

# 基于结构稀疏度和块差异度的目标移除图像修复

张 雷<sup>1</sup> 康宝生<sup>2</sup>

(运城学院公共计算机教学部 山西 运城 044000)<sup>1</sup> (西北大学信息科学与技术学院 西安 710127)<sup>2</sup>

**摘 要** 针对目标移除修复方法中存在的修复顺序不合理以及错误匹配问题,提出一种基于结构稀疏度和块差异度的图像修复方法。首先,在优先权中增加块的结构稀疏度计算,使优先权不仅依赖于目标块的几何特征,而且可以反映其邻域特征,提高了对目标块所处区域特征的辨识度,从而使修复顺序更加合理。其次,定义目标块与样本块之间的差异度,并在此基础上定义新的匹配规则,不仅对已存在像素之间的相似程度进行衡量,而且对已存在像素与填充像素之间的差异程度进行衡量,从而有效防止错误匹配以及错误累积。实验结果表明,该方法可以有效提高图像的修复效果,使修复图像更加符合视觉一致性要求。

**关键词** 结构稀疏度,块差异度,目标移除,图像修复

中图分类号 TP301.6 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.05.044

## Image Inpainting for Object Removal Based on Structure Sparsity and Patch Difference

ZHANG Lei<sup>1</sup> KANG Bao-sheng<sup>2</sup>

(Department of Public Computer Teaching, Yuncheng University, Yuncheng, Shanxi 044000, China)<sup>1</sup>

(Department of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Aiming at the problems of unreasonable filling order and the mismatch error in the image inpainting for object removal, an image inpainting method based on structure sparsity and patch difference was proposed. Firstly, the structure sparsity of the patch is added in the priority computation, because not only the priority depends on the geometric characteristics of target patch, but also its neighborhood characteristics are reflected, which can improve the identification of the regional characteristics of target patch, so that the filling order is more reasonable. Secondly, the difference between the target patch and the exemplar patch is defined, and the new matching rule is defined on the basis of this. In the new matching rule, it not only measures the similarity degree between existing pixels, but also measures the difference degree between existing pixels and filled pixels, thus effectively preventing mismatch error and error accumulation. Experimental results show that the proposed method can effectively improve the restoration effect, and make the restored images more consistent with the visual consistency requirements.

**Keywords** Structure sparsity, Patch difference, Object removal, Image inpainting

## 1 引言

图像修复起源于对艺术品的复原<sup>[1]</sup>,其基本思想是按照一定的规则,将未破损区域的信息平滑地向破损区域延伸,最终使修复的图像在整体上达到协调统一,使得不熟悉原始图像的人察觉不到其修复痕迹<sup>[2]</sup>。目前,图像修复技术已广泛应用于各个领域,如老照片及珍贵文献资料的修复、文物保护<sup>[3]</sup>、影视制作、缺陷检测<sup>[4]</sup>等。

目前,根据所采用的基本原理和方法,图像修复技术可以分为 3 类<sup>[5]</sup>:1) 基于偏微分方程的方法。其基本思想是通过求解偏微分方程将破损区域邻域的信息逐渐向破损区域平滑延伸,以达到修复的目的<sup>[6]</sup>。典型方法包括 BSCB 模型<sup>[7]</sup>、TV 模型<sup>[8]</sup>以及 CDD 模型<sup>[9]</sup>等。该类方法的优点是在消除

划痕、去除文字覆盖、填补空洞等方面可以取得较好的效果,缺点是对于较大尺度的破损区域会导致过平滑现象<sup>[10]</sup>。2) 基于纹理合成的方法。其基本思想是按照一定的匹配规则,在源区域搜索与目标块相似的样本块,并利用样本块对目标块进行修复<sup>[11]</sup>。典型方法包括基于样本的方法<sup>[12]</sup>、基于非局部均值的方法<sup>[13]</sup>、Efros-Leung 方法<sup>[14]</sup>等。该类方法的优点是对于较大尺度的破损区域可以取得令人满意的修复效果,缺点是在修复过程中容易出现修复顺序不合理、错误匹配以及错误累积等问题<sup>[15-16]</sup>。3) 基于稀疏表示的方法<sup>[17]</sup>。其基本思想是计算目标块在过完备字典上的稀疏编码,再利用过完备字典和稀疏编码对目标块进行重建<sup>[18]</sup>。典型方法包括基于 K-SVD 的方法<sup>[19]</sup>、基于 MCA 的方法<sup>[20]</sup>等。该类方法的优点是对于小尺度的破损区域可以取得较好的修复效

到稿日期:2017-08-05 返修日期:2017-12-12 本文受国家自然科学基金项目(61272286),陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JM8346),运城学院科研项目(CY-2016019)资助。

张 雷(1980—),男,博士,讲师,CCF 会员,主要研究方向为图形图像处理,E-mail:zhanglei0359@126.com(通信作者);康宝生(1961—),男,博士后,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机辅助几何设计、图形图像与多媒体技术等。

果,缺点是需要花费大量时间去学习过完备字典,且对于包含丰富纹理细节的图像,修复效果还有待提高。

从图像修复的角度出发,目标移除需要对较大尺度的破损区域进行修复,因此经常采用 Criminisi 等<sup>[12]</sup>提出的基于样本的方法。但该方法目前存在一些问题:1) 将其优先权定义为置信项与数据项的乘积,在修复过程中优先权会迅速减小,使得对目标块所处位置的辨识度降低,进而导致修复顺序不合理<sup>[21-22]</sup>;2) 使用 SSD(Sum of Squared Differences)规则对样本块和目标块进行匹配,该规则虽然比较简单,但容易使目标块被不适合的样本块代替,进而导致错误匹配<sup>[13,23]</sup>;3) 由于修复的不可逆性,随着修复的不断进行,该错误会不断累积,最终导致在目标区域中出现不可预期的、杂乱孤立的对象,使得修复图像不能满足视觉一致性要求。

针对上述问题,Wong 等<sup>[13]</sup>提出了一种非局部均值的修复方法,该方法利用若干个样本块的均值代替单个样本块对目标块进行修复,可以及时减少错误匹配误差。但是由于对每个样本块都采用多个样本块的均值进行修复,容易造成图像纹理细节的丢失,进而导致过平滑现象。张中华等<sup>[22]</sup>利用曲率和梯度信息改进优先权计算,使修复顺序更加合理。Liu 等<sup>[23]</sup>对匹配规则进行改进,增加了样本块与目标块的方差比较,在一定程度上可以避免错误匹配的发生。Nan 等<sup>[24]</sup>根据黄金分割设置,对数据项和置信项设置不同的权重,使修复顺序更加合理,但不能有效防止错误匹配的发生。Wang 等<sup>[25]</sup>在优先权计算中增加了正则化因子,并提出了两轮块匹配方法,有效提高了块匹配率。Xi 等<sup>[26]</sup>利用灰度熵对数据项进行改进,有效降低了修复顺序误差。刘业妃等<sup>[27]</sup>将置信项修改为指数形式,并将置信项与数据项加权求和,使修复顺序更加合理,但是该方法不能有效避免错误匹配以及错误累积问题。

本文方法针对修复顺序不合理问题,将结构稀疏度引入到优先权计算中,使优先权不仅依赖于目标块的几何特征,而且可以反映目标块的邻域特征,有效提高了位于边缘结构上的目标块的辨识度,使修复顺序更加合理。针对错误匹配和错误累积问题,本文定义了目标块与样本块之间的差异度,并利用其定义了新的匹配规则。该规则不仅可以衡量目标块与样本块中已存在像素之间的相似程度,而且可以衡量目标块中已存在像素与样本块中待填充像素之间的差异程度,可降低匹配误差,有效防止错误匹配,从而提高图像修复效果。

## 2 基于结构稀疏度的优先权计算

### 2.1 结构稀疏度

在自然图像中,位于不同特征区域的图像块与其邻域图像块之间的相似程度存在较大差别。例如,如果图像块位于平滑区域,则其邻域范围内存在较多与其相似的图像块;如果图像块位于边缘结构区域,则其邻域范围内与其相似的图像块则相对较少。因此,为了有效反映图像块所在区域的特征,Xu 等<sup>[28]</sup>提出了结构稀疏度的概念。

如图 1 所示, $\Psi_p$  是位于破损边界  $\partial\Omega$  上以  $p$  为中心的图像块, $N(p)$  是以  $p$  为中心的邻域窗口, $\Psi_{p_j}$  是邻域窗口内以  $p_j$  为中心且位于未破损区域  $\Phi$  的图像块。令  $N_s(p)$  表示  $N(p)$  中所有  $p_j$  的集合,即:

$$N_s(p) = \{p_j : p_j \in N(p) \wedge \Psi_{p_j} \subset \Phi\} \quad (1)$$

$\Psi_p$  与  $\Psi_{p_j}$  之间的相似度  $\omega_{p,p_j}$  定义为:

$$\omega_{p,p_j} = \frac{1}{Z(p)} \exp\left(-\frac{d(\overline{M\Psi_p}, \overline{M\Psi_{p_j}})}{\sigma^2}\right) \quad (2)$$

其中, $M$  是  $\Psi_p$  的掩膜,其用 1 表示待修复像素,用 0 表示已存在像素; $d(\overline{M\Psi_p}, \overline{M\Psi_{p_j}})$  是  $\Psi_p$  与  $\Psi_{p_j}$  之间已存在像素的均方差; $\sigma$  控制相似度的衰减程度; $Z(p)$  是归一化系数,使得:

$$\sum_{p_j \in N_s(p)} \omega_{p,p_j} = 1 \quad (3)$$

基于  $\Psi_p$  与  $\Psi_{p_j}$  ( $p_j \in N_s(p)$ ) 的相似度,将  $\Psi_p$  的结构稀疏度定义为:

$$\begin{aligned} \rho(p) &= \|\vec{\omega}_p\|_{L_2} \sqrt{\frac{|N_s(p)|}{|N(p)|}} \\ &= \sqrt{\left[\sum_{p_j \in N_s(p)} \omega_{p,p_j}^2\right] \cdot \frac{|N_s(p)|}{|N(p)|}} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\vec{\omega}_p$  为  $p$  与所有  $p_j$  ( $p_j \in N_s(p)$ ) 的  $\omega_{p,p_j}$  组成的一维向量, $|N_s(p)|$  为集合  $N_s(p)$  的大小, $|N(p)|$  为邻域窗口的大小。

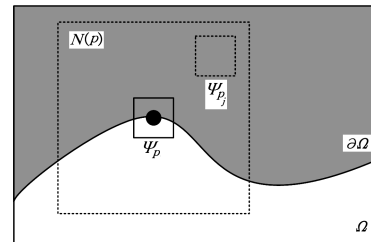
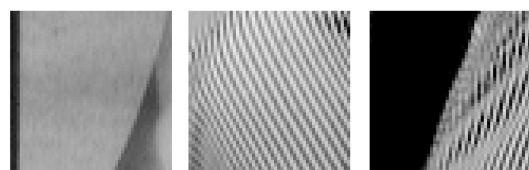


图 1 结构稀疏度符号表示

Fig. 1 Notation of structure sparsity

图 2 给出了 3 个具有不同特征区域的图像块。在图像块 A 中,中心块位于平滑区域;在图像块 B 中,中心块位于纹理区域;在图像块 C 中,中心块位于边缘结构区域。根据式(2)和式(4)可计算得到各中心块的相似度图像及相应的结构稀疏度,如图 3 所示。



(a) 图像块 A (b) 图像块 B (c) 图像块 C

图 2 不同特征区域的图像块

Fig. 2 Image patches located in different feature regions



$\rho(A) = 0.0480$   $\rho(B) = 0.3222$   $\rho(C) = 0.9704$   
(a) 图像块 A (b) 图像块 B (c) 图像块 C

图 3 相似度图像及结构稀疏度

Fig. 3 Similarity images and structure sparsity

从图 3 可以看出,位于不同特征区域的图像块的结构稀疏度存在较大差异。图像块 A 中的中心块位于平滑区域,其

邻域内存在数量较多的相似块,因此其结构稀疏度较小;图像块 C 中的中心块位于边缘区域,其邻域内存在数量较少的相似块,因此其结构稀疏度较大;图像块 B 中的中心块位于纹理区域,其邻域内的相似块数量少于图像块 A 而多于图像块 C,因此其结构稀疏度大于图像块 A 而小于图像块 C。因此,结构稀疏度可以对图像块所处区域的特征进行有效辨识。

## 2.2 优先权计算

为了保持图像结构的连续性与完整性,需要使位于边缘结构上的图像块优先被修复,Criminisi 等<sup>[12]</sup>为每个图像块定义了优先权,根据优先权大小决定图像块的修复顺序。假设  $\Psi_p$  是位于破损边缘  $\partial\Omega$  上以  $p$  为中心的目标块,则其优先权定义如下:

$$P(p) = C(p) \times D(p) \quad (5)$$

其中,  $C(p)$  为置信项,  $D(p)$  为数据项。  $C(p)$  定义为:

$$C(p) = \frac{\sum_{q \in \Psi_p \cap \Phi} C(q)}{|\Psi_p|} \quad (6)$$

其中,  $|\Psi_p|$  表示  $\Psi_p$  的大小。从式(6)可以看出,目标块中已存在的像素越多,其置信度越高。初始化时,  $C(p)$  的初始值设置为:

$$C(p) = \begin{cases} 0, & \forall p \in \Omega \\ 1, & \forall p \in \Phi \end{cases} \quad (7)$$

$D(p)$  定义为:

$$D(p) = \frac{|\nabla I_p^\perp \cdot n_p|}{\alpha} \quad (8)$$

其中,  $\nabla I_p^\perp$  为  $p$  点的等照度的方向,  $n_p$  为  $p$  点的单位法向量,  $\alpha$  为归一化因子。从式(8)可以看出,若  $p$  点的等照度线的强度越大,则数据项值越大。

式(5)中,优先权定义为置信项和数据项的乘积,随着修复的进行,优先权会迅速减小,使得对目标块所处位置的辨识度降低,导致修复顺序不合理。因此,本文在优先权计算中引入块的结构稀疏度计算,将优先权定义为:

$$P(p) = C(p) \times (\beta \times D(p) + \gamma \times \rho(p)) \quad (9)$$

其中,  $\beta$  和  $\gamma$  是权重因子,且  $\beta + \gamma = 1$ 。

式(9)中,  $D(p)$  反映了目标块的几何特征,  $\rho(p)$  反映了目标块的邻域特征,因此优先权值可以对目标块所处区域特征进行有效辨识,使修复顺序更加合理。

## 3 基于块差异度的匹配规则

### 3.1 错误匹配

假设  $\Psi_p$  是位于破损边界  $\partial\Omega$  上以  $p$  为中心的目标块,  $M$  是其修复掩膜, Criminisi 等<sup>[12]</sup>根据 SSD 规则在源区域  $\Phi$  中寻找与其匹配的样本块。SSD 匹配规则定义为:

$$\Psi_q = \arg \min_{\Psi_q \in \Phi} \text{ssd}(\Psi_p, \Psi_q) \quad (10)$$

其中,  $\text{ssd}(\Psi_p, \Psi_q)$  为  $\Psi_p$  与  $\Psi_q$  之间的 SSD 距离, 定义为:

$$\text{ssd}(\Psi_p, \Psi_q) = \sum |\bar{M}\Psi_p - \bar{M}\Psi_q|^2 \quad (11)$$

SSD 规则虽然比较简单,但是容易使目标块被不适合的样本块代替,造成错误匹配。图 4(a)是人工合成的原始图像;图 4(b)是需要修复的目标区域,其位于中心图像块的上半部分;图 4(c)是根据 SSD 规则找到的匹配样本块;图 4(d)是利用样本块对目标块修复的结果。

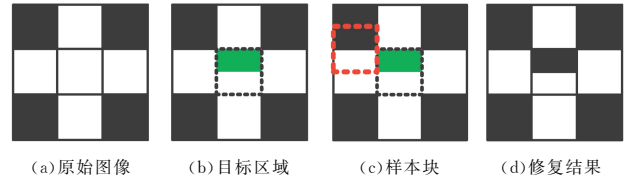


图 4 错误匹配

Fig. 4 Mismatch error

在图 4(c)中,由于样本块与目标块之间的 SSD 值为 0,因此其被选定为匹配样本块。但是从图 4(d)中可以看出,利用该样本块对目标块进行修复,结果出现了明显偏差,不符合视觉一致要求,出现了错误匹配。而且,由于修复进程的不可逆性,随着修复的不断进行,该错误会被不断累积,最终导致在目标区域出现不可预期的、杂乱琐碎的对象,从而影响图像的修复效果。

### 3.2 匹配规则

通过分析发现,在图 4 中,虽然目标块与样本块之间的 SSD 值为 0,即目标块中未破损像素与样本块中未破损像素非常相似,但是目标块中未破损像素与样本块中用来修复的像素之间的差异较大,即当使用样本块修复目标块后,目标块中两部分之间的差异较大,导致明显的视觉不一致,如图 4(d)所示。因此,本文将目标块  $\Psi_p$  与样本块  $\Psi_q$  之间的块内差异度定义为:

$$\text{dif}(\Psi_p, \Psi_q) = \sum \left| \frac{\sum \bar{M}\Psi_p}{\sum \bar{M}} - \frac{\sum M\Psi_q}{\sum M} \right|^2 \quad (12)$$

在此基础上,本文将匹配规则定义为:

$$\Psi_q = \arg \min_{\Psi_q \in \Phi} \text{ssd}(\Psi_p, \Psi_q) + \lambda \times \text{dif}(\Psi_p, \Psi_q) \quad (13)$$

其中,  $\lambda$  为调节因子,其值设置为:

$$\lambda = \sum \bar{M} \quad (14)$$

由式(13)可知,本文匹配规则不仅衡量了目标块中已存在像素与样本块中已存在像素之间的相似程度,而且衡量了目标块中已存在像素与样本块中用以修复的像素之间的差异程度,可以有效防止错误匹配的发生,提高图像的修复效果。

## 4 算法描述

本文算法的过程描述如下:

Step 1 确定目标区域,并用修复掩膜标识该区域;

Step 2 对于位于目标区域边界  $\partial\Omega$  上以  $p$  为中心的图像块,分别根据式(6)计算其置信项  $C(p)$ ,根据式(8)计算其数据项  $D(p)$ ,根据式(4)计算其结构稀疏度;

Step 3 根据式(9)计算每个块的优先权,并选择优先权最大的图像块作为目标块  $\Psi_p$ ;

Step 4 对于每个样本块,根据式(11)计算其与目标块  $\Psi_p$  之间的 SSD 值,根据式(12)计算其与目标块  $\Psi_p$  之间的差异度;

Step 5 根据式(13),确定与目标块  $\Psi_p$  最匹配的样本块  $\Psi_q$ ;

Step 6 根据式(15),利用样本块  $\Psi_q$  修复目标块  $\Psi_p$ :

$$M\Psi_p = M\Psi_q \quad (15)$$

Step 7 根据式(16),更新目标块  $\Psi_p$  中破损像素的置信项  $C(p)$ :

$$C(\hat{p})=C(p), \forall \hat{p} \in \Psi_p \cap \Omega \quad (16)$$

以上步骤循环进行,直到目标区域为空。

## 5 实验结果及分析

为了验证本文所提方法的可行性和有效性,从 Berkeley 大学的 BSR\_BSDS500 数据集<sup>[29]</sup>中选择自然图像进行实验,实验环境为 Matlab 2014,机器配置为 Intel(R) Core(TM) i5-6200U 2.3 GHz 处理器,4 GB 内存。

为方便对比分析,分别采用文献[12]的方法、文献[13]的方法、文献[24]的方法、文献[27]的方法以及本文方法修复每幅图像。其中,各方法的相关参数设置如下:图像块大小为  $9 \times 9$ ;在文献[13]的方法中,相似样本块的数量为 10;在文献[24]的方法中,置信项权重为 0.618,数据项权重为 0.382;在本文方法中,式(2)中  $\sigma=5$ ,式(8)中  $\alpha=255$ ,式(9)中  $\beta=0.7$ ,  $\gamma=0.3$ 。

对于每幅图像,首先确定目标对象,然后利用各方法修复目标对象所在的区域,得到的修复结果如图 5—图 7 所示。为了方便对比,在每种方法的修复结果中,将目标对象所在的区域用白色框线标出。

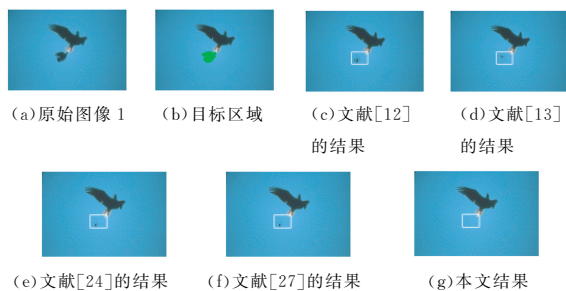


图 5 图像 1 的修复结果

Fig. 5 Restoration results of image 1

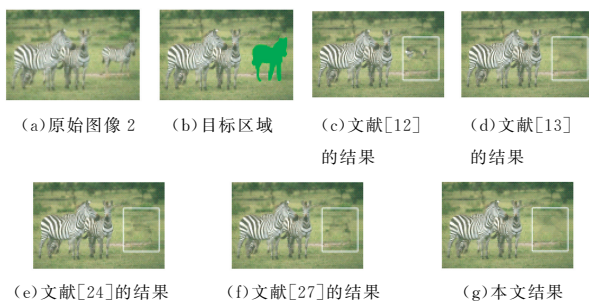


图 6 图像 2 的修复结果

Fig. 6 Restoration results of image 2

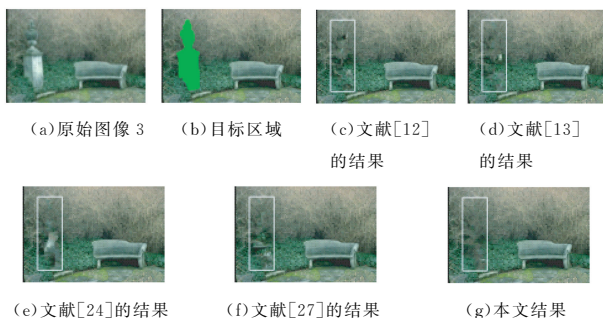


图 7 图像 3 的修复结果

Fig. 7 Restoration results of image 3

从以上结果可以看出,文献[12]的方法在修复过程中很容易在目标区域中引入不可预期的、孤立杂乱的物体。例如,在图 5(c)中,另一只鹰的小部分身体被复制到目标区域中;在图 6(c)中,在目标区域中出现了另外两只斑马的少部分身体;在图 7(c)中,部分石凳以及石凳下的小部分黑色阴影被复制到了目标区域中。出现上述问题的原因在于:修复过程中出现了目标块与样本块之间的错误匹配,并且随着修复的不断进行,该错误被不断累积,最终导致在目标区域中出现杂乱琐碎的对象,从而影响图像的修复效果。

相比文献[12]的方法,文献[13]的方法获得了较好的修复结果。例如,图 5(d)和图 7(d)中被引入的琐碎对象的大小明显小于图 5(c)和图 7(c)。其原因在于:该方法使用了多个样本块的均值来代替单个样本块对目标块进行修复,可以及时减少匹配误差,提高修复效果。但是,由于对每个目标块都采用多个样本块的均值进行修复,很容易在目标区域中造成纹理细节的丢失,进而导致过平滑现象,如图 6(d)所示。

文献[24]的方法利用黄金分割设置改进优先权计算,在一定程度上可以提高修复效果。例如,在图 5(e)中,另一只鹰的很小一部分身体被复制到目标区域中;在图 6(e)中,目标区域中没有出现明显的另外两只斑马的部分身体。但是,在图 7(e)中,目标区域中出现了明显的具有较大面积的不规则对象,修复结果不符合人的视觉一致性要求,严重影响了视觉效果,修复效果还有待提高。

文献[27]的方法利用指数形式改进优先权计算方法,使修复顺序更加合理,但在修复过程中仍然存在错误匹配以及错误累积问题。例如,在图 5(f)中,鹰的小部分身体被复制到目标区域中;在图 6(f)中,目标区域中虽然没有出现图 6(c)中的斑马的部分身体,但是远处的部分树木被复制到目标区域中;在图 7(f)中,目标区域中出现多个琐碎孤立的石凳,影响了图像的修复效果。

从图 5(g)、图 6(g)和图 7(g)中可以看出,相对于其他方法,本文方法取得了令人满意的修复结果,在目标区域中没有出现不可预期的、杂乱琐碎的对象,修复结果更加符合人类的视觉一致性要求。

**结束语** 从图像修复的角度出发,目标移除需要对大尺度的破损区域进行修复。针对目前修复方法中存在的问题,本文提出了一种基于结构稀疏度和块差异度的目标移除图像修复方法。一方面,其在优先权计算中加入了结构稀疏度计算,使优先权不仅可以反映目标块的几何特征,而且可以反映其邻域特征,提高了对目标块所处区域特征的辨识,使修复顺序更加合理。另一方面,定义了目标块与样本块之间的差异度,并基于其改进匹配规则,有效防止了错误匹配的发生。实验结果表明,本文方法可以有效提高修复效果,使修复图像在整体上保持协调一致,满足视觉一致性要求。在下一步的研究中,将考虑在修复过程中自适应地改变图像块的大小,进一步提高图像的修复效果和修复效率。

## 参考文献

- [1] GUILLEMOT C, LE M O. Image Inpainting: Overview and Recent Advances [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(1): 127-144.

- [2] NIE H Y, ZHAI D H, YU J, et al. Large Damaged Area Image Inpainting Algorithm Based on Matching Model for Broken Structure [J]. *Computer Science*, 2016, 43(10): 292-296. (in Chinese)  
聂洪玉, 翟东海, 鱼江, 等. 基于断裂结构线匹配模型的大破损区域图像修复算法[J]. *计算机科学*, 2016, 43(10): 292-296.
- [3] WANG W. Study on Exemplar-based Tangka Image Inpainting Technologies [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)  
王威. 基于样本块的唐卡图像修复技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [4] BHARDWAJ N, AGARWAL S. Review of Image Defect Detection and Inpainting Techniques and Scope for Improvements [J]. *International Journal of Emerging Sciences*, 2015, 5(1): 49-67.
- [5] ZHANG L, KANG B, LIU B, et al. A New Inpainting Method for Object Removal based on Patch Local Feature and Sparse Representation [J]. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2016, 12(1): 113-124.
- [6] M ULLER J S. A Coupled Variational Problem of Linear Growth Related to the Denoising and Inpainting of Images [J]. *Journal of Mathematical Sciences*, 2017, 224(2): 1-26.
- [7] BERTALMIO M, SAPIRO G, CASELLES V, et al. Image inpainting [C] // 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000: 417-424.
- [8] CHAN T F, SHEN J, ZHOU H M. Total Variation Wavelet Inpainting [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2006, 25(1): 107-125.
- [9] CHAN T F, SHEN J. Nontexture Inpainting by Curvature-driven Diffusions [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2001, 12(4): 436-449.
- [10] ZOU W G, ZHOU Z H, WANG Y. Image Inpainting Technology Based on Non-subsampled Contourlet Transform [J]. *Journal of Computer Applications*, 2017, 37(2): 553-558. (in Chinese)  
邹玮刚, 周志辉, 王洋. 基于非降采样轮廓波变换的图像修复算法[J]. *计算机应用*, 2017, 37(2): 553-558.
- [11] HUANG Y, LI K, YANG M. An Improved Image Inpainting Algorithm Based on Image Segmentation [J]. *Procedia Computer Science*, 2017, 107: 796-801.
- [12] 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.
- [13] WONG A, ORCHARD J. A Nonlocal-means Approach to Exemplar-based Inpainting [C] // 15th IEEE International Conference on Image Processing. IEEE, 2008: 2600-2603.
- [14] EFROS A A, LEUNG T K. Texture Synthesis by Non-parametric Sampling [C] // IEEE International Conference on Computer Vision. 1999: 1033-1038.
- [15] DENG L J, HUANG T Z, ZHAO X L. Exemplar-Based Image Inpainting Using a Modified Priority Definition [J]. *PLOS one*, 2015, 10(10): 1-18.
- [16] ALILOU V K, YAGHMAEE F. Exemplar-based Image Inpainting Using Svd-based Approximation Matrix and Multi-scale Analysis [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, 76(5): 7213-7234.
- [17] ZHANG Z, XU Y, YANG J, et al. A Survey of Sparse Representation: Algorithms and Applications [J]. *IEEE Access*, 2017, 3: 490-530.
- [18] ZHANG L, KANG B, LIU B, et al. Image Inpainting Based on Exemplar and Sparse Representation [J]. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 2016, 9(9): 177-188.
- [19] AHARON M, ELAD M, BRUCKSTEIN A. K-SVD: An Algorithm for Designing Over-complete Dictionaries for Sparse Representation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(11): 4311-4322.
- [20] ELAD M, STARCK J L, QUERRE P, et al. Simultaneous Cartoon and Texture Image Inpainting Using Morphological Component Analysis (MCA) [J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2005, 19(3): 340-358.
- [21] DAI L, JIANG D H, DING B, et al. Improved Digital Image Restoration Algorithm Based on Criminisi [J]. *Journal of Digital Information Management*, 2016, 14(5): 302-310.
- [22] ZHANG S H, WANG K G, ZHU X. Improved Criminisi Algorithm Constrained by Local Feature [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, 50(8): 127-130. (in Chinese)  
张中华, 王克刚, 祝轩. 局部特征信息约束的改进 Criminisi 算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2014, 50(8): 127-130.
- [23] LIU Y F, WANG F L, XI X Y. Enhanced Algorithm for Exemplar-based Image Inpainting [C] // 2013 9th International Conference on Computational Intelligence and Security. IEEE, 2013: 209-213.
- [24] NAN A, XI X. An Improved Criminisi Algorithm Based on A New Priority Function and Updating Confidence [C] // International Conference on Biomedical Engineering and Informatics. IEEE, 2014: 885-889.
- [25] WANG J, LU K, PAN D, et al. Letters: Robust Object Removal with An Exemplar-based Image Inpainting Approach [J]. *Neurocomputing*, 2014, 123: 150-155.
- [26] XI X, WANG F, LIU Y. Improved Criminisi Algorithm Based on a New Priority Function With the Gray Entropy [C] // 2013 9th International Conference on Computational Intelligence and Security. IEEE, 2013: 214-218.
- [27] LIU Y F, WANG F L, XI X Y, et al. Improved Algorithm for Image Inpainting Based on Texture Synthesis [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2014, 35(12): 2754-2758. (in Chinese)  
刘业妃, 王福龙, 奚祥艳, 等. 改进的 Criminisi 图像修复算法 [J]. *小型微型计算机系统*, 2014, 35(12): 2754-2758.
- [28] XU Z, SUN J. Image Inpainting by Patch Propagation Using Patch Sparsity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(5): 1153-1165.
- [29] ARBELAEZ P, MAIRE M, FOWLKES C, et al. Contour Detection and Hierarchical Image Segmentation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(5): 898-916.