



Школа Анализа Данных
Яндекса

Курс «Анализ изображений и видео»

Лекция №2
«Основы обработки изображений»

Антон Конушин

Заведующий лабораторией компьютерной графики и мультимедиа
ВМК МГУ

16 сентября 2016 года



Обработка изображений

- Семейство методов и задач, где входной и выходной информацией являются изображения
- Формально $Y = f(X)$, где $X, Y \in R^{n \times m \times k}$ - изображения с k -каналами, разрешением n на m пикселей

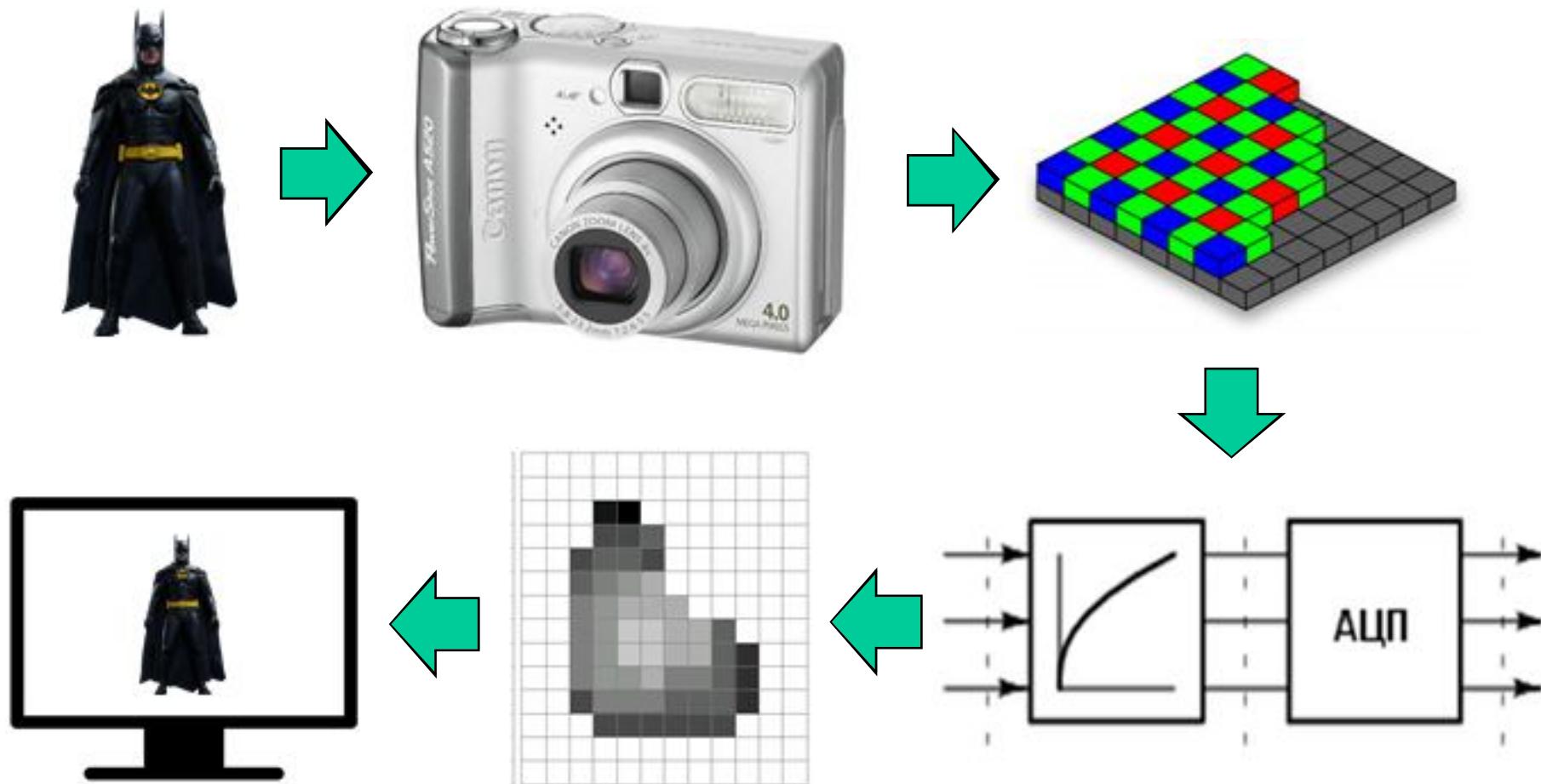


Зачем обрабатывать?

1. *Улучшение изображения для восприятия человеком*
 - цель – чтобы стало «лучше» с субъективной точки зрения человека
2. *Улучшение изображения для восприятия компьютером*
 - цель – упрощение последующего распознавания
3. *Преобразование для технических нужд*
 - например, изменение разрешения или пропорций для демонстрации на другом устройстве
4. *Развлечение (спецэффекты)*
 - цель – получить эстетическое удовольствие от красивого эффекта



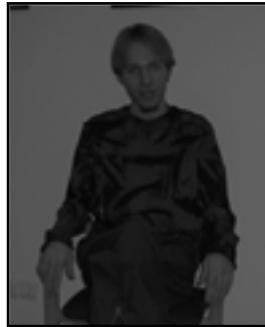
Тракт передачи изображений



Где кроются источники ошибок и дефектов?



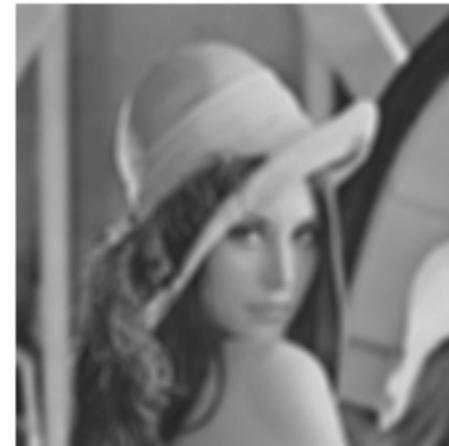
Рассматриваемые дефекты



Темное или слабоконтрастное

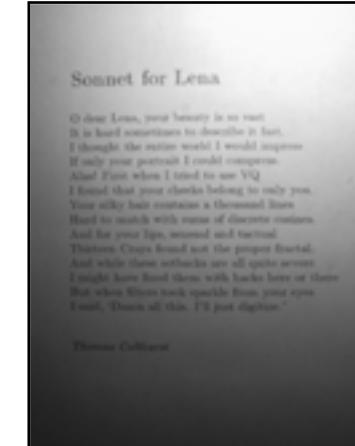


Неправильные цвета



Шумное

Нерезкое



Sonnet for Lena

O dear Lena, your beauty is so rare
It is hard sometimes to describe it fair,
I thought the entire world I would improve
If only your portrait I could compose.
Alas! First when I tried to use Y&Q
I found that your cheeks belong to only you,
Your silky hair contains a thousand lines
Hard to match with rows of discrete lines
And for your lips, round and taurous
Thirteen Crows found not the proper floral
And while these softails are all quite severe
I might have bound them with backs here or there
But, when Silver rock sparkle from your eyes
I said, "Down all this, I'll just digress."

Thomas Collicutt

Неравномерно освещённое



Тональная коррекция

Постоянство цвета и освещенности



Способность
зрительной системы
человека оценивать
собственные
отражательные
свойства
поверхностей в не
зависимости от
условий
освещенности

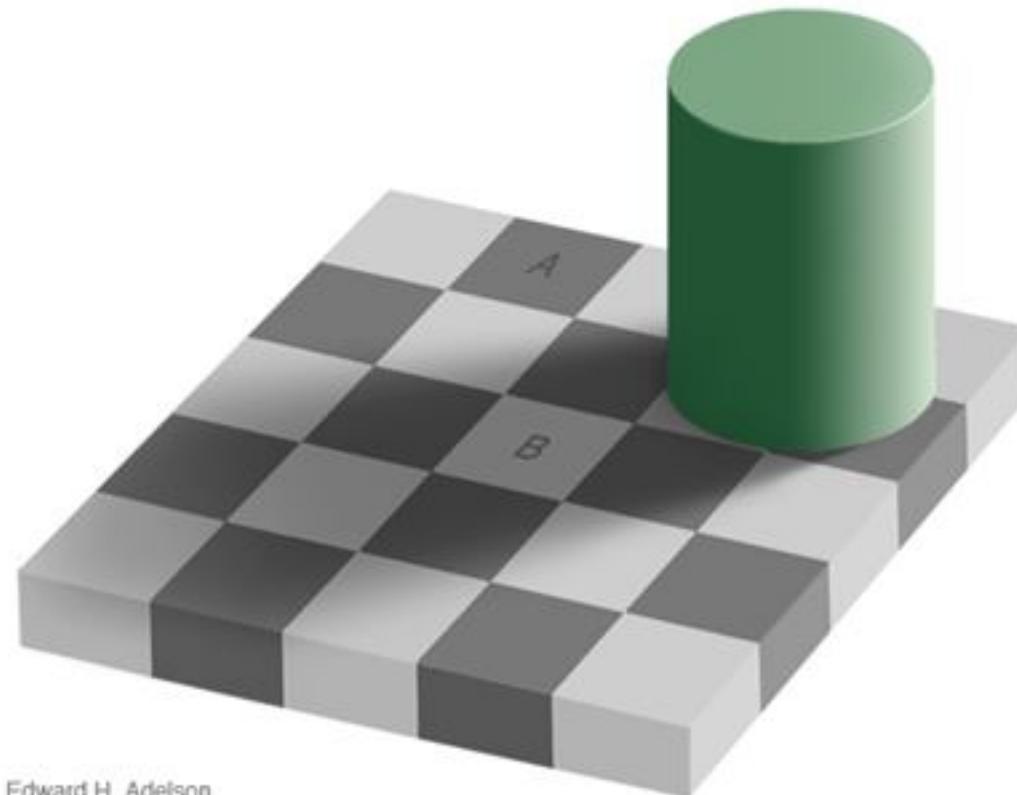
Освещённость:

- Полнолуние – 0.27 люкс
- Пасмурный день – 100-
1000 люкс
- Яркий день (в тени) –
20000 люкс
- На солнце - 100000

J. S. Sargent, The Daughters of Edward D. Boit, 1882



ПОСТОЯНСТВО ЯРКОСТИ



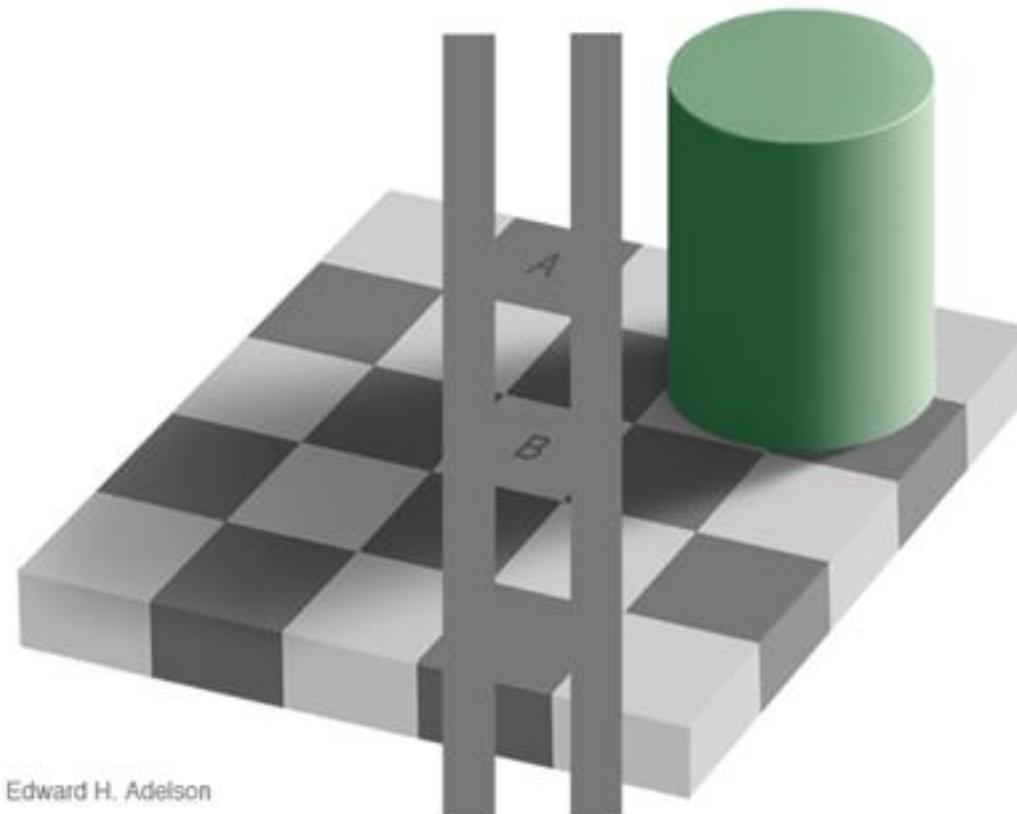
Edward H. Adelson

http://web.mit.edu/persci/people/adelson/checkershadow_illusion.html

Slide by S. Lazebnik



ПОСТОЯНСТВО ЯРКОСТИ



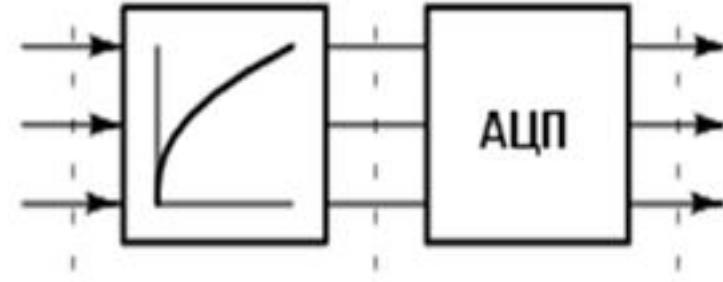
http://web.mit.edu/persci/people/adelson/checkershadow_illusion.html

Slide by S. Lazebnik

Причины плохой передачи яркости



- Ограниченный диапазон чувствительности датчика
- “Плохая” функция передачи датчика



Нужно оценить качество передачи тонов в изображении



Гистограмма и её оценка

Гистограмма – это график распределения яркостей на изображении. На горизонтальной оси - шкала яркостей тонов от белого до черного, на вертикальной оси - число пикселей заданной яркости.



255

0



255

0

- Не полностью используется диапазон яркостей
- Концентрация яркостей вокруг определенных значений - неравномерное заполнение диапазона яркостей)



Точечные операторы

Оператор, который определяет значение выходного пикселя по значению только одного входного пикселя. Все пиксели обрабатываются независимо друг от друга.

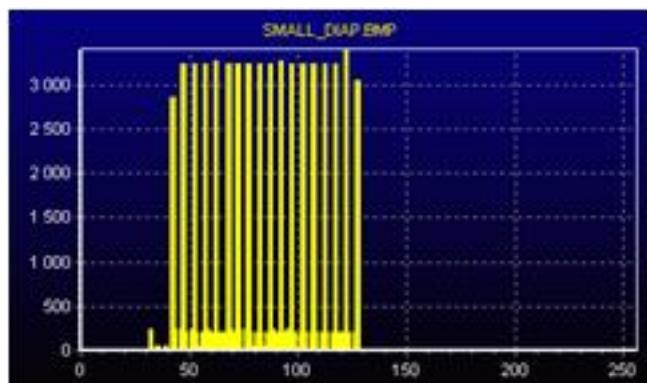
$$f^{-1}(y) = x \quad \begin{aligned} &y - \text{яркость пикселя на исходном изображении}, \\ &x - \text{яркость пикселя после коррекции}. \end{aligned}$$

Пишем f^{-1} , потому что «восстанавливаем» истинное значение яркости по неправильному



Линейная коррекция

Компенсация узкого диапазона яркостей –
линейное растяжение гистограммы
(Histogram equalization):



$$f^{-1}(y) = (y - y_{\min}) * \frac{(255 - 0)}{(y_{\max} - y_{\min})}$$

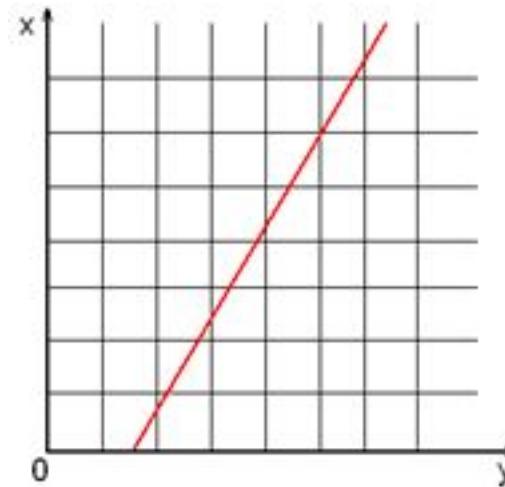
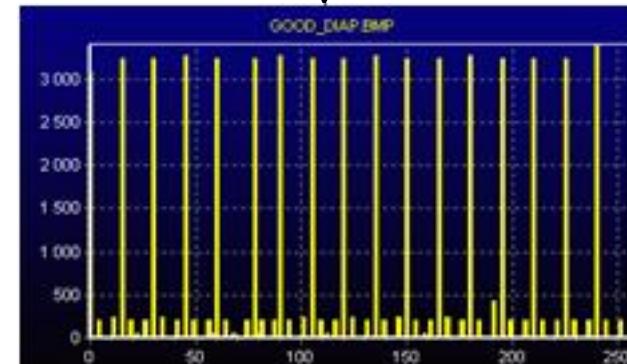
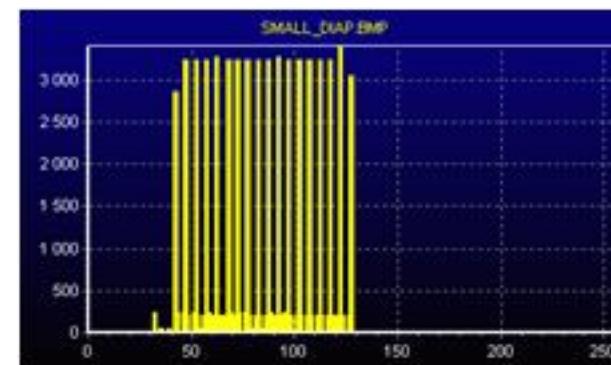


График функции $f^{-1}(y)$



Линейная коррекция

Компенсация узкого диапазона яркостей – линейное растяжение гистограммы:





Робастная линейная коррекция

Что будет при применении линейной коррекции к такой картинке?



Робастная (устойчивая) версия метода:

- Вычислим такую линейную коррекцию, чтобы 5% самых темных пикселов стали черными и 5% самых светлых стали белыми



Линейная коррекция

Линейное растяжение – «как AutoContrast в Photoshop»





Линейная коррекция



Линейная коррекция помогает не всегда!

К слову, в чём может быть причина дефекта такого изображения?



Нелинейная коррекция

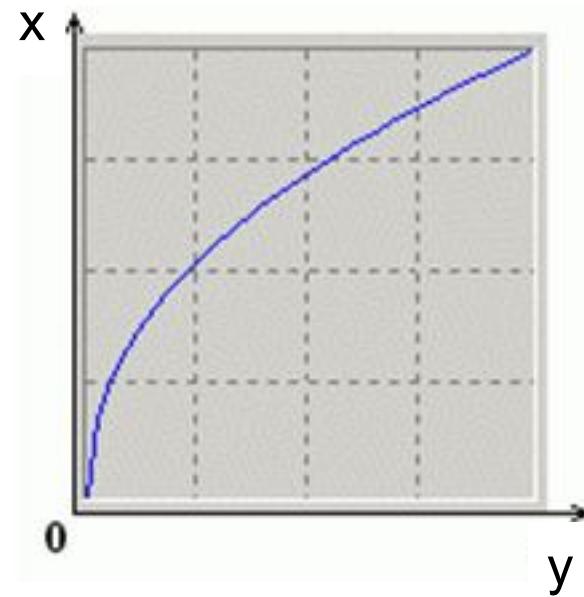
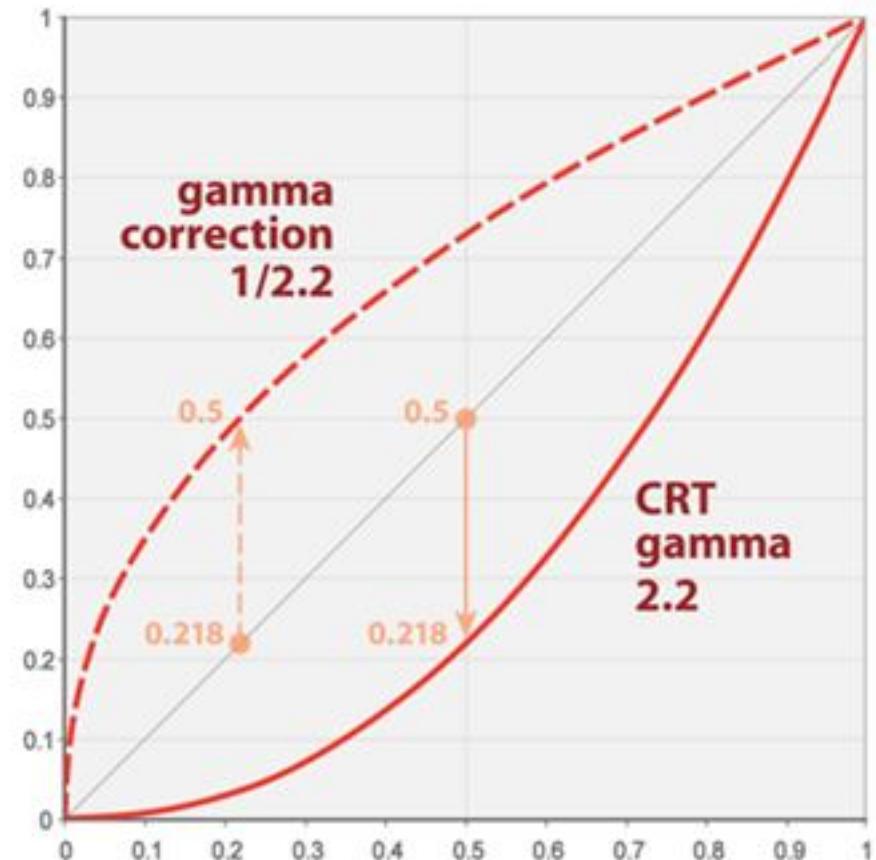


График функции $f^{-1}(y)$



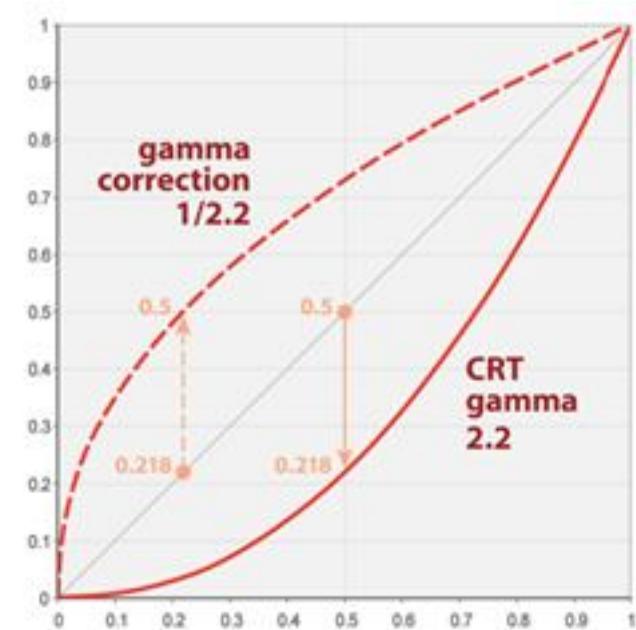
Гамма-коррекция

- Преобразование вида $y = c \cdot x^\gamma$
- Изначальная цель – коррекция для правильного отображения на мониторе
 - на ЭЛТ-мониторах была нелинейная зависимость между напряжением и яркостью пикселя
- Сейчас важнее как раз лучшая контрастность изображения при ограничении диапазона (те же 8бит)





Пример



Произвольная нелинейная коррекция

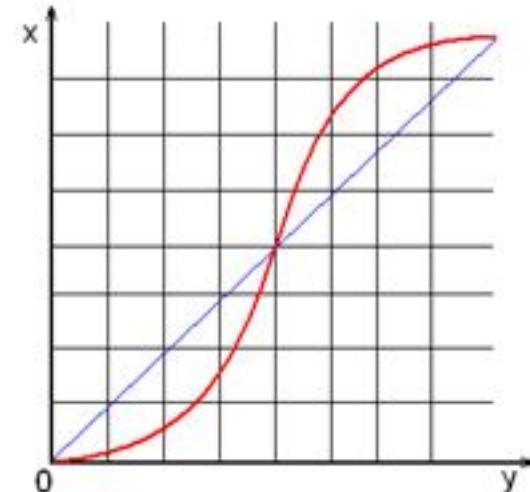
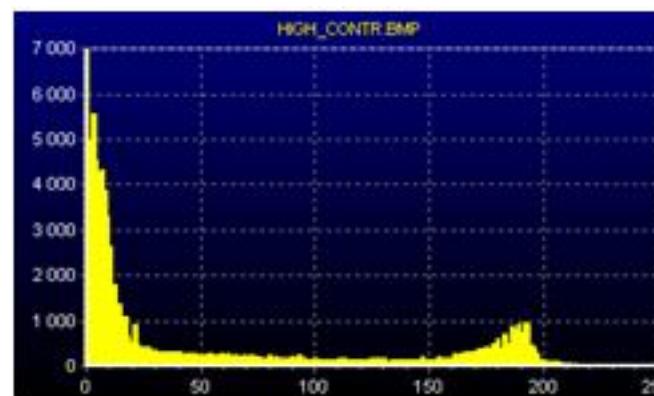
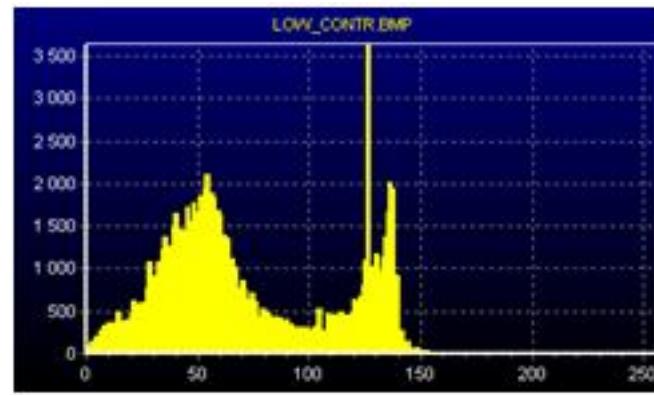


График функции $f^{-1}(y)$



Цветокоррекция

Цветовой баланс («баланс белого»)



Когда мы смотрим на фотографию или монитор, глаза адаптируются к освещению в комнате, а не к освещению сцены на фотографии.

Если «баланс белого» неточен, цвета фотографии кажутся неестественными.

Неправильный баланс



Правильный баланс



Как определить,
что цвета
неправильные?

Как
скорректировать
изображение?

<http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/white-balance.htm>

Slide by S. Lazebnik



Коррекция по шаблону

- Разумный подход:
 - Сфотографировать объект с известным цветом (шаблон)
 - Вычислить цветовое преобразование, чтобы цвет объекта на фотографии совпал с нужным
- Простейшая реализация:
 - Возьмём однотонные карточки (белые)
 - Будем домножать каждый канал отдельно, чтобы цвет карточек стал белым
 - Вычисление коэффициентов - Если цвет объект записывается как r_w, g_w, b_w , тогда веса $1/r_w, 1/g_w, 1/b_w$



Насколько такое
преобразование корректно,
какие могут быть
недостатки?

Профессиональная цветокоррекция



Source: The dark knight



Source: <http://x-rite.com>

Используем цветной шаблон с
многими цветами
Какое преобразование в камере?



Сложные модели



<http://vision.middlebury.edu/color/>

- Авторы собрали большую коллекцию разных изображений для оценки различных моделей преобразования в камере
- Полиномиальная модель (24 параметра)

$$y_i = g_i([M_D k]_i)$$

A. Chakrabarti, D. Scharstein, and T. Zickler. [An empirical camera model for Internet color vision](#). BMVC 2009

Оценка параметров цветокоррекции



Если нет цветовых шаблонов, тогда нам нужно угадать (или оценить) коэффициенты усиления

Модель «Серого мира» (Grayworld)

- Средний уровень («серый») по каждому каналу должен быть одинаков для всех каналов
- Если цветовой баланс нарушен, тогда «серый» в этом канале больше «серого» других каналов
- Вычислим коэффициенты усиления так, чтобы среднее в каждом канале стало одинаковым:

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum R(x, y); \quad \bar{G} = \frac{1}{N} \sum G(x, y); \quad \bar{B} = \frac{1}{N} \sum B(x, y); \quad Avg = \frac{\bar{R} + \bar{G} + \bar{B}}{3};$$

$$R' = R \cdot \frac{Avg}{\bar{R}}; \quad G' = G \cdot \frac{Avg}{\bar{G}}; \quad B' = B \cdot \frac{Avg}{\bar{B}}$$



«Серый мир» - примеры



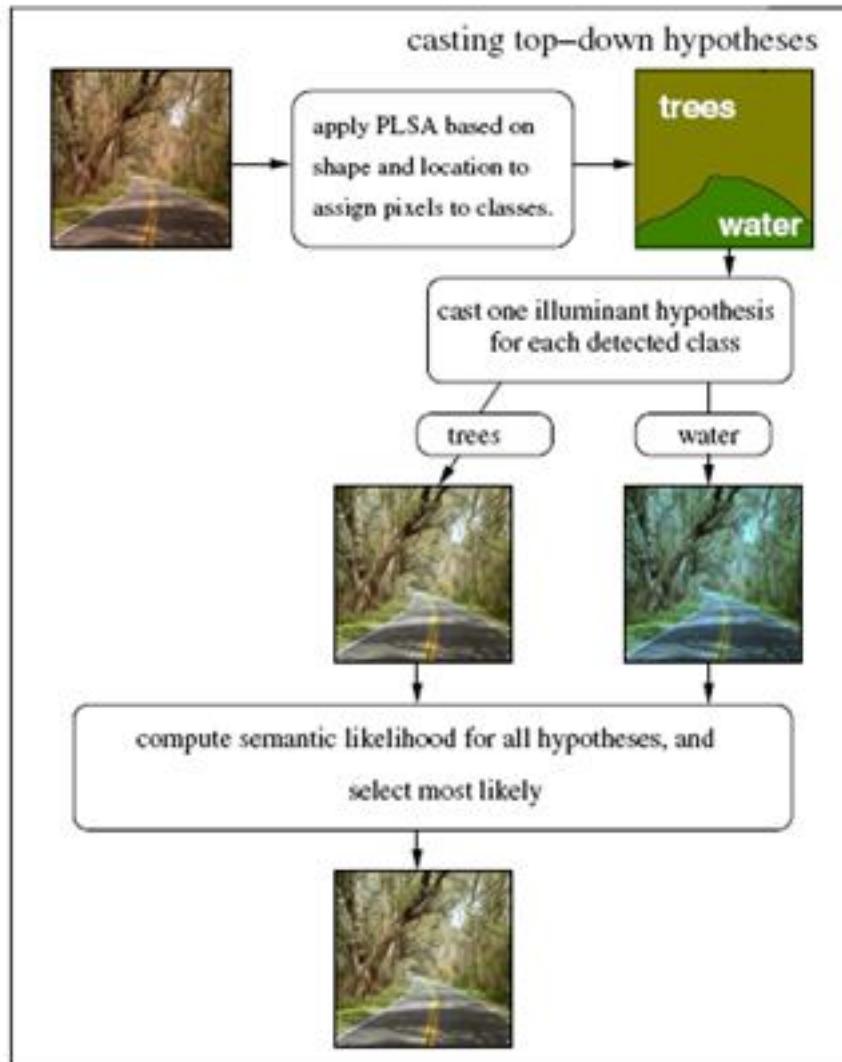


«Серый мир» - примеры





Распознавание баланса белого



Методы цветовой коррекции до сих пор развиваются.

Пример: Для каждого класса объектов, присутствующих в сцене, вычисляем преобразование таким образом, чтобы диапазон цветов объекта совпадал со средним диапазоном объектов этого класса на «типичных» изображениях



Шумоподавление



Шумоподавление

Причины возникновения шума:

- Несовершенство измерительных приборов (матриц)
- Пыль на приборах
- Потери при передаче
- Сжатие с потерями



Шум фотоаппарата



Сильное сжатие JPEG





Виды шума



Original



Salt and pepper noise



Impulse noise



Gaussian noise

- **Потеря информации** (*data drop-out noise*)
 - **Соль и перец:** случайные черные и белые пиксели
 - **Импульсный:** случайные белые пиксели
- **Гауссов:** колебания яркости, распределенные по нормальному закону
 - Аддитивный шум
 - $\text{Image}(i,j) = \text{true}(i,j) + \text{noise}(i,j)$
 - $\text{Noise}(i,j) \sim N(\mu, \sigma)$

Как оценить качество шумоподавления?

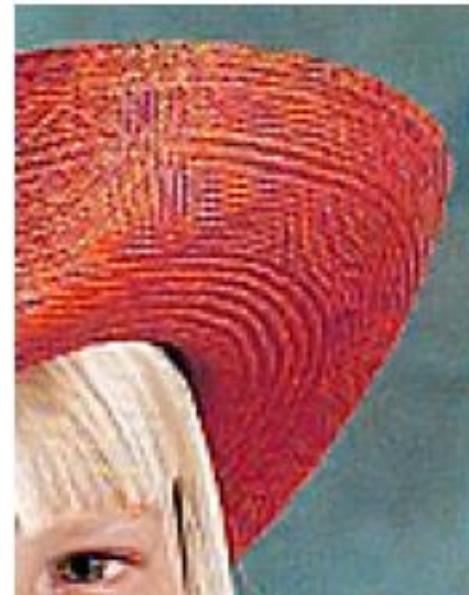


- Оценить результат можно только сравнив исходное изображение без шума с результатом шумоподавления по зашумлённому изображению

исходное
изображение
без шума



Результат
шумоподавления



- Т.е. нужна тестовая выборка пар изображений и метрики для сравнения изображений



Метрика PSNR

- Пусть X – изображение без шума, Y – изображение с шумом после шумоподавления
- Среднеквадратичная ошибка (MSE)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 \quad N – \text{число пикселей}$$

- Пиковое отношение сигнал/шум (PSNR)

$$PSNR_{dB} = 10 \lg \frac{M^2}{MSE} \quad M – \text{максимальное значение пикселя}$$

Ограничения метрики на примере Lena



PSNR и MSE не учитывают особенности человеческого восприятия, пусть и часто используются на практике



Оригинальное изображение Lena (Lenna)

- Обрезанная (512x512) часть изображения с разворота Playboy, Nov 1972
- Самый популярный, но не первый случай использования Playboy в обработке изображений (первый в 1961)
- Пригласили на 50ую конференцию Society for Imaging Science and Technology (IS&T) in 1997



Метрики качества

У этих изображений одинаковые PSNR с оригиналом
(примерно 25 dB)



Повышена контрастность Добавлен белый гауссов шум

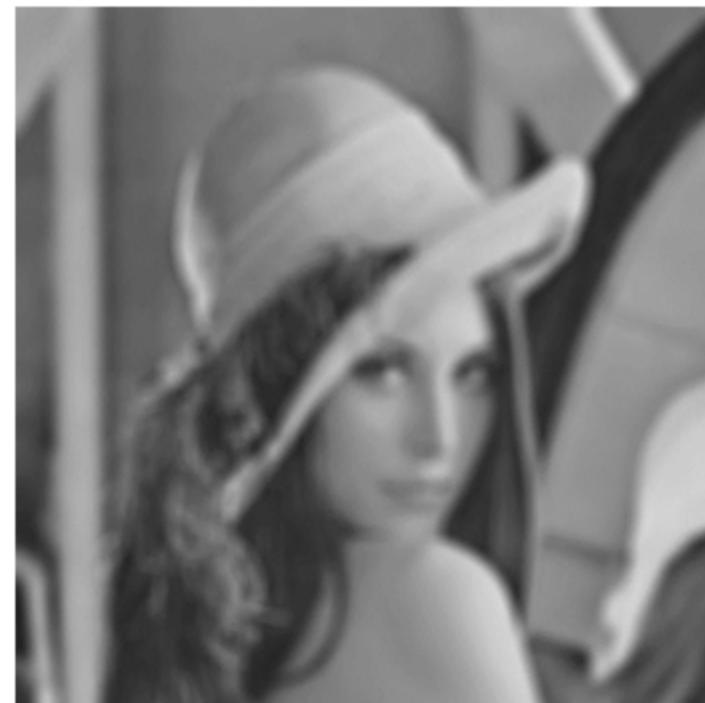


Метрики качества

И у этих – тоже примерно 25 dB!



Добавлен импульсный шум



Размытие



Метрики качества

- И у этого – тоже!



Артефакт блочности после JPEG

Постановка задачи фильтрации



- Найти такую функцию $Y=f(X)$, которая минимизирует $|Y-X'|$ по выбранной метрике на тестовой выборке $T=\{(X,X')_i\}$, где X' – изображение без шума, X – зашумлённое изображение
- Для разных видов шума будут свои функции
- Обычно будут параметры функции $f(x)$, значения которых приходится подбирать для оптимального качества в зависимости от шума



Усреднение нескольких кадров

«Временная фильтрация»



Зашумленные изображения



Усреднение по 10
изображениям

$$I(i, j) = g_r(i, j) + Err(i, j);$$

$$\bar{I}(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k(i, j);$$

$$E(\bar{I}(i, j)) = g_r(i, j);$$



Пространственная фильтрация

- Вычислим новое значение y_{ij} для пикселя x_{ij} как функцию от его локальной окрестности:

$$y_{ij} = f([x_{kl}]), x_{kl} \in \text{neighbour}(x_{ij})$$

- В простейшем случае мы возьмём просто взвешенное среднее по всем пикселям из окрестности
- Веса обозначаются как *ядро фильтра*
- Веса для усреднения задаются так:

$$\frac{1}{9} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

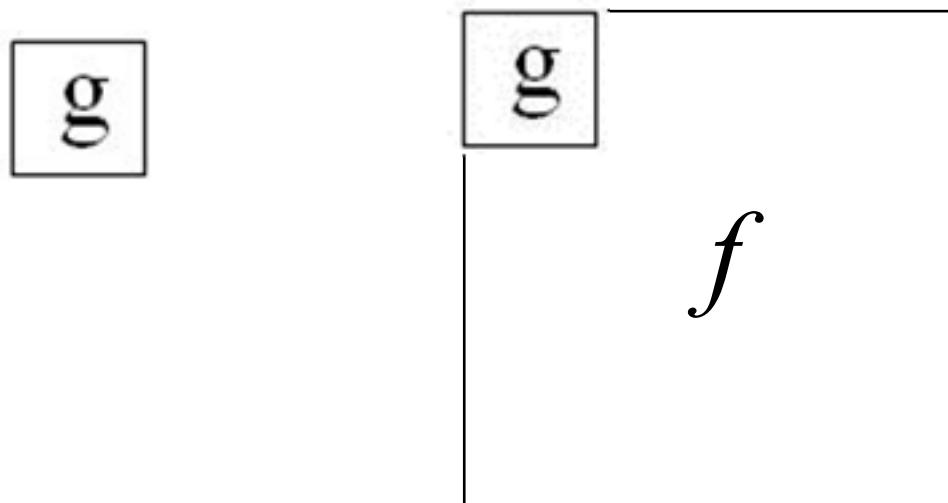
“box filter”



Свертка

- Пусть f – изображение, g - ядро. Свертка изображения f с помощью g обозначается как $f * g$ и называется:

$$(f * g)[m, n] = \sum_{k, l} f[m - k, n - l]g[k, l]$$





Линейные фильтры и свёртка

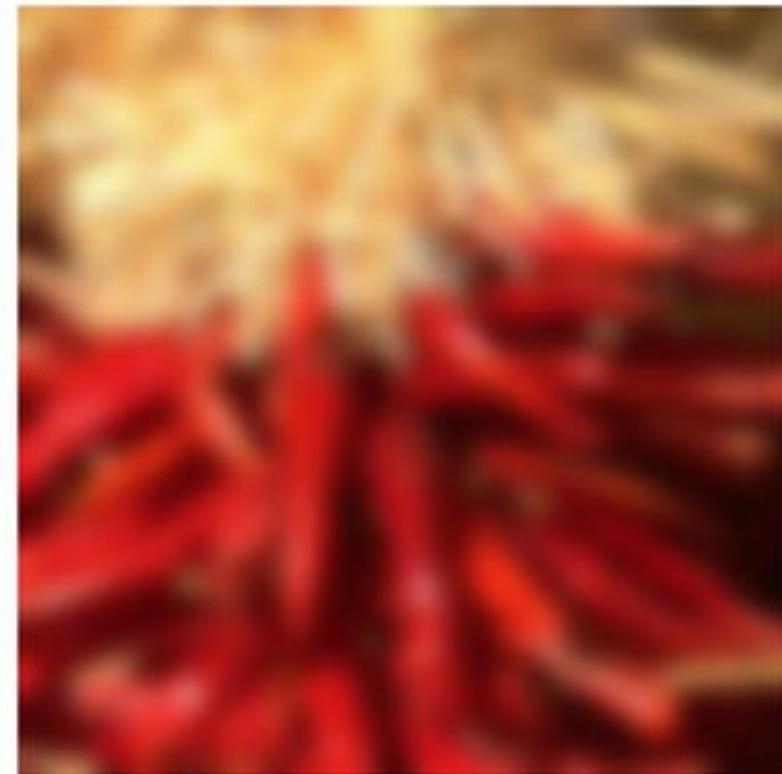
- Пространственный фильтр называется **линейным**, если выполняются свойства **линейности**:
 - $\text{filter}(f_1 + f_2) = \text{filter}(f_1) + \text{filter}(f_2)$
 - $\text{filter}(af_1) = a \text{ filter}(f_1)$
- Фильтр называются инвариантным к сдвигу, если выполняется следующее условие:
$$\text{filter}(\text{shift}(f)) = \text{shift}(\text{filter}(f))$$
- Теорема: любой линейный оператор, инвариантный к сдвигу, может быть записан в виде свертки
- Чтобы доказать нелинейность фильтра, можно воспользоваться основными свойствами, и показать их не выполнение на примере



Детали реализации

Как происходит фильтрация по краям?

- Окно фильтра выходит за границы изображения
- Необходимо экстраполировать изображение
- Варианты:
 - clip filter (black)
 - wrap around
 - copy edge
 - reflect across edge



Source: S. Marschner



Полезные свойства

- Ассоциативность: $a * (b * c) = (a * b) * c$
 - Последовательное применение фильтров: $((a * b_1) * b_2) * b_3$
 - Эквивалентно применению такого фильтра: $a * (b_1 * b_2 * b_3)$
- Дистрибутивность по сложению:
$$a * (b + c) = (a * b) + (a * c)$$



Простейшие фильтры



Original

0	0	0
0	1	0
0	0	0

?



Простейшие фильтры



Original

0	0	0
0	1	0
0	0	0



Filtered
(no change)



Простейшие фильтры



Original

0	0	0
0	0	1
0	0	0

?



Простейшие фильтры



Original

0	0	0
0	0	1
0	0	0



Shifted left
By 1 pixel



Простейшие фильтры

 $\frac{1}{9}$

1	1	1
1	1	1
1	1	1

?

Original

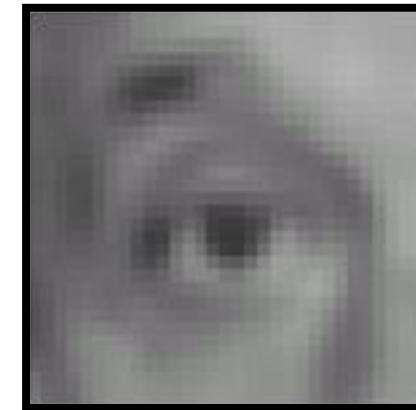


Бок-фильтр



Исходное

$$\frac{1}{9} \begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix}$$



Результат

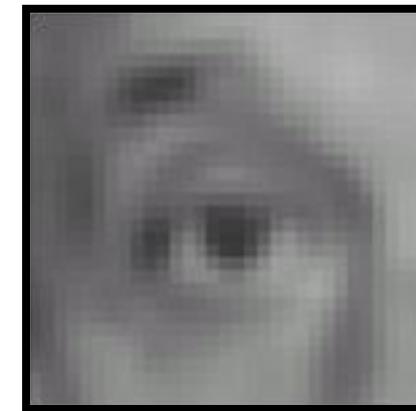


Другой фильтр



$$\frac{1}{16}$$

1	2	1
2	4	2
1	2	1



Исходное

Результат

Любой фильтр со всеми положительными весами и суммой весов = 1 будет сглаживать изображение



Сглаживание с box-фильтром

При сглаживании с box-фильтром на изображении могут образовываться паразитные линии



Source: D. Forsyth



Сглаживание

- Точка света, наблюдаемая с расфокусированного объектива, выглядит как кружок света, а усреднение (box) дает квадратик
- Другой способ: взвешиваем вклад пикселей по окрестности с учетом близости к центру

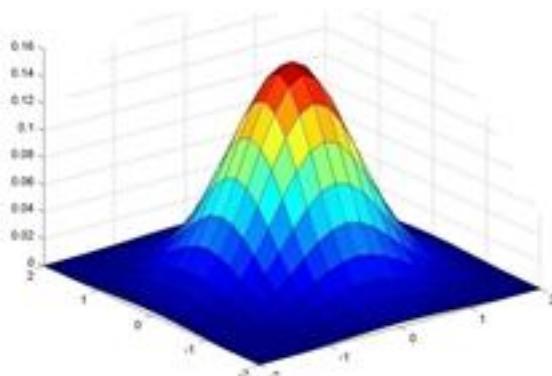


“размытый кружок”



Ядро фильтра гаусса

$$G_{\sigma} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$$



0.003	0.013	0.022	0.013	0.003
0.013	0.059	0.097	0.059	0.013
0.022	0.097	0.159	0.097	0.022
0.013	0.059	0.097	0.059	0.013
0.003	0.013	0.022	0.013	0.003

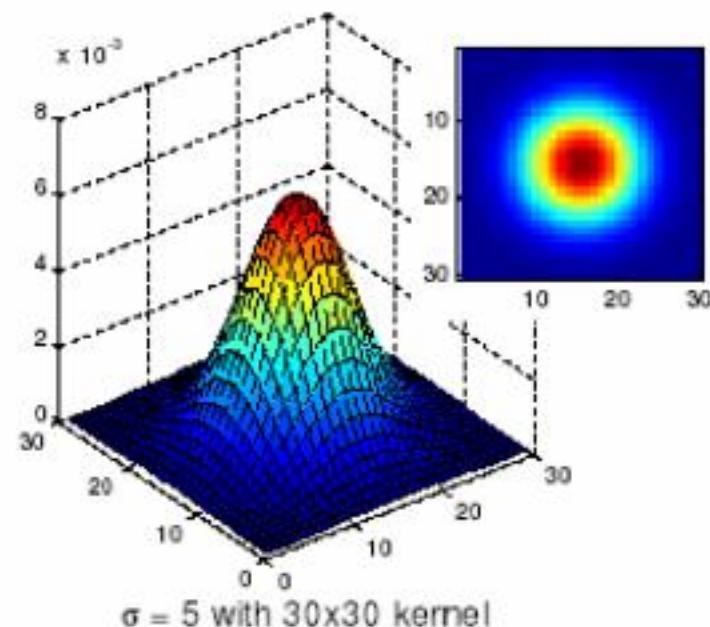
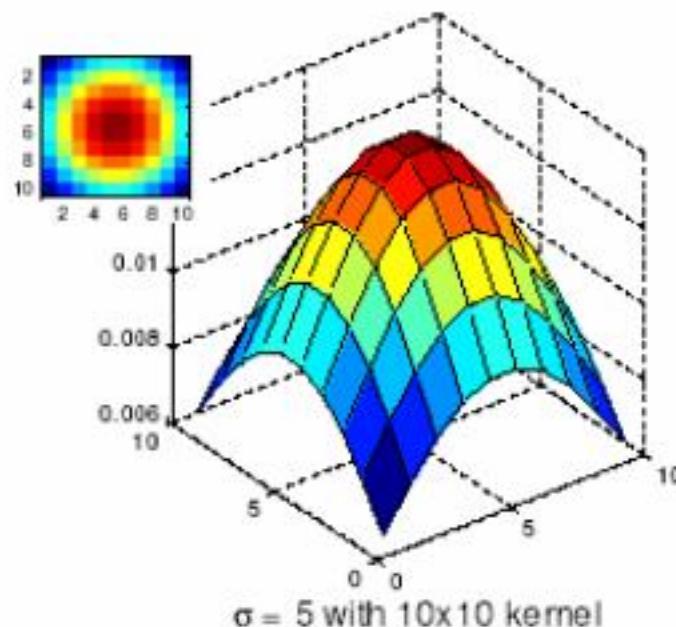
$5 \times 5, \sigma = 1$

Source: C. Rasmussen



Выбор размера ядра

Размер ядра дискретного фильтра ограничен

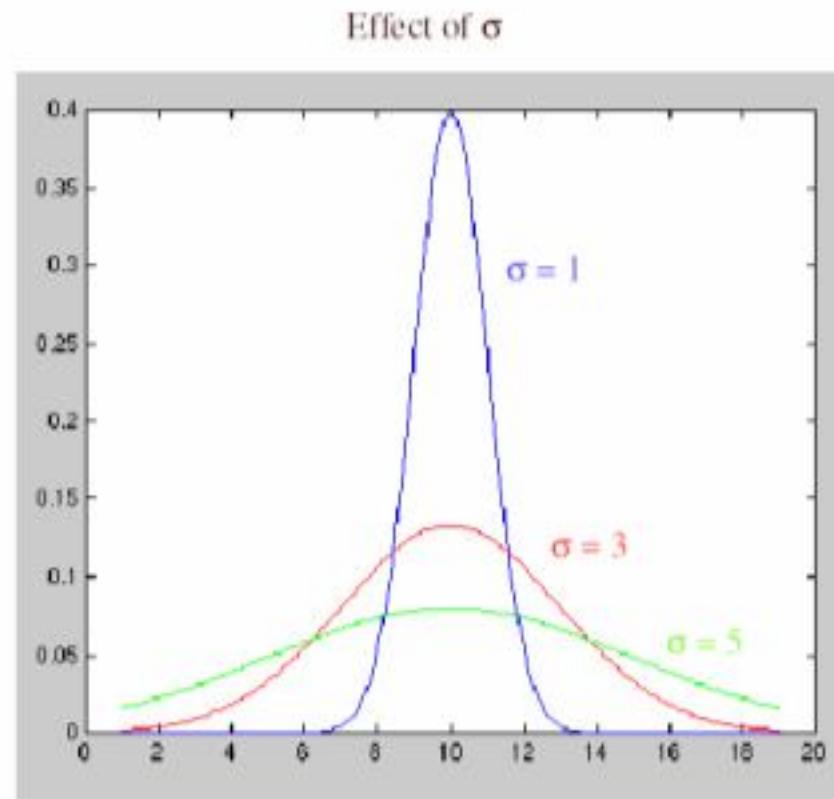


Source: K. Grauman



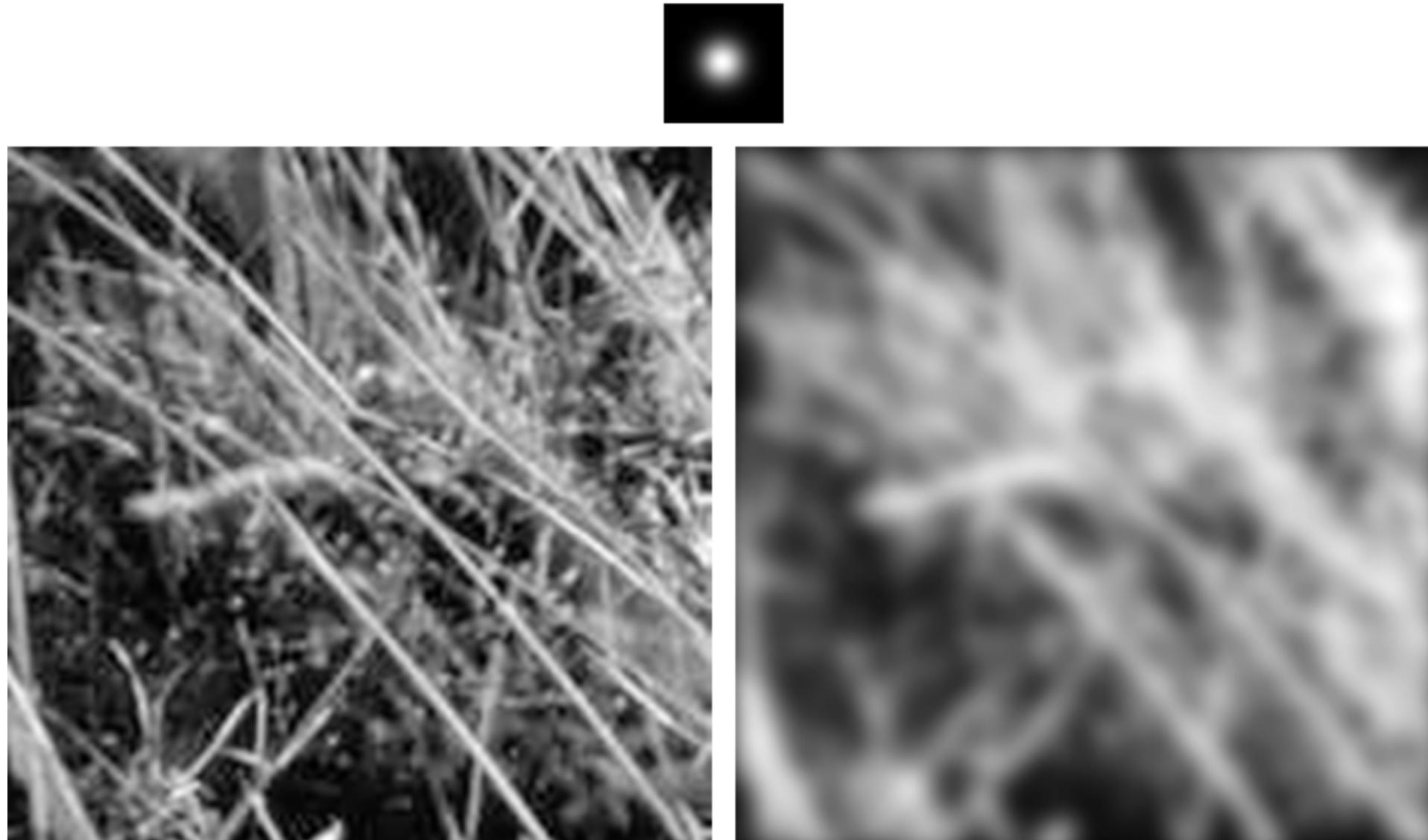
Выбор размера ядра

Эмпирика: полуразмер фильтра равен 3σ



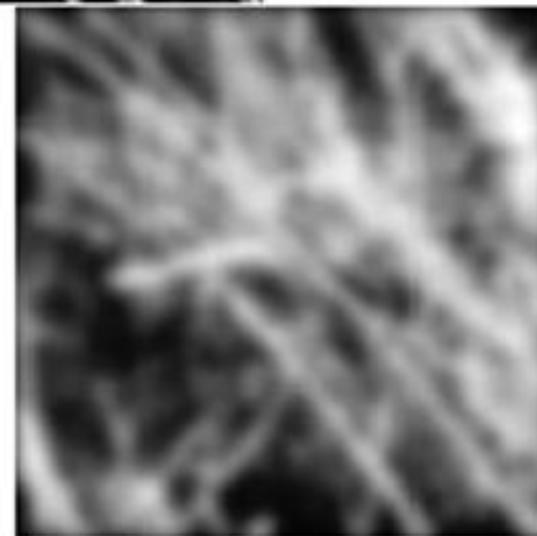
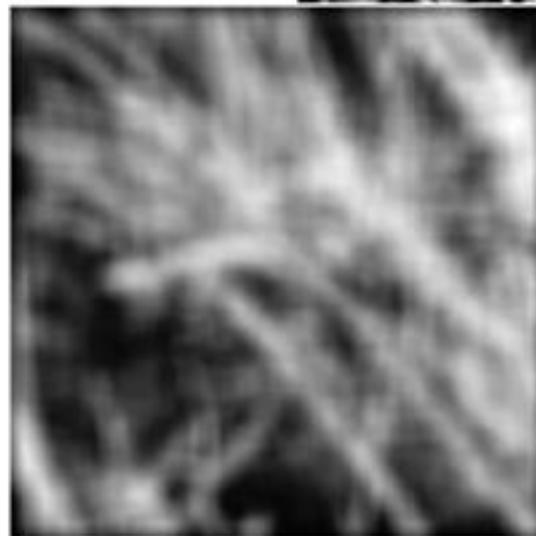


Сглаживание фильтром гаусса





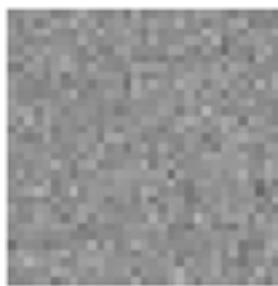
Сравнение



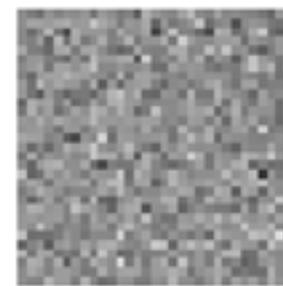


Подавление гауссова шума

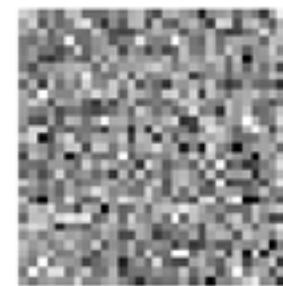
$\sigma=0.05$



$\sigma=0.1$



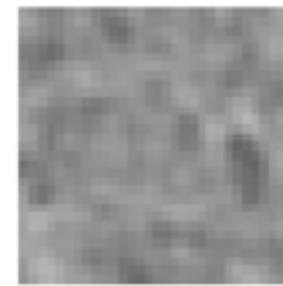
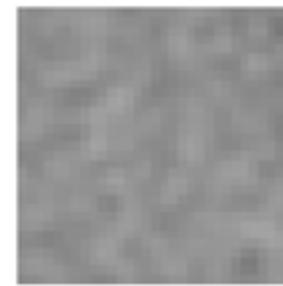
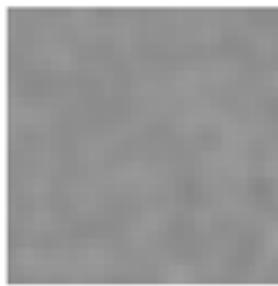
$\sigma=0.2$



no
smoothing



$\sigma=1$ pixel



$\sigma=2$ pixels



Сглаживание фильтрами большого радиуса подавляет шум, но размывает изображение

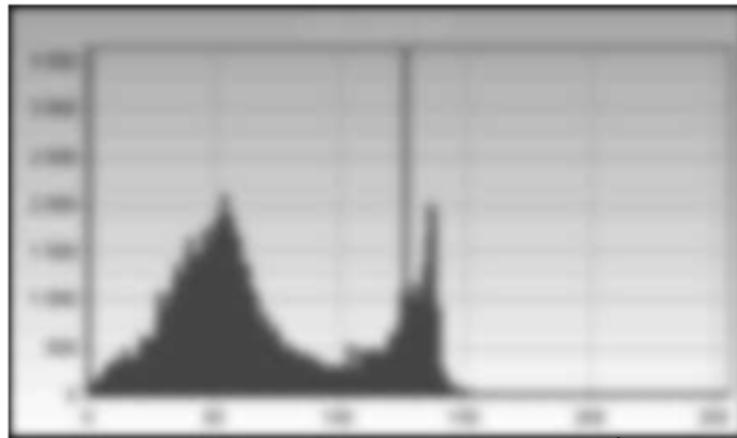


Свойства фильтра Гаусса

- Свертка с сами собой дает тоже фильтр гаусса
 - Сглаживание несколько раз фильтром с маленьким ядром дает результат, аналогичный свертке с большим ядром
 - Свертка 2 раза с фильтром радиуса σ дает тот же результат, что с фильтром радиуса $\sigma\sqrt{2}$

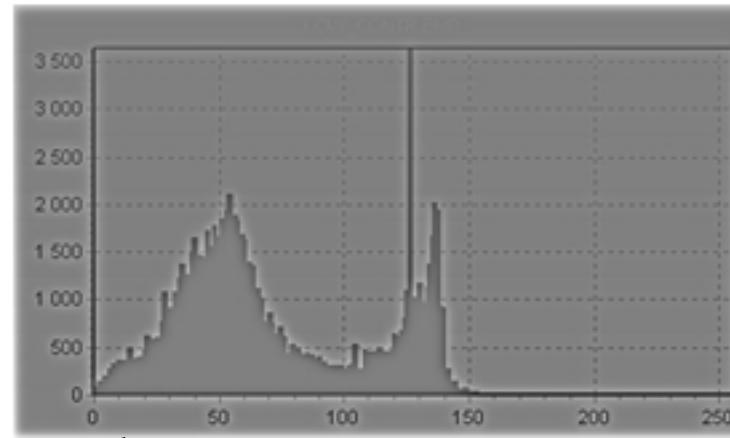


Маленькая экскурсия к Фурье

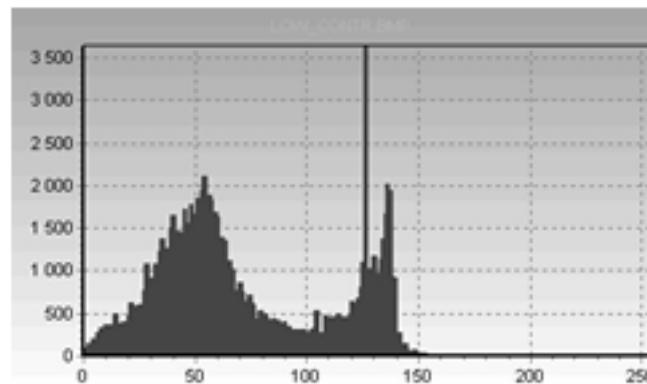


Низкие частоты

+



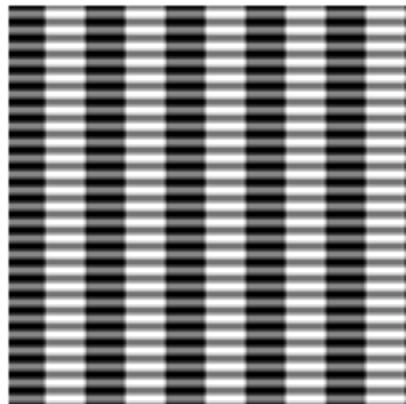
Высокие частоты



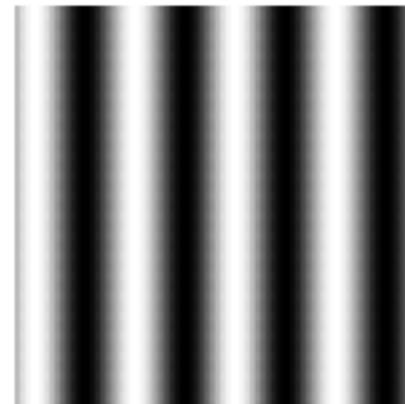


Фильтр Гаусса

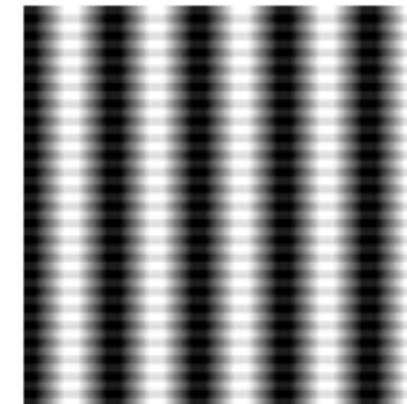
Результат свертки фильтром гаусса и усреднения



Исходное изображение



Фильтр Гаусса с
Sigma = 4



Усреднение по 49
пикселям (7x7)

Важное свойство фильтра Гаусса – он по сути является фильтром низких частот.



Подавление шума «соль и перец»

3x3



5x5



7x7

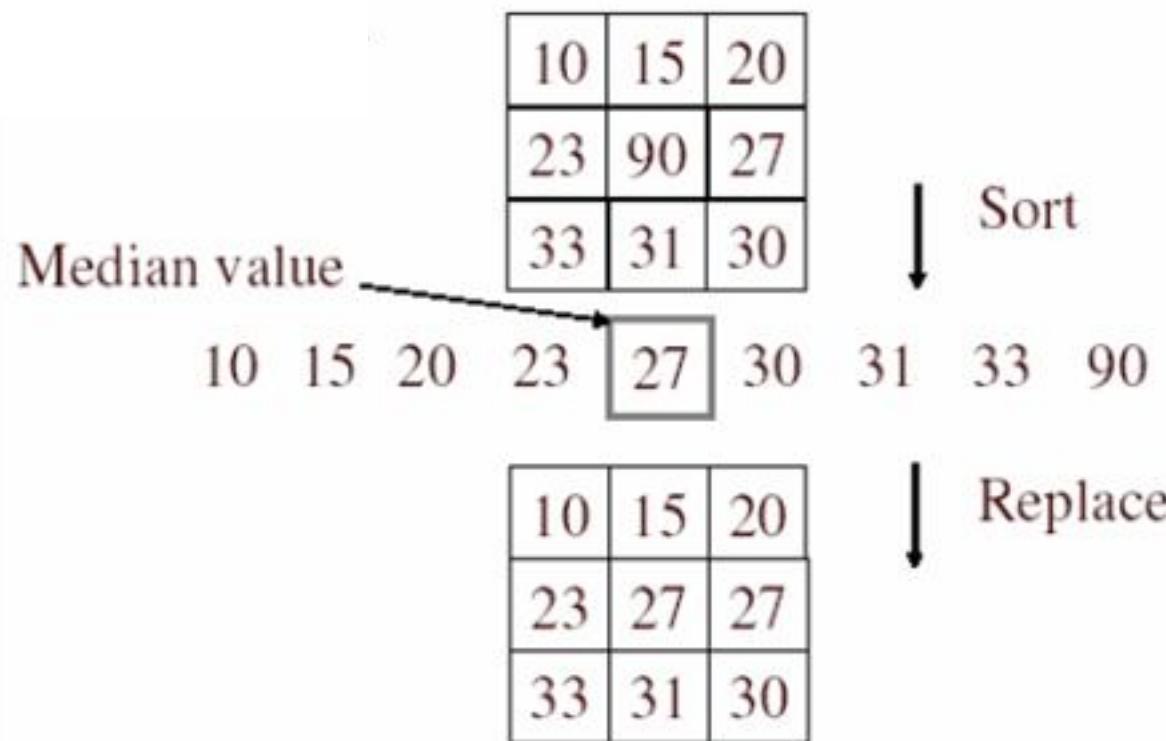


Применим фильтр Гаусса
Чем результат плох?



Медианный фильтр

- Выбор медианы из выборки пикселей по окрестности данного

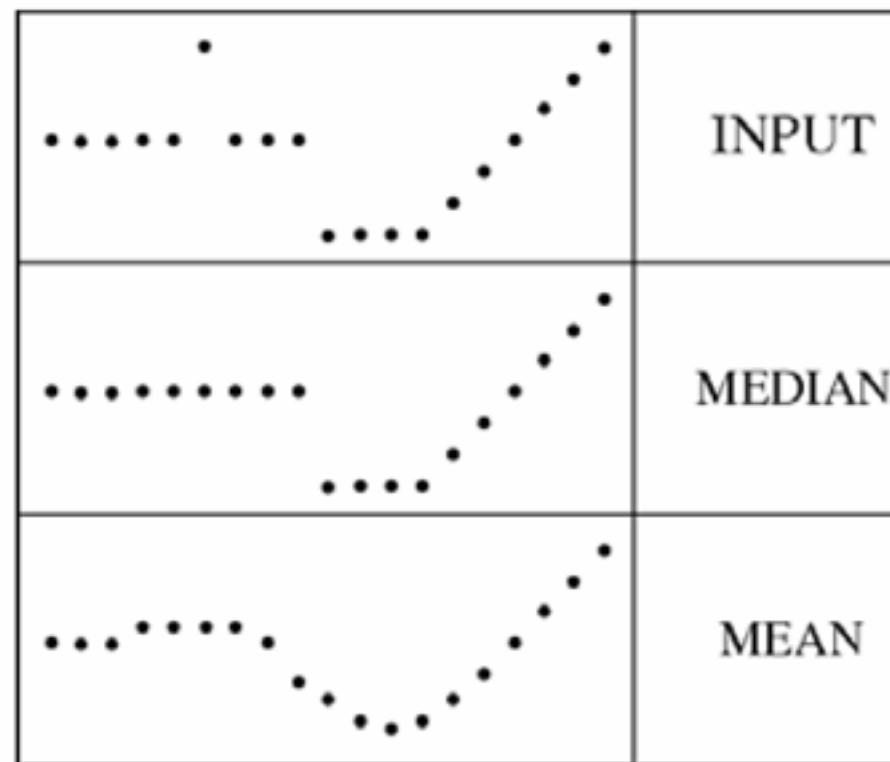


- Является ли фильтр линейным?



Медианный фильтр

- В чем главное отличие медианного фильтра перед фильтром гаусса?
 - Устойчивость к выбросам (outliers)



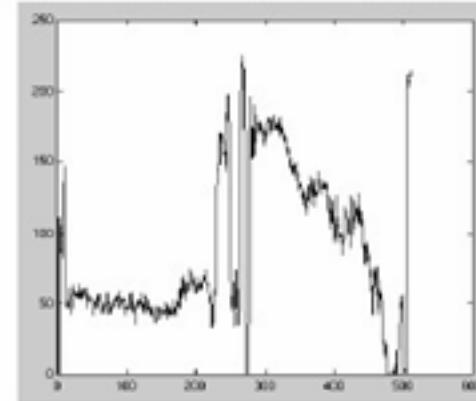
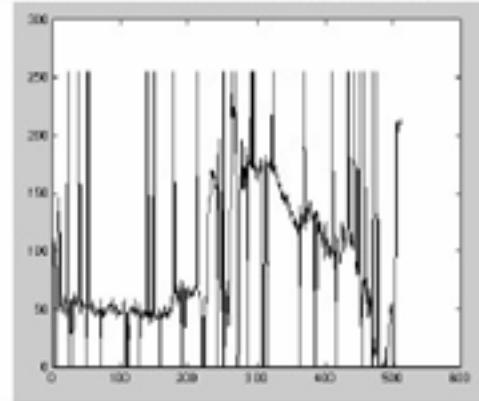
Фильтры размером в 5 пикселей

Source: K. Grauman



Медианный фильтр

Шум «соль и перец» Медианная фильтрация

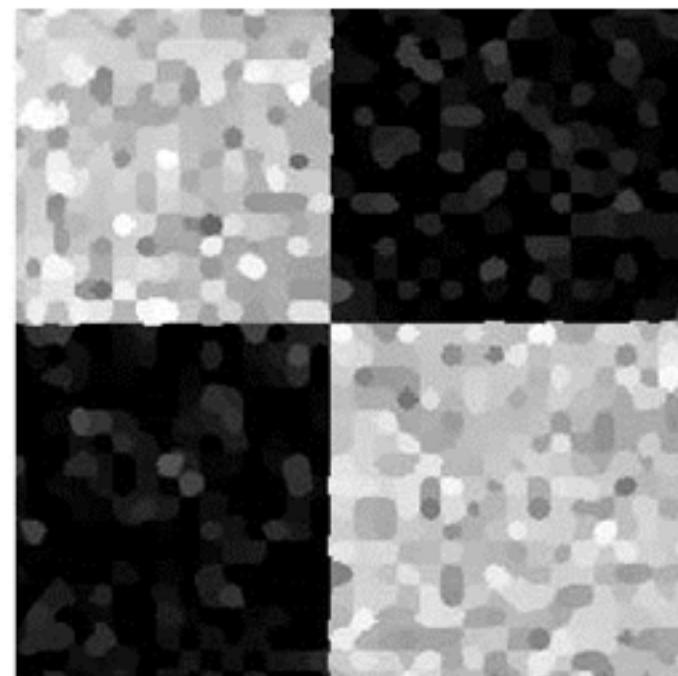
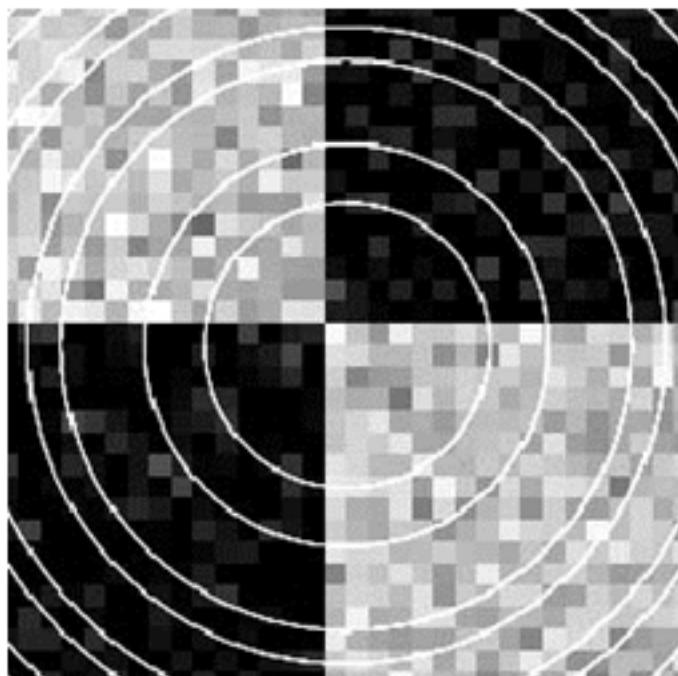


Source: M. Hebert



Медианный фильтр

Результат применения медианного фильтра с радиусом в 7 пикселей к изображению с шумом и артефактами в виде тонких светлых окружностей.





Сравнение фильтров

3x3



5x5



7x7



Гауссов

Медианный





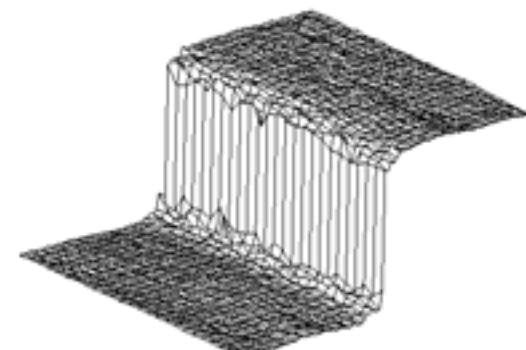
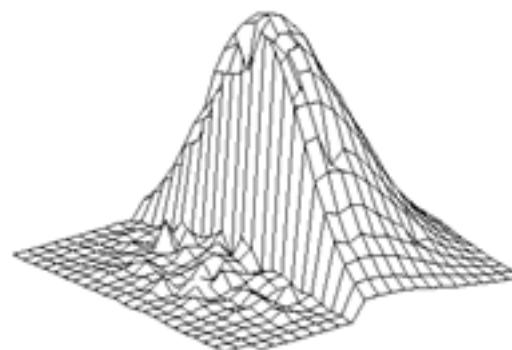
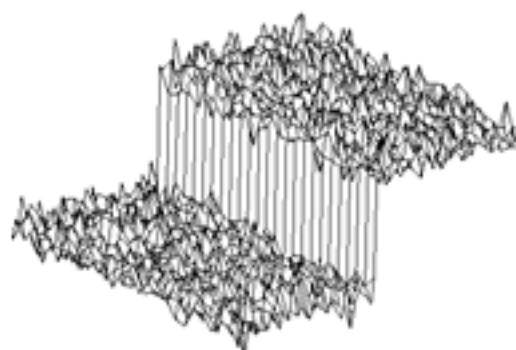
Билатеральный фильтр

- Мы рассмотрели фильтры, параметры которых одинаковы для всех пикселей
- Но мы можем сделать параметры фильтра зависящими от изображения
- Билатеральный фильтр:

$$y_{ij} = \sum x_{i-k, j-l} w(x_{i-k, j-l} - x_{i,j}) d(x_{i-k, j-l}, x_{i,j})$$

Вес, пропорциональный
близости пикселов по
цвет

Параметры
фильтра Гаусса





Современные методы

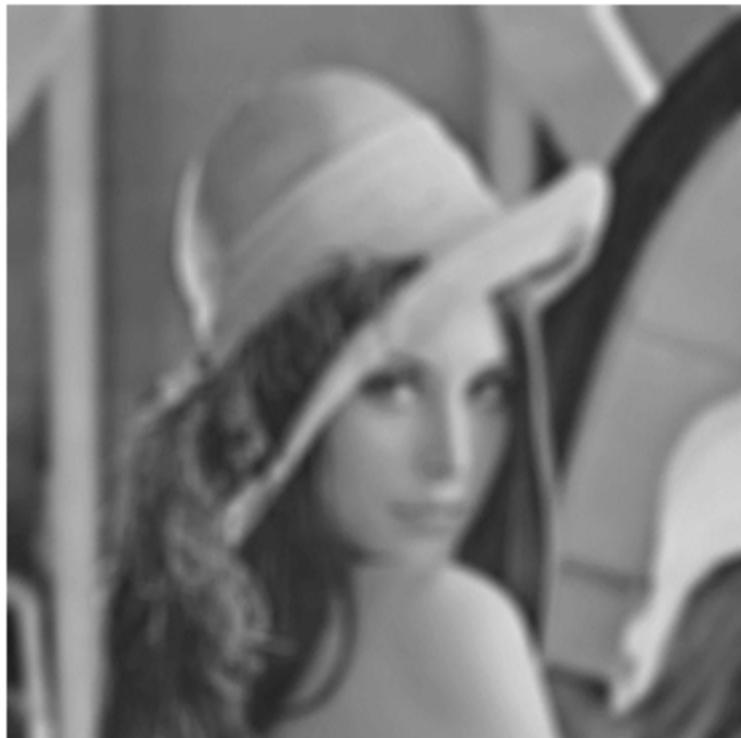
- Сейчас методы фильтрации изображений продолжают активно развиваться
- Можно выделить подходы:
 - Вейвлет и т.д. представления
 - Разреженные представления
 - Марковские случайные поля
 - Нейросетевые модели



Другие применения фильтрации



Повышение резкости



Иногда с помощью
фильтрации можно немного
повысить резкость
изображения (подчеркнуть
края)



Повышение резкости

Что теряется при сглаживании?



original

-



smoothed (5x5)

=



detail

Добавим дополнительно высокие частоты:



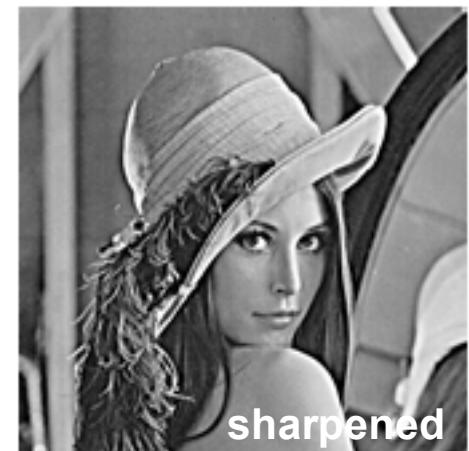
original

+ α



detail

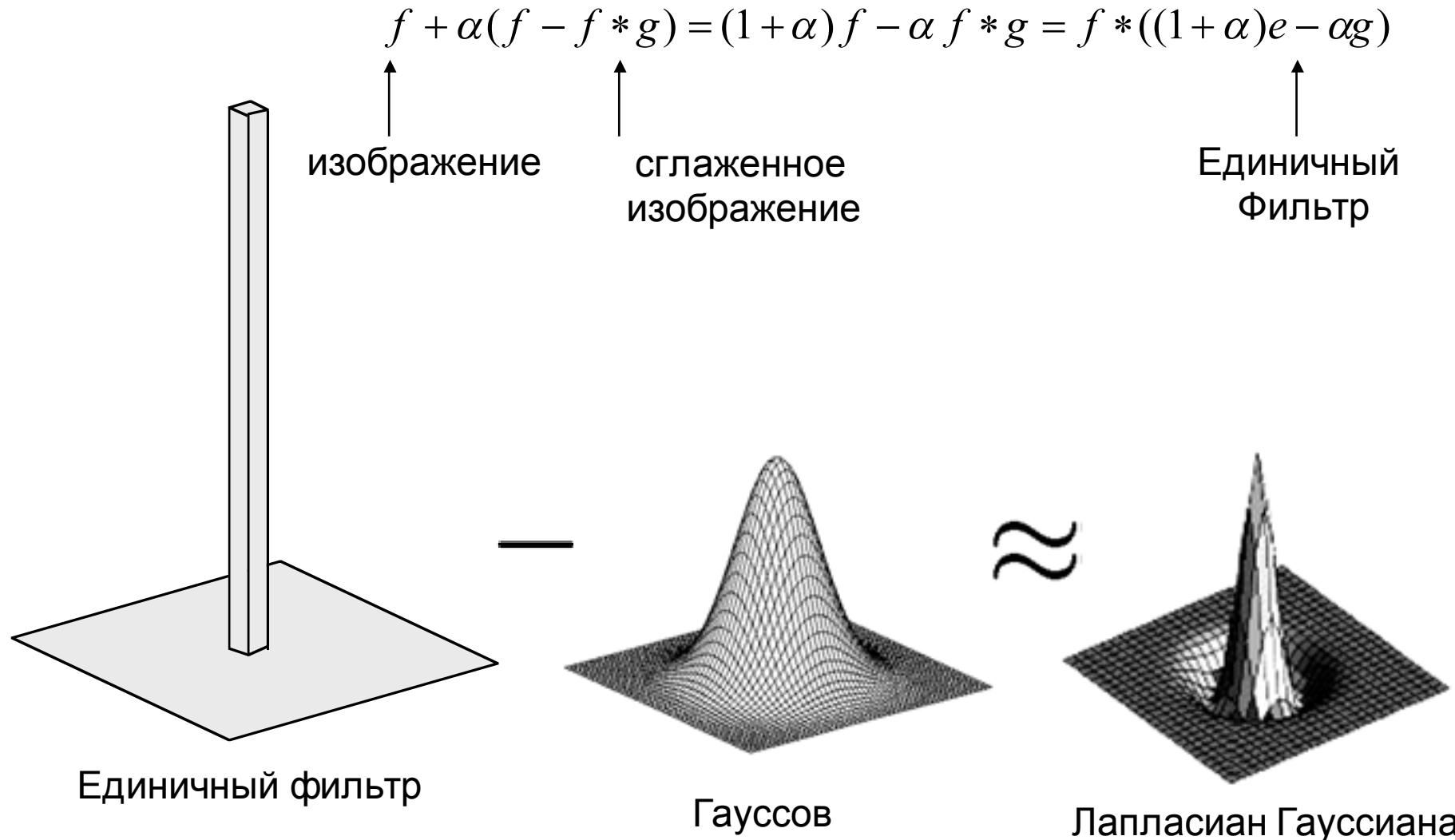
=



sharpened



Фильтр Unsharp





Пример повышения резкости

Ядро
свертки

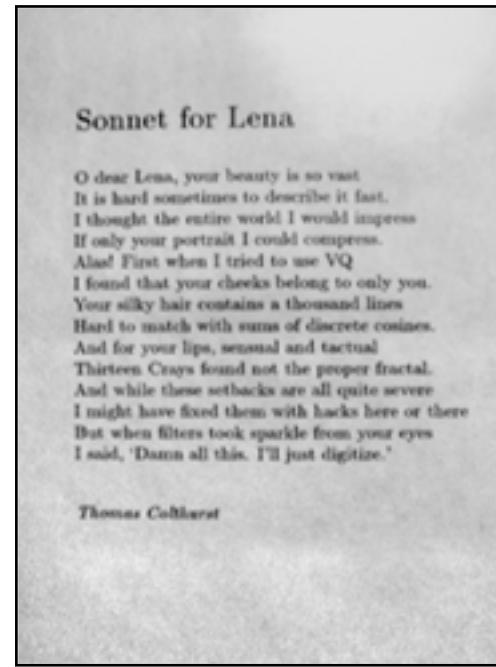
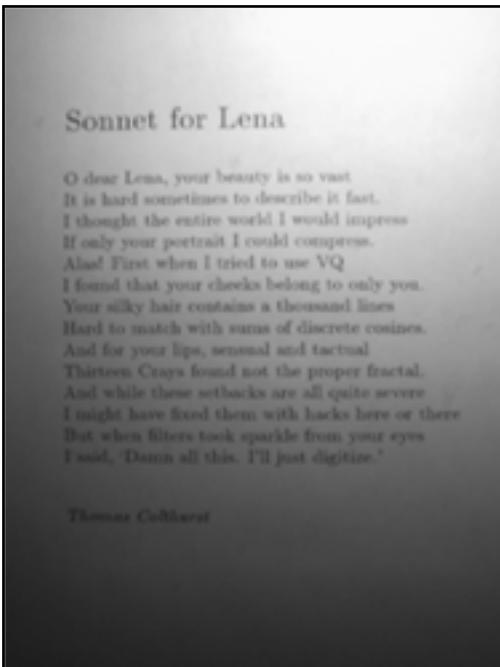
$$\frac{1}{10} \begin{vmatrix} -1 & -2 & -1 \\ -2 & 22 & -2 \\ -1 & -2 & -1 \end{vmatrix}$$



Компенсация разности освещения



Пример



Компенсация разности освещения

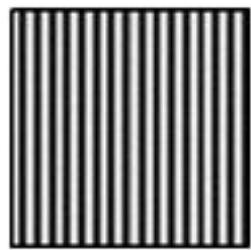


Идея:

Формирование изображения:

$$I(i, j) = l(i, j) \cdot r(i, j)$$

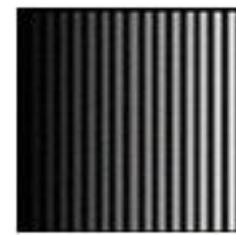
Плавные изменения яркости относятся к освещению,
резкие - к объектам.



объект $r(i, j)$



освещение $l(i, j)$



Изображение
освещенного
объекта $I(i, j)$

Алгоритм Single scale retinex (SSR)



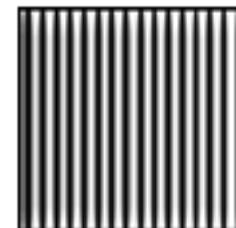
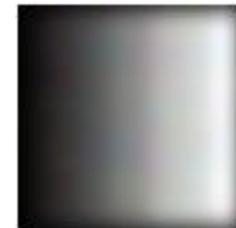
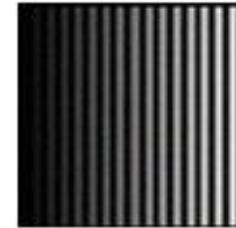
- Получить приближенное изображение освещения путем низочастотной фильтрации

$$\hat{l}(i, j) = G * I(i, j)$$

- Восстановить изображение по формуле

$$\hat{r}(i, j) = \frac{I(i, j)}{\hat{l}(i, j)}$$

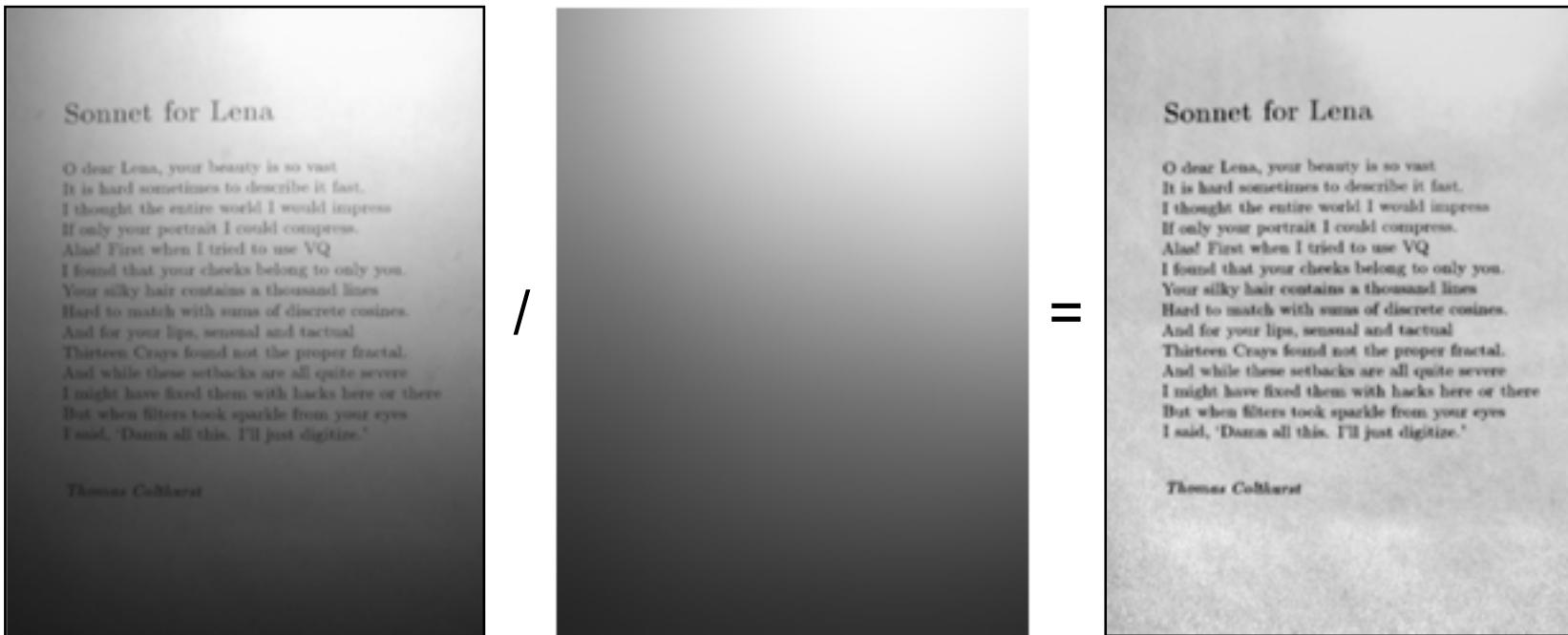
- После преобразования потребуется применить тональную коррекцию и определить значения, которые будут соответствовать черному и белому



Компенсация разности освещения



Пример



Gauss 14.7 пикселей



Выделение краёв



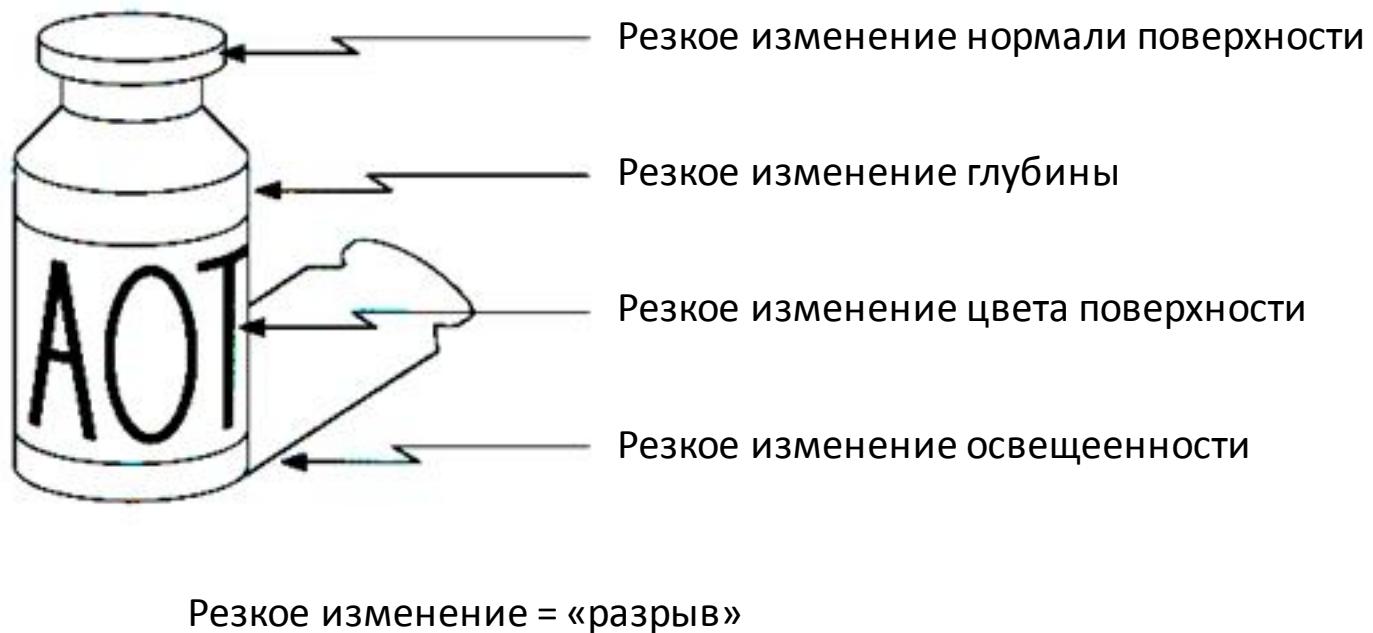
Выделение краев

- **Задача:** Выделить резкие изменения (разрывы) изображения
- Интуитивно понятно, что основная информация в картинке содержится как раз в краях (границах)
 - Компактное представление
 - Соответствует устройству мозга
- **Идеал:** рисунок художника (но артист уже пользуются своими знаниями об объектах)





Откуда берутся края

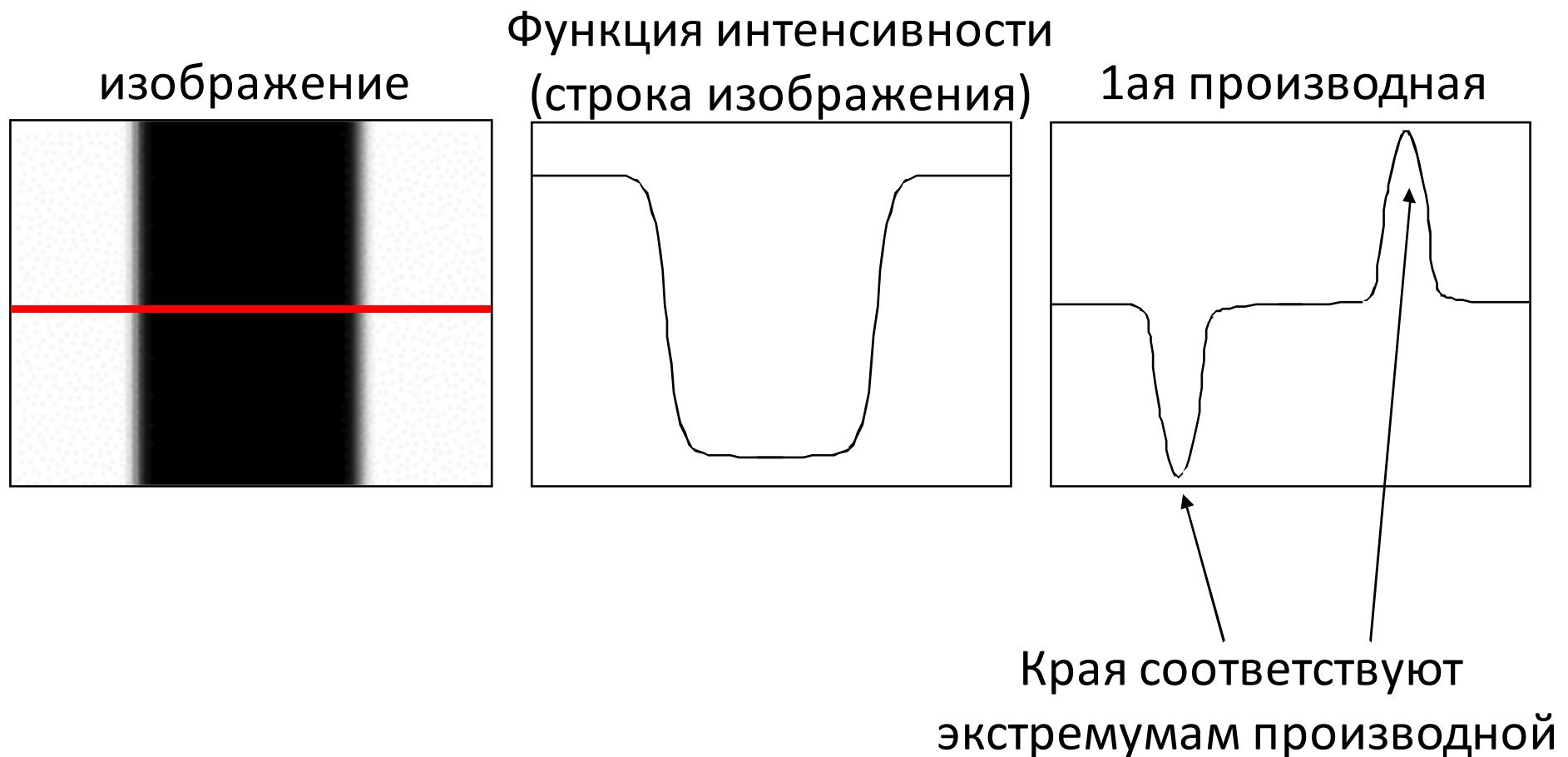


Существует множество причин формирования краев на изображении



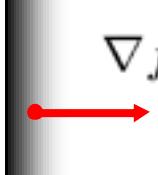
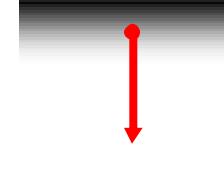
Описание «края»

- Край – это точка резкого изменения значений функции интенсивности изображения





Градиент изображения

- Градиент изображения: $\nabla f = \left[\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right]$
- $\nabla f = \left[\frac{\partial f}{\partial x}, 0 \right]$  $\nabla f = \left[0, \frac{\partial f}{\partial y} \right]$  $\nabla f = \left[\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right]$ 

Градиент направлен в сторону наибольшего изменения интенсивности

Направления градиента задается как: $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\partial f}{\partial y} / \frac{\partial f}{\partial x} \right)$

- Как направление градиента соответствует направлению края?
- Сила края* задается величиной (нормой) градиента:

$$\|\nabla f\| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}$$

Дифференцирование и свёртка



- Для функции 2х переменных, $f(x,y)$:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(\frac{f(x + \varepsilon, y) - f(x, y)}{\varepsilon} \right)$$

- Разностная производная:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{f(x_{n+1}, y) - f(x_n, y)}{\Delta x}$$

- Разностная производная - линейная и инвариантная к переносу
- Можно записать как свёртку

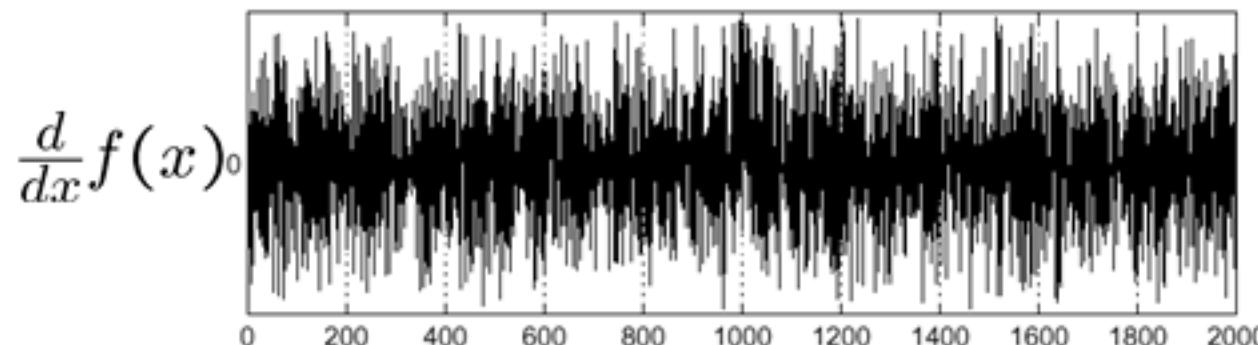
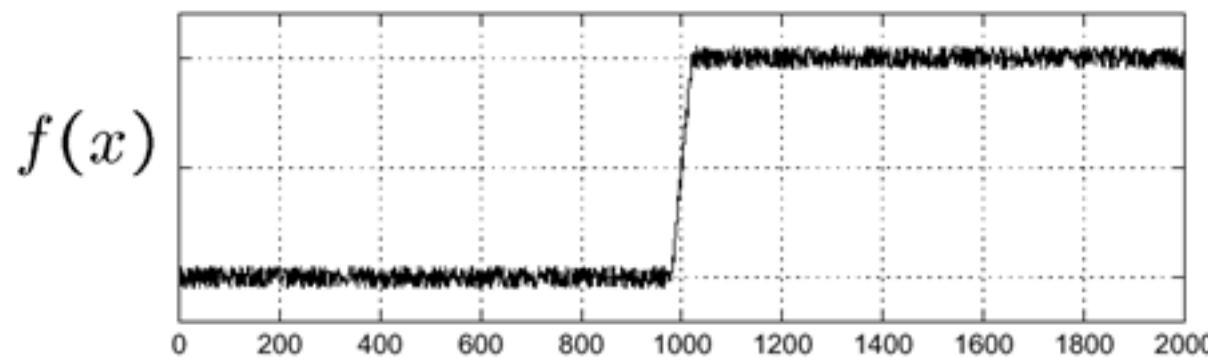
-1	1
----	---

Простейший фильтр



Влияние шума

- Рассмотрим строку или столбец изображения
 - Интенсивность от положения можно рассматривать как сигнал



Край исчез

Source: S. Seitz

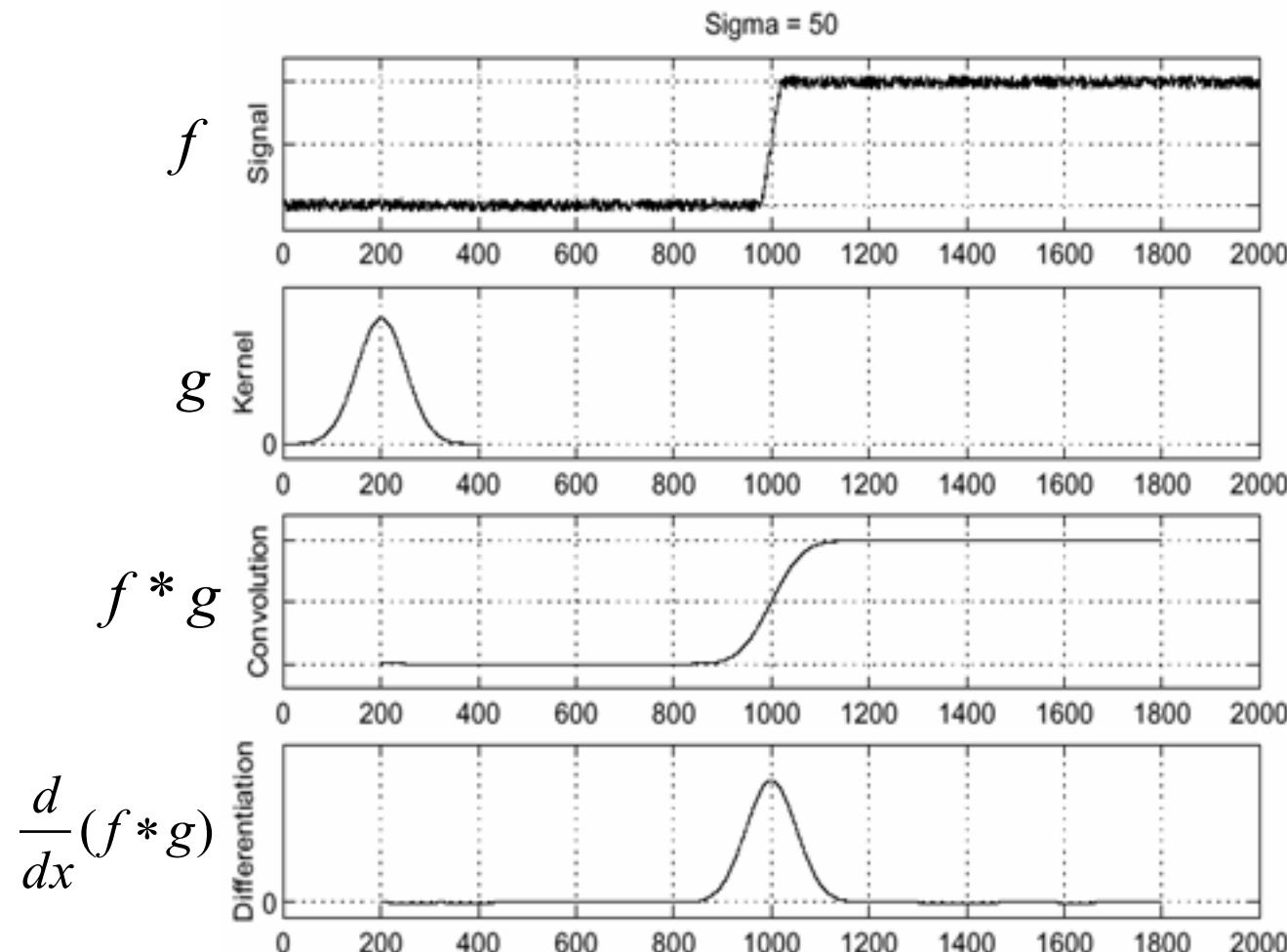


Влияние шума

- Разностные производные очень чувствительны к шуму
 - Зашумленные пиксели отличаются от соседей
 - Чем сильнее шум, тем выше отклик
- Сглаживание
 - Сглаживание делает все пиксели (зашумленные?) чуть более похожими на соседей



Предобработка (сглаживание)



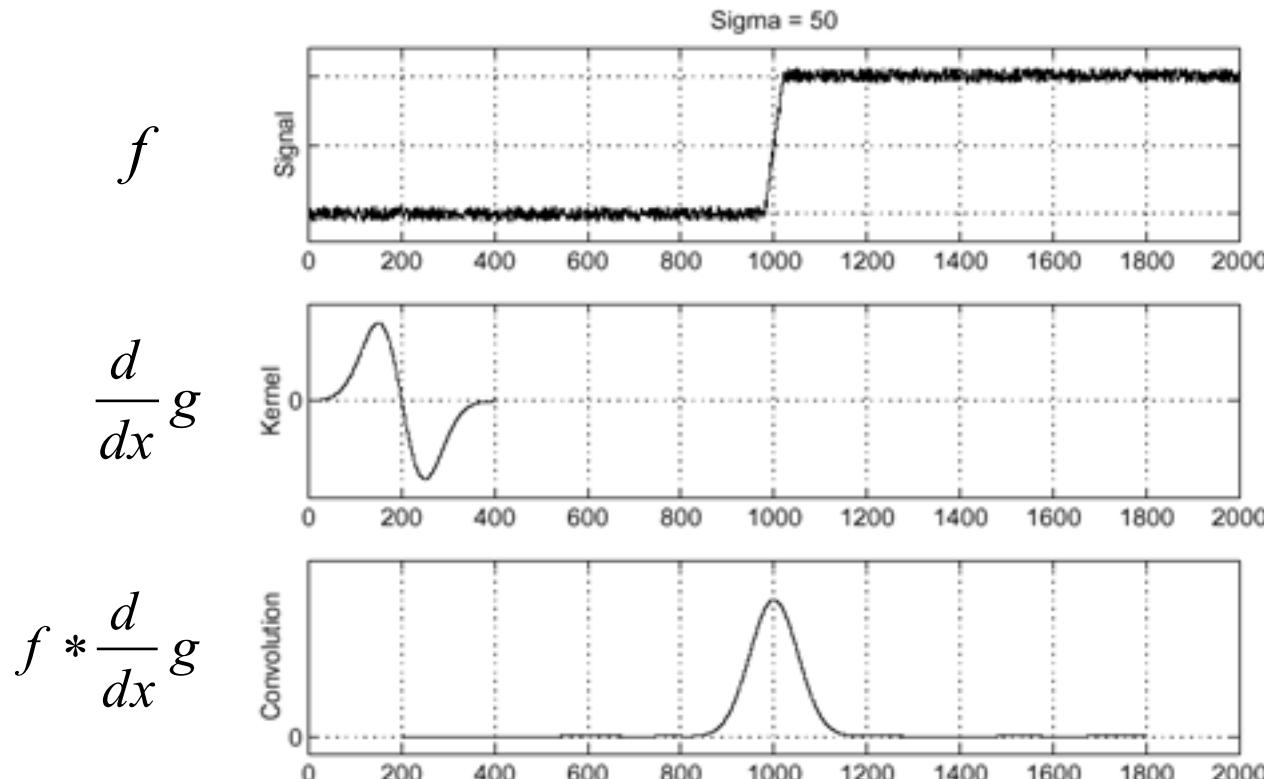
- Для поиска краев ищем пики в: $\frac{d}{dx}(f * g)$

Source: S. Seitz



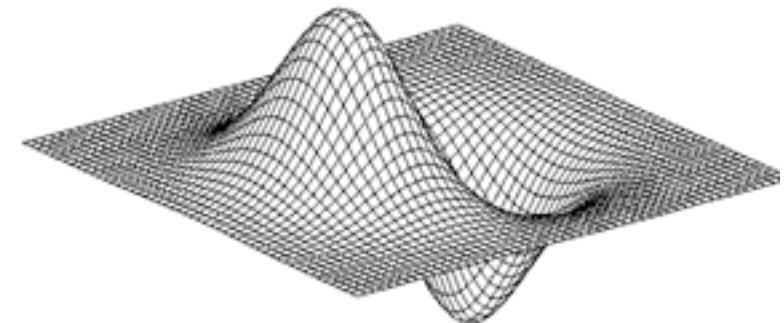
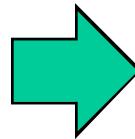
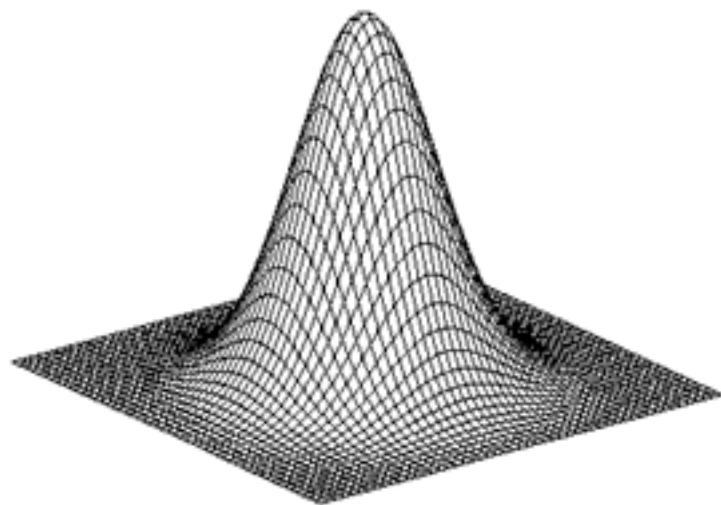
Свойства свертки

- Операции свертки и дифференцирования ассоциативны:
 - Это экономит 1 операцию:
- $$\frac{d}{dx}(f * g) = f * \frac{d}{dx}g$$

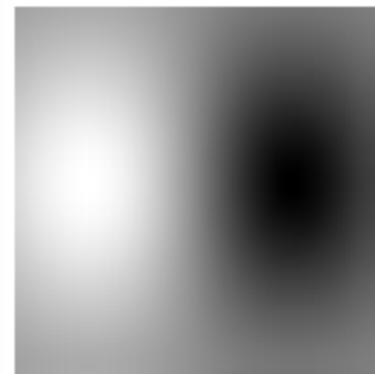
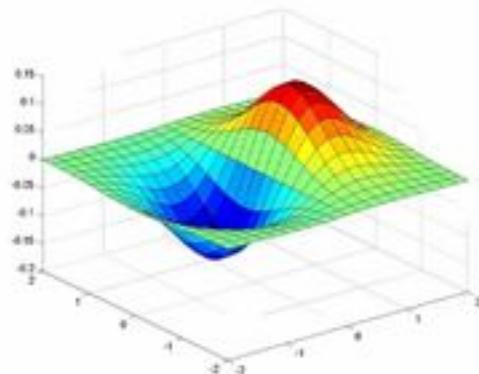


Source: S. Seitz

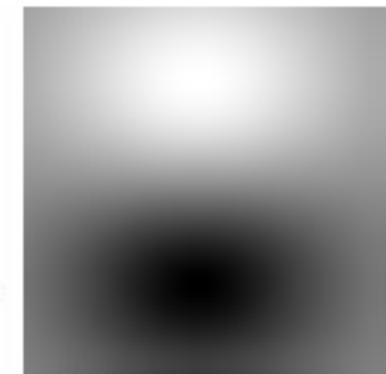
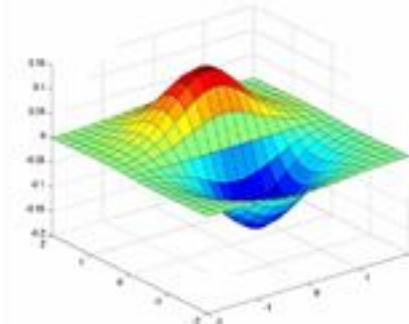
Производная фильтра Гаусса



По у



По y:





Известные фильтры

Несколько фильтров, по разному оценивающие производные по направлению и интегрирующие шумоподавление:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Робертса

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Превитт

$$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Собель 3x3

$$\begin{bmatrix} +3 & +10 & +3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} +3 & 0 & -3 \\ +10 & 0 & -10 \\ +3 & 0 & -3 \end{bmatrix}$$

Scharr фильтр

$$S_x = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & -2 & -1 \\ 4 & 8 & 0 & -8 & -4 \\ 6 & 12 & 0 & -12 & -6 \\ 4 & 8 & 0 & -8 & -4 \\ 1 & 2 & 0 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad S_y = \begin{bmatrix} -1 & -4 & -6 & -4 & -1 \\ -2 & -8 & -12 & -8 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 8 & 12 & 8 & 2 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

Собель 5x5



Карта силы краев

Примеры:



Робертса



Превитт

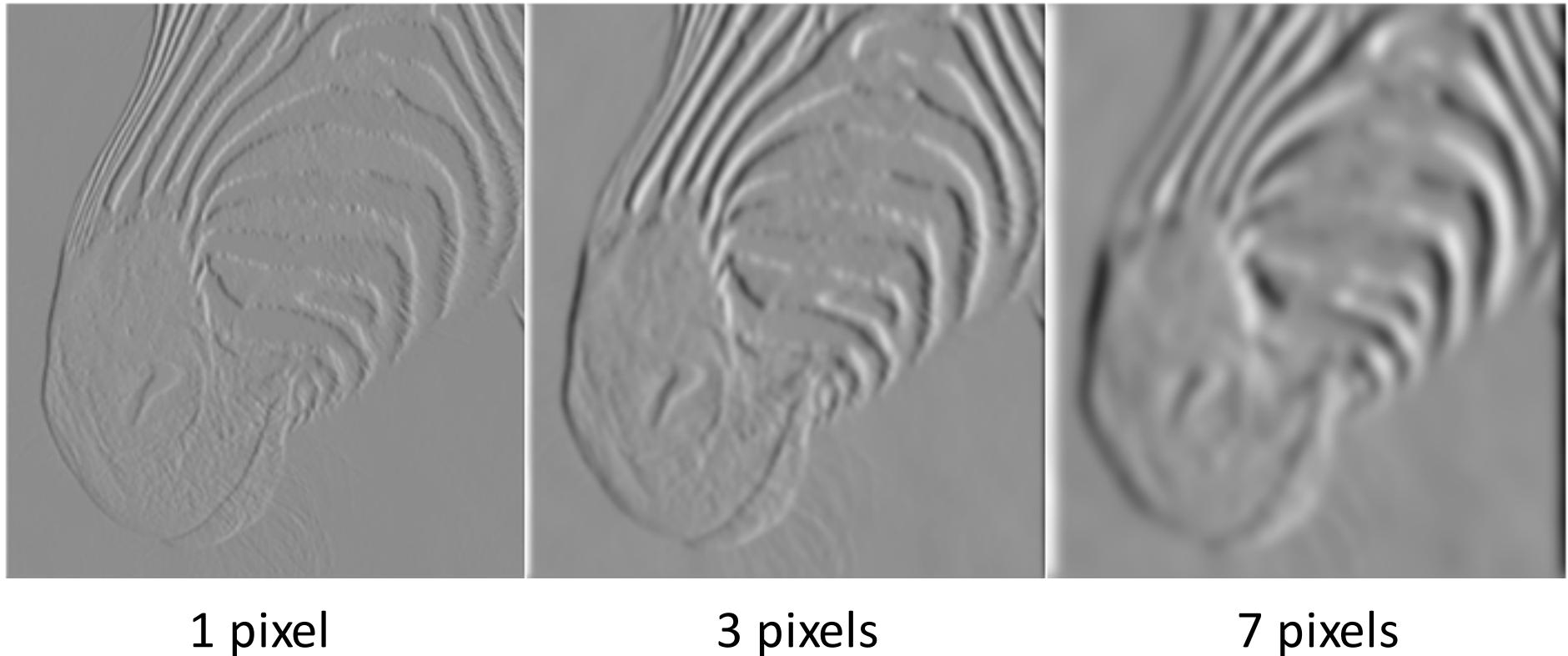


Собеля



Сглаживание и локализация

Применим сглаженные производные разного размера:



Сглаженные производные подавляют шум, но размывают края. Плюс края находится на разных «масштабах»

Source: D. Forsyth



Выделение краев

- Вычисление градиента – не идеальный метод для поиска краёв.



Исходное изображение



Карта силы краев

- Чего не хватает?
 - Точности – края «толстые» и размытые
 - Информации о связности



Детектор Canny

1. Свертка изображения с ядром – производной от фильтра гаусса
2. Поиск силы и направления градиента
3. Выделение локальных максимумов (Non-maximum suppression)
 - Уточнение полос в несколько пикселей до одного пикселя
4. Двойной порог (гистерезис)
 - Выше верхнего порога – «сильные края»
 - Ниже нижнего порога – шум (отсекаем)
 - Посередине – потенциальные края
5. Связывание краев



Пример



- Исходное изображение (Lena)



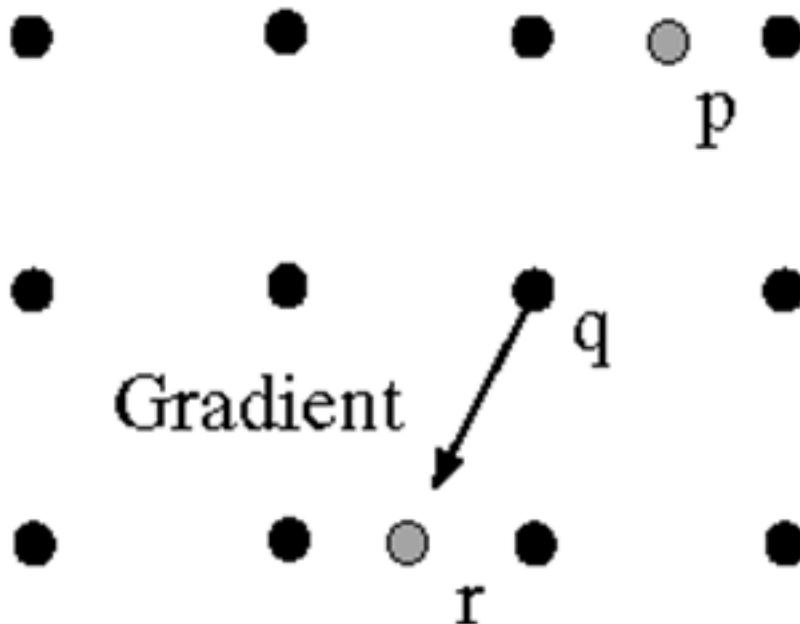
Пример



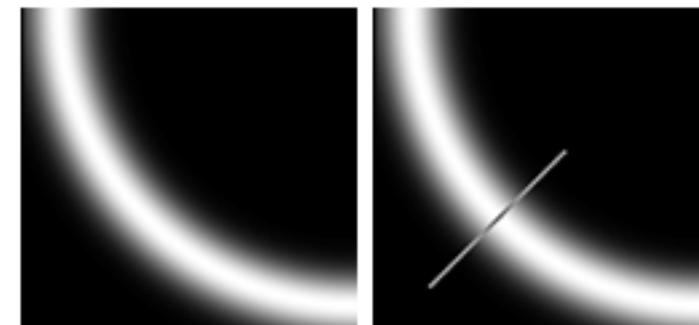
Норма градиента



Поиск локальных максимумов



- Максимум достигается в q , если значение больше r и g . Значения в r и g интерполируем.
- Можем аппроксимировать сравнением ближайших к направлению градиента пикселей





Пример

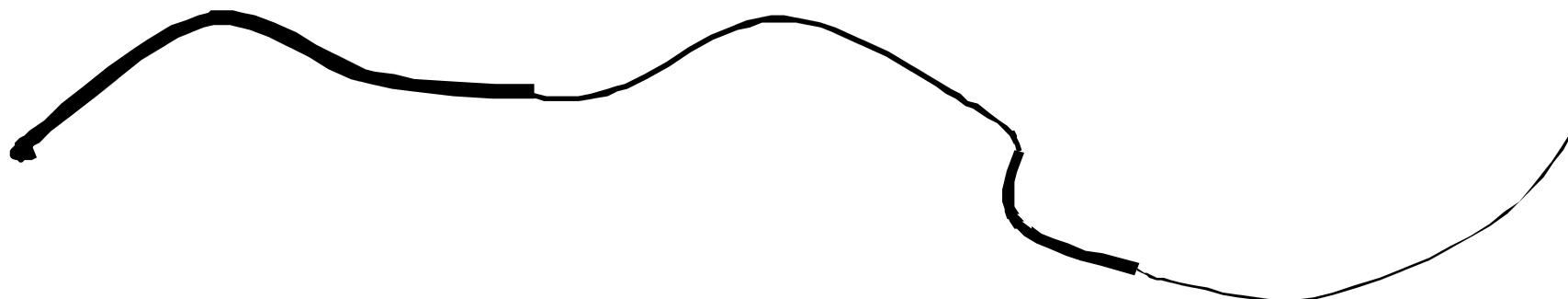


Утоньшение
(non-maximum suppression)



Гистерезис

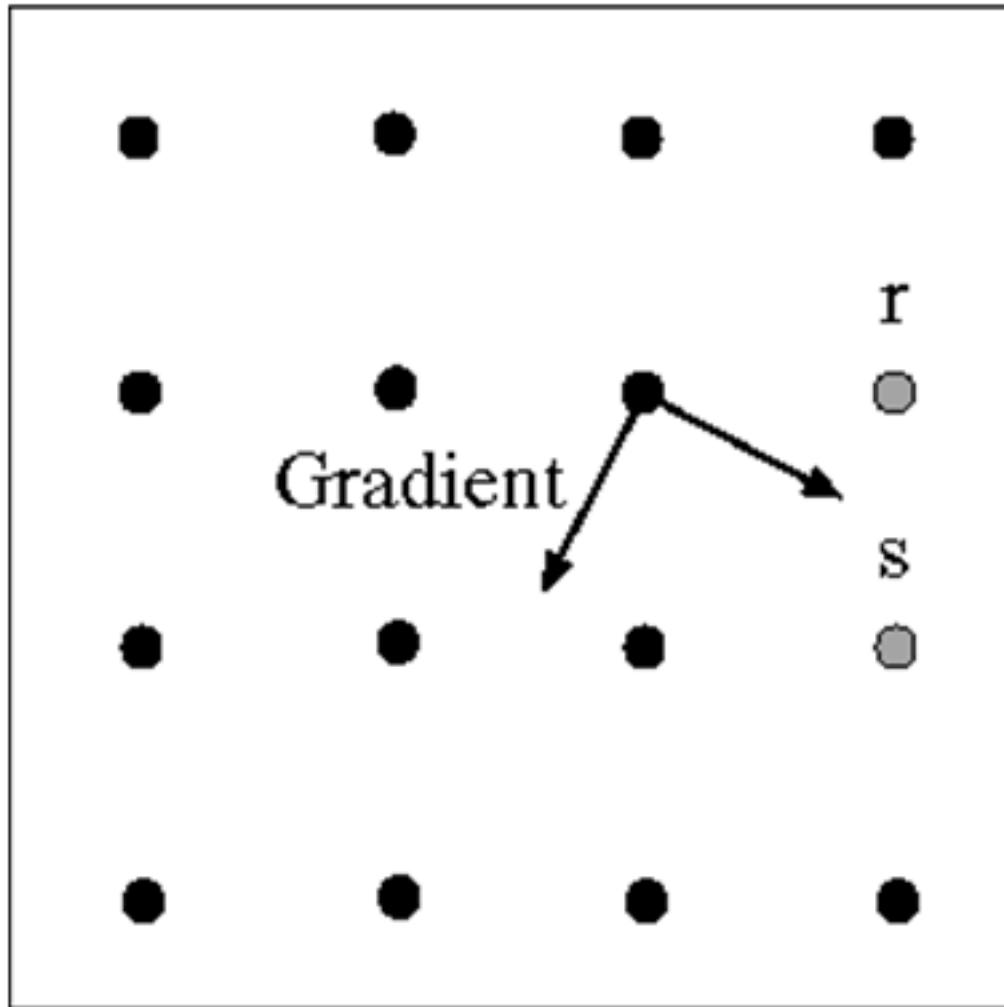
- Идея гистерезиса:
 - Два порога (низкий и высокий)
 - Точки с градиентом ниже низкого порога – гарантировано шум
 - Точки с градиентом выше высокого порога – гарантировано края («сильные края»)
 - Точки с промежуточным градиентом считаются краями в том случае, если являются соседями сильных краёв
- Схема метода
 - Прослеживаем точки от сильных краёв



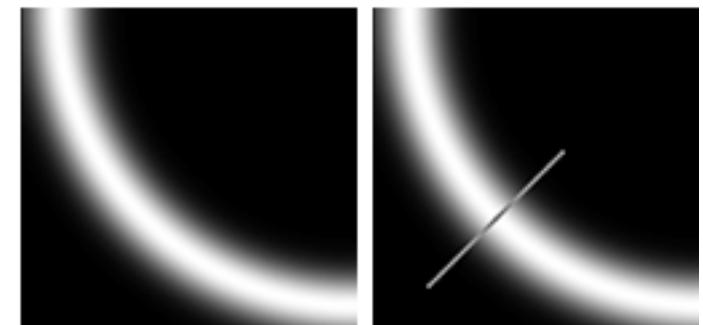
Source: S. Seitz



Связывание точек



Пусть отмеченная точка – край. Строим касательную к границе (нормаль к направлению градиента) и используем ее для предсказания новой точки (это либо s либо r).





Эффект гистерезиса



Исходное изображение



Высокий порог
(сильные края)



Низкий порог
(слабые + сильные края)



Порог по гистерезису

Source: L. Fei-Fei

Влияние σ (Размер ядра размытия)



original



Canny with $\sigma = 1$



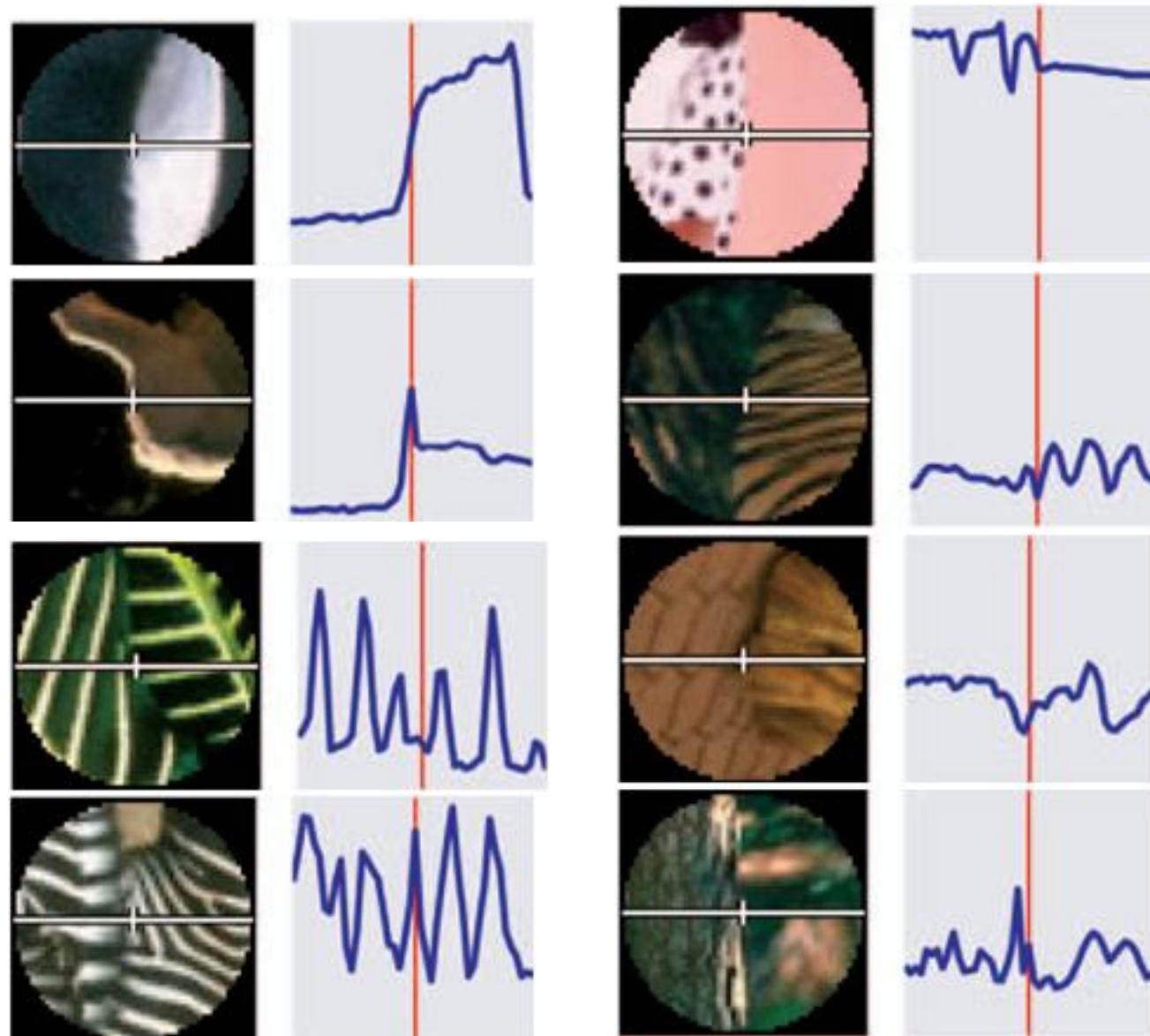
Canny with $\sigma = 2$

Выбор σ зависит от задачи

- большое σ - поиск крупных границ
- маленькое σ - выделение мелких деталей



Ограничения детектора Canny



Source: Martin et al. 2003

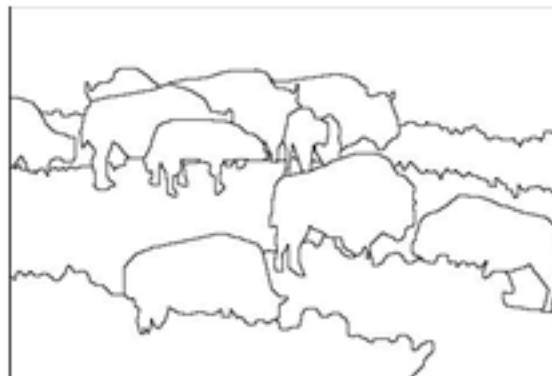
Поиск краев – это только начало...



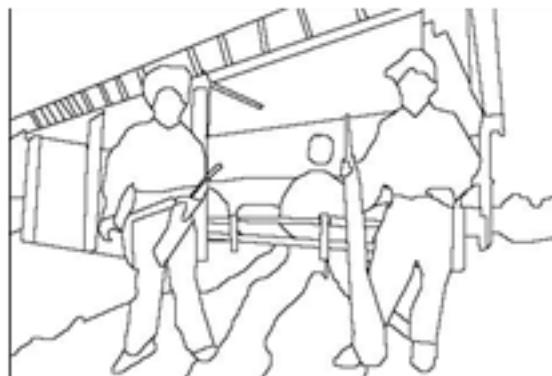
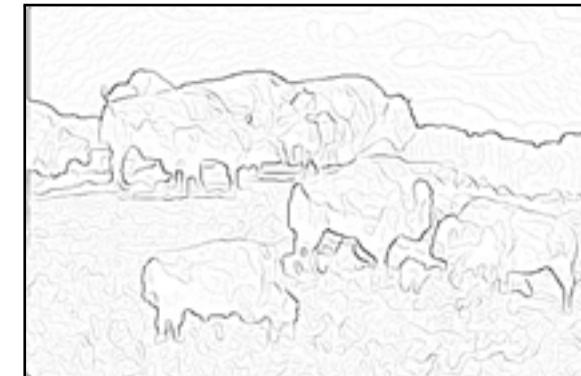
изображение



разметка вручную



норма градиента



- Berkeley segmentation database:

<http://www.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/grouping/segbench/>



Спецэффекты

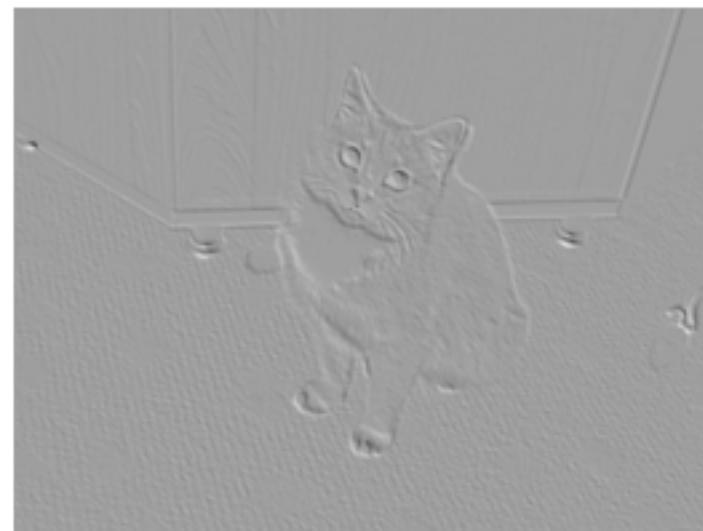
- Рассмотрим
 - Тиснение
 - Негатив
 - «Светящиеся» края
 - Геометрические эффекты
 - Перенос/поворот
 - Искажение
 - «Эффект стекла»



Тиснение

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}$$

Фильтр + сдвиг яркости, нормировка...





Цифровой негатив



$$R' = 255 - R; \quad G' = 255 - G; \quad B' = 255 - B;$$



Светящиеся края



Медианный фильтр + выделение краев + фильтр «максимума»



«Волны»



Волны 1:

$$x(k; l) = k + 20\sin(2\pi l / 128); y(k; l) = l;$$

Волны 2:

$$x(k; l) = k + 20\sin(2\pi k / 30); y(k; l) = l;$$



«Эффект стекла»


$$x(k; l) = k + (\text{rand}(1, 1) - 0.5) * 10;$$
$$y(k; l) = l + (\text{rand}(1, 1) - 0.5) * 10;$$



Резюме лекции

- Цветокоррекция изображения требует оценки до 24 параметров нелинейной модели
 - Калибровочный цветовой шаблон
 - Угадывание (оценка) параметров
- Линейная фильтрация (свёртка) изображения позволяет решать целый ряд задач – шумоподавление, повышение резкости, оценка градиента
- Выделение краёв изображения в простом случае можно достичь поиском локальных максимумов градиента яркости
- Всё это открытые задачи и сейчас активно продолжают исследоваться!