双边滤波说明

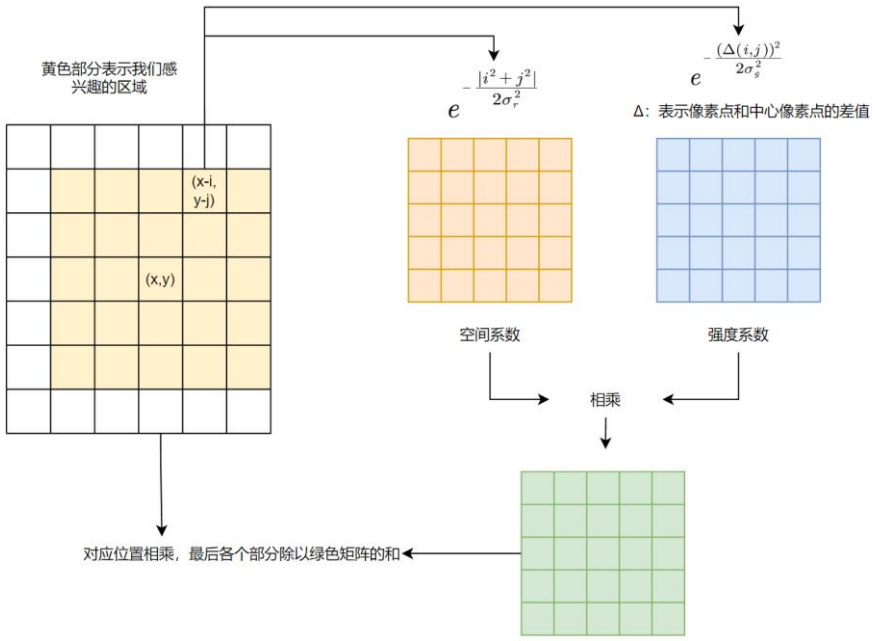
对于一个像素，双边滤波计算公式如下：

$$BF[I]_{\mathbf{p}} = \frac{1}{W_{\mathbf{p}}} \sum_{\mathbf{q} \in \mathcal{S}} G_{\sigma_\mathrm{s}}(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|)\, G_{\sigma_\mathrm{r}}(|I_{\mathbf{p}} - I_{\mathbf{q}}|)\, I_{\mathbf{q}}, \tag{3}$$

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

$$W_{\mathbf{p}} = \sum_{\mathbf{q} \in \mathcal{S}} G_{\sigma_\mathrm{s}}(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|)\, G_{\sigma_\mathrm{r}}(|I_{\mathbf{p}} - I_{\mathbf{q}}|). \tag{4}$$

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

   用户输入为窗口大小，要求只能为 3*3、5*5、7*7；公式中的空间标准差忽略（因为当标准差乘以 6 和窗口直径接近的时候效果较好，所以直接使用这样的标准差）。

   将下面的数据直接存储，根据用户输入调用不同的窗口。

1/16

1	2	1
2	4	2
1	2	1

1/273

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

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

   用户输入为强度标准差，事先进行运算 Δ 为 0-4095 时的结果，共需要 4096 次除法和 4096 次指数运算，计算后存储入 LUT。

   真正图像处理时，根据 Δ（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。

3*3 大小的双边滤波实现流程

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 Gs、W 表缩放值 Ws。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【4096/Gs】，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：

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

2. MCU 计算权重系数 LUT 表，设其为 W，W 的大小为【12*S/Ws】，值的位宽为 x-2 bit。

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

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//Gs]
        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//Ws] + 1
            new_img[i, j] = a * b / (S * S)
return new_img
```

4. LUT 需要 $\frac{4096}{Gs}\times(x)+\frac{2^x}{Ws}\times(x-2)$ bit

5. 代码在 Denoise 目录中，BF_FPGA.py