



# Исправление различий резкости в 3D-видео

Александр Белоус

*Video Group*  
*CS MSU Graphics & Media Lab*



# Содержание

---

- **Введение**
- Частотная реконструкция
- Пространственная реконструкция
- Размытие более резкого ракурса
- Заключение

# Введение

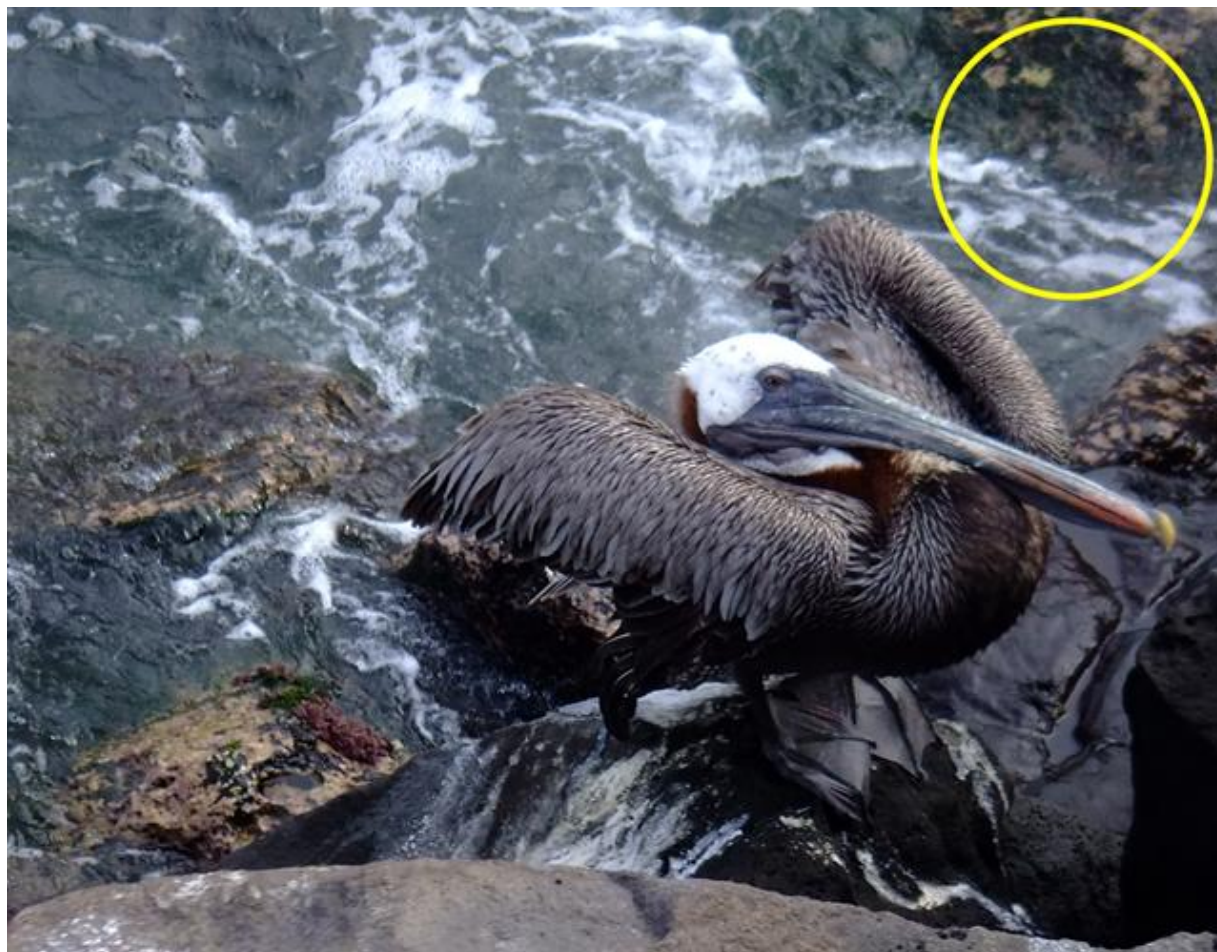
## Постановка задачи

Требуется устранить различия резкости между ракурсами, описываемые двумя случаями:

- Глобальное (несинхронизированные камеры)
- Локальное (геометрия сцены)

# Введение

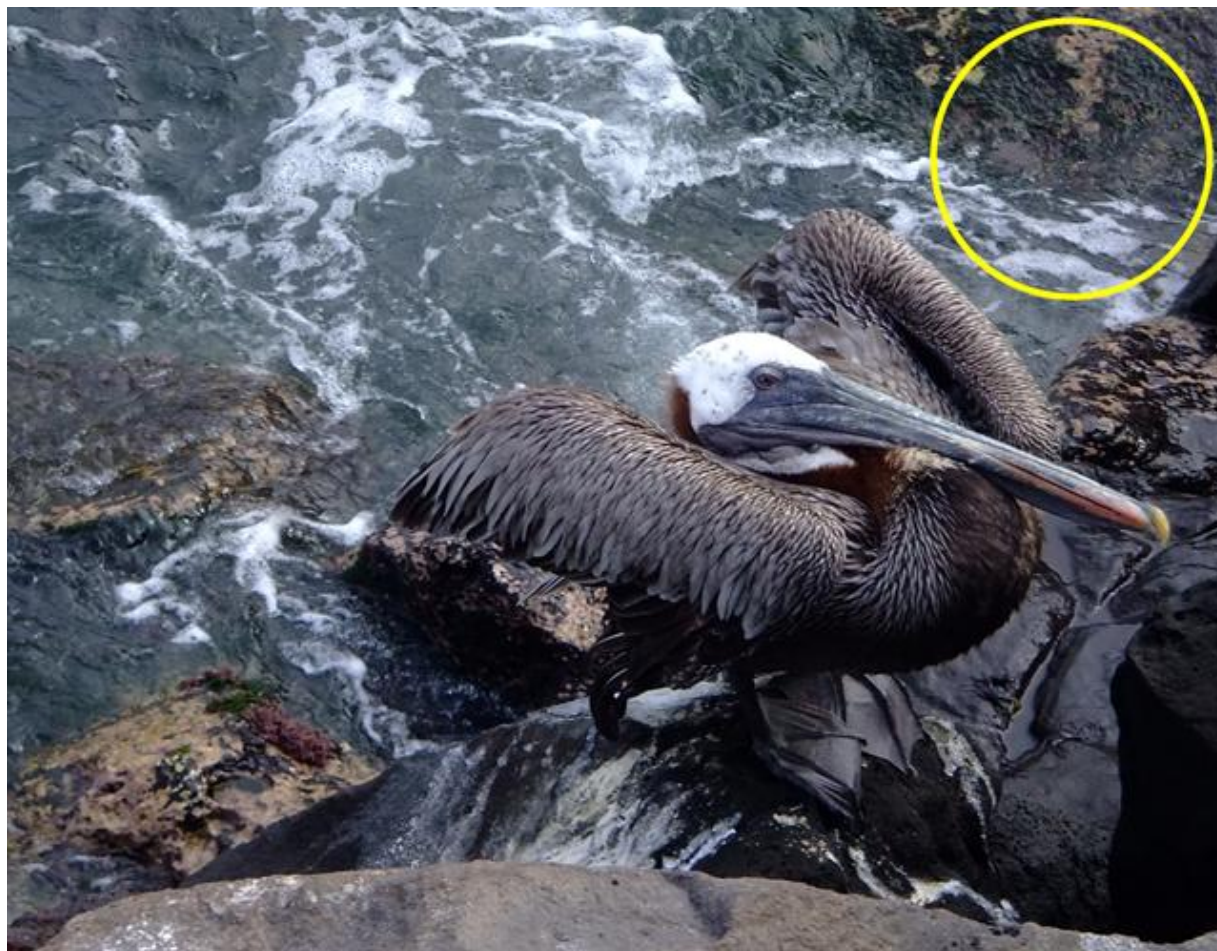
## Пример глобального несоответствия (1)



Левый ракурс

# Введение

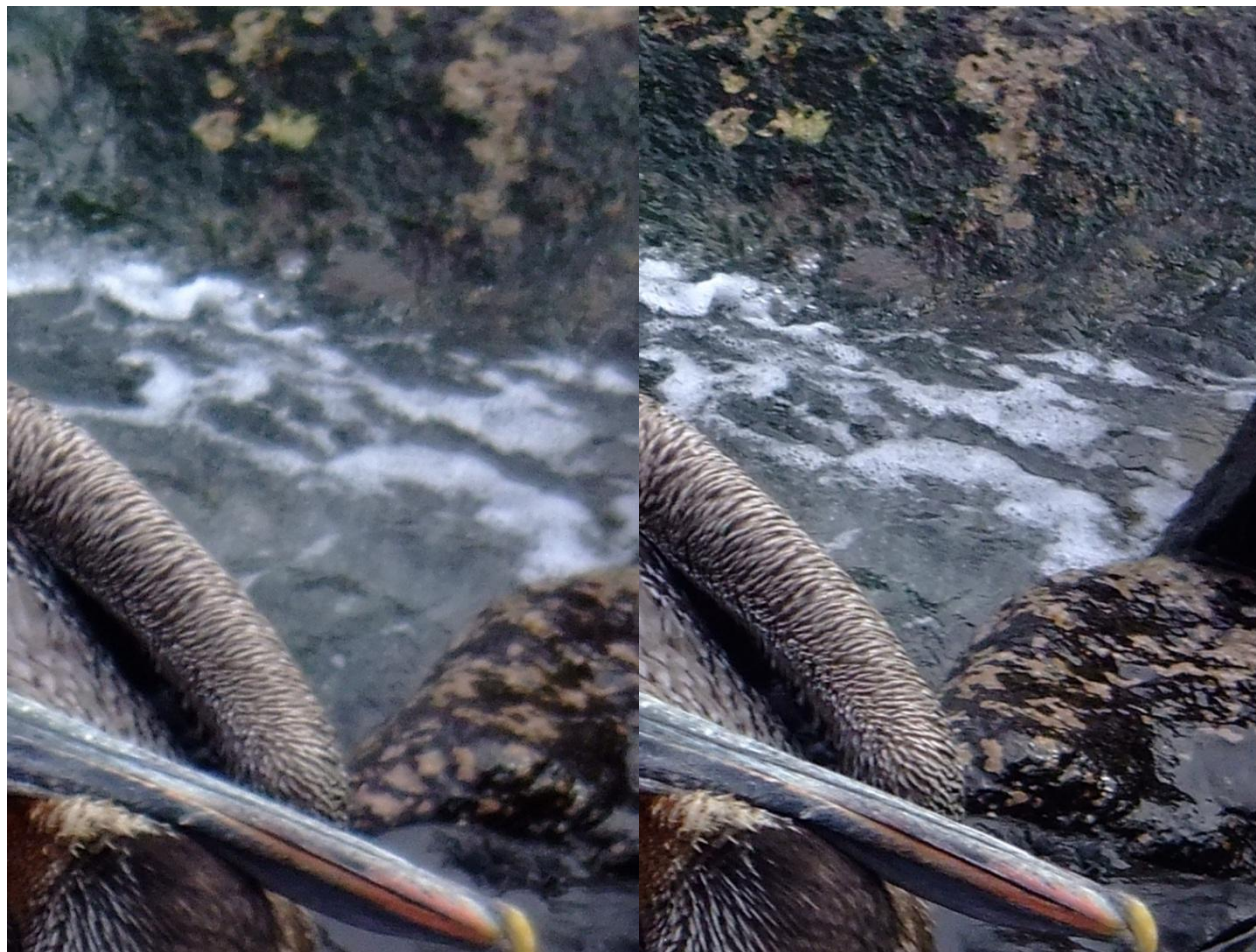
## Пример глобального несоответствия (2)



Правый ракурс

# Введение

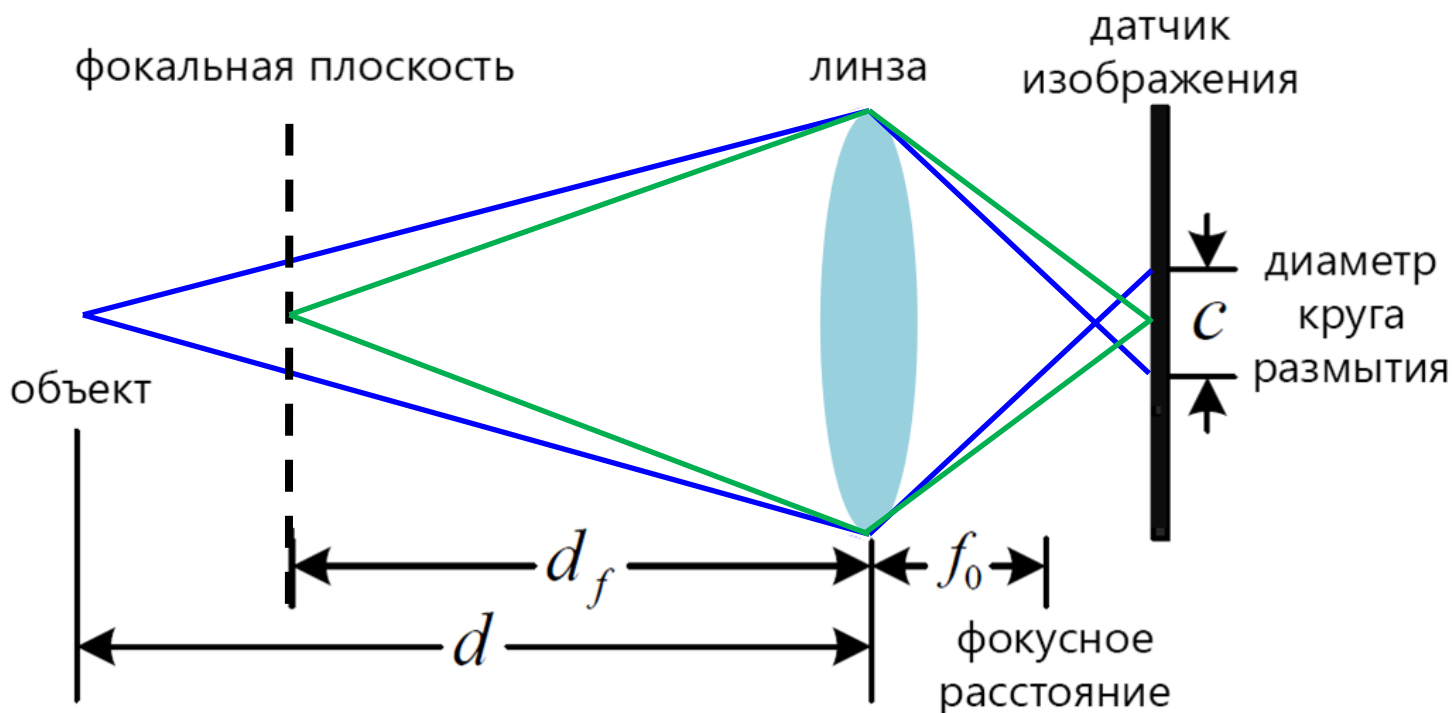
## Пример глобального несоответствия (3)



Сравнение

# Введение

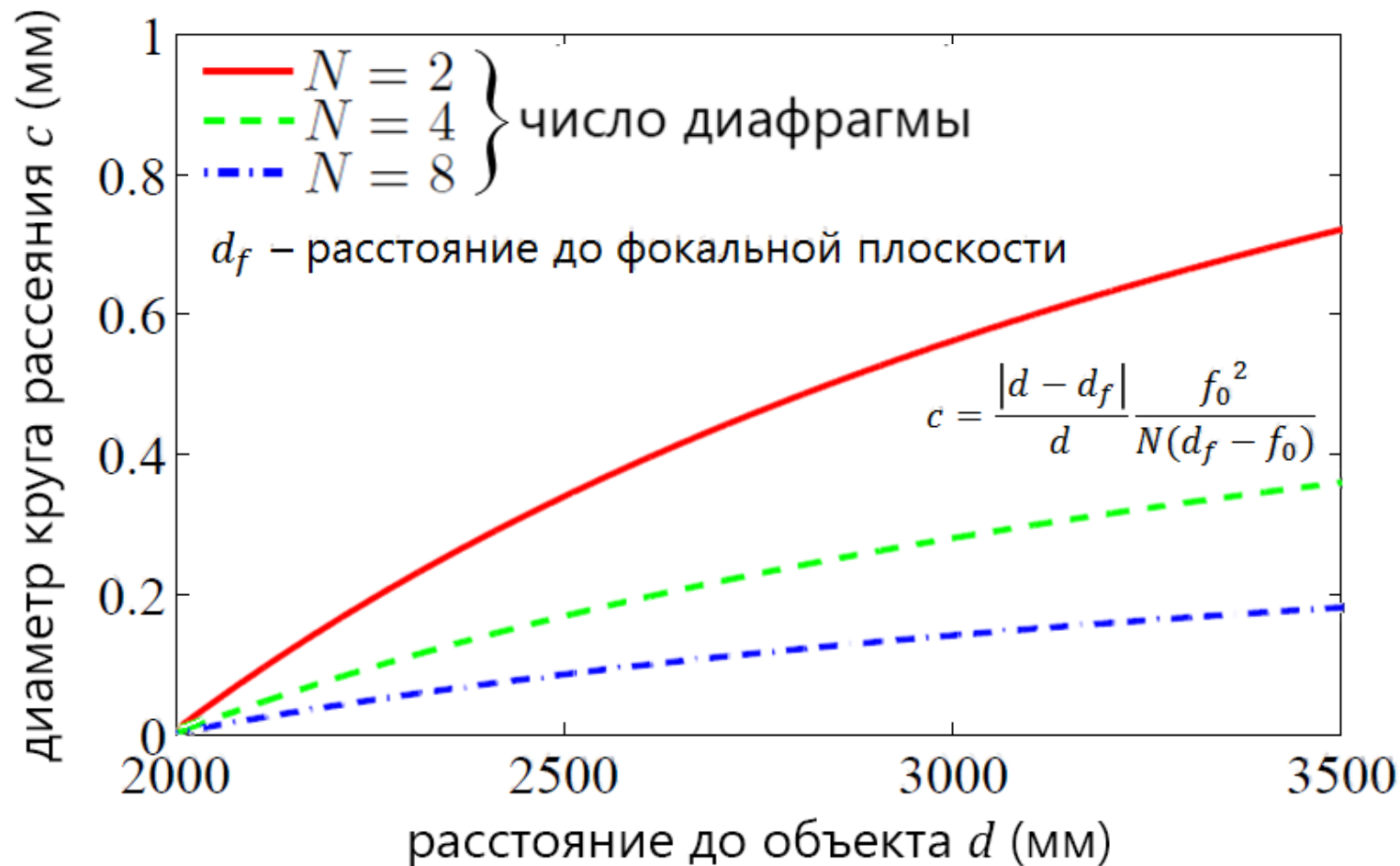
## Оптическая система (1)



Модель тонкой линзы. Сфокусированное  
и расфокусированное изображения

# Введение

## Оптическая система (2)





# Введение

## Оптическая система (3)

Даже знания глубины и расстояния  
до фокальной плоскости недостаточно  
для оценки размытия

# Введение

## Point spread function (1)

Для построения модели размытия используется функция рассеяния точки (PSF):

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y; \alpha, \beta) f(\alpha, \beta) d\alpha d\beta + \eta(x, y)$$

$f$  – объект

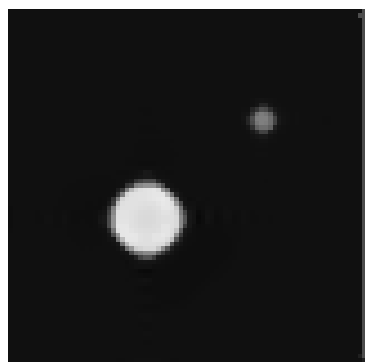
$g$  – его изображение

$h$  – функция рассеяния точки

$\eta$  – аддитивный шум

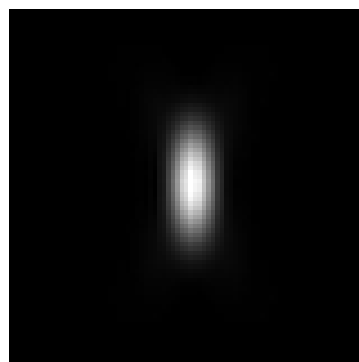
# Введение

## Point spread function (2)



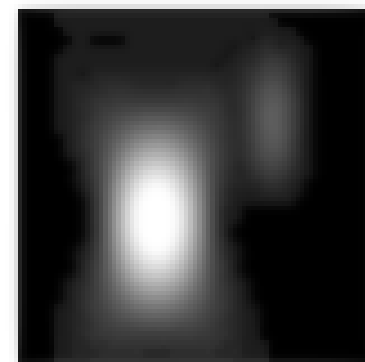
объект

\*



PSF

=



изображение



# Содержание

---

- Введение
- **Частотная реконструкция**
- Пространственная реконструкция
- Размытие более резкого ракурса
- Заключение

# Частотная реконструкция

## Шаги алгоритма

1. Дискретное косинусное преобразование ракурсов
2. Разделение на диапазоны частот
3. Оценка шума
4. Выравнивание сигнала
5. Обратное преобразование

# Шаг 1/5

## Дискретное косинусное преобразование

■ Преобразование  $f(x, y)$  в базис  $(u, v)$ :

$$C(u, v) = \alpha(u)\alpha(v) \sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} f(x, y) \cos\left[\frac{\pi(2x+1)u}{2W}\right] \cos\left[\frac{\pi(2y+1)v}{2H}\right]$$

$$\alpha(u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}}, u = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, u \neq 0 \end{cases}$$

# Шаг 1/5

## Пример из фильма «Аватар» (1)



Левый ракурс



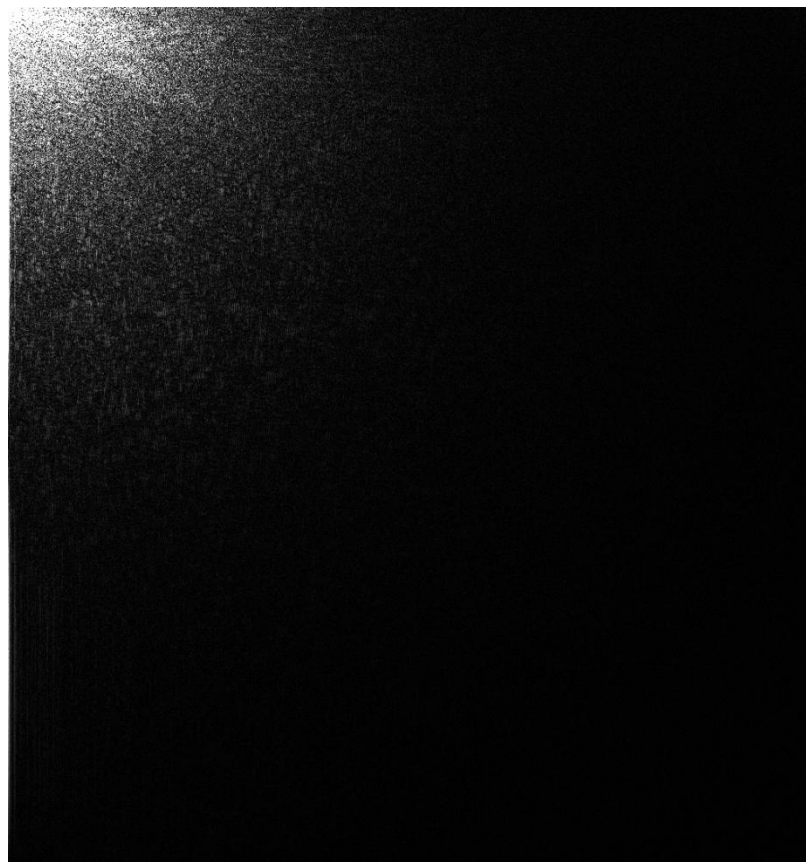
ДКП

# Шаг 1/5

## Пример из фильма «Аватар» (2)



Правый ракурс



ДКП



# Шаг 1/5

## Пример из фильма «Аватар» (3)



Размытый правый ракурс



ДКП

# Шаг 2/5

## Разделение на диапазоны частот (1)

- Коэффициенты ДКП разбиваются на диапазоны  $(u_i \leq u < u_{i+1}, v_i \leq v < v_{i+1})$

$$u_i = \text{round} \left( \frac{i \cdot W}{M} \right)$$

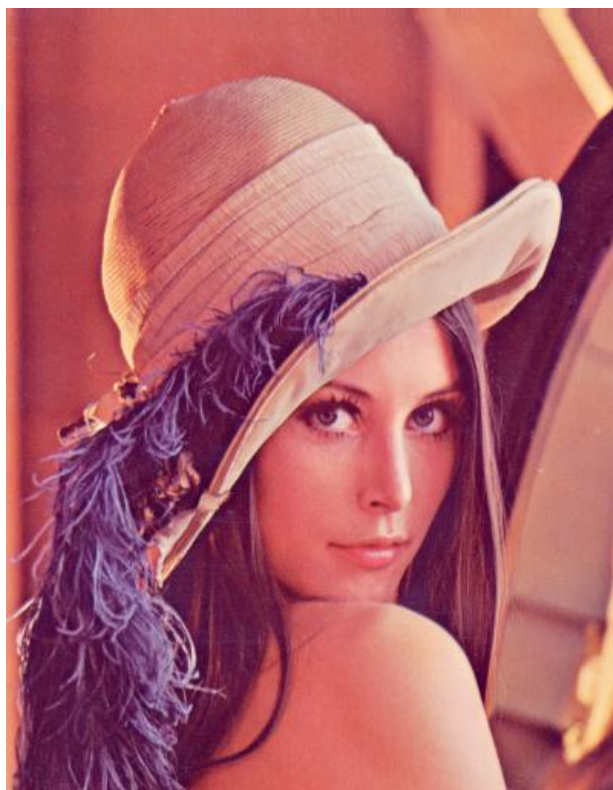
$$v_j = \text{round} \left( \frac{j \cdot H}{M} \right)$$

Авторы используют количество диапазонов

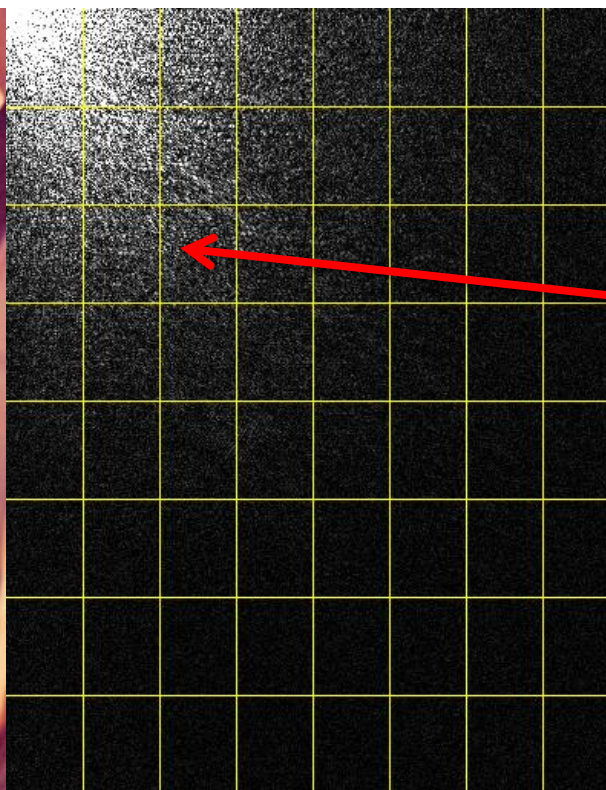
$$M = 20$$

# Шаг 2/5

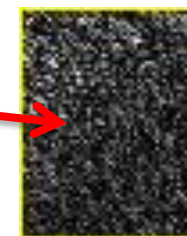
## Разделение на диапазоны частот (2)



изображение



ДКП



полоса ДКП

# Шаг 3/5

## Оценка шума

- Рассмотрим в качестве модели аддитивный белый гауссовский шум с дисперсией

$$\sigma_N = \frac{\text{median}_{u > u_T, v > v_T} (|\tilde{I}(u, v)|)}{0.6745}$$

$\tilde{I}$  – ДКП изображения

$u_T, v_T$  – нижние пороги высоких частот

(Авторы используют  $u_T = W - 20$   
 $v_T = H - 20$ )

# Шаг 4/5

## Выравнивание сигнала (1)

Для каждого диапазона вычисляется суммарная энергия сигнала:

$$En_{ij}(\tilde{I}) = \sum_{u=u_i}^{u_{i+1}-1} \sum_{v=v_i}^{v_{i+1}-1} \left( \tilde{I}(u, v) \right)^2$$

С учетом шума:

$$En_{ij}(HI) = \max(0, En_{ij}(\tilde{I}) - C_{ij}\sigma_N^2)$$

$\tilde{I}$  – ДКП изображения

$C_{ij}$  – количество коэффициентов в диапазоне

# Шаг 4/5

## Выравнивание сигнала (2)

- $En_{ij,\max} = \max[En_{ij}(HI_L), En_{ij}(HI_R)]$

Коэффициенты диапазонов левого и правого ракурса умножаются на

$$G_{ij,L} = \sqrt{\frac{En_{ij,\max}}{En_{ij}(HI_L)}} \text{ и } G_{ij,R} = \sqrt{\frac{En_{ij,\max}}{En_{ij}(HI_R)}}$$

Таким образом, энергия сигналов становится равной

# Шаг 5/5

## Обратное преобразование

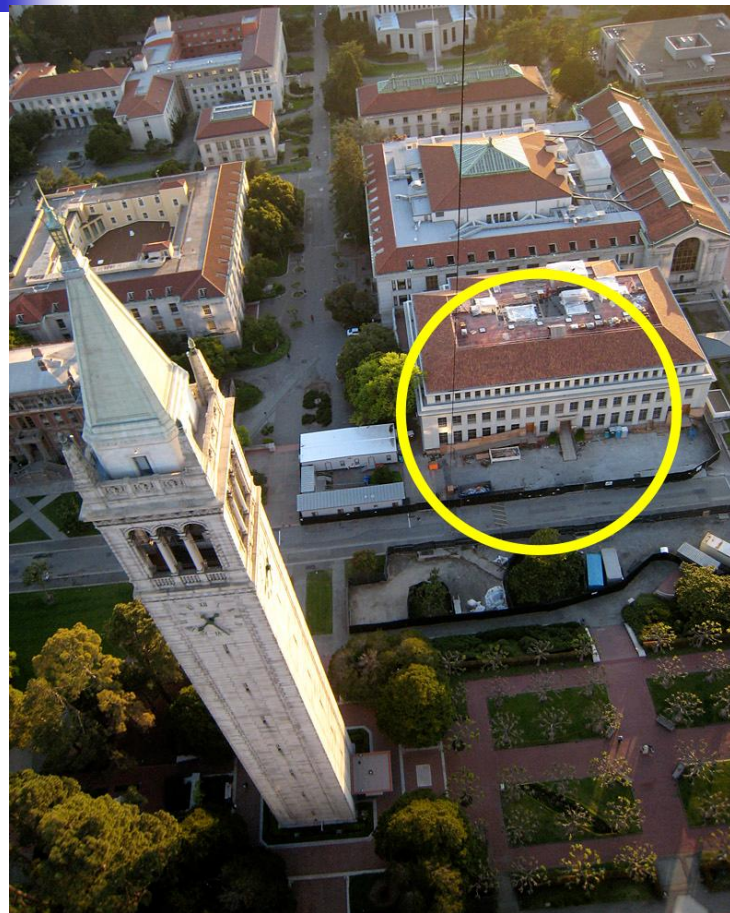
- К полученным коэффициентам применяем обратное ДКП и получаем изображение:

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{W-1} \sum_{v=0}^{H-1} \alpha(u)\alpha(v)C(u, v) \cos\left[\frac{\pi(2x+1)u}{2W}\right] \cos\left[\frac{\pi(2y+1)v}{2H}\right]$$

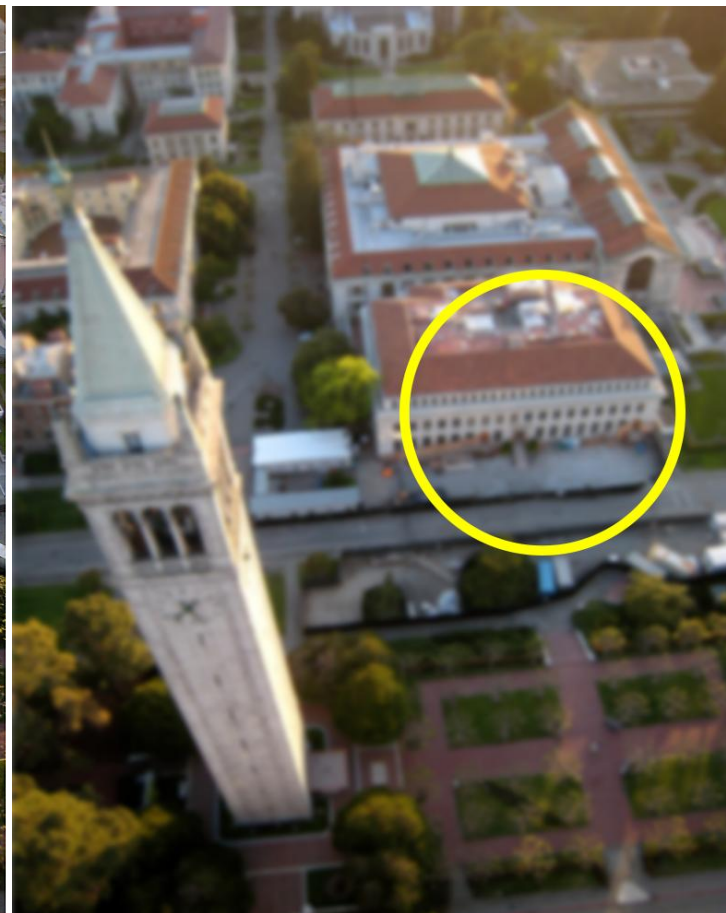
$$\alpha(u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}}, u = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, u \neq 0 \end{cases}$$

# Частотная реконструкция

## Собственная реализация (1)



левый ракурс

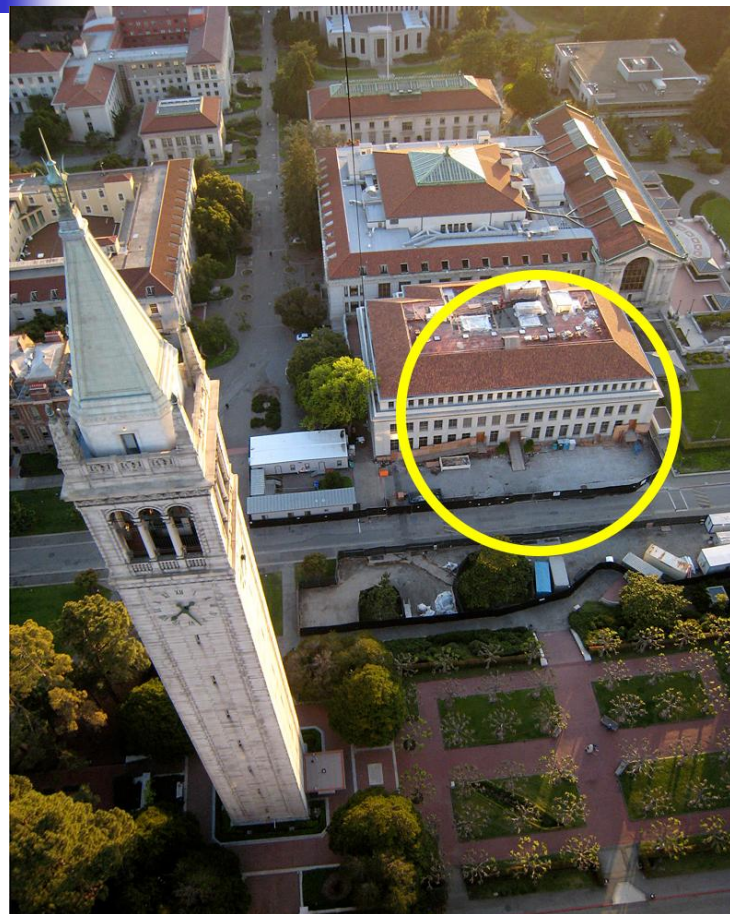


правый ракурс  
(размытый фильтром Гаусса,  $\sigma = 3$ )

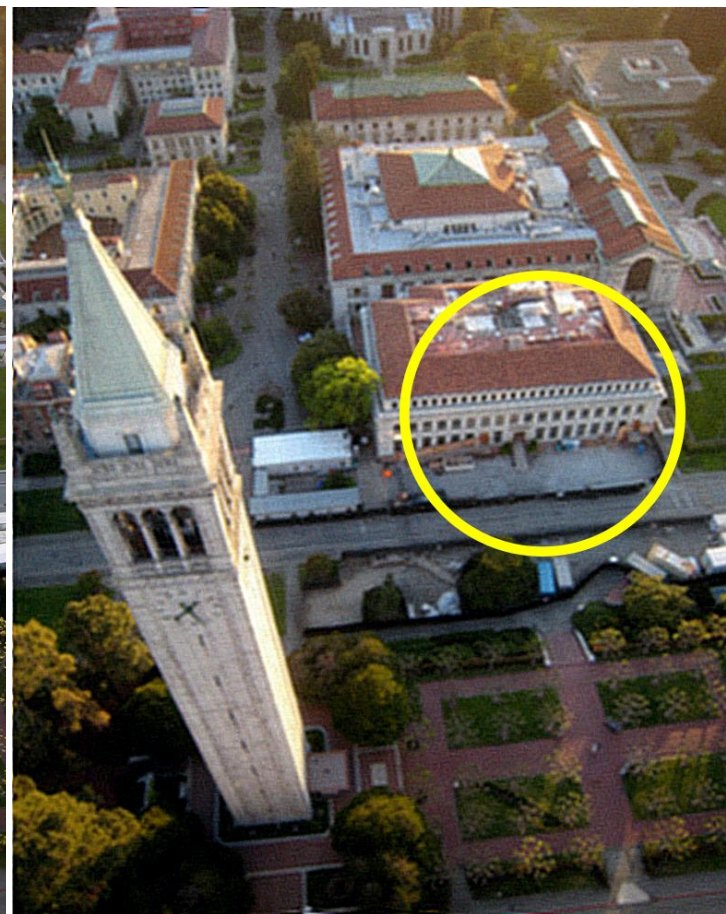


# Частотная реконструкция

## Собственная реализация (2)



правый ракурс (до размытия)



правый ракурс  
(результат)

# Частотная реконструкция

## Собственная реализация (3)



правый ракурс  
(до размытия)



правый ракурс  
(результат)

# Частотная реконструкция

## Собственная реализация (4)



правый ракурс  
(до размытия)



правый ракурс  
(результат unsharp masking)

# Частотная реконструкция

## Пример из фильма «Аватар» (1)



левый ракурс

# Частотная реконструкция

## Пример из фильма «Аватар» (2)



левый ракурс (исправленный, используется плавающее окно)

# Частотная реконструкция

## Пример из фильма «Аватар» (3)



правый ракурс

# Частотная реконструкция

## Выводы

### Достоинство:

- Позволяет восстанавливать области открытия

### Недостатки:

- Применим только для одинакового глобального несоответствия резкости
- Не учитывает диспаратет
- Результаты зашумлены (несмотря на то, что шум учитывается)



# Содержание

---

- Введение
- Частотная реконструкция
- Пространственная реконструкция
  - **Blur and Contrast Invariants**
    - Blur Robust Cost
- Размытие более резкого ракурса
- Заключение



# Blur and Contrast Invariants

## Основная идея (1)



Будем использовать для сопоставления ракурсов устойчивые к размытию свойства изображения

Теорема:

Тангенс фазового значения преобразования Фурье инвариантен к размытию

# Blur and Contrast Invariants

## Основная идея (2)

Рассмотрим следующую модель размытия:

$$g(x, y) = (f * h)(x, y),$$

$f$  – идеальное изображение

$h$  – функция рассеяния точки (PSF)

$g$  – наблюдаемое изображение

После преобразования Фурье:

$$G(x, y) = F(x, y) \cdot H(x, y)$$

$$\arg G(x, y) = \arg F(x, y) + \arg H(x, y)$$

$$\tan \arg G(x, y) = \tan \arg F(x, y)$$

# Blur and Contrast Invariants

## Применение для сопоставления стерео

Каждому блоку  $A$  ( $N \times N$ ) ставится в соответствие дескриптор:

$$G^k(A) = \{2k\Phi_A(u, v) \mid 0 \leq u, v \leq N - 1\}$$

$\Phi_A(u, v)$  – фазовое значение в спектральном домене

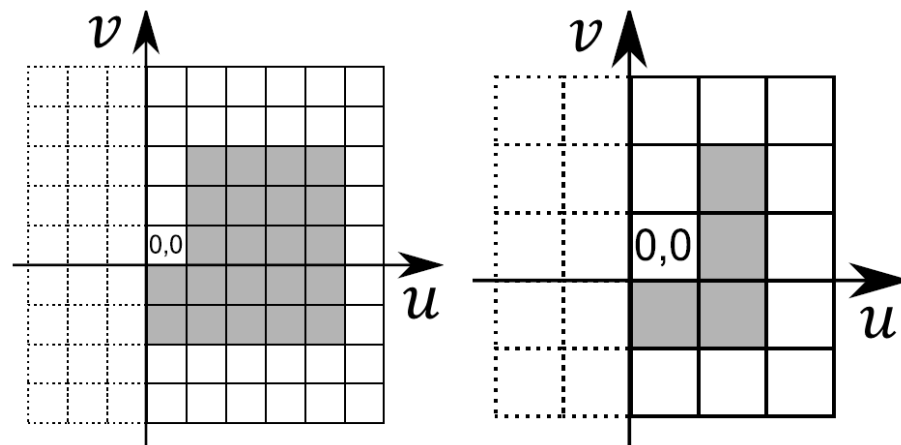
Цифровое представление дескриптора:

$$D_{r,s}^{k,b}(A) = \left\{ \left\lfloor \frac{2^{b-1}}{\pi} \arg(\Phi_A(u, v)^k) \right\rfloor \mid u \in [0, r], v \in [-s; s], u + \operatorname{sgn}(v - 1) \geq 0 \right\}$$

$b, r, s \geq 0$ ;  $k \in \{1, 2\}$ , область значений  $\arg$ :  $[-\pi; \pi)$

# Blur and Contrast Invariants

## Метрика сравнения



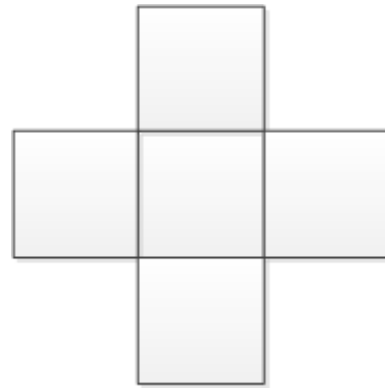
Область суммирования при  
 $r = 4, s = 2$  (слева),  
 $r = 1, s = 1$  (справа)

■ Метрика сравнения блоков  $A$  и  $B$ :

$$m(A, B) = \sum_{\substack{j: d_A(j) \in D_{r,s}^{k,b}(A) \\ d_B(j) \in D_{r,s}^{k,b}(B)}} f(|d_A(j) - d_B(j)|), \quad f(x) = \begin{cases} x, & |x| \leq M \\ 2M - x, & |x| > M \end{cases} \quad M = 2^{b-1}$$

# Blur and Contrast Invariants

## Построение disparity map

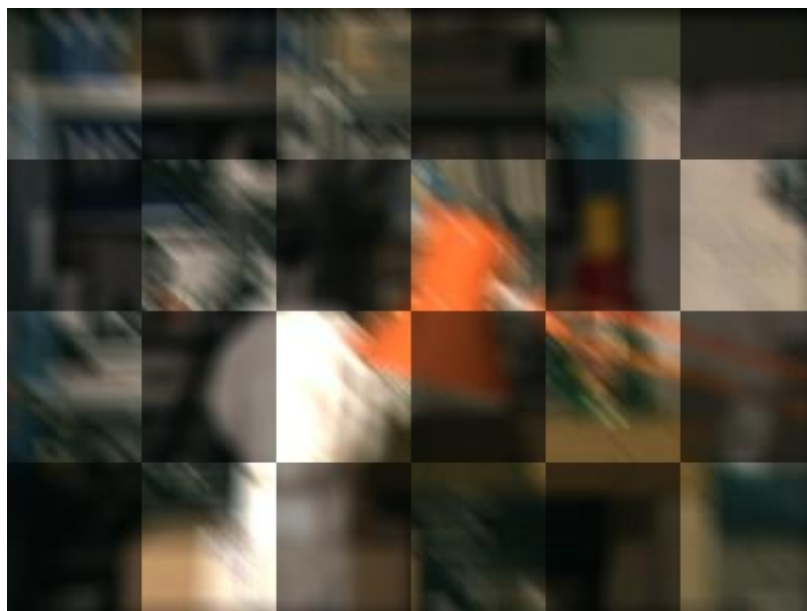


Метрика усредняется по каждому пяти независимым блокам

Результат дополнительно сглаживается с помощью Dynamic Programming Scanline Optimization

# Blur and Contrast Invariants

## Результаты (1)



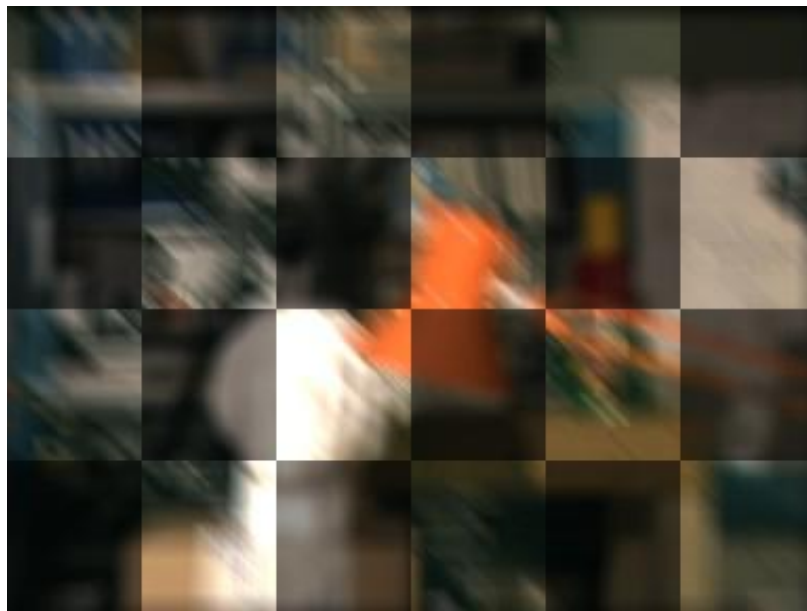
Левый ракурс



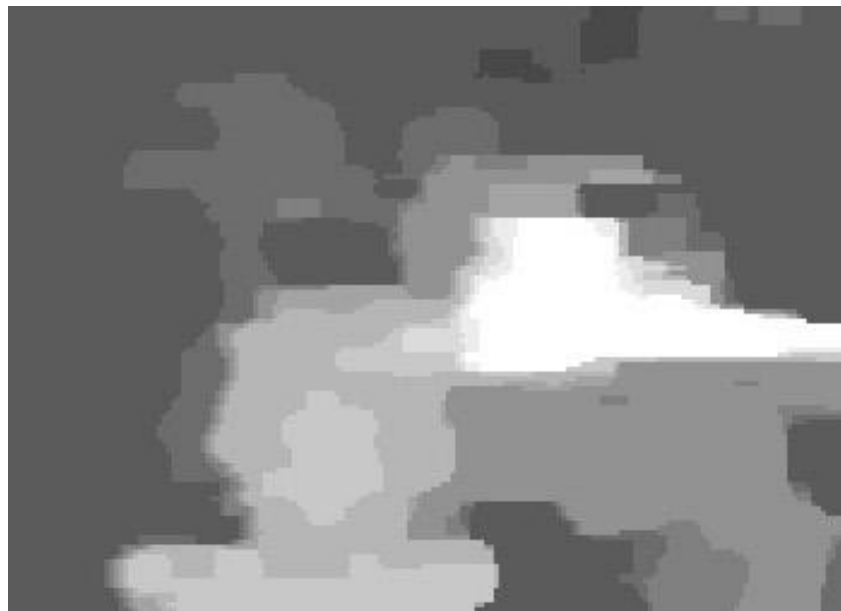
Ground truth

# Blur and Contrast Invariants

## Результаты (2)



Левый ракурс



Результат

# Blur and Contrast Invariants



## Выводы

### Достоинства:

- Имеет низкую вычислительную сложность
- Применим для локального несоответствия по резкости

### Недостаток:

- Не позволяет реконструировать области открытия





# Содержание

---

- Введение
- Частотная реконструкция
- Пространственная реконструкция
  - Blur and Contrast Invariants
  - **Blur Robust Cost**
- Размытие более резкого ракурса
- Заключение

# Blur Robust Cost

## Введение



Increasing level of blur  
↓

Подход «в лоб»: последовательно  
сравнивать более размытый ракурс  
с четким, но размытым с разной силой.  
Конечно, это будет долго...

...

# Blur Robust Cost

## Основная идея (1)

Авторы предлагают размыть изображение один раз фильтром достаточно большого радиуса

Используется модель дискового фильтра (disk filter) с функцией рассеяния точки (PSF)

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi r^2}, & x^2 + y^2 \leq r^2 \\ 0, & x^2 + y^2 > r^2 \end{cases}$$

# Blur Robust Cost

## Основная идея (2)

Свойством такого фильтра является непрерывная зависимость получаемого изображения от радиуса размытия в каждой точке, т.е.  $i_{x,y}(r) \in C(r)$

По теореме Больцано — Коши:

$\forall i_{mid}$  между  $i(0)$  и  $i(r_{max})$   $\exists$  радиус размытия  $r_{mid}$ :  
 $i(r_{mid}) = i_{mid}$ , причем  $0 \leq r_{mid} \leq r_{max}$

# Blur Robust Cost

## Описание метрики

Итоговая метрика  $D = \min(D_{CB}, D_{RB} + P, D_{LB} + P)$ , где  
 $D_{CB} = |I_L - I_R|$

$$D_{RB} = \begin{cases} 0, & \min(I_R, I_{RB}) \leq I_L \leq \max(I_R, I_{RB}) \\ |I_L - I_{RB}|, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$D_{LB} = \begin{cases} 0, & \min(I_L, I_{LB}) \leq I_R \leq \max(I_L, I_{LB}) \\ |I_R - I_{LB}|, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$I_L, I_R$  — левый и правый ракурсы

$I_{LB}, I_{RB}$  — их размытые версии

$P$  — штрафной коэффициент

# Blur Robust Cost

## Собственная реализация алгоритма (1)



правый ракурс

# Blur Robust Cost

## Собственная реализация алгоритма (2)



исправленный правый ракурс

# Blur Robust Cost

## Собственная реализация алгоритма (3)



левый ракурс



# Blur Robust Cost

## Выводы

### Достоинство:

- Низкая вычислительная сложность

### Недостаток:

- Не позволяет реконструировать области открытия



# Содержание

---

- Введение
- Частотная реконструкция
- Пространственная реконструкция
- **Размытие более резкого ракурса**
- Заключение

# Размытие более резкого ракурса



- Требуется определить PSF для обоих ракурсов либо разницу резкости между ними
- Задача тесно связана с методом Depth from Focus

# Defocus Map Estimation

## Основная идея

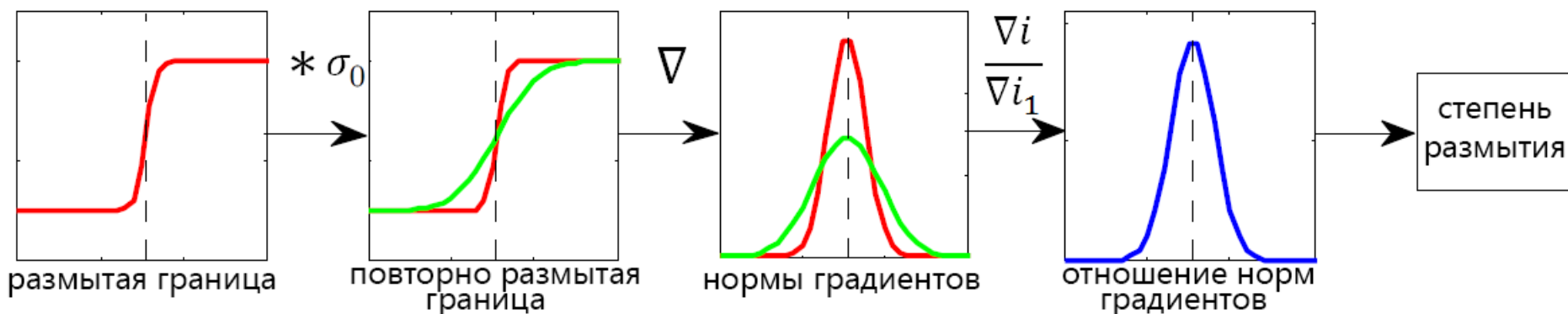
В качестве PSF используется гауссова функция  $g(x, \sigma)$ , где  $\sigma$  прямо пропорционально диаметру круга рассеяния

Метод оценивает размытие на границах изображения

# Defocus Map Estimation

## Схема работы

### Оценка размытия на границе:



# Defocus Map Estimation

## Формализация метода

Граница изображения:  $f(x) = Au(x) + B$ ,

$u(x)$  – ступенчатая функция

$A, B$  – амплитуда и смещение границы

Размытая граница:  $i(x) = f(x) * g(x, \sigma)$

Градиент размытой заново границы:

$$\nabla i_1(x) = \nabla (i(x) * g(x, \sigma_0))$$

$$= \nabla ((Au(x) + B) * g(x, \sigma) * g(x, \sigma_0))$$

$$= \frac{A}{\sqrt{2\pi(\sigma^2 + \sigma_0^2)}} \exp\left(-\frac{x^2}{2(\sigma^2 + \sigma_0^2)}\right)$$

# Defocus Map Estimation

## Оценка размытия

$$\frac{|\nabla i(x)|}{|\nabla i_1(x)|} = \sqrt{\frac{\sigma^2 + \sigma_0^2}{\sigma^2}} \exp \left( - \left( \frac{x^2}{2\sigma^2} - \frac{x^2}{2(\sigma^2 + \sigma_0^2)} \right) \right)$$

$$R = \frac{|\nabla i(0)|}{|\nabla i_1(0)|} = \sqrt{\frac{\sigma^2 + \sigma_0^2}{\sigma^2}}$$

Окончательная оценка параметра  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{R^2 - 1}} \sigma_0$$

# Defocus Map Estimation

## Интерполяция карты размытия

Полученная на этот момент карта размытия определена только на границах объектов

Авторы используют заполняющий лапласиан (Matting Laplacian) для интерполяции на всё изображение



# Defocus Map Estimation

## Детали алгоритма

- Авторы используют  $\sigma_0 = 1$  в качестве параметра повторного размытия
- Для выделения границ используется алгоритм Canny Edge Detector
- Для повышения качества применяется кросс-билатеральная фильтрация

# Defocus Map Estimation

## Результаты (1)



### тестовые изображения

S. Zhuo and T. Sim, "Defocus Map Estimation from a Single Image," in *The Journal of the Pattern Recognition Society*, vol. 44, pp. 1852–1858, 2011

# Defocus Map Estimation

## Результаты (2)

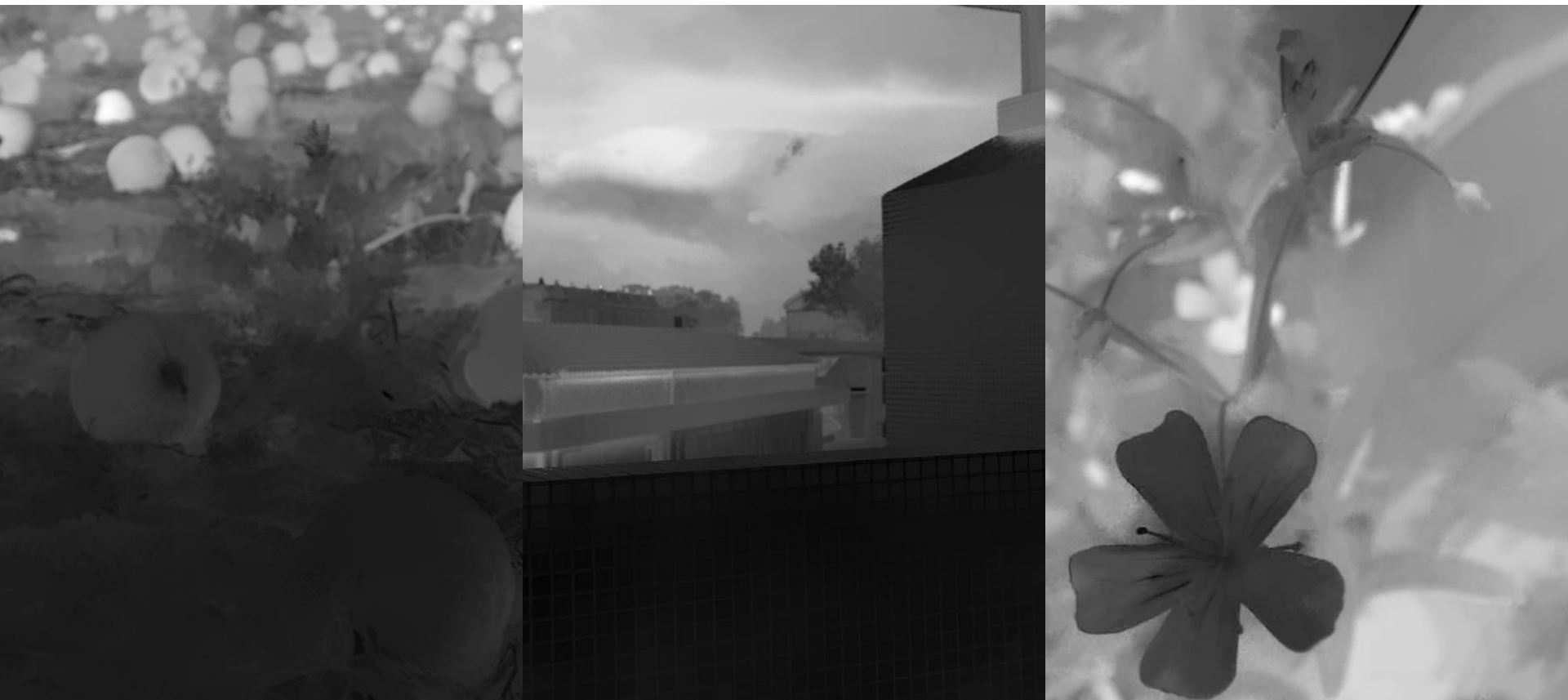


оценка размытия на границах

S. Zhuo and T. Sim, "Defocus Map Estimation from a Single Image," in *The Journal of the Pattern Recognition Society*, vol. 44, pp. 1852–1858, 2011

# Defocus Map Estimation

## Результаты (3)



### карты размытия

S. Zhuo and T. Sim, "Defocus Map Estimation from a Single Image," in *The Journal of the Pattern Recognition Society*, vol. 44, pp. 1852–1858, 2011

# Defocus Map Estimation

## Выводы

### Достоинства:

- Высокое качество результата (судя по примерам в статье)
- Возможность обработки областей открытия за счет экстраполяции

### Недостаток:

- Чувствительность к точности карты диспаратета



# Содержание

---

- Введение
- Частотная реконструкция
- Пространственная реконструкция
- Размытие более резкого ракурса
- **Заключение**



# Анализ алгоритмов

---

- Алгоритмы пространственной реконструкции ракурса не могут решить проблему областей открытия
- С другой стороны, для размытия резкого ракурса эта проблема разрешима
- Оптимальный результат можно получить комбинацией этих методов



# Планы

---

- Улучшить метод частотной реконструкции, используя карту диспаратета
- Рассмотреть возможность использования этого метода для определения маски размытия
- Реализовать размытие более резкого ракурса по рассказанному алгоритму
- Опробовать комбинированный подход для повышения качества



# Литература

1. C. Doutre and P. Nasiopoulos, "Correcting Sharpness Variations in Stereo Image Pairs," in *Conference for Visual Media Production*, London, November 2009, pp. 45–51.
2. J. Flusser and T. Suk, "Degraded Image Analysis: An Invariant Approach," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, vol. 20, pp. 590–603.
3. M. Pedone and J. Heikkila, "Blur and Contrast Invariant Fast Stereo Matching," in *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*, 2008, pp. 883–890.
4. C. Doutre and P. Nasiopoulos, "A Stereo Matching Data Cost Robust to Blurring," in *IEEE International Conference on Image Processing*, September 2010, pp. 1773–1776.
5. S. Zhuo and T. Sim, "Defocus Map Estimation from a Single Image," in *The Journal of the Pattern Recognition Society*, 2011, vol. 44, pp. 1852–1858.

# Лаборатория компьютерной графики и мультимедиа



Видеогруппа — это:

- Выпускники в аспирантурах Англии, Франции, Швейцарии (в России в МГУ и ИПМ им. Келдыша)
- Выпускниками защищены 5 диссертаций
- Наиболее популярные в мире сравнения видеокодеков
- Более 3 миллионов скачанных фильтров обработки видео