

图像处理与分析

— 图像退化与恢复 (1)

授课教师：孙剑

jiansun@mail.xjtu.edu.cn

<http://jiansun.gr.xjtu.edu.cn>

西安交通大学 数学与统计学院

目录

- 图像退化的类型
- 图像退化的生成模型
- 图像恢复方法—滤波算法
- 图像恢复方法—能量函数模型

图像退化与恢复

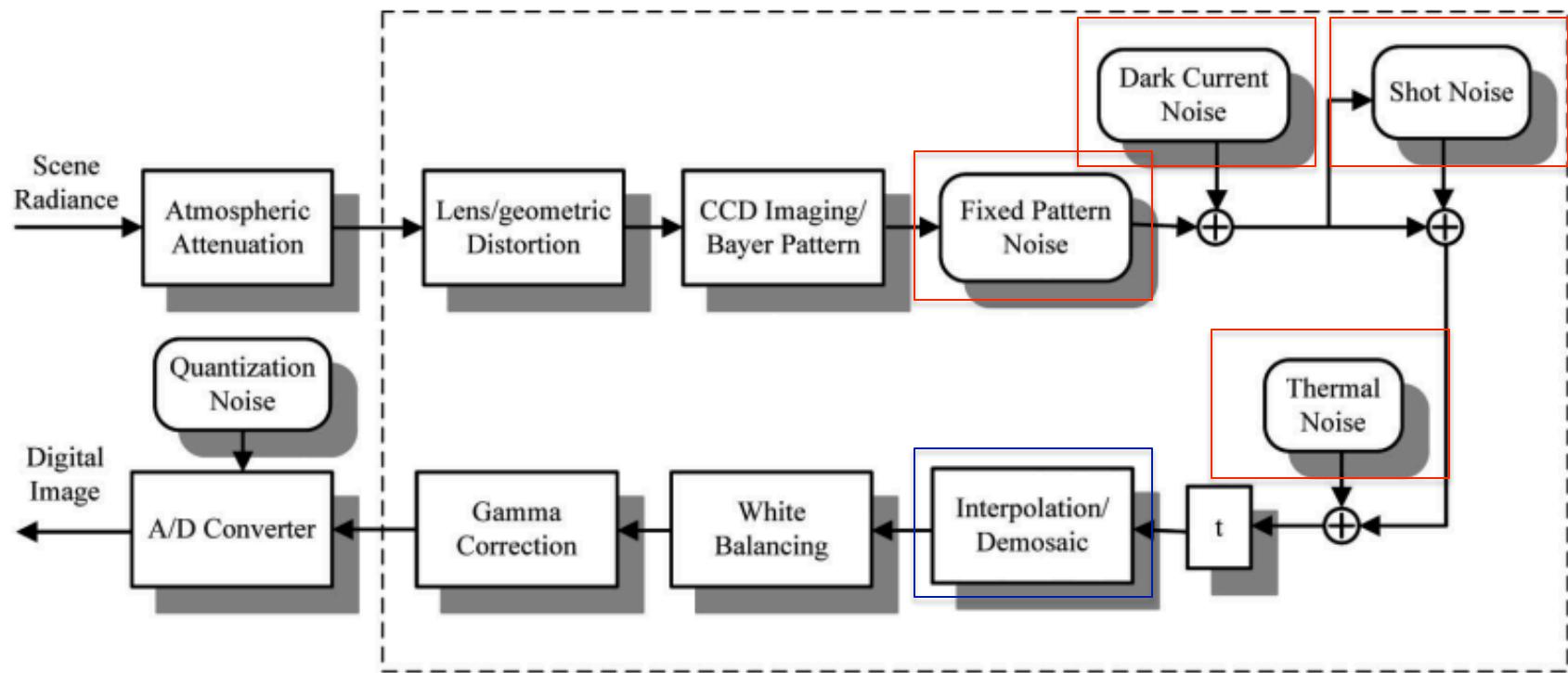
- 图像退化（Image Degradation）：在拍摄场景时，由于相机自身的性能局限、拍摄过程中的抖动、拍摄环境的低光等原因所产生的拍摄图像失真问题。
 - 图像噪声
 - 图像模糊
 - 图像分辨率低
 - 图像中含有雾、雪花、雨点等污点
 - 图像划痕

图像退化与恢复

- 图像恢复（Image Restoration）：针对观测到的退化图像，设计算法恢复出高清晰度的原始图像。
- 图像恢复与图像增强(Image Enhancement)的区别？
 - 图像增强：我们希望对图像内容进行增强以获得更清晰的图像，但是我们不知道清晰图像应该是什么样的？
 - 图像恢复：我们知道高质量图像是如何生成低质量图像的；图像恢复的目的是从低质量图像恢复出高质量图像。

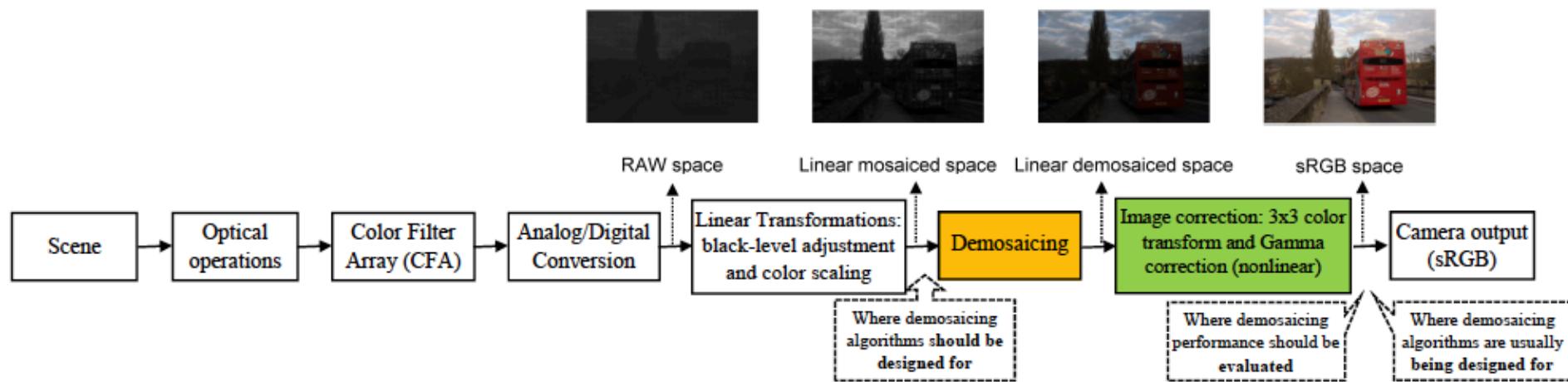
图像退化与恢复

- 相机成像的流程图:



图像退化与恢复

- 相机成像的流程图：



图像退化与恢复

- 图像噪声：在图像拍摄过程中，由于相机光学和电路系统处理中所引起的噪声。
 - 理想的噪声模型

$$O = I + n, n \sim N(0, \sigma)$$

$$O = I + N$$

- 真实相机的噪声模型

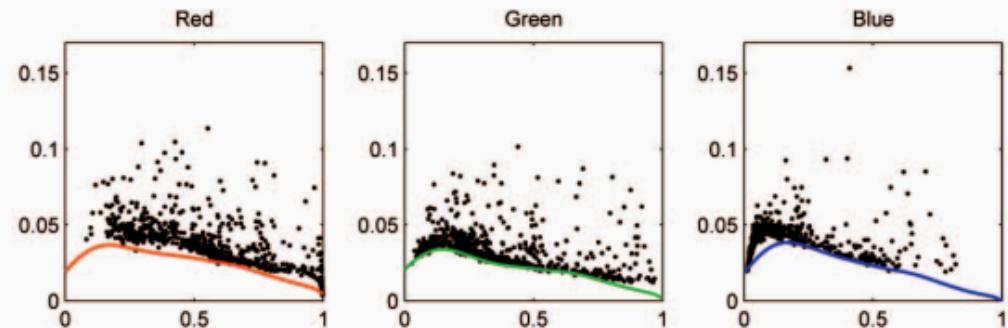
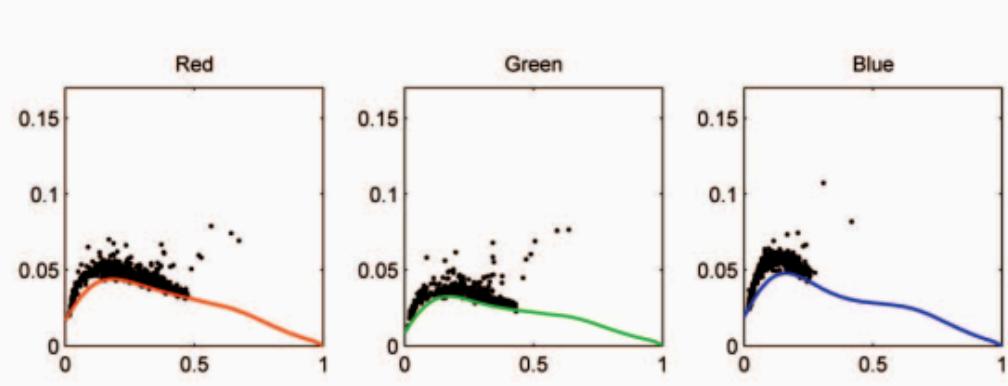
$$I = f(L + n_s + n_c) + n_q,$$

$$n_s \sim N(0, L\sigma_s^2); n_c \sim N(0, \sigma_c^2)$$

L ：辐照度，反映相机接收场景中的反射光的辐照度；

f : 相机响应函数，反映相机成像中的非线性Gamma变换和白平衡矫正等

图像退化与恢复



真实拍摄图像不同通道的不同灰度水平下的噪声方差样本

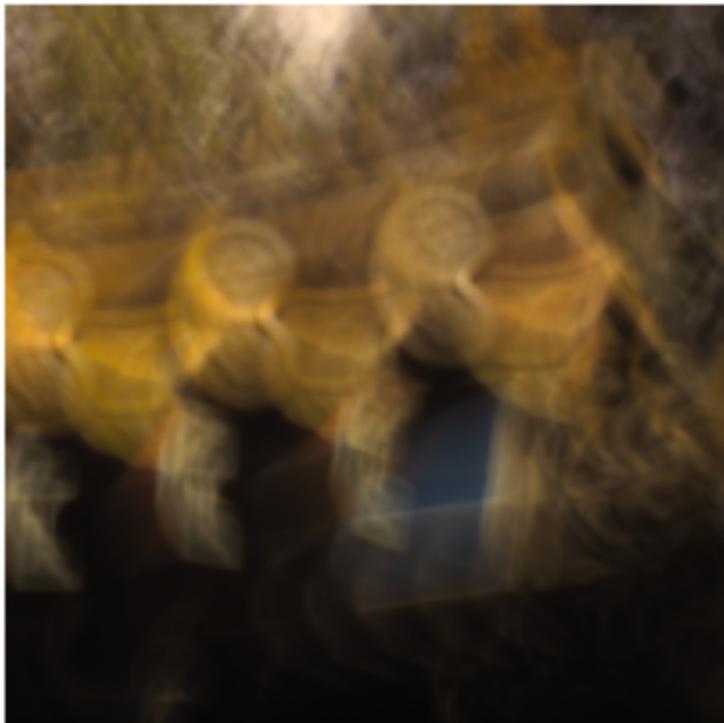
图像退化与恢复—图像模糊

- 图像模糊: 在拍摄图像过程中, 由于相机抖动、场景中物体的运动所引起的图像模糊现象。



图像模糊现象例子：场景中物体的运动所产生的模糊

图像退化与恢复—图像模糊



图像模糊现象例子：
相机运动所引起的模糊



图像模糊现象例子：
相机未正确聚焦的例子

图像退化与恢复—图像模糊

- 图像模糊的退化模型

- 假定图像全局一致模糊

$$O = k * I \xrightarrow{\text{图像卷积}} O = KI$$

O 为观测到的模糊图像； k, I 为模糊核和高质量图像；



图像退化与恢复—图像模糊

- 假定图像全局不一致图像模糊

$$O = k \otimes I \longrightarrow \text{特殊卷积: 空间不一致的图像卷积}$$

$$O = KI$$



图像退化与恢复—图像模糊

- 图像去模糊问题: 给定观测到的模糊图像, 估计高质量图像
 - 图像非盲去模糊: 假定模糊核是知道的, 仅估计高质量图像
 - 图像盲去模糊: 假定模糊核是不知道的, 同时估计模糊核和高质量图像。

图像退化与恢复—图像低分辨率

- 图像低分辨率问题：
 - 低分辨率和高分辨率图像间的关系

$$O = (g_\sigma * I) \downarrow$$

$$O = DGI$$



I



O

图像退化与恢复—带雾图像

- 图像雾模型：

$$O(x) = t(x)I(x) + (1 - t(x))A$$

$I(x)$: 辐照度

A : 大气光

$t(x) = \exp(-d(x))$: 大气透明度



Kaiming He, et al.,
Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior, CVPR 2009.

图像退化与恢复—带丢失区域图像

- 带缺失区域图像：

$$O(x) = M(x)I(x)$$

$$M(x) = \begin{cases} 0 & x \text{属于缺失区域} \\ 1 & x \text{属于已知区域} \end{cases}$$



图像退化与恢复

- 图像退化的一般模型：

$$O = AI + N$$

A : 不同退化对应于不同的矩阵形式；可为多个退化矩阵连乘

N : 噪声

- 图像恢复问题：数学上是个反问题，已知图像退化机制，如何从观测到的退化图像推理出高质量图像，主要的数学方法

- 濾波方法
- 能量建模方法
- 偏微分方程方法

图像恢复算法—基于滤波的图像去噪

- 图像退化的一般模型：

$$O = I + n, n \sim N(0, \sigma)$$

- 基于滤波的图像去噪算法
 - 高斯滤波
 - 双边滤波
 - 非局部滤波

图像恢复算法—基于滤波的图像去噪

- 高斯滤波：在空间区域对图像进行高斯滤波



图像恢复算法—高斯滤波

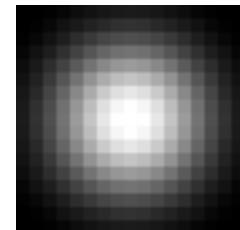
- 高斯滤波：在空间区域对图像进行高斯滤波

$$BA[I]_p = \sum_{q \in S} B_\sigma(p - q) I_q$$

像素p处的
高斯滤波结果 对像素p处周
围图像块内点q求和

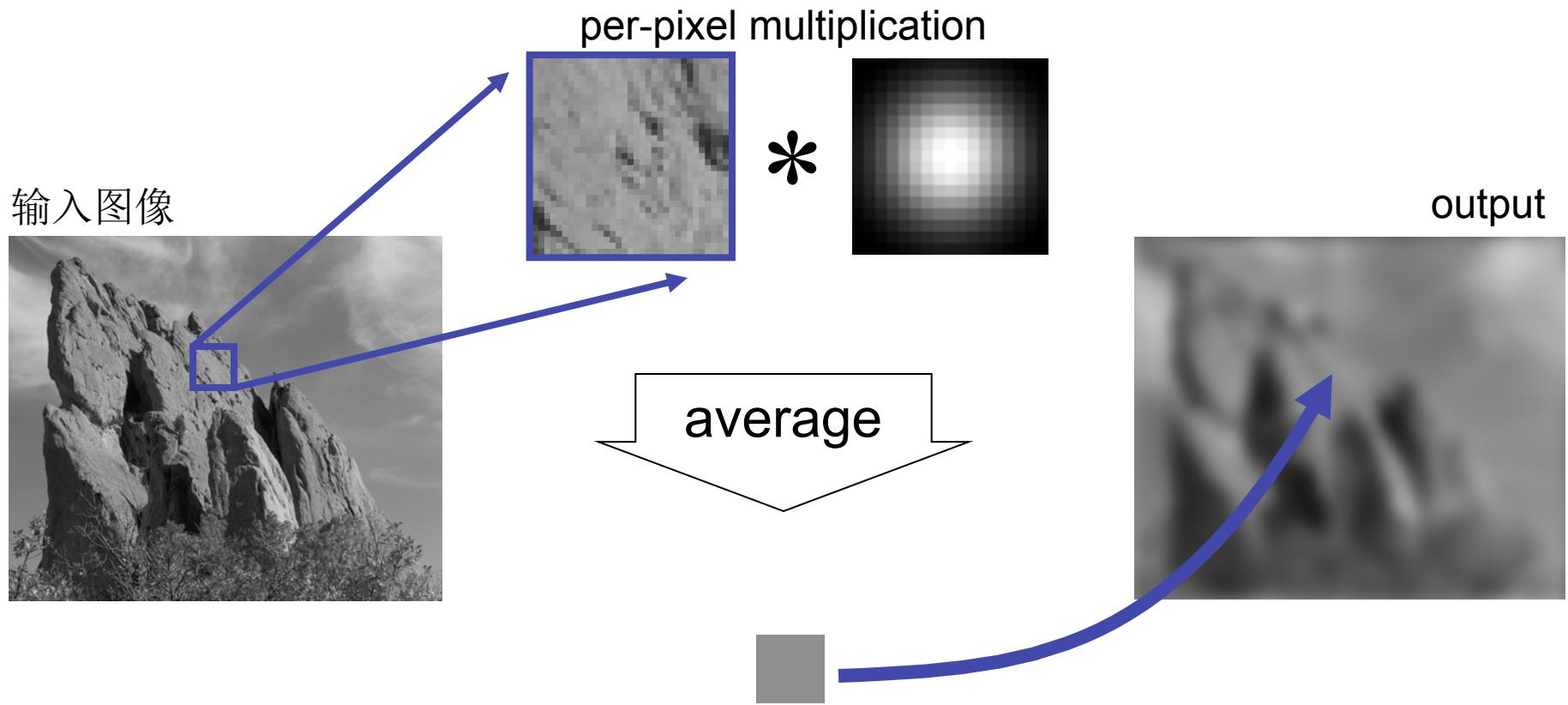
像素q的灰度值

高斯卷积模版



图像恢复算法—高斯滤波

- 高斯滤波操作



输入

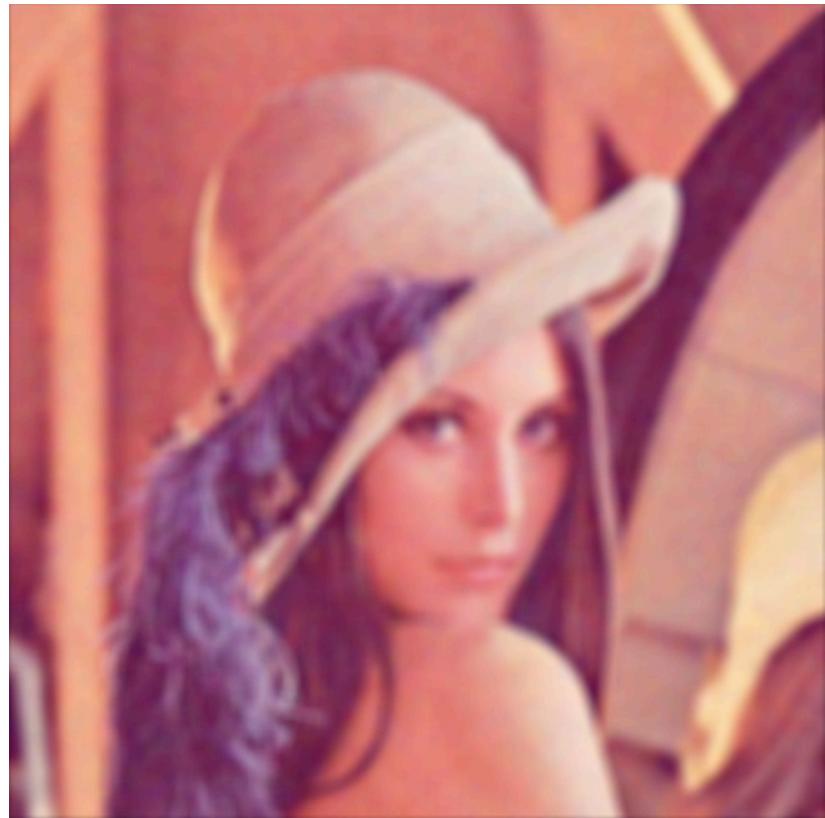
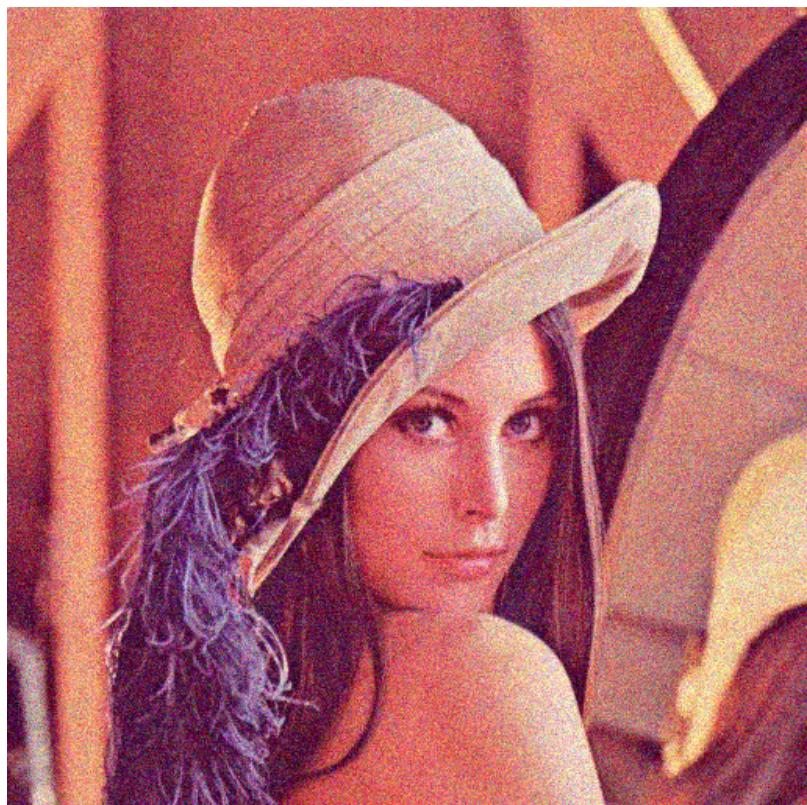


高斯卷积结果



图像恢复算法—高斯滤波

- 高斯滤波用于图像去噪



```
im = imread('lena.jpg');
imn = im + 25.5 * randn(size(im));
f = fspecial('gauss', 11, 5);
imfilt = imfilter(imn, f);
```

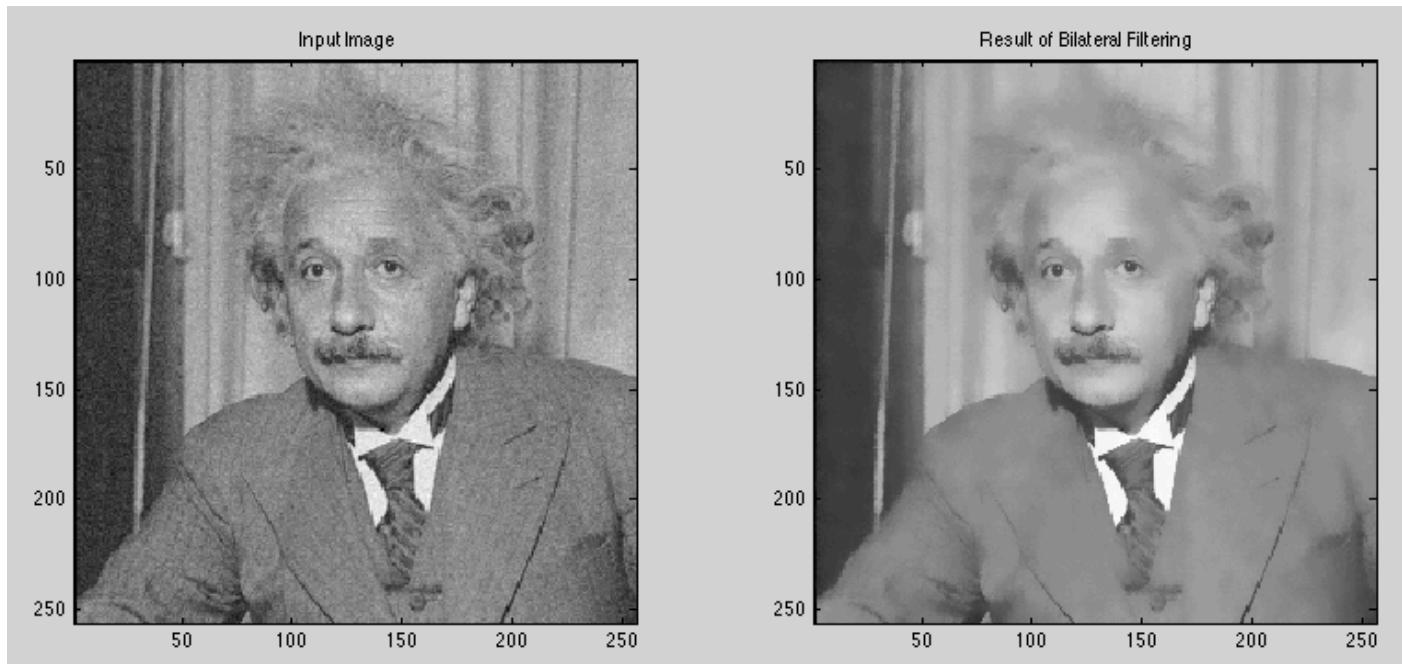
图像恢复算法—高斯滤波

- 高斯滤波的性质

- 线性滤波
- 滤波核为高斯函数生成，与图像信息本身无关
- 可以快速计算 (例如FFT...)
- 缺点：滤波图像在图像边缘模糊现象严重

图像恢复算法—双边滤波

- 双边滤波算法 (Bilateral image filtering) : 一种有效的非线性滤波方式，对不同像素点施加不同的滤波模版，该模版构建依赖于图像局部的颜色和位置信息。
- 在图像光滑化处理的同时，保持图像边缘信息



参考论文：C. Tomasi, R. Manduchi, Bilateral Filtering for Gray and Color Images, CVPR 1998

图像恢复算法—双边滤波

对于灰度图像：

$$BF[I]_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) I_q$$

灰度差
标量



对于彩色图像：

$$BF[I]_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(\|\mathbf{C}_p - \mathbf{C}_q\|) \mathbf{C}_q$$

颜色差
3D向量
(RGB, Lab)

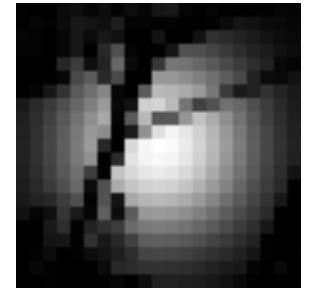
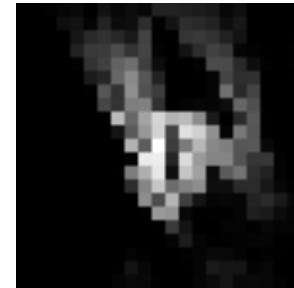
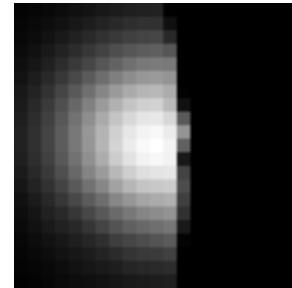
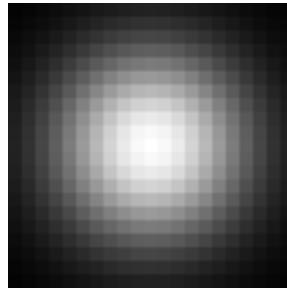


图像恢复算法—双边滤波

- 非线性性

$$BF[I]_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p-q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) I_q$$

- 计算相对复杂, 空间不一致卷积核



- 直接实现速度比较慢 > 10min
- 目前有该算法的加速实现算法。

图像恢复算法—双边滤波

- 双边滤波与高斯滤波的不同：

双边滤波：

$$BF[I]_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(\|C_p - C_q\|) C_q$$

高斯滤波：

$$GF[I]_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) C_q$$

$$G_{\sigma_s}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_s^2}\right)$$

图像恢复算法—双边滤波

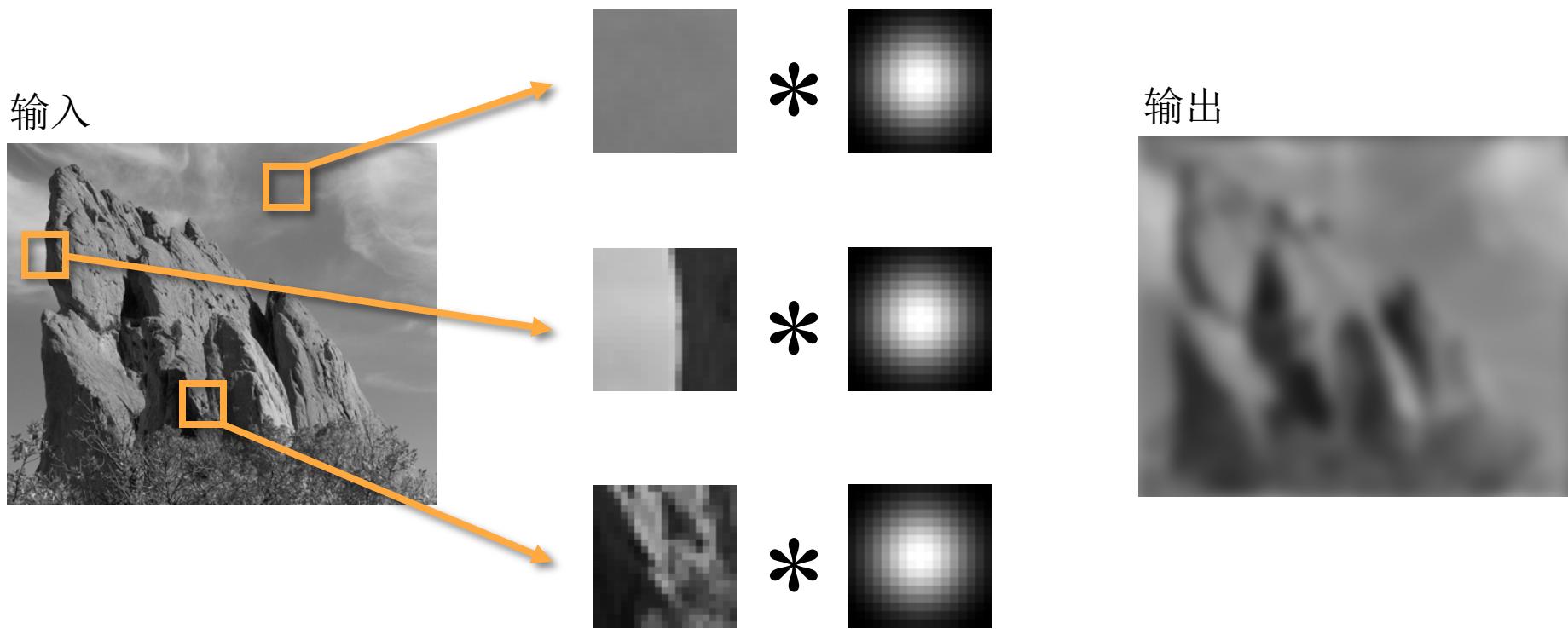
双边滤波：

$$BF[I]_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) I_q$$


- 空间 σ_s : 控制滤波核的空间范围.
- 颜色 / 灰度范围 σ_r : 控制边缘强度

图像恢复算法—双边滤波

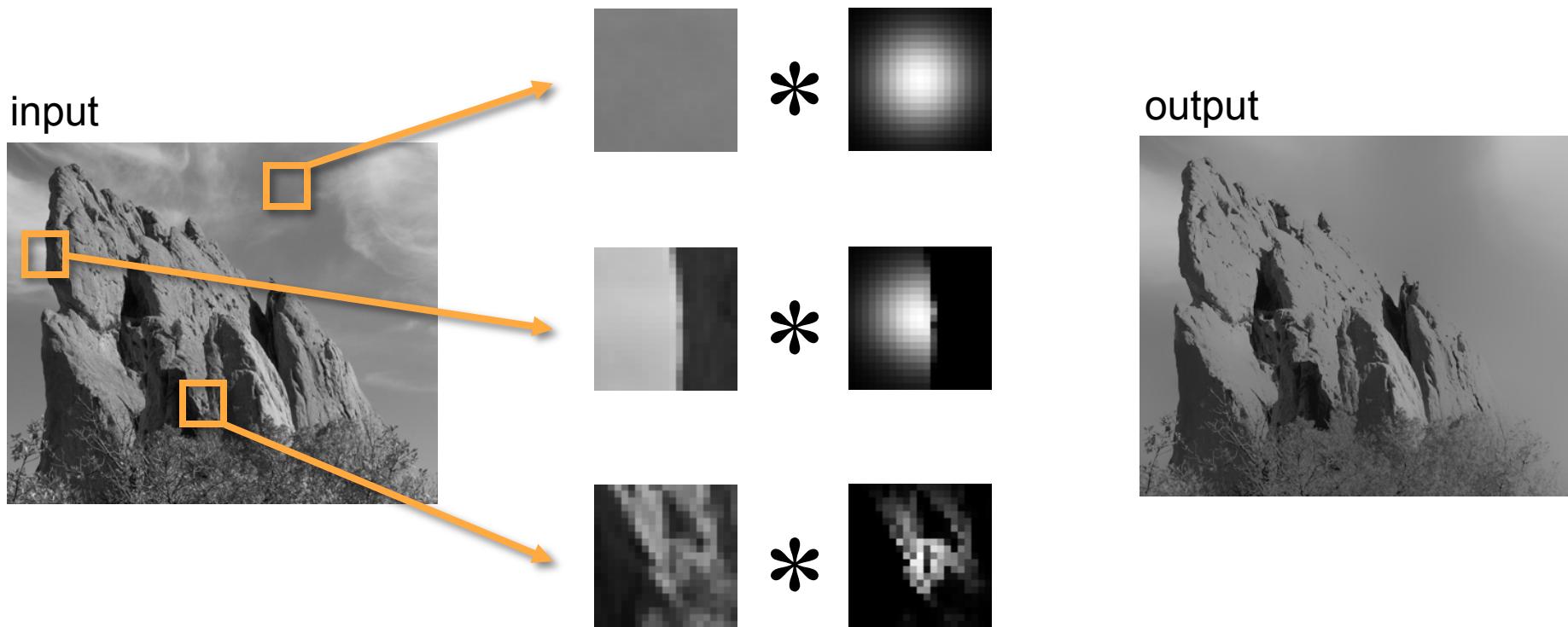
高斯滤波：



图像不同空间位置用相同的核

图像恢复算法—双边滤波

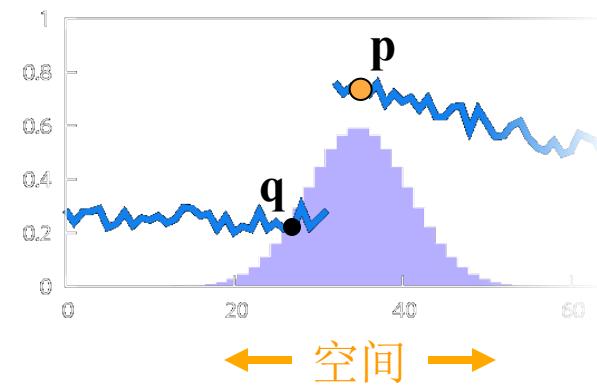
双边滤波：



The kernel shape depends on the image content.

图像恢复算法—双边滤波

高斯滤波 (1D 情形)

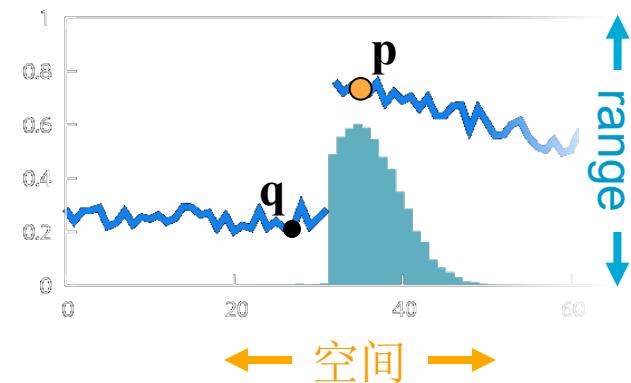


$$GB[I]_p = \sum_{q \in S} G_\sigma(\|p-q\|) I_q$$

空间

双边滤波 (2D情形)

[Aurich 95, Smith 97, Tomasi 98]

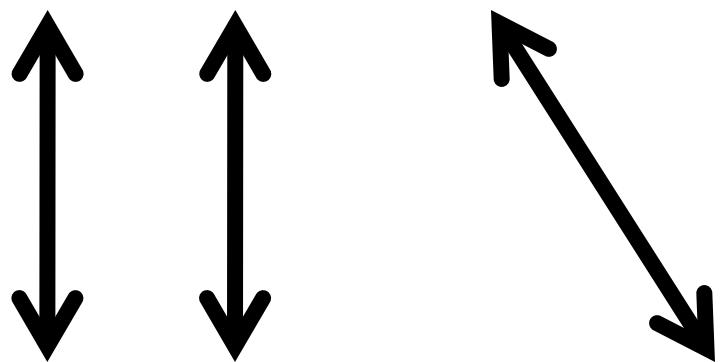


$$BF[I]_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p-q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) I_q$$

正规化

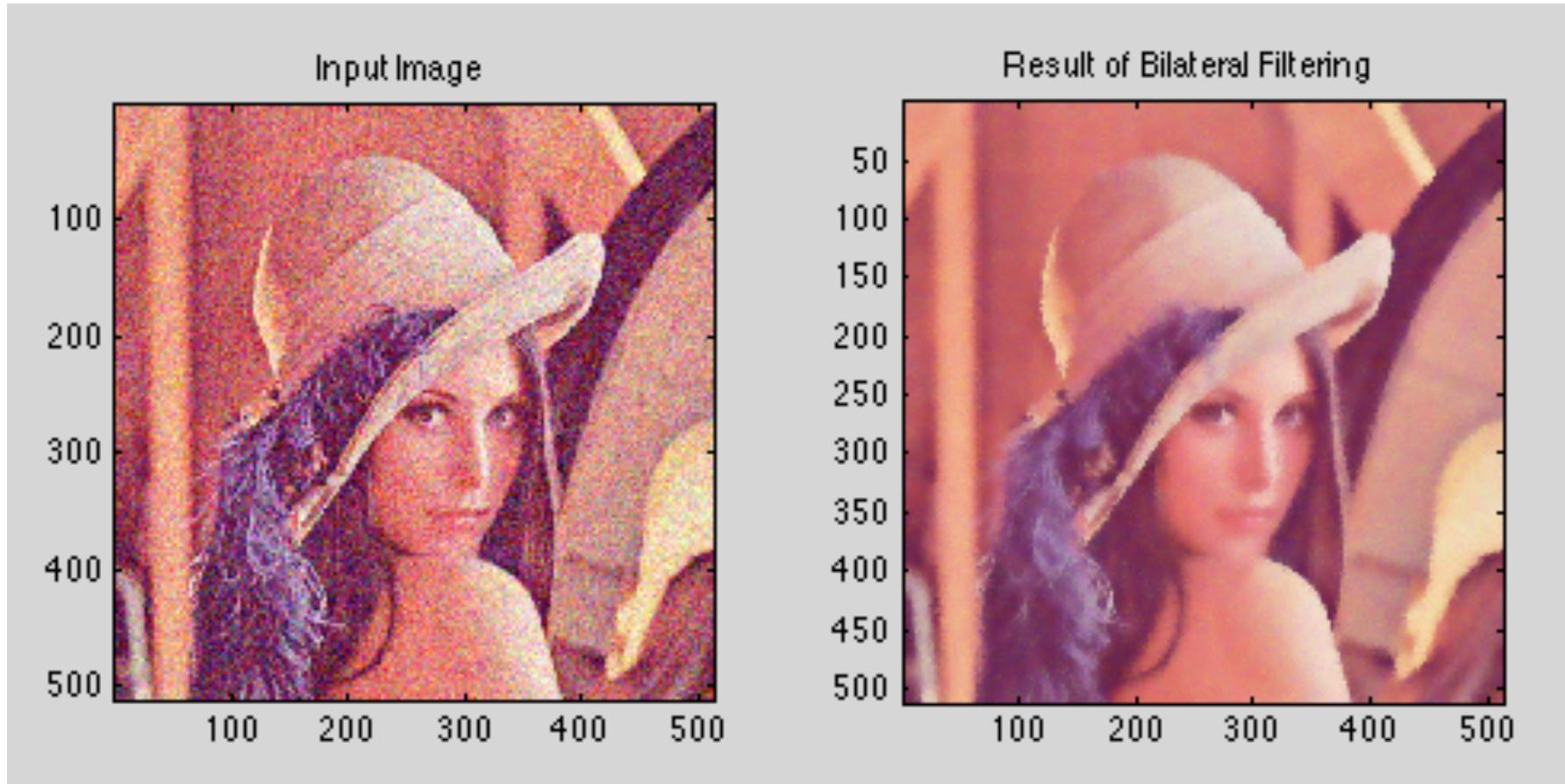
空间

范围



图像恢复算法—双边滤波

双边滤波：



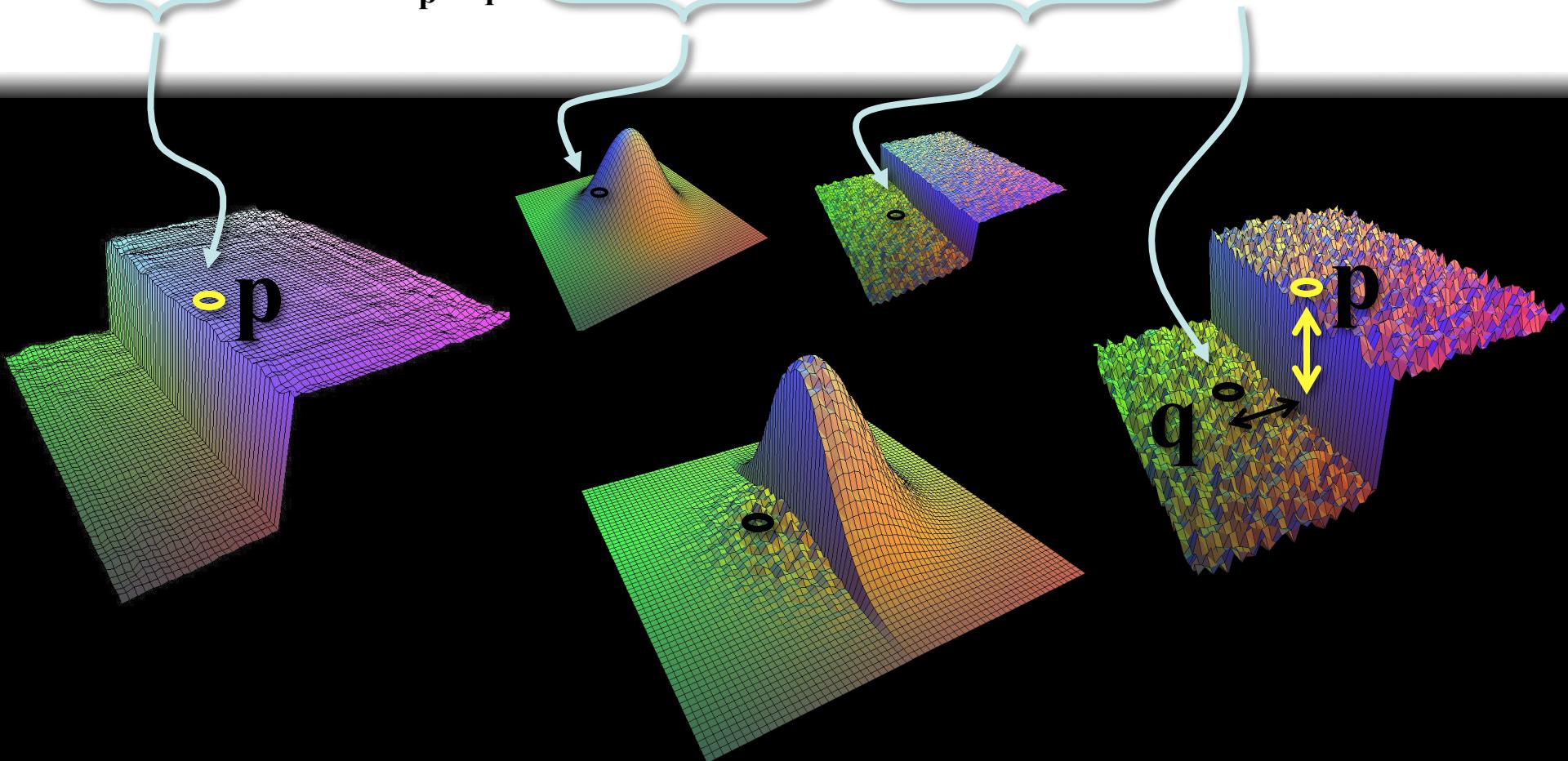
图像恢复算法—双边滤波

双边滤波的应用（图像卡通化）：



图像恢复算法—双边滤波

$$BF[I]_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) I_q$$



不同参数下的结果



输入

$s_r = 0.1$



$s_r = 0.25$



$s_r = \infty$
(高斯模糊)



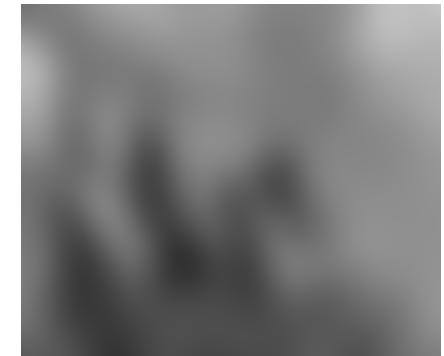
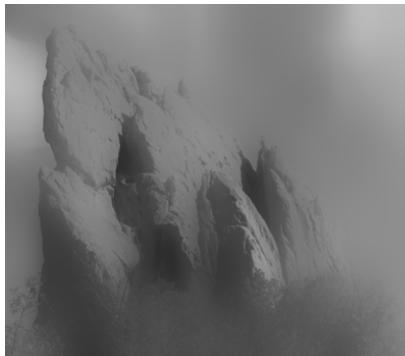
$s_s = 2$



$s_s = 6$



$s_s = 18$



不同参数下的结果



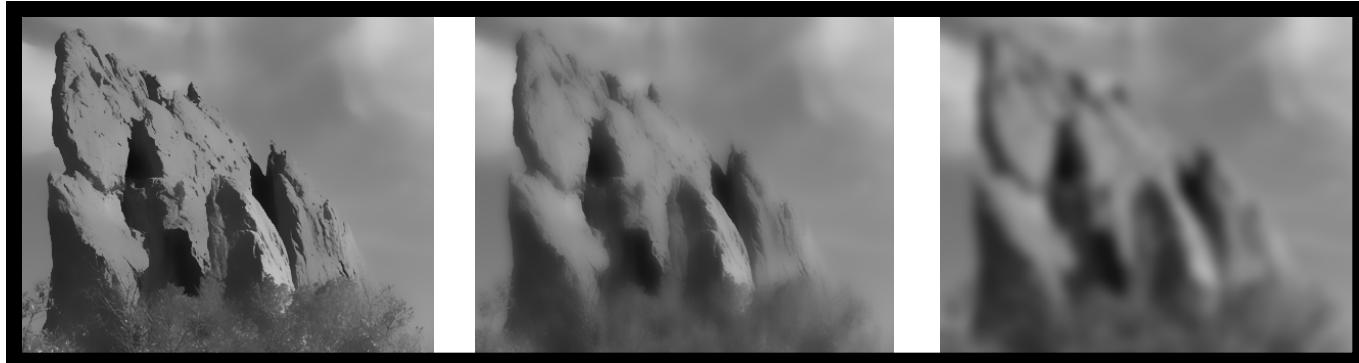
input

$s_r = 0.1$

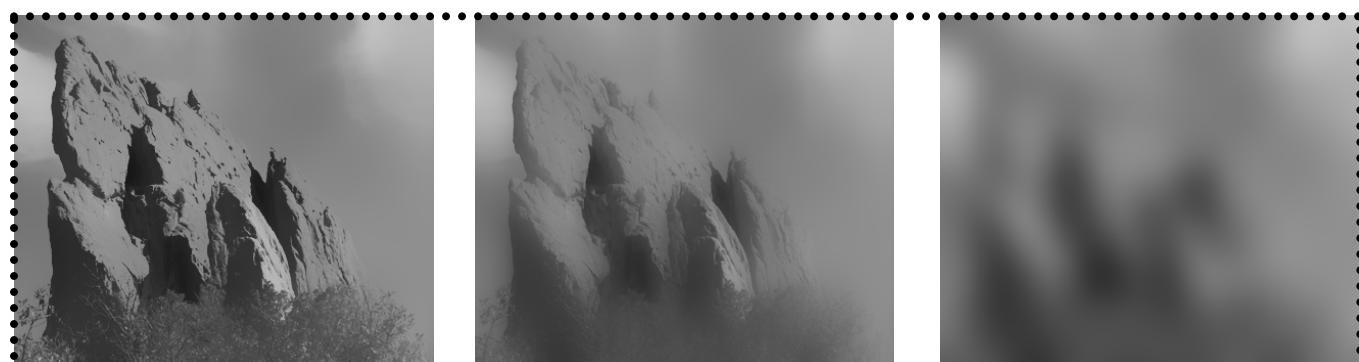
$s_r = 0.25$

$s_r = \infty$
(高斯模糊)

$s_s = 2$



$s_s = 6$



$s_s = 18$

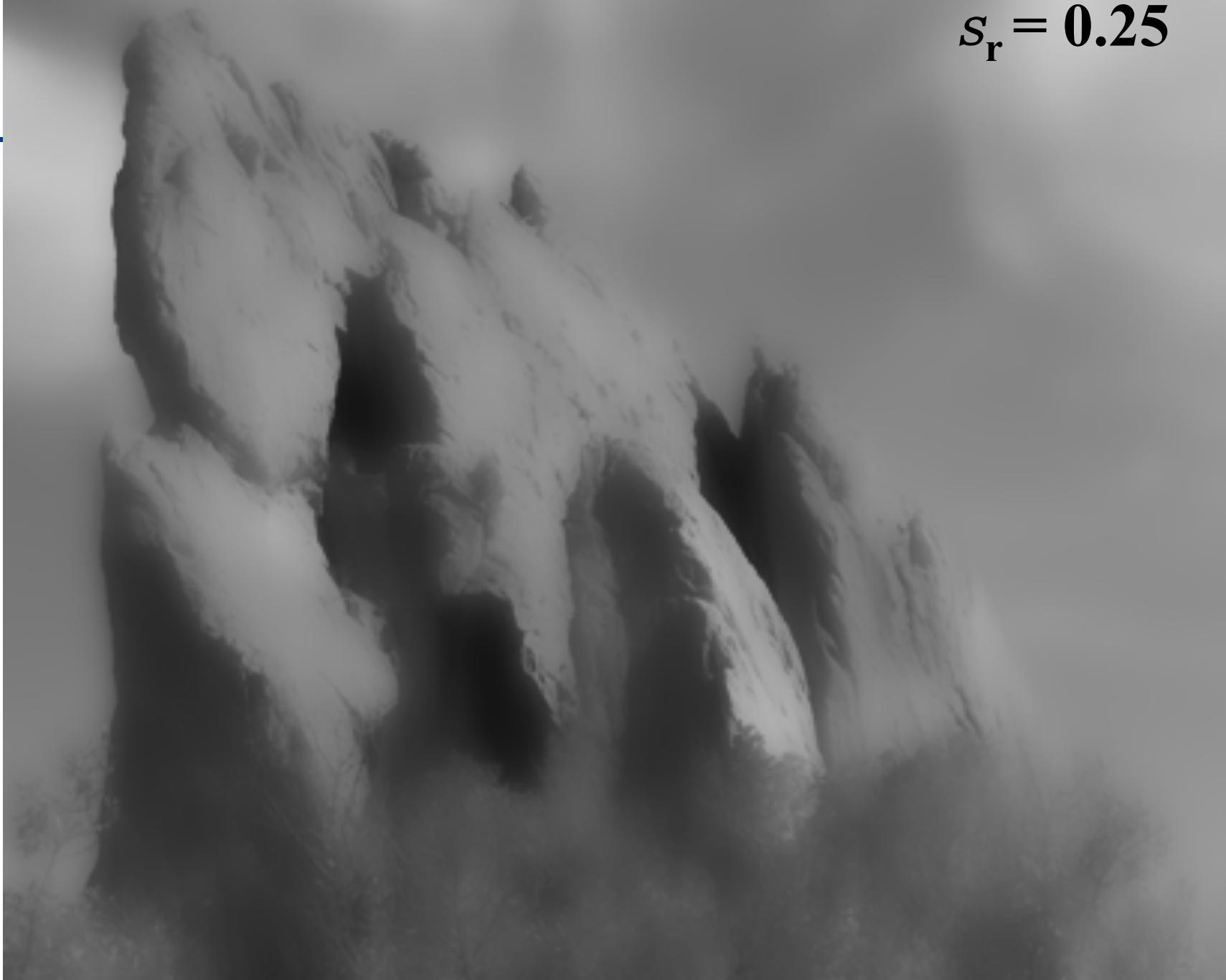
input



$s_r = 0.1$



$s_r = 0.25$



$s_r = \infty$
(Gaussian blur)

不同参数下的结果



input

$s_r = 0.1$



$s_s = 2$



$s_s = 6$



$s_s = 18$

$s_r = 0.25$



$s_r = \infty$
(Gaussian blur)



input



$s_s = 2$



$s_s = 6$



$s_s = 18$



图像恢复算法—双边滤波

迭代双边滤波

$$I_{(n+1)} = BF[I_{(n)}]$$

- 生成越来越分片光滑的图像

input



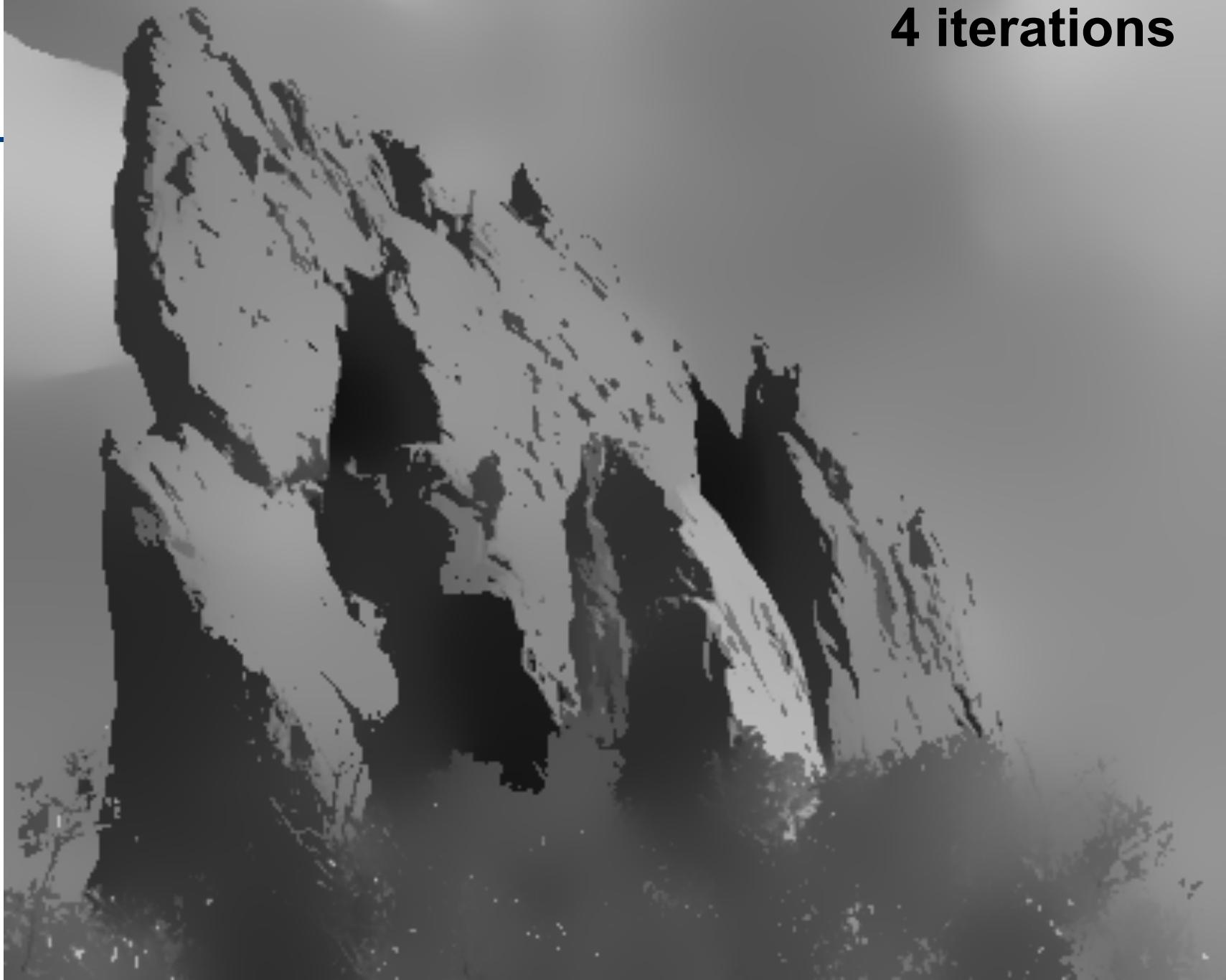
1 iteration



2 iterations



4 iterations



图像恢复算法—双边滤波

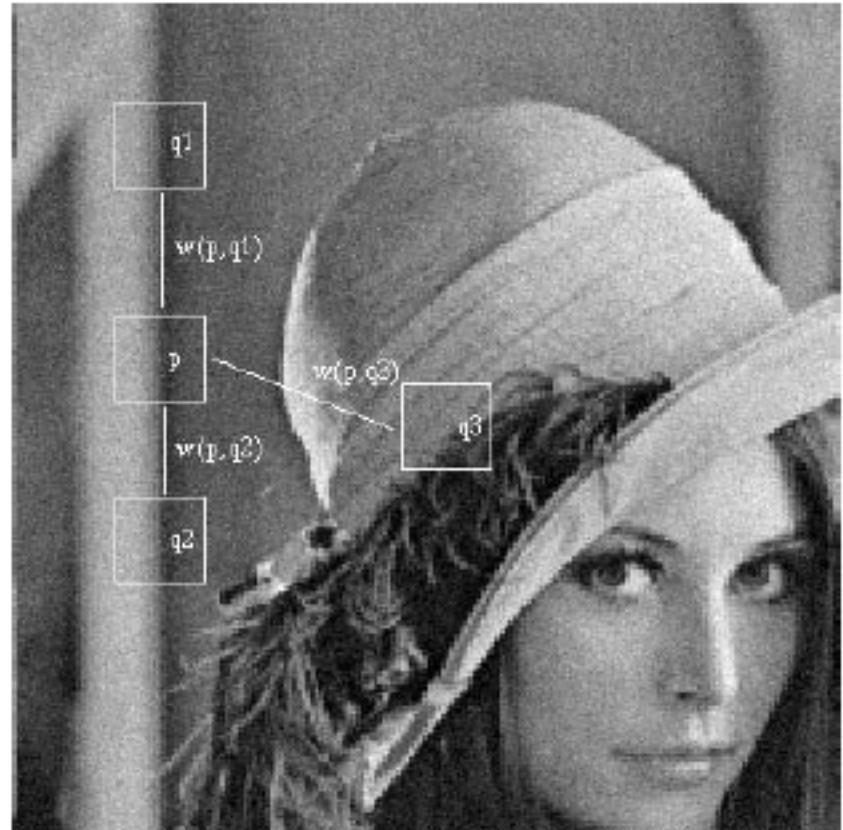
非局部滤波：

$$NL[I]_P = \sum_{q \in I} w(p, q)I(q)$$

其中：

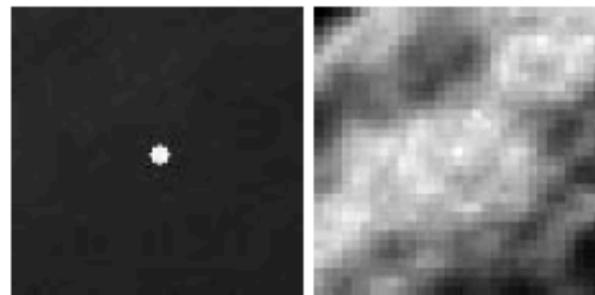
$$w(p, q) = e^{-\frac{\|\underline{N}(p) - \underline{N}(q)\|^2}{h^2}}$$

$\underline{N}(p)$ ：像素p周围的图像块

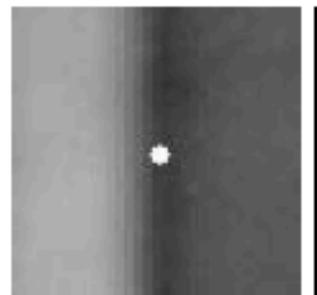


[参考文献：Antoni Buades, et al., A non-local algorithm for image denoising, CVPR 2005]

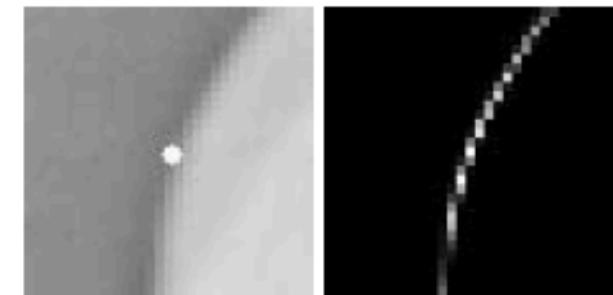
图像恢复算法—双边滤波



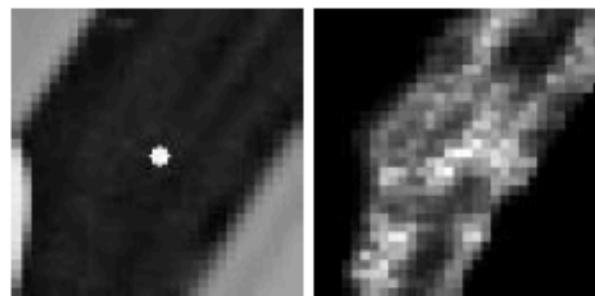
(a)



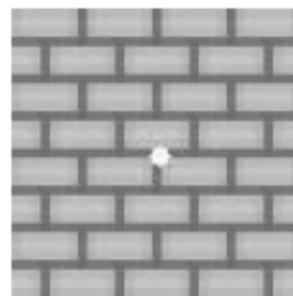
(b)



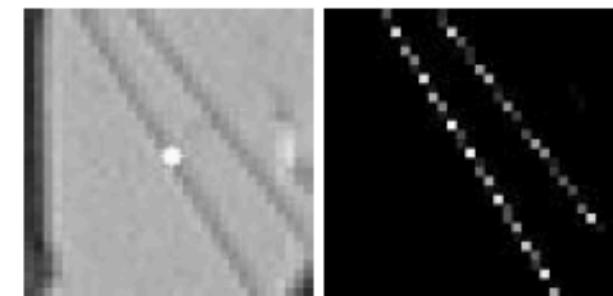
(c)



(d)



(e)



(f)

$$w(p,q) = e^{-\frac{\|\underline{N}(p)-\underline{N}(q)\|^2}{h^2}}$$





作业与练习

1. 复习双边滤波和非局部滤波方法，尝试上述两种算法做图像去噪。参考程序如下：

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/13176-non-local-means-filter>

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12191-bilateral-filtering>