Некоторые алгоритмы многомерной обработки изображений

Юрий Бердников

Video Group
CS MSU Graphics & Media Lab

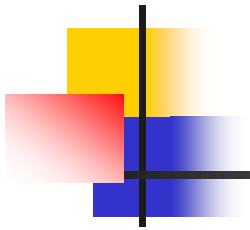
Содержание

- **Введение**
- Gaussian KD-Tree
- Permutohedral Lattice (PL)
- Adaptive Manifolds (AM)
- Заключение

Введение

- Алгоритмы многомерной фильтрации применяются почти во всех наших проектах
- Они универсальны
- Они медленно работают

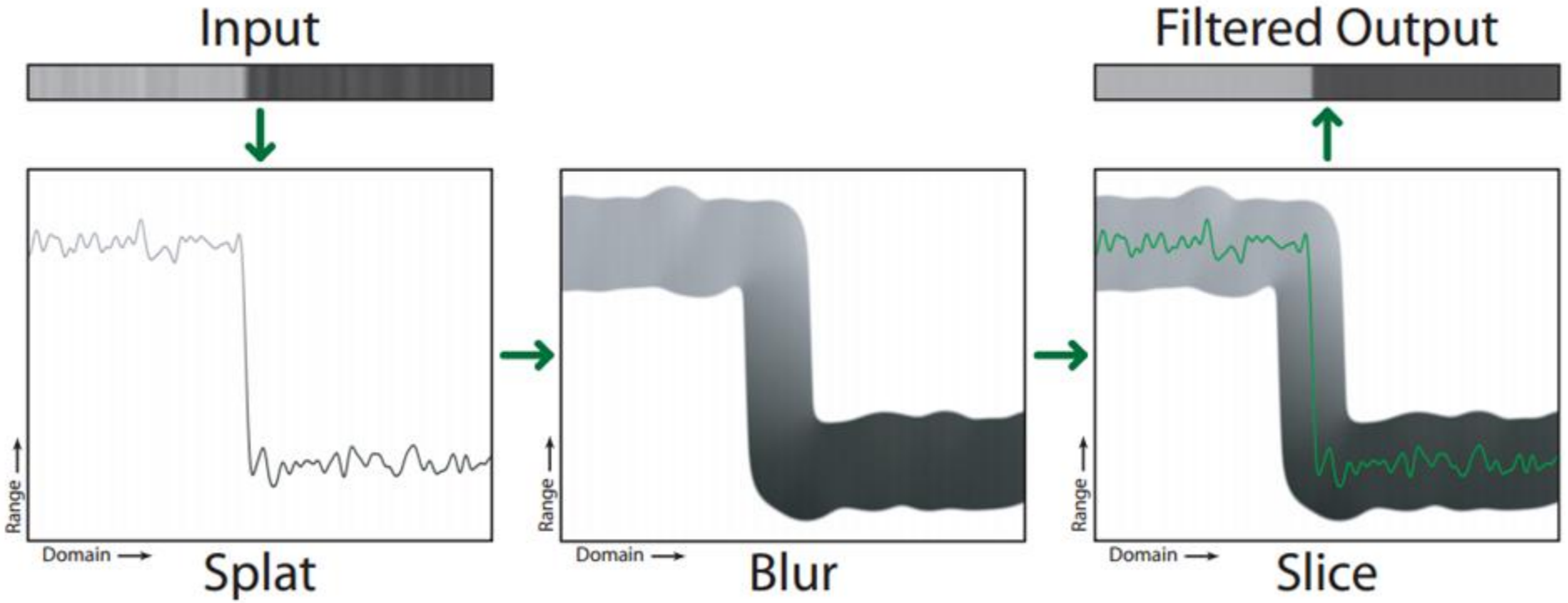
Изображение из Mr. Barlow's blog
http://mrbarlow.wordpress.com/2008/11/30/turtle-in-a-half-shell-turtle-power/



Содержание

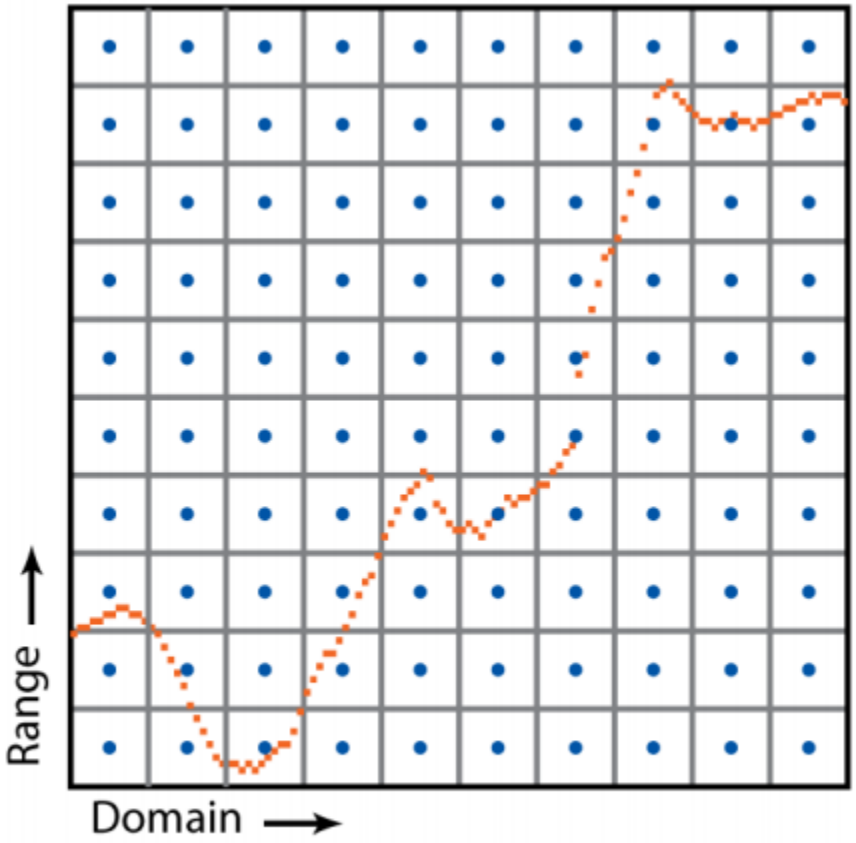
- Введение
- **Gaussian KD-Tree**
- Permutohedral Lattice (PL)
- Adaptive Manifolds (AM)
- Заключение

Основы метода



Bilateral grid

- Равномерная сетка
- Экспоненциальный рост количества точек с ростом размерности пространства

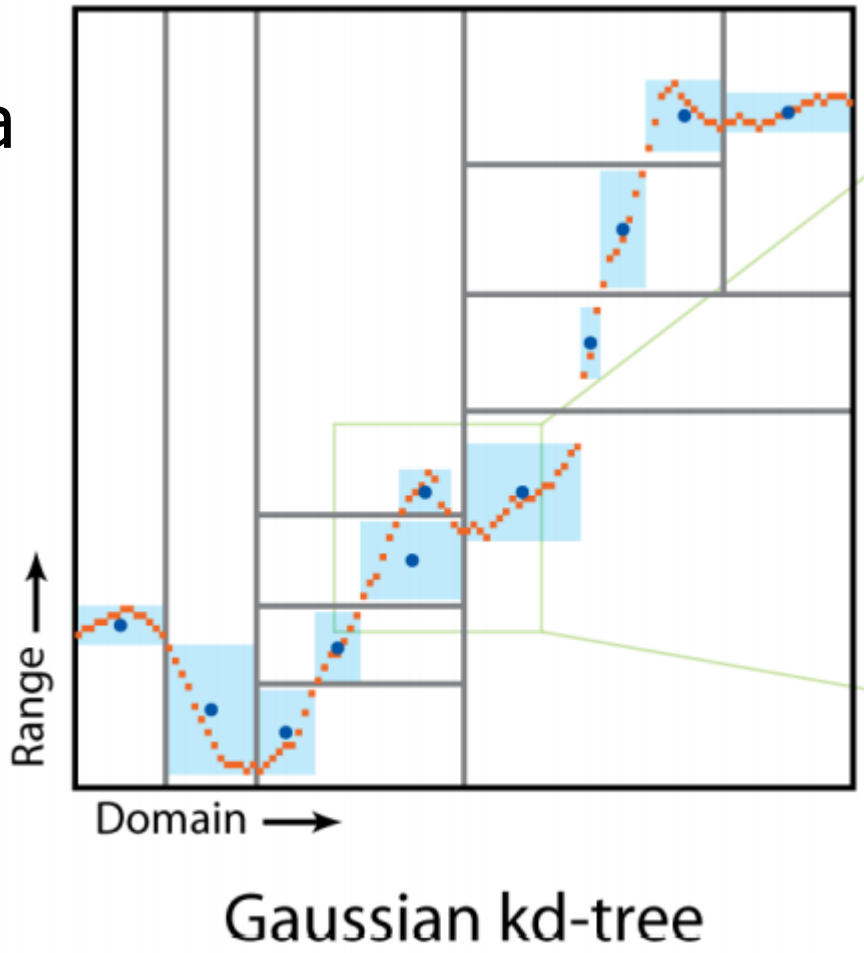


Bilateral grid

Andrew Adams et al., "Gaussian KD-Trees for Fast High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2009

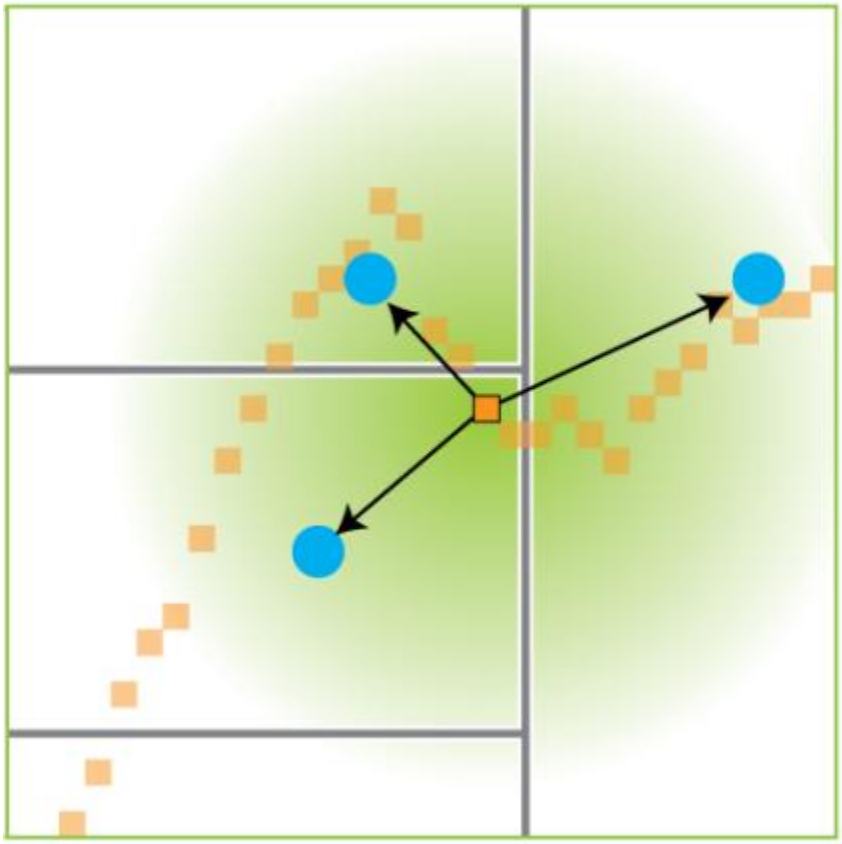
KD-Tree

- Разбиение пространства к-мерным деревом
- Медленный рост количества точек с ростом размерности пространства
- Дополнительные затраты на построение



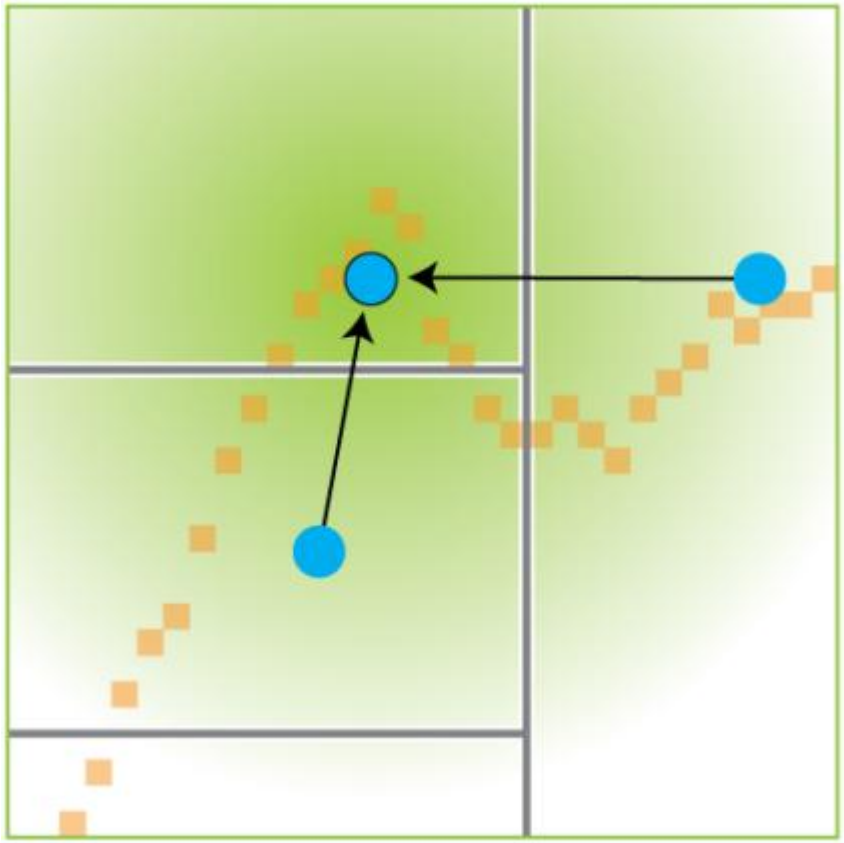
Andrew Adams et al., "Gaussian KD-Trees for Fast High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2009

Splatting



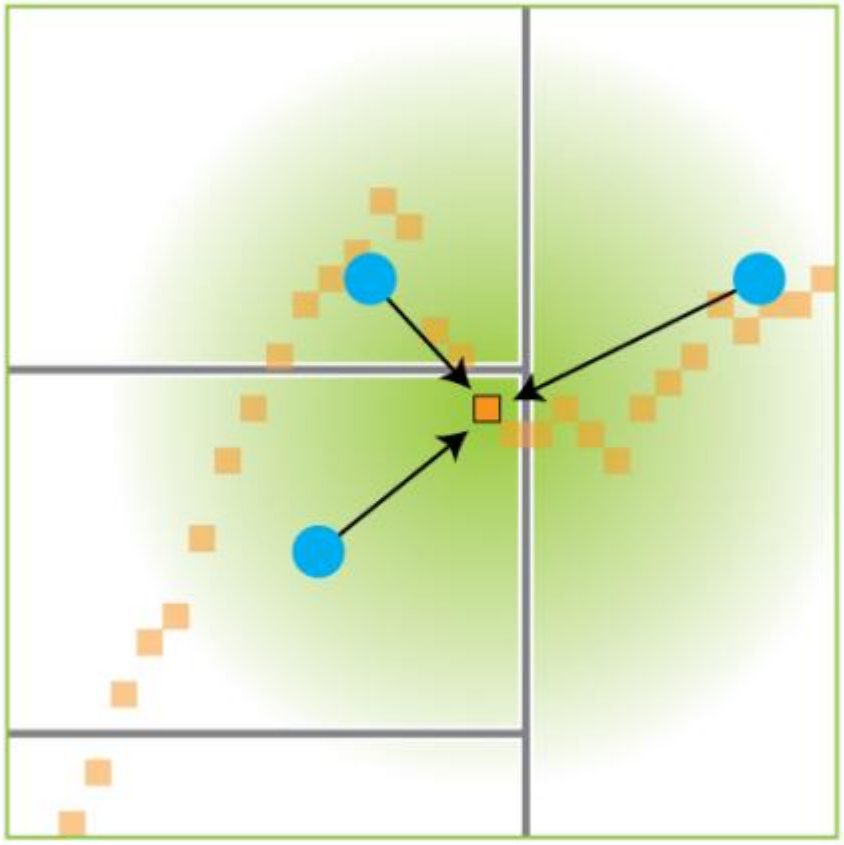
Andrew Adams et al., "Gaussian KD-Trees for Fast High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2009

Blurring



Andrew Adams et al., "Gaussian KD-Trees for Fast High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2009

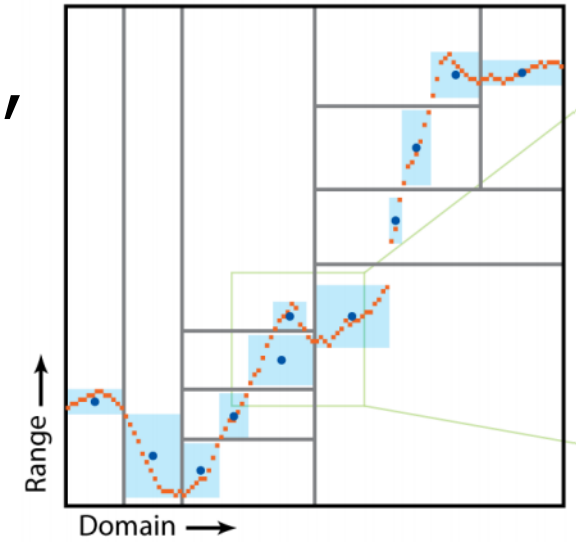
Slicing



Andrew Adams et al., "Gaussian KD-Trees for Fast High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2009

Построение KD-Tree

1. Построение Bounding Box (BB)
2. Если размер BB меньше порога, конец итерации,
   центр BB – вершина дерева
3. Разделение BB вдоль меньшей оси
4. Повторение шагов 1 – 4 для получившихся сегментов



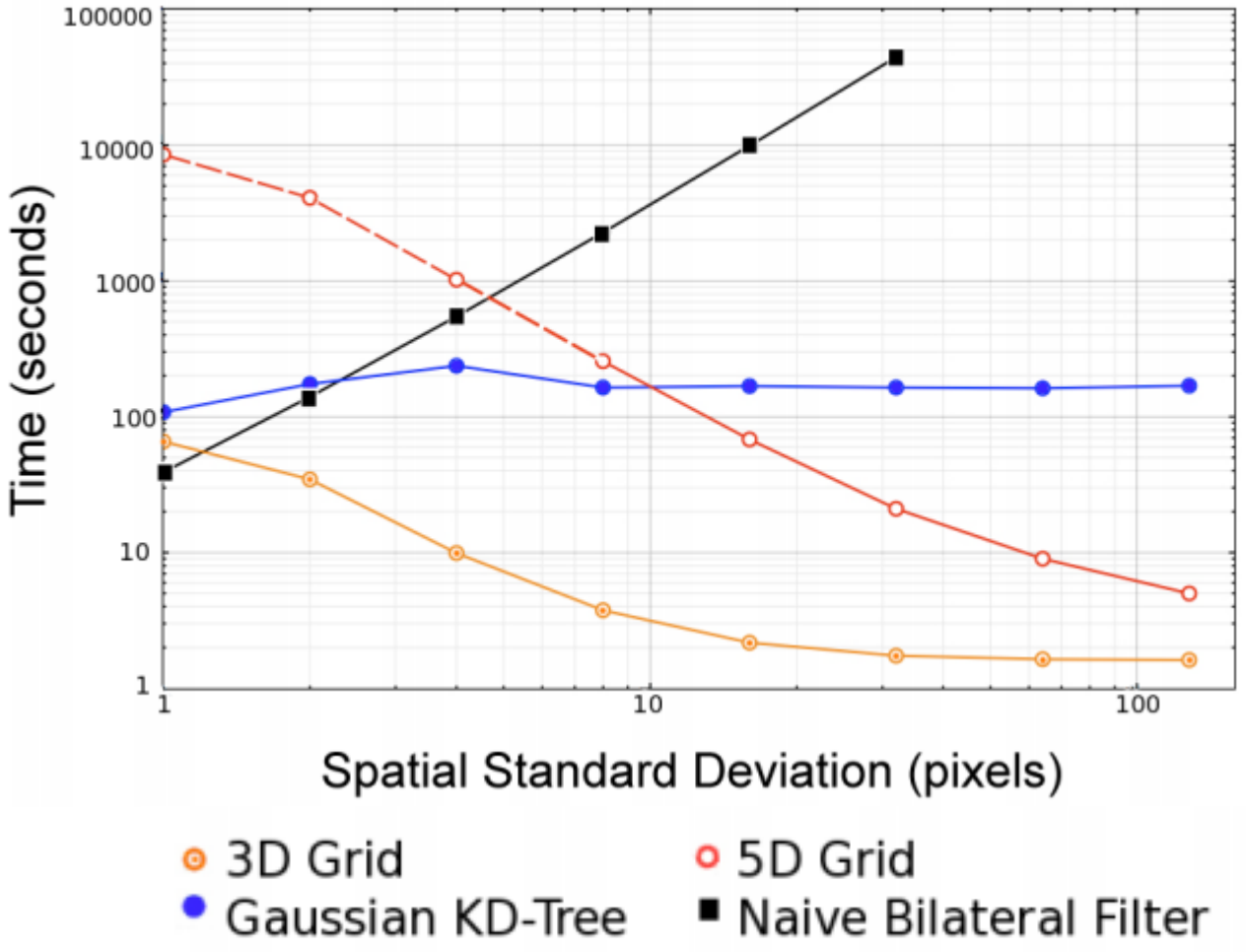
Gaussian kd-tree

Andrew Adams et al., "Gaussian KD-Trees for Fast High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2009

Условия тестирования

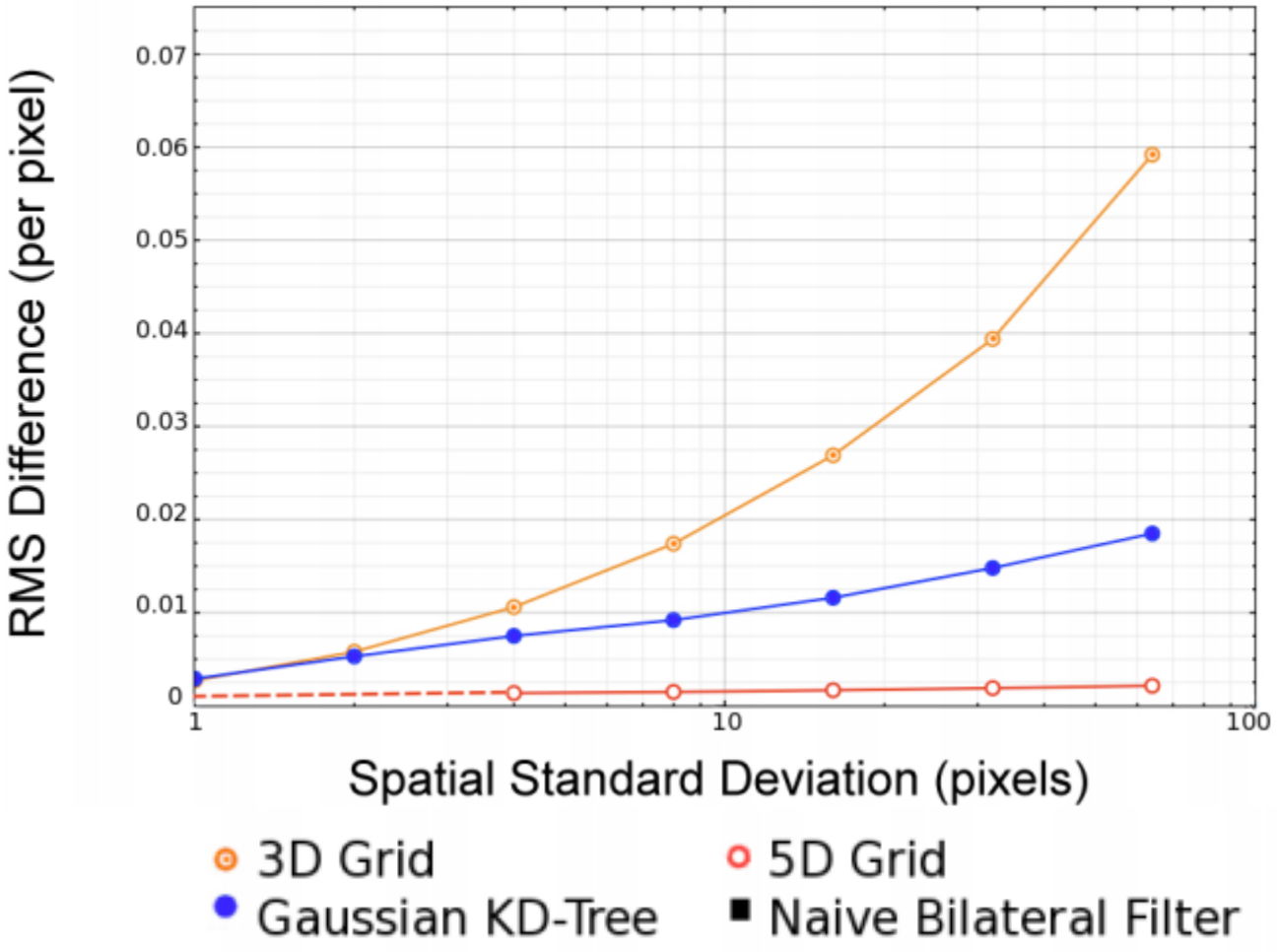
- 10 Мп RGB-изображение
- Дисперсия по цвету = 1/8
- CPU-реализация на Core2Duo 2.13 GHz
- GPU-реализация на GTX280 (ускорение в 10 раз)

Скорость работы



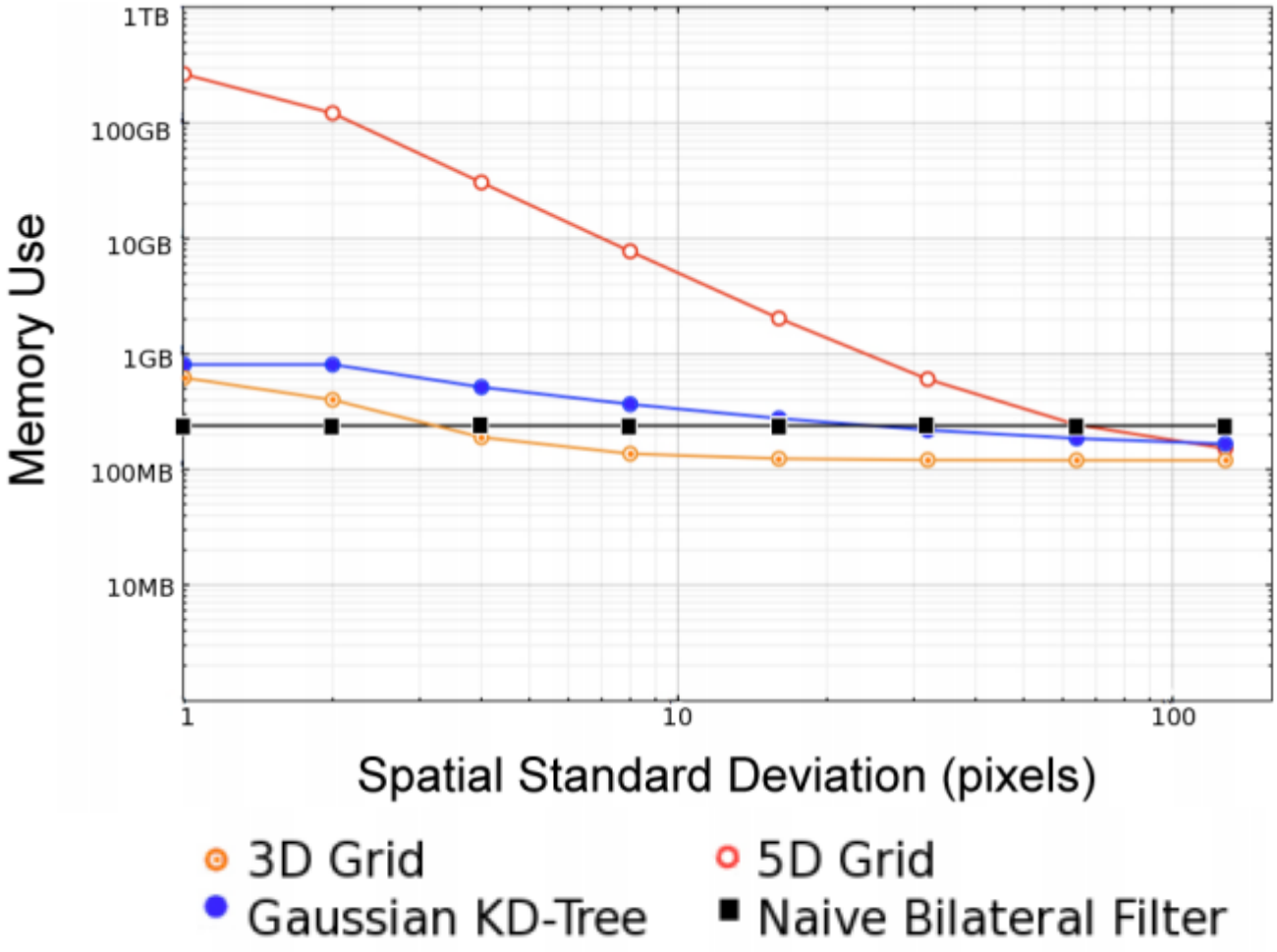
Andrew Adams et al., "Gaussian KD-Trees for Fast High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2009

Качество работы
Root Mean Square (RMS)



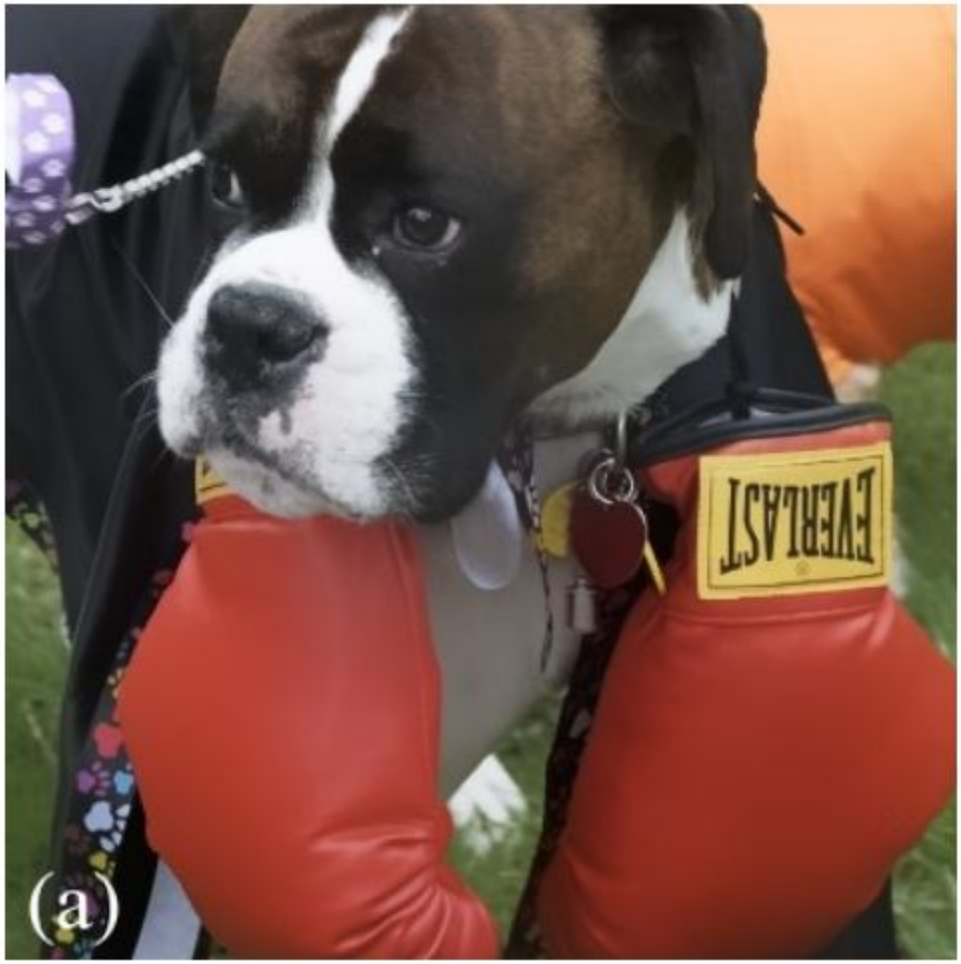
Andrew Adams et al., "Gaussian KD-Trees for Fast High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2009

Использование памяти



Andrew Adams et al., "Gaussian KD-Trees for Fast High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2009

Примеры работы
Naive Bilateral Filter (NBF)

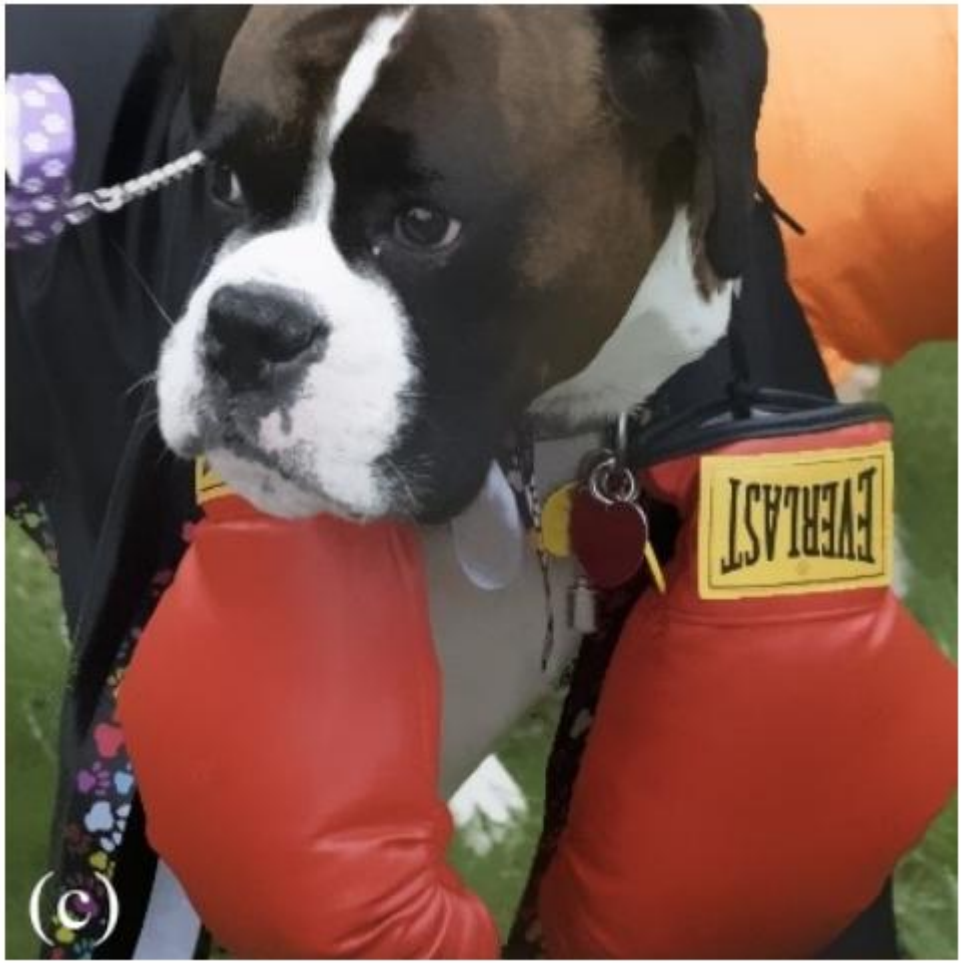


Andrew Adams et al., "Gaussian KD-Trees for Fast High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2009

Примеры работы
5D Grid

Andrew Adams et al., "Gaussian KD-Trees for Fast High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2009

Примеры работы
KD-Tree

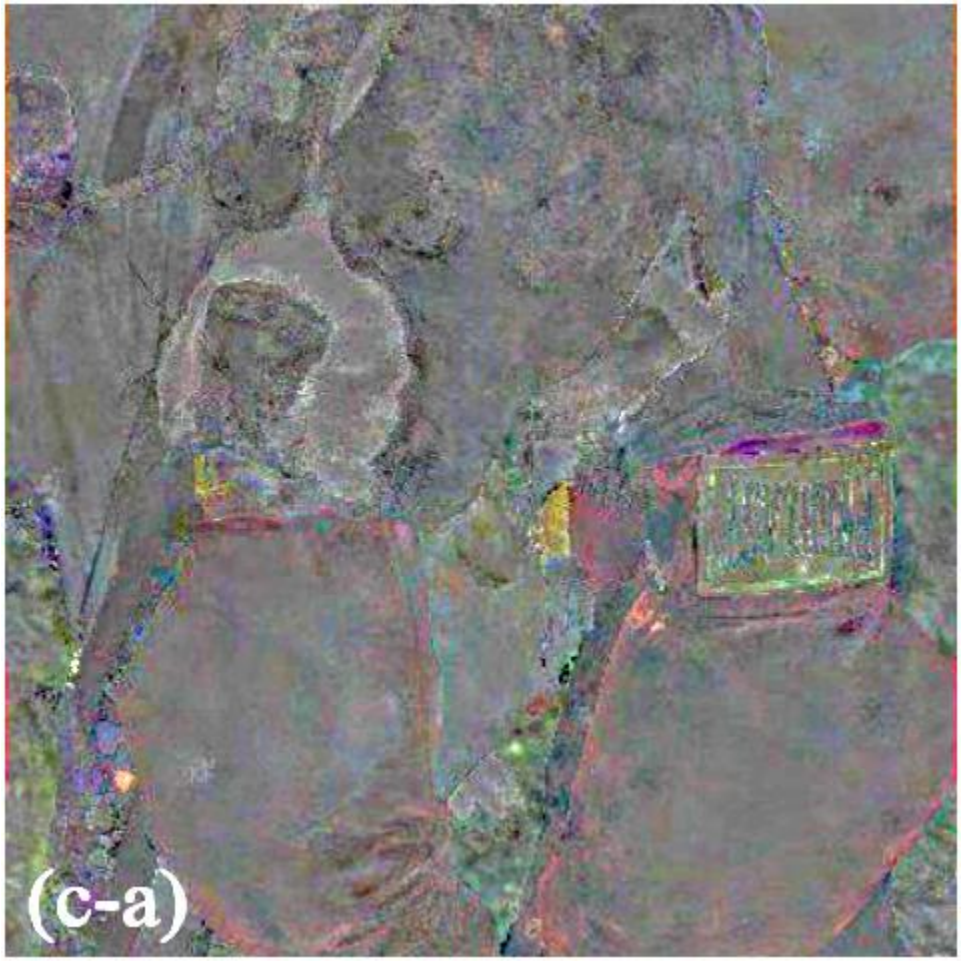


Andrew Adams et al., "Gaussian KD-Trees for Fast High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2009

Примеры работы
3D Grid

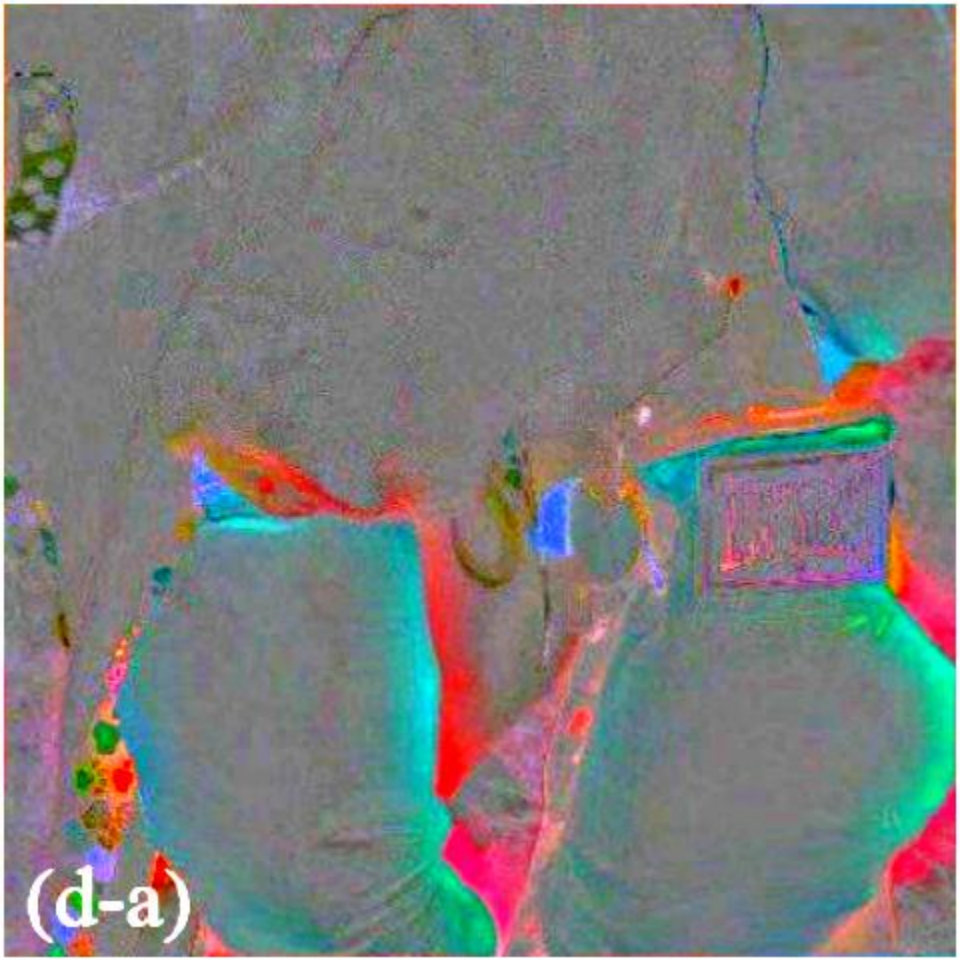
Andrew Adams et al., "Gaussian KD-Trees for Fast High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2009

Примеры работы
Разность KD-Tree и NBF

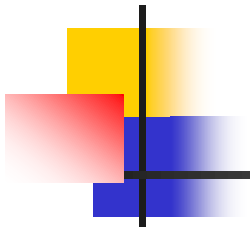


Andrew Adams et al., "Gaussian KD-Trees for Fast High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2009

Примеры работы
Разность 3D Grid и NBF



Andrew Adams et al., "Gaussian KD-Trees for Fast High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2009



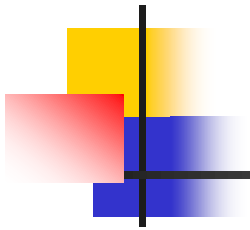
Выводы

Достоинства

- Высокая скорость работы
- Доступен код на C++ и CUDA
- Доступна авторская видеопрезентация

Недостаток

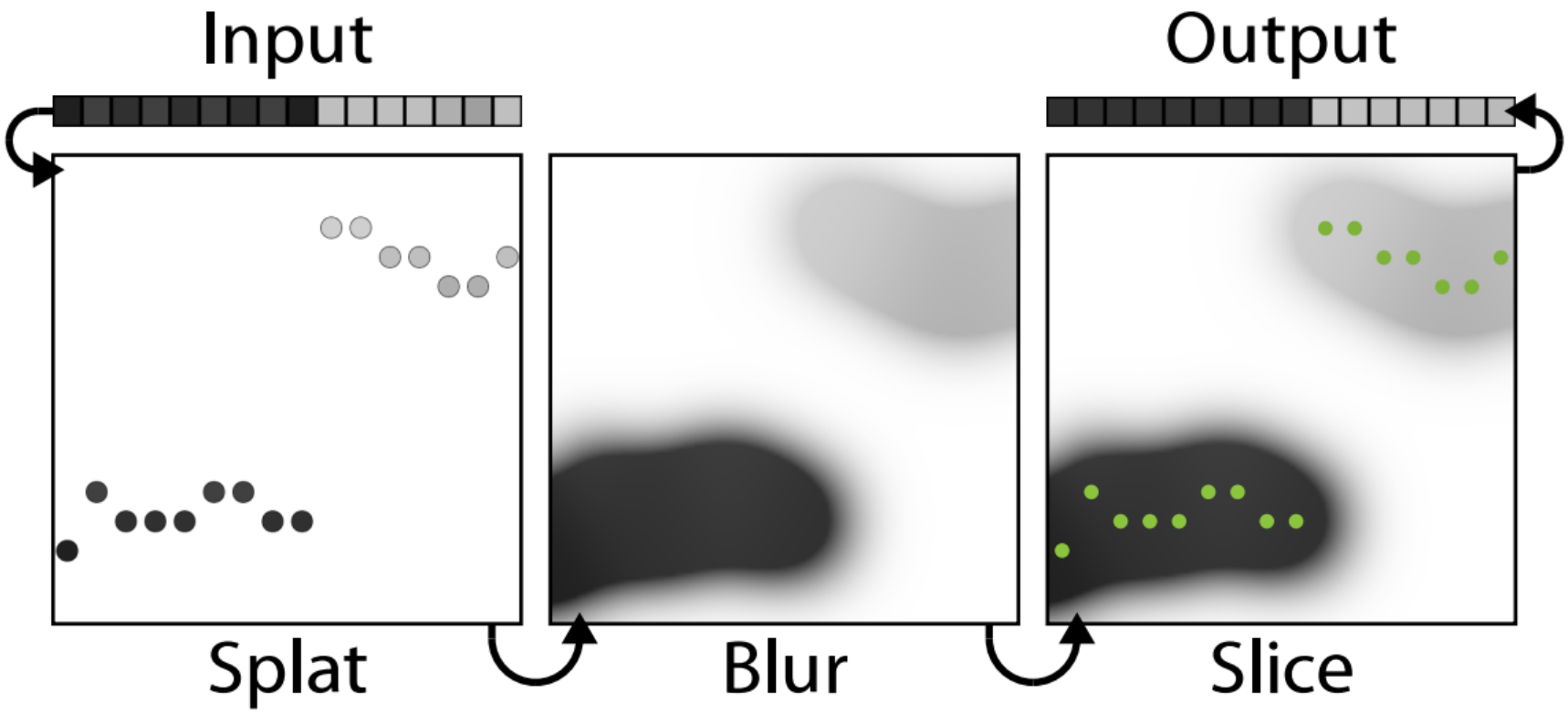
- Не представлено примеров по нашим темам



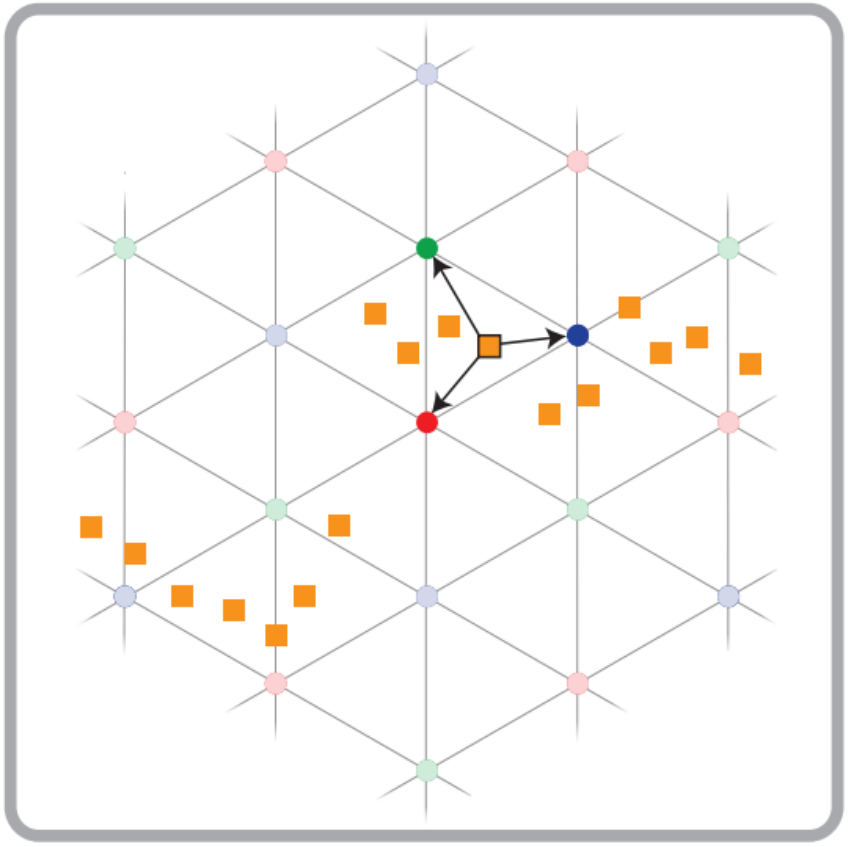
Содержание

- Введение
- Gaussian KD-Tree
- **Permutohedral Lattice (PL)**
- Adaptive Manifolds (AM)
- Заключение

Основы метода

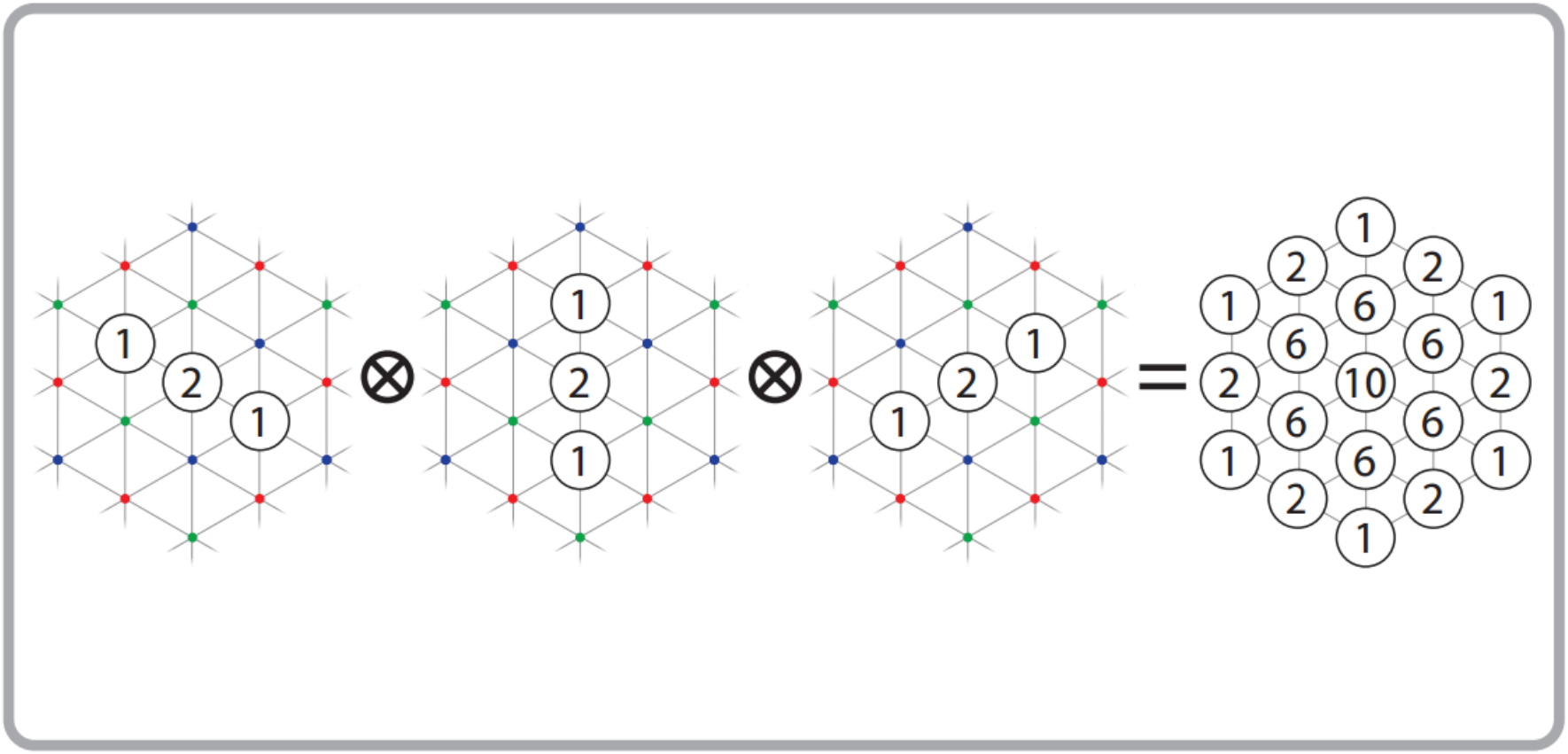


Предложенный метод (1)



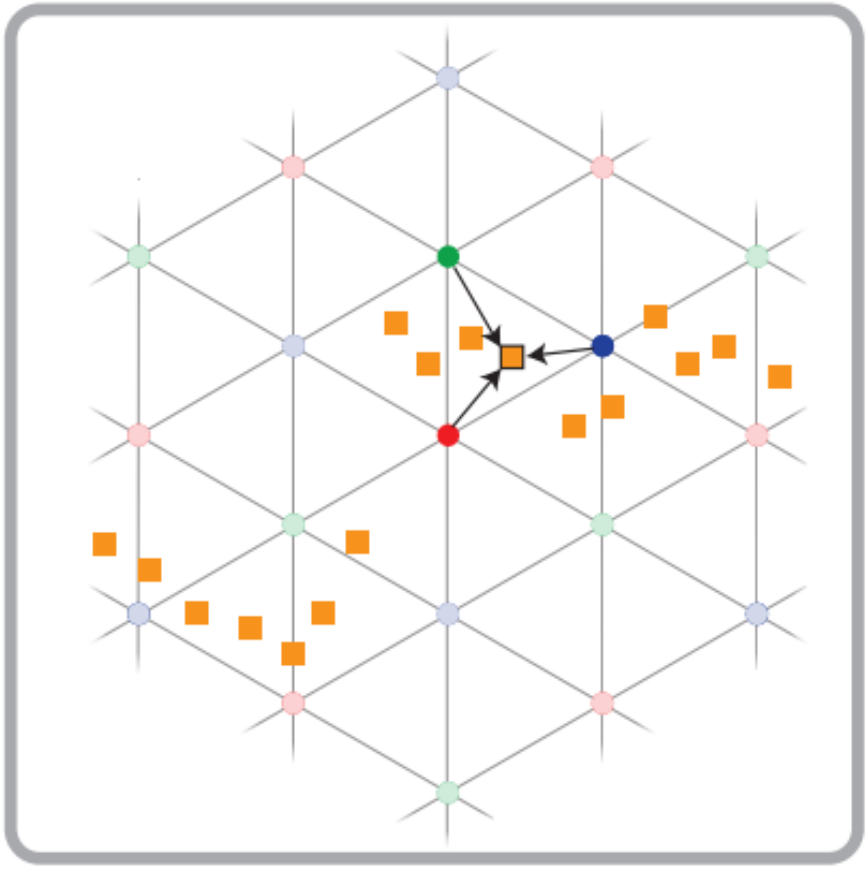
Andrew Adams et al., "Fast High-Dimensional Filtering Using the Permutohedral Lattice," Eurographics, 2010

Предложенный метод (2)



Andrew Adams et al., "Fast High-Dimensional Filtering Using the Permutohedral Lattice," Eurographics, 2010

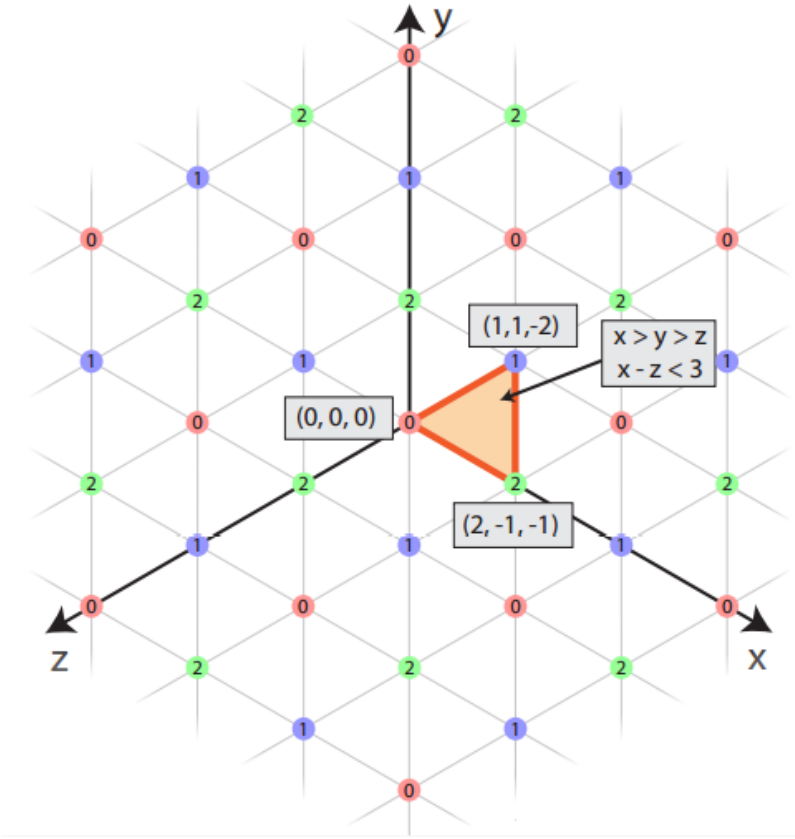
Предложенный метод (3)



Andrew Adams et al., "Fast High-Dimensional Filtering Using the Permutohedral Lattice," Eurographics, 2010

Permutohedral Lattice

Проекция n–мерной целочисленной решетки на $(n-1)$ - мерную плоскость, ортогональную единичному вектору

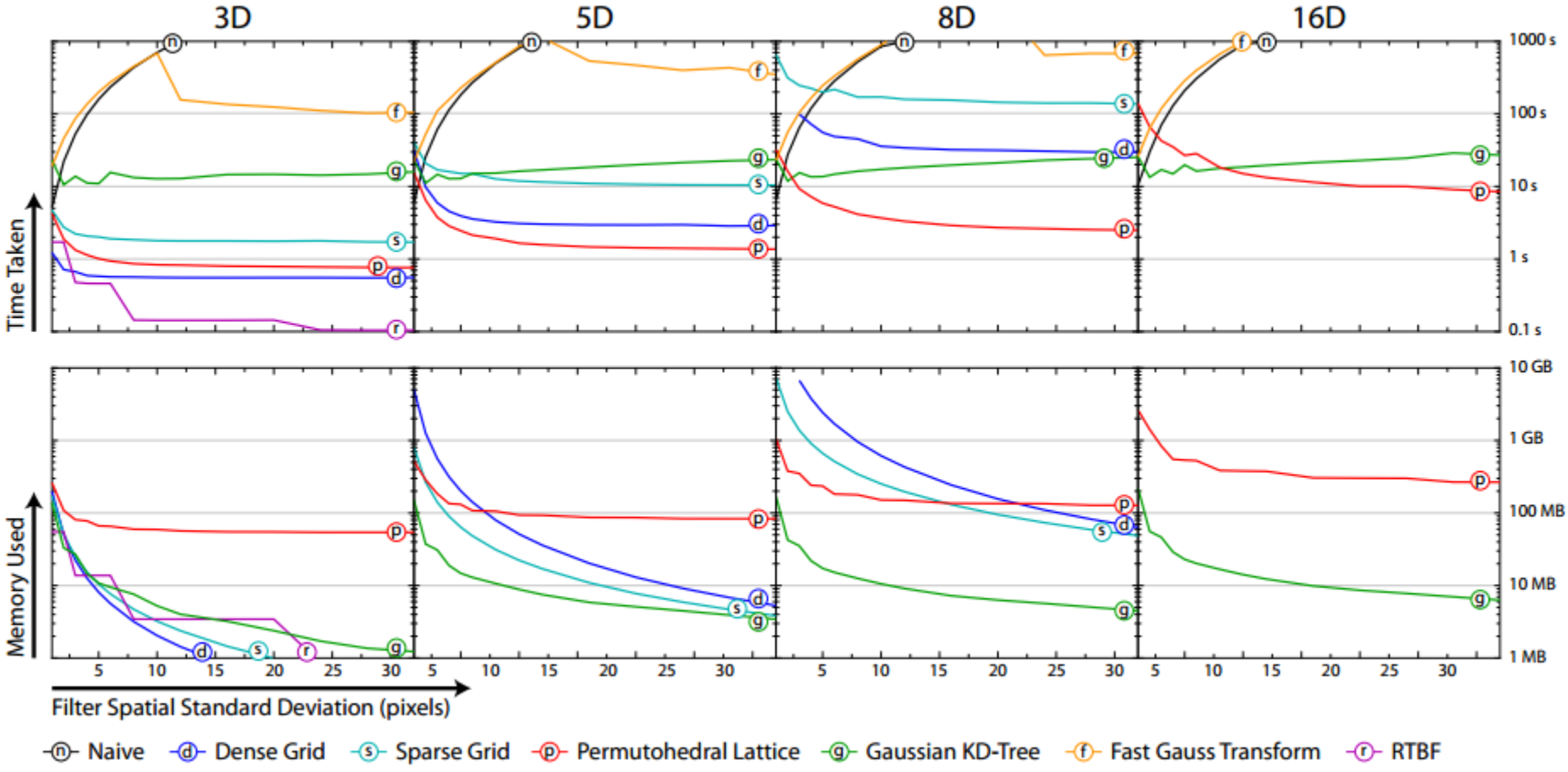


Andrew Adams et al., "Fast High-Dimensional Filtering Using the Permutohedral Lattice," Eurographics, 2010

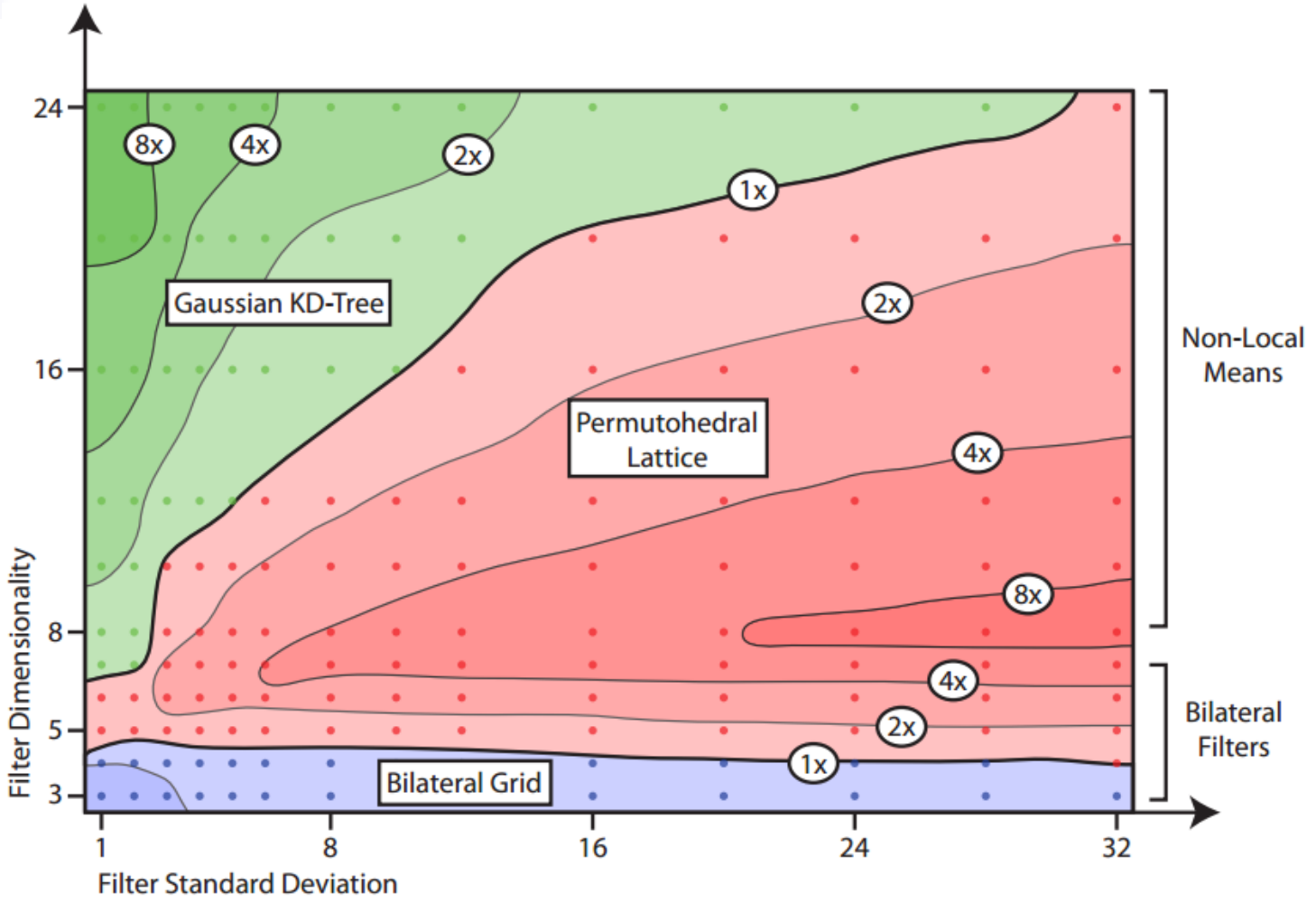
Permutohedral Lattice
Преимущества использования

- Разделение пространства на симметричные симплексы ⇒ быстрая барицентрическая интерполяция (splatting и slicing)
- Тривиальное вычисление соседних точек решётки ⇒ быстрое сглаживание (blurring)
- Существенная экономия памяти

Скорость работы

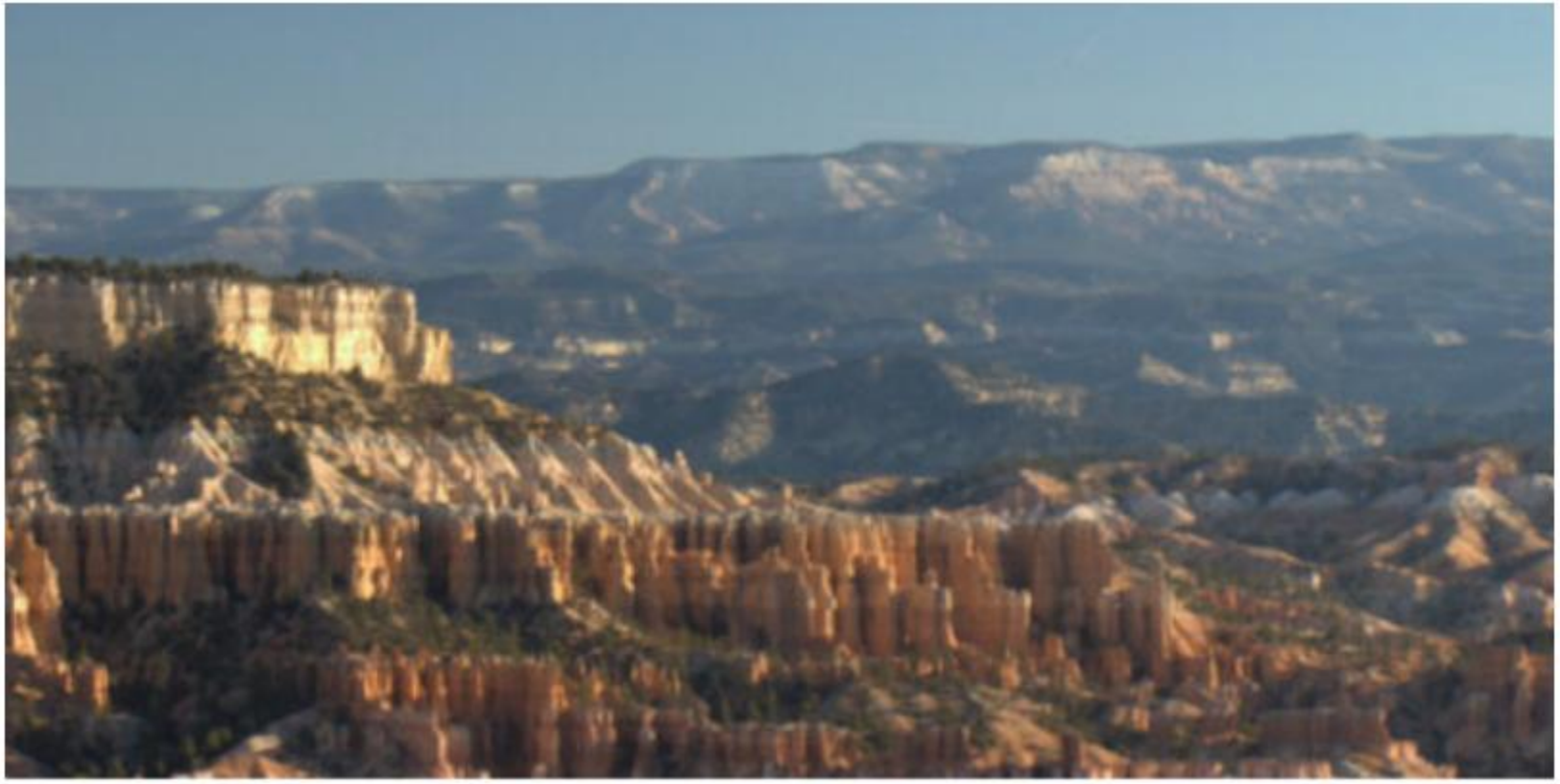


Анализ замеров скорости



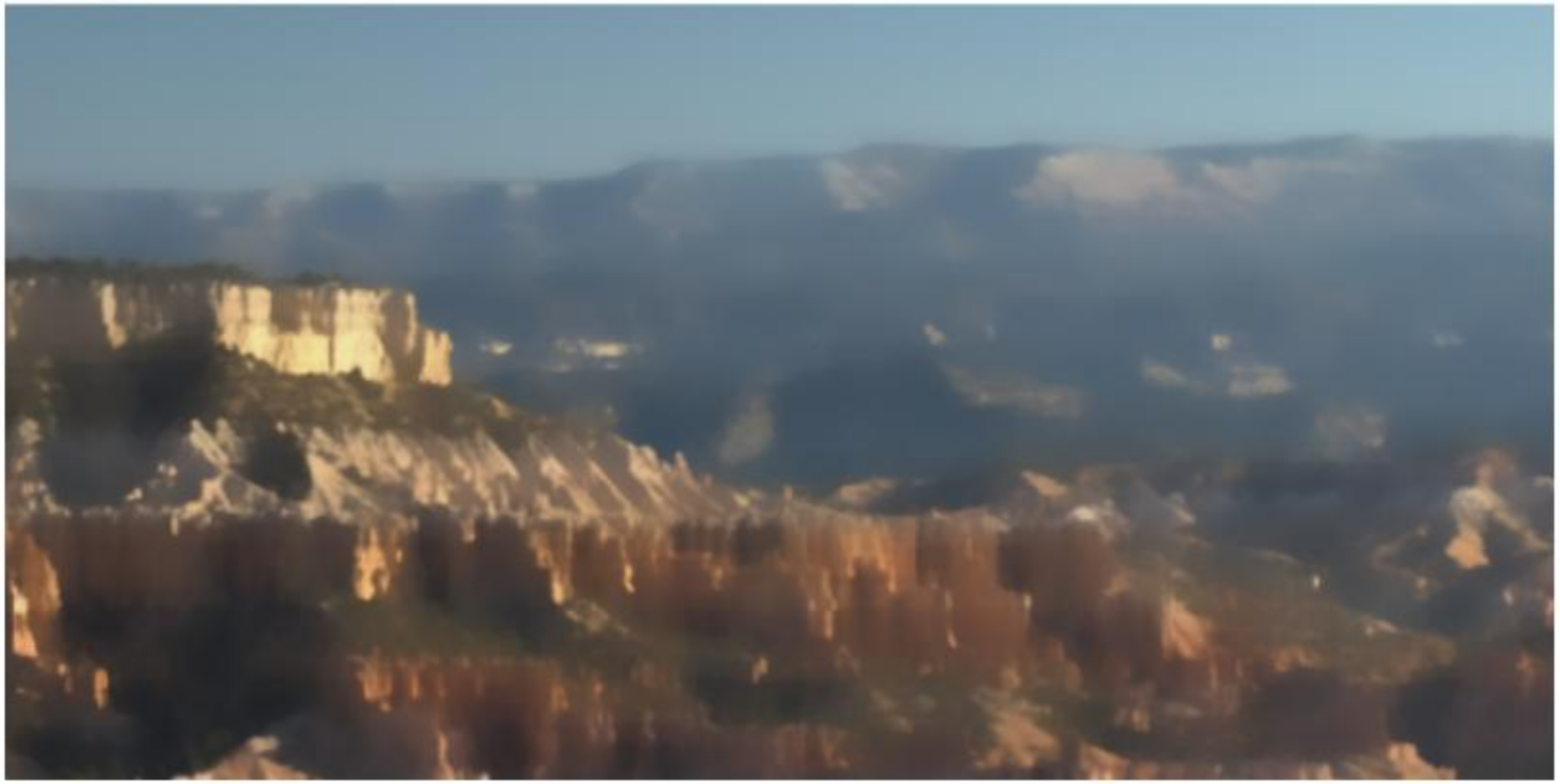
Andrew Adams et al., "Fast High-Dimensional Filtering Using the Permutohedral Lattice," Eurographics, 2010

Пример работы
Исходный кадр



Andrew Adams et al., "Fast High-Dimensional Filtering Using the Permutohedral Lattice," Eurographics, 2010

Пример работы
Обработанный кадр



Andrew Adams et al., "Fast High-Dimensional Filtering Using the Permutohedral Lattice," Eurographics, 2010

Выводы

Достоинства

- Высокая скорость работы
- Приведено полное описание алгоритма
- Доступен код на C++ и CUDA
- Доступна авторская видеопрезентация

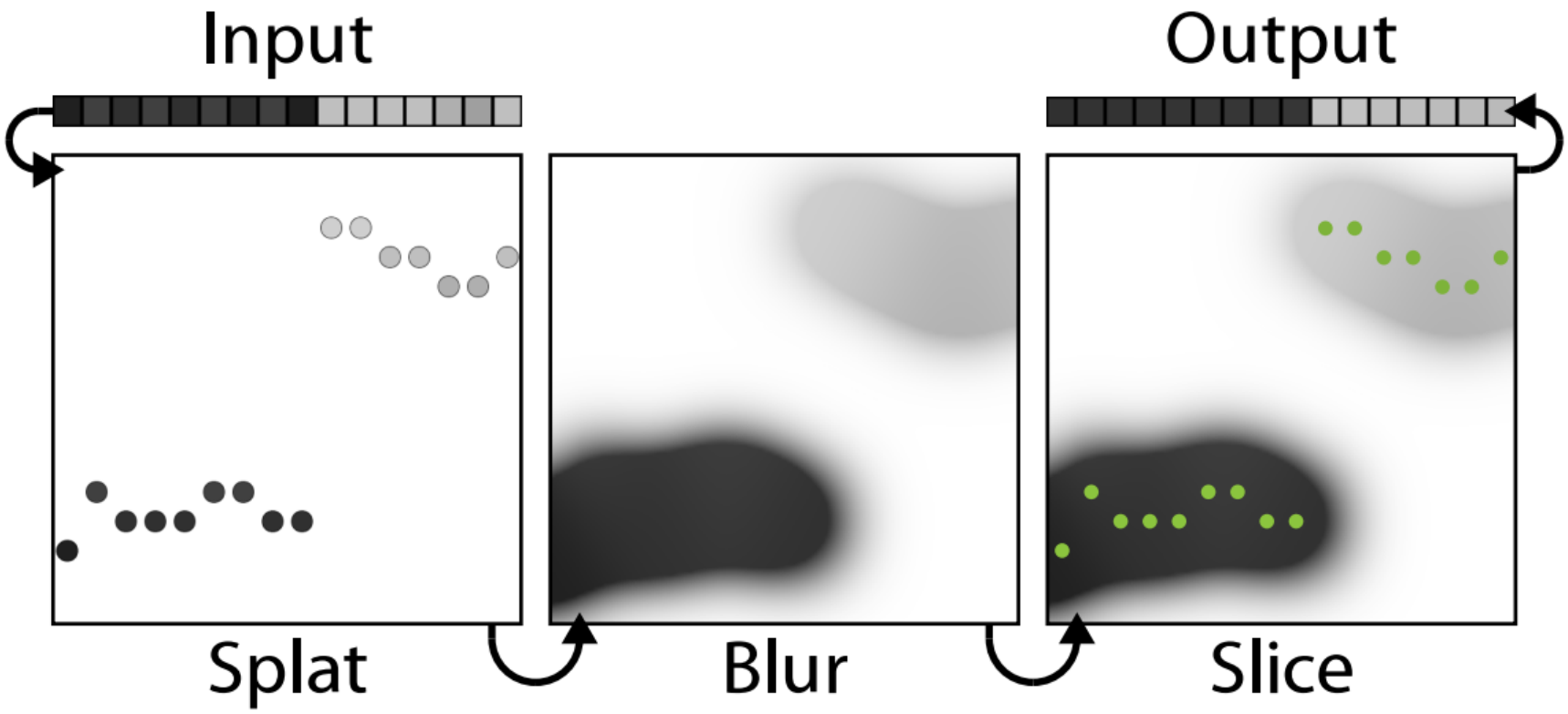
Недостатки

- Примеров работы очень мало
- Реализация кросс-фильтрации неочевидна

Содержание

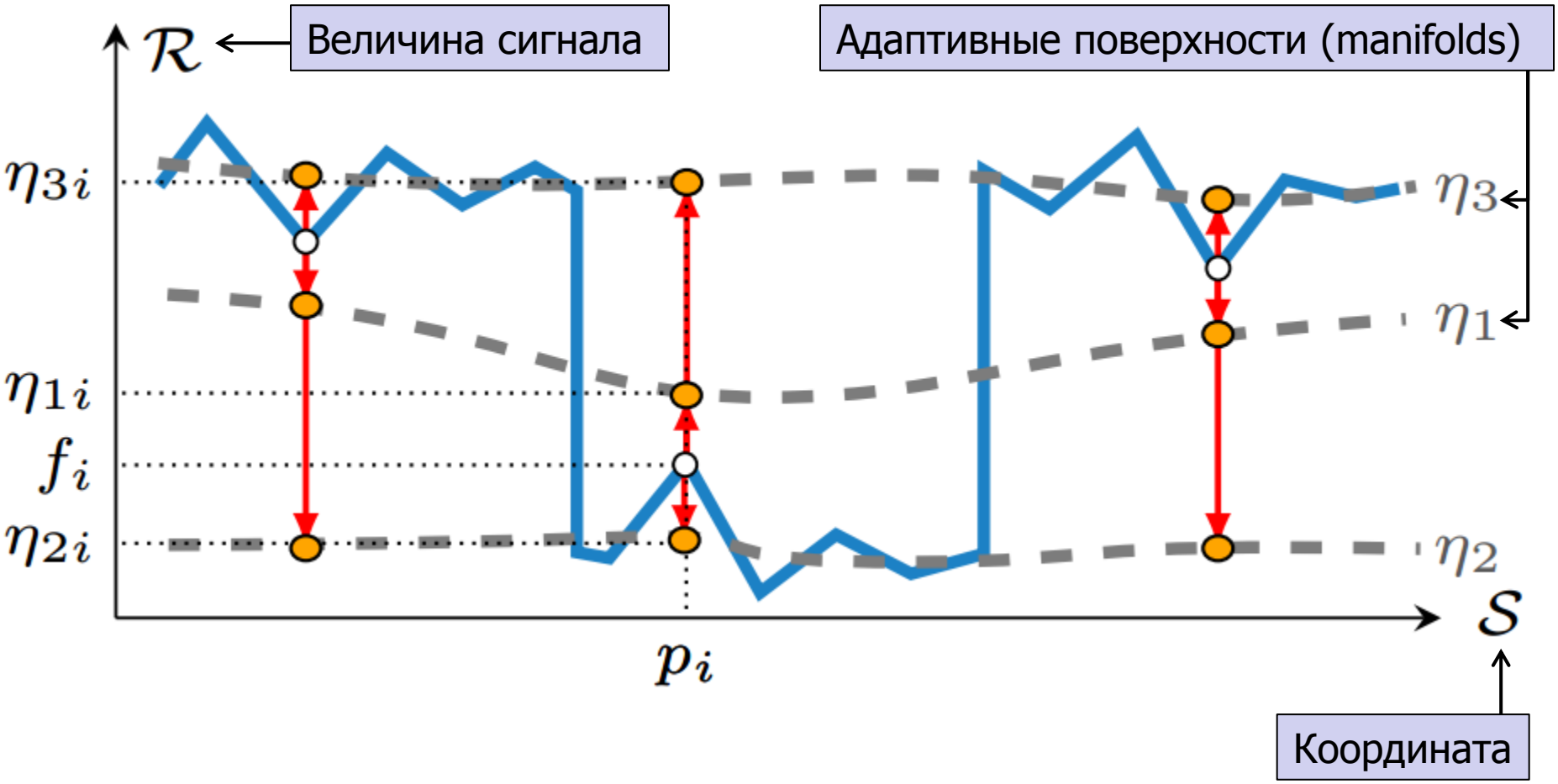
- Введение
- Gaussian KD-Tree
- Permutohedral Lattice (PL)
- **Adaptive Manifolds (AM)**
- Заключение

Основы метода



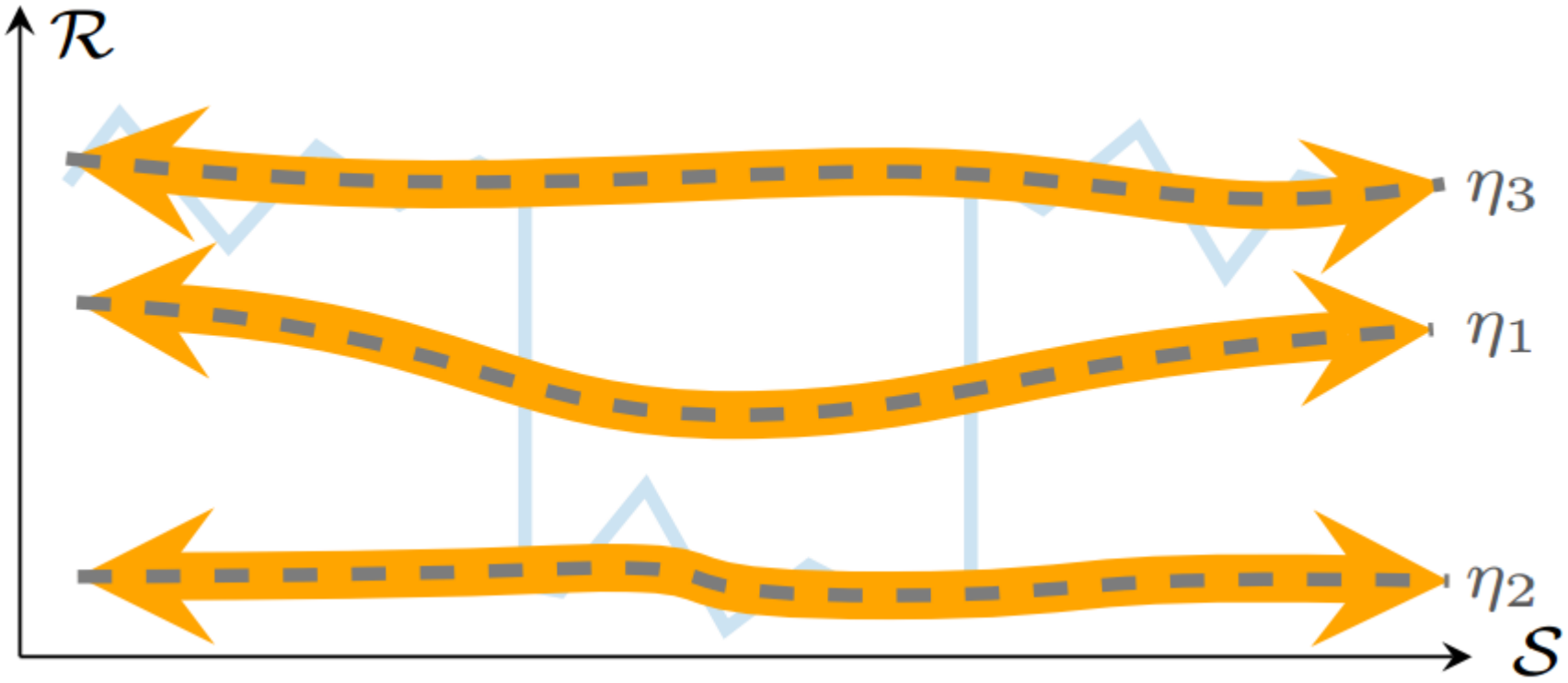
Andrew Adams et al., "Fast High-Dimensional Filtering Using the Permutohedral Lattice," Eurographics, 2010

Splatting

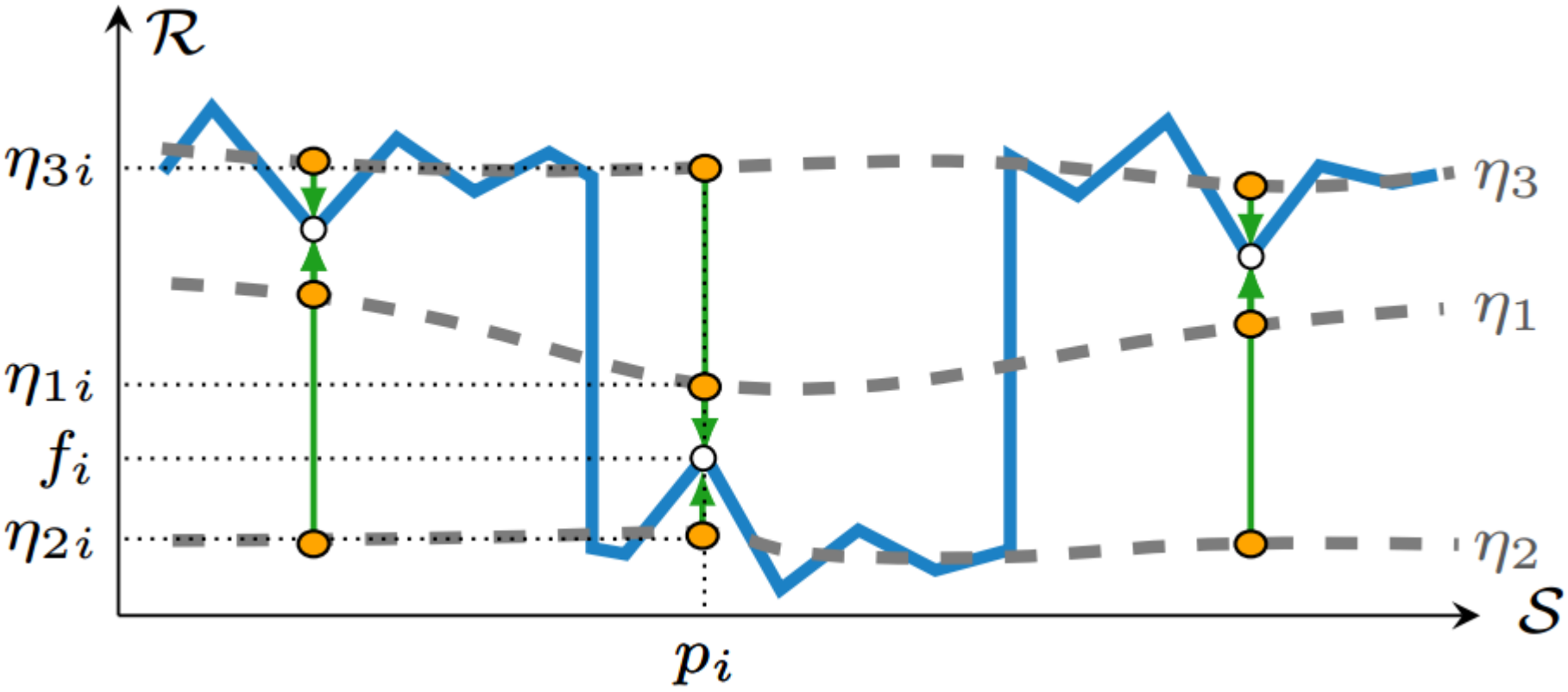


Eduardo S. L. Gastal, Manuel M. Oliveira, "Adaptive Manifolds for Real-Time High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2012

Blurring



Slicing



Eduardo S. L. Gastal, Manuel M. Oliveira, "Adaptive Manifolds for Real-Time High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2012

Splatting

Значение в точке поверхности

Ядро Гаусса

Матрица ковариации

$$\Psi_{splat}(\hat{\eta}_{ki}) = \phi_{\frac{\Sigma_{\mathcal{R}}}{2}}(\eta_{ki} - f_i)\, f_i$$

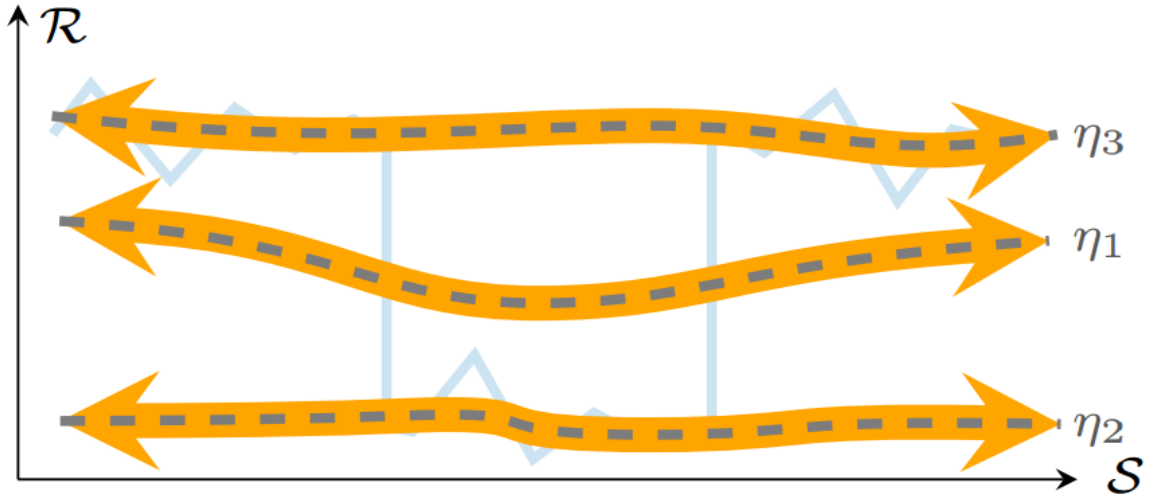
Координата на поверхности

Координата поверхности

Значение сигнала

Blurring

- Сглаживание с ядром Гаусса
- Учет кривизны поверхности
- Использование растяжения пространства для устранения анизотропии ядра Гаусса



Eduardo S. L. Gastal, Manuel M. Oliveira, "Adaptive Manifolds for Real-Time High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2012

Slicing

Итоговое значение сигнала →

$$g_i = \frac{\sum_{k=1}^{K} w_{ki}\, \Psi_{blur}(\hat{\eta}_{ki})}{\sum_{k=1}^{K} w_{ki}\, \Psi^0_{blur}(\hat{\eta}_{ki})}$$

$$w_{ki} = \phi_{\frac{\Sigma_{\mathcal{R}}}{2}}(\eta_{ki} - f_i)$$

$$\Psi^0_{splat}(\hat{\eta}_{ki}) = \phi_{\frac{\Sigma_{\mathcal{R}}}{2}}(\eta_{ki} - f_i)$$

Ψ_{blur} – результат сглаживания Ψ_{splat}

Eduardo S. L. Gastal, Manuel M. Oliveira, "Adaptive Manifolds for Real-Time High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2012

Построение поверхностей
Алгоритм (1)

GRAPHICS & MEDIA LAB
VIDEO GROUP

1. Построение первой поверхности η_1 низкочастотной фильтрацией
2. Определение преобладающего направления v_1 отклонения сигнала от поверхности η_1

v_1 – собственный вектор матрицы

$$(\mathbf{f}_1 - \boldsymbol{\eta}_1)(\mathbf{f}_1 - \boldsymbol{\eta}_1)^T$$

соответствующий наибольшему собственному значению

Построение поверхностей
Алгоритм (2)

3. Разбиение множества пикселей на два подмножества согласно v_1
4. Повторение шагов 2–4 для получившихся подмножеств
5. Критерий остановки алгоритма: достижение заданной высоты построенного дерева поверхностей

Построение поверхностей
Ограничение высоты дерева (1)

Для обработки RGB-изображений:

$$H = \max\left(2, \left\lceil H_S \, L_R \right\rceil\right)$$

$$H_S = \left\lfloor \log_2 \left(\sigma_{S_{max}}\right) \right\rfloor - 1, \; L_R = 1 - \sigma_{R_{min}}$$

$$\sigma_{S_{max}} = \sqrt{\max\left(\Sigma_S\right)}$$

Матрица дисперсий по расстоянию

$$\sigma_{R_{min}} = \sqrt{\min\left(\Sigma_R\right)}$$

Матрица дисперсий по цвету

Eduardo S. L. Gastal, Manuel M. Oliveira, "Adaptive Manifolds for Real-Time High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2012

Построение поверхностей
Предложенные авторами значения

σ_r \ σ_s	1	4	8	16	32	64	128
0.01	3	3	3	7	15	31	63
0.10	3	3	3	7	15	31	63
0.20	3	3	3	7	15	15	31
0.40	3	3	3	3	7	7	15
1.00	3	3	3	3	3	3	3

Table 1: *Several values of K computed for RGB color image filtering.*

Построение поверхностей
Ограничение высоты дерева (2)

Для иных случаев:

- Подбирать вручную, поддерживая баланс скорость/качество
- Остановиться, когда среднее отклонение сигнала от ближайшей плоскости будет достаточно мало

Построение поверхностей
Исходный кадр

Построение поверхностей
Результат (1/1)

η_1 η_- η_+

Eduardo S. L. Gastal, Manuel M. Oliveira, "Adaptive Manifolds for Real-Time High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2012

Построение поверхностей
Результат (2/2)

η_{-+} η_{+-} η_{++} η_{--}

Eduardo S. L. Gastal, Manuel M. Oliveira, "Adaptive Manifolds for Real-Time High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2012

Детали реализации

- Низкочастотный фильтр

$$out[i] = in[i] + \exp\left(-\sqrt{2}/\sigma_l\right)(in[i-1] - in[i])$$

применяется дважды, в двух направлениях, к прореженному изображению.

Число опорных точек = $min(N, 4\,N/\sigma_l)$

- Для сглаживания используется рекурсивный фильтр [Gastal, 2011]

Точность результатов

σ_r \ σ_s	1	4	8	16	32	64	128
0.01	57.8	52.7	51.2	50.9	50.6	50.4	50.3
0.05	50.7	44.8	42.5	43.3	43.6	43.5	43.3
0.10	47.9	43.7	41.1	41.7	42.1	41.6	40.6
0.15	46.3	43.8	41.2	40.8	41.4	40.4	39.2
0.20	45.3	44.1	41.6	40.2	41.0	39.4	38.0
0.40	43.0	44.5	42.1	40.1	38.6	37.3	36.5
0.60	41.8	43.7	41.7	40.1	39.0	37.4	35.5
1.00	40.8	42.4	41.1	39.7	38.8	37.2	35.1

PSNR with Naive Bilateral Filter

Eduardo S. L. Gastal, Manuel M. Oliveira, "Adaptive Manifolds for Real-Time High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2012

Скорость работы (1)

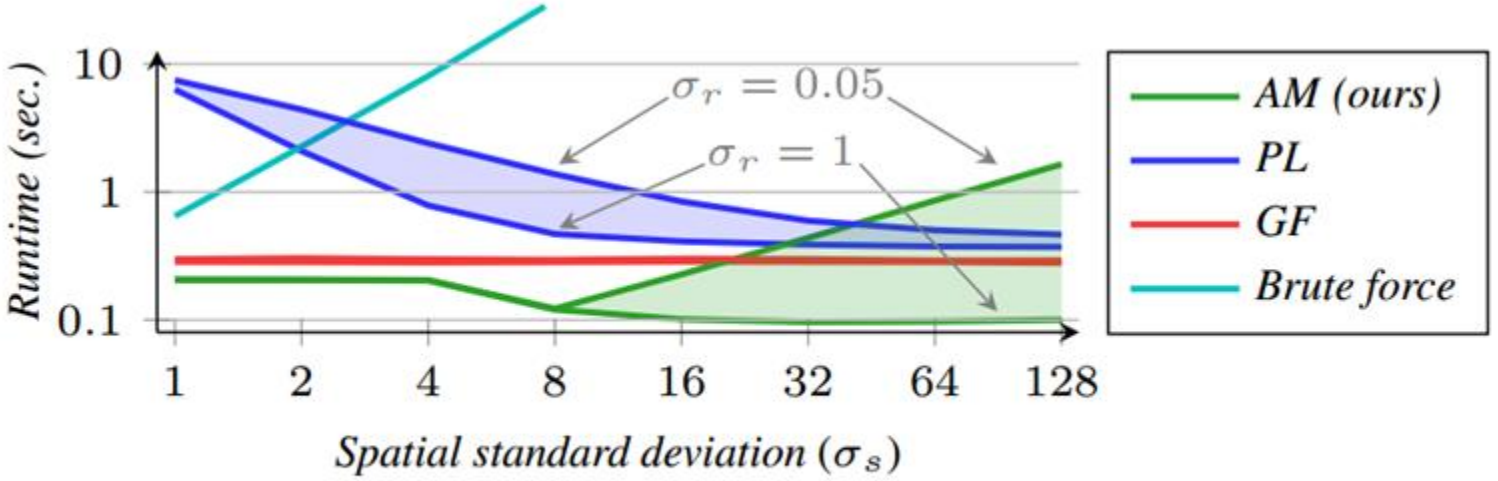


Figure 7: CPU performance

Скорость работы (2)

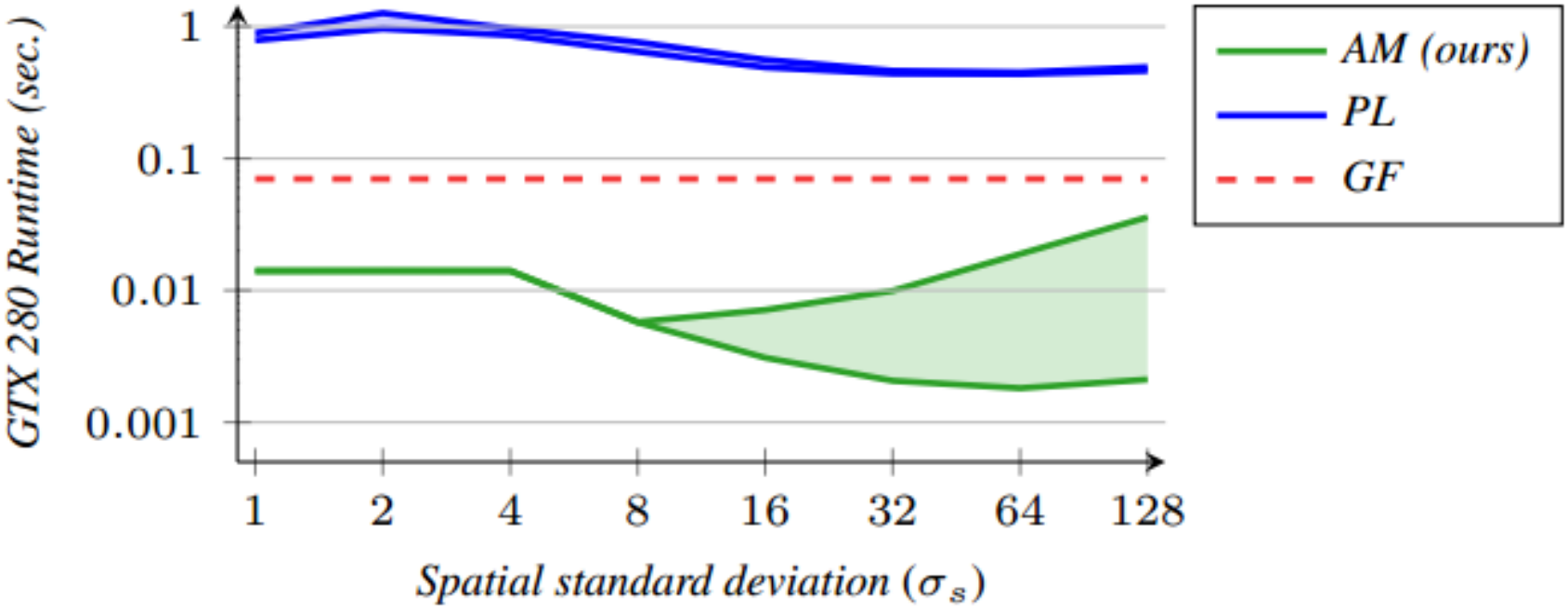


Figure 1: Performance on a GTX 280 GPU

Скорость работы (3)

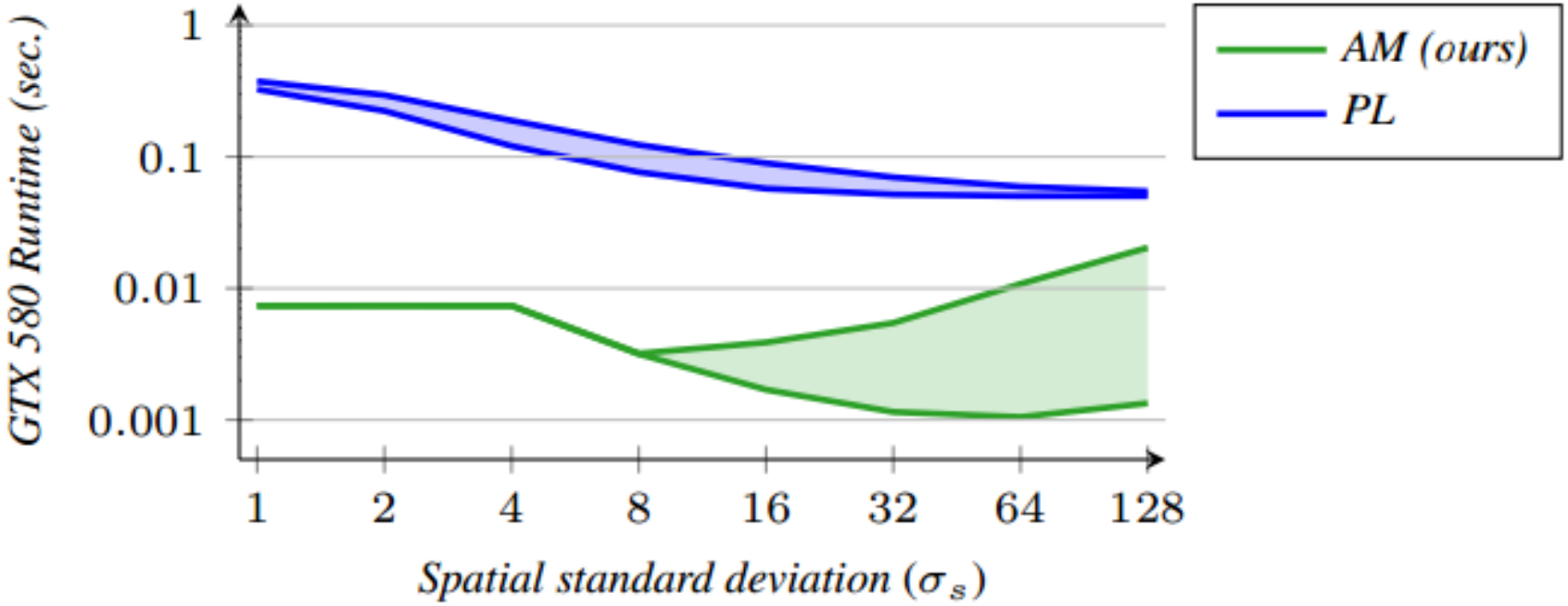


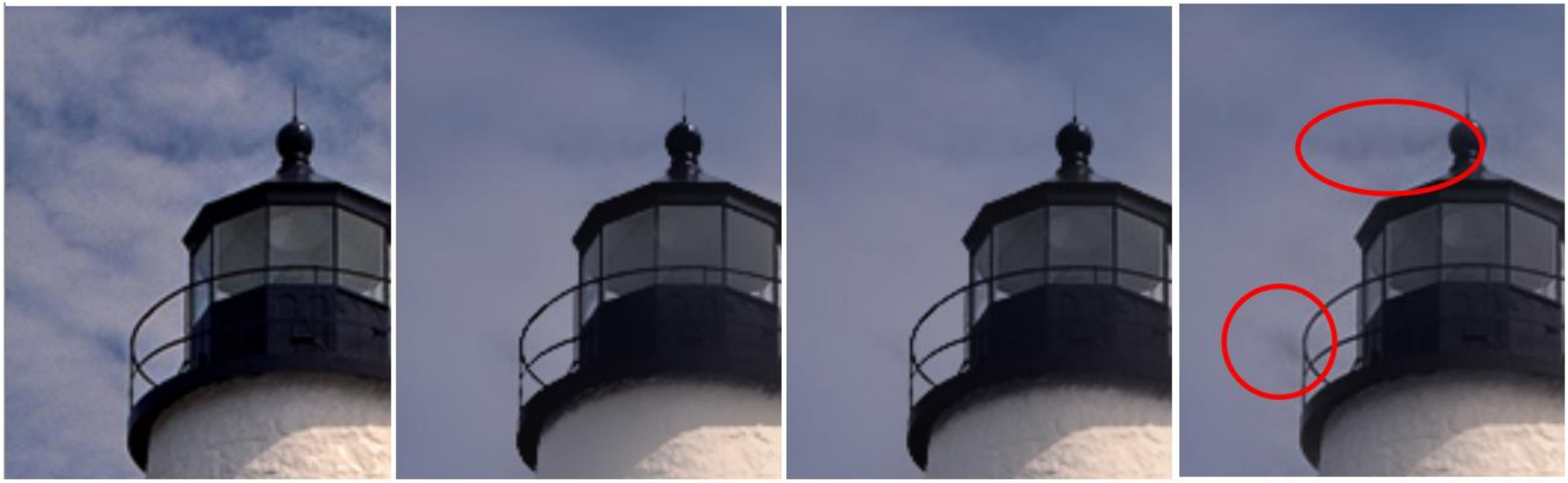
Figure 2: Performance on a GTX 580 GPU

Примеры работы (1)

(a) Photograph (b) Our AM (c) Bilateral (BF) (d) Guided (GF)

Eduardo S. L. Gastal, Manuel M. Oliveira, "Adaptive Manifolds for Real-Time High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2012

Примеры работы (1)



(a) Photograph (b) Our AM (c) Bilateral (BF) (d) Guided (GF)

Eduardo S. L. Gastal, Manuel M. Oliveira, "Adaptive Manifolds for Real-Time High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2012

Примеры работы (2)

(a) Input

Примеры работы (2)

(b) Ours, PSNR 41 dB

Примеры работы (2)

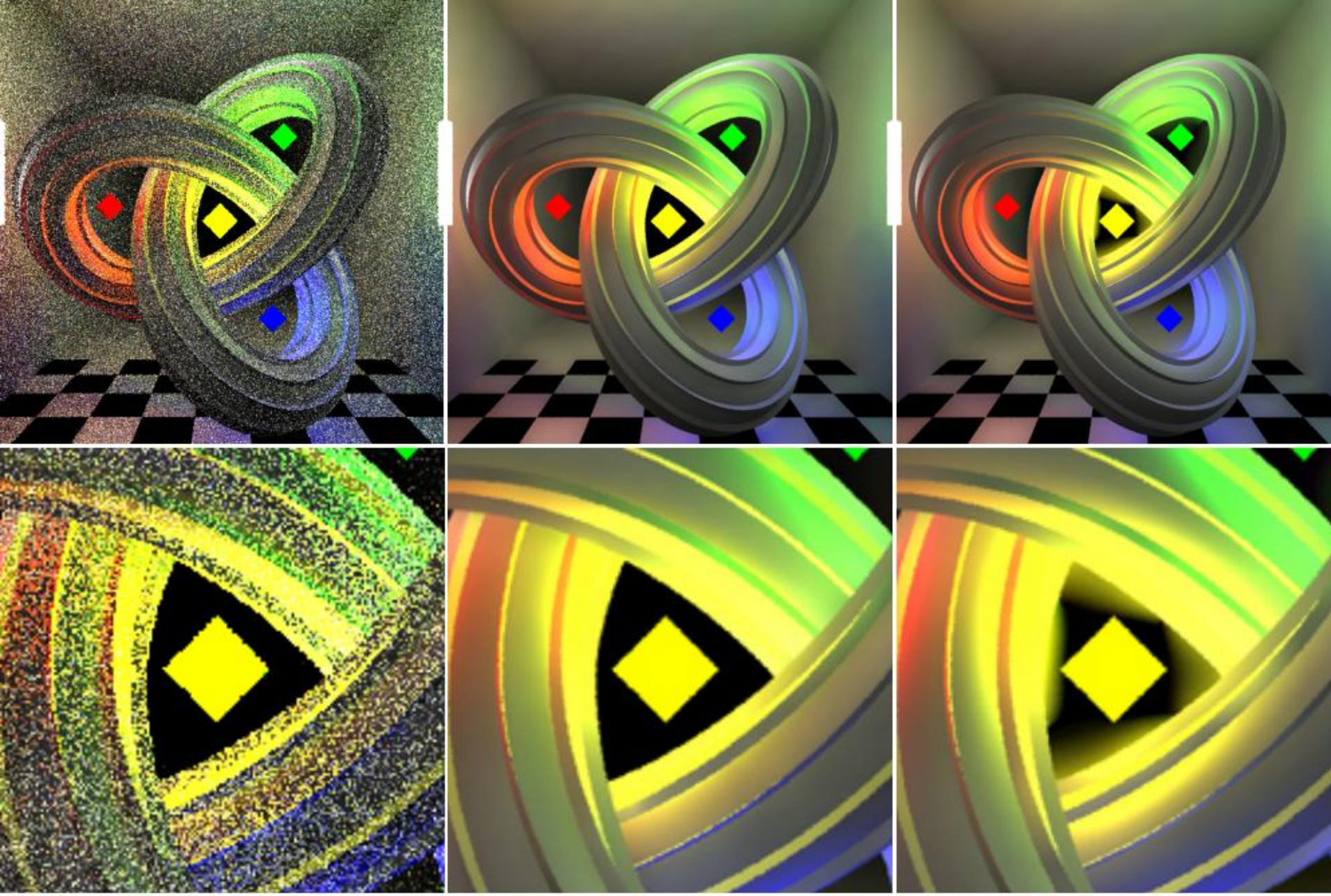
(c) Bilateral filter

Примеры работы (2)

(d) Ours, PSNR 37 dB

Примеры работы (2)

(e) Bilateral filter



(d) Path-traced image (e) Our AM filter (f) Guided filter

Eduardo S. L. Gastal, Manuel M. Oliveira, "Adaptive Manifolds for Real-Time High-Dimensional Filtering," SIGGRAPH, 2012

Выводы

Достоинства

- Высокая скорость работы
- Наличие полного математического обоснования работы метода и выбора параметров
- Доступен код для MATLAB
- Доступна авторская видеопрезентация

Недостатки

- Не представлено примеров по нашим темам
- Реализация кросс-фильтрации неочевидна

Содержание

- Введение
- Gaussian KD-Tree
- Permutohedral Lattice (PL)
- Adaptive Manifolds (AM)
- **Заключение**

Заключение

- Алгоритмы решают поставленную задачу
- Для представленных алгоритмов доступен исходный код

Надо брать, тестировать
и использовать!

Изображение из I-Love-Cartoons Clipart
http://i-love-cartoons.us/snags/clipart/christmas/garfield/Xmas-Garfield-Tree.php

Литература (1)

1. A. Adams, N. Gelfand, J.Dolson, and M. Leroy, "Gaussian KD-Trees for Fast High-Dimensional Filtering," *in ACM Transactions on Graphics*, Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009, Volume 28 Issue 3, August 2009, Article No. 21.
2. A. Adams, J. Baek, and M. A. Davis, "Fast High-Dimensional Filtering Using the Permutohedral Lattice," *in Computer Graphics Forum*, Vol. 29, No. 2. (2010), pp. 753 – 762.
3. Eduardo S. L. Gastal and Manuel M. Oliveira, "Adaptive Manifolds for Real-Time High-Dimensional Filtering," *in ACM Transactions on Graphics*, SIGGRAPH 2012 Conference Proceedings, Volume 31 Issue 4, July 2012, Article No. 33.

Литература (2)

4. Sylvain Paris and Frédo Durand, "A Fast Approximation of the Bilateral Filter Using a Signal Processing Approach," *in Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, 2006, pp. 568 – 580.
5. Eduardo S. L. Gastal and Manuel M. Oliveira, "Domain Transform for Edge-Aware Image and Video Processing," *in ACM Transactions on Graphics*, Volume 30, Number 4, Proceedings of SIGGRAPH 2011, Article 69.

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