

## 基于改进 Criminisi 算法的地基云图修复方法

路志英 周庆霞 李 鑫

(天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津, 300072)

**摘要:** 全天空成像仪 (Total sky imager, TSI) 对天空进行观测时, 设备的结构特点会使采集到的云图信息不完整, 对图像的分析造成不利影响。针对 Criminisi 算法修复地基云图所造成修复顺序发生错误、图像不连续以及匹配块遍历搜索时间复杂度大的问题, 本文提出了一种基于改进 Criminisi 算法的地基云图修复方法。该算法改进了优先权计算公式, 引入地基云图独特的红蓝比特特征作为置信项, 使得含有更多信息的像素块具有更高的优先级, 在搜索匹配块的过程中, 基于启发信息选择匹配区域的大小, 避免了搜索到离待修复块较远的相关性较低的匹配块, 也有效缩短了匹配块搜索时间, 降低了算法的时间复杂度。实验结果表明, 改进后的 Criminisi 算法具有较好的图像修复效果, 且降低了时间复杂度, 提高了修复效率。

**关键词:** 地基云图; 图像修复; 优先权函数; 匹配区域

**中图分类号:** TP391      **文献标志码:** A

### Ground-Based Cloud Image Inpainting Method Based on Improved Criminisi Algorithm

Lu Zhiying, Zhou Qingxia, Li Xin

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

**Abstract:** When the total sky imager (TSI) is used to observe the sky, the structural characteristics of the device will make the collected cloud image information incomplete, which affects the analysis of images. In order to deal with the problems, including the wrong order due to the sharp decrease to zero of the confidence level, the discontinuity of image and the large complexity of time for traversal searching the matching block in the process of repairing ground-based cloud image by the Criminisi algorithm, we propose a ground-based cloud image inpainting method based on the improved Criminisi algorithm in this paper. The calculation formula of priority is improved, and the unique red-blue ratio feature of the ground-based cloud map is introduced as a confidence term, so that the pixel block with more information has higher priority. In the process of searching for the matching block, the searching area is selected based on heuristic information in order to avoid the blocks far away from the block to be repaired and those with low correlation, which effectively shortens the searching time and reduces the time complexity of the algorithm. Experimental results show that the improved Criminisi algorithm has better image restoration effect, can reduce the time complexity and improve the image inpainting efficiency.

**Key words:** ground-based cloud image; image inpainting; priority function; matching region

**基金项目:** 国家自然科学基金 (51677123) 资助项目。

**收稿日期:** 2018-11-20; **修订日期:** 2018-12-29

## 引 言

太阳能是一种绿色环保的可再生能源,光伏系统可以实现对太阳能的有效利用,因此对光伏系统的预测研究逐渐引起了人们的关注<sup>[1]</sup>。然而,天空中云的生成、运动和消融会造成光伏系统输出功率不稳定<sup>[2]</sup>。因此,结合云图预测光伏系统超短期输出功率(或太阳辐射)的方法成为了当前主流的研究内容<sup>[3]</sup>。对于实时和超短期预测,结合地基云图进行预测是现在广泛使用的方法<sup>[4]</sup>。全天空地基云图是通过特定的拍摄设备对天空进行拍摄所获取的图像。由于全天空成像仪(Total sky imager, TSI)的设备结构特点导致采集的云图存在信息缺失,严重影响了云识别、云量计算及云量分布的描述。因此,对地基云图进行修复具有至关重要的意义<sup>[5]</sup>。

云图修复属于图像修复范畴,主要可分为两大类<sup>[6]</sup>:一类是针对小尺度缺损的基于结构的图像修复技术;另一类是针对大面积破损的基于样本块匹配的纹理合成算法。Bertalmio 等<sup>[7]</sup>首次提出数字图像修复这一术语,该技术主要应用于破损油画或照片的修复、指定目标物的移除;在此基础上,Chan 和 Shen 提出了全变分模型<sup>[8]</sup>和基于曲率驱动扩散模型<sup>[9]</sup>。此类修复方法在修复小尺度破损图像时有很好的修复效果,但对大面积纹理区域缺失的图像进行修复时会产生模糊现象,因此主要适用于非纹理图像和破损程度不严重的纹理类图像。Criminisi 等<sup>[10]</sup>于 2004 年提出一种基于样本的图像修复算法,该算法在确保可以修复较大破损区域的同时,还一定程度上保留了图像的结构和纹理信息,使得对物体的移除和区域的填充具有良好的效果。后续大量的专家学者对 Criminisi 算法进行研究,提出了大量的改进算法<sup>[11-14]</sup>。例如,彭坤杨等<sup>[11]</sup>通过基于图像平均灰度值的方法,缩短算法执行时间,修复效果与 Criminisi 算法持平,但丢失了图像的彩色信息;朱霞等<sup>[12]</sup>采用基于颜色区域分割的方法,其分配块的搜索限定在源样本块所覆盖的颜色区域中,提高了算法性能,但增加了算法的复杂度;韩明珠等<sup>[13]</sup>通过引入调节因子减小置信度对优先权的影响,间接增大数据项对优先权的作用,在一定程度上增加了算法的复杂度。

地基云图纹理细节比较丰富,本文在 Criminisi 算法的基础上提出了一种基于改进 Criminisi 算法的地基云图修复方法,即根据地基云图独特的红蓝比特征,对优先权函数进行改进,使修复顺序得到了改善,同时对搜索匹配块时的搜索区域进行了调整,使修复结果更加自然,提高了修复的准确性。

## 1 Criminisi 算法简介

Criminisi 修复算法的原理是在最佳样本上通过寻找待修复块的最佳匹配块及复制来进行图像修复。该算法主要由计算待修复块优先级、寻找最佳匹配块并填充以及更新置信度 3 部分构成。

令 Criminisi 修复算法中符号标记如图 1 所示。其中: $I$  代表整个图像; $\Omega$  代表图像  $I$  中待修复的区域; $\delta\Omega$  代表待修复区域与源区域的边界; $\Phi$  代表源区域,可为待修复区域提供最佳匹配样本,且  $\Phi = I - \Omega$ ;  $\psi_p$  为位于待修复区域边界  $\delta\Omega$  上大小为  $(2\epsilon + 1) \times (2\epsilon + 1)$  的待修复块,中心点为  $p$ ,一般情况下选择  $M \times M$  ( $M = 9$ ) 的方形窗口模块。

### 1.1 计算待修复块的优先级

Criminisi 修复的核心与重点是不同待修复块优先级的计算与比较,图像源区域的每个像素点都有不同的置信度,而待修复块由于其内部像素点的差别而具有不同的优先级。

对于以边界线  $\delta\Omega$  上的点  $p$  为中心的待修复块  $\psi_p$ ,其优先权  $P(p)$  的计算公式为

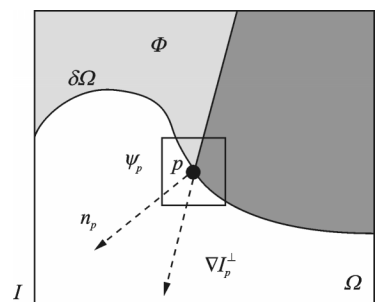


图 1 Criminisi 算法标记图

Fig.1 Criminisi algorithm marker map

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

式中:  $C(p)$  表示置信度项, 用来衡量待修复块  $\psi_p$  中可靠信息的数量;  $D(p)$  为数据项, 表示当前点  $p$  所达到的等照度线的强弱。  $C(p)$  和  $D(p)$  可由式(2,3)计算获得。

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

需要对  $C(p)$  进行初始化处理, 当  $\forall p \in \Omega$  时, 置  $C(p) = 0$ ; 当  $\forall p \in \Phi$  时, 置  $C(p) = 1$ , 有

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

式中:  $\mathbf{n}_p$  表示  $p$  点处垂直于边界线  $\delta\Omega$  的法向量;  $\nabla I_p^\perp$  表示点  $p$  的等照度线方向;  $\alpha$  为归一化参数, 一般选择  $\alpha = 255$ 。

根据式(1)计算待修复区域边界上所有点的优先级, 确定出优先级最大的点所在的待修复块。

## 1.2 寻找最佳匹配块并填充

寻找最佳匹配块是在源区域中搜索与具有最大优先级的待修复块纹理最相近且与之匹配的块; 填充则是把搜索到的最佳匹配块中的像素对应复制到待修复块的未知像素点, 从而使未知像素点转化为已知像素点。

不同的匹配块与具有最大优先级的待修复块之间的匹配度公式为

$$\Psi_{\hat{p}} = \arg \min_{\Psi_{\hat{p}} \in \Phi} d(\Psi_{\hat{p}}, \Psi_p) \quad (4)$$

式中:  $\Psi_p$  表示待修复块;  $\Psi_{\hat{p}}$  表示匹配块, 其中  $\hat{p}$  表示匹配块中的像素点;  $d(\Psi_{\hat{p}}, \Psi_p)$  表示  $\Psi_{\hat{p}}$  与  $\Psi_p$  块区间的差距。基于像素灰度平方差之和 (Sum of squared differences, SSD) 最小的匹配准则, 待修复块与匹配块内像素之间存在的颜色差距可描述为

$$SSD = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \left\{ \left( R(\hat{p}_{ij}) - R(p_{ij}) \right)^2 + \left( G(\hat{p}_{ij}) - G(p_{ij}) \right)^2 + \left( B(\hat{p}_{ij}) - B(p_{ij}) \right)^2 \right\} \quad (5)$$

式中函数  $R()$ 、 $G()$ 、 $B()$  分别表示  $M \times M$  (本文设定  $M = 9$ ) 图像块中点  $(i, j)$  的红、绿、蓝三原色。

确定最佳匹配块之后, 将搜索到的最佳匹配块中的像素对应复制到待修复块的未知像素点, 实现待修复块的修补过程。

## 1.3 更新置信度

待修复块的修复实现之后, 其中的边界点转化为内部的已知点, 原待修复区域内的点变为已知点或者边界点, 此时需要更新已知像素点的置信度以及边界点的优先权。将这些点的置信度统一设为与  $p$  点相同的置信度

$$C(p') = C(p) \quad \forall p' \in \psi_p \cap \Omega \quad (6)$$

对以上3步进行循环, 直至待修复区域完成全部修复。

## 2 基于 TSI 设备的图像采集

### 2.1 图像采集设备

TSI-880 是美国 Yankee Environmental Systems 公司研制的全自动、全彩色天空成像系统, 能够满足各种天气条件下对局地天空的观测需要。图2所示为 TSI-880 的外观, 该设备的工作原理是通



图2 全天空成像仪 TSI-880 外观

Fig.2 TSI-880 appearance

过 CCD 镜头向下观测一个半球型旋镜,捕捉从天空反射到镜上的图像;在球面镜上方有一条遮光带随太阳的运动而转动,用于避免阳光直射入镜头,起到保护 TSI 的作用<sup>[15]</sup>。TSI-880 采集的地基云图为 640 像素  $\times$  480 像素的 JPEG 图像,通过网络服务器实时显示。

图 3 为 TSI-880 输出的云图图像,中部圆形区域为有效区域,因此处理图像时首先将圆形区域外部置白,以消除外部区域对图像处理的影响;其次,中部圆形区域中的遮光带和镜头支臂影像为待修复区域,对其进行置黑,处理后的结果如图 4 所示。

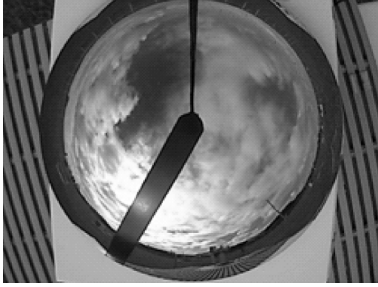


图 3 TSI-880 输出的云图图像

Fig.3 Cloud image outputted by TSI-880

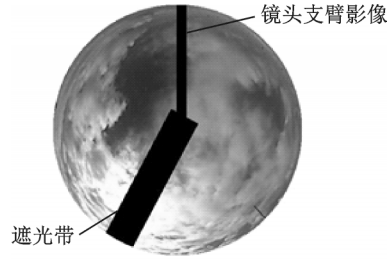


图 4 待修复区域的显示

Fig.4 Displayed area to be inpainted

## 2.2 遮光带和镜头支臂影像定位

TSI 设备的镜面上存在保护其摄像头不受太阳强光损坏的遮光带,且设备用于支撑镜头的机械臂也在镜面上形成投影,使获得的云图信息不完整,影响图像的分析,因此为了修复地基云图还原云图真实情况,需要确定出遮光带和镜头支臂影像在云图中的位置。

遮光带在云图中的位置会随着太阳位置的变化而变化,因此需要计算太阳光斑在地基云图中的位置以对遮光带进行定位,以此确定待修复区域。在天文学中,可通过太阳天顶角和方位角确定太阳的位置。遮光带与镜头支臂影像定位的计算过程如下:

(1) 获取 TSI 云图拍摄的时间和设备所在位置的经纬度。

(2) 计算太阳赤纬角  $\delta$  为

$$\delta = 23.45 \sin \left( \frac{2\pi(284 + N)}{365} \right) \quad (7)$$

式中  $N$  为一年中的日期顺序序列号,从一年中的第一天(1月1日)到最后一天(12月31号),取值范围是 1~365。

(3) 计算太阳时角  $\omega$  为

$$\omega = 15(t - 12) \quad (8)$$

式中  $t$  表示真太阳时,以 24 h 计。

(4) 计算太阳方位角  $\gamma_s$  和天顶角  $\theta_z$  为

$$\begin{cases} \theta_z = \arccos(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega) \\ \gamma_s = \arcsin \left( \frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \theta_z} \right) \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\varphi$  表示全天空成像仪 TSI 所处位置的纬度。

(5) 确定遮光带位置。由于遮光带区域的轴线和云图中心线的夹角与太阳方位角  $\gamma_s$  (如图 5 所示) 一致,所以可以通过太阳方位角来确定遮光带区域的中心线在云图中的位置。

(6)镜头臂的位置在图像中固定,可直接确定。

### 3 Criminisi 图像修复算法的改进

#### 3.1 优先权的改进

Criminisi 算法在确保可以修复较大破损区域的同时,还一定程度上保留了图像的结构和纹理信息,使得对物体的移除和区域的填充具有良好的效果。然而由于地基云图纹理细节比较丰富,具有独特的红蓝比特征,因此将该特征引入置信项中,可实现对待修复块优先级的计算。

在优先权函数中的置信项中加入了地基云图独特的红蓝比特征,避免了置信度快速下降造成的影响,使得图像修复时的顺序更加合理。对 Criminisi 算法的优先权计算公式作如下改进

$$P(p) = RB(p) \cdot D(p) \quad (10)$$

式中  $RB(p)$  表示改进的置信度项,则  $RB(p)$  为

$$RB(p) = \frac{\sum_{q \in \psi_p \cap \Phi} rb(q)}{|\psi_p|} \quad (11)$$

$$rb(q) = \frac{R(q)}{B(q)} \quad (12)$$

式中:  $\psi_p$  表示待修复块,选取  $9 \times 9$  的方形窗口模块;  $rb(q)$  表示  $q$  点的红蓝比,即像素点  $q$  的红色通道和蓝色通道的分量比值。

#### 3.2 基于启发信息的最佳匹配块获取

在 Criminisi 算法中每个待修复块采用遍历的方法对整个源区域进行全局搜索,这种搜索方法会增加算法的时间复杂度,使效率降低。而一块图像与周围相邻图像的相关性与距离成反比,采用全局搜索有时会得到离待修复块较远且相关性较低的匹配块,即过大的搜索范围可能会导致最终得到的修复图像与其邻域图像有较大的差别。

通常一幅图像具有很强的空间冗余度,而且相邻像素值的变化小,这些具有相关性的点形成了图像的结构和纹理。对于待修复块可以只选取待修复点周围的源区域作为待匹配区域,这样可以缩短搜索时间,同时保证修复图像在其邻域图像内搜索。为此,本文提出基于启发信息选择匹配区域大小的方法,步骤如下:

(1)待修复区域为遮光带和镜头支臂影像区域;

(2)选择以待修复点为中心的边长为  $L$  的正方形,

其中:  $L = \frac{\min(m, n)}{l}$ ,  $m \times n$  为原图像大小,  $l =$

$\text{INT} \left[ \frac{\min(m, n)}{2 \times (w + M)} \right]$ , 该模块与源区域相交的部分即

为匹配区域,如图 6 所示。图中:  $p$  为待修复点,  $w$  为遮光带宽度,  $M$  为以点  $p$  为中心的待修复块的边长,  $L$  为以点  $p$  为中心的正方形的边长,图中阴影部分即为匹配区域;

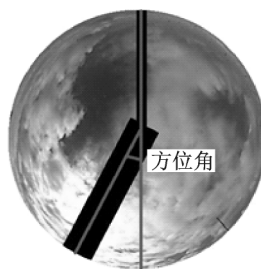


图 5 方位角在地基云图中的显示

Fig.5 Display of azimuth in the ground-based cloud image

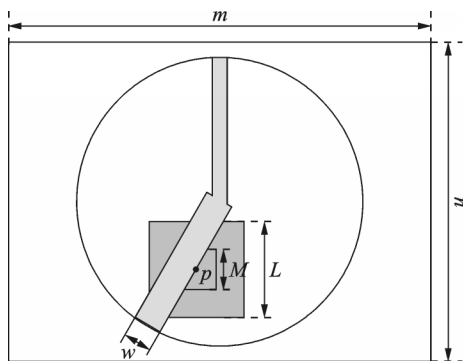


图 6 待修复点的匹配区域

Fig.6 Matching area of the point to be inpainted

(3)在匹配区域中遍历,寻找最佳匹配块。

### 3.3 改进后算法流程

改进后的具体实现步骤如下(流程图如图 7 所示):

(1)对提取出的遮光带区域和镜头臂区域置黑;

(2)提取置黑区域的边界,并判断边界是否为空;若是,跳到步骤(7);否则,继续下一步;

(3)计算边界上各点的优先级,确定修补的先后顺序,找到优先级最大的像素点所在的待修复块,先对其进行修复;

(4)确定待匹配区域。以待修复点为中心选取边长为  $L$  的正方形,该区域与源区域相交的部分即为匹配区域;

(5)计算待修复块和最佳匹配块的 SSD,选取 SSD 最小的匹配块对待修复块进行修复;

(6)更新破损区域,返回步骤(2);

(7)完成修复,输出修复图像。

## 4 实验结果与分析

应用本文算法对地基云图进行了修复,并与 Criminisi 算法、文献[13]算法的结果进行了比较。上述算法均在 WIN 7 platform with Intel®Core TM i3-2120 CPU @ 3.30 GHz 的配置条件下,利用 Matlab 2010 编程完成的。

图 8 是拍摄时间为 2016-02-17-151930 的地基云图。从图 8(c, d)不难看出:虚线框中的遮光带区域

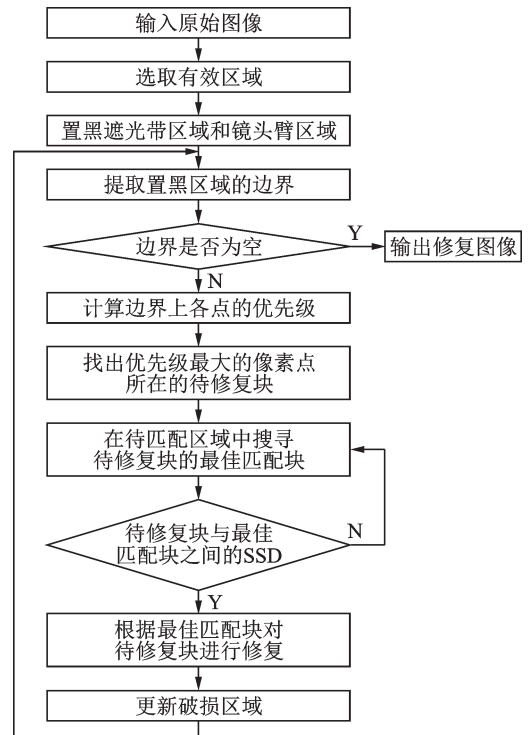
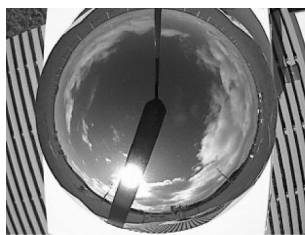
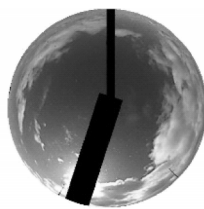


图 7 算法流程图

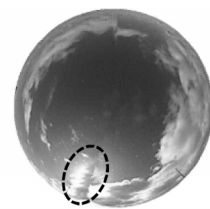
Fig.7 Algorithm flowchart



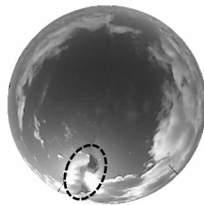
(a) 原图  
(a) Original image



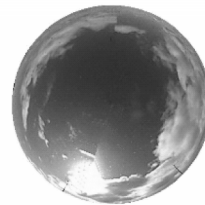
(b) 待修复区域标注图  
(b) Area to be inpainted



(c) Criminisi 算法效果  
(c) Inpainted effect by Criminisi algorithm



(d) 文献[13]算法效果  
(d) Inpainted effect by Criminisi in Ref.[13]



(e) 本文算法效果  
(e) Inpainted effect by proposed algorithm

图 8 采集图像 1

Fig.8 Capture image 1

的修复结果出现了块匹配错误,产生断层现象,造成结构不连续、不自然;而图 8(e)相应区域修复后的图像较连续,没有明显的块匹配错误,保证了合理的填充顺序,达到了较好的视觉效果,而且自然可信,表明了其修复效果明显优于原始算法。

图 9、图 10 为两组不同时刻地基云图的修复实验,在 Criminisi 修复算法及文献[13]修复算法得到的实验结果中可以看出结构不连续不自然的问题,而改进后的 Criminisi 修复算法得到的实验结果可以取得更好的效果。

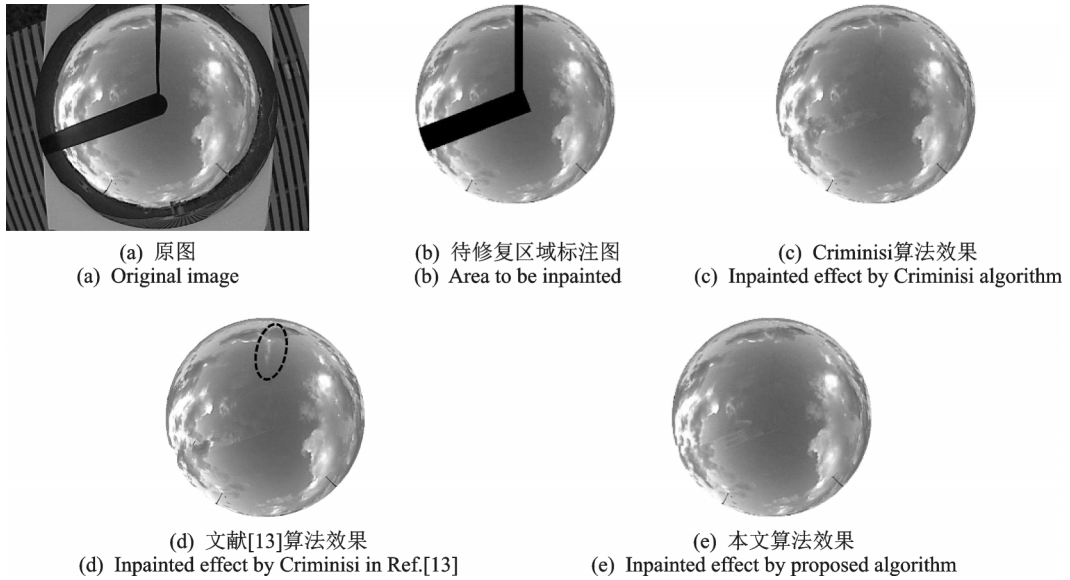


图 9 采集图像 2

Fig.9 Capture image 2

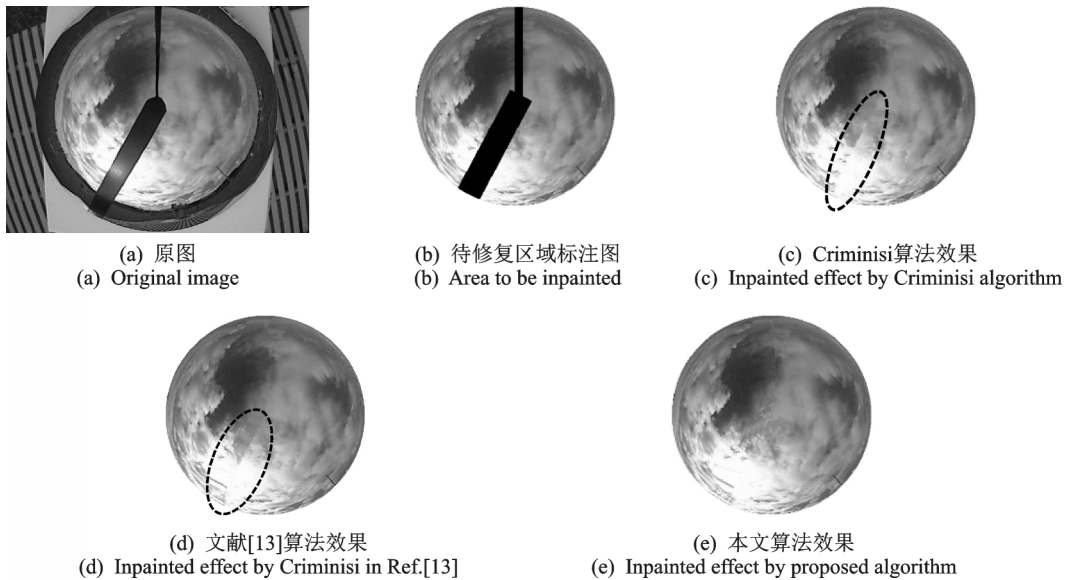


图 10 采集图像 3

Fig.10 Capture image 3

表1给出了修复不同时刻的地基云图所用的时间。从表中数据可见:改进后的Criminisi修复算法的修复速度相对于Criminisi算法提升了5倍左右,文献[13]修复算法引入调节因子使得需要的修复时间更长,说明改进后的Criminisi修复算法降低了时间复杂度,提高了修复效率。

为了更好地反映改进算法的有效性,本文采用峰值信噪比(Peak signal to noise ratio, PSNR)评价指标对修复后的地基云图进行了客观评价,同时也对本文的比较方法进行了评价。PSNR计算公式为

$$\text{PSNR} = 10 \lg \left\{ \frac{255^2}{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(i,j) - g(i,j)]^2} \right\} \quad (13)$$

本文随机选取了图10(a)的局部区域进行置黑,并用本文算法对其进行修复,实验效果如图11所示,实验结果如表2所示。表中PSNR用于衡量修复结果相对于原图的保真度。一般来说PSNR值越大,修复效果和质量越好,图像失真越小。综上所述,从PSNR值可以看出改进后的算法PSNR值提高;从修复的视觉效果上可以看出:改进后的算法比原始算法更加自然。

表1 算法执行时间比较

Tab. 1 Algorithm execution time comparison

TSI地 基云图	运行时间/s		
	Criminisi算法	文献[13]算法	改进算法
图8	211.335 718	300.067 386	41.098 083
图9	207.849 569	315.601 963	41.088 078
图10	220.307 328	322.333 442	42.747 426

表2 不同算法修复结果的PSNR值

Tab. 2 PSNR values of different repaired results

TSI地 基云图	PSNR/dB		
	Criminisi算法	文献[13]算法	改进算法
图11	46.934 3	45.650 6	48.729 8

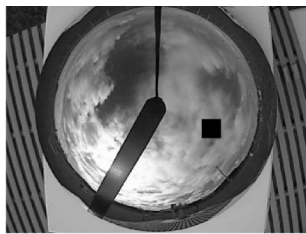
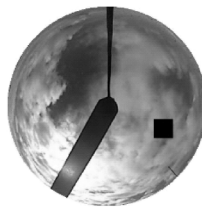
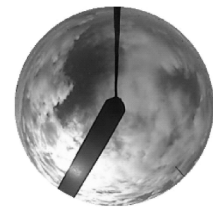
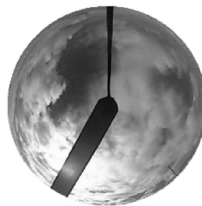
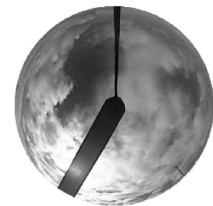
(a) 破损图像  
(a) Broken image(b) 破损图像有效区域  
(b) Effective area of broken image(c) 原图有效区域  
(c) Original effective area(d) Criminisi算法效果  
(d) Inpainted effect by Criminisi algorithm(e) 文献[13]算法效果  
(e) Inpainted effect by Criminisi in Ref. [13](f) 本文算法效果  
(f) Inpainted effect by proposed algorithm

图11 局部区域修复效果

Fig.11 Inpainted effect of local area



## 5 结束语

本文针对 TSI 拍摄的地基云图中存在的遮挡问题,结合地基云图特征,对 Criminisi 算法进行了改进,提出了一种基于改进 Criminisi 算法的地基云图修复方法,具体包括:

(1) 引入地基云图独特的红蓝比特征作为置信项,将图像更多的已知信息融入到优先权计算中,使得含有更多信息的像素块具有更高的优先级,解决了传统 Criminisi 算法在计算优先权时由于置信度急剧下降为零所造成的修复顺序发生错误的问题。

(2) 提出基于启发信息选择匹配区域大小的方法,避免了搜索到离待修复块较远的相关性较低的匹配块,降低了算法的时间复杂度。

实验表明,与传统 Criminisi 算法相比,本文修复算法可以在较短的时间内实现对不同时刻地基云图的修复工作,并取得更为满意的修复效果,为建立光伏发电预测模型奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] Zhu T, Wei H, Zhao X, et al. Clear-sky model for wavelet forecast of direct normal irradiance[J]. *Renewable Energy*, 2017, 104: 1-8.
- [2] 谭津, 邓长虹, 杨威, 等. 微电网光伏发电的 Adaboost 天气聚类超短期预测方法[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(21): 33-39.  
Tan Jin, Deng Changhong, Yang Wei, et al. Ultra-short-term photovoltaic power forecasting in microgrid based on Adaboost clustering[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(21): 33-39.
- [3] 朱想, 居蓉蓉, 程序, 等. 组合数值天气预报与地基云图的光伏超短期功率预测模型[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(6): 4-10.  
Zhu Xiang, Ju Rongrong, Cheng Xu, et al. A very short-term prediction model for photovoltaic power based on numerical weather prediction and ground-based cloud images[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(6): 4-10.
- [4] 陈志宝, 李秋水, 程序, 等. 基于地基云图的光伏功率超短期预测模型[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(19): 20-25.  
Chen Zhibao, Li Qiushui, Cheng Xu, et al. A very short-term prediction model for photovoltaic power based on ground-based cloud images[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(19): 20-25.
- [5] Marquez R, Coimbra C F M. Intra-hour DNI forecasting based on cloud tracking image analysis[J]. *Solar Energy*, 2013, 91(3): 327-336.
- [6] Guillemot C, Meur O L. Image inpainting: Overview and recent advances[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2013, 31(1): 127-144.
- [7] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V, et al. Image inpainting[C]//SIGGRAPH'00: Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM Press / Addison-Wesley Publishing Co, 2000: 417-424.
- [8] Chan T F, Shen J H. Mathematical models for local nontexture inpaintings[J]. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 2001, 62(3): 1019-1043.
- [9] Chan T F, Shen J H. Nontexture inpainting by curvature-driven diffusions[J]. *Journal of Visual Communication & Image Representation*, 2001, 12(4): 436-449.
- [10] 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.
- [11] 彭坤杨, 董兰芳. 一种基于图像平均灰度值的快速图像修复算法[J]. *中国图象图形学报*, 2010, 15(1): 50-55.  
Peng Kunyang, Dong Lanfang. A fast image inpainting algorithm based on average gray value[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2010, 15(1): 50-55.
- [12] 朱霞, 李宏, 张卫. 一种基于颜色区域分割的图像修复算法[J]. *计算机工程*, 2008, 34(14): 191-193.  
Zhu Xia, Li Hong, Zhang Wei. Image inpainting algorithm based on color region segmentation[J]. *Computer Engineering*, 2008, 34(14): 191-193.
- [13] 韩明珠, 郭树旭, 藏玲玲, 等. 基于样本块的图像修复改进算法[J]. *计算机工程与应用*, 2015, 51(16): 192-194.

Han Mingzhu, Guo Shuxu, Zang Lingling, et al. Improved exemplar block-based image inpainting algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(16):192-194.

[14] Liu Y, Caselles V. Exemplar-based image inpainting using multiscale graph cuts[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(5): 1699-1711.

[15] 朱想, 周海, 丁杰, 等. 全天空云图图像复原算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(6): 896-902.

Zhu Xiang, Zhou Hai, Ding Jie, et al. All-sky cloud map image restoration algorithm research[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(6): 896-902.

作者简介:



路志英(1964-),女,教授,博士生导师,研究方向:模式识别、图像处理、生物识别、智能算法、数据挖掘, E-mail:luzy@tju.edu.cn。



周庆霞(1995-),女,硕士研究生,研究方向:模式识别、图像处理。



李鑫(1993-),女,博士研究生,研究方向:模式识别、图像处理。

(编辑:张黄群)