

# 基于样本块的旋转及缩放图像修复算法

卢雯霞, 何凯

天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072

**摘要** 大多数基于样本块的图像修复算法通过平移来寻找最优匹配块,当破损区域与信息区域存在旋转或尺度缩放时,这些算法则无法对图像进行有效修复。针对这一问题,提出一种基于样本块的旋转及缩放图像修复算法。利用局部特征向量获得与破损区域具有旋转或尺度缩放关系的最优匹配块;对匹配块的空间能量函数进行拓展;实现具有旋转及尺度缩放破损图像的自动修复。实验结果表明,对于具有旋转和尺度缩放的图像,本文算法能够准确搜寻到破损块的最优匹配块,提高了匹配准确率,并且修复效果较好,修复效率较高,稳健性较强。

**关键词** 图像处理; 旋转及尺度缩放; 局部特征向量; 能量空间函数拓展

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.031006

## Exemplar-Based Inpainting Algorithm with Rotation and Scaling Transformation

Lu Wenxia, He Kai

*School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

**Abstract** Most exemplar-based methods find the optimal matching block by translation, which fail to deal with the images when there is rotation or scaling transformation between source and damaged region. We propose an exemplar-based inpainting algorithm with rotation and scaling transformation. Firstly, the optimal patches, with rotation or scaling transformation in those damaged region, are obtained based on the local feature vectors. Then, the energy space function is expanded to adapt the transformation of patch in data filling. Finally, the damaged image with rotation or scaling transformation can be inpainted automatically. The experimental results show that the proposed method can accurately find the optimal matching block when rotation or scaling transformation exists, and achieve better effect, higher effectiveness and robustness.

**Key words** image processing; rotation and scaling transformation; local feature vector; energy space function expansion

**OCIS codes** 100.3020; 100.5760; 110.3010

## 1 引言

图像修复是图像处理和计算机视觉领域的研究热点,其目的是对图像中丢失或破损的区域进行补充,以保证图像的整体视觉效果。图像修复技术大致可分为较小破损区域的修复方法和较大破损区域的补全方法。较小破损区域的修复通常是利用热扩散方程来实现<sup>[1-3]</sup>;而较大破损区域的补全则通常利

用基于样本块的图像修复方法来解决,其代表算法由 Criminisi 等<sup>[4]</sup>最早提出,该方法在保持图像纹理细节和基本结构方面取得了良好的效果,一经提出就得到了广泛应用。在此基础上,各国学者提出了许多改进方法:Xue 等<sup>[5]</sup>通过改进匹配块的估计准则来减少误配率;Kuo 等<sup>[6]</sup>提出基于梯度分析的自适应算法;Zhang 等<sup>[7]</sup>提出一种基于小波变换的图像修复方法;Hasegawa 等<sup>[8]</sup>提出利用二维非谐波

收稿日期: 2017-09-08; 收到修改稿日期: 2017-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(61271326)

作者简介: 卢雯霞(1992—),女,硕士研究生,主要从事图像修复方面的研究。E-mail: wxlu0315@tju.edu.cn

导师简介: 何凯(1972—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事数字图像处理方面的研究。

E-mail: hekai626@163.com(通信联系人)

分析获取目标块;张鑫等<sup>[9]</sup>提出了基于子模式独立成分分析尺度不变特征变换(SICA-SIFT)和粒子群优化的图像匹配算法;谭永前等<sup>[10]</sup>提出一种改进的纹理合成图像算法;倪锦艳等<sup>[11]</sup>提出一种基于透射率优化和色温调节的水下图像复原方法;张申华等<sup>[12]</sup>提出一种局部特征信息约束的改进 Criminisi 算法,克服了 Criminisi 算法在修复过程中高纹理区域向低纹理区域过度扩散的问题。此外,近年来还涌现了许多其他方法,如基于神经网络的方法<sup>[13]</sup>在一定程度上改善了物体边缘的修复效果,增强的分段线性估计(E-PLF)方法<sup>[14]</sup>在修复较小区域时获得了较好的实际效果,Non-local 方法<sup>[15]</sup>有效改善了结构传播效果等。

目前,基于样本块的修复方法是解决大区域图像修复的主流算法,被各国学者广泛采用。该修复方法主要包含 2 个过程:1) 从信息来源区域搜索最优匹配块;2) 利用匹配块对破损区域进行信息填充。传统的基于样本块的图像修复方法只能通过平移来搜索最优匹配块。因此,当图像破损区域与信息区域之

间存在旋转及尺度缩放时,无法进行有效修复。

针对上述问题,有学者通过迭代方法对图像进行旋转和缩放,然后利用样本块匹配(PM)方法获得匹配块<sup>[16-17]</sup>。该方法虽然能够在一定程度上解决旋转及缩放问题,但算法稳健性较差,且比较费时。Fedorov 等<sup>[18]</sup>利用仿射不变相似性度量提出一种新的变分公式。Huang 等<sup>[19]</sup>提出利用平面结构引导(PSG)进行图像修复。

本文提出一种基于样本块的旋转及缩放图像的修复算法。利用局部特征向量获得跟破损区域具有旋转或尺度缩放关系的匹配块,再通过对匹配块的空间能量函数进行改进,从而保证破损块信息的顺利填充。仿真实验结果证明了本文方法的有效性。

## 2 基本原理

### 2.1 问题描述

传统基于样本块的方法只能修复具有平移关系的图像。然而,很多图像破损区域和完好区域之间存在着旋转或尺度缩放的关系,如图 1 所示。

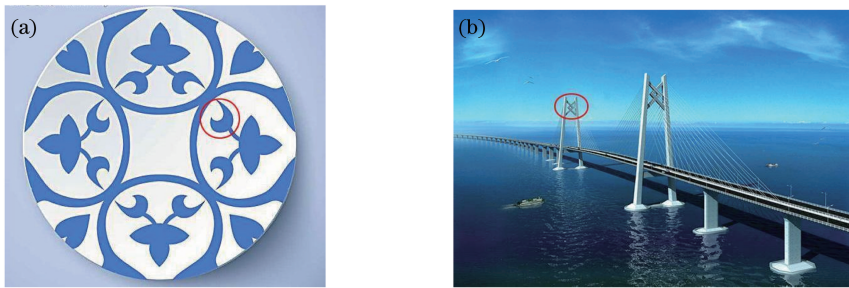


图 1 具有(a)旋转变换和(b)尺度缩放的图像

Fig. 1 Images with (a) rotation and (b) scaling transformation

如图 1(a)所示,盘子的花瓣之间具有旋转关系,此时,无法直接通过平移获得破损区域(红圈标记)的最优匹配块。图 1(b)的情况亦如此,仅通过平移无法获得破损区域(红圈标记)的最优匹配块。

### 2.2 本文算法

#### 2.2.1 最优匹配块的搜寻

局部特征向量对于平移、旋转、光照变化、仿射变换和投影变换具有不变性,在图像配准领域得到了广泛应用。局部特征向量是具有方向信息的局部极值点,可由高斯差分函数(DOG)产生<sup>[20]</sup>,表达式为

$$D(x, y, \sigma) = [G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)] * I(x, y), \quad (1)$$

式中  $D(x, y, \sigma)$  是经过缩放变换后的空间函数,  $I(x, y)$  代表图像像素,  $G(x, y, \sigma)$  是具有尺度不变性的高斯函数,  $k$  是常量乘数因子,  $*$  代表卷积运算。首先,将图像转化为一个局部特征向量集;然后,通过建立图像金字塔来获得每个图像层中的局部极值点。剔除对边界和噪声敏感的极值点,以提高算法的准确性。通过计算梯度来获得极值点,幅值和角度可表示为

$$m(x, y) = \sqrt{[I(x+1, y) - I(x-1, y)]^2 + [I(x, y+1) - I(x, y-1)]^2}, \quad (2)$$

$$\theta(x, y) = \arctan \left[ \frac{I(x, y+1) - I(x, y-1)}{I(x+1, y) - I(x-1, y)} \right], \quad (3)$$

式中  $m(x, y)$  代表梯度的幅值,  $\theta(x, y)$  代表梯度的方向。

假设  $n$  个关键点(极值点)的水平 and 垂直坐标集合分别为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  和  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ , 搜索坐标的最大和最小值来确定匹配块的轮廓:

$$\begin{cases} x_{\min} \leftrightarrow y_j, x_{\max} \leftrightarrow y_i, \\ y_{\min} \leftrightarrow x_k, y_{\max} \leftrightarrow x_l, \end{cases} \quad (4)$$

式中  $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$  分别是关键点横、纵坐标的最大值和最小值,  $y_j, y_i, x_k, x_l$  分别是横、纵坐标最大值、最小值所对应的另一半坐标值。利用关键点的坐标值确定匹配块轮廓, 如图 2 所示。

图 2 中,  $S$  代表信息来源区域,  $D$  代表破损区域,  $B$  是破损块, 图中的黑点表示的是关键点, 红色矩形表示  $B$  的匹配块。

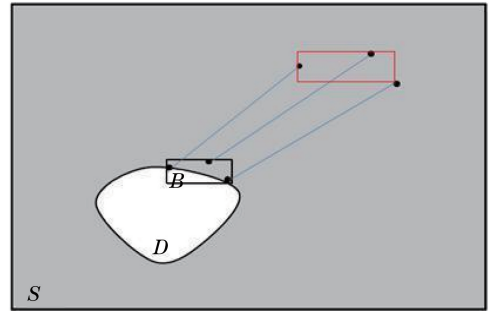


图 2 利用关键点的坐标值确定匹配块  
Fig. 2 Determination of matching patch by key-point coordinate

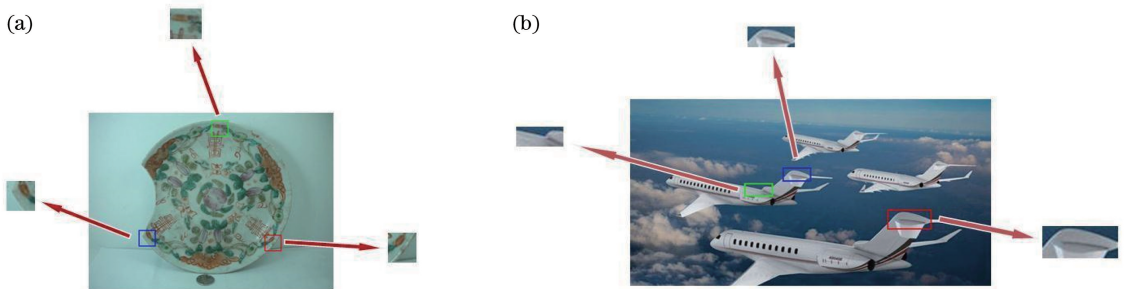


图 3 不同方法获得的最优匹配块对比。(a) 旋转变换图像的结果; (b) 尺度缩放图像的结果

Fig. 3 Comparison of optimal patches by different methods.

(a) Image with rotation transformation; (b) image with scaling transformation

从图 3 可以看出, 破损块和绿色匹配块完全不同, 这说明破损区域与信息区域存在旋转或尺度缩放关系时, 利用传统方法无法获得准确的匹配块。图 3(a) 中红色匹配块与破损块之间虽然存在旋转, 但具有相似的纹理; 图 3(b) 中破损块和红色匹配块之间存在缩放关系, 但纹理相同。这表明当破损区域与信息区域之间存在旋转及缩放关系时, 利用本文方法仍然可以获得最优匹配块。

### 2.2.2 利用改进的能量函数进行信息填充

考虑到最优匹配块和破损块之间具有旋转或尺度缩放的关系, 要想保证信息填充过程的顺利进行, 必须对匹配块进行变换。利用空间能量函数来实现上述功能, 传统的能量函数<sup>[21]</sup>表达式为

$$E(T, S) = \sum \min D(t_n, s_{x_n}), \quad (5)$$

式中  $T$  表示破损区域,  $S$  是信息来源区域,  $t_n$  是以  $n$  为中心的目标块,  $s_{x_n}$  是以  $x_n$  为中心的信息块,  $D$  是最小均方差。

(5) 式仅适用于平移空间, 通过添加旋转和尺度

缩放因子, 对传统的能量函数进行空间拓展:

$$M(x_n) = x_n + \alpha_n R_{\theta_n} i_p, \quad (6)$$

式中  $i_p$  是像素的相对索引,  $R_{\theta_n}$  代表旋转了  $\theta_n$  角度,  $\alpha_n$  是尺度变换系数,  $R_{\theta_n} i_p$  代表顺时针旋转  $\theta_n$  角度后的像素索引,  $M(x_n)$  是经过变换后以  $x_n$  为中心的最优匹配块。

利用空间拓展函数对传统能量函数进行改进, 同时加入梯度项以减少匹配误差。改进后的能量函数表示为

$$E = \min_{x_n \in D} \{F_{\text{MMSE}} [B, M(x_n)] + \lambda F_{\text{MMSE}} [\nabla B, \nabla M(x_n)]\}, \quad (7)$$

式中  $D$  代表破损区域,  $F_{\text{MMSE}}$  表示最小均方差,  $B$  为破损块,  $\nabla$  表示水平和垂直方向的梯度信息,  $\lambda$  是权重因子, 用于控制梯度项的影响程度。

当修复旋转图像时, 顺时针旋转  $\theta_n$  角度后的块内相对索引  $R_{\theta_n} i_p$  定义为

$$\begin{cases} i_x = i_{x_0} \cos \theta_n + i_{y_0} \sin \theta_n, \\ i_y = i_{y_0} \cos \theta_n - i_{x_0} \sin \theta_n, \end{cases} \quad (8)$$

式中  $i_{x_0}$ 、 $i_{y_0}$  和  $i_x$ 、 $i_y$  分别是旋转前后的像素索引。当修复缩放图像时,根据搜索块的大小,依次对搜索尺度进行迭代增加或减小,直到获得最佳匹配尺度。

### 2.3 算法流程

算法流程如下,其中  $S$  代表了信息来源区域, $B$  是以有最高优先权值的点  $p$  为中心的破损块, $M$  是最优匹配块。

**Input:** Damaged image  $I$ .

**Output:** Restored image

**Step 1:** Determine the size of image block

**Step 2:** Calculate the key points of information source region  $S$

**Step 3:** Repeat following steps until all damaged regions are repaired

- 1) Calculate the priority of  $I$
- 2) Define the damaged block  $B$  with the highest priority weight  $p$  as the center
- 3) Calculate the key points of  $B$
- 4) Match the key points between  $B$  and  $S$
- 5) Determine contour of the matching block  $M$
- 6) Expand the space energy function of  $M$
- 7) Fill the information of  $B$  according to the expanded  $M$

根据实验仿真结果,图像块的大小设为  $35 \times 35$ ,以保证足够多的关键点。采用文献[4]中定义的优先权函数来确定破损区域的修复顺序。

## 3 实验结果与分析

为了验证本文方法的有效性,将其与几种经典图像修复方法进行比较,如 Criminisi 方法<sup>[4]</sup>、改进 Criminisi 方法<sup>[12]</sup>、文献[16]方法、文献[17]方法以及

PSG 方法<sup>[19]</sup>。本文中  $\lambda$  和  $\alpha$  分别取值 0.2 和 0.5。

图 4 对 2 幅具有旋转变换的图像的修复结果进行比较;由于缺乏旋转变换,Criminisi 方法和改进 Criminisi 方法的修复效果不够理想,盘和碟的边缘存在明显破损;PSG 方法的处理效果略有改善,但是修复后的纹理不连续;文献[16]方法获得的结果亦不能令人满意;文献[17]方法获得的结果中纹理部分修复不合理;本文算法获得的修复结果较为自

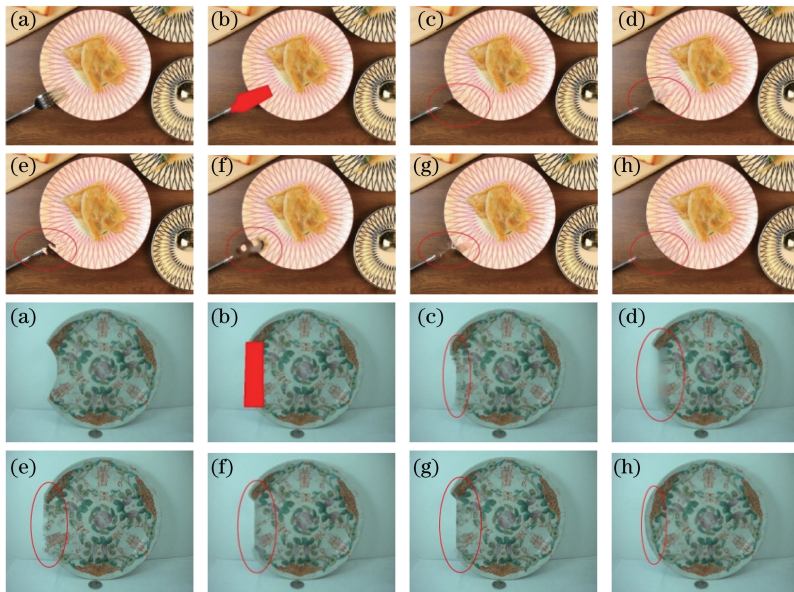


图 4 Dish 和 Plate 旋转图像修复结果的比较。(a)原始图像;(b)破损图像;(c) Criminisi 方法;(d) PSG 方法;(e)改进 Criminisi 方法;(f)文献[16]方法;(g)文献[17]方法;(h)本文方法

Fig. 4 Comparisons of images Dish and Plate with rotation transformation. (a) Original image; (b) damaged image; images inpainted by (c) Criminisi method, (d) PSG method, (e) improved Criminisi method, (f) method in Ref. [16], (g) method in Ref. [17], and (h) proposed method

然,修复后的图案与图像整体保持一致。这表明,由于加入了旋转变换,本文算法获得的最优匹配块是准确的。

图 5 对比了 2 幅具有尺度缩放关系的图像的修复效果: Criminisi、改进 Criminisi 和文献[16]算法

得到的结果具有明显的块效应;由 PSG 方法获得的结果虽然有所改善,但仍不能令人满意;文献[17]方法获得的结果与图(c)、(d)相比略有改善,但是对于纹理细节仍无法进行合理的修复;本文算法获得的结果更加自然合理,纹理细节得到了很好的恢复。

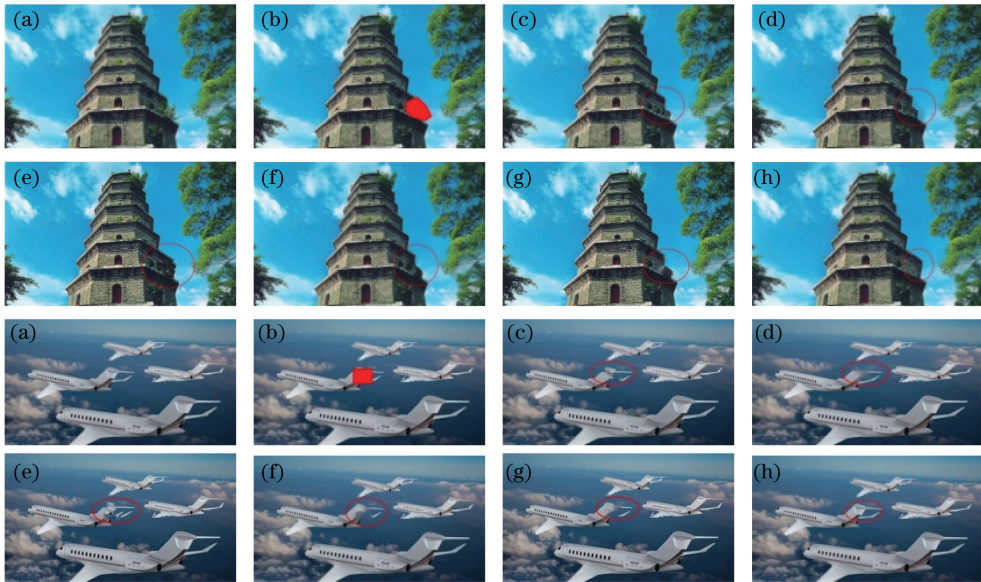


图 5 Tower 和 Airplane 尺度缩放图像修复结果比较。(a)原始图像;(b)破损图像;(c) Criminisi 方法;

(d) PSG 方法;(e)改进 Criminisi 方法;(f)文献[16]方法;(g)文献[17]方法;(h)本文方法

Fig. 5 Comparisons of images Tower and Airplane with scaling transformation. (a) Original image; (b) damaged image; images inpainted by (c) Criminisi method, (d) PSG method, (e) improved Criminisi method, (f) method in Ref. [16], (g) method in Ref. [17], and (h) proposed method

表 1 所示为不同方法的运行时间对比结果。计算机配置:CPU 为 3.30 GHz,内存为 4 GB。

表 1 不同方法的运行时间对比结果

Table 1 Comparison of computation times of different methods

Method	Dish	Plate	Tower	Airplane	Average
Criminisi <sup>[4]</sup>	11.95	14.10	10.46	2.97	9.87
PSG <sup>[19]</sup>	27.27	7.16	15.59	3.91	13.24
Improved Criminisi <sup>[12]</sup>	1020.87	875.81	905.12	44.45	711.56
Method in Ref. [16]	2875.38	2915.12	2844.59	746.66	2345.43
Method in Ref. [17]	8924.93	6531.36	7800.52	1317.61	6143.60
Proposed	12.51	19.89	16.87	4.37	13.41

从表 1 可以看出,Criminisi 方法所需时间最少,但是该方法不适用于旋转及缩放图像;改进 Criminisi 方法、文献[16]方法及文献[17]方法均耗时较长;本文方法和 PSG 方法花费时间差不多,但是 PSG 方法获得的结果不能令人满意。综合考虑修复效果和修复效率,本文方法效果最佳。

## 4 结 论

当图像发生旋转或缩放时,传统基于样本块的图像修复算法无法实现最优匹配块的自动选取,针

对这一问题,提出一种基于样本块的旋转和缩放图像修复算法。利用局部特征向量所具有的旋转尺度不变性,对基于样本块的图像修复算法的匹配块搜寻过程进行改进,同时利用改进的空间能量函数对信息填充阶段进行拓展,以确保信息的正确填充。通过对几种图像修复方法进行比较,证明本文算法的有效性、稳健性。

本文算法利用局部特征向量进行匹配块搜索,对于低纹理区域,特征关键点往往较少,这会在很大程度上降低匹配块搜索的准确性。如何解决这一问

题,还有待进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V, *et al.* Image inpainting [C]//Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2000: 417-424.
- [2] Chan T F, Shen J. Mathematical models for local nontexture inpaintings[J]. *Siam Journal on Applied Mathematics*, 2001, 62(3): 1019-1043.
- [3] Chan T F, Shen J. Nontexture inpainting by curvature-driven diffusions [J]. *Journal of Visual Communication & Image Representation*, 2001, 12(4): 436-449.
- [4] 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.
- [5] Xue Y, Zhang H, Wang F, *et al.* Exemplar-based image completion using color ratio gradient [C]. *Image and Signal Processing*, 2008, 3: 569-572.
- [6] Kuo C M, Yang N C, Chang W H, *et al.* Image recovery based on effective image completion [C]//International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, 2008: 393-396.
- [7] Zhang Y, Pu Y F, Hu J R, *et al.* A class of fractional-order variational image inpainting models [J]. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2012, 6(2): 299-306.
- [8] Hasegawa M, Kako T, Hirobayashi S, *et al.* Image inpainting on the basis of spectral structure from 2-D nonharmonic analysis [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(8): 3008-3017.
- [9] Zhang X, Jin Y X, Xue D. Image matching algorithm based on SICA-SIFT and particle swarm optimization [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091002.  
张鑫, 靳雁霞, 薛丹. SICA-SIFT 和粒子群优化的图像匹配算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 091002.
- [10] Tan Y Q, Zeng F J, Yue L, *et al.* An improved algorithm for texture image synthesis [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 121001.  
谭永前, 曾凡菊, 岳莉, 等. 一种改进的纹理图像合成算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 121001.
- [11] Tan J Y, Li Q W, Zhou Y Q, *et al.* Underwater image restoration based on transmittance optimization and color temperature adjustment [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 011001.  
倪锦艳, 李庆武, 周亚琴, 等. 基于透射率优化和色温调节的水下图像复原 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 011001.
- [12] 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.  
张申华, 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.
- [13] Fawzi A, Samulowitz H, Turaga D, *et al.* Image inpainting through neural networks hallucinations [C]//Image, Video, and Multidimensional Signal Processing Workshop, 2016: 1-5.
- [14] Wang Y Q. E-PLE: an algorithm for image inpainting [J]. *Image Processing on Line*, 2013, 3: 271-285.
- [15] Fedorov V, Facciolo G, Arias P. Variational framework for non-local inpainting [J]. *Image Processing on Line*, 2015, 5: 362-386.
- [16] Mansfield A, Prasad M, Rother C, *et al.* Transforming image completion [C]//British Machine Vision Conference, 2011: 1-11.
- [17] He K, Zheng H, Zhang L Y. Image completion algorithm based on rotation and scale space expansion [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2015, 48(7): 652-657.  
何凯, 郑欢, 张丽莹. 基于旋转及尺度空间拓展的图像修复算法 [J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2015, 48(7): 652-657.
- [18] Fedorov V, Arias P, Facciolo G, *et al.* Affine invariant self-similarity for exemplar-based inpainting [C]//Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications, 2016: 48-58.
- [19] Huang J B, Kang S B, Ahuja N, *et al.* Image completion using planar structure guidance [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2014, 33(4): 129.
- [20] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [21] Wexler Y, Shechtman E, Irani M. Space-time completion of video [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2007, 29(3): 463.