

## 双边滤波说明

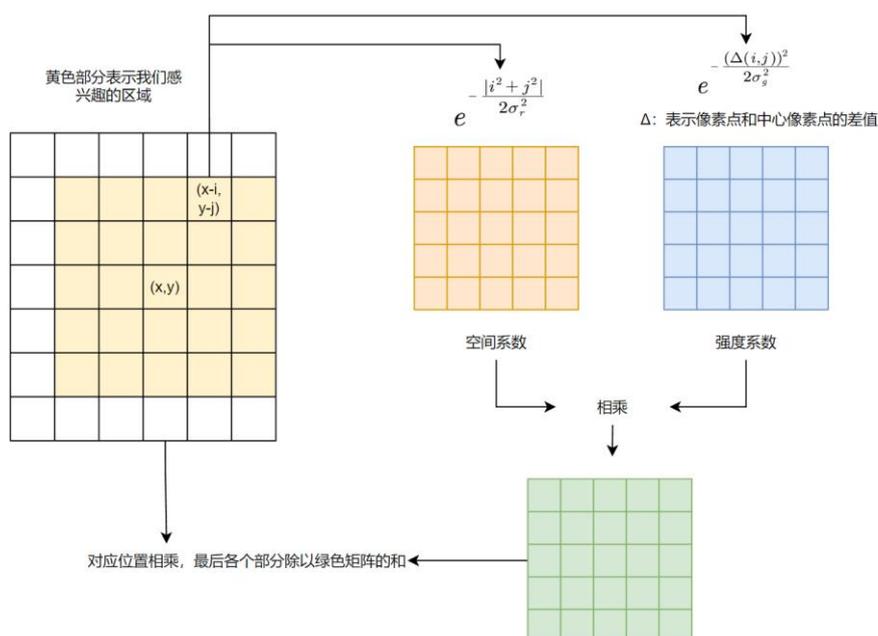
对于一个像素，双边滤波计算公式如下：

$$BF[I]_{\mathbf{p}} = \frac{1}{W_{\mathbf{p}}} \sum_{\mathbf{q} \in \mathcal{S}} G_{\sigma_s}(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|) G_{\sigma_r}(|I_{\mathbf{p}} - I_{\mathbf{q}}|) I_{\mathbf{q}}, \quad (3)$$

where normalization factor  $W_{\mathbf{p}}$  ensures pixel weights sum to 1.0:

$$W_{\mathbf{p}} = \sum_{\mathbf{q} \in \mathcal{S}} G_{\sigma_s}(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|) G_{\sigma_r}(|I_{\mathbf{p}} - I_{\mathbf{q}}|). \quad (4)$$

图例解释：



实现流程，主要是两个部分：空间系数和强度系数

### 1. 空间系数

用户设置有一个参数为窗口大小，要求只能为 3\*3、5\*5、7\*7。

公式中有另一个参数：空间标准差，即上图的  $\sigma_r$ 。这个参数不需要用户输入，因为当标准差乘以 6 和窗口直径接近的时候效果较好，所以可以直接通过用户输入的窗口大小计算得到。

根据用户输入的窗口，空间系数可以直接选择为下面的对应数据：

1/16	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"><tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr><tr><td>2</td><td>4</td><td>2</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr></table>	1	2	1	2	4	2	1	2	1
1	2	1								
2	4	2								
1	2	1								

1/273	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"><tr><td>1</td><td>4</td><td>7</td><td>4</td><td>1</td></tr><tr><td>4</td><td>16</td><td>26</td><td>16</td><td>4</td></tr><tr><td>7</td><td>26</td><td>41</td><td>26</td><td>7</td></tr><tr><td>4</td><td>16</td><td>26</td><td>16</td><td>4</td></tr><tr><td>1</td><td>4</td><td>7</td><td>4</td><td>1</td></tr></table>	1	4	7	4	1	4	16	26	16	4	7	26	41	26	7	4	16	26	16	4	1	4	7	4	1
1	4	7	4	1																						
4	16	26	16	4																						
7	26	41	26	7																						
4	16	26	16	4																						
1	4	7	4	1																						

1/1003	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>3</td><td>13</td><td>22</td><td>13</td><td>3</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>13</td><td>59</td><td>97</td><td>59</td><td>13</td><td>1</td></tr><tr><td>2</td><td>22</td><td>97</td><td>159</td><td>97</td><td>22</td><td>2</td></tr><tr><td>1</td><td>13</td><td>59</td><td>97</td><td>59</td><td>13</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>3</td><td>13</td><td>22</td><td>13</td><td>3</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	0	0	1	2	1	0	0	0	3	13	22	13	3	0	1	13	59	97	59	13	1	2	22	97	159	97	22	2	1	13	59	97	59	13	1	0	3	13	22	13	3	0	0	0	1	2	1	0	0
0	0	1	2	1	0	0																																												
0	3	13	22	13	3	0																																												
1	13	59	97	59	13	1																																												
2	22	97	159	97	22	2																																												
1	13	59	97	59	13	1																																												
0	3	13	22	13	3	0																																												
0	0	1	2	1	0	0																																												

## 2. 强度系数

用户设置有一个参数为强度标准差，即示意图的  $\sigma_g$ 。

以像素为 12bit 为例，两个像素值之差的绝对值  $\Delta$  最大为 4095，所以运算  $\Delta$  为 0-4095 时的结果，即上图中的  $e^{-\Delta(i,j)^2/2\sigma_g^2}$ ，计算后存储入 LUT。该步骤不应该让 FPGA 实现，应该事先存储形成一个文件，或者 MCU 来完成。

真正图像处理时，根据  $\Delta$ （像素点和中心像素点的差值）进行查表，得到对应系数后进行后续计算。

此外，如果为了节省资源，像素值之差可以进行简单的量化，比如每次算完像素差之后除以 16，这样用 256 个值代替 4096。

## 3. FPGA 处理

- 黑白图片：正常按照图例流程即可
- 彩色图片：每个颜色都要执行一次操作，注意每个颜色计算时用到的像素差是红绿蓝的平均值（或者使用 YUV 中的 Y，其他模块有过计算，如果可以复用则使用 Y 最好），这也意味着红绿蓝的像素差都是一样的。切记不要使用每个颜色各自的像素值  $s$ 。

### 3\*3 大小的双边滤波实现流程

不需要看这里的文档，该文档已作废。

用户输入一个参数：强度系数的标准差，以下用 sigma 来代替。

有三个参数控制 LUT 大小：位宽 x、G 表缩放值 G<sub>s</sub>、W 表缩放值 W<sub>s</sub>。其中 S 表示位宽 x 最大数加一，如 x 为 3 时，S 为 8

1. MCU 计算强度系数 LUT 表，设其为 G，大小为  $\lfloor 4096/G_s \rfloor$ ，值的位宽为 x bit。计算方式：从 0 到 4096 按照如下公式计算，假设当前索引值是 i：

$$G[i] = (S - 1) \times e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{G_s \times i}{\sigma} \right)^2}$$

2. MCU 计算权重系数 LUT 表，设其为 W，W 的大小为  $\lfloor 12 \times S / W_s \rfloor$ ，值的位宽为 x-2 bit。

$$W[i] = \frac{S \times S}{W_s \times i + 4 \times S} - 1$$

3. 数据传入 FPGA，开始计算：

```
# 空间固定 3x3, 注意中间变成了 0
F = np.array([[1, 2, 1], [2, 0, 2], [1, 2, 1]])
new_img = np.zeros(img.shape)
for i in range(1, img.shape[0]-1):
    for j in range(1, img.shape[1]-1):
        # 和中心的差值
        D = np.abs(img[i-1:i+2, j-1:j+2] - img[i, j])
        # 高斯和颜色相乘
        now_W = F * G[D//G_s]
        b = np.sum(now_W)

        if b == 0:
            new_img[i, j] = img[i, j]
        else:
            # 分母
            a = np.sum(now_W * img[i-1:i+2, j-1:j+2]) + img[i, j]*4* S
            # 分子, +1 是因为事先计算 W 的时候减了 1 (否则最大值为S/4, 溢出)
            b = W[b//W_s] + 1
            new_img[i, j] = a * b / (S * S)
return new_img
```

4. LUT 需要  $\frac{4096}{G_s} \times (x) + \frac{2^x}{W_s} \times (x - 2)$  bit
5. 代码在 Denoise 目录中, BF\_FPGA.py