

改进的 Criminisi 图像修复算法

刘业妃,王福龙,奚祥艳,刘志煌

(广东工业大学 应用数学学院,广州 510520)
E-mail:liuyefei1988@126.com

摘 要: 数字图像修复技术是对图像上信息缺损区域进行信息填充并使观察者无法察觉出图像曾经破损或已被修复. 针对 Criminisi 算法随着修复的进行置信度迅速降为零而造成修复顺序出现偏差的不足,提出一种改进的优先级函数. 将优先级函数表示为置信度项和数据项的加权和,并将置信度项修改为指数函数形式以平滑其迅速降为零的趋势,从而使得修复顺序更加准确. 此外,对优先级函数中的置信度项和数据项选取不同的权重因子可得到不同的修复图像供用户选择. 实验结果表明,该算法取得了较好的修复效果.

关键词: 图像修复;优先级函数;置信度;指数函数;权重因子
中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1220(2014)12-2754-05

Improved Algorithm for Image Inpainting Based on Texture Synthesis

LIU Ye-fei, WANG Fu-long, XI Xiang-yan, LIU Zhi-huang
(School of Applied Mathematics, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China)

Abstract: Image inpainting is one of the technology, which can reach restore image information and is not easy to detected by people. This paper proposes a new priority function to improve the deficiency of inaccuracy the priority function of Criminisi algorithm has. This method modifies the priority function from multiplication into addition and introduces exponential function to smooth the tendency that confidence term drop to zero dramatically, which can improve the priority computation precision. At the same time, this paper sets the weighting factor for a variety of restoration image for users to choose. Experimental results show that the proposed method achieves better inpainting effect.

Key words: image inpainting; priority function; confidence term; exponential function; weighting factor

1 引 言

图像修复是指利用图像待修补区域的邻域信息对图像缺损区域按照一定规则进行填充的过程,其目的是尽可能地使修复后的图像接近原来的视觉效果,且使人眼观察不到修复的痕迹. 图像修复是图像处理研究的热门课题之一,主要用于古文字物画、破损老照片的修复以及文字或图像的移除.

近年来出现了很多图像修复算法,总体上可以分为基于结构的修复算法和基于纹理合成的修复算法. Bertalmio 等人在 2000 年提出了基于偏微分方程(PDE)的数字图像修复算法^[1],该算法是利用待修复区域周围的信息,采用一种由粗到精的方法来估计等照度的方向,将已知信息传播到待修补区域内,得到了较好的修复效果. 随后更多更复杂的 PDE 模型被提出^[2-4]. 基于 PDE 图像修复技术,对处理图像中的划痕等小尺度破损有较好的复原效果,然而,当破损处及其周围的纹理非常丰富时,修复后的效果往往产生模糊效果.

另一种是基于样本的纹理合成图像修复算法, Criminisi 等人^[5]提出一种基于优先级的纹理合成修复算法,该算法的主要思想是,通过计算修补区域边界上所有点的优先级,选取优先级最高的像素,以该像素点为中心,生成大小合适的纹理块,然后在破损区域周围寻找与之最相似的纹理匹配块进行

填充. 这种算法是以纹理块为单位而不是以像素点为单位^[6]的修复过程,故时间复杂度有所降低. 该算法在修复大面积破损区域获得了满意的效果,但优先权的计算和匹配块选取的准则存在一定的不足,容易受到破损区域结构纹理特征的影响,准确性较低. 由此大量研究者开始研究 Criminisi 算法,并提出了相关改进算法^[10-13]. 文献[7,8]采用梯度项代替数据项与置信度构成优先级的计算公式,决定待修复边界像素点的填充次序. 文献[9]缩小纹理块搜索的范围,采用局部窗口搜索策略,加快了算法运行速度. 文献[14]根据待修复区域的纹理特征,选取不同的模板大小,修复效果较好,适用于大面积破损的图像修复. Wu^[15]采用不同于 Criminisi 算法提出的等照度线方向,而是垂直于等照度线的方向进行修复. 这种算法更有利于边界结构突出的图像修复,在修复效果上有所提高. Nie^[16]对优先级函数中的置信度项和数据项进行归一化,且改变了匹配块的选取准则,避免了多次使用同一纹理块进行填充. 很多算法着重物体边缘的修复^[17],先根据图像上物体的轮廓特征将受损区域分割成不同的区域,再逐一对每个区域的纹理结构特征选取不同算法进行修复.

由于 Criminisi 算法实现简单、快速、效果好,故而得到了广泛地应用. 该算法的关键是确定破损区域的修复顺序,而修复顺序依赖于优先权函数的计算. 文献[12]指出, Criminisi

收稿日期:2013-08-16 收修稿日期:2013-10-09 基金项目:广东省自然科学基金项目(S2011040004273)资助. 作者简介:刘业妃,女,1988 年生,硕士研究生,研究方向为图像处理与模式识别;王福龙,男,1968 年生,教授,主要研究方向为信号与图像处理;奚祥艳,女,1988 年生,硕士研究生,研究方向为图像处理;刘志煌,男,1980 年生,博士,讲师,主要研究方向为自动控制、运动物体的跟踪等.

算法随着修复的进行置信度迅速下降为零,从而优先权函数计算的准确性降低,导致修复块的填充次序出现偏差,最终影响图像的修复效果。

针对 Criminisi 算法的上述缺点,大量学者通过不同角度对 Criminisi 算法进行了改进。林云莉等人^[18]引入补偿系数和加权系数分别对置信度项和数据项进行改进,优先修复边缘结构较强的区域。黄淑兵等人^[19]通过增加边界项来改进优先权函数,并针对不用图像选取不同的参数,在某种程度上提高了修复效果,但容易出现模糊现象。文献[20]提出一种优先级递减法,即利用合适的递减因子使强边缘所在的数据块优先级降低。但上述文献并没有很好的解决优先级计算的稳定性,具有局限性。因此,本文对优先权函数进行改进,使得改进之后的优先权函数避免随着算法迭代的进行置信项趋于零而导致修复顺序出现偏差的问题,从而提高了修复的准确性,获得了更满意的视觉效果。

2 Criminisi 算法介绍

Criminisi 算法的核心是考虑了待修复区域的填充优先顺序,即先计算边界轮廓上所有目标块的优先权,具有高优先权的目标块优先填充并获得更新。

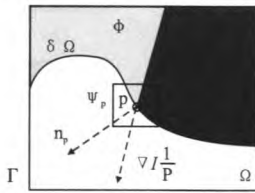


图 1 符号标志图

Fig. 1 Symbols figure

为了更好的阐释,我们利用图例来说明。各种符号标于图 1,其中 I 为整幅图像, Ω 为空白区域,即待修复的目标区域; Φ 为源区域,即完好区域; $\delta\Omega$ 为目标区域的边缘; Ψ_p 是以 p 点为中心的 9×9 正方形小块; n_p 为 $\delta\Omega$ 在 p 点的切线的单位法向量, ∇I_p^\perp 为 p 处梯度的垂直方向,即等照度线的方向。

2.1 计算待修复块的优先级

修复过程从填充边缘 $\delta\Omega$ 开始,通过置信度项和数据项计算填充边缘的每个像素的优先值:

$$P(p) = C(p) \times D(p) \tag{1}$$

其中, $C(p)$ 代表置信度项, $D(p)$ 代表数据项,定义:

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

$$D(p) = \frac{|\nabla I_p^\perp \cdot n_p|}{\alpha} \tag{3}$$

其中 $|\Psi_p|$ 是 Ψ_p 的面积, α 为归一化因子(对于灰度图像, α 取 255)。 ∇I_p^\perp 代表 p 点的等照度线的方向,可用灰度梯度表示,即 $\nabla I_p^\perp = (-I_y, I_x)$ 。 I_x 和 I_y 分别表示 x 方向和 y 方向的梯度。

2.2 最佳匹配块的选择

找到优先级最高的像素点 p ,以该点为中心生成待修复块 Ψ_p 。在源区域(即 Φ)寻找与 Ψ_p 已知部分像素平方差和最小的最优匹配块 Ψ_q (即 SSD 准则),用 Ψ_q 替代当前待修复

块。定义:

$$\Psi_q = \operatorname{argmin}_d(\Psi_p, \Psi_q) \tag{4}$$

$$d(\Psi_p, \Psi_q) = \sum (r(x) - r(y))^2 + (g(x) - g(y))^2 + (b(x) - b(y))^2 \tag{5}$$

其中 $x \in \Psi_p \cap \Phi$, y 为在 Ψ_q 中对应位置的点, r, g, b 为点的颜色值。

2.3 置信度的更新

当 Ψ_p 中的破损区域被填充完后,更新受损区域边界 $\delta\Omega$,即:

$$C(p') = C(p) \tag{6}$$

其中, $p' \in \Psi_p \cap \Omega$ 。重复以上三个步骤,直到整个目标区域 Ω 被填充完毕。

3 改进算法

3.1 Criminisi 算法优先权函数的分析

Criminisi 算法核心思想是考虑了待修复块的修复顺序,提出了按优先级的顺序进行修复。我们对图像修复过程中置信度,数据项以及优先权值的变化情况进行绘图,如图 2 所示。从图中可看到随着算法的进行,置信度项急剧地下降到零,从而使得优先权的变化趋势与置信度项的变化趋势一致,导致优先权的计算变得不可靠,最终待修复块的优先级出现偏差,甚至在算法的后期出现随机选择待修复块进行修复的情况。此外,当等照度线的方向与单位法向量的方向垂直时,这时,即使 $C(p)$ 很大,待修复块也得不到及时的填充,最终影响修复效果。

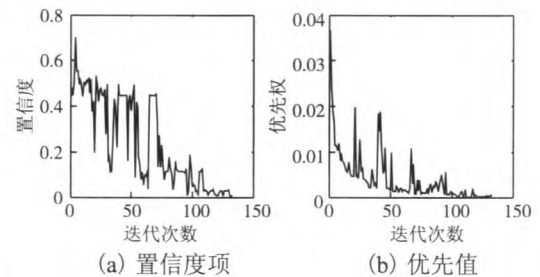


图 2 Criminisi 算法置信度项和优先值的变化情况

Fig. 2 Behavior illustrations of confidence term, data term and priority function for Criminisi algorithm

下页图 3 给出一组由 Criminisi 算法修复的图片。可以看出在修复初始阶段窗的水平与垂直结构都能得到正确的修复,当修复到 130 代如图 3(d) 所示,由于置信度项迅速下降为零,优先权函数的计算变得不准确,窗棂的结构出现了较为明显的误差。

3.2 Criminisi 算法优先权函数的改进

Criminisi 算法定义的优先权函数表示为置信度项 $C(p)$ 和结构项 $D(p)$ 的乘积,而乘法对于因式趋于零的情况较为敏感,加法则相对更加的稳定。基于此,本文提出一种改进的优先级函数,将优先级函数表示为置信度项和数据项的加权和。同时为了克服 $C(p)$ 下降过于剧烈的缺点,将置信度项改为指数函数的形式,即 $e^{C(p)}$,以平滑 $C(p)$ 的变化趋势。由于 e^x 在 x 趋于 0 时变化会相对的平缓,故将置信度项改为指数函数形式能够抵消 $C(p)$ 迅速下降为零所产生的影响。

因此,本文对优先级进行如下改进,令:

$$P(p) = \alpha \times e^{C(p)} + \beta \times D(p) \tag{7}$$

其中 α, β 为权重因子。

公式(7)定义的置信度项具有如下优点:首先,由前面的定义,易得 $0 \leq C(p) < 1$, 则 $e^{C(p)}$ 的取值范围为 $[1, e)$ 。避免出现置信度项急剧降为零的情况,提高了优先级计算的可靠性;其次, $e^{C(p)}$ 并没有改变 $C(p)$ 的变化趋势,只是规则化地将取值范围调大;最后, $e^{C(p)}$ 具有更好的光滑性,避免了因 $C(p)$ 的急剧变化而导致算法的波动性过大,使得算法的稳定性变得更强。

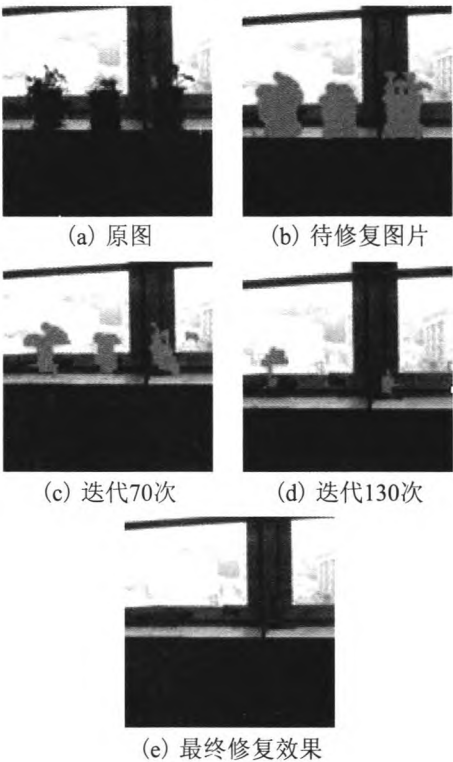


图3 Criminisi 算法修复过程
Fig. 3 Processing of Criminisi algorithm

我们针对改进后的优先权函数进行实验,结果如图4所示。从图4(a)可以明显看出,改进优先权函数后的置信度项变

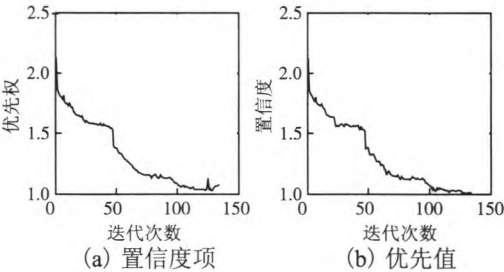


图4 本文改进算法置信度项和优先值变化情况
Fig. 4 Behavior illustrations of confidence term and priority function for improved algorithm

化比较平缓,并且趋于1,不会出现急剧降为零的情况。同样从图4(b)可以看出随算法迭代的进行,优先权的变化更加平稳,优先权计算的可靠性得到提高。

3.3 权重因子的选择

在不同的图像中,纹理信息和结构信息占的比重不同,则置信度项和数据项的相对重要程度也不相同。我们对图5(a)分别用不同的 α, β 取值进行对比试验。该图并不复杂,但待修复区域恰好位于黑色区域和灰色区域的交界处,结构信息比较明显,对于说明 α, β 不同取值对修复结果的影响具有一定的代表性。图5(b)表示的是 $\alpha = \beta$ 时图像的修复效果,可以明显的看出交界处的修复错误。图5(c)表示的是 α, β 分别取0.01和0.99时的修复效果。由于增大了结构项的比重,图5(c)的修复效果较图5(b)有了明显地提高,但是依然有少量的黑色像素被错误地填充到灰色区域中。随后我们将 α, β 的值分别调整为0和1,即在优先权的计算时只考虑结构项,结果如图(d)所示。显然此时的修复结果最好,符合人眼主观视觉连续性。因待修复图像中黑色和灰色区域区分较明显,应优先修复位于黑色区域和灰色区域交界处的像素,故数据项占的比重较大。

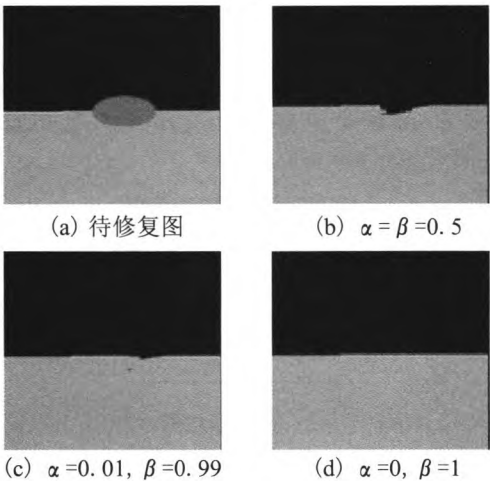


图5 设置不同权重因子的修复效果
Fig. 5 Repair effect figure of setting of different component weights

综上所述,为了提高修复效果, α, β 可根据不同图片的结构纹理信息丰富与否选取不同的值。如果目标区域周围含有较多结构信息,则 β 取较大的值,以满足结构先于纹理修复的原则;如果待修复块周围纹理信息量大,则 α 取较大的值。根据具体的情况动态的调整参数值,使修复出来的图片具有更好的视觉效果。

4 实验结果

本文算法的有效性,是通过大量的图像进行试验来验证的,在这里取四组实验进行分析说明。所有实验是在配置为2.69GHz处理器,2GB内存的计算机上运行,仿真环境为VC++6.0。本文采用主观对比图像的视觉效果和客观评价即峰值信噪比(PSNR)来判断修复质量的好坏。峰值信噪比的定义为:

$$\text{均方根误差: } MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - u_i)^2 \tag{8}$$

$$\text{峰值信噪比: } PSNR = 10 \cdot \log\left(\frac{255^2}{MSE}\right) \tag{9}$$

其中, n 表示图像像素的个数, x_i 和 u_i 分别表示原图像和修复后的图像。

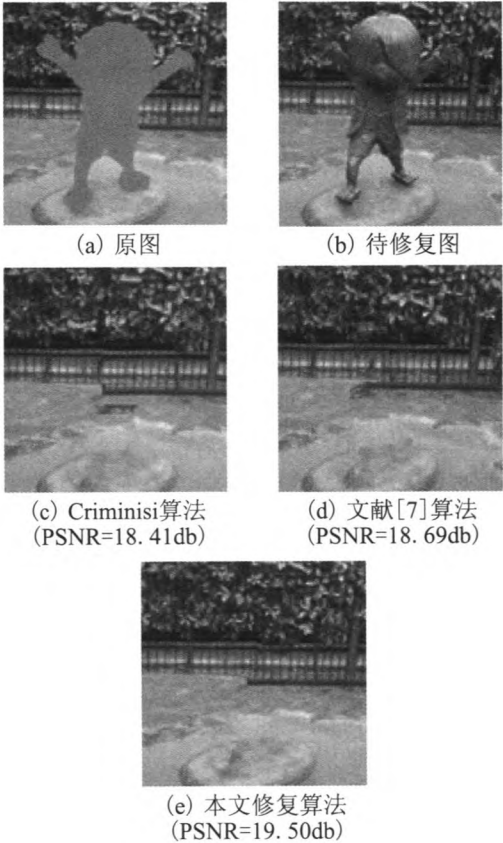


图 6 statue 修复效果比较
Fig. 6 Repair effect figure of statue

图 6 给出了不同算法对 statue 图像的修复效果. 图 6(c) 是Criminisi算法对statue的修复结果, 可以看到栏杆的结构修复良好, 但栏杆的纹理延伸到了其它部分. 此外, 花丛中间出现了断裂的情况, 整体连接性较差. 因为修复初期优先权函数计算较为准确, 故栏杆的结构与纹理部分修复较好. 可是随

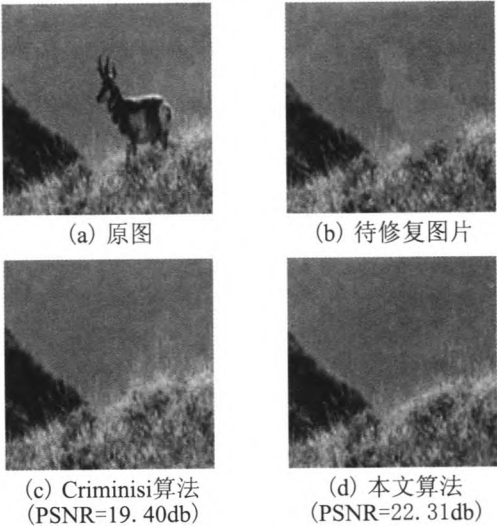


图 7 sheep 修复效果比较
Fig. 7 Repair effect figure of sheep

着修复的进行, 置信度急速下降到零导致优先权函数的计算变得不准确, 最终修复效果出现瑕疵. 文献[7]算法的修复结

果中, 栏杆纹理延伸到地面, 且花丛中间出现了错误的填充. 本文改进算法弥补了以上两种算法的不足, 通过设置合适的权重因子, 将栏杆, 地面, 花丛三部分的结构与纹理部分修复较好, 视觉效果上达到最佳.

图 7 表示移除羊后的修复效果图比较. 由图 7(c) 可以看出, Criminisi 算法修复的草丛有明显的人工痕迹. 在羊站立处, 枯草被过度的填充与延伸. 图 7(d) 是本文改进算法的修复效果, 从图 7(d) 可看出本文算法在保持结构一致性上效果更好, 也更符合人眼的主观视觉.

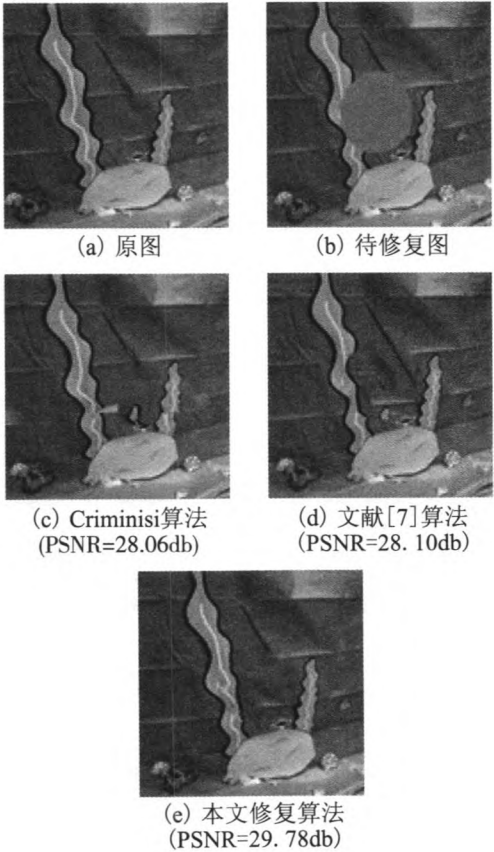


图 8 sea 修复效果比较
Fig. 8 Repair effect figure of sea

本文算法和文献[7]算法以及 Criminisi 算法修复结果的比较如图 8 所示. Criminisi 算法对两颗草边缘和结构部分修复较差, 而且图片的左边和两颗草中间出现了错误的填充. 文献[7]算法对右边草的结构与纹理部分修复较好, 但是对左边草边缘的修复造成了部分的缺失, 同时又延伸了部分纹理, 整体修复效果较差. 本文算法对整幅图像的结构与纹理结构修复较好, 而且没有出现错误的匹配. 虽然修复结果中左边草内部的曲线弯曲, 但较之前两种算法, 整体上视觉效果较好.

本文改进算法中权重因子的选取具有较好的灵活性, 可以针对不同用户的偏好灵活设置. 下页图 9 是分别用 Criminisi 算法和本文改进算法取不同权重因子对原图像白兔进行移除的修复效果. 从图 9(c) 可看出, 原白兔区域的中部有较为明显的修复痕迹, 整体效果不自然. 图 9(d) 至图 9(h) 分别是本文改进算法取不同权重因子得到的修复效果. 这几幅图在细节部分有所差异, 但都取得了较好的修复效果, 最终的选

取可以根据不同用户的喜好决定. 因此, 本文改进算法可以根据用户不同的偏好提供多种修复结果.

5 结 论

针对Criminisi算法在修复过程中优先级计算不准确这一

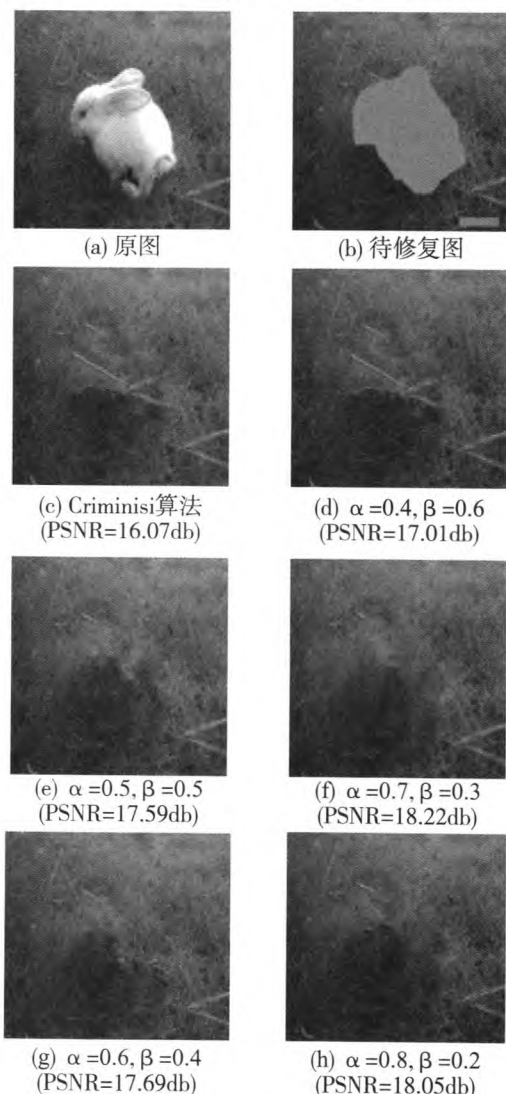


图9 不同权重因子的 rabbit 图像修复比较
Fig.9 Repair effect figure of setting of different component weight

缺点, 本文提出一种新的优先级计算公式. 该公式将原来的乘法运算改为加法运算, 同时将置信度项修改为指数函数形式以平滑置信度项的急剧变化趋势, 提高了优先权计算的准确性. 此外, 本文算法根据不同图像的纹理结构信息调节权重因子, 通过设置不同的权重因子得到不同的修复效果, 以满足不同用户的需求, 具有一定的灵活性. 仿真实验分析表明, 本文算法相比于 Criminisi 算法和其他相关算法取得了更好的修复效果.

References:

- [1] Zhang Hong-ying, Peng Qi-cong. A survey on digital image inpainting[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(1): 1-10.
- [2] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V, et al. Image inpainting[J]. Proceedings of International Conference on Computer Graphics and In-

- teractive Techniques, New Orleans, USA, 2000, 30(51): 417-424.
- [3] Chan T F, Shen J H. Mathematical models for local non-texture inpainting[J]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002, 62(3): 1019-1043.
- [4] Esedoglu S, Shen J H. Digital inpainting based on the mumford-shah-euler image model [J]. European Journal of Applied Mathematics, 2002, 13(4): 353-370.
- [5] Criminisi A, Perez P, Toyama K. Region filling and object removal by exemplar image inpainting[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(9): 1200-1212.
- [6] Bertalmio M, Vese L, Sapiro G, et al. Simultaneous structure and texture image inpainting[J]. IEEE Transactions on Image processing, 2003, 12(8): 882-889.
- [7] Huang Hui-yu, Chun Nan Hsiao. A patch-based image inpainting based on structure consistence [J]. IEEE Transactions on Image processing, 2010, 12(8): 882-229.
- [8] Dai Shi-mei, Zhang Hong-ying, Zeng Chao. A fast algorithm of exemplar based image completion [J]. Application of Electronic Technique, 2010, 29(22): 36-39.
- [9] Zhou H, Zhang J. Adaptive patch size determination for patch-based image completion[C]. Proceedings of 2010 IEEE 17th International Conference on Image Processing, Hong Kong, China; IEEE, 2010, 421-424.
- [10] Hu Wen-jin, Wang Wei-lan, Liu Zhong-min. A fast algorithm of exemplar based image inpainting [J]. Data Acquisition and Processing, 2011, 26(11): 626-630.
- [11] Kwok T, Sheung H, Wang C C L. Fast query for exemplar-based image completion [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2010, 19(12): 3106-3115.
- [12] Cheng W H, Hsieh C W, Lin S K, et al. Robust algorithm for exemplar-based image inpainting [C]. The International Conference on Computer Graphics. Imaging and Vision, 2005, 64-69.
- [13] Li J J, Zhang C M, Fan H, et al. Image inpainting algorithm based on fractal theory [J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 38(10): 2430-2435.
- [14] Drori I, Cohenor D, Yeshurun H. Fragment-based image completion [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 303-312.
- [15] Wu Ji-ying, Ruan Qiu-qi. Object removal by cross isophotes exemplar-based inpainting [C]. 18th International Conference on Pattern Recognition, Hong kong, 2006, 4(3): 810-813.
- [16] Nie Dong-dong, Ma Li-zhuang, Xiao Shuang-jiu. Similarity based image inpainting method [C]. 12th International Multi-Media Modelling Conference Proceedings, IEEE Transaction, 2006, 4(12): 344-348.
- [17] Celia A. Nad Adriana M. Maritins. Level lines continuation based digital inpainting [J]. Computer Graphics and Image Processing, IEEE, 2004: 1530-1534.
- [18] Lin Yun-li, Zhao Jun-hong, Zhu Xue-feng, et al. An improved algorithm for image inpainting based on texture synthesis [J]. Computer Application and Software, 2010, 27(10): 11-12.
- [19] Huang Shu-bing, Zhu Xiao-lin, Xu Yun-yun. An improved algorithm for image inpainting based on texture synthesis [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2011, 34(2): 313-320.
- [20] Zhu Wei, Li Guo-hui. Application of texture synthesis in old photograph completion [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(28): 220-222.

附中文参考文献:

- [1] 张红英, 彭启琮. 数字图像修复综述 [J]. 中国图像图形学报, 2007, 12(1): 1-10.
- [8] 代仕梅, 张红英, 曾超. 一种基于样例的快速图像修复算法 [J]. 电子技术应用, 2010, 29(22): 36-39.
- [10] 胡文瑾, 王维兰, 刘仲民. 一种基于样本块的快速图像修复算法 [J]. 数据采集与处理, 2011, 26(11): 626-630.
- [18] 林云莉, 赵俊红, 朱学峰, 等. 改进的纹理合成图像修复算法 [J]. 计算机应用软件, 2010, 27(10): 11-12.
- [19] 黄淑兵, 朱晓临, 许云云. 一种改进的基于纹理合成的图像修复算法 [J]. 合肥工业大学学报, 自然学报, 2011, 34(2): 313-320.
- [20] 朱为, 李国辉. 纹理合成在旧图片中的应用 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(28): 220-222.