

基于改进 Criminisi 算法的航拍图像厚云修复

张思雨*, 李从利**

中国人民解放军陆军炮兵防空兵学院, 安徽 合肥 230031

摘要 针对航拍图像中存在的厚云遮挡问题,提出了一种基于改进 Criminisi 算法的图像修复去厚云算法。通过改进优先权函数确定了最优待修补块,完善了最优匹配块搜索策略,减少了结构传播错误和累积错误,增大了匹配的准确度;根据像素点的亮度局部方差选择了适合的样本块尺寸,并定义了新的置信度更新函数。通过逐步细化的云检测方法和形态学开运算获得厚云区域掩模。模拟数据和真实数据实验结果表明,所提算法相比于传统 Criminisi 算法,补全效果更自然,能更好地修复航拍图像中的厚云区域。

关键词 图像处理; 航拍图像; 厚云去除; Criminisi 算法; 优先权模型

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.121012

Thick Cloud Restoration of Aerial Images Based on Improved Criminisi Algorithm

Zhang Siyu*, Li Congli**

Army Artillery and Air Defense Forces Academy of People's Liberation Army, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract In order to remove the thick cloud of aerial images, an improved image restoration algorithm based on improved Criminisi algorithm is proposed. The optimal inpainted block is selected by improving the priority function, and the searching strategy of the best matching block is optimized. In this way, the structural propagation error and cumulative error are reduced, and the matching accuracy is improved. Then the suitable size of the sample block is selected according to the local variance of the brightness of the pixels. A new confidence updating function is defined. The thick cloud area mask can be obtained through gradually refined cloud detection method and morphological closed operation. The experimental results of simulated data and real data show that compared with the traditional Criminisi algorithm, the completion effect of proposed method is more natural, and the thick cloud area in aerial images can be better repaired.

Key words image processing; aerial image; thick cloud removal; Criminisi algorithm; priority model

OCIS codes 100.2000; 100.3010; 100.3020

1 引言

近年来,随着航拍飞机、无人机等航拍设备的迅速普及,航拍图像的数据量得到了前所未有的发展。航拍图像具有大视场、高清晰度的特点,已经成为研究和观察地表信息的重要方式之一^[1-2]。然而,当航拍设备受到云覆盖(尤其是厚云覆盖)影响时,会对其下垫面的信息造成遮挡,影响研究人员的进一步研究分析。平均来说,在任何时期,35%的全球陆地表面积会被云覆盖^[3]。在某些国家和地区,云覆盖的面积可能会更大。故研究航拍图像的去云算法

具有十分重要的理论意义和应用价值。

目前,去云方法主要可分为三类。第一类是基于多光谱的方法^[4-7],其利用冗余含云波段和其对应波段的光谱相关性重建云区信息,然而航拍图像主要为可见光波段,一般没有冗余的波段,而且厚云一般存在于多光谱的所有波段,故这类方法并不适用于航拍图像去厚云。第二类是基于多时相的方法,其通过同一场景不同时刻的无云区域参考影像信息替换或重建云覆盖区域的信息。Lin 等^[8]提出了基于块的信息重建全局最优方法,将参考影像的梯度镶嵌到云覆盖区域,利用泊松方程重建云区域的信

收稿日期: 2018-06-07; 修回日期: 2018-06-29; 录用日期: 2018-07-12

* E-mail: yusonzhang@foxmail.com; ** E-mail: lcliqa@163.com

息。Zhang 等^[9]提出了一种具有泊松调整的时空融合算法,融合多传感器和多时相图像以达到去云效果。航拍飞行器在拍摄时的轨迹一般是固定的,在很多情况下(如战场环境)不便于进行影像重采,故无法提供多时相数据,而且此类方法还会涉及图像配准和融合等领域,算法构成比较复杂。第三类是基于图像修复的方法,这类方法不需要辅助数据,使用图像中剩余部分的数据对云区进行填充。Maalouf 等^[10]提出了一种基于 Bandelet 变换的遥感图像去云算法;Lorenzi 等^[11]针对高分辨率遥感图像提出了基于光谱和集合信息的修补策略;Li 等^[12]提出了基于时域组稀疏表示的云去除方法。然而,这些方法的主要研究对象是多波段卫星遥感图像,对于只有红绿蓝(RGB)通道的航拍图像研究较少。

最经典的图像修复方法是 Criminisi 等^[13]提出的基于样本块匹配的修复算法,该算法结合了纹理合成和扩散填充的优点,可修复较大孔洞的缺失信息,视觉效果比较自然,但有时会出现匹配错误^[14]和信息丢失^[15]的现象。近年来,研究者提出了多种改进算法,如 Kui 等^[16]使用结构张量对数据项进行优化,但只考虑了目标块与待修复块的颜色距离,没有深入探究它们之间的相似性;杨筱平等^[17]通过 Dempster-Shafer(D-S)证据数据融合方法改进了优先权计算函数,但该算法复杂度较高,运行速率较慢;Sun 等^[18]提出了基于结构传播的修复方法,但该方法需要手动勾选待修复区域,增大了用户的工作量;李旭峰等^[19]在原有置信度的基础上增大了具有明显特征边缘点的置信度,但该算法对待修复边缘的选择十分敏感;卢雯霞等^[20]利用局部特征向量的旋转尺度不变性改进了匹配块搜寻过程,但该方法在低纹理区域的匹配准确度不高;王鹏焜等^[21]引入了颜色匹配度量来优化相似度匹配,但仍未较好地解决修复顺序错误的问题。

传统去云方法的对象大多是遥感影像,而航拍图像分辨率较高,波段多为可见光波段,因此不能直接运用传统的遥感图像去云方法。本文提出了一种基于改进 Criminisi 算法的航拍图像去厚云算法,通过改进优先级计算模型、优化最佳匹配块搜索策略、设定自适应样本块大小模型和新的置信度更新方式,对云检测得到的厚云区域进行填充。实验结果表明,所提算法可以得到较为理想的厚云区域修复结果。

2 Criminisi 算法

Criminisi 算法是一种基于样本块优先级匹配的图像修复算法,主要内容包括:计算优先级、搜索最佳匹配块并填充,以及更新置信度。

2.1 计算优先级

图 1 所示为计算优先级的示意图,其中 I 为整个图像, Ω 为受损区域, φ 为未受损区域, δ_Ω 为待修复区域边界, p 为优先级最高的像素, ψ_p 为以 p 点为中心、大小为 $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$ 的样本块, \mathbf{n}_p 为点 p 处的单位法向量, ∇I_p^\perp 为点 p 的等照度线方向和强度,方向垂直于点 p 的梯度方向。块 ψ_p 的优先级计算公式为

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

式中: $C(p)$ 为置信度项; $D(p)$ 为数据项。它们的定义分别为

$$C(p) = \frac{\sum_{q \in \psi_p \cap \varphi} C(q)}{|\psi_p|}, \quad (2)$$

$$D(p) = \frac{|\nabla I_p^\perp \cdot \mathbf{n}_p|}{\alpha}, \quad (3)$$

式中: $|\psi_p|$ 为块 ψ_p 的面积; α 为标准化因子(在灰度图中 $\alpha = 255$); $\nabla I_p^\perp = \frac{(-I_y, I_x)}{\sqrt{I_x^2 + I_y^2}}$,其中 I_y 和 I_x 分别为点 p 在 x 和 y 方向的偏微分。在边界的每一个像素块上计算其优先级,初始时,如果 $\forall p \in \Omega$, $C(p) = 0$, 否则 $C(p) = 1$ 。

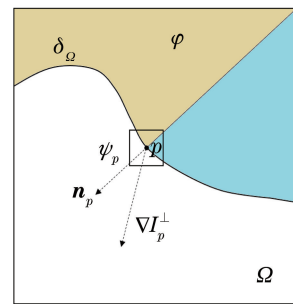


图 1 计算优先级

Fig. 1 Priority of calculation

2.2 搜索最佳匹配块并填充

通过 2.1 节的方法找到优先级最高的待修复块 ψ_p , 使用全局搜索方法,将平方差距离和 (f_{SSD}) 作为匹配准则,在未受损区域 φ 中找到其最佳匹配块 ψ_q' :

$$\psi_q' = \arg \min_{\psi_q \in \varphi} [f_{SSD}(\psi_p, \psi_q)]. \quad (4)$$

用对应的最佳匹配块对待修复块进行填充。

2.3 更新置信度

待修复块 ψ_p 填充了新像素值后,出现了新的边界,需要更新置信度:

$$C(p') = C(p), \forall p' \in \psi_p \cap \Omega. \quad (5)$$

重复以上步骤,直到受损区域被全部填充完毕。

3 改进的 Criminisi 算法

3.1 改进优先级

由(3)式可知,当像素点的等照度线和单位法向量垂直时,数据项 $D(p) = 0$,在整个算法的迭代过程中,置信度 $C(p)$ 也会从 1 逐渐减小到趋于 0,此时优先级 $P(p)$ 也会趋于 0,造成修复顺序出现错误^[22]。航拍图像纹理细节比较丰富,对优先级计算的准确度要求更高。故在原有优先级的基础上增大数据项所占的比例:

$$P(p) = C(p) \cdot D(p) + \omega \times D(p), \quad (6)$$

式中: ω 为权重系数。经过多次实验可知, $\omega = 7$ 时修复效果最为理想。

用待修复块中心像素点的八邻域方向优化置信度:

$$C'(p) = \sum_{\psi_p \cap \varphi} V / \|\psi_p\|, \quad (7)$$

式中: V 为以 p 点为中心的八邻域中落在未受损区域内的像素之和。使用结构张量 \mathbf{J} 优化数据项,即把图像梯度卷积后的散度作为数据项^[16],计算公式为

$$D'(p) = \text{div}[\mathbf{J} \nabla I(x, y)], \quad (8)$$

式中: div 为散度算子。综合(6)~(8)式可得最终的优先级计算函数为

$$P(p) = C'(p) \cdot D'(p) + 7D'(p). \quad (9)$$

3.2 改进相似度匹配准则

传统 Criminisi 算法以 f_{SSD} 作为匹配准则,在图像纹理较为简单时具有较好的效果,但当对象是具有复杂纹理的航拍图像时,可能会出现错误匹配的情况。故使用标准协方差来深入分析待修复块和目标块的相似度差异分布情况,其计算公式为

$$d(\psi_p, \psi_q) = f_{\text{SSD}}(\psi_p, \psi_q) \times \{ [d_{\text{STD}}(\psi_p - \psi_q)]^\beta + 1 \}, \quad (10)$$

$$d_{\text{STD}}(\psi_p - \psi_q) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_t \{ [\psi_p(t)M_p(t) - \psi_q(t)M_q(t)] - (\bar{\psi}_p - \bar{\psi}_q) \}^2}, \quad (11)$$

式中: m 为块中有效信息的数量; β 为权重因子; $\bar{\psi}_p$ 和 $\bar{\psi}_q$ 分别为待修复块和目标块中已知信息的平均值; t 为样本块中的像素点序号; M_p 和 M_q 分别为待修复块和匹配块中序号为 t 的像素点出现的概率。由(10)式可知,标准协方差值越小,对应匹配块的相似度也就越高,常数项 1 的作用是避免标准协方差值为 0。

3.3 自适应样本块大小选择模型

传统 Criminisi 算法的样本块大小固定为 $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$,这显然是不合理的^[23]。若样本块尺寸过大,修补过程会过于粗糙,不能很好地处理较小的纹理细节;若尺寸过小,在较平滑的区域可能会带来块效应。而且航拍图像分辨率较高,土地覆盖类型信息复杂多样,纹理结构信息大多不均匀,因此对于不同纹理结构的区域应采用与其相适应的样本块大小,以提升算法的稳健性。

图像的局部方差^[24]是表示图像结构信息的一个重要特征,其值越大代表图像细节越复杂,反之则图像越平滑。将局部方差引入到自适应样本块大小

选择模型中^[23],即

$$S = \begin{cases} 9, & L(p) \leq 0.2 \\ 7, & 0.2 < L(p) \leq 0.4 \\ 5, & 0.4 < L(p) \leq 0.6 \\ 3, & L(p) > 0.6 \end{cases}, \quad (12)$$

式中: S 为选择的样本块大小; $L(p)$ 为 p 点的局部方差值。

3.4 更新置信度的改进

待修复块被新像素填充后,需更新置信度, Criminisi 算法未考虑待修复块和匹配块的相似度,而它们是有误差的,随着算法的迭代误差也会叠加,影响填充顺序。置信度的更新方式^[25]为

$$C(p') = C(p) \cdot \frac{3}{\lg(I' + \alpha)}, \alpha > 0, \quad (13)$$

式中: I' 为待修复块和目标块的 prewitt 算子值之间的差异度, $I' = \sum_{i=1}^n |I_{p_i} - I_{q_i}|$, 其中 n 为待修复块中已知像素点的个数, I_{p_i} 和 I_{q_i} 分别为待修复块和目标块的 prewitt 算子值; 常数项 α 的作用是避免分母为 0, 其值为 2 时效果最好。

4 实验分析与比较

实验在操作系统为 Windows 7、中央处理器 (CPU) 为 2.6 GHz Intel Core i5 3230M、内存为 4 G 的笔记本上完成, 采用 MATLAB R2016a 软件编程实现。先对厚云区域掩模获取方法予以介绍, 然后分别在模拟云图和实拍云图上进行去云实验。为了验证所提算法的有效性, 将其与传统 Criminisi 算法和 Huang 等^[26]提出的使用平面结构引导的修补算

法进行对比实验。

4.1 标记厚云区域掩模

要去除航拍图像中的厚云, 首先要获得厚云区域的掩模, 若掩模外有云残留, 就会影响整个图像的修复效果, 故云掩模还要包括存在于厚云边缘的薄云, 综合采用 Zhang 等^[27]提出的逐步细化的航拍图像云检测方法和形态学开运算^[28]来解决这一问题。云检测结果如图 2 所示, 可以看出, 形态学开运算消除了和云区不连接的像素, 得到的掩模边界更加平滑。



图 2 云检测获取云区掩模。(a)原图;(b)初步云检测掩模;(c)形态学开运算结果

Fig. 2 Cloud mask obtained by cloud detection. (a) Original image; (b) initial cloud detection mask; (c) mask after morphological opening operation

4.2 模拟加云图像的厚云去除

模拟实验数据来自于 2013 年 6 月 3 日拍摄的江西省九江市彭泽县的航拍图像, 因为原图尺寸过大, 分别截取大小为 $351 \text{ pixel} \times 301 \text{ pixel}$ 和 $361 \text{ pixel} \times 331 \text{ pixel}$ 的两块区域进行实验, 去云效果分布如图 3 和图 4 所示。在图 3 中, 传统 Criminisi 算法的结果延长了蓝顶建筑物的长度; 文献^[26]算法的结果在建筑物上方添加了无关的地物信息, 且填补区域整体较模糊; 所提算法则能较为正确地估计云层下面建筑物的尺寸, 并找到了最相似的目标块予以填充。在图 4 中, 传统 Criminisi 算法

的结果整体纹理比较杂乱, 黄色区域内出现了错误匹配现象; 文献^[26]算法的结果中, 地物信息模糊不清; 所提算法较好地补充了地物信息, 道路部分的填补完成度较高。

为了进一步衡量所提算法的效果, 采用峰值信噪比 (PSNR) 和结构相似性 (SSIM)^[29] 两种图像质量评价指标来定量分析图 3 和图 4 中的去云效果, 结果如表 1 所示。PSNR 值越大、SSIM 值越接近于 1, 说明两幅图像越相似, 即所恢复的图像越接近于真实图像。由表 1 可知, 所提算法在 PSNR 和 SSIM 这两个评价指标上的表现总体优于传统

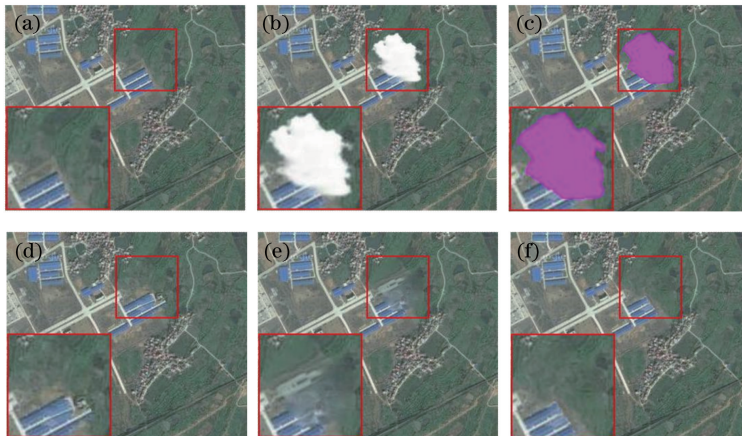


图 3 第一组模拟加云结果。(a)原图;(b)模拟加云;(c)云检测掩模;(d)传统 Criminisi 算法结果;(e)文献^[26]算法结果;(f)所提算法结果

Fig. 3 The first set of simulated cloud results. (a) Original image; (b) simulated cloud; (c) cloud mask; (d) traditional Criminisi method; (e) method in Ref. [26]; (f) proposed method

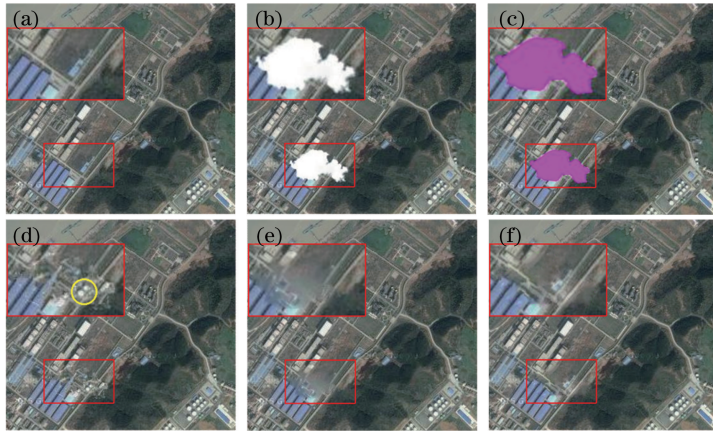


图4 第二组模拟加云结果。(a)原图;(b)模拟加云;(c)云检测掩模;(d)传统 Criminisi 算法结果;
(e)文献[26]算法结果;(f)所提算法结果

Fig. 4 The second set of simulated cloud results. (a) Original image; (b) simulated cloud; (c) cloud mask;
(d) traditional Criminisi method; (e) method in Ref. [26]; (f) proposed method

表1 不同算法去云效果的评价参数对比

Table 1 Comparison of evaluation index of different algorithms for cloud removal effect

Image number	Index	Traditional Criminisi method	Method in Ref.[26]	Proposed method
Fig. 3	PSNR	31.1735	34.7962	37.4294
	SSIM	0.8931	0.9542	0.9867
Fig. 4	PSNR	28.3526	33.6145	33.8701
	SSIM	0.9093	0.9316	0.9804

Criminisi 算法和文献[26]算法,从而验证了本文算法的有效性。

4.3 实拍含云图像的厚云去除

为了评价所提算法的实际去云效果,进行了实

拍含云图像的去云实验。拍摄地区同样是江西省九江市彭泽县,拍摄时间为2013年8月17日,截取尺寸为374 pixel×349 pixel的典型厚云区域进行了实验,各算法的去云效果对比如图5所示。



图5 实拍含云图像去云结果。(a)原图;(b)云检测掩模;(c)传统 Criminisi 算法结果;(d)文献[26]算法结果;(e)所提算法结果

Fig. 5 Real cloud image results. (a) Original image; (c) cloud mask; (c) traditional Criminisi method;
(d) method in Ref. [26]; (e) proposed method

可以看出,传统 Criminisi 算法的结果在山脚线附近的纹理比较模糊;文献[26]算法的结果整体比较模糊,对植被的纹理信息恢复较差;而所提算法在补全山脚线的同时,较好地恢复了植被的纹理细节,与未受云覆盖影响区域的衔接比较自然。

5 结 论

将图像修复技术引入到航拍图像去云工作中,

从优先级计算、相似度匹配准则、样本块大小和更新置信度这4个方面对传统的 Criminisi 算法予以改进,通过模拟加云和实拍含云图像实验验证可知,所提算法能较好地修补航拍图像中的厚云,修复结果的纹理结构较为清晰,视觉效果自然。因为航拍图像中具有比较丰富的相似信息,符合机器学习的基础条件,下一步将采用基于机器学习的图像修补技术进行去云工作。

参 考 文 献

- [1] Wang B, Wang X, Chen F, *et al.* Pavement crack recognition based on aerial image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0810004.
王博, 王霞, 陈飞, 等. 航拍图像的路面裂缝识别 [J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0810004.
- [2] Wei Y M, Quan J C, Hou Y Q Y. Aerial image location of unmanned aerial vehicle based on YOLO v2[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 111002.
魏湧明, 全吉成, 侯宇青阳. 基于 YOLO v2 的无人机航拍图像定位研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 111002.
- [3] Lin C H, Lai K H, Chen Z B, *et al.* Patch-based information reconstruction of cloud-contaminated multitemporal images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(1): 163-174.
- [4] Rakwatin P, Takeuchi W, Yasuoka Y. Restoration of aqua MODIS band 6 using histogram matching and local least squares fitting [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, 47(2): 613-627.
- [5] Shen H, Zeng C, Zhang L. Recovering reflectance of AQUA MODIS band 6 based on within-class local fitting [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2011, 4(1): 185-192.
- [6] Gladkova I, Grossberg M D, Shahriar F, *et al.* Quantitative restoration for MODIS band 6 on Aqua [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2012, 50(6): 2409-2416.
- [7] Zhang Y, Guindon B, Cihlar J. An image transform to characterize and compensate for spatial variations in thin cloud contamination of Landsat images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82(2): 173-187.
- [8] Lin C H, Tsai P H, Lai K H, *et al.* Cloud removal from multitemporal satellite images using information cloning [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2013, 51(1): 232-241.
- [9] Zhang C, Li Z, Cheng Q, *et al.* Cloud removal by fusing multi-source and multi-temporal images [C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2017: 2577-2580.
- [10] Maalouf A, Carre P, Augereau B, *et al.* A bandelet-based inpainting technique for clouds removal from remotely sensed images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, 47(7): 2363-2371.
- [11] Lorenzi L, Melgani F, Mercier G. Inpainting strategies for reconstruction of missing data in VHR images [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2011, 8(5): 914-918.
- [12] Li X, Shen H, Li H, *et al.* Temporal domain group sparse representation based cloud removal for remote sensing images [C]. *International Conference on Image and Graphics*, 2015: 444-452.
- [13] 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.
- [14] Tang F, Ying Y, Wang J, *et al.* A novel texture synthesis based algorithm for object removal in photographs [C]. *Asian Computing Science Conference on Advances in Computer Science*, 2004: 248-258.
- [15] 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.
- [16] Kui L, Jieqing T, Benyue S. Exemplar-based image inpainting using structure tensor [C]. *International Conference on Advanced Computer Science and Electronics Information*, 2013, 5(6): 143-148.
- [17] Yang X P, Wang S W. Dunhuang mural inpainting in intricate disrepaired region based on improvement of priority algorithm [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2011, 23(2): 284-289.
杨筱平, 王书文. 基于优先权改进算法的敦煌壁画复杂破损区域修复 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2011, 23(2): 284-289.
- [18] Sun J, Yuan L, Jia J, *et al.* Image completion with structure propagation [C]. *Acm Siggraph*, 2005, 24(3): 861-868.
- [19] Li X F, Wang J, Liu H M, *et al.* Image inpainting using feature precedence and patch matching [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(7): 1131-1137.
李旭峰, 王静, 刘红敏, 等. 特征优先块匹配图像修复算法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, 28(7): 1131-1137.
- [20] Lu W X, He K. Exemplar-based inpainting algorithm with rotation and scaling transformation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55

- (3): 031006.
- 卢雯霞, 何凯. 基于样本块的旋转及缩放图像修复算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031006.
- [21] Wang P Y, Zhao D H, Li M F. Optical camouflage effect assessment based on digital image inpainting technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 031011.
- 王鹏焯, 赵德辉, 李明锋. 基于图像修复技术的目标可见光伪装效果评价[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031011.
- [22] Khellah F. Textured image denoising using dominant neighborhood structure [J]. *Arabian Journal for Science & Engineering*, 2014, 39(5): 3759-3770.
- [23] Tan S. Research on image inpainting technology of large area damaged [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- 谭实. 大区域破损图像修复技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- [24] Wang Y Q. Application of local variance in image quality assessment [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(5): 531-536.
- 王宇庆. 局部方差在图像质量评价中的应用[J]. 中国光学, 2011, 4(5): 531-536.
- [25] Chang C, He J N. An improved Criminisi method for image inpainting [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(1): 74-79.
- 常晨, 何建农. 一种改进的 Criminisi 图像修复方法[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 74-79.
- [26] Huang J B, Kang S B, Ahuja N, *et al.* Image completion using planar structure guidance [J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2014, 33(4): 1-10.
- [27] Zhang Q, Xiao C. Cloud detection of RGB color aerial photographs by progressive refinement scheme [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(11): 7264-7275.
- [28] Xiang Y, Ye Q H, Liu J G, *et al.* Retrieve of planetary boundary layer height based on image edge detection [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0704003.
- 项衍, 叶擎昊, 刘建国, 等. 基于图像边缘检测法反演大气边界层高度 [J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0704003.
- [29] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.