

# 2022.11.21 汇报

周添文

数学科学学院  
北京师范大学

# 耀斑（Flare）类杂散光的自动探测与去除方法

- 耀斑类杂散光的自动探测
- 光源检测
- 耀斑检测
- 耀斑位置的确定方法
- 耀斑去除

由文献 [1] 可知，耀斑伪影 (flare artifact) 一般产生在光源对面的对称点处。

由文献 [1] 可知, 耀斑伪影 (flare artifact) 一般产生在光源对面的对称点处。

设  $u: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^3$  为一个图像, 其中  $\Omega \subset \mathbb{R}^2$  代表图像的定义域 (domain), 则我们可以按照下述方法找到耀斑伪影的位置: 找到穿过光源和主点 (principal point) 的线, 在定义域中找到靠近这条直线的点。

由文献 [1] 可知, 耀斑伪影 (flare artifact) 一般产生在光源对面的对称点处。

设  $u: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^3$  为一个图像, 其中  $\Omega \subset \mathbb{R}^2$  代表图像的定义域 (domain), 则我们可以按照下述方法找到耀斑伪影的位置: 找到穿过光源和**主点** (principal point) 的线, 在定义域中找到靠近这条直线的点。

主点指的是**主光轴** (principal axis) 和像平面的交点。在此处, 我们大致地定义主点为定义域的中心, 记作  $x_c$ 。

接下来，我们需要确定定义域中的亮光源  $x_{S_i}, i = 1, \dots, s$ , 进而确定图像中耀斑的位置。

接下来，我们需要确定定义域中的亮光源  $x_{S_i}, i = 1, \dots, s$ , 进而确定图像中耀斑的位置。

考察在 CIELab 色彩空间下的图像  $u^{La*b*} = u^L, u^{a*}, u^{b*} : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^3$ , 其中的  $u^L(x)$  代表着  $x \in \Omega$  处的亮度 (Luminance)。

接下来，我们需要确定定义域中的亮光源  $x_{S_i}, i = 1, \dots, s$ , 进而确定图像中耀斑的位置。

考察在 CIELab 色彩空间下的图像  $u^{La*b*} = u^L, u^{a*}, u^{b*} : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^3$ , 其中的  $u^L(x)$  代表着  $x \in \Omega$  处的亮度 (Luminance)。

CIELab 颜色空间 (Lab color space) 是在 1976 年出现的。这种颜色空间包括人眼所能看到的所有颜色 (可见光谱), 所以也是目前为止色域最宽的颜色空间, 其每一组色值对应一种确定的与设备无关的色彩。



接下来，我们需要确定定义域中的亮光源  $x_{S_i}, i = 1, \dots, s$ , 进而确定图像中耀斑的位置。

考察在 CIELab 色彩空间下的图像  $u^{La*b*} = u^L, u^{a*}, u^{b*} : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^3$ , 其中的  $u^L(x)$  代表着  $x \in \Omega$  处的亮度 (Luminance)。

CIELab 颜色空间 (Lab color space) 是在 1976 年出现的。这种颜色空间包括人眼所能看到的所有颜色 (可见光谱), 所以也是目前为止色域最宽的颜色空间, 其每一组色值对应一种确定的与设备无关的色彩。

在 Lab 颜色空间中，一种颜色由 L（明度）， $a^*$  颜色， $b^*$  颜色三个参数表示；在一幅图像中，每一个像素对应一个 Lab 值，L, $a^*$ , $b^*$  三个参数的取值范围如下所述。

在 Lab 颜色空间中，一种颜色由 L（明度）， $a^*$  颜色， $b^*$  颜色三个参数表示；在一幅图像中，每一个像素对应一个 Lab 值， $L, a^*, b^*$  三个参数的取值范围如下所述。

L：取值范围为  $[0, 100]$ ，表示纯黑色到纯白色范围；

$a$ ：取值范围为  $[-128, 127]$ ，表示绿色到杨红色范围；

$b$ ：取值范围为  $[-128, 127]$ ，表示蓝色到黄色范围。

因此，为了找到亮度最大的区域，我们需要我们需要  $u^L$  更加接近 100。  
由此，我们考察  $u^L$  的上水平集 (upper level set)

$$X_l u^L := \{u^L \geq l\} = \{x \in \Omega : u^L(x) \geq l\}. \quad (1)$$

因此，为了找到亮度最大的区域，我们需要我们需要  $u^L$  更加接近 100。  
由此，我们考察  $u^L$  的上水平集 (upper level set)

$$X_l u^L := \{u^L \geq l\} = \{x \in \Omega : u^L(x) \geq l\}. \quad (1)$$

其可以写作有穷多个联通分支 (connected components) 的并集，我们选取其中面积最大的联通分支  $S_1$ ，其即为主光源。

因此，为了找到亮度最大的区域，我们需要我们需要  $u^L$  更加接近 100。  
由此，我们考察  $u^L$  的上水平集 (upper level set)

$$X_l u^L := \{u^L \geq l\} = \{x \in \Omega : u^L(x) \geq l\}. \quad (1)$$

其可以写作有穷多个联通分支 (connected components) 的并集，我们选取其中面积最大的联通分支  $S_1$ ，其即为主光源。

除此以外，我们选取面积大于等于  $0.8 \times S_1$  的所有联通分支，记为  $S_i$ ，并近似地将他们的重心当作近似的中心，记为  $x_{S_i}$

$$x_{S_i} = \frac{1}{\text{area}(S_i)} \sum_{x \in S_i} x, x \in \Omega \quad (2)$$

为了更合理地检测耀斑位置，我们需要进行如下假设：

- 耀斑是图像  $u$  中的一个**明亮斑点** (bright blob)<sup>1</sup>，我们通常用**关键点**  $x_k$  代表一个耀斑。

---

<sup>1</sup>一个斑点 (blob) 可以看作图像中比背景更亮或更暗的区域，并且由平滑弯曲的边界所包围

为了更合理地检测耀斑位置，我们需要进行如下假设：

- 耀斑是图像  $u$  中的一个**明亮斑点** (bright blob)<sup>1</sup>，我们通常用**关键点**  $x_k$  代表一个耀斑。
- 由于耀斑一般具有圆形或椭圆形形状，因此上述明亮斑点不应太过细长

---

<sup>1</sup>一个斑点 (blob) 可以看作图像中比背景更亮或更暗的区域，并且由平滑弯曲的边界所包围



为了更合理地检测耀斑位置，我们需要进行如下假设：

- 耀斑是图像  $u$  中的一个**明亮斑点** (bright blob)<sup>1</sup>，我们通常用**关键点**  $x_k$  代表一个耀斑。
- 由于耀斑一般具有圆形或椭圆形形状，因此上述明亮斑点不应太过细长
- 耀斑的大小有限，是有界限的

---

<sup>1</sup>一个斑点 (blob) 可以看作图像中比背景更亮或更暗的区域，并且由平滑弯曲的边界所包围

为了更合理地检测耀斑位置，我们需要进行如下假设：

- 耀斑是图像  $u$  中的一个**明亮斑点** (bright blob)<sup>1</sup>，我们通常用**关键点**  $x_k$  代表一个耀斑。
- 由于耀斑一般具有圆形或椭圆形形状，因此上述明亮斑点不应太过细长
- 耀斑的大小有限，是有界限的
- 由 Rayleigh 公式，耀斑的 CIELab 颜色应当有较高的 L 值和负的  $a^*$  值

---

<sup>1</sup>一个斑点 (blob) 可以看作图像中比背景更亮或更暗的区域，并且由平滑弯曲的边界所包围

为了更合理地检测耀斑位置，我们需要进行如下假设：

- 耀斑是图像  $u$  中的一个**明亮斑点** (bright blob)<sup>1</sup>，我们通常用**关键点**  $x_k$  代表一个耀斑。
- 由于耀斑一般具有圆形或椭圆形形状，因此上述明亮斑点不应太过细长
- 耀斑的大小有限，是有界限的
- 由 Rayleigh 公式，耀斑的 CIELab 颜色应当有较高的 L 值和负的  $a^*$  值

---

<sup>1</sup>一个斑点 (blob) 可以看作图像中比背景更亮或更暗的区域，并且由平滑弯曲的边界所包围

首先，我们按照前文中的规定，将耀斑定义为比背景更亮的明亮斑点 (blob)。根据文献 [3] 中描述，我们将关键点  $x_k \in \Omega \subset \mathbb{R}$  定义为方程

$$L(x, \sigma) = G(x; \sigma) * u^g(x) \quad (3)$$

的局部极大值。

首先, 我们按照前文中的规定, 将耀斑定义为比背景更亮的明亮斑点 (blob)。根据文献 [3] 中描述, 我们将关键点  $x_k \in \Omega \subset \mathbb{R}$  定义为方程

$$L(x, \sigma) = G(x; \sigma) * u^g(x) \quad (3)$$

的局部极大值。

其中,  $*$  是  $\mathbb{R}^2$  中的卷积 (convolution),  $u^g$  是图像  $u$  的灰化版本 (仅保留  $u^L$ )。  $G(x; \sigma)$  是各向同性 (isotropic) 的归一化高斯函数, 标准差为  $\sigma$ , 其在全平面上积分为 1.  $L(x, \sigma)$  是平面上的 Laplace 算子,

$$\Delta L = \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 L}{\partial y^2} \quad (4)$$

我们考察 DOG(the Difference Of Gaussian)

$$D(x, \sigma) = L(x, k\sigma) - L(x, \sigma), k \in \mathbb{R} \quad (5)$$

我们考察 DOG(the Difference Of Gaussian)

$$D(x, \sigma) = L(x, k\sigma) - L(x, \sigma), k \in \mathbb{R} \quad (5)$$

其可以近似估计正规化的 Laplace 算子  $\sigma^2 \Delta L(x, \sigma)$ . 在本算法中, 由于我们的假设, 可以得知耀斑位于  $D(x, \sigma)$  的最小值处.

# 耀斑的边界

由前假设, 我们知道耀斑是有界的。假设  $x_k(j)$  为一个关键点, 我们考察和其亮度相似的像素点的全体, 其中  $\delta$  为邻域半径:

$$B_\delta(x_k(j)) = \{x \in \Omega : |u^L(x_k(j)) - u^L(x)| \leq \delta\} \quad (6)$$



由前假设, 我们知道耀斑是有界的。假设  $x_k(j)$  为一个关键点, 我们考察和其亮度相似的像素点的全体, 其中  $\delta$  为邻域半径:

$$B_\delta(x_k(j)) = \{x \in \Omega : |u^L(x_k(j)) - u^L(x)| \leq \delta\} \quad (6)$$

设  $cc(B_\delta(x_k(j)); x_k(j))$  是  $B_\delta(x_k(j))$  包含关键点  $x_k(j)$  的连通分支, 则该连通分支内包含着所有与  $x_k(j)$  亮度相似的点。我们规定, 上述连通分支的面积应该小于整体光源面积的 1%, 即

$$area(cc(B_\delta(x_k(j)); x_k(j))) < \frac{area(S)}{100} \quad (7)$$

# 去除细长型明亮斑点

由前假设，耀斑只有近似圆形的形状，由文献 [4] 中方法，我们可以计算  $D = L(x, k\sigma) - L(x, \sigma)$  的 Hessian 矩阵特征值  $\lambda_1, \lambda_2$ .

# 去除细长型明亮斑点

由前假设，耀斑只有近似圆形的形状，由文献 [4] 中方法，我们可以计算  $D = L(x, k\sigma) - L(x, \sigma)$  的 Hessian 矩阵特征值  $\lambda_1, \lambda_2$ . 由于关键点  $x_k(j)$  是  $D$  的最小值，故由矩阵论，可知  $\lambda_1, \lambda_2 \geq 0$ .

# 去除细长型明亮斑点

由前假设，耀斑只有近似圆形的形状，由文献 [4] 中方法，我们可以计算  $D = L(x, k\sigma) - L(x, \sigma)$  的 Hessian 矩阵特征值  $\lambda_1, \lambda_2$ . 由于关键点  $x_k(j)$  是  $D$  的最小值，故由矩阵论，可知  $\lambda_1, \lambda_2 \geq 0$ .

进一步来说， $\lambda_1, \lambda_2$  需要满足下述条件：

$$\lambda_1 > 0, \lambda_2 < 4\lambda_1 \quad (8)$$

其保证了  $D$  的确取到了最小值，同时并不是细长型斑点。

# 耀斑位置的确定方法

我们将引入如下几种判别方法，判断明亮斑点确为耀斑的可能性：

## 1. 关键点的位置

- 从关键点  $x_k(j)$  到图像中心  $x_c$  的距离与从光源  $x_s$  到图像中心  $x_c$  的距离相似

# 耀斑位置的确定方法

我们将引入如下几种判别方法，判断明亮斑点确为耀斑的可能性：

## 1. 关键点的位置

- 从关键点  $x_k(j)$  到图像中心  $x_c$  的距离与从光源  $x_s$  到图像中心  $x_c$  的距离相似
- 记光源  $x_s$  和图像中心  $x_c$  的连线为  $l$ ， $x_k(j)$  到  $l$  的距离足够小

# 耀斑位置的确定方法

我们将引入如下几种判别方法，判断明亮斑点确为耀斑的可能性：

## 1. 关键点的位置

- 从关键点  $x_k(j)$  到图像中心  $x_c$  的距离与从光源  $x_s$  到图像中心  $x_c$  的距离相似
- 记光源  $x_s$  和图像中心  $x_c$  的连线为  $l$ ， $x_k(j)$  到  $l$  的距离足够小

## 2. $La^*b^*$ 的值

- $u^L$  较大
- $u^a$  为负
- $u^b$  无限制

# 耀斑位置的确定方法

我们将引入如下几种判别方法，判断明亮斑点确为耀斑的可能性：

## 1. 关键点的位置

- 从关键点  $x_k(j)$  到图像中心  $x_c$  的距离与从光源  $x_s$  到图像中心  $x_c$  的距离相似
- 记光源  $x_s$  和图像中心  $x_c$  的连线为  $l$ ， $x_k(j)$  到  $l$  的距离足够小

## 2. $L^a b^*$ 的值

- $u^L$  较大
- $u^a$  为负
- $u^b$  无限制

接下来，我们将利用上述方法，阐述耀斑去除的过程：



# 建立掩膜

**掩膜 (Mask)** 是图像处理中的常用工具。我们用到的是**二元掩膜 (Binary Mask)**，在图像处理中，计算机将图像识别为矩阵，而掩膜同样为一个矩阵，其在希望过滤掉的部分值为 0，其他部分值为 1，以此达成**过滤图像信息**的目的。

**掩膜 (Mask)** 是图像处理中的常用工具。我们用到的是**二元掩膜 (Binary Mask)**，在图像处理中，计算机将图像识别为矩阵，而掩膜同样为一个矩阵，其在希望过滤掉的部分值为 0，其他部分值为 1，以此达成**过滤图像信息**的目的。

通常来说，(二元) 掩膜具有如下应用：

- **提取感兴趣区**：用预先制作的感兴趣区掩膜与待处理图像相乘，得到感兴趣区图像，感兴趣区内图像值保持不变，而区外图像值都为 0；

**掩膜 (Mask)** 是图像处理中的常用工具。我们用到的是**二元掩膜 (Binary Mask)**，在图像处理中，计算机将图像识别为矩阵，而掩膜同样为一个矩阵，其在希望过滤掉的部分值为 0，其他部分值为 1，以此达成**过滤图像信息**的目的。

通常来说，(二元) 掩膜具有如下应用：

- **提取感兴趣区**：用预先制作的感兴趣区掩膜与待处理图像相乘，得到感兴趣区图像，感兴趣区内图像值保持不变，而区外图像值都为 0；
- **屏蔽作用**：用掩膜对图像上某些区域作屏蔽，使其不参加处理或不参加处理参数的计算，或仅对屏蔽区作处理或统计；

**掩膜 (Mask)** 是图像处理中的常用工具。我们用到的是**二元掩膜 (Binary Mask)**，在图像处理中，计算机将图像识别为矩阵，而掩膜同样为一个矩阵，其在希望过滤掉的部分值为 0，其他部分值为 1，以此达成**过滤图像信息**的目的。

通常来说，(二元) 掩膜具有如下应用：

- **提取感兴趣区**：用预先制作的感兴趣区掩膜与待处理图像相乘，得到感兴趣区图像，感兴趣区内图像值保持不变，而区外图像值都为 0；
- **屏蔽作用**：用掩膜对图像上某些区域作屏蔽，使其不参加处理或不参加处理参数的计算，或仅对屏蔽区作处理或统计；
- **结构特征提取**：用相似性变量或图像匹配方法检测和提取图像中与掩膜相似的结构特征；

在此问题中，我们先考察耀斑对图像像素的影响，其分为以下几步：

在此问题中，我们先考察耀斑对图像像素的影响，其分为以下几步：

- 给定  $\delta > 0$ ，考虑  $B_\delta(x_{fs}) = \{x \in \Omega : |u^L(x_k(j)) - u^L(x)| \leq \delta\}$ ，取定其中包含关键点  $x_{fs}$  的连通分支，记作  $C_\delta(x_{fs})$

在此问题中，我们先考察耀斑对图像像素的影响，其分为以下几步：

- 给定  $\delta > 0$ ，考虑  $B_\delta(x_{fs}) = \{x \in \Omega : |u^L(x_k(j)) - u^L(x)| \leq \delta\}$ ，取定其中包含关键点  $x_{fs}$  的连通分支，记作  $C_\delta(x_{fs})$
- 取  $C_\delta(x_{fs})$  半径为  $\epsilon > 0$  的扩张 (dilation)  $C_\delta^\epsilon(x_{fs})$ ，注意这一扩张中可能包含并不在连通分支中的点

在此问题中，我们先考察耀斑对图像像素的影响，其分为以下几步：

- 给定  $\delta > 0$ ，考虑  $B_\delta(x_{fs}) = \{x \in \Omega : |u^L(x_k(j)) - u^L(x)| \leq \delta\}$ ，取定其中包含关键点  $x_{fs}$  的连通分支，记作  $C_\delta(x_{fs})$
- 取  $C_\delta(x_{fs})$  半径为  $\epsilon > 0$  的扩张 (dilation)  $C_\delta^\epsilon(x_{fs})$ ，注意这一扩张中可能包含并不在连通分支中的点
- 给定  $\omega$  为图像内的其他像素，为了减小计算量，将  $u^L(x)$  进行标准化，表达为

$$u_{norm}^L(x) = \frac{u^L(x) - \min(u^L, \omega)}{\max(u^L, \omega) - \min(u^L, \omega)} \quad (9)$$

使得  $u_{norm}^L(x)$  在 0 到 1 内取值



最终，耀斑区域可以写为：

$$F(x_{fs}) = C_{\delta}^{\epsilon}(x_{fs}) \cap x_{\alpha} u_{norm}^L \quad (10)$$

最终，耀斑区域可以写为：

$$F(x_{fs}) = C_{\delta}^{\epsilon}(x_{fs}) \cap x_{\alpha} u_{norm}^L \quad (10)$$

其中， $x_{\alpha} u_{norm}^L$  代表水平集  $[u_{norm}^L \geq \alpha]$ ， $\alpha$  由试验确定为 0.2.

最终，耀斑区域可以写为：

$$F(x_{fs}) = C_{\delta}^e(x_{fs}) \cap x_{\alpha} u_{norm}^L \quad (10)$$

其中， $x_{\alpha} u_{norm}^L$  代表水平集  $[u_{norm}^L \geq \alpha]$ ， $\alpha$  由试验确定为 0.2。  
掩膜矩阵  $M: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  的表达式为：

$$M(x) = 1, x \in F(x_{fs}) \quad (11)$$

其余情况下， $M(x) = 0$

为了能够重建被耀斑损坏的区域  $O \subset \Omega \subset \mathbb{R}^2$ , 可以将其视作寻找  $x \in O$  在映射  $\phi: O \rightarrow O^c$  下的像  $\phi(x)$  的过程

为了能够重建被耀斑损坏的区域  $O \subset \Omega \subset \mathbb{R}^2$ ，可以将其视作寻找  $x \in O$  在映射  $\phi: O \rightarrow O^c$  下的像  $\phi(x)$  的过程而在  $O^c$  中，像的情况是已知的，只需要求解如下能量方程：

为了能够重建被耀斑损坏的区域  $O \subset \Omega \subset \mathbb{R}^2$ ，可以将其视作寻找  $x \in O$  在映射  $\phi: O \rightarrow O^c$  下的像  $\phi(x)$  的过程而在  $O^c$  中，像的情况是已知的，只需要求解如下能量方程：

$$\epsilon_E(\hat{u}, \phi) = \int_{\hat{O}} E(p_{\hat{u}}(x) - p_u(\phi(x))) dx \quad (12)$$





其中  $O = \bigcup_{i=1} sF(x_{fs}^i)$

---

```

1: function FLARESPOTREMOVAL( $u$ )
2:    $\{\mathbf{x}_{S_i}\}_{i=1}^s = \text{FINDLIGHTSOURCES}(u)$ 
3:    $\{\mathbf{x}_k(j)\}_j = \text{BLOBDETECTOR}(u)$ 
4:    $\mathbf{X}_{fs} = \{\}$ 
5:   for all  $i = 1, \dots, s$  do
6:      $\text{MaxConfMeasure} = 0$ 
7:     for all  $j$  do
8:        $(\lambda_1, \lambda_2) = \text{EINGENVALUES}(\mathbf{x}_k(j))$ 
9:       if  $\lambda_1 < 0 \vee \lambda_2 > 4\lambda_1$  then
10:        Continue (with  $j + 1$ );
11:       if  $\text{AREA}(cc(B_\delta(\mathbf{x}_k(j)); \mathbf{x}_k(j))) \geq \frac{\text{area}(S_i)}{100}$  then
12:        Continue (with  $j + 1$ );
13:       if  $\text{RELATIVE BRIGHTNESS}(\mathbf{x}_k(j)) < \alpha$  then
14:        Continue (with  $j + 1$ );
15:       if  $e^{-E(\mathbf{x}_k(j))} > \text{MaxConfMeasure}$  then
16:         $\text{MaxConfMeasure} = e^{-E(\mathbf{x}_k(j))}$ 
17:         $\mathbf{x}_{fs}^i = \mathbf{x}_k(j)$ 
18:         $\mathbf{X}_{fs} \leftarrow \mathbf{X}_{fs} \cup \{\mathbf{x}_{fs}^i\}$ 
19:    $M = \text{MASKCOMPUTATION}(\{\mathbf{X}_{fs}\})$ 
20:    $u_{new} = \text{EXEMPLARBASDINPAINTING}(u, M)$ 

```

-  Evans, E. D.: An analysis and reduction of flare light in optical systems. PhD thesis, The Ohio State University (1988)
-  Vitoria P, Ballester C. Automatic flare spot artifact detection and removal in photographs[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2019, 61(4): 515-533.
-  Lowe, D.G.: Object recognition from local scale-invariant features. In: The proceedings of the seventh IEEE international conference on Computer vision, vol. 2, pp. 1150—1157. IEEE (1999)
-  Lowe, D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision 60, 91—110 (2004).  
<https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>