

Школа Анализа
Данных Яндекса

Курс «Анализ изображений и видео, ч.2.»

Лекция №2
«Цифровой фотомонтаж»

Антон Конушин

Заведующий лабораторией компьютерной графики и мультимедиа
ВМК МГУ

17 февраля 2017 года

Задача фотомонтажа



Манипулирование отдельными объектами сцены или всем изображением в целом с высоким визуальным качеством

- Перенос объекта с одного изображения на другое
- Редактирование конкретного объекта
- Удаление объекта (с восстановлением фона)
- Композиция одного изображения из нескольких
- Изменение пропорций (умный crop) изображения



Формирование изображения



- Введём модель изображения как попиксельную линейную композицию изображения объекта «переднего плана» (foreground) и фона (background)

$$I = \alpha * F + (1 - \alpha) * B$$

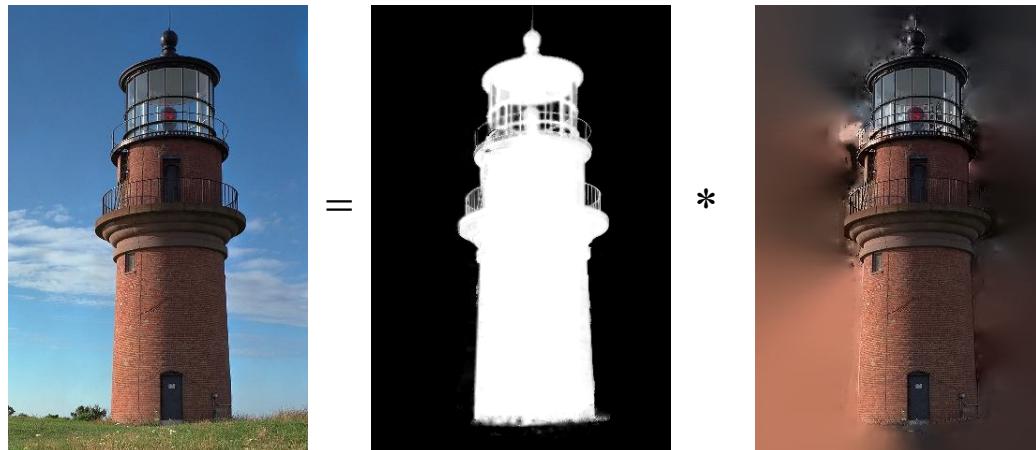


- Карта прозрачности (opacity map) α из $[0,1]$, где 0 - фон, 1 – непрозрачный объект
 - Она же альфа-канал



Выделение объекта

- Задача *матирования* (matting) объекта
 - Выделить интересующий пользователя объект на изображении
- **Формально:**
 - Для каждого пикселя изображения определить значения прозрачности α из $[0,1]$, где 0 - фон, 1 – непрозрачный объект
 - Для всех пикселей с $\alpha > 0$ определить f – цвет пикселя объекта



- При смешивании полученного фона с изображением объекта по альфа-каналу должно получиться исходное изображение
 - Для этого нам нужно определить ещё для всех пикселей b – цвет фона

Композиция изображений



- Выделенный объект можем встроить в другое изображение
- Если провели мягкую сегментацию, то при встраивании смешиваем (blending) изображения объекта и фона:

$$I_{comp} = \alpha I_{fg} + (1-\alpha) I_{bg}$$



Подход к решению

- С очевидностью, задача недоопределенная
 - Сцена состоит из множества объектов, какой из них нужен пользователю, неизвестно
 - Для каждого пикселя объекта необходимо оценить 7 параметров (альфа, RGB для объекта и фона)
- Обязательно нужна какая-то дополнительная информация для того, чтобы задача была решаемой



Chroma keying

- Идея – воспользоваться однородным фоном определенного цвета B

$$I = \alpha * F + (1 - \alpha) * B$$

- Однако у нас остаётся всё равно 4 неизвестных для 3x уравнений
- Несколько вариантов решения:
 - Фон однотонный (Blue), объект не содержит компоненты фона (цвета из RG)
 - Объект с известным соотношением каналов
 - Серый (хорошо для фильмов «Звёздные войны»)
 - Кожа человека (r , $0.5r$, $0.5r$)
 - Два кадра с разными фонами

Пример chroma keying

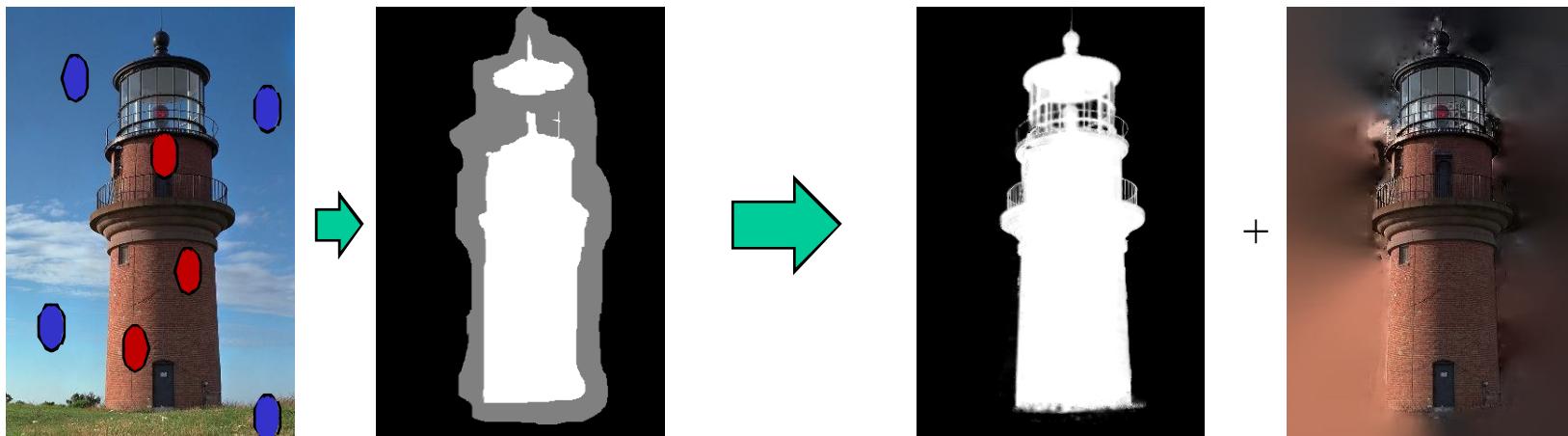


2 Fast 2 Furious
(2003)



Подход к решению

- Для изображений, полученных в обычных условиях, задачу можно разложить в несколько более простых задач
 - Интерактивная «жесткая» сегментация объекта
 - Пользовательский ввод
 - α из $\{0, 1\}$
 - Мягкая сегментация объекта (собственно *маттирование*)
 - Результат жесткой сегментации используется как начальное приближение через трикарту (trimap)



Интерактивная сегментация



- Методы
 - Magic wand & Intelligent scissors
 - Interactive graph cuts
 - GrabCut
 - «Background removal tool» из MS Office 2010
- Одна из основных проблем - отсутствие единой метрики качества
 - Субъективное сравнение результатов
 - Разный пользовательский ввод (объём?)

MagicWand & Intelligent Scissors



- MagicWand – цветовая сегментация по меткам пользователя
- Intelligent Scissors – проведение пути по области с высоким градиентом на основе динамического программирования через отмечаемые пользователем точки на границе

Magic Wand

Ввод
пользователя



Intelligent Scissors



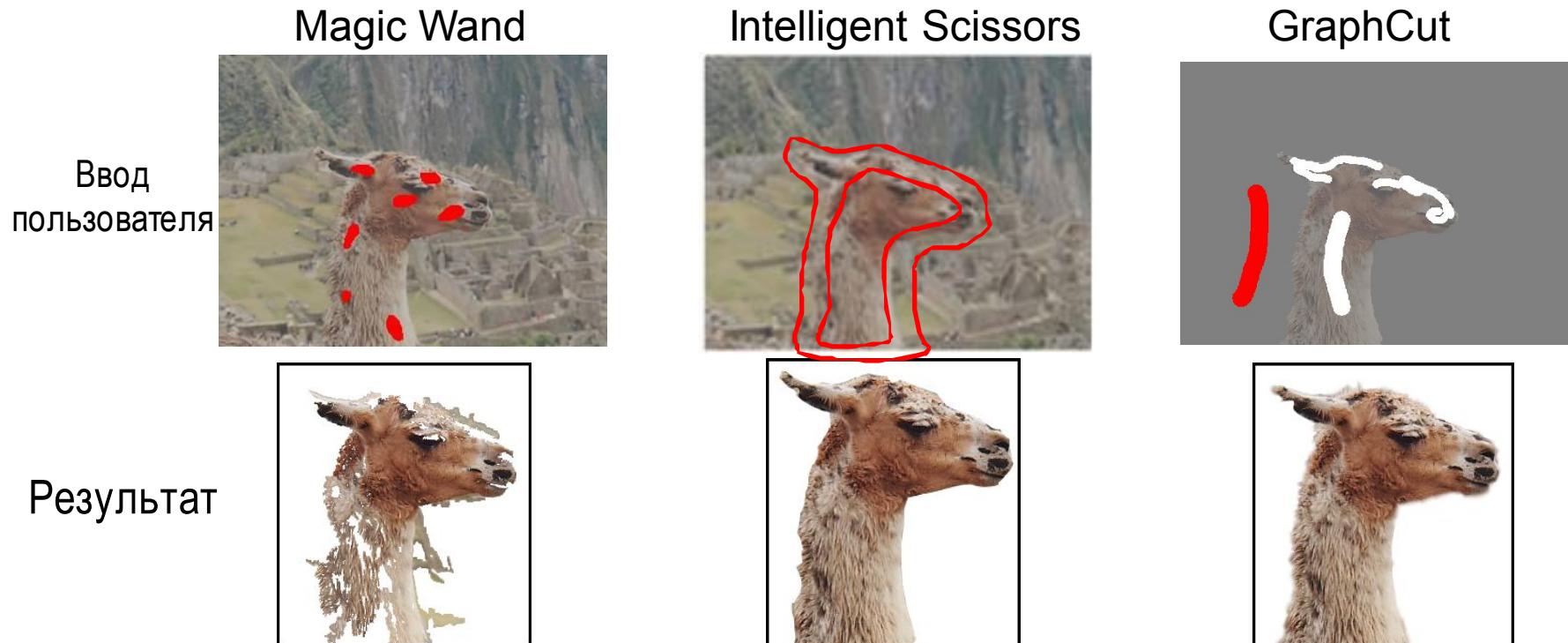
Результат



Алгоритм Interactive GraphCuts



- Идея: учитывать информацию о свойствах областей (как в MagicWand) с информацией о границах/градиентах (как в Intelligent Scissors) с помощью CRF
- Интерфейс: жесткие ограничения в виде мазков (strokes) для объекта (O) и фона (B)



Yuri Boykov and Marie-Pierre Jolly. [Interactive Graph Cuts for Optimal Boundary & Region Segmentation of Objects in N-D images](#). ICCV 2001.

Условное случайное поле



$$Energy_{MRF} = E(F) = \sum_p (\phi(I | F_p)) + \sum_{\{p,q\} \in N} (\phi(I | F_p, F_q) * \psi(F_p, F_q))) + const$$

Унарное правдоподобие
(Unary likelihood) Член контраста
(Contrast Term) Модель априорной
вероятности Поттса
(Potts Model Prior)

$$MAP \ solution \quad F^* = \arg \min_F E(F)$$



Данные (I)



Унарные члены



Парные члены



Решение

Boykov et al. [ICCV 2001], Blake et al. [ECCV 2004]

GrabCut



Идеи:

- Заменить интерфейс с мазков на выделение объекта рамкой
- Собирать информацию о цвете со всего изображения, а не только из мазков пользователей
- Итеративно обновлять цветовую модель

C. Rother, V. Kolmogorov, and A. Blake. Grabcut - interactive foreground extraction using iterated graph cuts. *Proc. ACM Siggraph*, 2004.

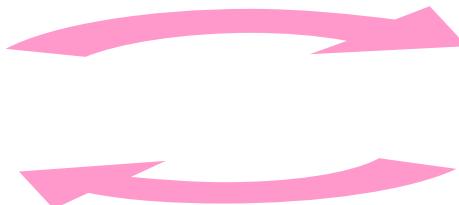
Итеративные разрезы графов



Инициализация пользователя



К-средних для
обучения статистик
цветов



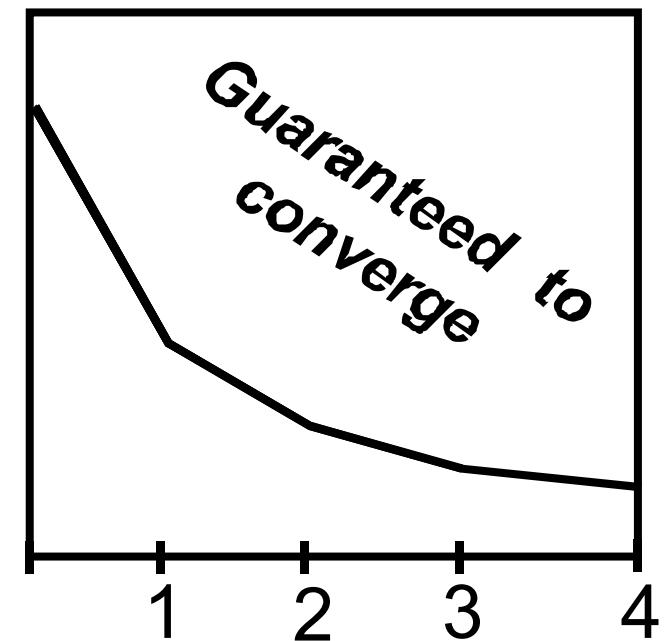
Graph cuts для
сегментации

- Цвет фона и объекта моделируется смесью гауссиан (обычно 5-8 компонент)
- Каждый пиксель объекта/фона сопоставляется компоненте смеси
- Затем уточняются параметры смеси

Итеративные разрезы графов

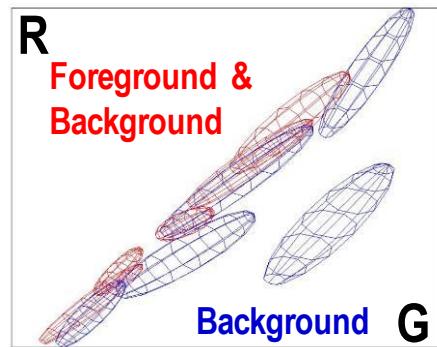


Результат

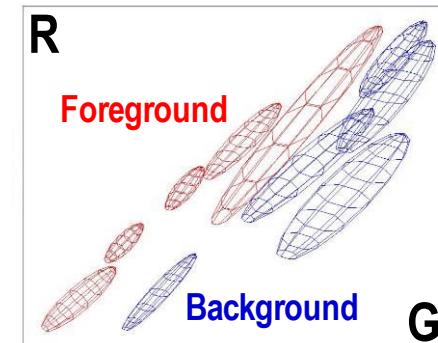


Энергия после итераций

Цветовая модель



Итеративное
уточнение



Цвет фона и объекта моделируется смесью гауссиан
(обычно 5-8 компонент)

Несколько примеров



Вычисляются автоматически по прямоугольной рамке

Сложные примеры



Камуфляж и
низкий контраст

Исходный
прямоугол
ьник



Тонкие структуры



Нет телепатии



Исходный
результат



Сравнение

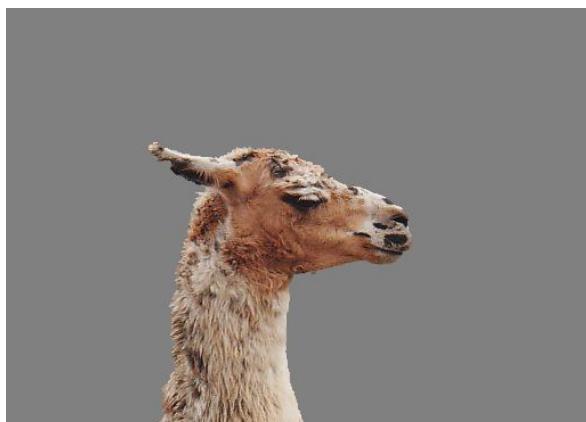


Boykov and Jolly (2001)



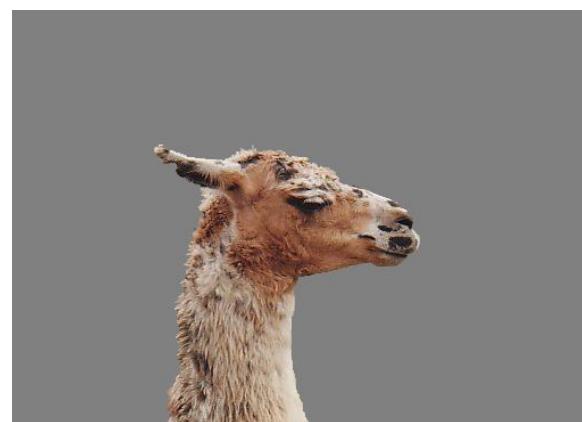
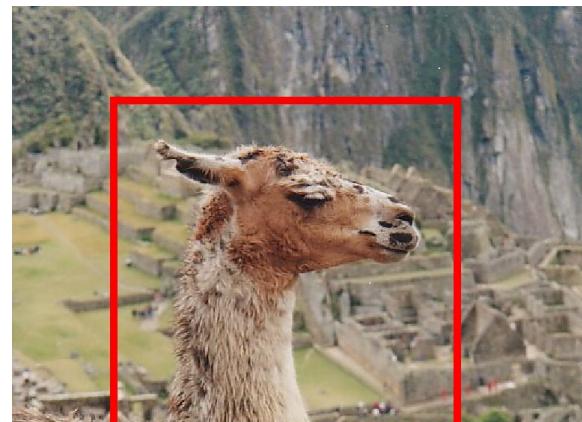
Пользовательский ввод

Результат



Error Rate: 0.72%

GrabCut



Error Rate: 0.72%

Slide by C. Rother

Интерактивный эксперимент



Воспользуемся инструментом “Background removal” из Microsoft Office 2010

Матирование границ (GrabCut)



Жесткая
сегментация

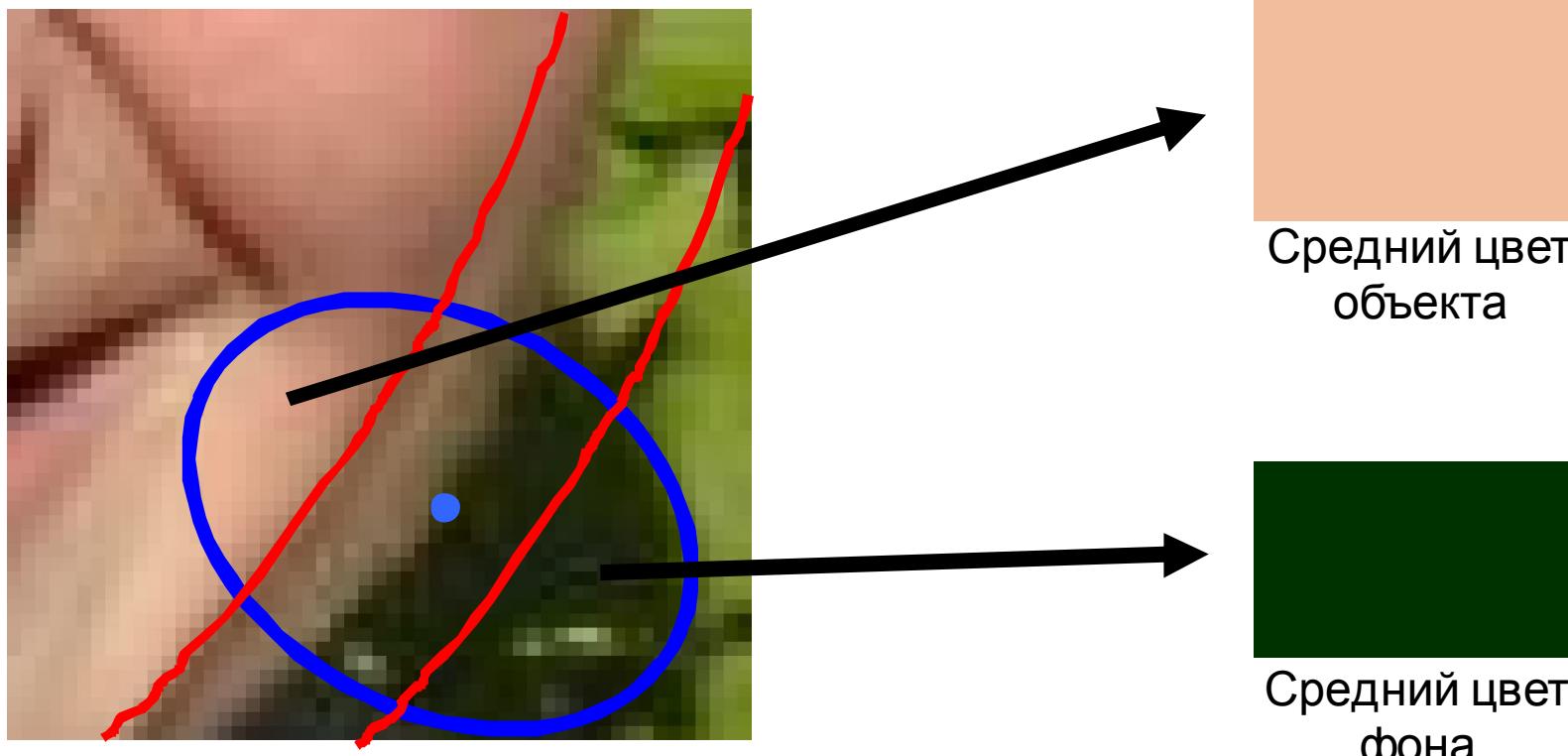


Автоматическая
три-карта



Матирование

Матирование вдоль границы

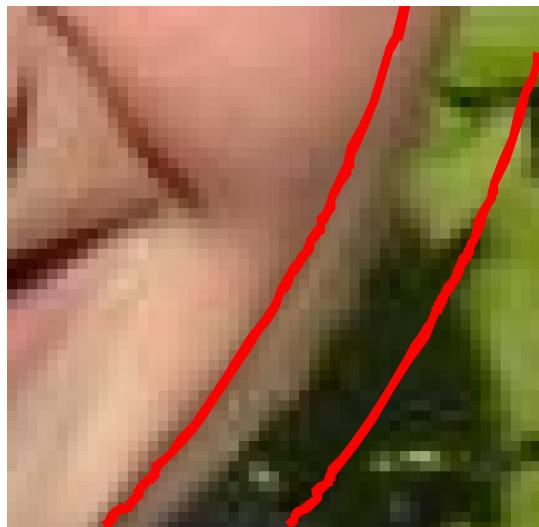


- Решаем для каждого пикселя уравнение – ищем оптимальные пропорции (альфа) смешения цветов фона и объекта
- Методов матирования появилось очень много, см. Wang, Cohen. Image and Video Matting: A Survey, 2007

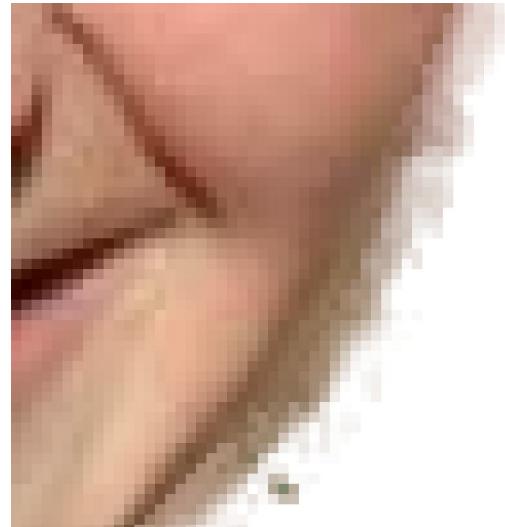
Проблемы матирования



Без регуляризации по альфа



Вход

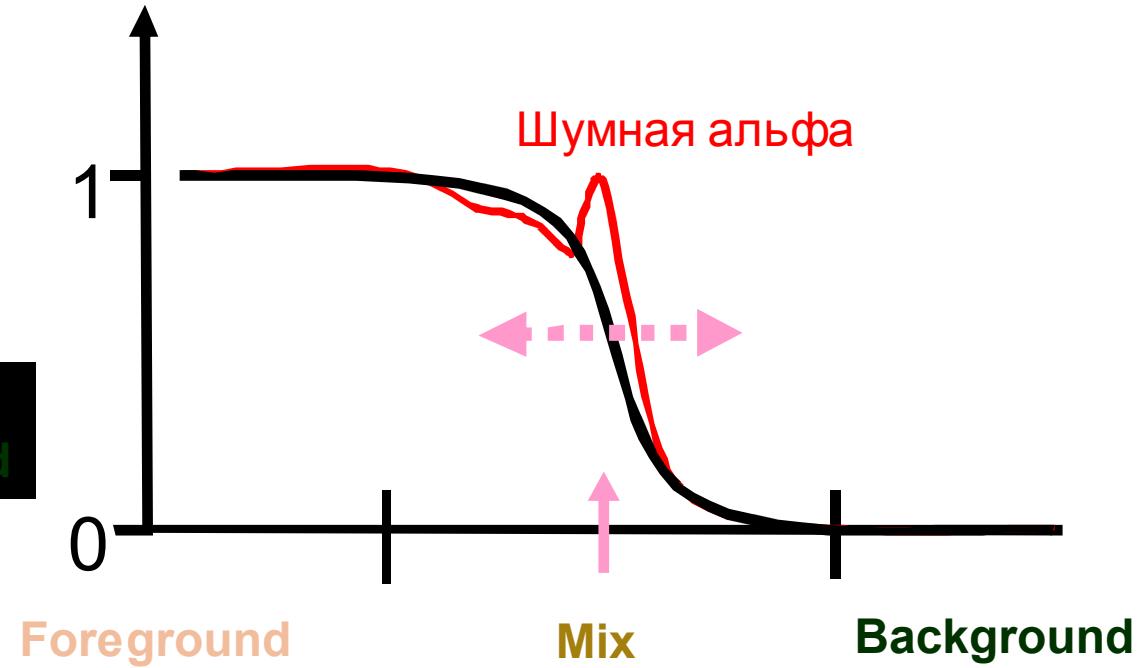


Bayes Matting
Chuang et. al. (2001)



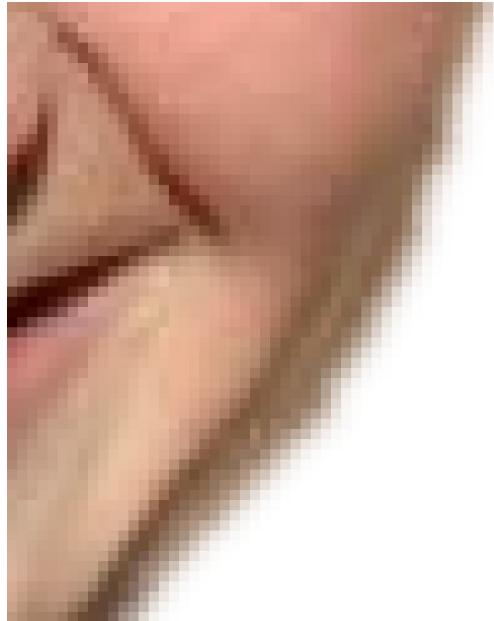
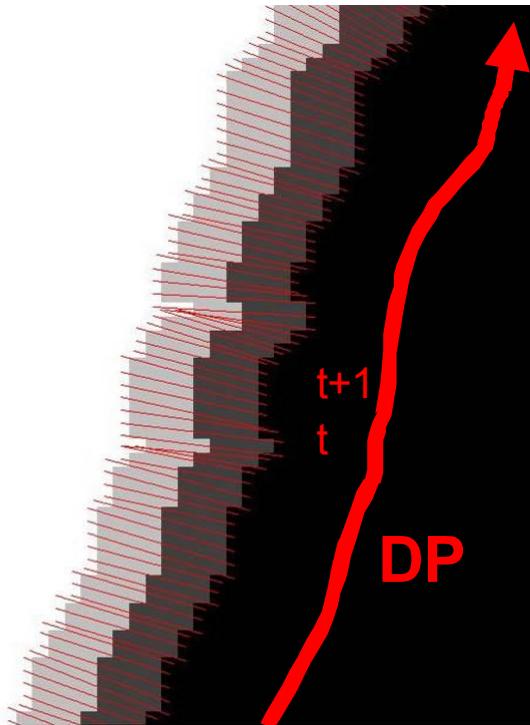
Knockout 2
Photoshop Plug-In

Матирование границы



- Приближаем α вдоль каждого профиля гладким сплайном
- За счёт этого границу сглаживаем

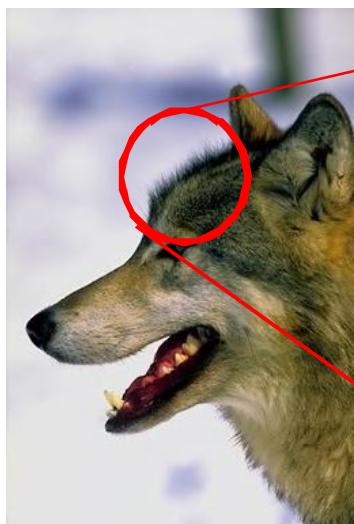
Сглаживание границы



Результат после DP Border
Matting

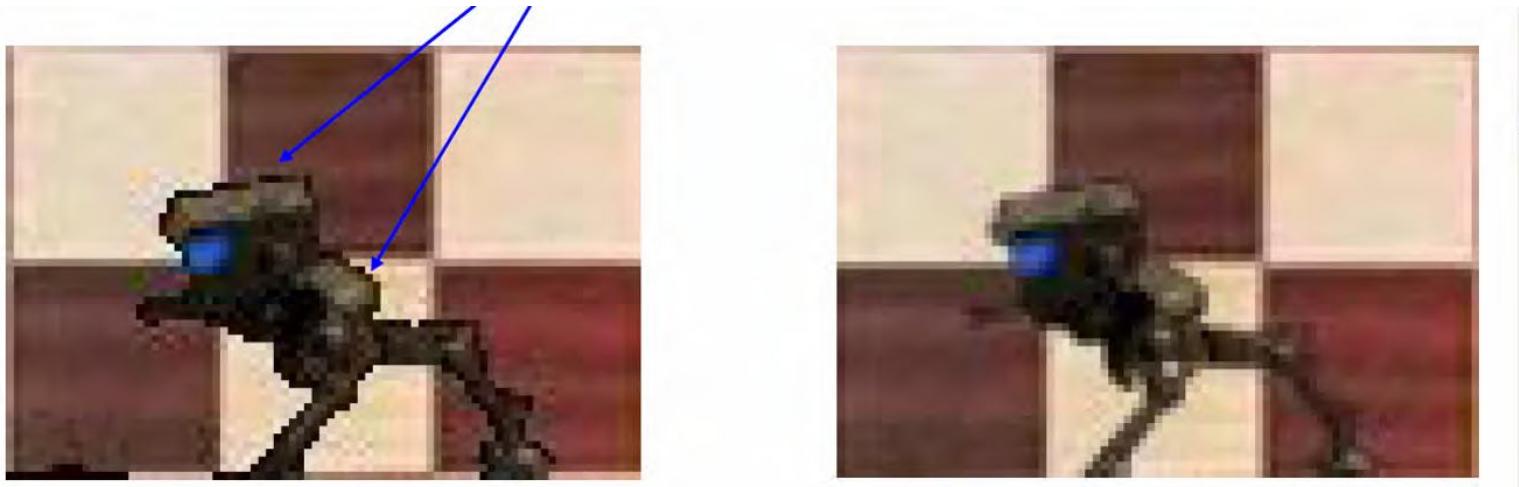
Сглаживанием параметры сплайнов профилей с
помощью динамического программирования

Результат



На сложных границах (шерсть) сглаживание может быть чересчур сильным

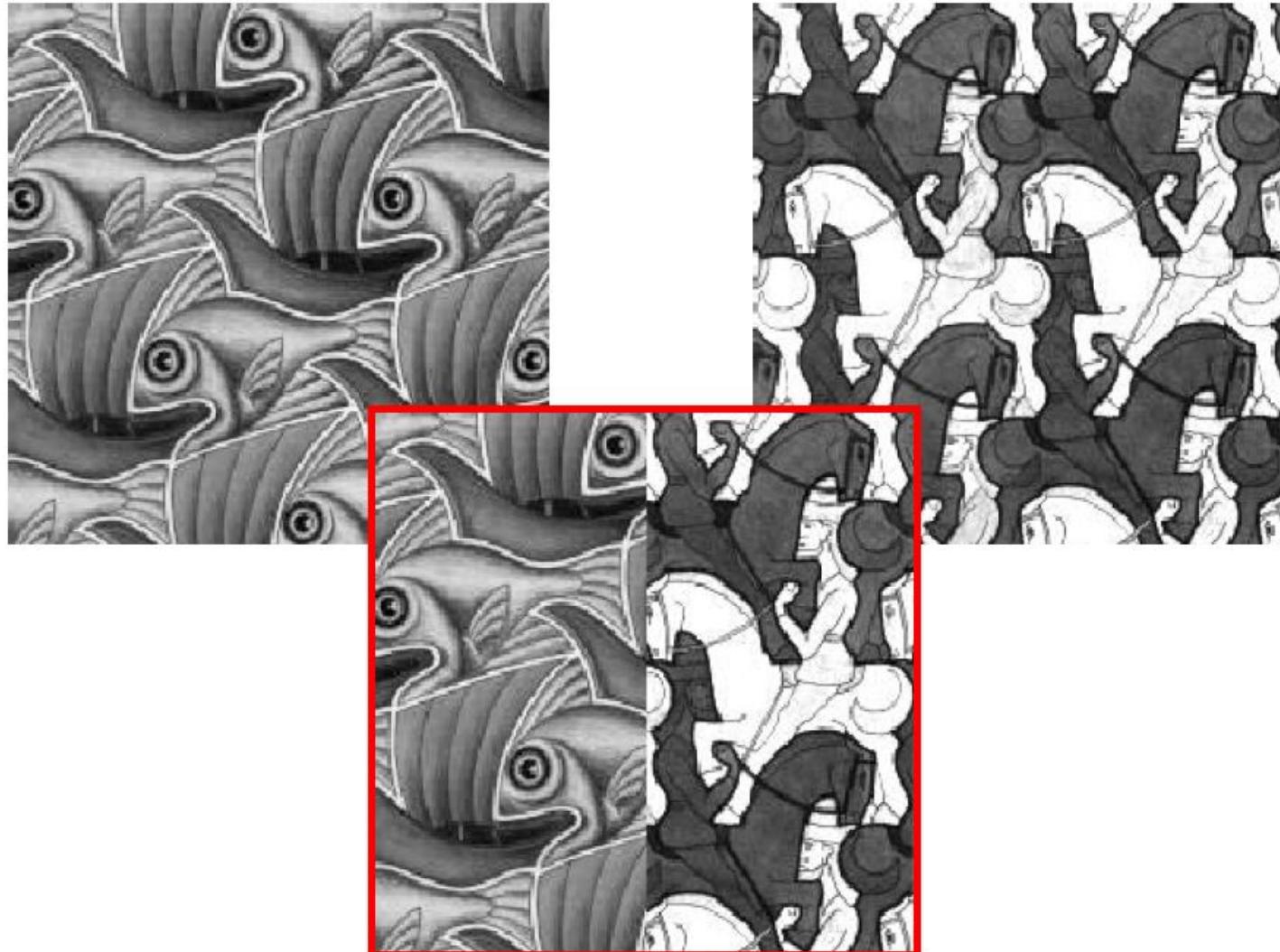
Композиция изображений



- Выделенный объект можем встроить в другое изображение
- Если провели мягкую сегментацию, то при встраивании смешиваем (blending) изображения объекта и фона:

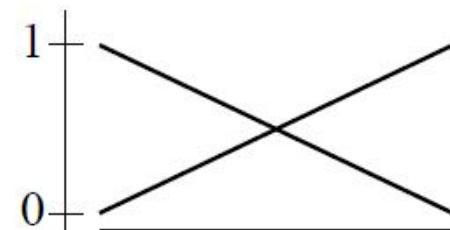
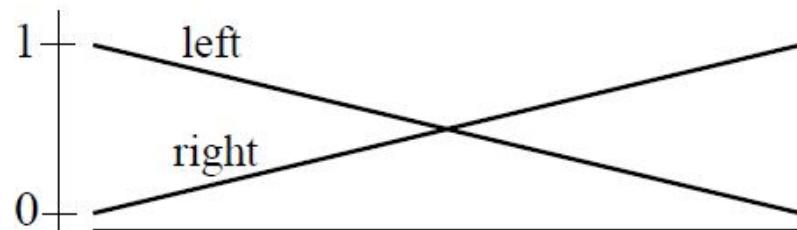
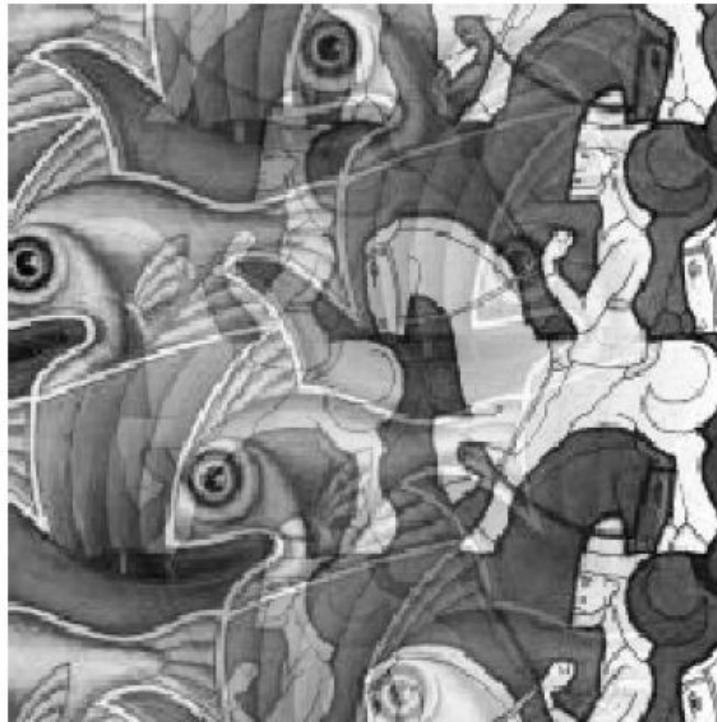
$$I_{comp} = \alpha I_{fg} + (1-\alpha) I_{bg}$$

Прямая сшивка изображений

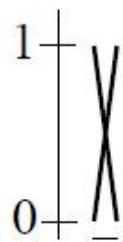


- Что делать, когда невозможно сегментировать объекты?

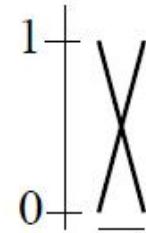
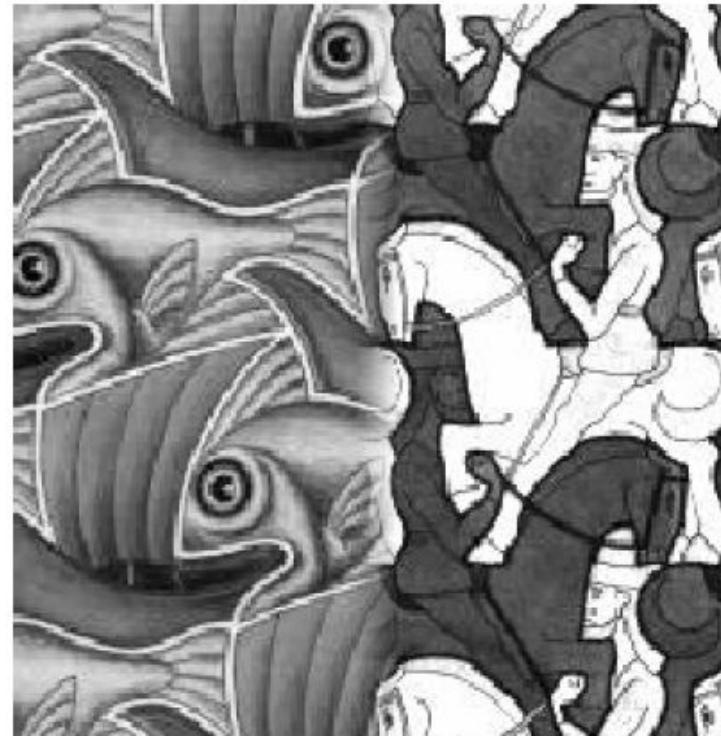
Feathering



Feathering



Feathering

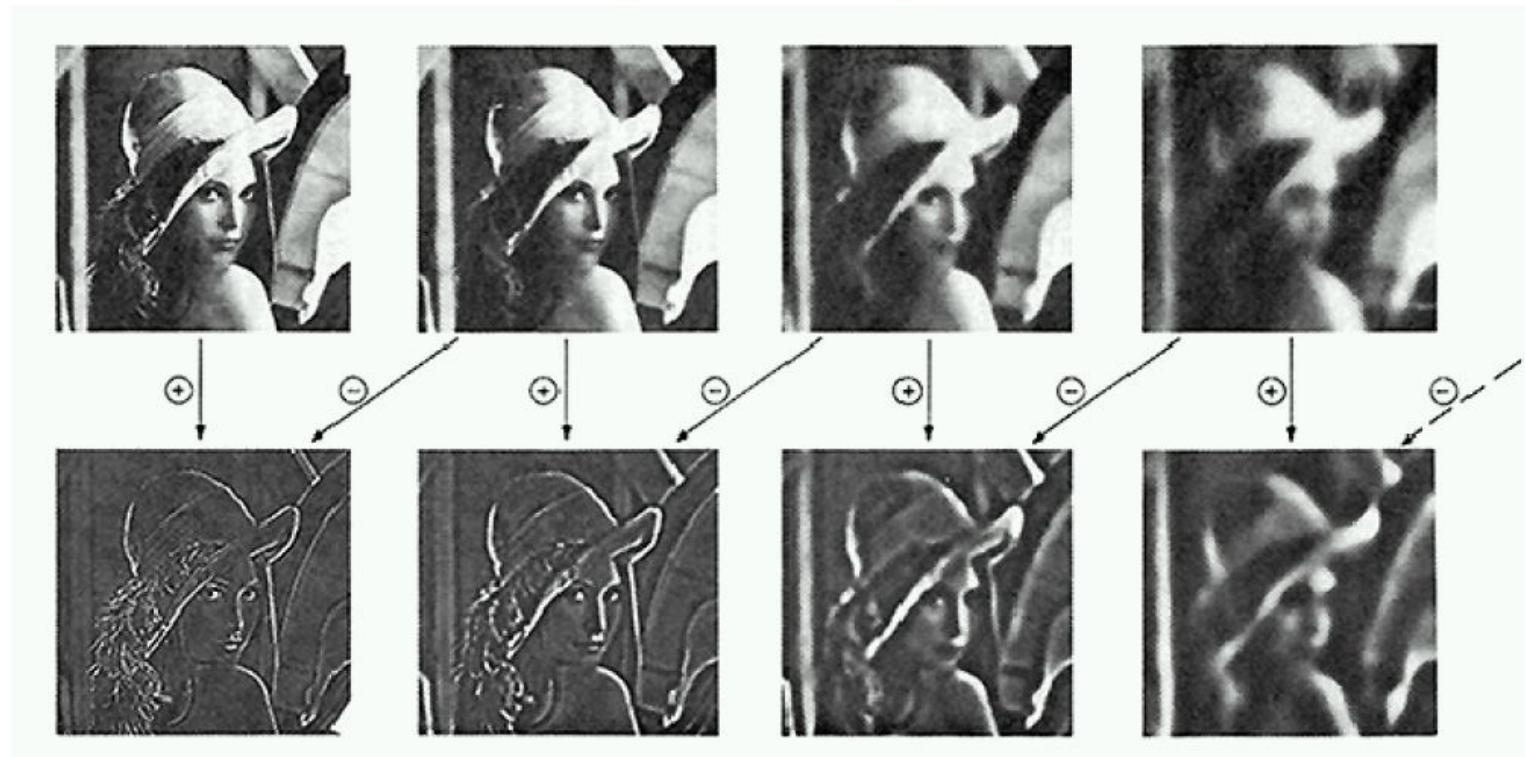


- «Оптимальное» окно: плавный переход, но нет «призраков»
- Зависит от размеров структуры, т.е. от «частоты»

Пирамиды Лапласа для сшивки



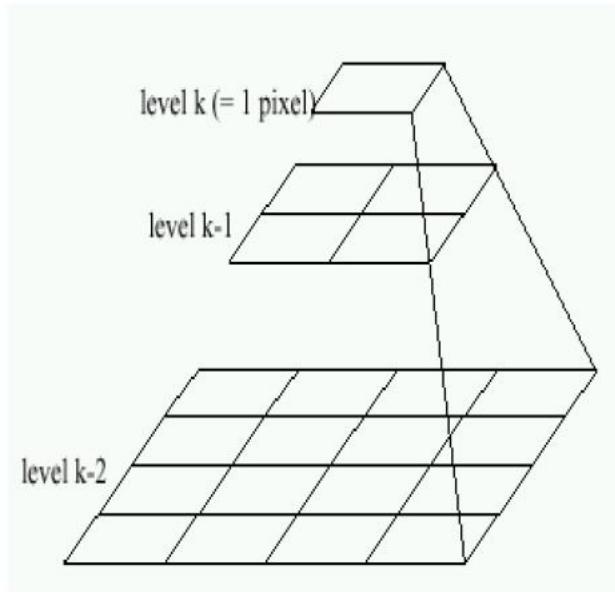
Lowpass Images



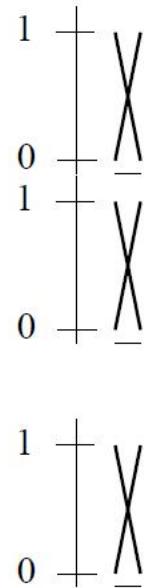
Bandpass Images

- Идея: сшивать отдельно по каждой полосе частот

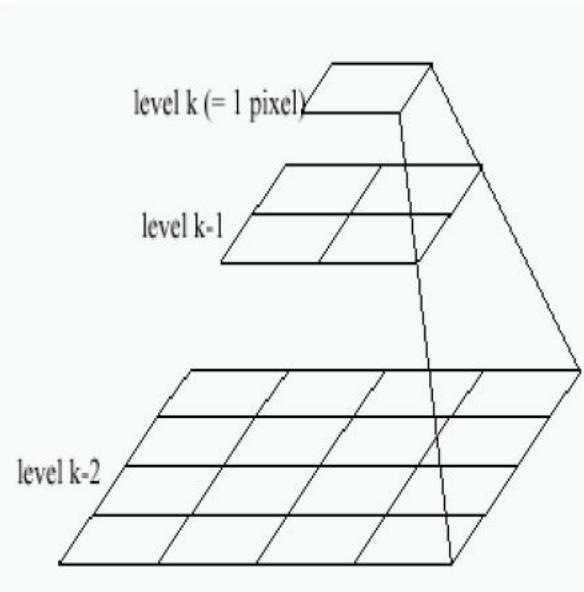
Идея метода



Left pyramid



blend



Right pyramid

Пример

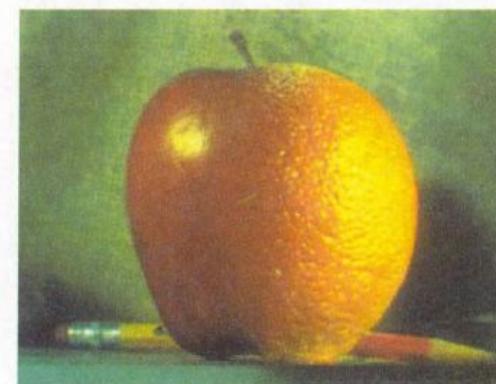
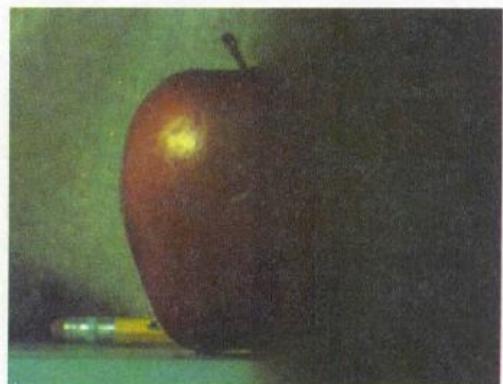
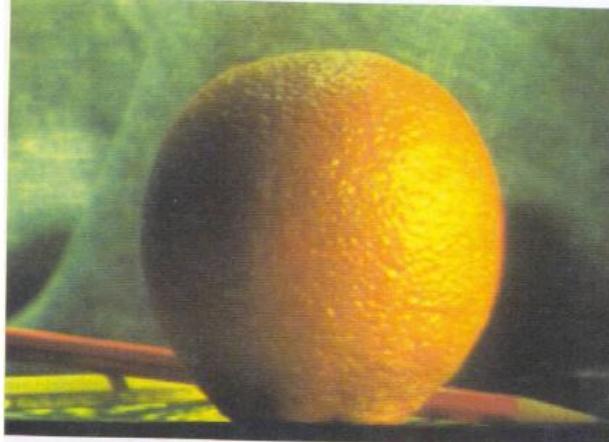
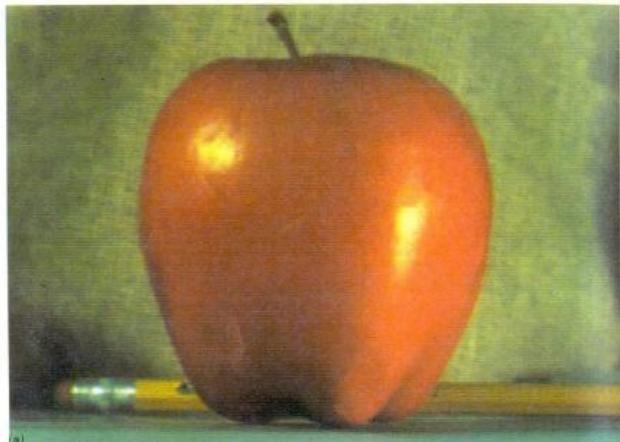
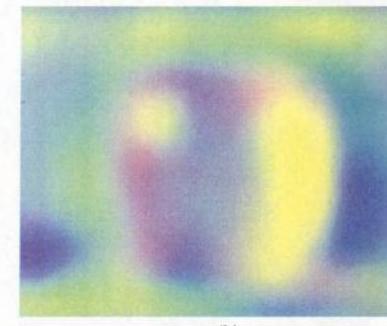
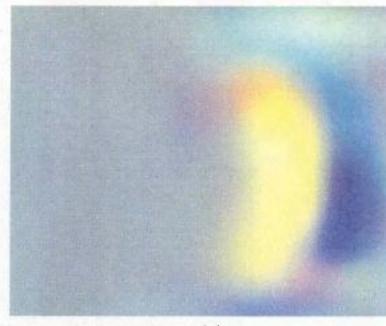
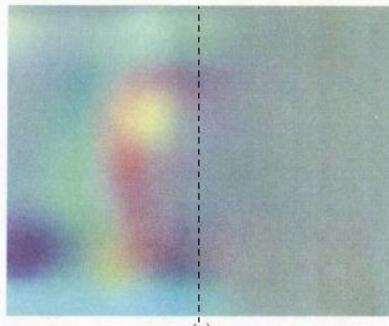


Иллюстрация работы



laplacian
level
4

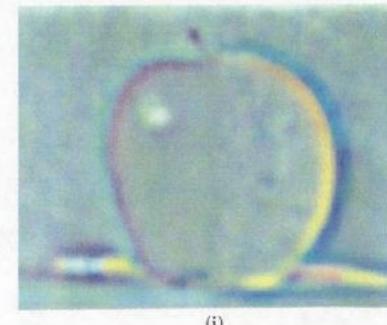
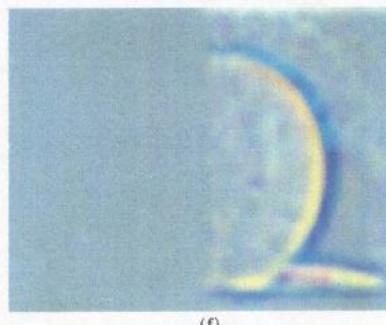
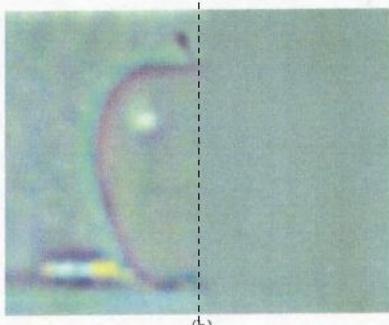


(c)

(g)

(k)

laplacian
level
2

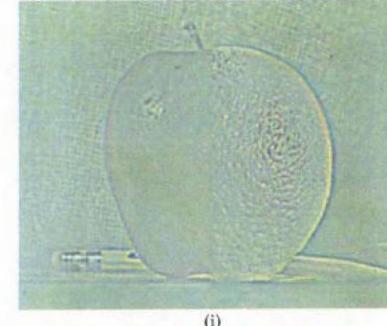
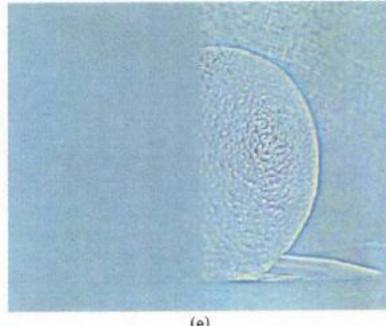
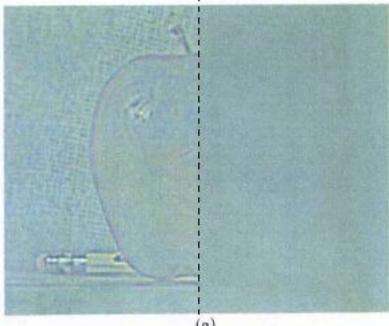


(b)

(f)

(j)

laplacian
level
0



(a)

(e)

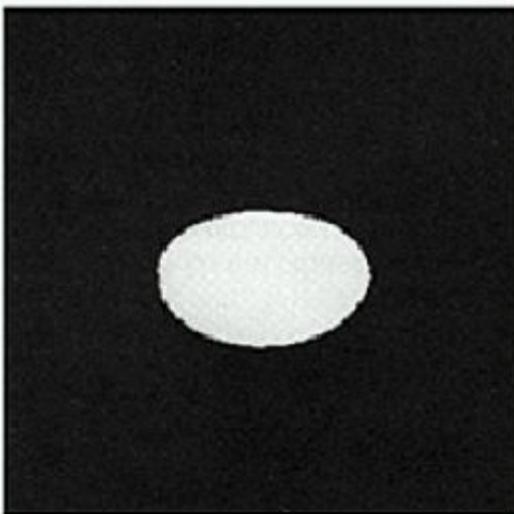
(i)

left pyramid

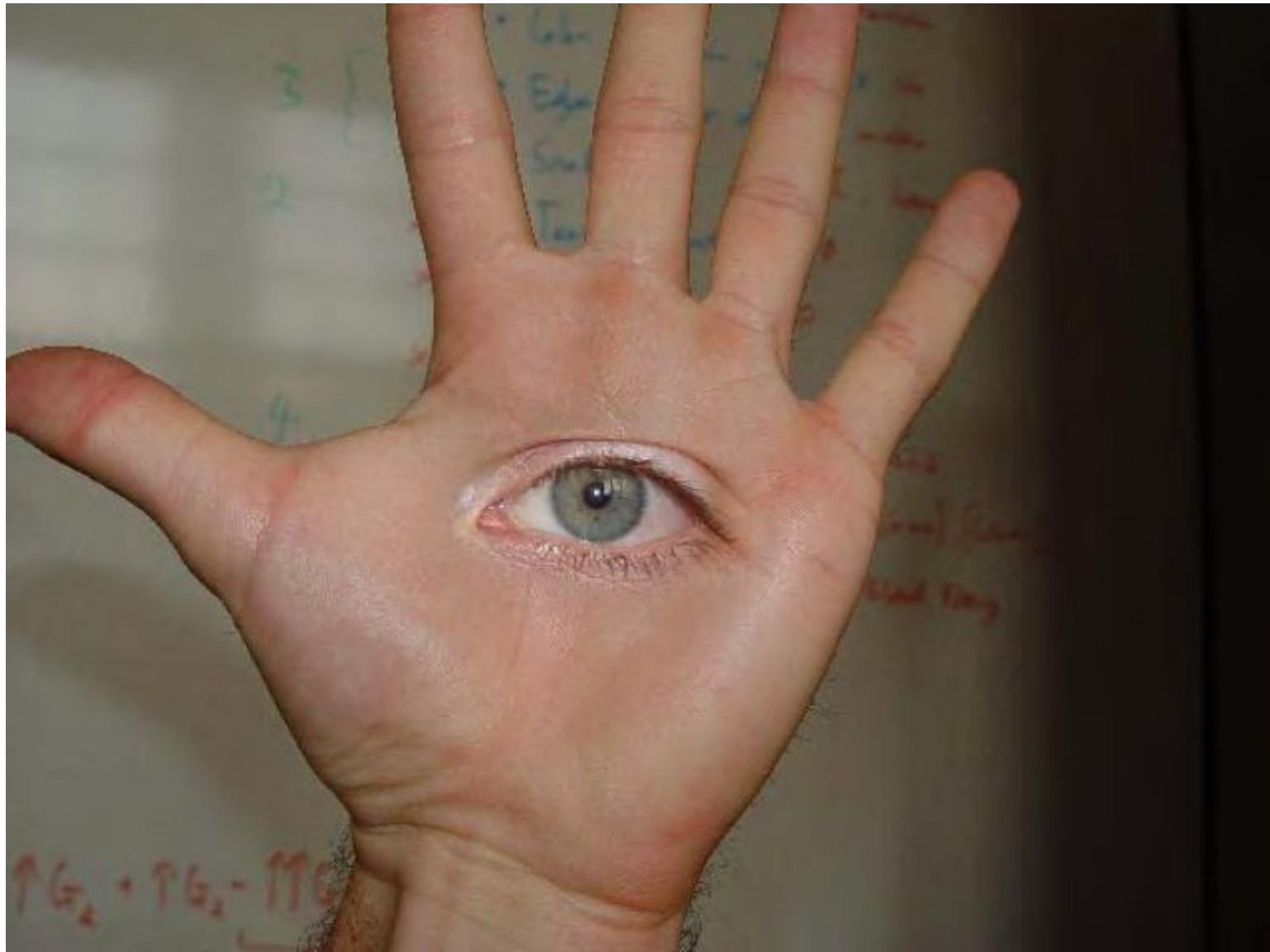
right pyramid

blended pyramid

Пример студенческих заданий



Пример студенческих заданий



Пример студенческих заданий



Пример сшивки панорам



Простое наложение



+ Компенсация яркости



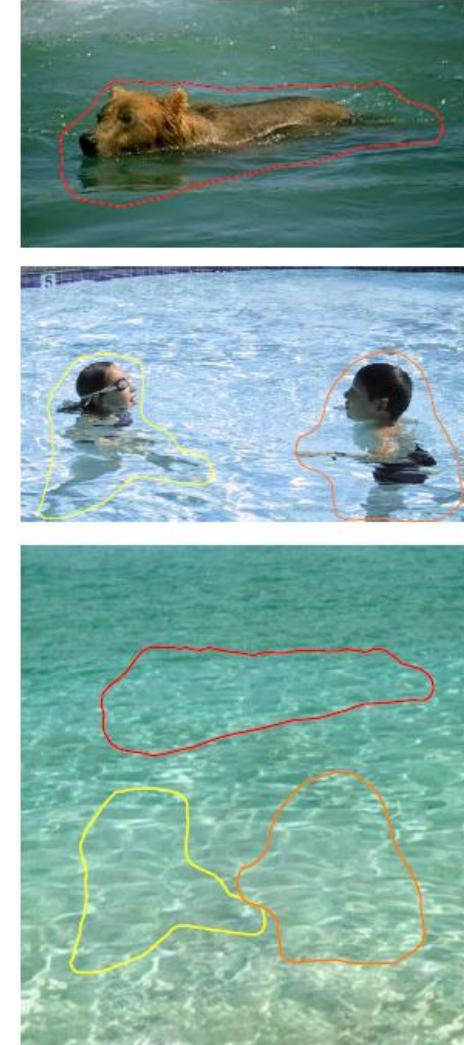
+ Многополосная сшивка

Вывод: для аккуратного фотомонтажа нужна цветокоррекция!

«Poisson editing»

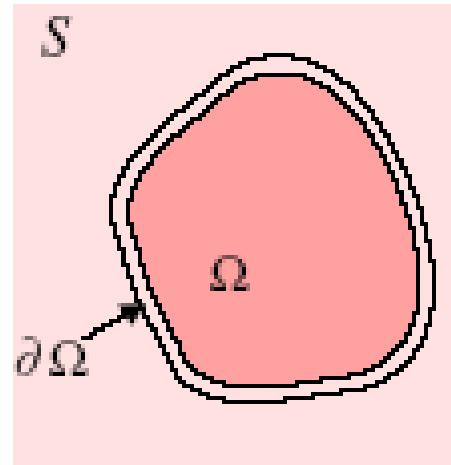
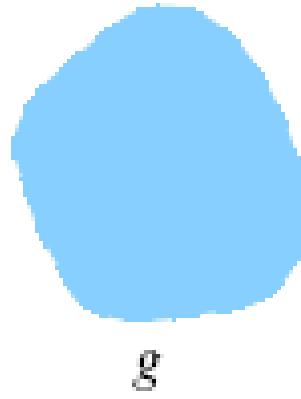
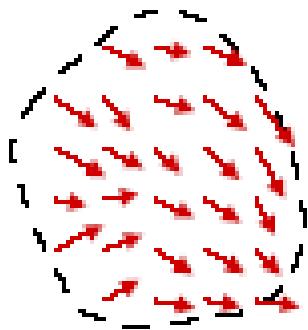


- Задача: встроить объект из изображения s в изображение t
- Идея:
 - Возьмём поле градиента из изображения s (и только!)
 - Вычислим цвета в новой области так, чтобы новое поле градиента совпадало с s , и цвета на границе совпадали с цветами t
 - У нас будет цветокоррекция, интегрированная в сшивку!
- «Направленная интерполяция»
 - *Guided interpolation*



PEREZ, P., GANGNET, M., AND BLAKE, A. 2003. Poisson image editing. Proceedings of ACM SIGGRAPH, 313-318.

Подход



Вычисляем функцию f в области Ω такую, чтобы её градиент в Ω соответствовал векторному полю v , которое может быть (а может и не быть) градиентом исходной функции g с заданными граничными условиями

Уравнение Пуассона для изображения



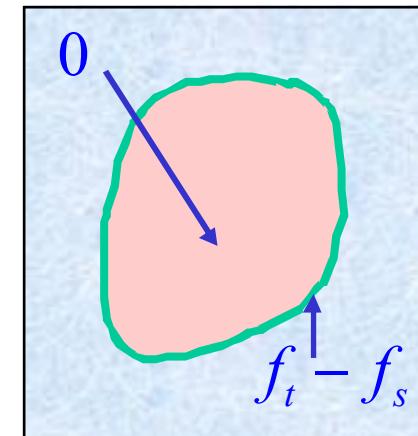
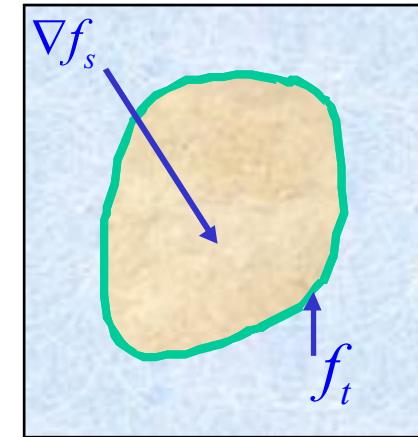
- Задача: найти f , такое что

$$\min_f \iint_{\Omega} |\nabla f - v|^2 \quad f|_{\partial\Omega} = f_t^*|_{\partial\Omega}$$

- Решение этой задачи – это решение уравнения Пуассона:

$$\Delta f = \operatorname{div} v \quad f|_{\partial\Omega} = f_t^*|_{\partial\Omega}$$

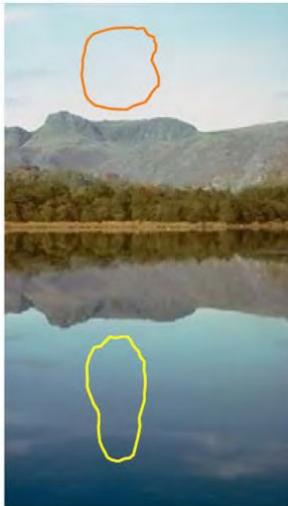
- Решаются 3 задачи независимо по каждому каналу RGB
- Дискретизация уравнений приводит к системе линейных уравнений, которая решается методом Гаусса-Зиделя



Примеры работы



sources



destinations



cloning



seamless cloning



sources/destinations



cloning



seamless cloning

Смешение полей градиентов



- Вместо полного копирования поля градиента из исходного изображения, можно сделать их композицию
- Пр: взять максимумы градиентов из исходного и целевого полей

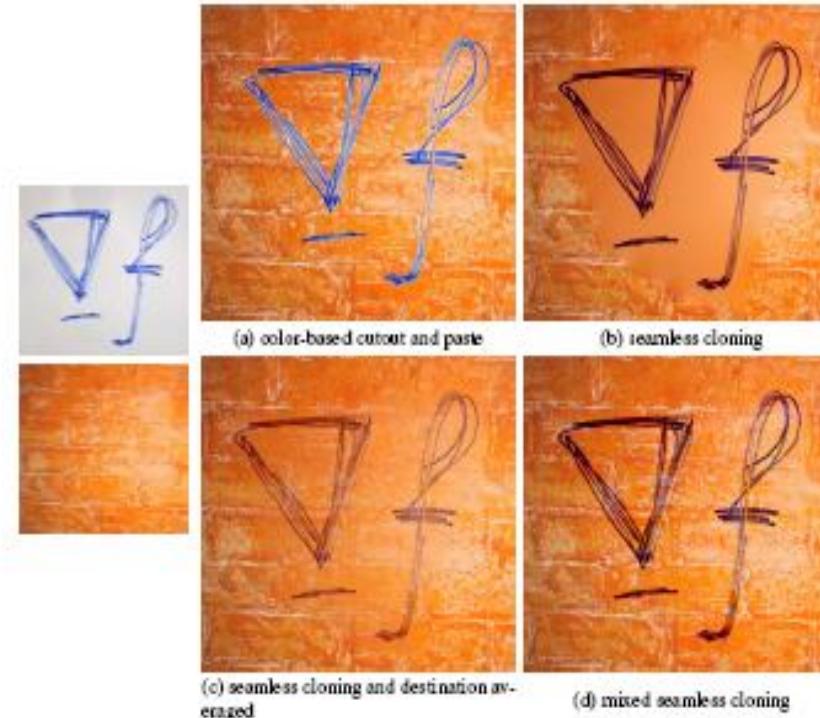


Figure 6: **Inserting objects with holes.** (a) The classic method, color-based selection and alpha masking might be time consuming and often leaves an undesirable halo; (b-c) seamless cloning, even averaged with the original image, is not effective; (d) mixed seamless cloning based on a loose selection proves effective.

Редактирование выделения



Изменяя поле градиентов в выделенной области мы можем, например, локально улучшить контрастность объекта

Композиция изображений



Результат прямого смешения нескольких изображений друг с другом

Многополосное смешение всё-таки размывает, «смешивает» объекты. Лучше бы брать каждый объект из своего изображения.

Поиск оптимальных границ



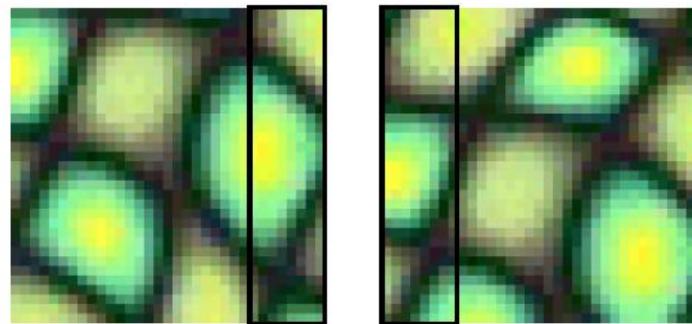
Поиск оптимальных границ



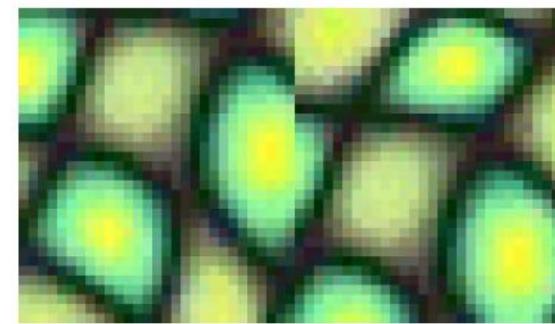
GraphCut для сшивки



overlapping blocks

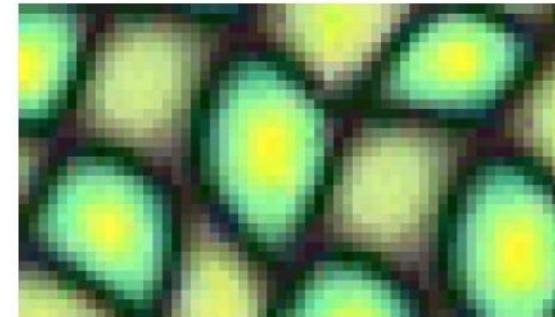


vertical boundary



$$\left(\begin{array}{c} \text{block 1} \\ - \\ \text{block 2} \end{array} \right)^2 = \text{overlap error}$$

overlap error



min. error boundary

KWATRA, V., SCHODL, A., ESSA, I., TURK, G., AND BOBICK, A.. Graphcut textures: image and video synthesis using graph cuts. *SIGGRAPH*, 2003

GraphCut для сшивки



Создание текстур

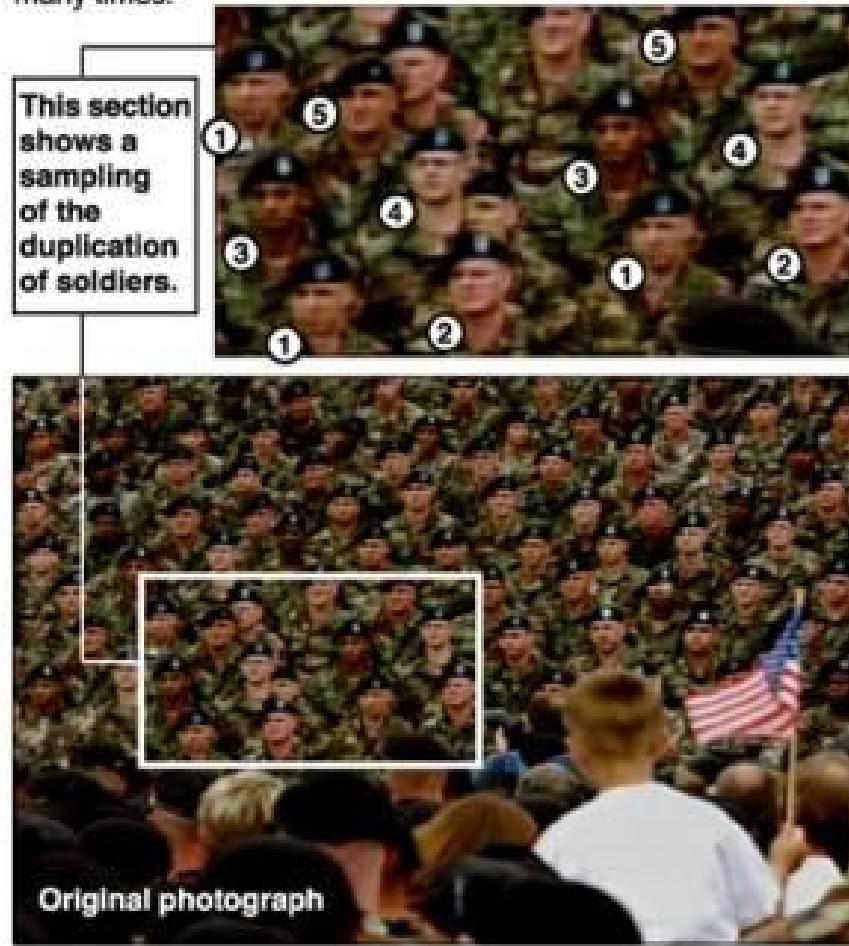


- «Накидываем» исходные экземпляры на изображение и сшиваем их с помощью разрезов графов.
- Перспективное изменение (масштабирование) по необходимости



Bush campaign digitally altered TV ad

President Bush's campaign acknowledged Thursday that it had digitally altered a photo that appeared in a national cable television commercial. In the photo, a handful of soldiers were multiplied many times.



Digital Photomontage



- Развитие подхода сшивки фрагментов с использованием разрезов графов
- *Смотрим видео*

Aseem Agarwala, Mira Dontcheva, Maneesh Agrawala, Steven Drucker, Alex Colburn, Brian Curless, David Salesin, Michael Cohen. Interactive Digital Photomontage. *In Siggraph 2004*

Drag-and-Drop Pasting



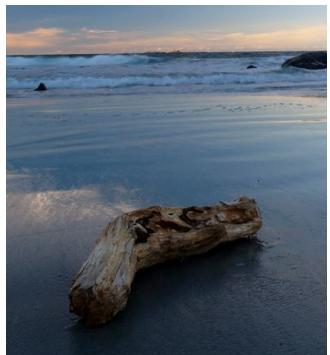
- Объединим наработки разных подходов
 - Смешение по Пуассону
 - Альфа-смешение
 - Выбор оптимальной границы по GrabCut

Jiaya Jia, Jian Sun, Chi-Keung Tang, Heung-Yeung Shum. Drag-and-Drop Pasting. Siggraph 2006

Проблемы метода по Пуассону



Рассмотрим 2 примера
встраивания одного
объекта, но с разными
границами



+



f_s

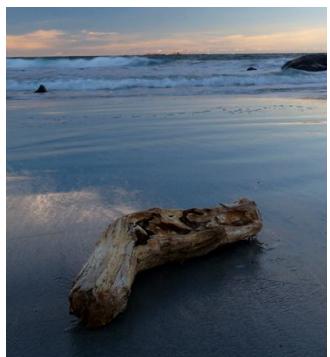
f_t



Проблемы метода по Пуассону



Результат разный!



+



f_s

f_t



Проблемы метода по Пуассону



- Направляющее поле $\nu = \nabla f_s$, обозначим $f' = f - f_s$
- Тогда исходное уравнение эквивалентно:

$$\min_f \iint_{\Omega} |\nabla f - \nu|^2 \quad f|_{\partial\Omega} = f_t^*|_{\partial\Omega} \quad \min_f \iint_{\Omega} |\nabla f'|^2 \quad f'|_{\partial\Omega} = f_t - f_s|_{\partial\Omega}$$

- Что эквивалентно решению уравнения Лапласа:

$$\Delta f' = 0 \quad f'|_{\partial\Omega} = f_t - f_s|_{\partial\Omega}$$

- Свойство уравнения Лапласа:
 - Энергия $\iint_{\Omega} |\nabla f'|^2$ будет близка нулю тогда и только тогда, если $f_t - f_s|_{\partial\Omega} = k$, где k - константа

Проблемы метода по Пуассону



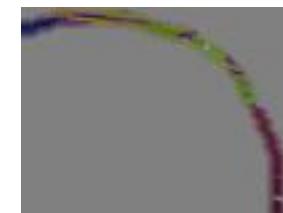
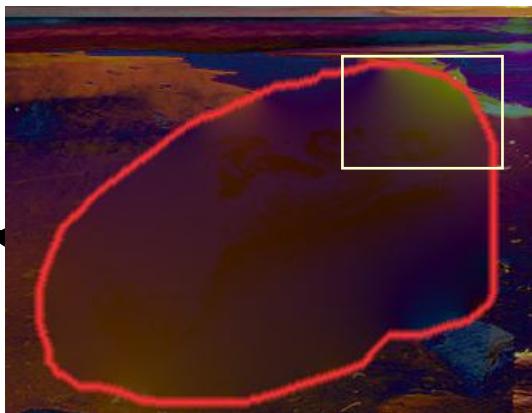
Разные границы дают разный
результат в зависимости от
равномерности цвета на
границе



+



↑



Уравнение Пуассона



- Где проходит оптимальная граница $\partial\Omega$?
 - Внутри обозначенной пользователем области
 - Вне объекта интереса
 - Его находим через GrabCut
 - Получаем область возможной границы (голубая)
- Как будем искать?
 - Найдём замкнутый путь, вдоль которого разница цветов первого и второго изображения близки некоторой константе:



$$\min_f \sum_{p \in \partial\Omega} ((f_t(p) - f_s(p)) - k)^2 \quad \partial\Omega \in blue$$

Поиск оптимальной границы



Найдём замкнутый путь, вдоль которого разница цветов первого и второго изображения близки некоторой константе:

$$E(\partial\Omega, k) = \sum_{p \in \partial\Omega} ((f_t(p) - f_s(p)) - k)^2 \quad \partial\Omega \in \text{blue}$$

- $\partial\Omega$ и k - неизвестные
- Итеративная (EM-like) оптимизация
 - Инициализируем $\partial\Omega$ по отмеченной пользователем границе
 - По $\partial\Omega$ вычисляем оптимальное k :

$$\frac{\partial E(\partial\Omega, k)}{\partial k} = 0$$

- Фиксируя k , находим оптимизируем границу $\partial\Omega$ (поиск кратчайшего пути)
- Повторяем предыдущие два шага до сходимости

Пример



Учёт дробной границы



Альфа-смешение и смешение по Пуассону в предыдущих работах являются двумя разными методами.

- Альфа-смешение обеспечивает дробную границу, но не может изменять цвет исходного объекта.
- Смешение по Пуассону модифицирует цвет объекта, но использует только бинарную границу.
- Объединим оба подхода.

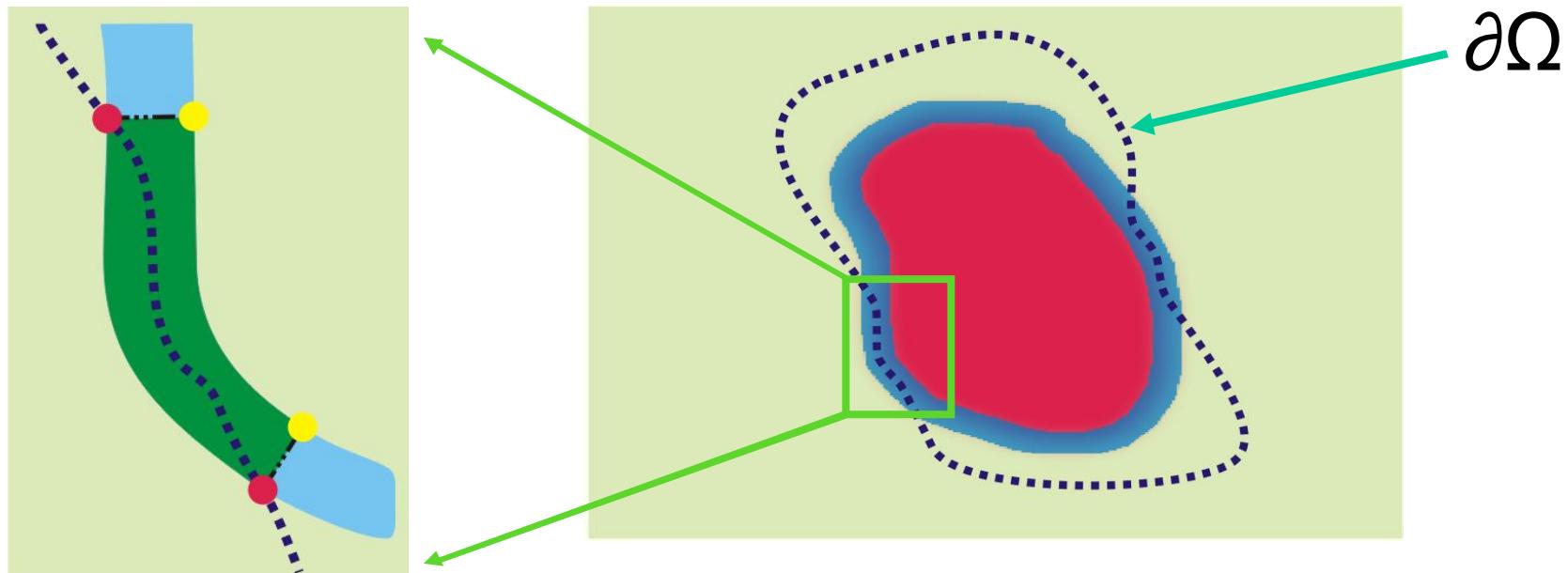
Без дробной границы
встроить объекты со
сложными полупрозрачными
границами нельзя



Учёт дробной границы



- Где нужно учитывать дробные значения?
 - Только там, где найденная линия сшивки (граница) проходит по голубой (дробной) области объекта



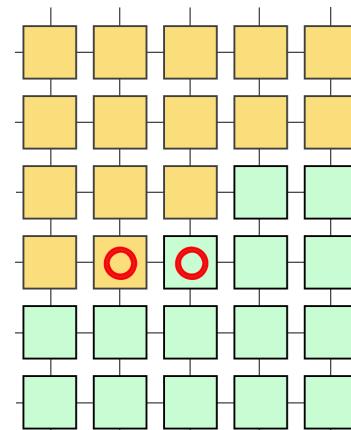
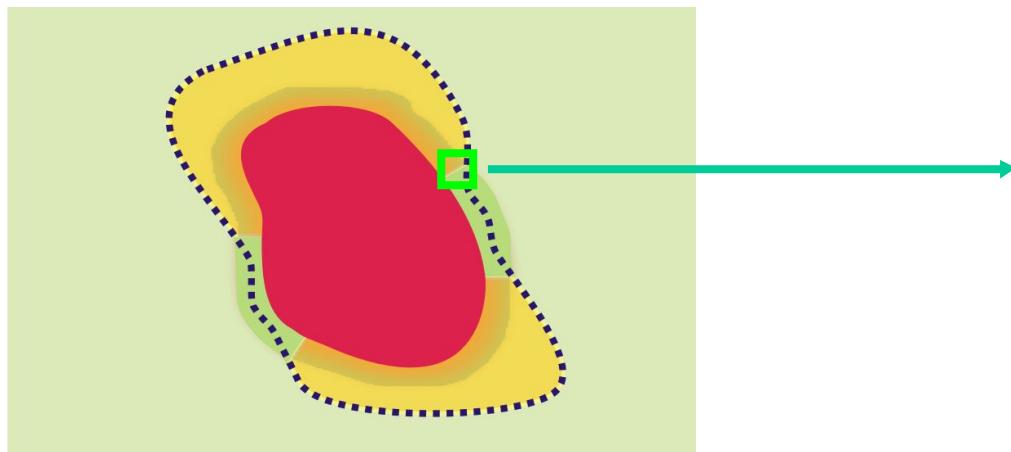
Учёт дробной границы



Для учёта дробных границ в методе Пуассона построим смешанное направляющее поле (градиентов):

$$v'_x(x, y) = \begin{cases} \nabla_x f_s(x, y) & (x, y), (x+1, y) \in yellow \\ \nabla_x (a f_s + (1-a) f_t) & (x, y), (x+1, y) \in green \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

$\nabla_x f_s(x, y) = f(x+1, y) - f(x, y)$



Учёт дробной границы



- Решаем задачу с построенным смешанным направляющим полем (градиентов):

$$\min_f \int_{p \in \Omega^*} |\nabla f - \nu'|^2 dp \quad f|_{\partial\Omega^*} = f_t|_{\partial\Omega^*}$$

- Решаем соответствующее уравнение Пуассона.

Результат и сравнение



Альфа смешение

Результат и сравнение



Drag&Drop



Смешение по Пуассону

Результат и сравнение



Drag&Drop



Альфа-смешение

Результат и сравнение



Drag&Drop



Смешение по Пуассону

Результат



Результат



Inpainting



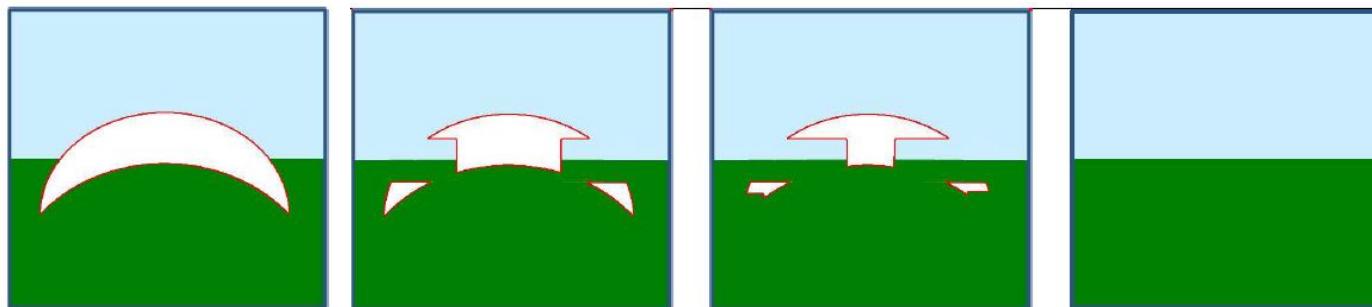
- Задача: реконструировать изображение в неизвестной внутренней области
 - Царапины, трещины, текст
 - Вырезанный объект
- Как это делают эксперты:
 - Структура изображения продолжается внутрь области дефекта
 - Т.е. контура объектов продолжаются внутрь области
 - Области внутри дефекта заливаются цветом согласно соседним областям
 - Текстура искусственно добавляется (синтезируется в области)

M. Bertalmio, G. Sapiro, V. Caselles, C. Ballester. Image inpainting. In *Proc. Siggraph 2000*.

Exemplar-based inpainting



- Идея - объединить все 3 основных принципа по реконструкции изображений художниками
- Ищем и копируем в неизвестную область небольшие фрагменты из известной области
- Приоритет даём продолжению линейных структур



A. Criminisi, P. Perez, K. Toyama. Region filling and object removal by exemplar-based inpainting. In *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004

Алгоритм- шаг 1



- Назначим каждому пикслю на границе приоритет
- Линейным структурам назначим больший приоритет

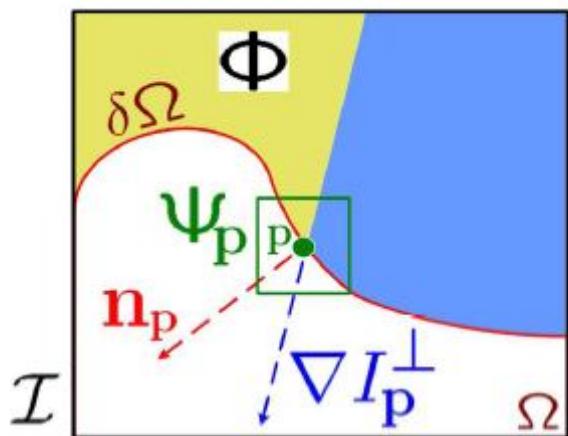


Fig. 5. Notation diagram. Given the patch Ψ_p , n_p is the normal to the contour $\delta\Omega$ of the target region Ω and ∇I_p^\perp is the isophote (direction and intensity) at point p . The entire image is denoted with \mathcal{I} .

$$P(\mathbf{p}) = C(\mathbf{p})D(\mathbf{p}).$$

$$C(\mathbf{p}) = \frac{\sum_{\mathbf{q} \in \Psi_p \cap (\mathcal{I} - \Omega)} C(\mathbf{q})}{|\Psi_p|}, \quad D(\mathbf{p}) = \frac{|\nabla I_p^\perp \cdot n_p|}{\alpha}$$

Алгоритм- шаг 2



- Распространяем «структуру» путём копирования фрагментов изображения вдоль направления распространения структуры

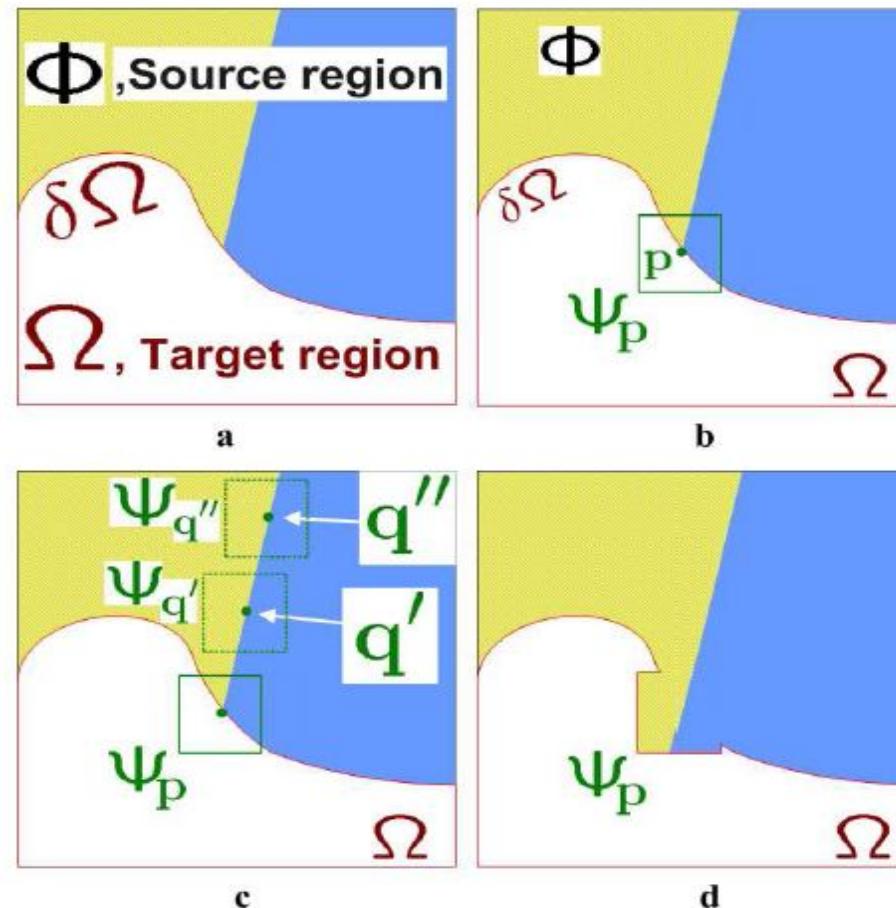
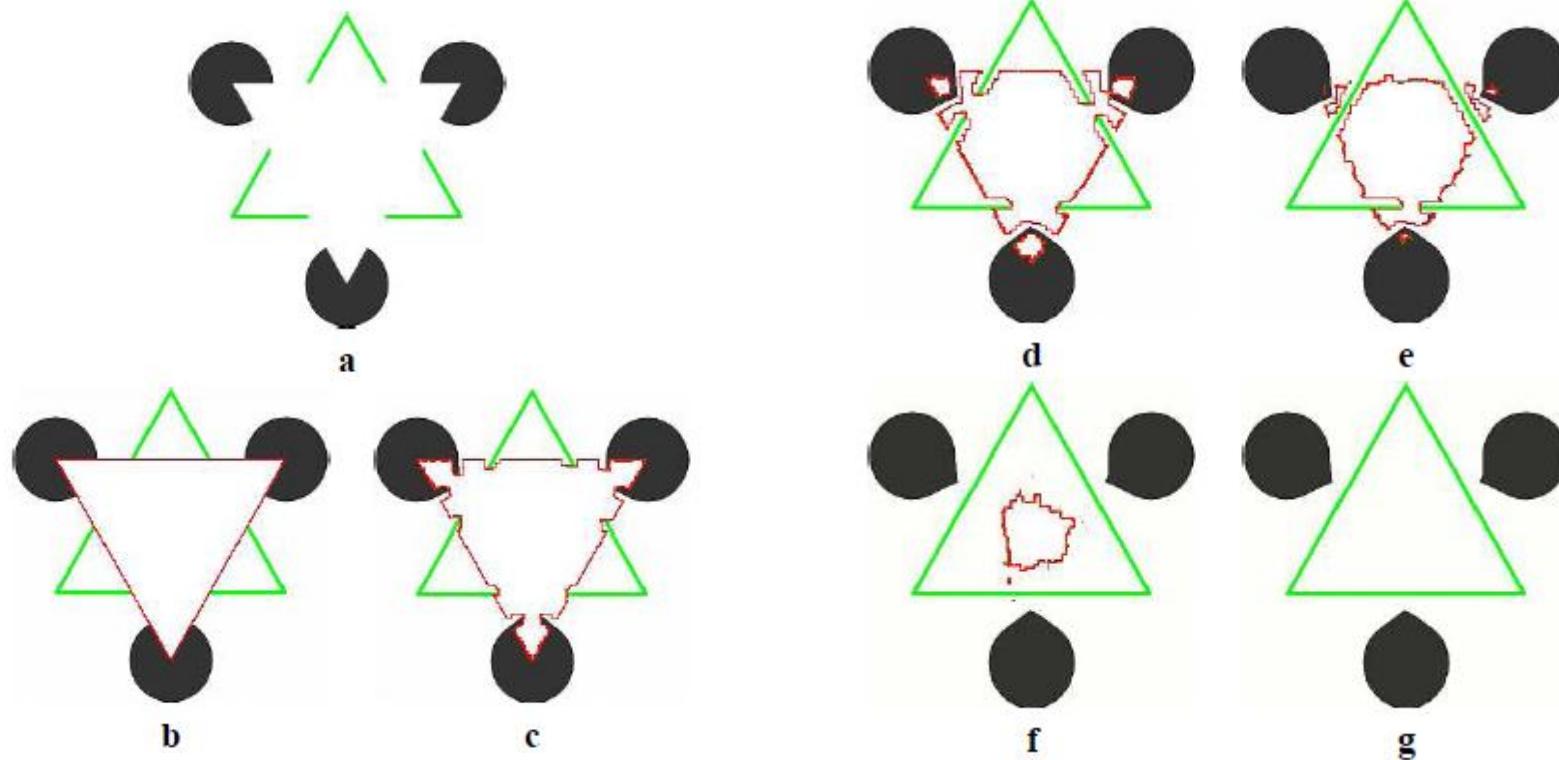
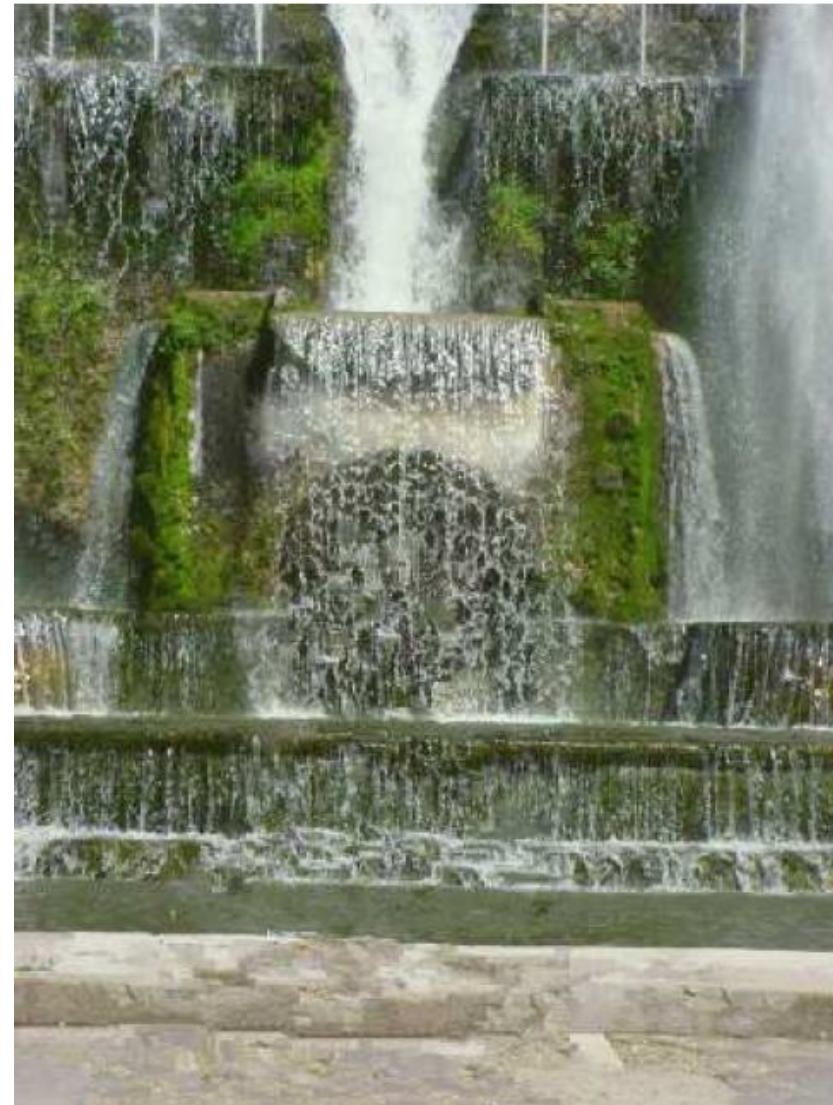
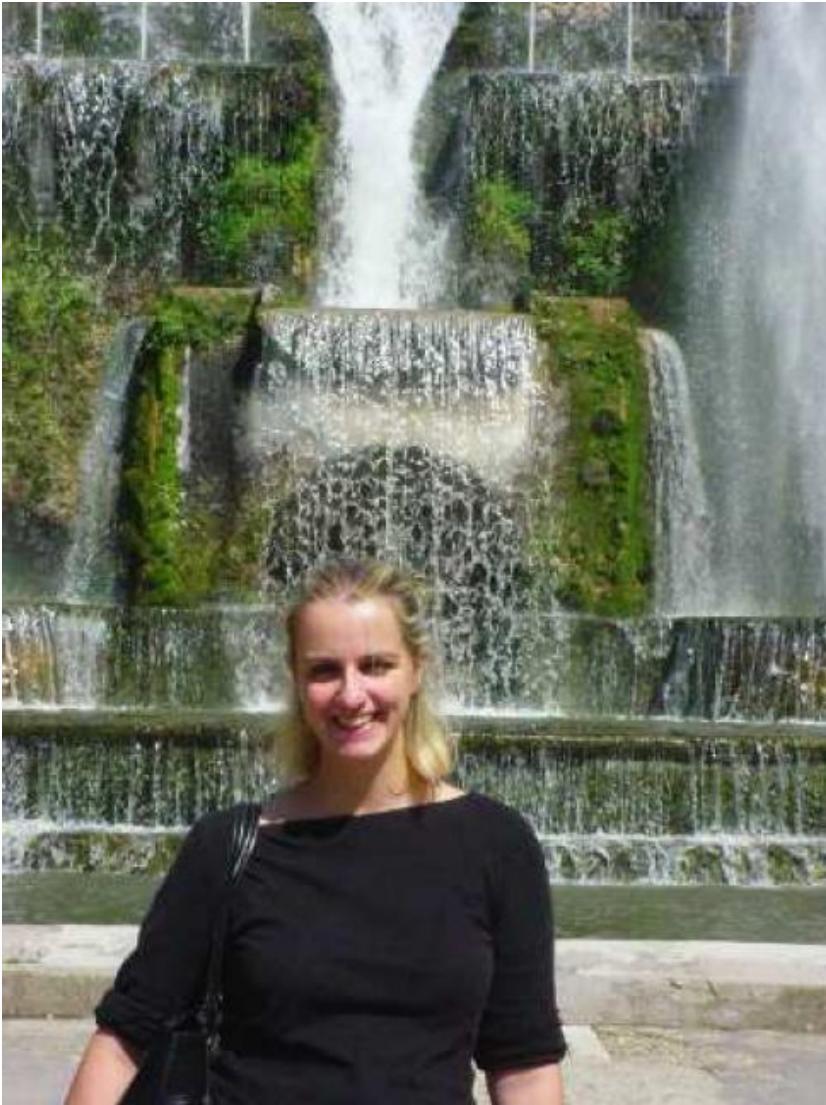


Иллюстрация работы



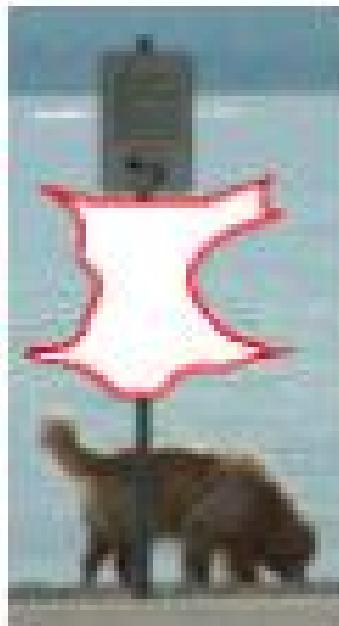
Хороший пример работы



Сравнение с синтезом текстур



Original



Object Cut



Tex. Syn.



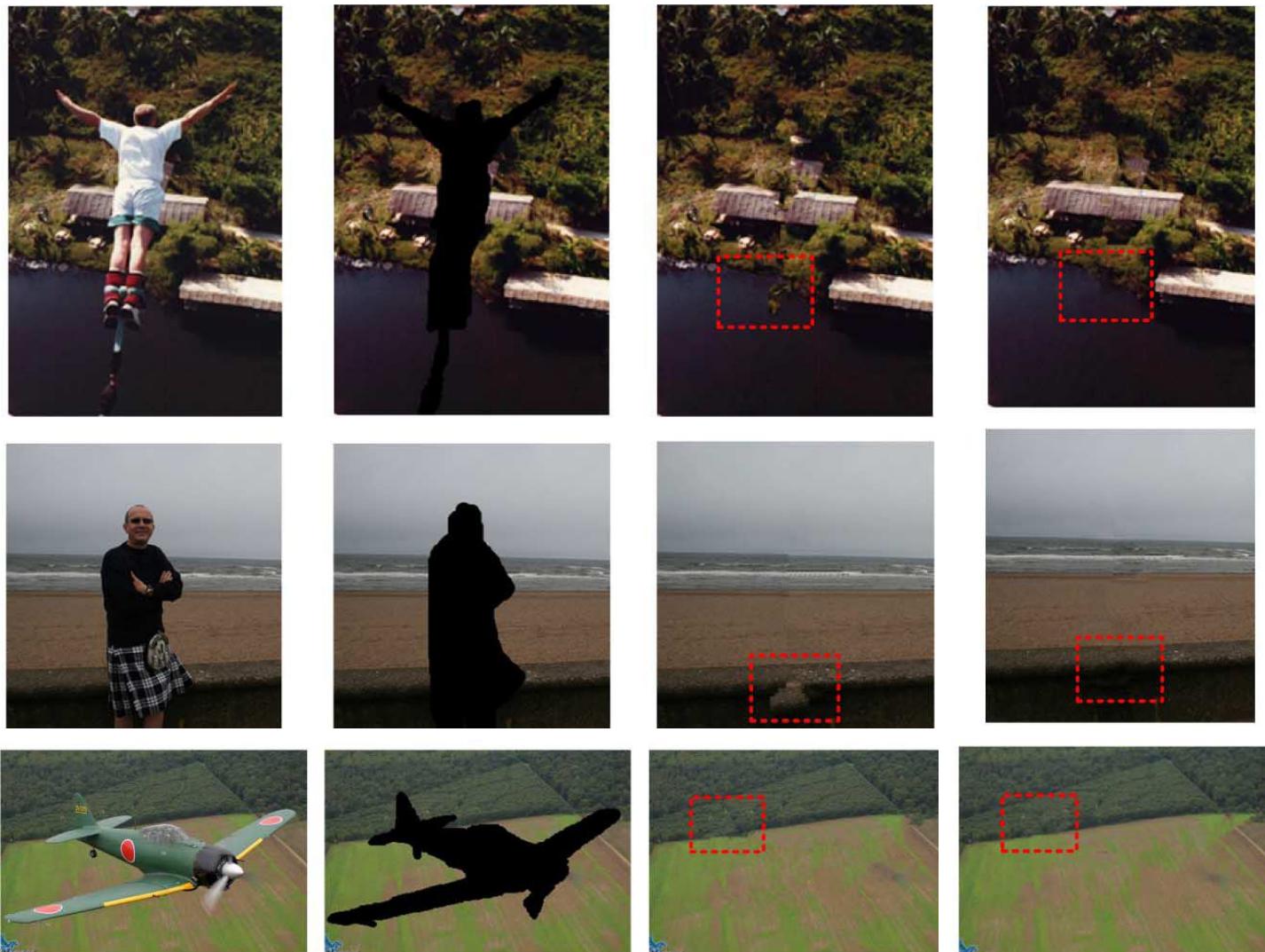
Criminisi

Развитие методов inpainting



- Учёт статистики естественных изображений (S. Roth and M. J. Black, 2005)
- Усовершенствование метрик выбора фрагментов
- Смешение нескольких фрагментов при копировании
- Разреженные избыточные (sparse overcomplete) базисы для оценки фрагментов
 - Немного об этом будет в лекции о нейросетях
- И т.д.

Сравнение



Z. Xu, J. Sun Image Inpainting by Patch Propagation Using Patch Sparsity, IEEE Trans. of Image Processing, 2010

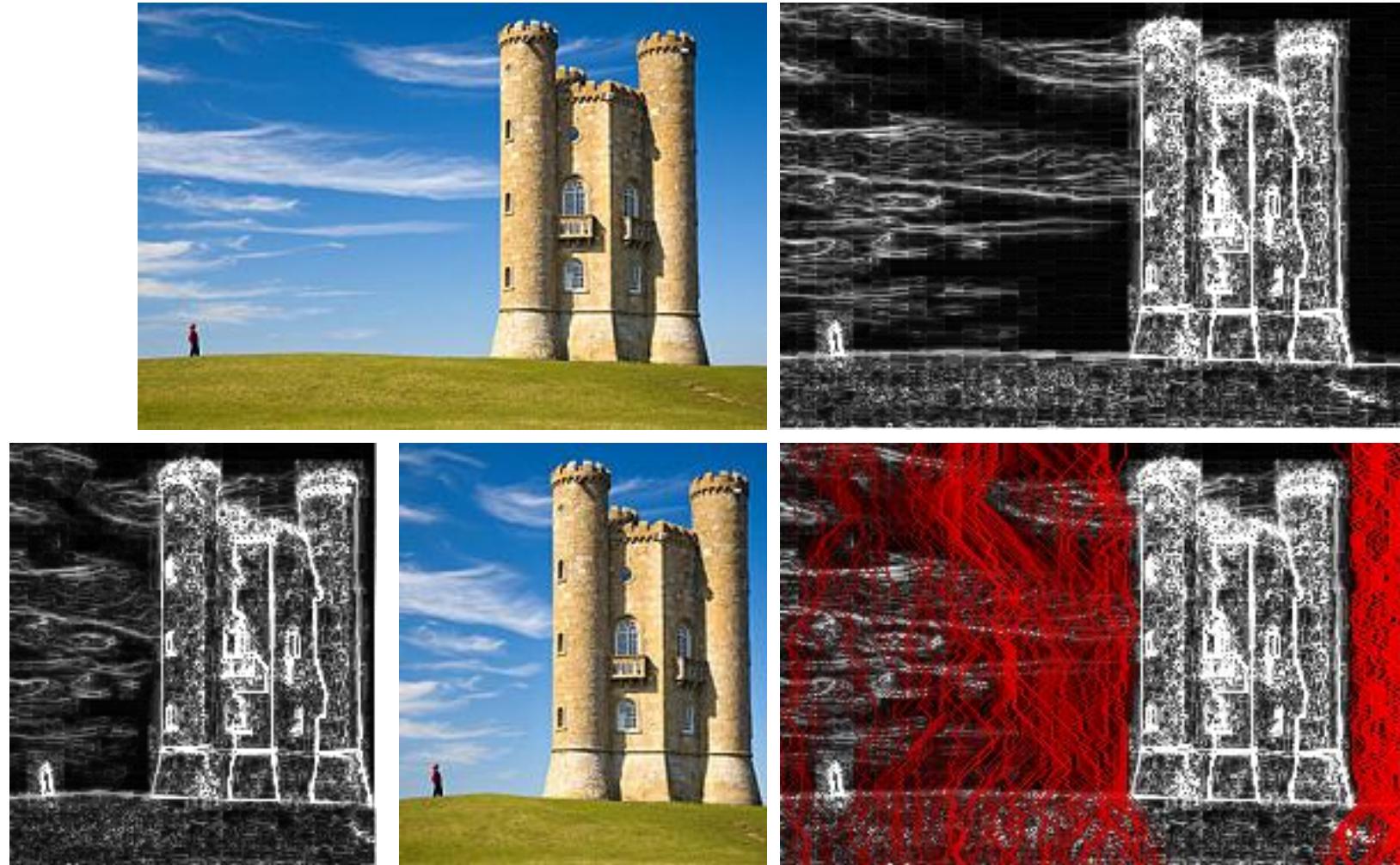
Image Retargeting



Автоматическое изменение пропорций изображений под нужный экран с сохранением «важного» содержания

Vidya Setlur, Saeko Takage, Ramesh Raskar, Michael Gleicher and Bruce Gooch «Automatic image retargeting», ACM MUM 2005

Seam carving



[Seam Carving for Content-Aware Image Resizing.](#) Shai Avidan,
Ariel Shamir, 2007.

Исторические примеры ретуши

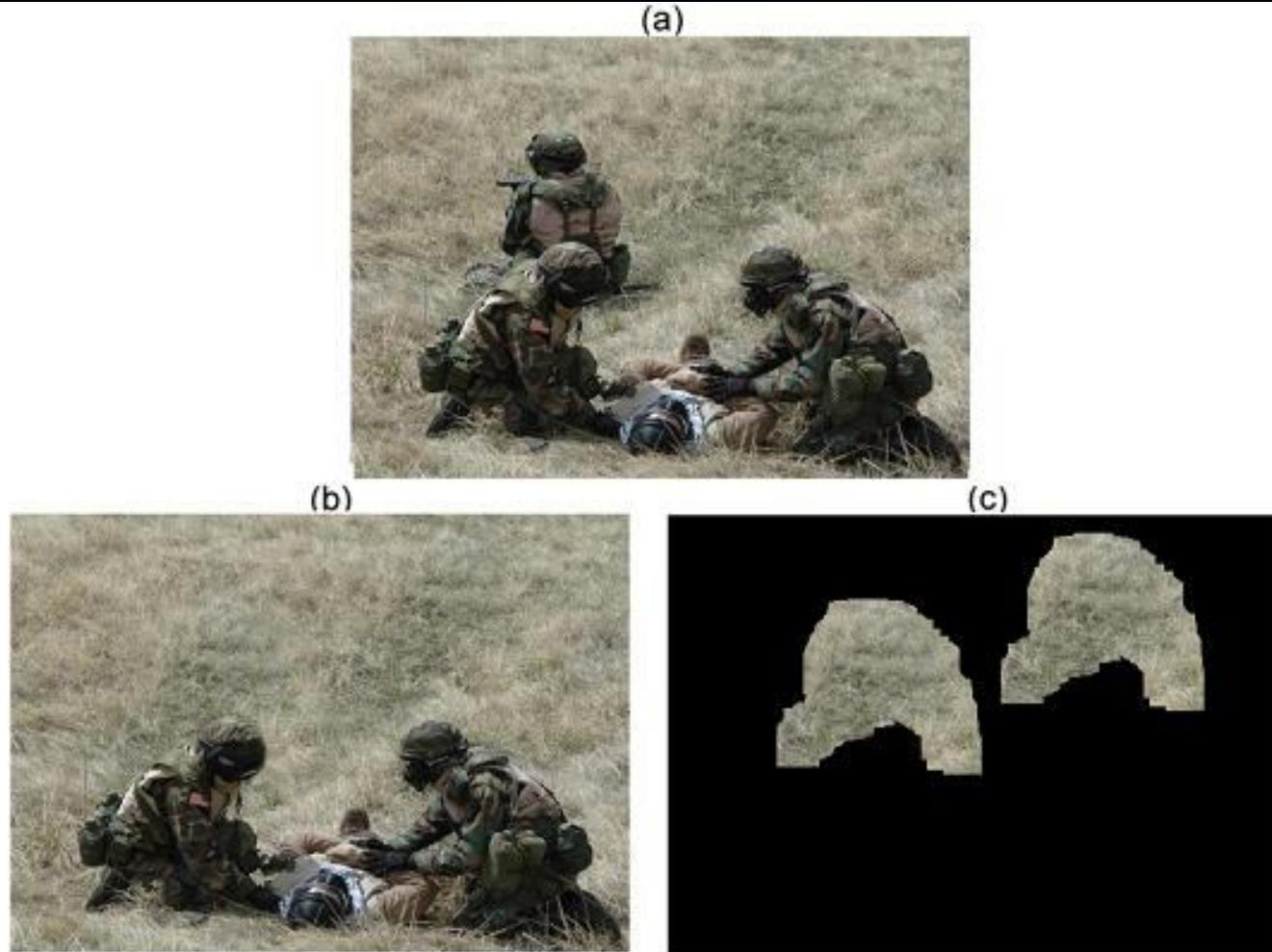


Идеи для обнаружения ретуши



- Клонирование объектов
 - Поиск похожих фрагментов
- Монтаж объектов
 - Оценка уровня шума
 - Оценка освещённости
- Передискретизация фрагментов
 - Оценка корреляции соседних пикселей
- Оценка JPEG
 - Оценка гистограмма коэффициентов после повторного сохранения
 - Поиск границ блоков после обрезания и сохранения фрагмента

Поиск клонирования



- Вычисление инвариантов(признаков) для каждого блока
- Поиск похожих блоков по всему изображению (kd-дерево)

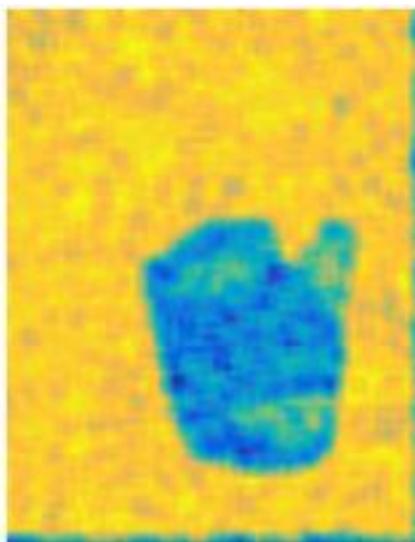
Поиск клонирования



Оценка шума и JPEG-артефактов



Фотомонтаж с помощью
продвинутого метода на
основе градиентов и
матирования



Оценка направления освещения



P. Nillius and J.-O. Eklundh, “Automatic estimation of the projected light source direction,” CVPR 2001

Использование для поиска подделок



Подделка



Реальное фото

Резюме



- Выделение объекта
 - Жесткая сегментация и матирование
 - Chroma Key
 - Magic Wand, Умные ножницы, разрезы графов, GrabCut
- Склейка фрагментов
 - Многополосная склейка
 - Градиентные методы (склейка по Пуассону)
 - Выбор оптимального разреза с GraphCut
 - Drag & Drop Pasting
- Inpainting
- Image retargeting
- Поиск подделок в изображениях

«Мастер фотошопа в деле»

