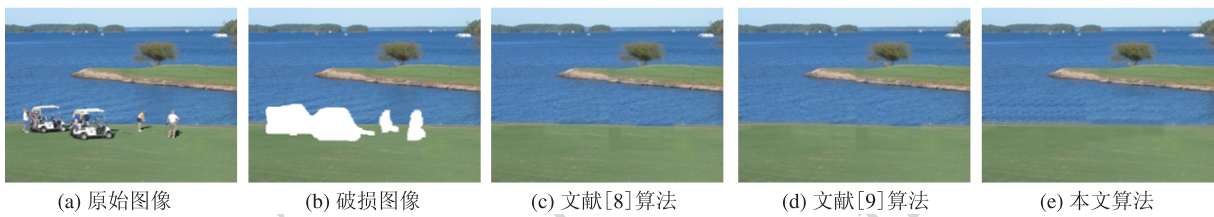


图7 beach 图像物体移除后的效果
Fig. 7 The effect of beach image object removal

本文算法不仅能更好地满足人眼视觉效果要求,而且在客观评价指标上优于相关算法,如表2所示,通过 PSNR 和 SSIM 的客观评价,可以看出本文算法相比 Criminisi 经典的改进算法具有很大的优势。

表2 3种修复算法的 PSNR、SSIM 性能比较
Table 2 Comparison of PSNR and SSIM results among three inpainting algorithms

算法	PSNR/dB			SSIM		
	图4	图5	图6	图4	图5	图6
文献[8]	31.54	27.62	29.17	0.951 2	0.962 3	0.942 1
文献[9]	32.69	29.34	31.08	0.954 6	0.965 2	0.943 6
本文	32.78	29.12	31.21	0.957 3	0.968 1	0.967 9

5 结 论

本文提出邻域窗口权重变分的图像修复算法充分利用权重变分的方法计算破损区域边缘像素的优先权大小,对 Criminisi 算法的优先权模型进行了改进,有效地区分了几何结构和丰富纹理信息。同时在像素块的匹配过程中,除比较像素块对应的颜色值外,还引入了整体结构差异算子进一步提高匹配精度,有效地消除了误匹配。仿真实验分析表明,本文算法不仅能够有效抑制纹理部分的优先修复,还能使样本块的匹配更加合理,相比于 Criminisi 算法和相应的其他改进算法取得了更好的修复效果。

参考文献 (References)

- [1] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V, et al. Image inpainting [C]//Proceedings of SIGGRAPH. New York, USA: ACM, 2000: 417-424.
- [2] Shen J, Chan T F. Mathematical models for local nontexture inpaintings [J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2002, 62(3): 1019-1043.
- [3] Cai J F, Chan R H, Shen Z. A framelet-based image inpainting algorithm [J]. Applied Computational Harmonic Analysis, 2008, 24(2): 131-149. [DOI: 10.1016/j.acha.2007.10.002]
- [4] Elad M, Starck J L, Querre P, et al. Simultaneous cartoon and texture image inpainting using morphological component analysis (MCA) [J]. Applied Computational Harmonic Analysis, 2005, 19(3): 340-358. [DOI:10.1016/j.acha.2005.03.005]
- [5] Yu G S, Sapiro G, Mallat S. Solving inverse problems with piecewise linear estimators: From Gaussian mixture models to structured sparsity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(5): 2481-2499. [DOI: 10.1109/TIP.2011.2176743]
- [6] Efros A A, Leung T K. Texture synthesis by non-parametric sampling [C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. Kerkyra, Greece: IEEE, 1999: 1033-1038.
- [7] 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. [DOI: 10.1109/TIP.2004.833105]
- [8] Ren S, Tang X H, K J L. Improved Criminisi algorithm with the texture and edge feature [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(9): 1085-1091. [任澍, 唐向宏, 康佳伦. 利用纹理和边缘特征 Criminisi 改进算法 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(9): 1085-1091.] [DOI:10.11834/jig.20120906]
- [9] Xu Z B, Sun J. Image inpainting by patch propagation using patch sparsity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(5): 1153-1165. [DOI: 10.1109/TIP.2010.2042098]
- [10] Cao F, Gousseau Y, Masnou S, et al. Geometrically guided exemplar-based inpainting [J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2011, 4(4): 1143-1170. [DOI:10.1137/110823572]
- [11] Arias P, Facciolo G, Caselles V, et al. A variational framework for exemplar-based image inpainting [J]. International Journal of Computer Vision, 2011, 93(3): 319-347. [DOI: 10.1007/s11263-010-0418-7]
- [12] Florinabel D J, Juliet S E, Sadasivam V. Combined frequency and spatial domain-based patch propagation for image completion [J]. Computers & Graphics-UK, 2011, 35(6): 1051-1062. [DOI:10.1016/j.cag.2011.10.002]
- [13] Zhang Q, Lin J. Exemplar-based image inpainting using color distribution analysis [J]. Journal of Information Science and Engineering, 2012, 28(4): 641-654.
- [14] Xu L, Yan Q, Xia Y, et al. Structure extraction from texture via relative total variation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6): #139(1-10). [DOI: 10.1145/2366145.2366158]
- [15] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612. [DOI:10.1109/TIP.2003.819861]