

一种改进的基于样图的图像修复算法

戴磊¹ 李尚同² 黄轲³ 姜代红¹

(1. 徐州工程学院信电学院, 徐州, 221018; 2. 徐州市公安局科技处, 徐州, 221000; 3. 江苏师范大学数学与统计学院, 徐州, 221116)

摘要: 图像修复的目的是填补有信息缺损的图像, 并使观察者无法察觉出图像的填补痕迹。分析了图像修复技术中的 Criminisi 算法, 针对它的不足, 提出一种新的改进算法。新算法从 4 个方面加以改进: 使用了新的优先权计算函数, 优化了优先权大小选择的计算, 避免了因模板数据项迅速衰减带来的错误填充次序; 利用 Sobel 算子改进等照度线计算, 使等照度线上的点优先被修复; 采用新的匹配方法, 将查找匹配的范围锁定在破损区域的边缘。最后为了平滑置信值更新导致的误差传播, 定义了新的置信值更新方程。实验结果证明, 本文图像修复算法不但可以改善图像修复质量, 还可以提高图像修复效率。

关键词: 图像修复; Sobel 算子; 等照度线; 置信值

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Improved Exemplar-Based Image Restoration Algorithm

Dai Lei¹, Li Shangdong², Huang Ke³, Jiang Daihong¹

(1. Department of Information and Electrical Engineering, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou, 221018, China; 2. Science and Technology Department, Xuzhou Municipal Public Security Bureau, Xuzhou, 221000, China; 3. School of Mathematics and Statistics, Jiangsu Normal University, Xuzhou, 221116, China)

Abstract: Image inpainting technique aims at infilling the images with missing or damaged portions in a way that they will be non-detectable for an observer. The Criminisi algorithm in the image inpainting is introduced. An improved algorithm is proposed to tackle the existing problem. These new improvements are in four aspects. Firstly, a new priority function is used to adjust the order of the selected pixel block, and therefore the incorrect filling order caused by rapid decay of data term is avoided. Secondly, a Sobel operator is introduced to improve computing method of isophote intensity, making the inpainting order along the isophotes. Thirdly, a new matching searching method to identify the samples in the neighborhood of the damaged region based on similarity is employed. Finally, to smooth the propagation of error in updating the confidence value, a new formula is defined. Experimental results show the improved algorithm can get a satisfied inpainting result and improve repairing efficiency.

Key words: image inpainting; Sobel operator; isophote; confidence value

引言

作为图像处理的一个重要应用,图像复原的主要目的是在人眼可以接受的程度下对破损的图像进行修复,它的应用领域包括艺术品的修复、计算机动画、影视特技以及虚拟现实等各个方面。目前比较经典的图像修复算法主要集中于两大类:(1)图像润饰的方法,该方法首先由 Bertalmio^[1]等引入到数字图像,使用基于偏微分方程的修复模型,基于此思想的方法还有 Chan^[2]提出的整体变分模型以及基于曲率驱动扩散模型等^[3,4]。这些方法对有瑕疵的图像破损有较好的修复效果,但修复较大区域效果模糊,且对纹理较强的破损区域修复效果差。(2)基于纹理合成的图像修复方法,适用于修复大面积的破损。其中最经典的算法由 Criminisi^[5]等提出,该算法在基于样本的纹理合成算法基础上,再融合图像润饰结构扩散的特点,修复效果较好。在此基础上,国内外一些学者也提出了一些改进算法^[6-12]。文献[7]利用小波变换进行图像修复,但需要依赖图像分解、结构修复及纹理合成这3种技术,比较繁琐;文献[9]利用邻域特性选择待修复样本块模板大小,该算法对纹理部分修复较好,但容易产生纹理重叠;文献[6,10]提出了基于匹配块的图像修复算法,修复效果较好,但计算代价过大。除了以上主要算法外,近年来,国内学者还提出了另外一些基于稀疏重构的图像修复方法,典型的算法有文献[13]。

本文通过分析 Criminisi 算法及其存在的问题,从优先级计算、数据值计算、匹配区域的搜索和置信值更新4个方面进行改进,实验结果证明,改进算法修复效果和运行效率比原算法有了进一步提高。

1 Criminisi 算法及存在问题

1.1 Criminisi 算法

如图1(a)所示,设有图像 I ,待填充的目标区域为 Ω ,轮廓线为 $\delta\Omega$,源区域为 $\Phi(\Phi=I-\Omega)$ 。目标区域内沿轮廓线的方形模板 Ψ_p 。中心点 p 在轮廓线 $\delta\Omega$ 上,模板 Ψ_p 应包含了一部分已合成的像素。模板内的每个像素点都有一个颜色值和置信值(该点为1表示已填充,为0表示还未填充)。轮廓线上的每个模板建立一个暂时的优先级,它决定了每个模板被填充的优先顺序。模板填充的顺序是从外向内逐步填充,可充分利用已有的信息。初始化完成后,按照以下步骤循环执行,直到填充全部完成。

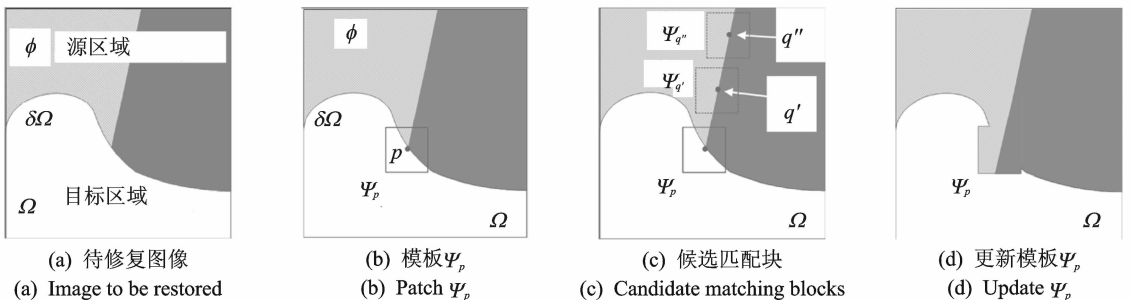


图1 基于样本的图像润饰

Fig. 1 Sample-based image inpainting

(1) 计算优先级。优先级的大小由两部分构成:一部分是该模板的数据值,另一部分是模板的置信度值,二者相互制约,共同构成优先级。这里的优先级计算式为

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

$$C(p) = \frac{\sum_{q \in \Psi_p \cap \Omega} C(q)}{|\Psi_p|}, \quad D(p) = \frac{|\nabla I_p^\perp \cdot n_p|}{\alpha} \quad (2)$$

式中: $C(p)$ 表示模板的置信度值; $D(p)$ 表示模板的数据值; $C(q)$ 表示模板内像素点的置信值。

初始化时,位于目标区域中的每个点的值设为 0,源区域中的每个点的值设为 1。 $|\Psi_p|$ 为模板 Ψ_p 的面积。 n_p 为轮廓线在 p 点的单位法向量, ∇I_p^+ 为在点 p 的等照度线的强度和方向。对于每一个模板,都将计算优先级,从而得到合成顺序。从式(1,2)可以看出,包含了较多的已填充像素的模板,置信度值较大,从而可信度较高,这些模板就将被优先填充;结构明显、包含线段突出的模板,数据值较大,从而保证这些模板可被优先填充。另一方面,数据值大的模板会使优先级倾向线段突出的部分,而置信度值大的模板则会抑止那些线段的突出,在这种情况下两者会取得一定的平衡。

(2) 扩散纹理和结构信息。对于轮廓线上的模板,找出优先级最高的一个进行匹配。方法是从源区域取样,寻找和该模板最匹配的模板,当搜索整幅图像的已知信息区域后,找到颜色平方差的和(Sum of color squared differences, SSD)最小的模板即为最优匹配模板,如图 1(c)所示。然后将相应的像素点复制填充到目标区域的模板中。这样一次完成填充,包括了纹理和形成的结构信息,如图 1(d)所示。同传统图像润饰算法传播信息通过扩散进行不同,该算法通过在源区域采样来传播信息,因此在填充较大的区域时不会出现模糊现象。

(3) 更新置信值。随着模板内剩余像素的填充完毕,重新更新该模板内像素的置信值。

1.2 算法存在问题

Criminisi 算法的缺陷主要表现在 3 个方面:(1)优先级的计算,随着填充过程的进行,模板数据值会迅速下降到零,这样使得计算出的优先级不可靠。因此会出现错误的填充顺序,最后影响修复效果。(2)采用全局搜索算法来寻找最优匹配块,这样不但会产生错误匹配,而且还会使填充速度变慢。(3)置信值的计算,对破损区域内原有的像素点和填充上去的像素点进行相同处理,意味着破损区域原有的像素点和填充上去的像素点一样可靠,没有考虑到本次修复的效果,算法容易导致修复效果越来越差,从而形成它的贪婪性。

2 算法的改进

2.1 优先级计算的改进

原算法用乘积的形式来决定优先权,在修补过程中,如果数据项为零,即使置信度项很高,由于优先级为零也不能得到优先修复。并且在修补过程中如果多个模板的 $D(p)$ 同时为零,会使它们的优先级也都为零,从而使 $C(p)$ 值失去了意义。综上所述,采取式(1)计算优先级往往不可信。参考文献[11],在 $D(p)=0$ 以及 $D(p)\neq 0$ 并且 $C(p)\geq 0.5$ 的条件下,将此计算改为加运算,即

$$P(p) = \begin{cases} C(p) & D(p) = 0 \\ \alpha C(p) + \beta D(p) & D(p) \neq 0 \text{ 并且 } C(p) \geq 0.5 \\ C(p)D(p) & D(p) \neq 0 \text{ 并且 } C(p) < 0.5 \end{cases} \quad (3)$$

式中: α 和 β 为调节参数,不考虑 $C(p)$ 等于零的情况(实际 p 点位于填充轮廓线上,待修复模板置信度值不会为零)。这样能保证当数据项为零时,只要置信度项足够高,也可以得到优先修复;与文献[11]不同的是,当数据项不为零且置信度项值大于等于 0.5 时,让数据项占主导因素,即采用结构优先的修复方法;而当数据项不为零且置信度项值小于 0.5 时,仍采用 Criminisi 算法的优先级计算方法,可使两项相互抑制,保证修复顺序从外围向内逐渐扩散。采用这样的优先项计算方法,即可以有效地解决 Criminisi 算法低纹理区域修复滞后的问题,也可以解决修复顺序完全按照线性结构的方向进行问题,有利于“断层”的消除。

2.2 等照度线计算的改进

在 Criminisi 算法中,等照度线 ∇I_p^+ 计算只是简单的用梯度方向来代替,该方法虽然可取,但是在面对纹理较多的图像时等照度线不能与周围信息有效融合,进而破坏到最终修复效果。为了解决这个问题,利用 Sobel 算子计算图像亮度函数的作用,将其用来计算等照度线。在使用 Sobel 算子时采用 3×3 模板,有

$$\nabla I_p^\perp = (\mathbf{g}_x, \mathbf{g}_y)^\perp = (\varphi_p \cdot \mathbf{h}, \varphi_p \cdot \mathbf{h}')^\perp \quad (4)$$

式中： \mathbf{h} 为水平方向的 Sobel 算子； \mathbf{h}' 为垂直方向的 Sobel 算子； φ_p 表示以边界上点为中心 3×3 的模板；与水平方向的 Sobel 算子 \mathbf{h} 相乘得到水平方向的梯度 \mathbf{g}_x ；与垂直方向的 Sobel 算子 \mathbf{h}' 相乘得到垂直方向的梯度 \mathbf{g}_y 。垂直正交向量即等照度线强度。在等照度线上的点会首先被修复，这样两个颜色区域的边界线会随着填充过程被保留延续下去，保留了图像的线性结构。

2.3 匹配区域及最优匹配块的改进

在 Criminisi 算法中，为了找到与轮廓线上优先级最大的模板最匹配的像素块，需要在整个图像源区域的已知信息中进行匹配，搜索空间由已知区域内的像素点组成的模板构成，且这个过程被不断调用，因此耗费时间较多^[10]。事实上，源图像中与待修复模板中信息相关的信息只存在于一定的区域中，根据马尔可夫随机场模型对纹理局部性和稳定性的认识^[9]，本算法将匹配区域限定在以待修复像素点为中心的 $S \times S$ 正方形邻域内。匹配邻域 $S \times S$ 的大小可根据破损区域的形状来确定。设破损区域不超过 $m \times n$ 大小，通过对大量的图像进行反复实验和验证，本算法设 $\max = \min(m, n)$ ，取 $S = 2 \times \max + 1$ 。

在 Criminisi 算法中，搜索最优匹配块的顺序是由上到下，由左到右，搜索匹配区域中候选块与待修复块进行 SSD 计算选出最优匹配块。在候选块与待修复块的匹配过程中，很可能产生多个候选块与待修复块的颜色差距值相等且为最小。如果搜索到的最优匹配块与待修复块距离相隔甚远，就只能保证与待修复块中已知像素点的特性一致，而剩余部分的特性很有可能与预期的结果不符。一旦复制了一个错误的匹配块，将使之后匹配块的搜索陷入一个恶性繁衍的过程中。

本文提出一种搜索最近最优匹配块的搜索方式。对于根据优先权值确定的当前待修复点 p ，它在上述确定的匹配区域中搜索匹配点的方式为：以点 p 为中心，顺序搜索与 p 的棋盘距离为 n ($1 \leq n \leq \max, n \in N$) 的各点作为匹配点，并依次以这些点为中心生成候选块与待修复块 φ_p ，作 SSD 计算，直至搜索完匹配区域。这样的搜索方式使得匹配块的搜索是由近及远，对于最优匹配块的选择也是优先考虑距离 p 点最近的颜色差距值最小的匹配块。搜索中，直接对第 1 次搜索到的颜色差距值最小的候选块作记录，并将其作为最优匹配块，复制其信息到待修复块相应位置，得到的修复结果与其邻域的相关性较大，也更加符合视觉上的效果。文献[11]和文献[9]的方法都存在计算代价过大的问题，经过验证，本文方法与以上方法相比，算法效率更高，修复效果也更自然。

2.4 置信值更新的改进

Criminisi 算法对破损图像的模板更新时，只要是已经修复的区域，就将修复好的像素置信值置为 1。这也意味着在下次计算模板的 $C(p)$ 时，不论是原图像上的非破损像素点还是经过修补之后的像素点的 $C(q)$ 都是 1，这样也就相当于修补之后的像素点和原待修复图像的非破损区域的像素点同样可靠。算法修补一个模板后更新边界，极有可能导致新边界上优先级最大的点就处于刚填充的模板中，然后继续向内部延伸。算法循环中，如果某个模板被填充了不符合视觉效果的颜色信息，会导致不合理的颜色信息继续延伸下去，最终导致修复的视觉效果不佳。

为了克服以上不足，本算法特设定一颜色阈值 Th 。阈值 Th 的确定，根据计算具体图像修复模板对应的 SSD 值来确定。即有

$$C(p) = \begin{cases} 1 & \text{SSD} < Th \\ \frac{\sum_{q \in \Psi_p \cap \Omega} C(q)}{|\Psi_p|} & \text{SSD} \geq Th \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中如果最优匹配模板对应的 $\text{SSD} < Th$ ，说明其可信度高，则待修补像素点的置信值用源图像模板对应像素点的置信值直接更新。如果 $\text{SSD} > Th$ ，说明其相对于源区域中的信息来说可信度较差，不能一样对待，则待修补像素点的置信值采用匹配前优先级最大的模板的置信度值进行更新。如匹配前某优先级最大的模板置信度值为 0.68，则匹配后其剩余待修补像素点的置信值都置为 0.68。这样保

证在不断修补的过程中越是深入待修补区域的内部,可信度就越低,这符合一般规律。可信度越低,最后得到的优先级 $P(p)$ 就越低,填充时应该尽量寻找整体置信度比较高的匹配模块对待修复区域进行填充,这就保证了合成的顺序基本上是从外围向中间合成。

3 实验结果及分析

本文实验用 Visual C++ 6.0 作为工具,在 Intel 酷睿 2 双核处理器(1.7 GHz),2 GB 内存的 PC 机上实现。本文算法中取 $\alpha=0.382, \beta=0.618$,颜色阈值 Th 取 11,图 2,3,4 为本算法和 Criminisi 算法及文献[11]算法的修复效果对比。

从图 2(c)可以看出,Criminisi 算法在图中标识的屋顶区域修复出现了明显的断层。这是由于其置信值更新过于简单,并且优先级的计算采用了数据项与置信度项的乘积,一旦填进某一错误信息,由于优先级过大,会导致不合理的颜色信息继续延伸下去。在图中另一标注区域,则出现了多余的“垃圾物”。这是由于 Criminisi 算法采用的是一种全局搜索方法,如果图像含有噪声,常会出现错误的匹配,随着修复过程的进行,会造成修复误差的不断累积。图 2(d)中文献[11]的算法修复效果有了一定程度的改善,但仍在图中标识的区域出现了少许“垃圾物”。在继续改进其优先级计算和最优匹配块搜索的基础上,本文算法修复效果如图 2(e)所示,从图中可以看出本文算法恢复效果自然,基本没有瑕疵。

从图 3(c)可以看出,Criminisi 算法在图中标识的草地和水域的边界处修复出现了明显的塌陷,范围大且深。原因还是优先级的计算采用了数据项与置信度项的乘积,导致高纹理区域的修复先于低纹理区域,出现高纹理区域的修复过度扩展。图 3(d)中文献[11]的算法修复已使塌陷范围明显缩小,而本文算法则进一步缩小错误范围,效果如图 3(e)所示。

图 4 草地中有 3 处破损区域且破损面积较大,并且都选在了多种颜色纹理的交界处,更能考验算法的执行情况。从图 4(c)可以看出,Criminisi 算法在图中标识的区域处出现了明显的修复偏差,原因和上述类似。图 4(d)中文献[11]的算法修复有了明显改善,但对于左边多种纹理交接的破损区域,算法修复效果过渡明显不自然。图 4(e)中本文算法在采用 Sobel 算子改进等照度线计算后,各种颜色纹理边界修复效果比较合理,也更符合真实情况。

除了采用主观评价外,为了更进一步评价图像的修复质量,还可采用峰值信噪比(Peak signal to noise ratios,PSNR)作为图像修复质量的客观评价。本文分别列出图像三色通道分量的 PSNR 进行比较,具体数据如表 1 所示。PSNR 值越高,修复图像与原始图像之间的误差越小,修复效果越好,由表 1 可知,本文算法适用于各种不同的破损情况,而且修复结果较优。

实验中分别统计了图 2~4 中图像缺失像素的数量和 3 种算法修复需要的时间以进行对比,如表 2 所示。实验结果表明,通过将匹配区域限定在以待修补像素点为中心的正方形邻域内,能够在保证修复效果的前提下大幅提高修复速度。

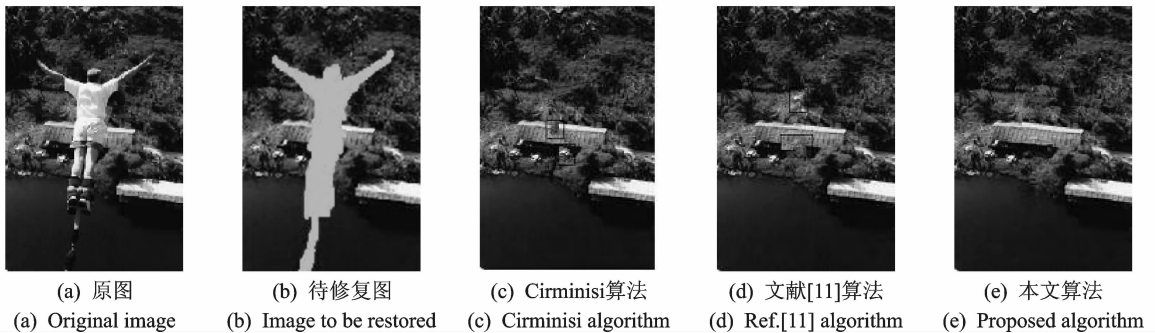


图 2 Bungee 图像修复效果比较

Fig. 2 Comparison of results of image restoration ("Bungee")

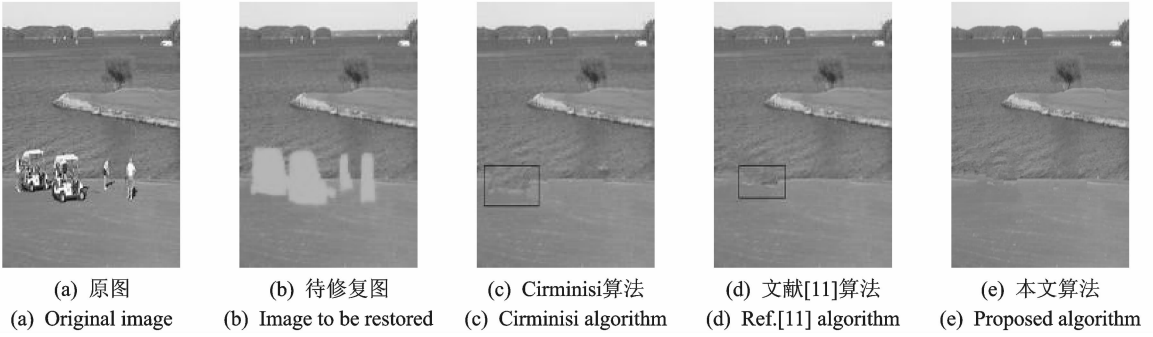


图 3 Golf 图像修复效果比较

Fig. 3 Comparison of results of image restoration ("Golf")

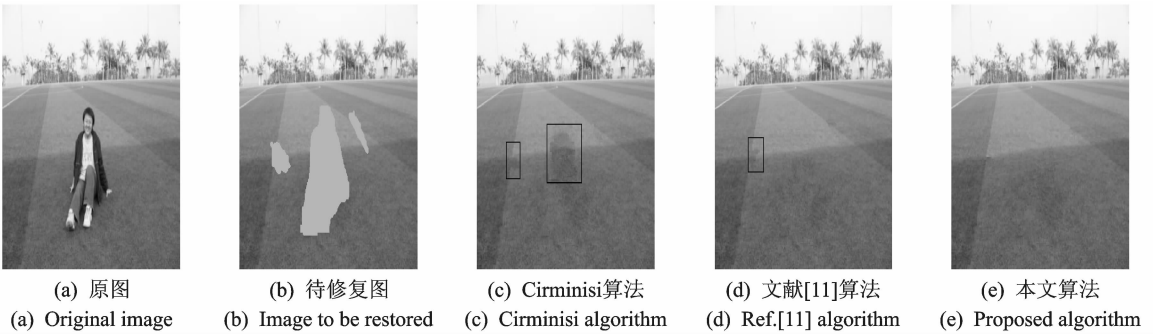


图 4 Grass 图像修复效果比较

Fig. 4 Comparison of results of image restoration ("Grass")

表 1 修复图片的 PSNR 统计

Tab. 1 PSNR of restored image

dB

图像名称	红色通道			绿色通道			蓝色通道		
	Criminisi 算法	文献[11] 算法	本文 算法	Criminisi 算法	文献[11] 算法	本文 算法	Criminisi 算法	文献[11] 算法	本文 算法
图 2	24.22	25.96	25.09	24.18	26.07	25.19	23.26	25.26	24.40
图 3	28.31	28.33	28.38	30.30	30.30	30.31	29.97	30.59	30.52
图 4	29.70	29.97	30.01	30.62	30.60	30.65	31.08	31.31	31.37

表 2 不同算法运行时间比较

Table 2 Comparison of computation time with different algorithms

图像名称	图像大小/像素	缺失像素/像素	Criminisi 算法/s	文献[11]算法/s	本文算法/s
图 2	206×308	7 954	69	38	34
图 3	350×262	8 453	91	39	36
图 4	350×262	9 000	90	36	34

4 结束语

本文首先介绍了图像修复领域中的 Criminisi 算法,针对这种算法的不足,从优先级的运算、数据值

计算、匹配区域及最优匹配块的搜索和置信值更新 4 个方面进行改进。实验结果表明,改进算法的修复效果比原算法有了进一步的提高,更符合人类视觉系统的特征;同时算法由于只是在局部进行运算,大大减少了修复时间。但是对于破损区域比较复杂、结构性很强的图像修复效果仍会出现一定的修复误差,不能与人的视觉保持一致,针对不同类型的图像修复,本文算法的通用性仍有不足。如何更好建立算法的通用性和自适应性,这是今后的工作需要进一步研究的问题。

参考文献:

- [1] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V, et al. Image inpainting [C]//27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM Press,2000: 417-424.
- [2] Chan T F, Shen J H. Non-texture inpainting by curvature driven diffusions[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2001, 12(4): 436-449.
- [3] Chan T F, Kang S H, Shen J H. Euler's elastic and curvature based inpainting[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2002, 63(2): 564-592.
- [4] Li L, Yu L. Nonlocal curvature-driven diffusion model for image inpainting[C]//IEEE Conference on Information Assurance and Security. Xi'an: IEEE Computer Society Press, 2009: 513-516.
- [5] Criminisi A, Perez P, Toyama K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(9): 1200-1212.
- [6] Wong A, Orchard J. A nonlocal-means approach to exemplar-based inpainting[C]//15th IEEE International Conference on Image Processing. California, USA: IEEE Computer Society Press, 2008: 2600-2603.
- [7] 陈永彬, 张松. 小波域图像块修复[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(5): 650-654.
Chen Yongbin, Zhang Song. Image repairing research based on block-by-block in wavelet domain[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2009, 24(5): 650-654.
- [8] 杨秀红, 王慧琴, 李苏莉. 基于自适应模板和置信度更新的图像修复算法[J]. 电子科技, 2009, 22(12): 69-72.
Yang Xiuhong, Wang Huiqin, Li Suli. Image inpainting algorithm based on the adaptive template and update of the confidence term[J]. Electronic Science and Technology, 2009, 22(12): 69-72.
- [9] 付绍春, 楼顺天. 基于区域纹理合成的图像修补算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1319-1322.
Fu Shaochun, Lou Shuntian. Regional texture synthesis based image inpainting[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(6): 1319-1322.
- [10] 林胜华, 汪继文, 沈玉峰, 等. 利用邻域相似度的图像修复[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(7): 190-191, 220.
Lin Shenghua, Wang Jiwen, Shen Yufeng, et al. Image inpainting by neighborhood similarity[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(7): 190-191, 220.
- [11] 吴晓军, 李功清. 基于样本和线性结构信息的大范围图像修复算法[J]. 电子学报, 2012, 40(8): 1509-1514.
Wu Xiaojun, Li Gongqing. Large scale image inpainting based on exemplar and structure information[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(8): 1509-1514.
- [12] 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(6): 626-630.
Hu Wenjin, Wang Weilan, Liu Zhongmin. Improved exemplar-based method for image inpainting[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2011, 26(6): 626-630.
- [13] 康佳伦, 唐向宏, 任澍. 结构约束和样本稀疏表示的图像修复[J]. 中国图像图形学报, 2013, 18(11): 1425-1434.
Kang Jialun, Tang Xianghong, Ren Shu. Image inpainting by structural constraints and sample sparse representation[J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(11): 1425-1434.

作者简介:



戴磊 (1973-), 男, 副教授, 博士研究生, 研究方向: 图形图像处理、移动计算, E-mail: 73829@163.com.



李尚同 (1965-), 男, 工程师, 研究方向: 图形图像处理、计算机网络。



黄轲 (1996-), 女, 本科, 研究方向: 算法设计。



姜代红 (1969-), 女, 教授, 研究方向: 移动计算、数据库技术及图形图像处理。

