



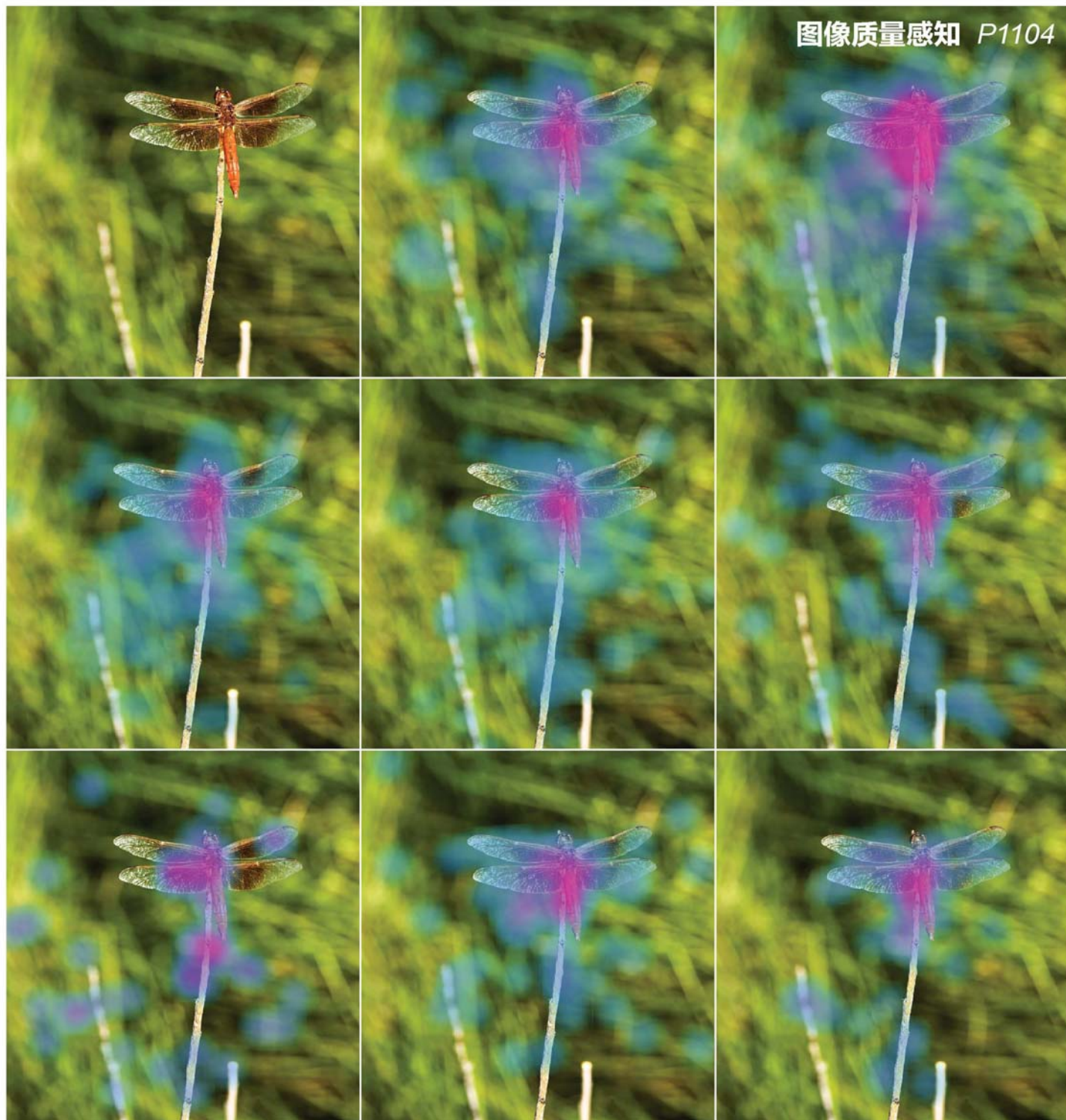
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

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

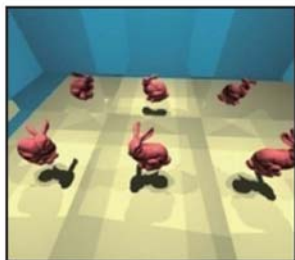
2014
07
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



多特征融合的图像自动变形
(第1012页)

多通道Haar-like特征多示例学习目标跟踪(第1038页)

快速虚顶点光子映射的焦散
绘制(第1062页)

综述

打印机光谱特性化方法研究综述

万晓霞, 刘强 0985

图像处理和编码

图像场方向导数的局部区域重建

叶学义, 齐珍珍, 何志伟, 李汪兵 0998

Lytro相机的光场图像校正与重对焦方法

周文晖, 林丽莉 1006

多特征融合的图像自动变形

肖红光, 肖树根, 刘京, 李淳芃, 陈立福 1012

结合频谱扩散的指纹图像滤波增强

卞维新, 封举富, 罗永龙, 徐德琴 1021

图像分析和识别

中心投影变换的抗噪性分析

黄永东, 李三三, 杨建伟 1031

多通道Haar-like特征多示例学习目标跟踪

宁纪锋, 赵耀博, 石武祯 1038

自主移动机器人自适应室外道路检测

杜明芳, 王军政, 李静, 崔广涛, 方建军, 曹海青 1046

分层树结构字典编码的行为识别

周同驰, 程旭, 吴镇扬 1054

计算机图形学

快速虚顶点光子映射的焦散绘制

李瑞瑞, 秦开怀 1062

双重视图下的3维网格模型可见水印

陆尘, 朱长青, 王玉海 1068

虚拟现实与增强现实

个性化编辑的轻量化3维树木模型构建

董天阳, 纪磊, 刘思远, 范菁, 熊丽荣 1074

遥感图像处理

带距离徙动校正的压缩感知PFA成像方法

段化军, 朱岱寅 1085

结合边缘和区域的活动轮廓模型SAR图像目标轮廓提取

王沛, 周鑫, 彭荣赜, 符鹏 1095

第2届全国图像图形联合学术会议专栏

视线跟踪技术的图像质量主观数据库构建及其可视化

张昀, 牟轩沁 1104

丰富图像标签的正则化非负矩阵分解方法

夏召强, 冯晓毅, 彭进业 1112

CONTENTS

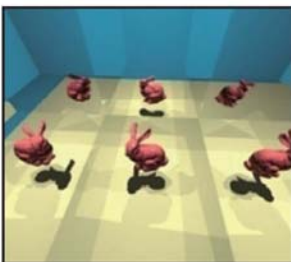
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Multi-feature fusion-based image morphing(P1012)



Multiple instance learning based object tracking with multi-channel Haar-like feature(P1038)



Fast caustics rendering by photon beam tracing based on virtual vertex transformations(P1062)

Review

- Review of spectral printer characterization
Wan Xiaoxia, Liu Qiang 0985

Image Processing and Coding

- Reconstructing image local regions based on directional derivative of a field
Ye Xueyi, Qi Zhenzhen, He Zhiwei, Li Wangbing 0998
- Light field image rectification and refocus method for Lytro camera
Zhou Wenhui, Lin Lili 1006
- Multi-feature fusion-based image morphing
Xiao Hongguang, Xiao Shugen, Liu Jing, Li Chunpeng, Chen Lifu 1012
- The fingerprint enhancement using filtering combined with spectrum diffusion
Bian Weixin, Feng Jufu, Luo Yonglong, Xu Deqin 1021

Image Analysis and Recognition

- Robustness to noise of central projection transformation
Huang Yongdong, Li Sansan, Yang Jianwei 1031
- Multiple instance learning based object tracking with multi-channel Haar-like feature
Ning Jifeng, Zhao Yaobo, Shi Wuzhen 1038
- Adaptive outdoor road detection for autonomous mobile robot
Du Mingfang, Wang Junzheng, Li Jing, Cui Guangtao, Fang Jianjun, Cao Haiqing 1046
- Action recognition using hierarchically tree-structured dictionary encoding
Zhou Tongchi, Cheng Xu, Wu Zhenyang 1054

Computer Graphics

- Fast caustics rendering by photon beam tracing based on virtual vertex transformations
Li Ruirui, Qin Kaihuai 1062
- Visible watermarking for three-dimensional mesh model in two views
Lu Chen, Zhu Changqing, Wang Yuhai 1068

Virtual Reality and Augmented Reality

- Construction of lightweight three-dimensional tree models supporting personalization editing
Dong Tianyang, Ji Lei, Liu Siyuan, Fan Jing, Xiong Lirong 1074

Remote Sensing Image Processing

- PFA imaging with range migration correction by compressive sensing
Duan Huajun, Zhu Daiyin 1085
- Active contour model based on edge and region attributes for target contour extraction in SAR image
Wang Pei, Zhou Xin, Peng Rongkun, Fu Peng 1095

Column of UCIG'2013

- Eye tracking based image quality assessment database and visualization method
Zhang Yun, Mou Xuanqin 1104
- Regularized non-negative matrix factorization method for image tag enrichment
Xia Zhaoqiang, Feng Xiaoyi, Peng Jinye 1112

中图法分类号: TN911.73 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)07-0998-08

论文引用格式: Ye X Y, Qi Z Z, He Z W, Li W B. Reconstructing image local regions based on directional derivative of a field[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(7): 998-1005. [叶学义, 齐珍珍, 何志伟, 李汪兵. 图像场方向导数的局部区域重建[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(7): 998-1005.] [DOI:10.11834/jig.20140702]

图像场方向导数的局部区域重建

叶学义, 齐珍珍, 何志伟, 李汪兵

杭州电子科技大学通信工程学院, 模式识别与信息安全实验室, 杭州 310018

摘要: **目的** 目前图像修复的研究是以人眼不能察觉为目标, 注重视觉效果而不追求重建的准确性。本文提出一种能准确重建图像缺损边缘的重建算法。**方法** 采用稳定场作为图像局部纹理的数学物理描述, 提出基于点源影响函数的图像局部区域重建模型, 该模型针对每一个缺损点, 计算周围各已知点对它的影响, 以期较为准确地重建该点; 并根据该场中的方向导数, 分析各已知点与缺损点的差异性 & 相似性, 确定一种点源影响函数的计算方法, 以实现该重建模型。**结果** 实验结果表明所提算法与传统修复算法相比, 对图像边缘及纹理细节的重建更加清晰, 同时保持了较好的整体视觉效果; 且重建过程无迭代计算, 具有较高的效率。**结论** 实验结果表明, 该算法在重建效率和准确重建方面均取得了较好的成果。

关键词: 稳定场; 点源影响函数; 场方向导数; 局部区域重建

Reconstructing image local regions based on directional derivative of a field

Ye Xueyi, Qi Zhenzhen, He Zhiwei, Li Wangbing

Laboratory of Pattern Recognition & Information Security, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: **Objective** A good visual effect has been the main target of present researchers in image reconstruction, and accurate local area reconstruction has been neglected. However, with the development of image analysis and recognition, more and more reconstructed images have been used for feature extraction. Therefore, accurate image reconstruction is arousing researchers' attention. At the same time, to achieve a higher reconstruction efficiency is also being taken seriously because of the real-time requirement and video processing. Pointing to the two problems above, a new algorithm is proposed in this paper. **Method** The stable field model is used to describe the image local region in this paper, a reconstructing model based on point-source influence function is proposed, and the directional derivative is used to analyze the calculation methods of the influence function. Given that it is the stable result of the interaction between the surface texture and structure of the object and light, a stationary image can be regarded as a stable energy field, so that we propose a stable field model of the image local region. In this model the missing pixel is the "point" and the known pixel is the "source". Then, a stable field equation of the image local region is set up according to the model. After the equation is solved, a new reconstruction model of the image local region based on the point-source influence function is proposed, which aims at reconstructing each missing pixel accurately by calculating the influence of the known pixels around. Finally, according to the directional derivative of the stable field, a method to calculate the point-source influence function is determined by ana-

收稿日期: 2013-10-28; 修回日期: 2014-02-28

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, 主要研究方向为图像处理、模式识别、信息隐藏, 已发表论文 40 余篇, 授权国家专利 8 项。E-mail: xueyiye@hdu.edu.cn

lyzing both the similarities and differences between the missing pixel and the known, so that the reconstruction model could be achieved. **Result** In the reconstruction model, the missing pixels are assigned values one by one; before this, the influence function of each “source” around the “point” would be calculated first. Because both the calculation and the assignment to each missing pixel are as accurate as possible, compared with traditional reconstruction algorithms, the proposed algorithm achieves a better effect in accurate reconstruction. The proposed algorithm reconstructs damaged edges and texture more clearly than traditional ones and at the same time keeps a good visual effect. Moreover, because there are no iterative computations in the reconstruction process, the proposed algorithm has higher efficiency than traditional ones, which experimental results confirm that. **Conclusion** Based on the foundation of the image local region’s stable field model, a new reconstruction model for the image local region is proposed, and it is achieved by calculating the point-source influence function with an algorithm based on the field directional derivative. Different from traditional ones, the proposed algorithm shifts the attention from the total visual effect to the reconstruction of each missing pixel, so that it achieves a more accurate reconstruction for damaged images. In addition, the lack of iterative computations makes it more efficient than traditional ones.

Key words: stable field; point-source influence function; field directional derivative; reconstructing image local region

0 引言

所谓图像修复就是对图像中信息缺损区域进行重建的过程,其目的就是恢复有信息缺损的图像。随着数字技术的快速发展,图像修复一般通过人机交互或者由计算机自动完成。

目前,图像修复技术的研究主要集中在基于几何特征的图像修复(inpainting^[1])和基于纹理填充的图像修复(completion^[1])两个方向。其中,Inpainting作为目前的研究热点,主要用于较小缺损区域的重建,大多利用偏微分方程(PDE)求解的计算模式,该类研究的主要思想是缺损区域的边缘信息从区域边界向边界内扩散,扩散信息和扩散方向利用边缘信息确定。其具有代表性的算法有:BSCB^[2]模型、曲率扩散修复算法(CDD模型^[3])和全变分修复算法(TV^[4]模型),上述算法除采用的数学模型不同之外,影响其修复效果的主要因素在于对扩散信息的选取和扩散方向的控制。总的来说,这类方法都以修复后的图像整体效果使人眼难以察觉为目标,注重的是整体视觉效果,而不注重对某一定点的准确值的重建,这也使得它们对边缘及纹理细节修复的清晰度并无刻意追求^[5];另外由于这类修复模型需要重复多次迭代及高阶偏导计算,会影响其修复效率^[6]。

通过对图像纹理本身以及图像纹理形成机理的分析,采用稳定场模型作为图像局部纹理的数学物理描述,建立静态图像局部纹理的稳定场模型及方程,讨论方程的解作为缺损像素点的值,提出基于点

源影响函数的图像局部区域重建模型,该模型针对每一个缺损像素点,认为周围已知像素点均对其像素值产生影响,并通过计算各已知像素点对缺损像素点的影响并将其叠加作为缺损点像素值,以期较为准确地重建缺损像素点;最后,从该稳定场的方向导数入手,分析缺损像素点与已知像素点的相似性及差异性,确定一种点源影响函数的计算方法,用以实现上述修复模型。实验结果表明本文对图像缺损点的准确重建的探索有所成效,所提算法不仅能对图像边缘及纹理细节进行比较清晰的重建,而且修复后的图像保持着较好的整体视觉效果;由于成像时间极短,只考虑成像过程中的一次能量投射,无需迭代,使得本文算法效率较高。

1 图像的稳定场模型

1.1 图像与稳定场

图像纹理的形成通常可以理解为物体表面结构(包括表面材质、组成方式等)及自身的形状(几何形态)和成像光相互作用的稳定结果。相对于成像光的波长,物体表面结构及自身的形状在空间上可以看成是连续而且可导的,也就是物体表面任意两点都可以沿着表面用一段近似光滑的曲线连接起来(即物体表面任意点的邻域上处处可导),因此,图像纹理可以用解析函数近似描述。

物理量在空间分布且不随时间变化,即为稳定场。目前为止,在数理领域已经对稳定场进行了比较深入的研究,具有较为成熟的理论基础和计算方法^[6-8]。

作为物体表面结构及自身的形状和光线相互作用结果的稳定表现,图像纹理^[9]和数学物理中的稳定场具有相似性^[10]。首先,任意确定图像的纹理或者局部纹理都是静态的、不随时间变化的,这使得要研究的图像局部纹理和稳定场之间存在联系的基础;其次,在成像光作用下,成像物体表面结构及其形状可以看做是解析的,在成像瞬间反射一次后形成稳定的图像场,不存在所谓迭代,这些使得利用稳定场模型描述图像问题成为可能。

1.2 描述图像的稳场方程

在数学物理方法中,不同类型的数学物理方程可以统一写成

$$Lu = f \quad (1)$$

式中, L 是某一线性微分算符,对稳定场方程, $L = -\Delta$, u 表示描述稳定场的函数, Δ 代表拉普拉斯算子^[11], f 代表场的源。

将图像的局部区域看做稳定场中的一部分,建立图像局部纹理的稳定场方程

$$-\Delta I(r) = f, r \in U \quad (2)$$

式中, $I(r)$ 为描述图像局部纹理的函数,若为灰度图像, $I(r)$ 的值表示对应空间点的灰度值(对于彩色图像,假如是RGB图像, $I(r)$ 表示其中任一颜色的值,然后分别计算即可); r 表示图像局部纹理区域的空间坐标, U 表示整个图像局部纹理区域;关于 f ,作如下讨论:对一般的稳定场来说, f 代表场源,考虑在对一幅图像的缺损区域进行重建时,可用信息只有该图像已知区域的像素值,因此,如果将缺损区域看做待求像素场的话,已知区域像素值可以看做是为缺损区域提供能量的源 f 。

图像局部纹理的稳定场模型可由图1表示。

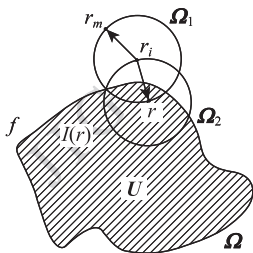


图1 图像局部纹理的稳定场模型

Fig. 1 Stable field model of image local texture

图1中阴影部分为 U ,表示图像局部缺失纹理; $I(r)$ 为描述这一部分纹理的函数; $r \in U$,表示缺损像素点的坐标; f 为描述图像已知区域纹理的函数; Ω

为包围图像缺损区域的边界($\Omega \in U$); Ω_2 是以 r 为圆心,以任意长度为半径的圆, r_i 为 Ω_2 上位于已知区域的任意一点(区域重建过程是从边界开始的,所以重建过程选取的 r 满足 $r \in \Omega$,因此不论选取半径是多大, Ω_2 上必有位于已知区域的点); Ω_1 是以 r_i 为圆心,以 $|r - r_i|$ 为半径的圆, r_m 为 Ω_1 上位于已知区域的任意一点。

r 是缺损像素点,要重建它的像素值,必然要从已知区域获取信息,考虑已知区域所有点对它的影响,即对半径为任意大小的 Ω_2 ,都考虑其上所有已知像素点 r_i 对 r 的影响; r_i 是为 r 提供能量的点,它与其周围的像素点都有一定的关系,正是这种关系构成了图像的纹理,可以根据 r_i 与已知区域的一个或多个已知像素点(例如 r_m)的关系,推出 r_i 对其周围像素点的影响,并遵循同样的规律计算 r_i 点对待修复 r 点像素值的影响。

设 r_i 对 r 的影响函数为 $G(r, r_i)$,其对应物理意义为:位置在 r_i 点的单位强度点源单独作用,即 $f = \delta(r - r_i)$ 时,在 r 点产生的像素场。

$$\delta(r - r_i) = \begin{cases} 1 & r = r_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$G(r, r_i)$ 满足方程式(2),得

$$LG(r, r_i) = \delta(r - r_i) \quad (4)$$

目的是解有源 f 的方程式(2),由于方程线性,满足叠加原理,因此,若点源 r_i 强度为 $\varphi(r_i)$,用 $\varphi(r_i)$ 乘方程式(4)左右两边。因为 L 是作用在变量 r 上的微分算符,对它来说 $\varphi(r_i)$ 可以看成“常数”,可以将 $\varphi(r_i)$ 写到算符 L 的右边,即

$$LG(r, r_i)\varphi(r_i) = \delta(r - r_i)\varphi(r_i) = \varphi(r_i) \quad (5)$$

将式(5)左右两边在已知区域对 r_i 积分,并将它和作用在 r 上的算符 L 交换次序,得

$$L \sum_{i=1}^n G(r, r_i)\varphi(r_i) = \sum_{i=1}^n \varphi(r_i) = f \quad (6)$$

式中, n 为已知像素点的个数。因此,方程式(2)的解可以写成

$$I(r) = \sum_{i=1}^n G(r, r_i)\varphi(r_i) \quad (7)$$

式中, $\varphi(r_i)$ 是在 r_i 点的像素值,表示 r_i 点的源强度,将 $G(r, r_i)$ 是 r_i 点单位强度点源在 r 点产生的场,它也表示 r_i 点对 r 点像素值的影响函数。所以 $G(r, r_i)\varphi(r_i)$ 表示的是,当 r_i 点像素值为 $\varphi(r_i)$ 时,作为源点的 r_i 在点 r 处产生的场。将 $G(r, r_i)\varphi(r_i)$ 在已知区域对 r_i 积分,得到整个源 f (由所有已知像

素点构成)在 r 点所产生的场,即 r 点的像素值,如式(4)所示。将 $G(r, r_i)$ 定义为点源影响函数,式(4)即为基于点源影响函数的图像局部区域重建模型。

此外,虽然认为所有已知像素点都对缺损像素点的像素值有影响,但是,由于距离 r 点较远的点对其影响太小可以忽略不计,在实际修复的过程中,只考虑距离 r 点较近的点对它的影响,从待修复区域的边界处开始向内修复。

2 基于场方向导数的图像局部重建

2.1 图像标量场中的方向导数

标量场的方向导数描述的是场中该标量函数沿某方向变化速率的大小^[7]。如图2所示,对有缺损的图像标量场,设 $I_0(r_i)$ 为描述图像已知区域纹理的函数, r_i 为场内任一点坐标, l 为场内自 r_i 的任意射线, r 为 l 上邻近 r_i 的一点,两点距离为 Δl ,则 $I_0(r_i)$ 在点 r_i 沿 l 方向的方向导数定义为

$$\frac{\partial I_0(r_i)}{\partial l} = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{I_0(r) - I_0(r_i)}{\Delta l} \quad (8)$$

因此,当 Δl 极小时,有

$$I_0(r) \approx \Delta l * \frac{\partial I_0(r_i)}{\partial l} + I_0(r_i) \quad (9)$$

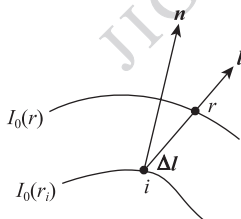


图2 方向导数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of directional derivative

图2中, n 为由 r_i 点沿等势线法线方向引出的射线,在该方向上标量场 $I_0(r_i)$ 有最大变化率,即为 $I_0(r_i)$ 在点 r_i 的梯度。

由于距离较远的点的影响太小忽略不计,在实际对某一缺损像素点进行重建时,将与目标重建点之间距离不大于 $\sqrt{5}$ 的区域作为有效作用区域,只考虑该区域内的点的影响,如图3所示。

图3中阴影部分为目标重建点 $r, r_1 \sim r_{20}$ 这20个点处于有效作用区域,暂且假设它们都是已知点,则

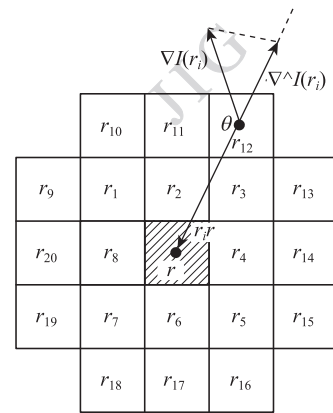


图3 有效作用区域示意图

Fig. 3 Schematic diagram of effective field

$$I_0(r_i) = \begin{cases} \varphi(r_i) & r_i \text{ 为已知} \\ 0 & r_i \text{ 为未知} \end{cases} \quad (10)$$

设 $\nabla I_0(r_i)$ 表示 r_i 点像素的梯度, $\nabla^{\wedge} I_0(r_i)$ 表示 r_i 点在 rr_i 方向上的方向导数,图3为随机选定一点,标出这些量。

在 $|r - r_i|$ 满足合适的数量级(取归一化值)的前提下,由式(9)可得

$$\hat{I}(r, r_i) = I_0(r) \approx I_0(r_i) + \nabla^{\wedge} I_0(r_i) \times |r - r_i| \quad (11)$$

式中, $\hat{I}(r, r_i)$ 表示仅在 r_i 点的影响下对 $I(r)$ 的估计值,且

$$\nabla^{\wedge} I(r_i) = |\nabla I_0(r_i)| \cos(\theta) \quad (12)$$

式中, θ 为梯度 $\nabla I_0(r_i)$ 和向量 rr_i 的夹角。将式(12)代入式(11)中可得

$$\hat{I}(r, r_i) = I_0(r_i) + |\nabla I_0(r_i)| \times |r - r_i| \times \cos(\theta) = I_0(r_i) \left(1 + \frac{|\nabla I_0(r_i)| \times |r - r_i| \times \cos(\theta)}{I_0(r_i)} \right) \quad (13)$$

2.2 点源影响函数

为了得到1.2节中的点源影响函数 $G(r, r_i)$ 的具体表示,作如下分析,设差异因子

$$\text{dif}(r, r_i) = \frac{|\hat{I}(r, r_i) - I_0(r_i)|}{I_0(r_i)} = \frac{||\nabla I_0(r_i)| \times |r - r_i| \times \cos(\theta)|}{I_0(r_i)} \quad (14)$$

它是对 r_i 点单位像素值在 rr_i 方向上产生的变化量模值的估计,表示 r_i 点为单位像素时,对 r 和 r_i 像素差值的估计,表现的是二者的差异性。当 $\text{dif}(r, r_i) = 0$ 时,表示 r 点处于 r_i 点的等照度线上,二者的差异性最小,相似度最大,那么这样的 r_i 对 r 的影响

最大;当 $\text{dif}(r, r_i) > 0$, 表示 r 不在 r_i 的等照度线上, 二者存在一定的差异, 相似度变小, 这样的 r_i 对 r 的影响变小。即差异越大, 二者的相似性越小, r_i 对 r 的影响越小。

前面讲到式(11)成立的前提是 $|r - r_i|$ 满足合适的数量级。结合式(8)(9)和式(13)知 $|r - r_i|$ 需与求梯度 $\nabla I(r_i)$ 时所用 Δl 在同一数量级, 因此需对 $|r - r_i|$ 归一化。在实验中, 求梯度时的 Δl 是 1, 而由图 3 知, 所用 $|r - r_i|$ 的取值范围是 $[1, \sqrt{5}]$, 因此取 $d_{r_i} = \frac{|r - r_i|}{\sqrt{5}}$, 作为 $|r - r_i|$ 的归一化值。同样, 式(14)中的 $|r - r_i|$ 也用其归一化值代替, 转化为

$$\text{dif}(r, r_i) = \frac{|\nabla I_0(r_i)| \times d_{r_i} \times \cos \theta}{I_0(r_i)} \quad (15)$$

综合以上分析, 并在大量实验对比基础上, 令

$$g(r, r_i) = \sqrt{1 - (\text{dif}(r, r_i))^2} \quad (16)$$

表示只考虑某一个点 r_i 的作用时, 其对 r 点的影响。为了避免分母为零, 实际重建中取

$$g(r, r_i) = \sqrt{1 - \left(\frac{|\nabla I_0(r_i)| \times d_{r_i} \times \cos \theta}{I_0(r_i) + 1} \right)^2} \quad (17)$$

综合考虑所有作用点时, 需对所有作用点的影响因子加权平均, 因此影响函数为

$$G(r, r_i) = \frac{g(r, r_i)k(r_i)}{\sum_{i=1}^{20} g(r, r_i)k(r_i)} \quad (18)$$

式中

$$k(r_i) = \begin{cases} 0 & r_i \in \text{缺损区域} \\ 1 & r_i \notin \text{缺损区域} \end{cases} \quad (19)$$

由于 $r_1 \sim r_{20}$ 一般不会全部位于已知区域, $k(r_i)$ 可避免将待修复点计算在内。

最后, 进行图像修复, 公式为

$$I(r) = \sum_{i=1}^{20} G(r, r_i) I_0(r_i) \quad (20)$$

3 仿真实验及结果分析

为检验所提模型的重建效果, 实验选择了多种类型的缺损图像, 且使缺损区域尽量覆盖图像中的纹理变化范围或边缘特征的大部分, 并对实验结果从主观效果、效率及峰值信噪比 3 个方面与 BSCB 算法、CDD 算法及 TV 算法进行比较。

3.1 对典型几何图形的重建

对典型几何图形进行修复及重建, 以比较上述各算法对几何图形边缘的修复及重建效果。

图 4(a) 是缺损图像, 白色区域为缺损区域, 该区域覆盖了图像中的两条不同边缘。可以看到, 前 3 种算法对该图形边缘的修复存在不同程度的模糊, 而本文算法的重建则清晰准确。

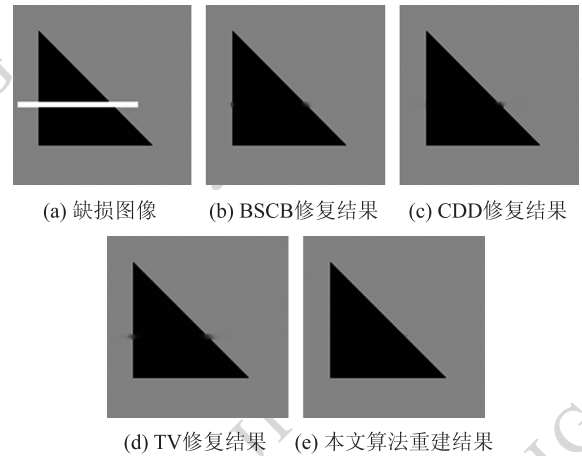


图 4 对几何图形 Image1 的修复及重建效果

Fig. 4 Repair and restoration effects for geometric graph Image1

选择缺损区域所覆盖的边缘特征更为多样的一幅几何图形, 来比较几种算法的效果。图 5(a) 为缺损图形, 其中灰色区域为缺损区域, 该缺损区域对图像中所有的几种边缘都有覆盖; 实验结果显示, 前 3 种算法都未能成功修复出该图形的边缘; 本文算法则清晰地重建出该图形的边缘, 只是重建后的边缘还不完全光滑; 该实验同时说明本文算法对不同方向的缺损具有鲁棒性。

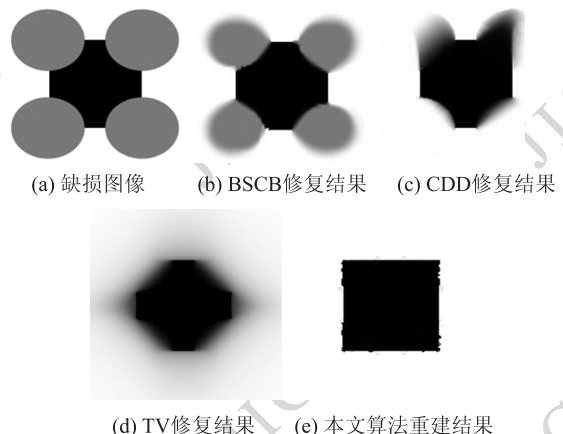


图 5 对几何图形的重建及修复

Fig. 5 Repair and restoration effects for geometric graph

3.2 对灰度图像的重建

先选择纹理及边缘细节丰富的一幅灰度图像, 对其边缘及纹理区域各作多种类型的破坏, 且令缺损区域覆盖图像中的大部分纹理变化范围及边缘, 以便全面比较各算法的效果, 实验结果如图6所示。



图6 对灰度图像 Image2 的修复及重建效果

Fig. 6 Repair and restoration effects for gray image Image 2

缺损图像图6(a)中, 白色区域为缺损区域。从图6可以看到, 对较大的斑点, BSCB 算法修复后还会有较为明显的亮斑。对帽沿等边缘处的较粗划痕的修复前3种算法存在不同程度的模糊, 其中 BSCB 及 TV 算法的模糊较为明显, CDD 算法的模糊程度较轻, 本文算法对该处边缘的重建则比较清晰。对图像左上角柱状边缘处的较大斑点, 几种算法修复或重建效果皆不理想, 但有所区别: 前3种算法对该缺损区域进行了程度不同的模糊化, 本文算法对该部分边缘的重建虽然清晰,

但也未能完整重建。

为进一步比较各算法对图像边缘的修复及重建效果, 再选一幅边缘细节丰富的图像, 同样作几种不同类型的破坏, 且令缺损区域覆盖几乎全部的纹理变化范围及边缘, 如图7(a)。实验结果如图7所示。



图7 对灰度图像 Image3 的修复及重建效果

Fig. 7 Repair and restoration effects for gray image Image3

图7(a)中白色区域为缺损区域; 从实验结果可以看出, 本文算法对边缘(人物肩膀、衣服及相机支架)的重建比前3种算法更清晰准确。

3.3 对彩色图像的重建

最后选取一幅有着较复杂的纹理信息的彩色图像进行修复对比, 以比较各算法对彩色图像纹理细节的修复及重建效果; 由于前面选的实验图像尺寸都较小, 为方便后面对3种算法的修复时间作全面的比较, 选取一幅尺寸较大的彩色图像进行破坏并

修复,同样对大部分纹理变化范围及边缘处作几种不同类型的破坏,如图 8(a)所示。



图 8 对彩色图像 Image4 的修复效果

Fig. 8 Repair and restoration effects for colour image Image4

图 8(a) 是缺损彩色图像,红色区域为缺损区域。可以看到这几种算法的修复都保持了较好的整体视觉效果,为进一步比较,将图 8(b)—(e) 中同一位置局部纹理细节放大如图 9 所示。

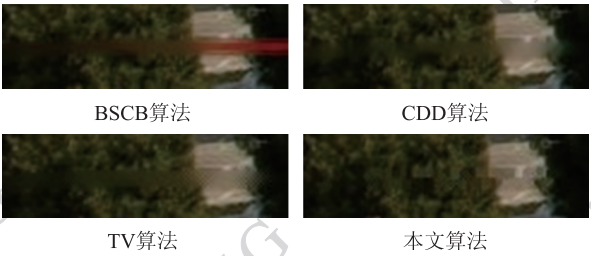


图 9 局部放大图

Fig. 9 Local amplification of the images in fig. 8

可以看出,较之前 3 种算法,本文算法对纹理细节的重建效果更加清晰自然。

3.4 修复或重建时间及峰值信噪比的比较

表 1 列出了上述 4 种算法的修复或重建时间及峰值信噪比 (PSNR)。Image1—Image4 图像尺寸各不相同,便于比较图像大小对几种算法修复或重建时间的影响;同时对 Image2 和 Image4 分别做了两种程度不同的破坏,缺损像素数相差较大,以便比较缺损区域大小对各算法修复及重建时间的影响。

表 1 几种算法的修复时间及峰值信噪比对比表

Table 1 Comparison of efficient and PSNR

图像	图像总像素数	缺损像素数	修复时间/s				PSNR/dB			
			BSCB	CDD	TV	本文	BSCB	CDD	TV	本文
Image1	128 × 128	344	2	35	4	1	36.7	37.9	34.8	52.0
Image2	512 × 512	23 288	57	2 520	153	48	35.3	37.5	35.2	35.3
	512 × 512	1 840	48	297	50	4	45.8	46.5	44.6	45.0
Image3	256 × 256	4 185	9.0	105	28	10	35.5	36.7	34.5	35.6
	256 × 256	812	7.4	419	13	2	44.4	44.2	43.5	43.3
Image4	686 × 1 024 × 3	26 574	382	6 670	2 231	56	37.8	39.6	39.5	37.7
	686 × 1 024 × 3	5 488	354	2 155	1 258	13	45.2	46.3	44.3	43.8

由表 1 可以看到,BSCB 算法修复时间主要受图像本身大小的影响;CDD 算法和 TV 算法修复时间受图形本身大小和缺损区域大小的影响都较大;而本文算法修复时间几乎完全由缺损区域大小决定。对表中修复时间进行横向比较,看到本文算法修复效率较前三种算法要高,图像尺寸越大,本文算法在效率方面的优势越明显。从 PSNR 来看,CDD

算法明显优于其他几种,本文算法与 BSCB 和 TV 算法针对不同类型的图像及不同种类的破损,各有优势。

综上所述,本文算法与前 3 种算法对图像的重建或修复整体视觉效果都较好;由于本文重建模型注重对每一个缺损像素点的重建,在重建过程中对每一个缺损点都进行计算赋值,使得本文算法对边

缘及纹理细节的重建较为清晰准确;但因为梯度及影响函数的计算精度还不够,导致本文算法对边缘细节的重建精度不够高,还不能完全准确地重建边缘;由于本文重建模型避免了重复迭代及高阶偏导的计算,具有较高的效率,尤其是对大尺寸图像,本文算法的重建时间优势比较明显。

4 结 论

目前的图像修复算法是以人眼难以察觉为目标,注重的是图像视觉效果,而不追求重建的准确性。采用稳定场作为图像局部纹理的数学物理描述,提出一种基于点源影响函数的图像修复模型,针对每一个缺损像素点,考虑周围各已知像素点对它的影响,将这些影响叠加来计算缺损像素点的值;继而根据该场的方向导数,分析缺损像素点与各已知点的相似性及差异性,确定了一个点源影响函数的计算方法,用以对上述模型进行实现。最后实验结果表明,所提算法能够比较清晰地重建图像的边缘及纹理细节,同时还保持了较好的视觉效果。由于重建过程避免了重复迭代和高阶偏导的重复计算,算法具有较高的效率。

参考文献 (References)

- [1] Bertalmio M, Vese L, Sapiro G, et al. Image inpainting [C] // Proceeding of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Louisiana; New Orleans USA: SIG-GRAPH ACM, 2000: 417-424.
- [2] 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. [DOI: 10.1006/jvci.2001.0487]
- [3] Chan T F, Shen J H. Mathematical models for local non-texture inpainting [J]. SIAM Journal of Applied Mathematics, 2001, 62(3): 1019-1043.
- [4] Ye X Y, Wang J, Zhao Z J, et al. Robust gradient driving image inpainting method [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(6): 630-635. [叶学义, 王靖, 赵知劲, 等. 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.] [DOI: 10.11834/jig.20120603]
- [5] Wu Y D, Zhang H Y, Wu B. Digital Image Inpainting [M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-19. [吴亚东, 张红英, 吴斌. 数字图像修复技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-19.]
- [6] Landau L D, Lifshitz E M, Holbrow C H. The classical theory of fields [J]. Physics Today, 1963, 16(6): 72-73. [DOI: 10.1063/1.3050989]
- [7] Le Q Z, Cui J Z. Transmission Fundamentals [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 1-16. [乐启焱, 崔建忠. 传输过程基本原理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 1-16.]
- [8] Yang H J. Methods of Mathematical Physics and Simulation. [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005: 31-54. [杨华军. 数学物理方法与仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 31-54.]
- [9] Gimel' farb G. Modeling image textures by Gibbs random fields [J]. Pattern Recognition Letters, 1999, 20 (11): 1123-1132. [DOI: 10.1016/S0167-8655(99)00079-3]
- [10] Ward R S. Stabilizing textures with magnetic fields [J]. Physical Review D, 2002, 66 (4): #041701 (1-11). [DOI: 10.1103/PhysRevD.66.041701]
- [11] Liu L S, Wang Z Q, Li G X. Methods of Mathematical Physics. [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2004: 117-118. [刘连寿, 王正清, 李高翔. 数学物理方法 [M]. 2 版. 北京: 北京高等教育出版社, 2004: 117-118.]