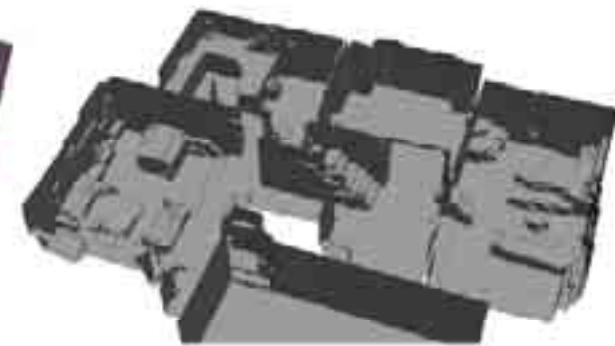
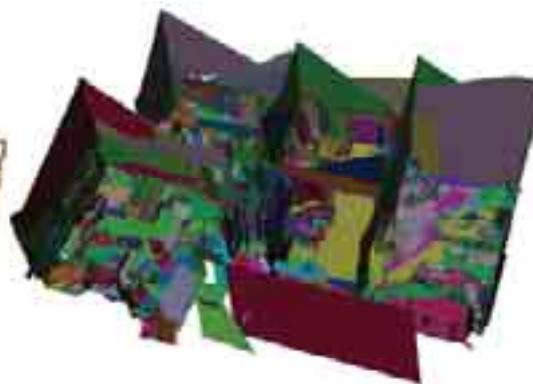




Многовидовая реконструкция





Благодарности

- В презентации использованы слайды курса «3d Shape Reconstruction from Photographs: a Multi-View Stereo Approach» от **Carlos Hernandez, George Vogiatzis and Yasutaka Furukawa**



План лекции

- Введение
- Многовидовое пассивное стерео
 - Воксельные подходы
 - Подход на основе объединения сеток
 - Разрастание регионов
- Активное стерео
- Приложение: реконструкция головы человека



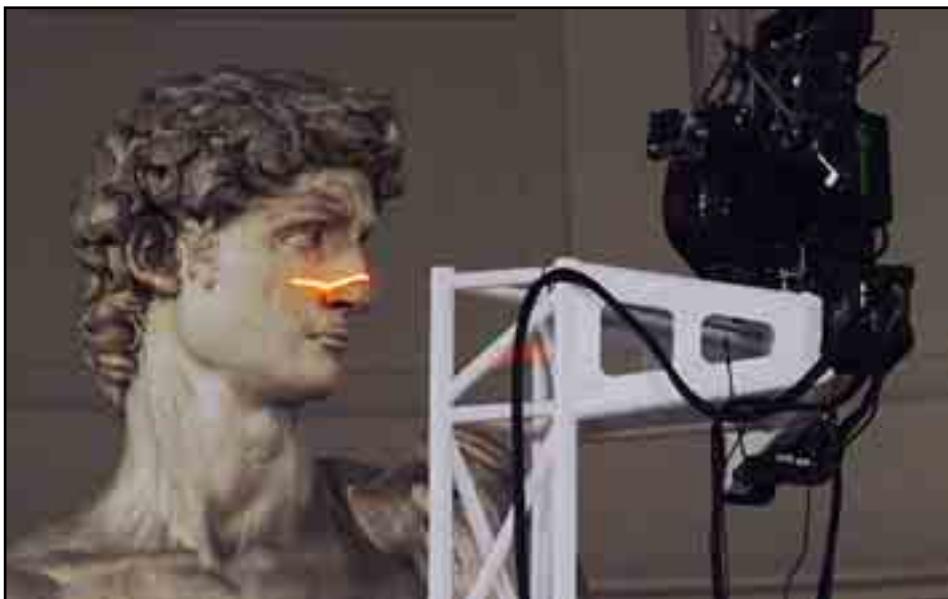
План лекции

- Введение
- Многовидовое пассивное стерео
 - Воксельные подходы
 - Подход на основе объединения сеток
 - Разрастание регионов
- Активное стерео
- Приложение: реконструкция головы человека



Системы сканирования

- Лазерные сканеры – система измерения координат
 - Очень точные
 - Дорогие
 - Сложны в использовании



Проект “Michelangelo”



Minolta

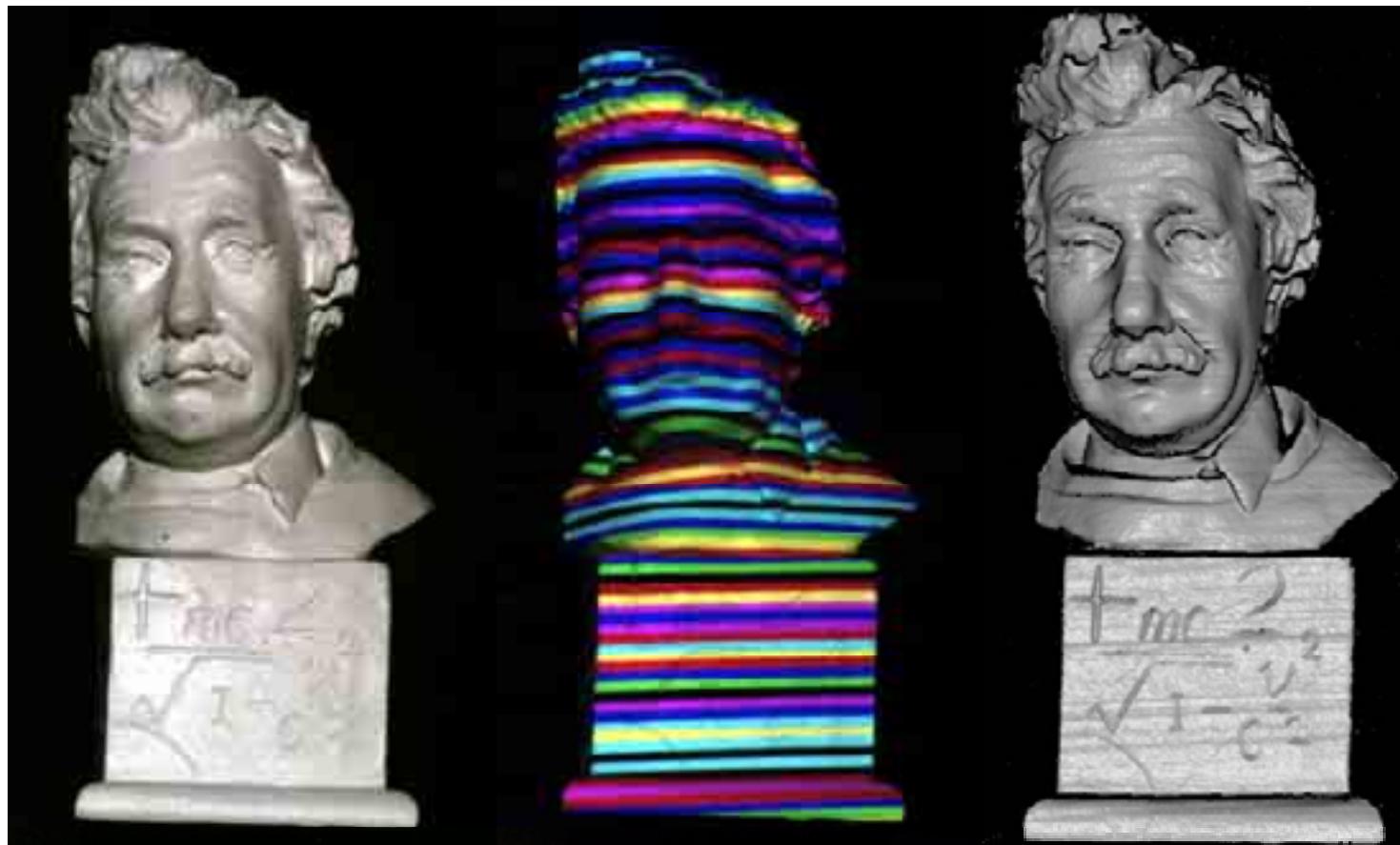


Contura CMM



Системы сканирования

- Структурированный свет

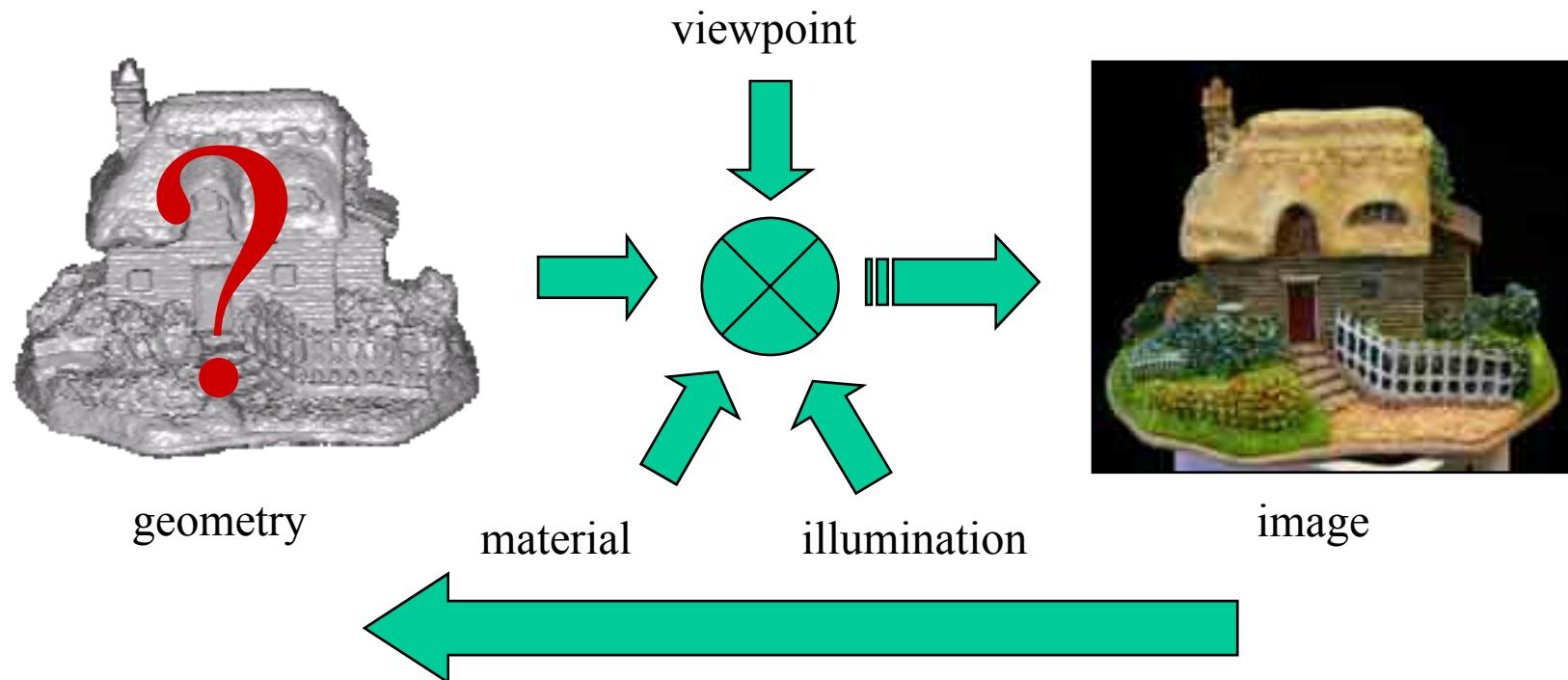


[Zhang02]



Реконструкция по фотографиям

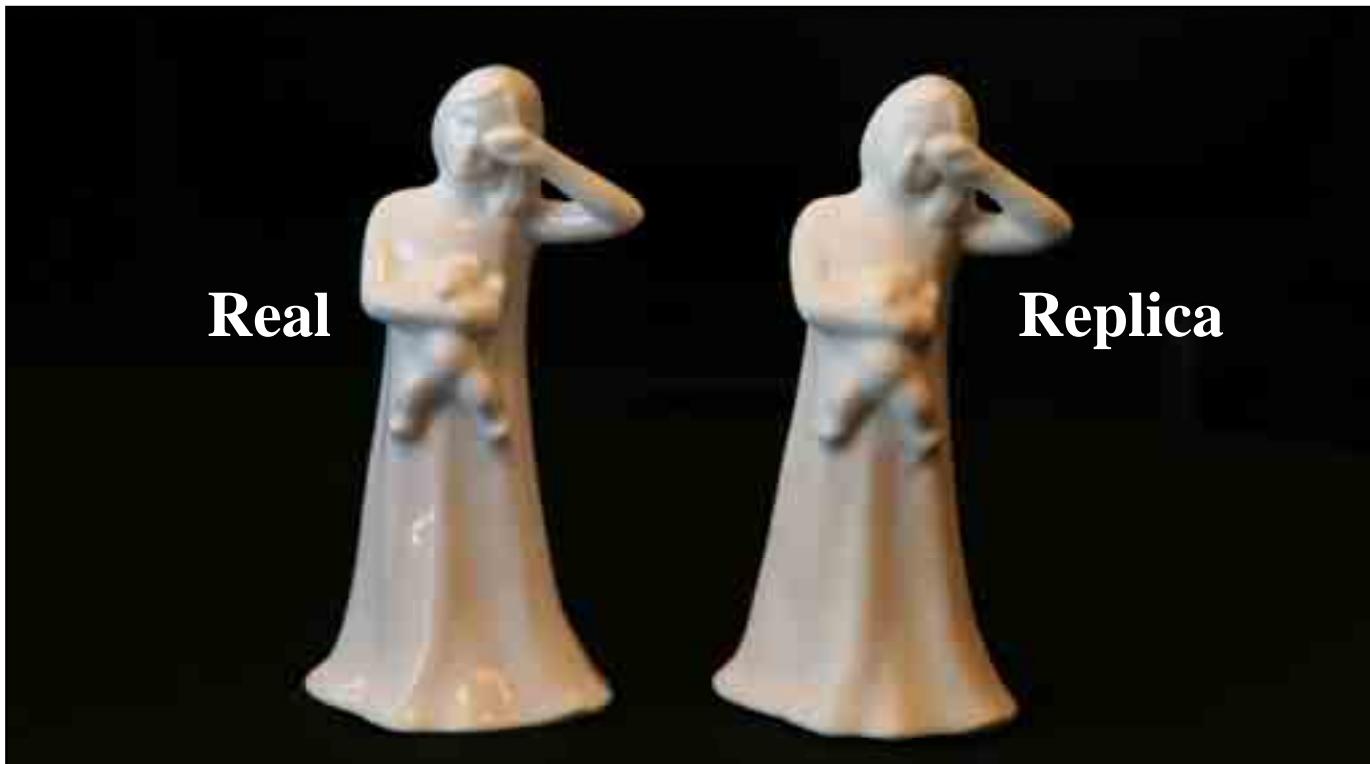
“Estimate a 3d shape that would generate the input photographs given the same material, viewpoints and illumination”





Реконструкция по фотографиям

“Estimate a 3d shape that would generate the input photographs given the same material, viewpoints and illumination”





Реконструкция по фотографиям

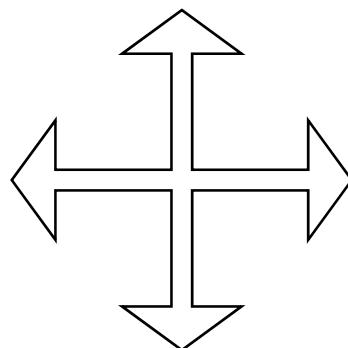
Внешность объекта сильно зависит от материалов и освещения



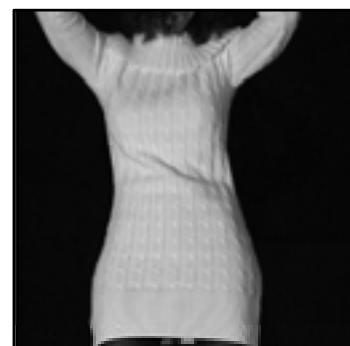
жесткий



с текстурой



деформирующийся





Реконструкция по фотографиям

Внешность объекта сильно зависит от материалов и освещения



Нет единого алгоритма для всех типов сцен

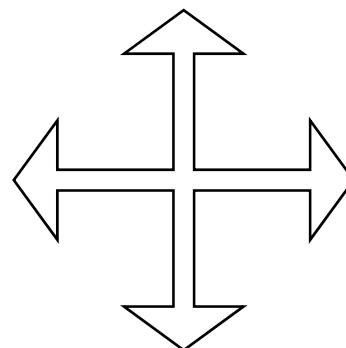


с текстурой

жесткий



без текстуры



деформирующийся





Фото-согласование

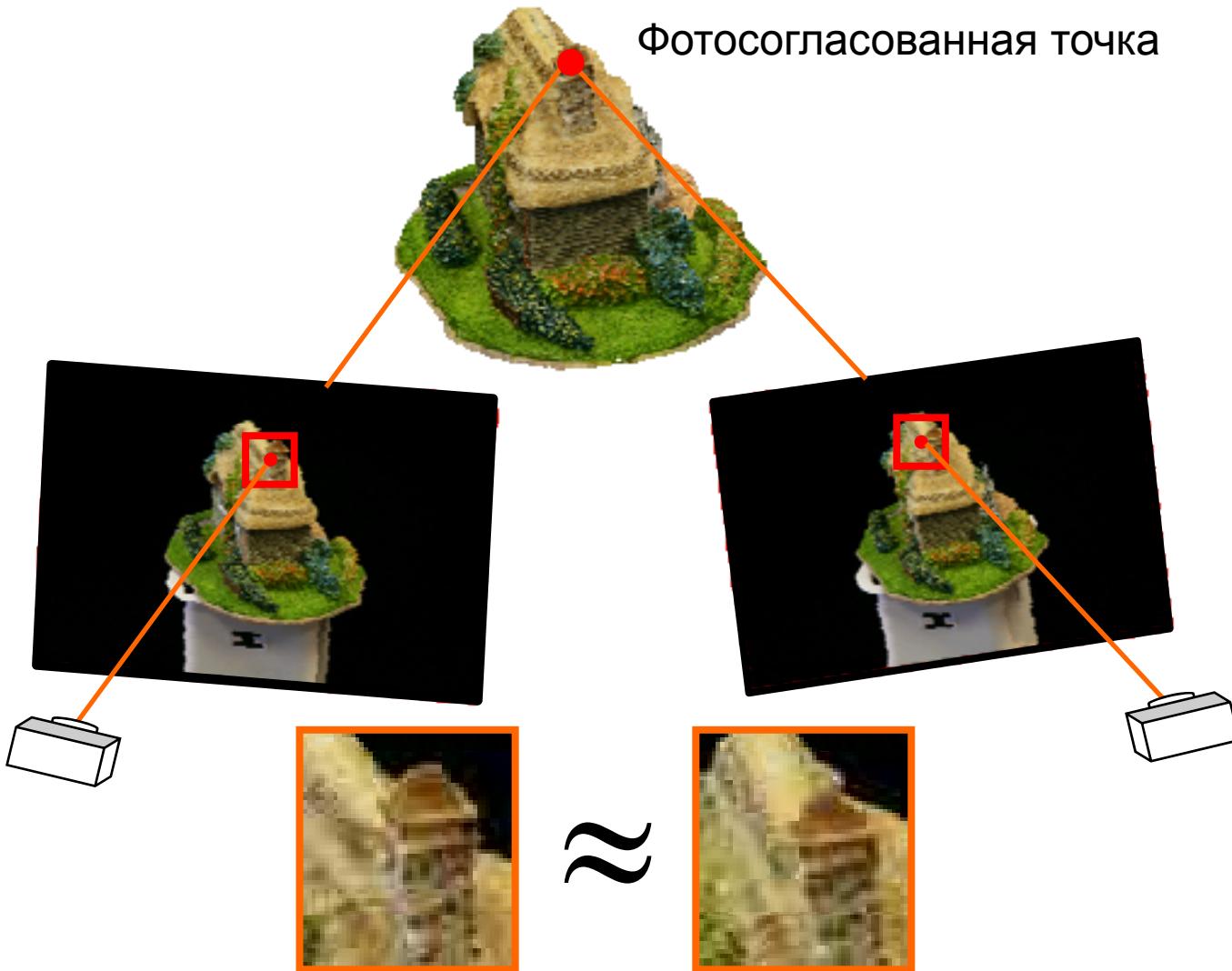




Фото-согласование

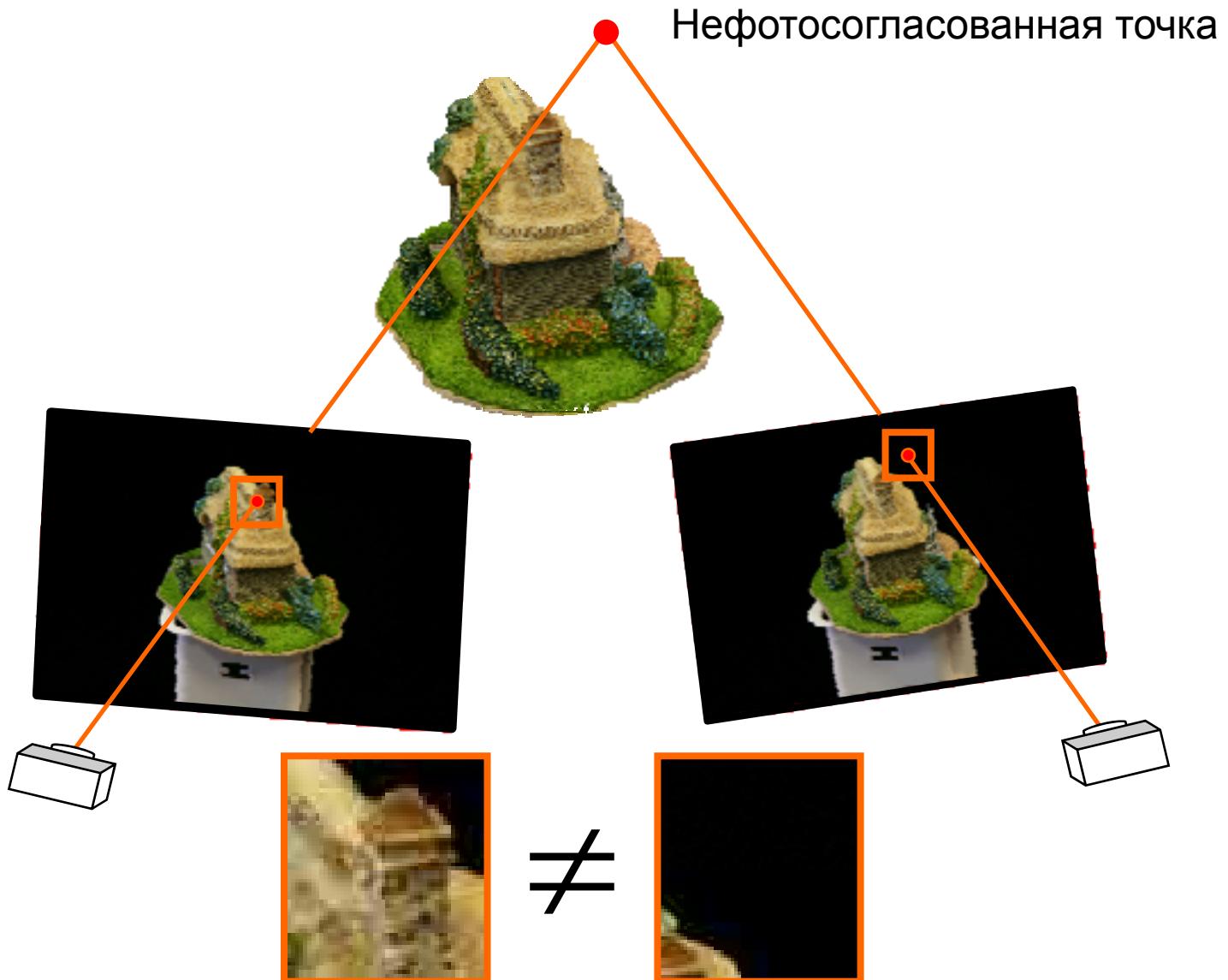
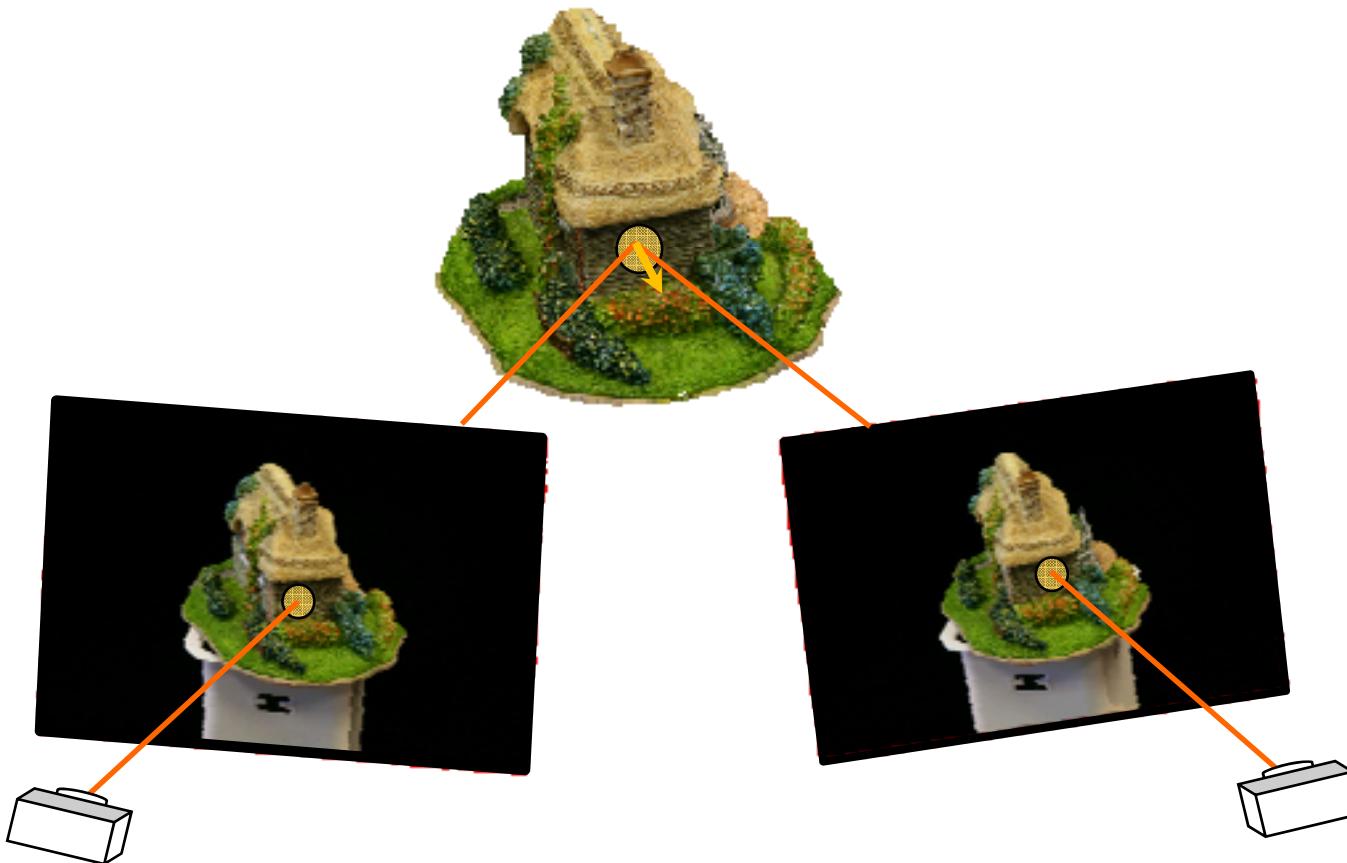


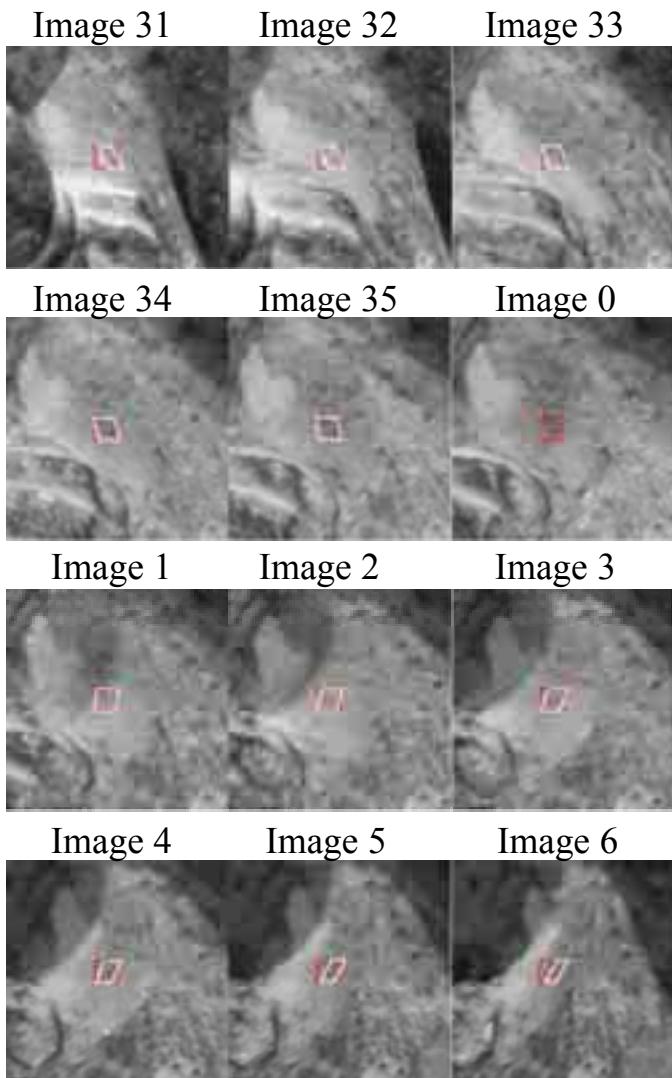


Фото-согласование фрагмента

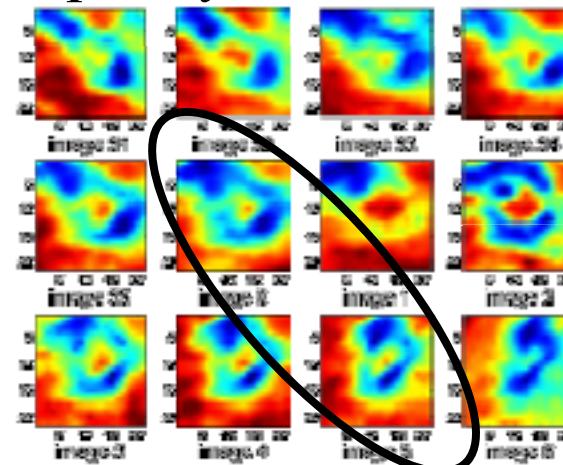




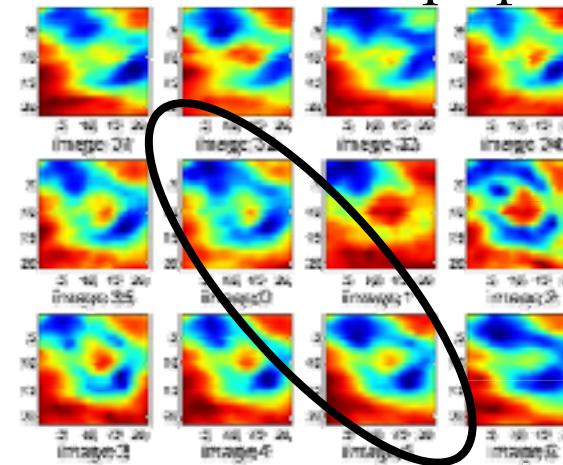
Сравнение окон



Прямоугольное окно



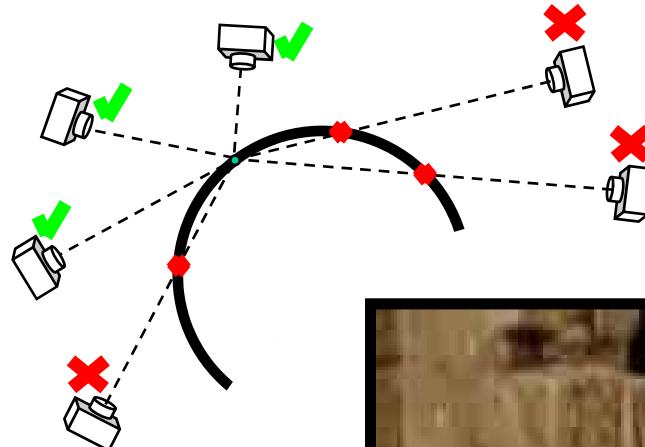
Окно по гомографии





Проблемы фото-согласования

- Видимость камеры
- Ошибки метрики
 - Повтор текстуры
 - Отсутствие текстуры
 - Блики





Многовидовое стерео

- Сравнения и оценки:
 - **A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms**,
S. Seitz et al., CVPR 2006, vol. 1, pages 519-526.
- История алгоритмов:
 - **Representing stereo data with the Delaunay triangulation**,
O. Faugeras et al., Artificial Intelligence, 44(1-2):41-87, 1990.
 - **A multiple-baseline stereo**,
M. Okutomi and T. Kanade, TPAMI, 15(4):353-363, 1993.
 - **Object-centered surface reconstruction: Combining multi-image stereo and shading**,
P. Fua, Y. Leclerc, International Journal of Computer Vision, vol. 16:35-56, 1995.
 - **A portable three-dimensional digitizer**,
Y. Matsumoto et al., Int. Conf. on Recent Advances in 3D Imaging and Modeling, 197-205, 1997.
 - **Photorealistic Scene Reconstruction by Voxel Coloring**,
S. M. Seitz and C. R. Dyer, CVPR., 1067-1073, 1997.
 - **Variational principles, surface evolution, PDE's, level set methods and the stereo problem**,
O. Faugeras and R. Keriven, IEEE Trans. on Image Processing, 7(3):336-344, 1998.



Многовидовое стерео

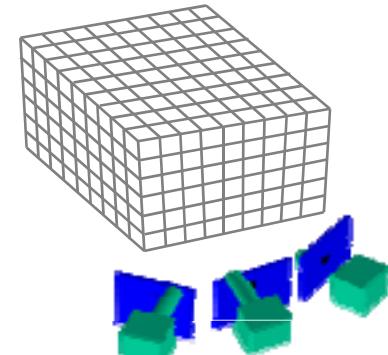
- Сравнения и оценки:
 - A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms,
S. Seitz et al., CVPR 2006, vol. 1, pages 519-526.
 - <http://vision.middlebury.edu/mview/>
- Недавно много новых алгоритмов появилось
- Высокая точность
- Почти все работают с небольшим количеством изображений (~100) основное исключение exception [Pollefeys08]
- Оффлайн-методы

| SoftB | Image Full 112 views Avg. Comp [s] / [M] [mm] / [m] | Image Avg 40 views Avg. Comp [s] / [M] [mm] / [m] | Image Sparse 10 views Avg. Comp [s] / [M] [mm] / [m] | Image Full 100 views Avg. Comp [s] / [M] [mm] / [m] | Image Avg 40 views Avg. Comp [s] / [M] [mm] / [m] | Image Sparse 10 views Avg. Comp [s] / [M] [mm] / [m] |
|---------------------|---|---|--|---|---|--|
| Funkasai 3 | 0.49 99.8 | 0.47 99.8 | 0.63 99.3 | 0.33 99.8 | 0.28 99.8 | 0.37 99.2 |
| Campbell | 0.41 99.8 | 0.38 99.4 | 0.52 99.4 | | | |
| Hernandez | 0.36 99.7 | 0.32 99.5 | 0.75 99.3 | 0.49 99.8 | 0.45 97.9 | 0.8 99.5 |
| Funkasai 2 | 0.54 99.3 | 0.56 99.1 | 0.62 99.2 | 0.32 99.8 | 0.33 99.8 | 0.42 99.2 |
| Zehner | | 0.38 99.2 | 0.78 99.8 | | 0.42 99.8 | 0.46 99.2 |
| Zach2 | 0.31 99.8 | 0.36 99.5 | | 0.35 99.7 | 0.31 99.1 | |
| SurfView3D | | 0.38 99.8 | 0.78 99.8 | | 0.38 97.7 | 0.68 97.8 |
| Bradley | 0.37 99.1 | 0.48 99.7 | | 0.39 97.9 | 0.38 94.7 | |
| Zach | | 0.38 99.2 | | | 0.37 99.0 | |
| Funkasai | 0.35 99.7 | 0.36 99.5 | 0.82 99.2 | 0.42 99.8 | 0.38 99.8 | |
| Pois | 0.38 99.8 | 0.38 99.4 | | 0.38 99.8 | 0.31 97.9 | |
| Gorsse | 0.42 99.3 | 0.52 99.7 | 0.68 99.6 | 0.36 99.3 | 0.45 97.8 | 0.56 99.4 |
| Zaharescu | | 0.32 99.1 | | | 0.38 99.1 | |
| Vogiatzis2 | 0.3 99.4 | 0.36 99.2 | 0.68 99.3 | | | 0.31 99.2 |
| Somamm | | 0.38 97.2 | | | | |
| ICCV_1500 | 0.36 99.8 | 0.37 99.8 | 0.74 94.9 | 0.31 73.8 | 0.71 76.8 | 0.66 74.9 |
| Kolev2 | | 0.32 97.8 | 1.04 81.6 | | 0.43 99.4 | 0.33 99.3 |
| SurfCut | | 0.73 97.3 | | | 0.59 99.7 | |
| Merrill Stability | | 0.79 95.2 | | | 0.73 73.1 | |
| Vogiatzis | 1.37 99.7 | 0.76 99.2 | 2.37 76.4 | 0.42 99.3 | 0.49 99.7 | 1.16 90.8 |
| Kolev | | 0.78 99.9 | | | 0.53 99.8 | |
| Sinha | | 0.78 94.9 | | | 0.39 97.2 | |
| Merrill Confidence | | 0.79 99.9 | | | 0.64 93.1 | |
| Aurier | | 0.52 1.02 92.5 | | | 0.62 99.7 | 0.74 99.8 |
| Brecha | | 0.78 1.00 94.1 | | | 1.21 92.6 | 1.47 94.9 |
| Gargala | | 0.68 0.99 91.8 | | | 0.6 92.8 | 0.76 90.7 |
| Tan | 1.12 92.3 | 1.53 96.4 | | 1.12 92.3 | 1.26 99.3 | |
| Kolmogorov | | 0.64 90.4 | | | 2.37 98.0 | |
| Continuous Probabil | | 0.86 92.1 | | | 2.65 95.4 | |
| SDM_156 | 0.55 99.7 | | | 0.76 99.3 | | |
| Delaunay | | 0.72 96.9 | | | 0.88 93.8 | |
| Gorsse_2007 | 0.42 99.2 | | | 0.46 94.7 | | |
| Halbecke | 0.36 99.3 | | | 0.43 99.7 | | |
| Hornung | 0.54 99.7 | | | 0.79 95.1 | | |
| JancosekCWWW | | | | | 0.78 95.8 | |
| Ladikos | | | | | | 0.59 97.0 |
| Liu | | 0.38 99.8 | | | | 0.59 98.2 |
| Liu2 | | 0.53 98.8 | | | | 0.51 94.7 |
| Massively Parallel | 0.19 92.2 | | | | | |
| Stanek | | | 1.27 97.7 | | | 1.07 93.7 |



Воксельные объёмы

1. Инициализация воксельного объема сцены



2. Итеративная проверка всех векселей на фотосогласованность



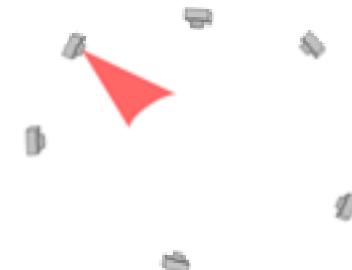
3. Повторяем до сходимости, пока все voxели на поверхности не станут фотосогласованными



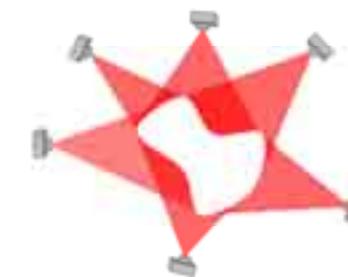


Схема объединения карт глубины

1. Вычисляем карту глубины



2. Объединяем карты глубины
в объеме



3. Извлекаем 3д поверхность

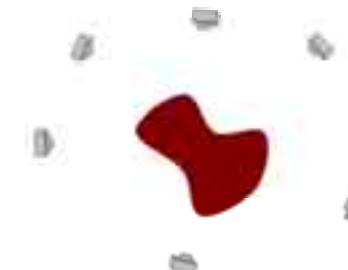
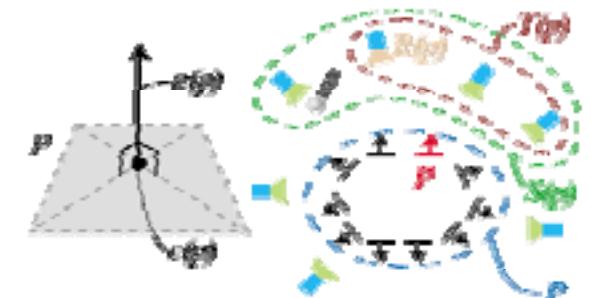




Схема роста регионов

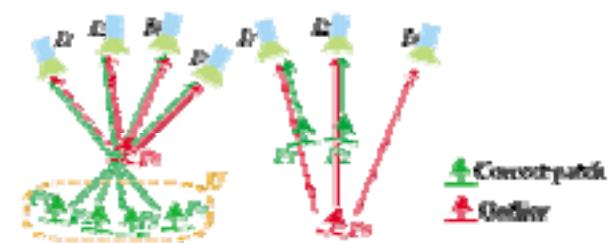
1. Этап подгонки

Локальный фрагмент поверхности подгоняется, с учётом видимости



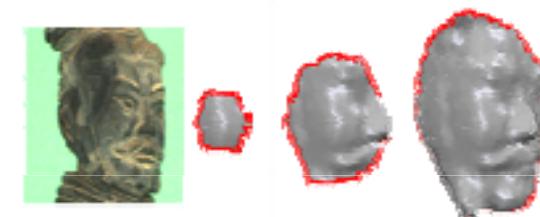
2. Этап фильтрации

Жестко обеспечивается видимость



3. Этап расширения

Удачные фрагменты используются для инициализации активной границы





Лучшие алгоритмы

| | Рост регионов | Объединение карт глубины |
|---------|---|---|
| summary | Начинает с облака 3д точек, растим небольшие фрагменты поверхности, максимиизируя фотосогласованность | Объединяем набор карт глубины, полученных с помощью бинокулярного стерео |
| pros | Обеспечивает наилучшие результаты за счет фотосогласования с опорой на плоскости | Элегантный подход Подключаемые блоки Легко распараллеливается |
| cons | Много настраиваемых параметров, трудно подогнать к оптимуму | Метрика фотосогласования простая и не оптимальная. Метрика ошибается, когда нет текстуры или низкое разрешение |



План лекции

- Введение
- Многовидовое пассивное стерео
 - Воксельные подходы
 - Подход на основе объединения сеток
 - Разрастание регионов
- Активное стерео
- Приложение: реконструкция головы человека



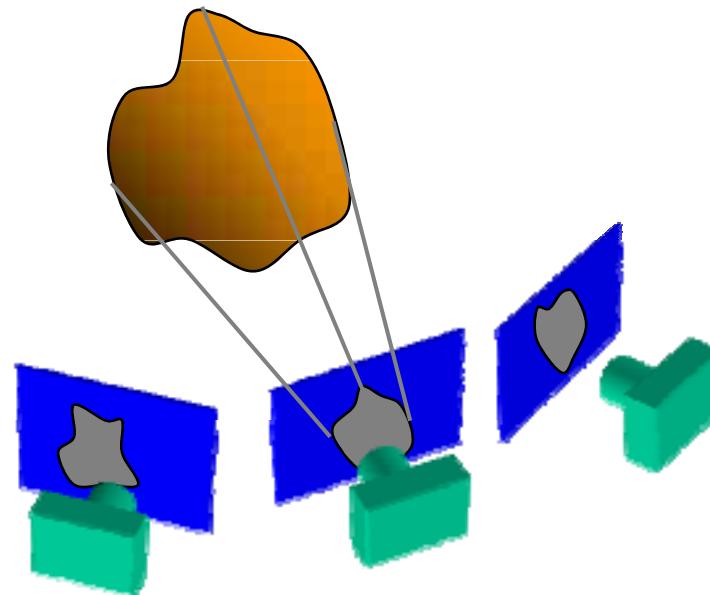
Алгоритмы раскраски вокселей

1. Цветов=2 (Силуэты)
 - Пересечение объемов
2. Кол-во цветов не ограничено
 - ограничение на точки обзора
3. Общий случай



Реконструкция по силуэтам

Бинарные
Изображения →
(2 цвета)

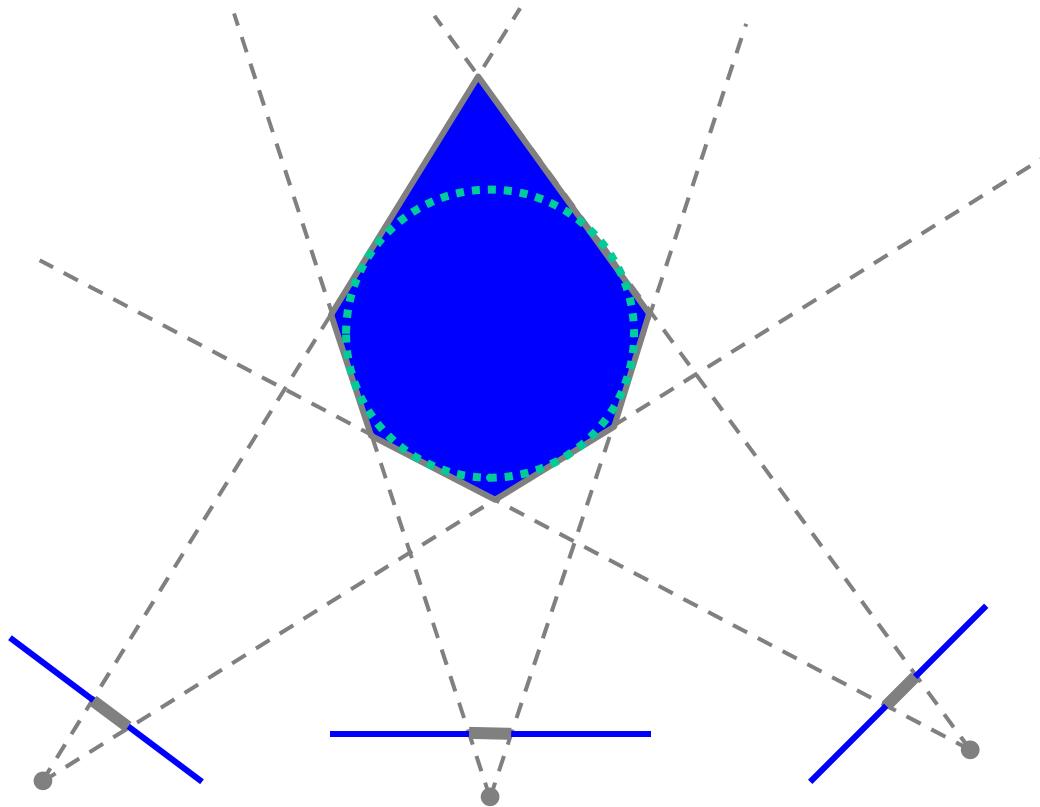


Подход

- Построить конус видимости по каждому силуэту
- Пересечь конусы видимости



Пересечение объемов

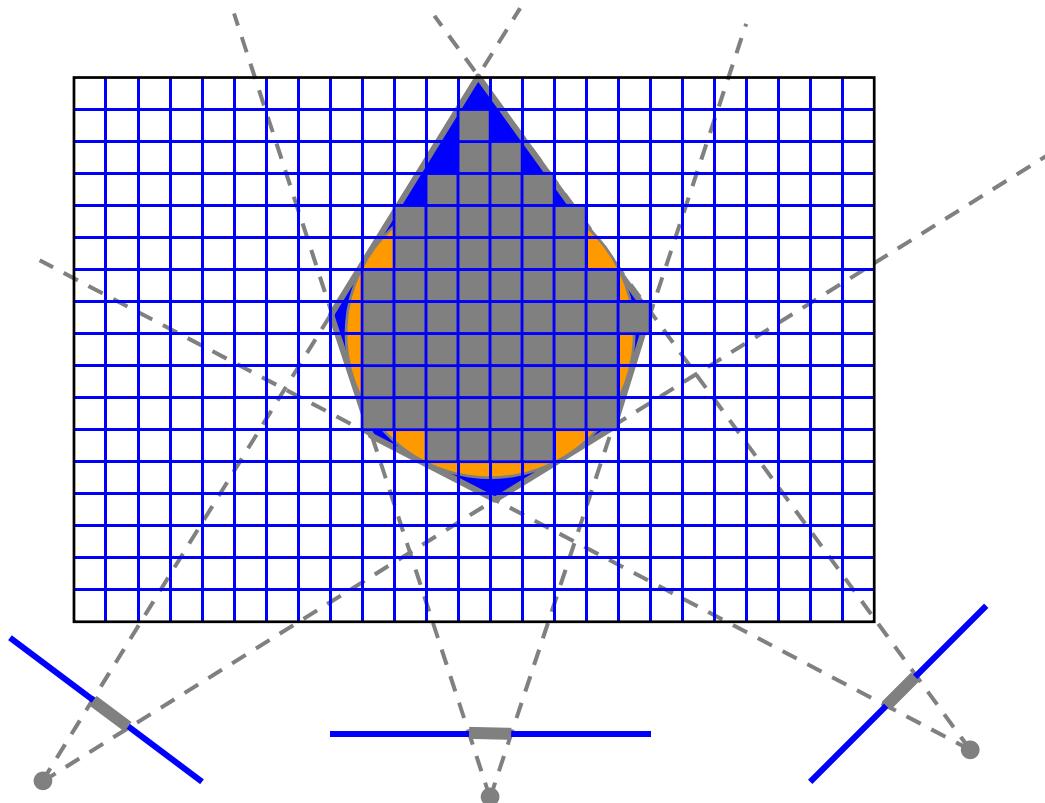


Результат содержит исходную сцену

- В общем случае не совпадает с исходной сценой
- В пределе (по всевозможным изображениям) результат называется **видимой оболочкой (*Visual Hull*)**



Воксельный алгоритм



- Раскрасим воксель черным, если он проецируется внутрь силуэта на каждом изображении
- Удалим воксель, если он попадает вне силуэта хотя бы на 1-м изображении



Свойства пересечения объемов

Преимущества

- Легок в реализации
- Быстрый
- Можно ускорить с помощью окто-деревьев

Недостатки

- Невозможно моделировать полости объекта
- Реконструкция не согласована по цветам
- Необходимо определить силуэты объекта



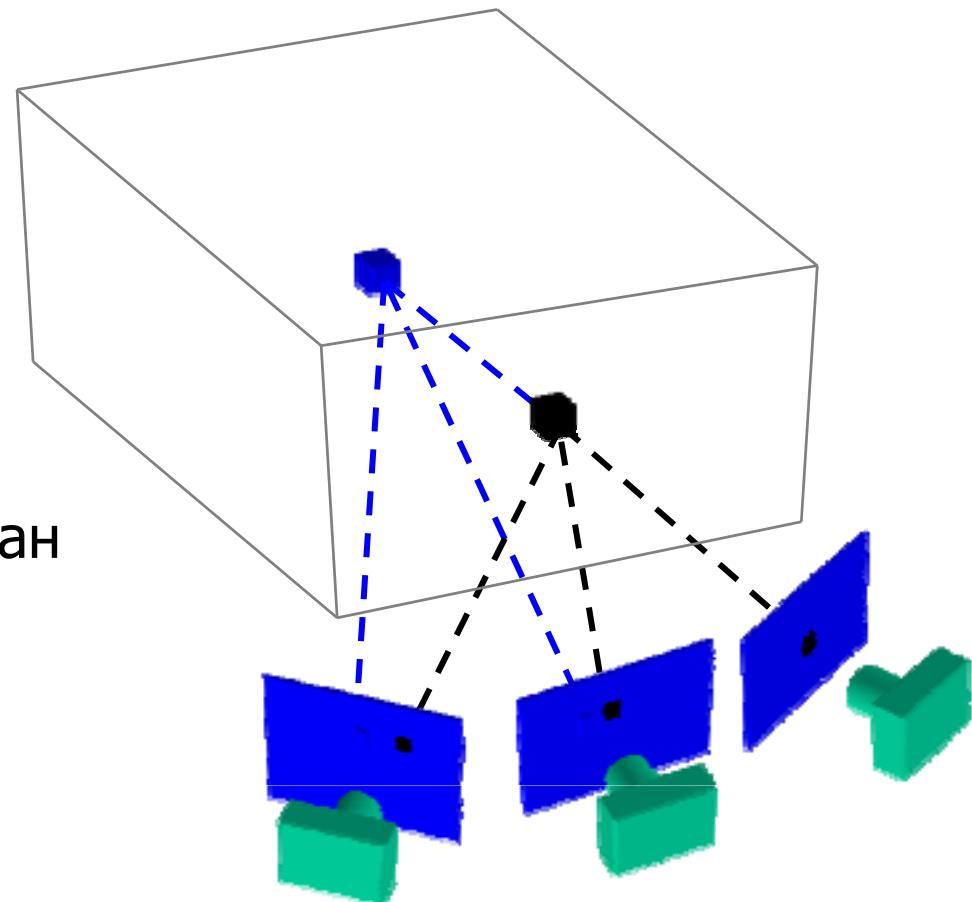
Алгоритмы раскраски вокселей

1. Цветов=2 (Силуэты)
 - Пересечение объемов
2. Кол-во цветов не ограничено
 - ограничение на точки обзора
3. Общий случай



Раскраска вокселей

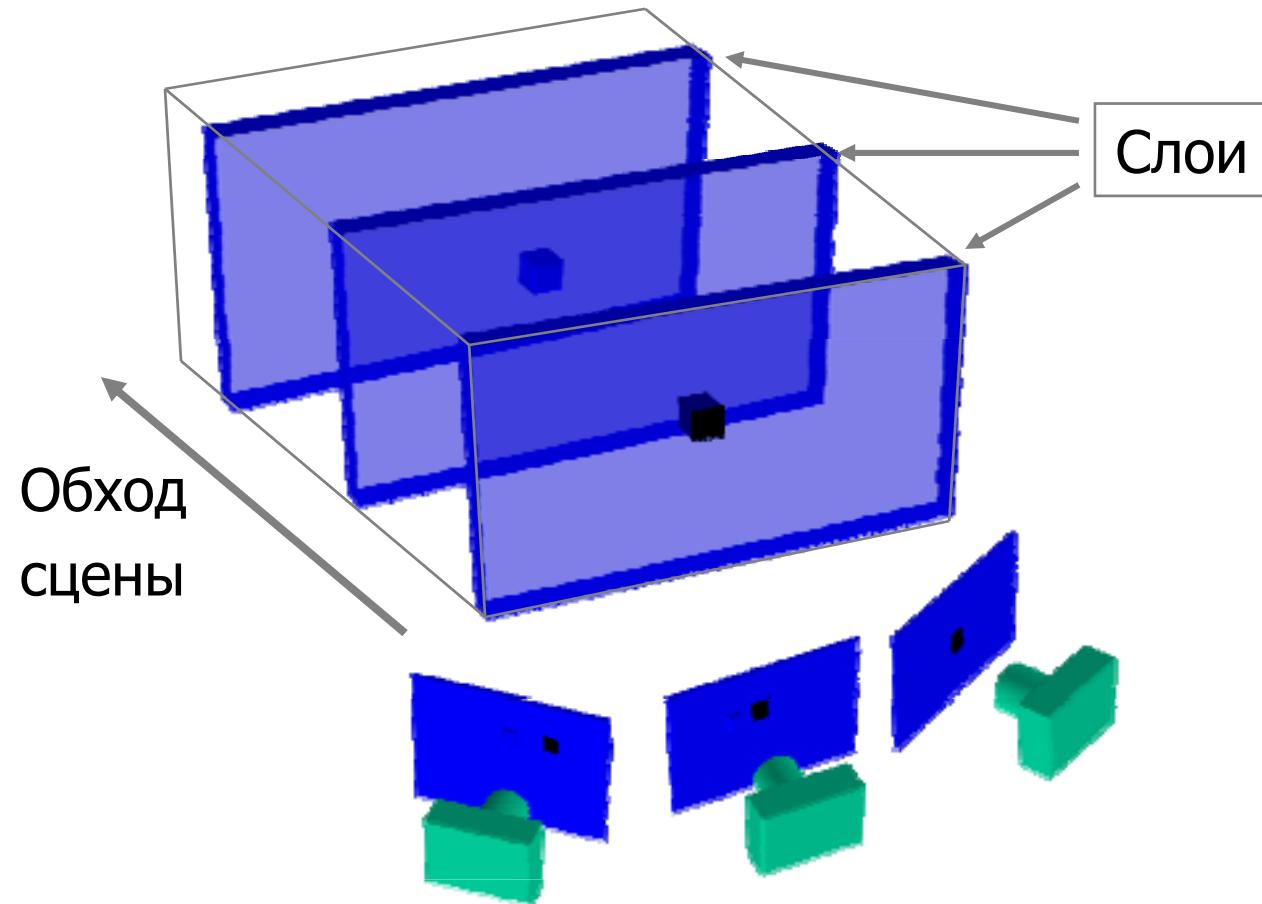
1. Выбрать воксель
2. Спроектировать и сравнить
3. Раскрасить, если согласован
(разница меньше порога)



Проблема видимости:
На каких изображениях воксель виден?



Упорядоченный обход по глубине



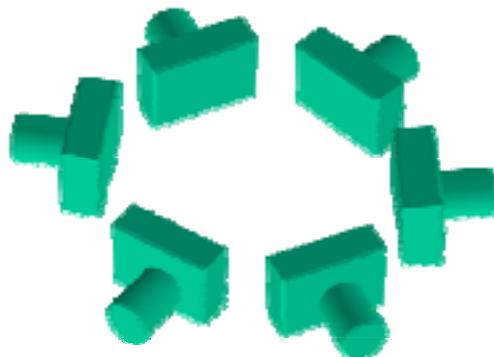
Аналогично расчету видимости в визуализации!

- Воксели на следующих плоскостях могут быть закрыты только voxelами предыдущих плоскостей



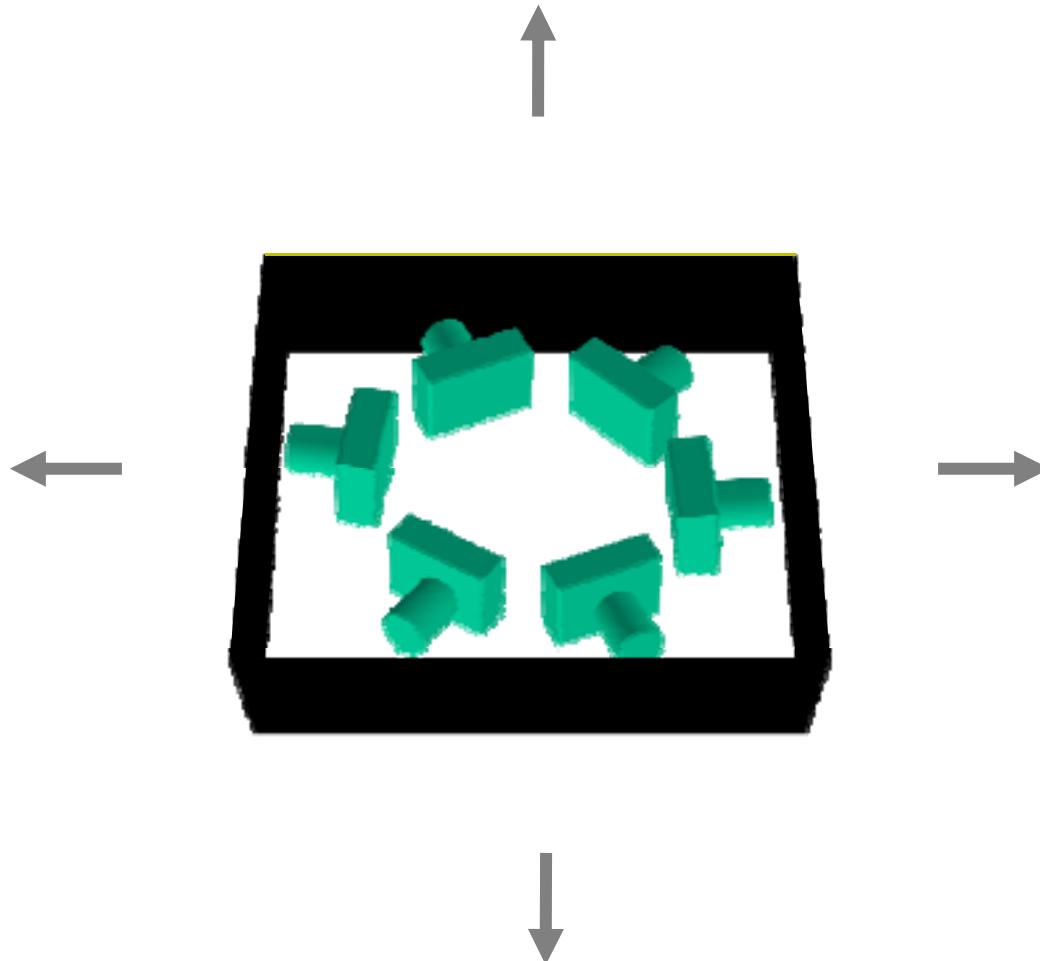
Порядок обхода для панорам

- Камеры направленные в разные стороны
- Плоский порядок обхода по глубине не подходит





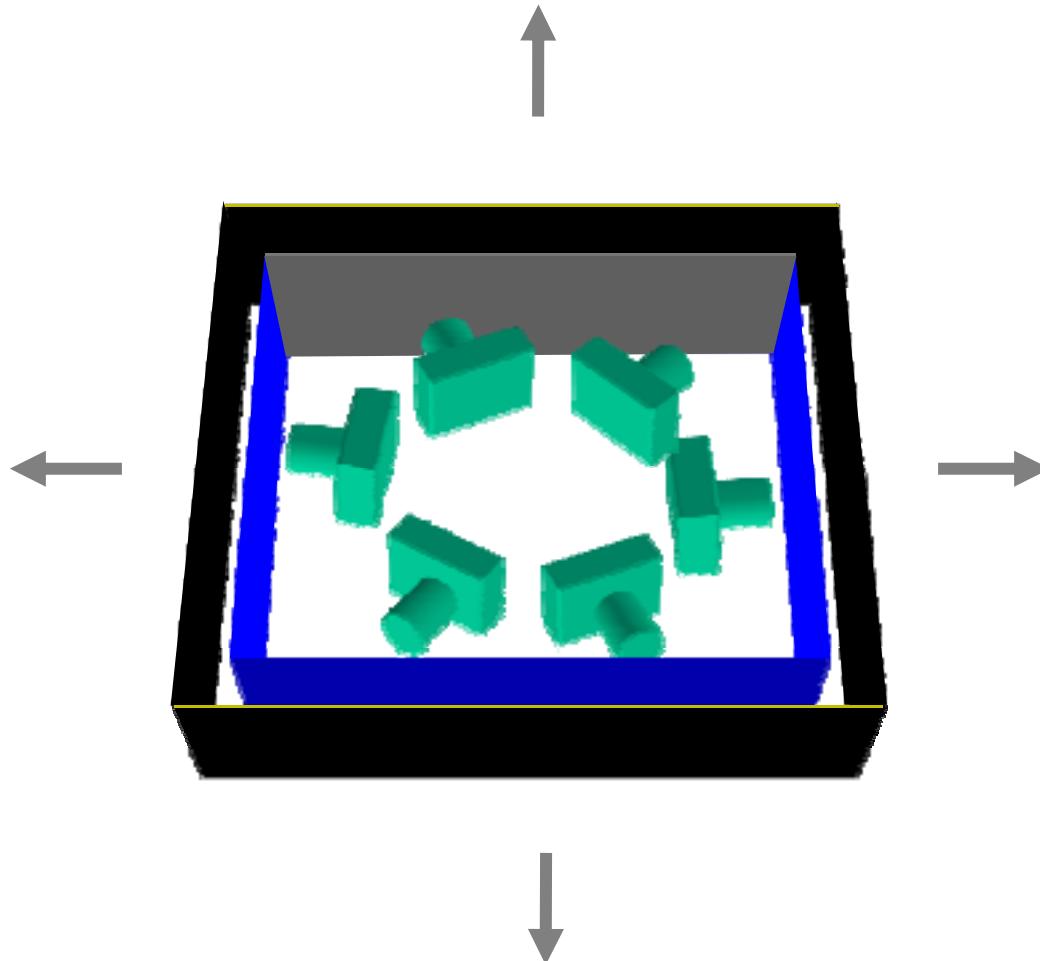
Порядок обхода для панорам



Слои расходятся по направлению «от центра»



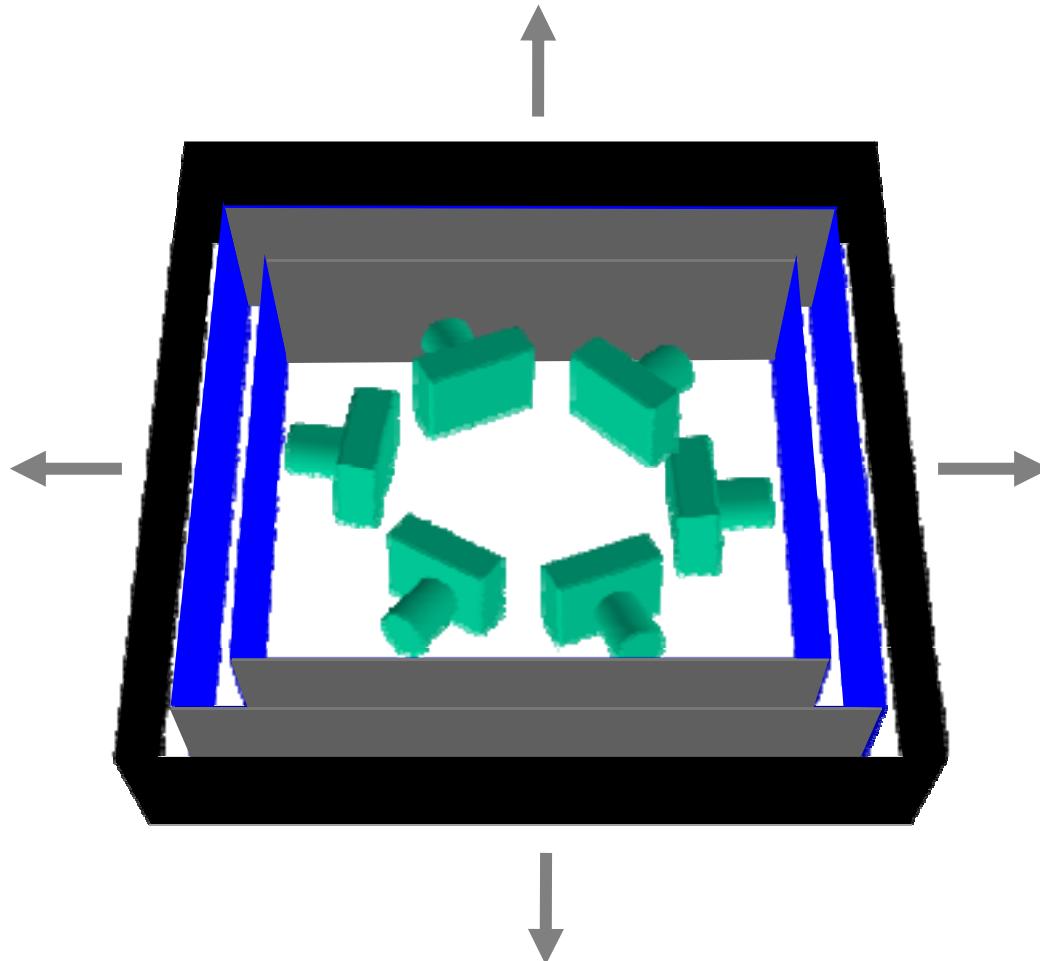
Порядок обхода для панорам



Слои расходятся по направлению «от центра»



Порядок обхода для панорам



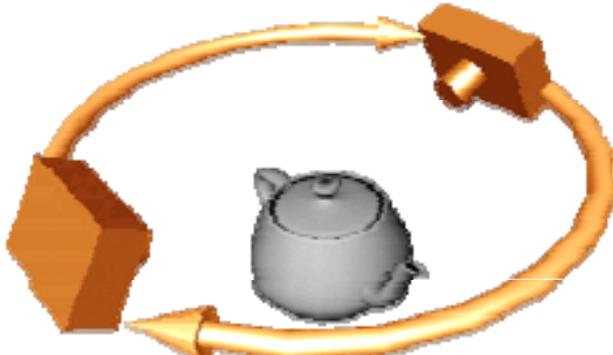
Слои расходятся по направлению «от центра»



Возможные конфигурации камер

Ограничение

- Сцена расположена вне выпуклой оболочки камеры



*Камеры направлены
внутрь*
Камеры выше сцены



*Камеры направлены
вовне*
Камеры внутри сцены



Раскраска вокселей



Динозавр

72 К вокселий раскрашено
7.6 М вокселий проверено
7 мин вычислений
на 250MHz SGI



Цветов

70 К вокселий раскрашено
7.6 М вокселий проверено
7 мин вычислений
на 250MHz SGI



Ограничения подхода

Может не существовать порядка обхода вокселей по глубине для всех изображений!



Требуется более общий алгоритм

- Без ограничений на положение камеры
- Без ограничений на топологию сцены



Алгоритмы раскраски вокселей

1. Цветов=2 (Силуэты)

- Пересечение объемов

2. Кол-во цветов не ограничено

- ограничение на точки обзора

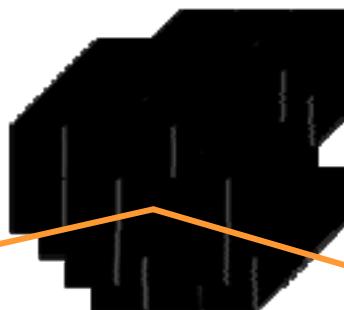
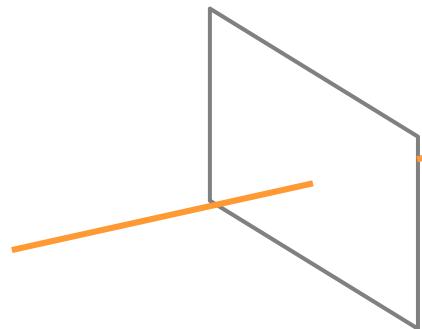
3. Общий случай

- Space carving [Kutulakos & Seitz 98]

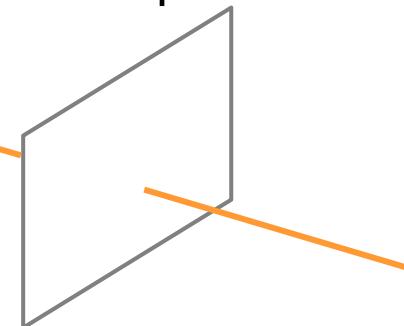


Алгоритм Space Carving

Изображение 1



Изображение N

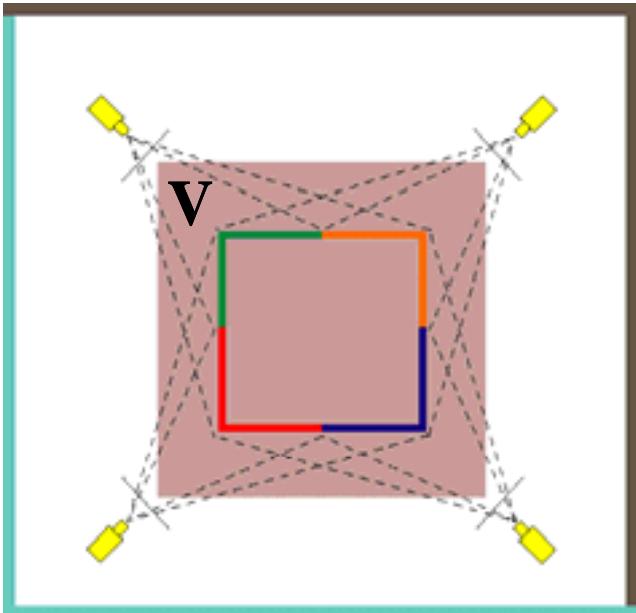


- Инициализация объема V содержащего в себе сцену
- Выбрать любой воксель на текущей поверхности
- Спроектировать на все видимые изображения
- Удалить, если он не согласован по цветам
- Повторить до сходимости

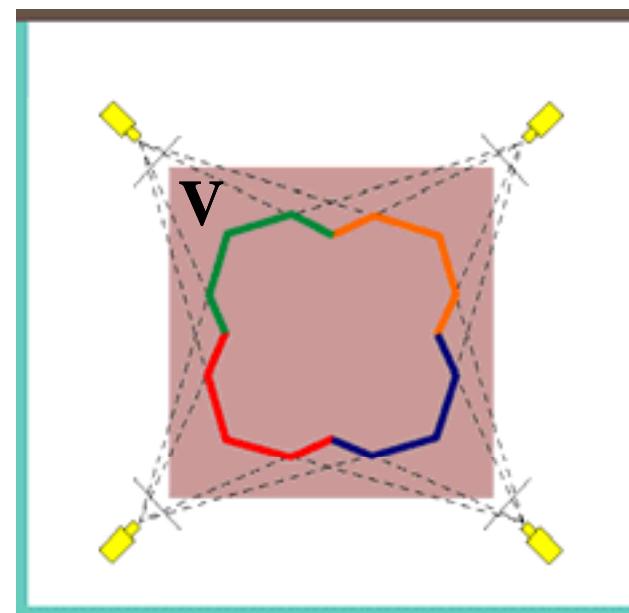


Фотооболочка

Microsoft:
Research



Истинная сцена



Фотооболочка

Фотооболочка это объединение всех фото-согласованных сцен в V

- Согласованная по цветам реконструкция сцены
- Наименьшая фото-согласованная реконструкция



Алгоритм Space Carving

Базовый алгоритм неудобен

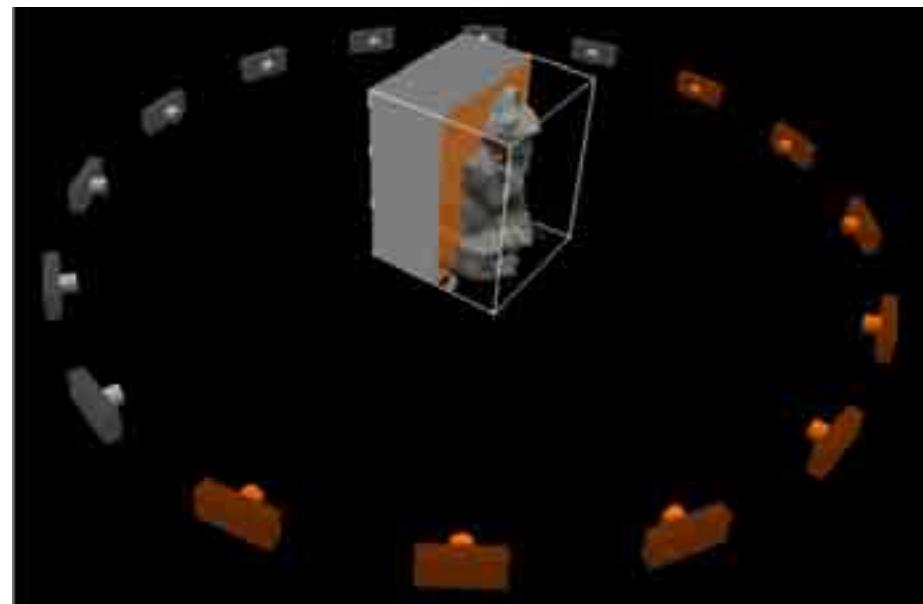
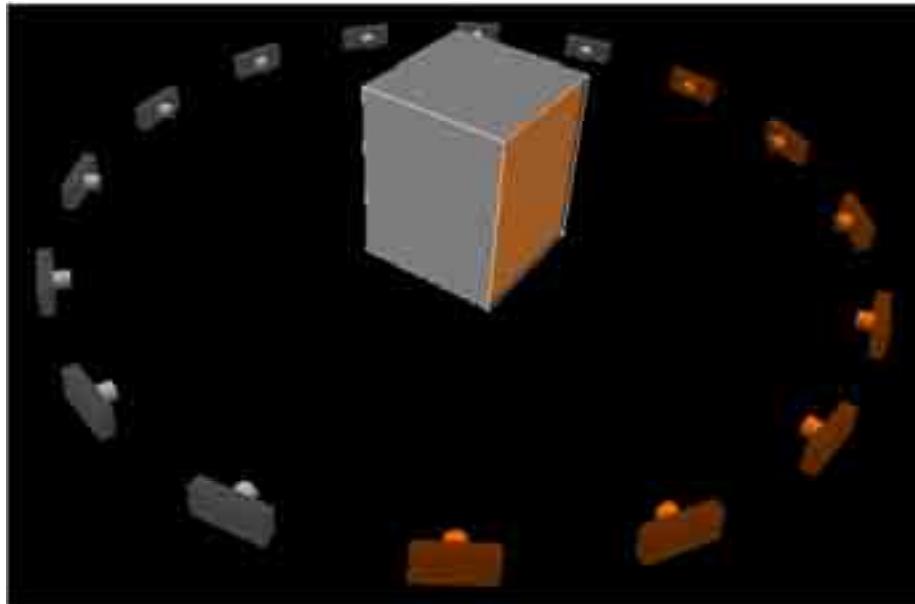
- Сложная процедура обхода

Многопроходное «заметание» плоскостей

- «Эффективный», можно использовать алгоритмы наложения текстуры
- Быстро сходится



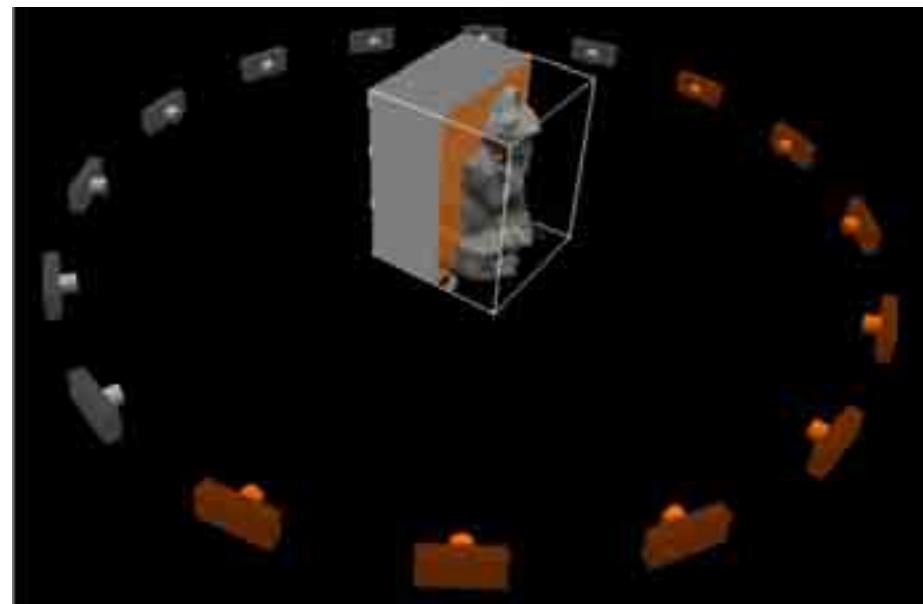
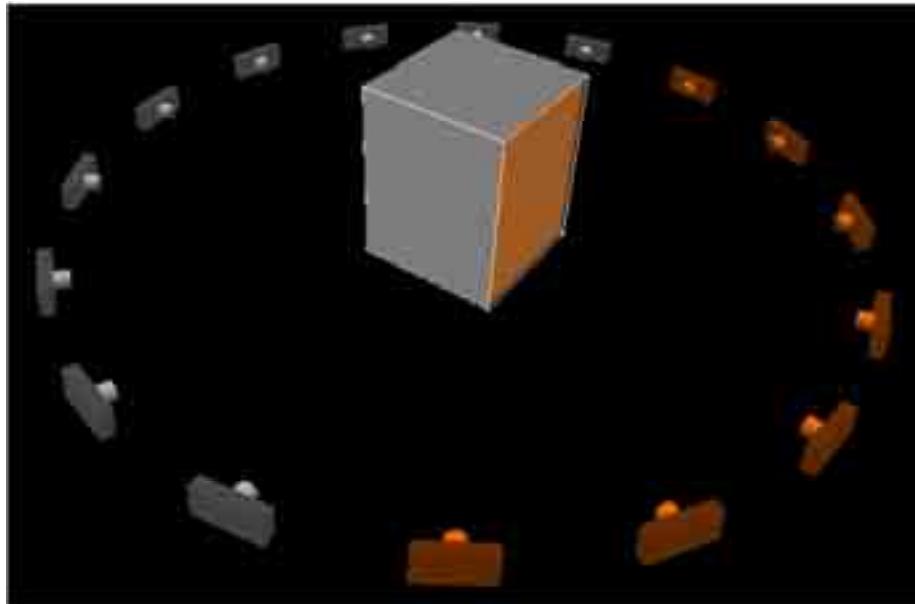
«Заметание плоскости»



- Рассматривает voxели на 1-ой плоскости
- Рассматриваем только камеры по одну сторону от плоскости



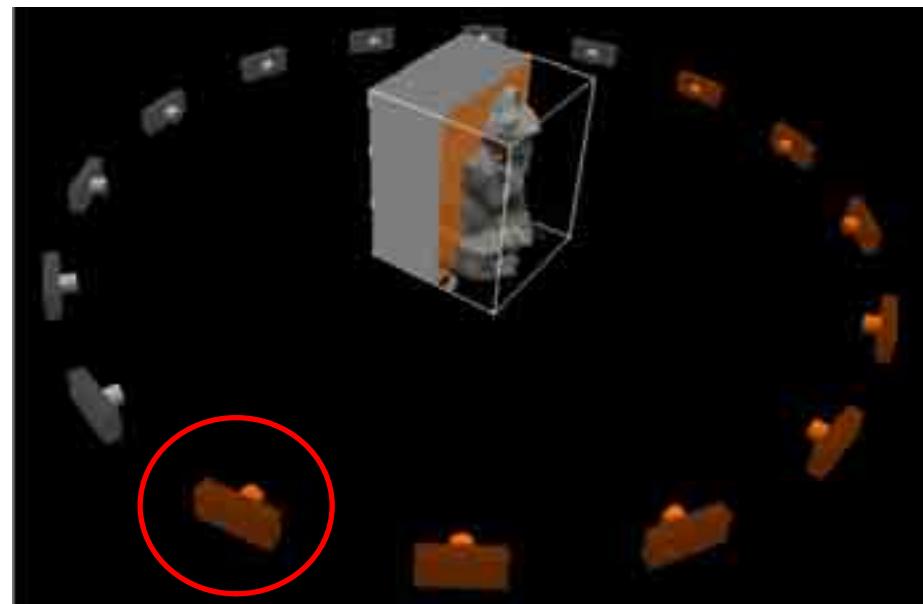
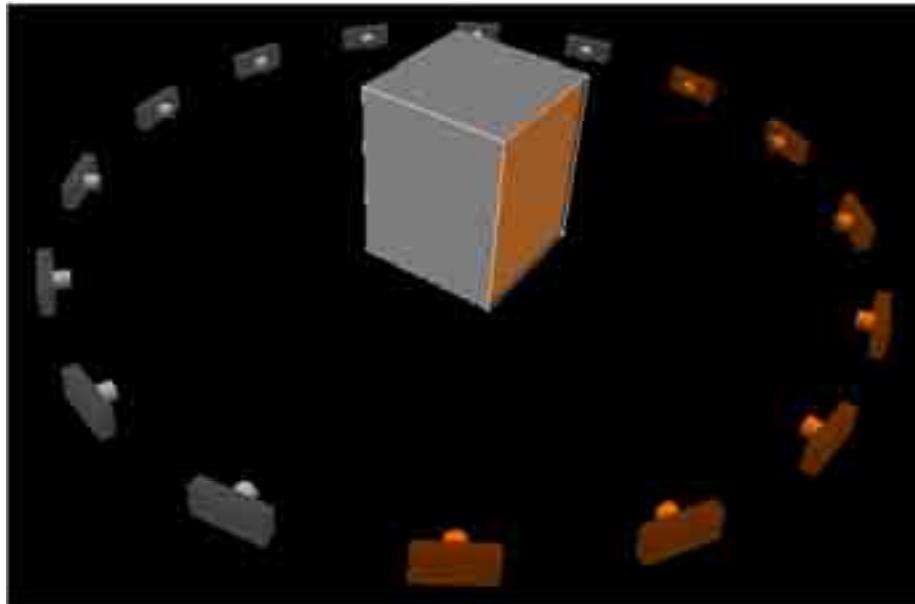
«Заметание плоскости»



- Берем пересечение плоскости Π и текущей модели V
- Для каждого вокселя v из пересечения
 - Проецируем его на изображения
 - Если соответствующие пиксели не помечены
 - Проверяем фотосогласованность
 - » Если не согласован – удаляем
 - » Если согласован – помечаем пиксель



«Заметание плоскости»



- Двигаем плоскость вдоль объема
 - Постепенно добавляем новые камеры
- Можем проецировать всю плоскость целиком
 - Используя GPU или просто визуализируя плоскость с текстурой



Результаты

Microsoft:
Research



Изображение (1 of 45)



Реконструкция



Реконструкция



Реконструкция



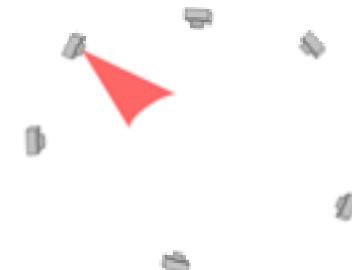
План лекции

- Введение
- Многовидовое пассивное стерео
 - Воксельные подходы
 - **Подход на основе объединения сеток**
 - Разрастание регионов
- Активное стерео
- Приложение: реконструкция головы человека

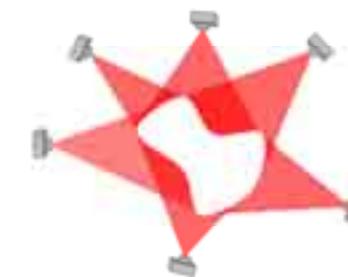


Схема объединения карт глубины

1. Вычисляем карту глубины



2. Объединяем карты глубины
в объеме



3. Извлекаем 3д поверхность



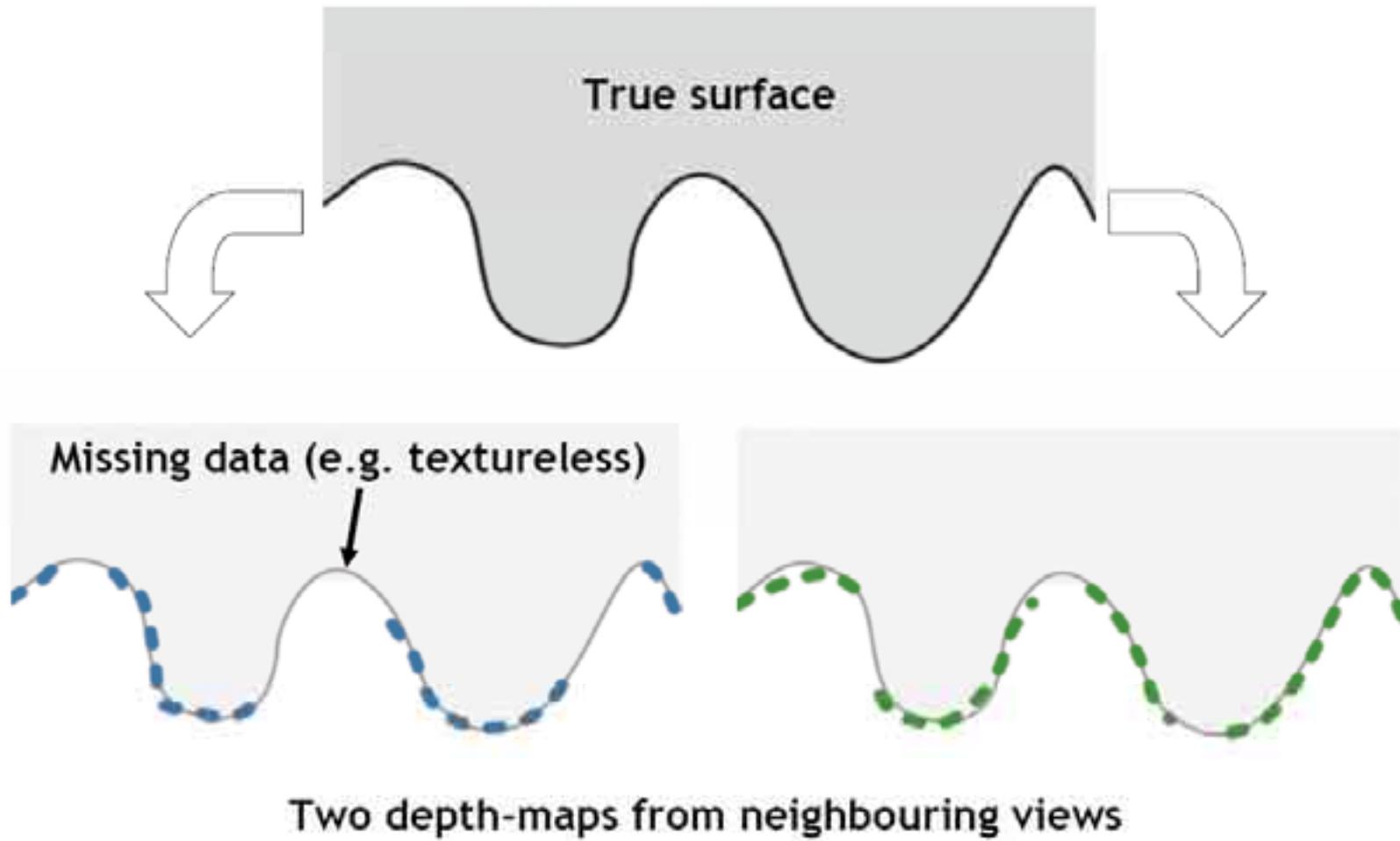


Проблема регуляризации

- Почему бы не использовать самые продвинутые методы бинокулярного стерео?
 - На основе функционалов энергии и на основе сегментов
- Проблема регуляризации:
 - В сложных областях метод интерполирует значения за счёт использования регуляризации
 - Регуляризовать приходится из-за предположения, что дополнительных данных нет
 - В случае многовидового стерео дополнительная информация есть!

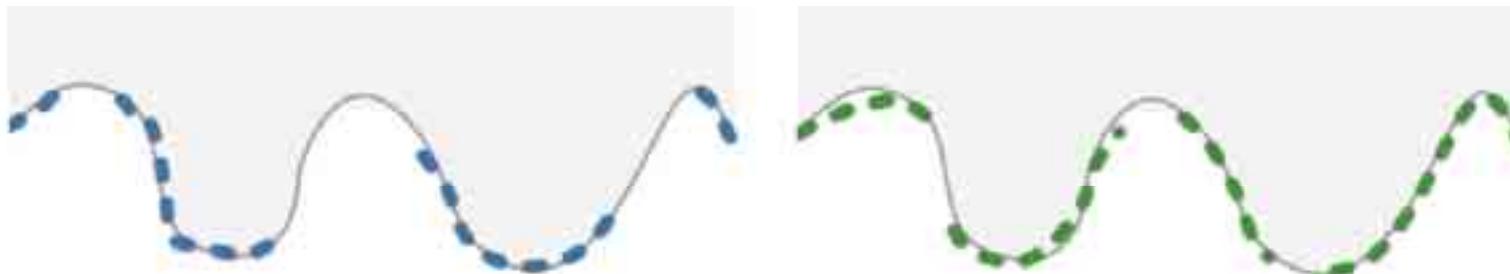


Ранняя регуляризация





Ранняя регуляризация

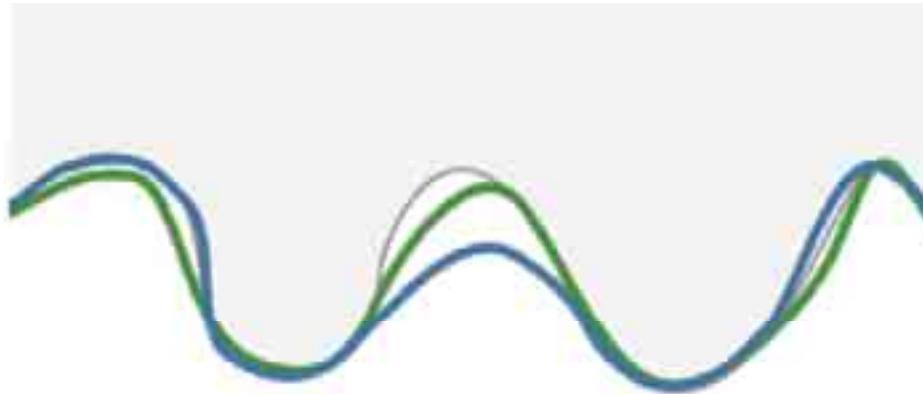


Independent regularisation for each depth-map





Объединение оценок

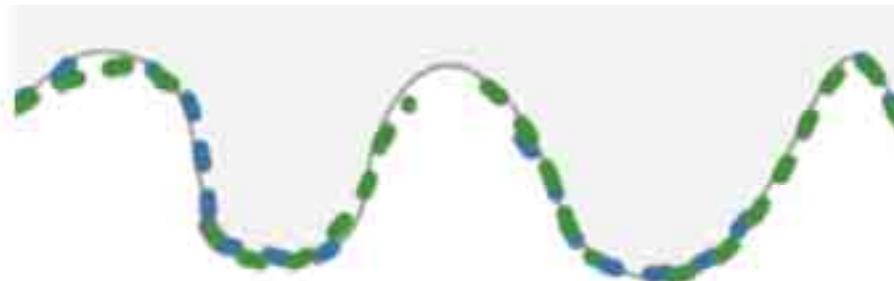


Combine the two estimates





Ранняя регуляризация

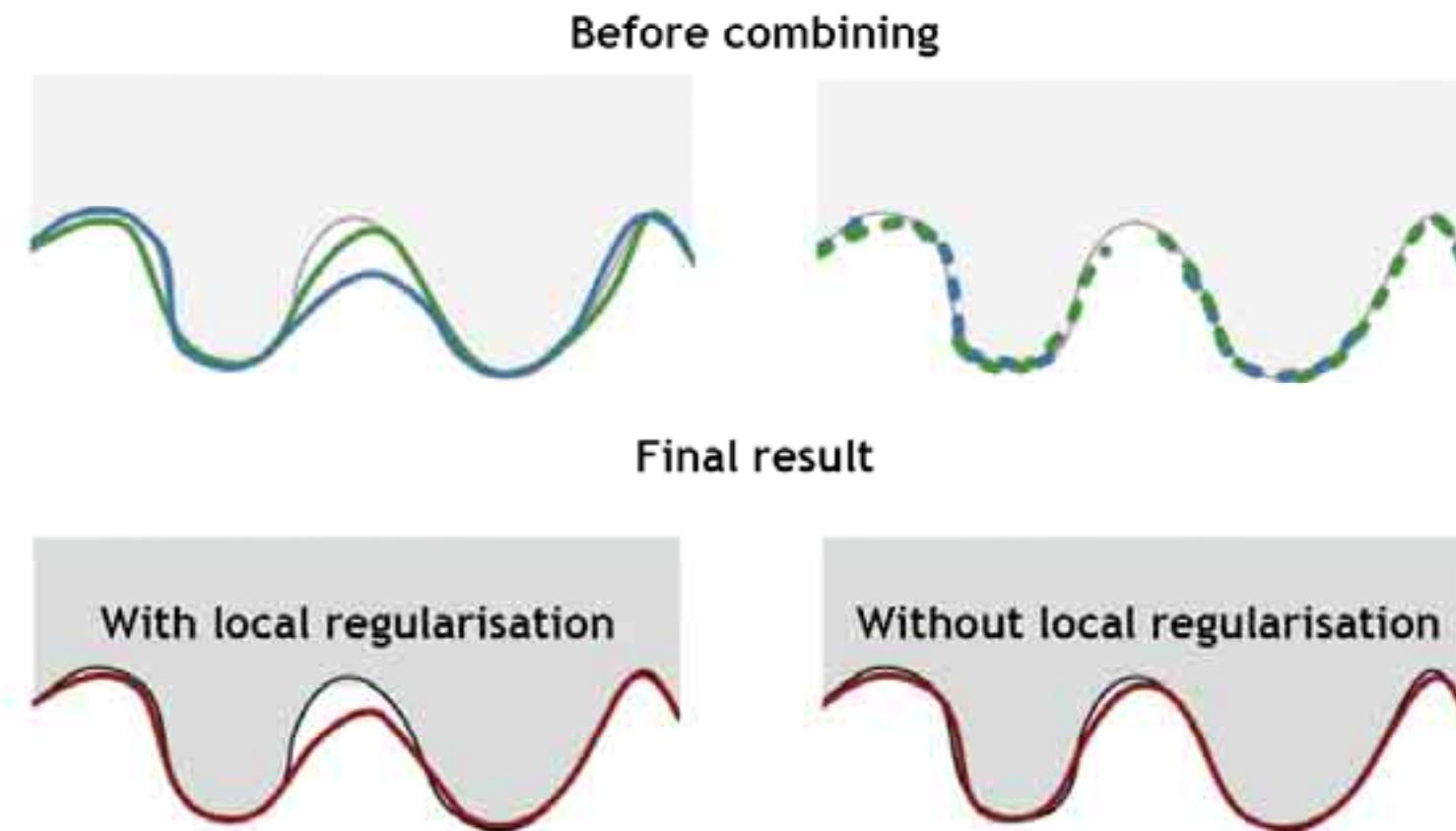


Combine the depth-maps and THEN regularise





Ранняя регуляризация



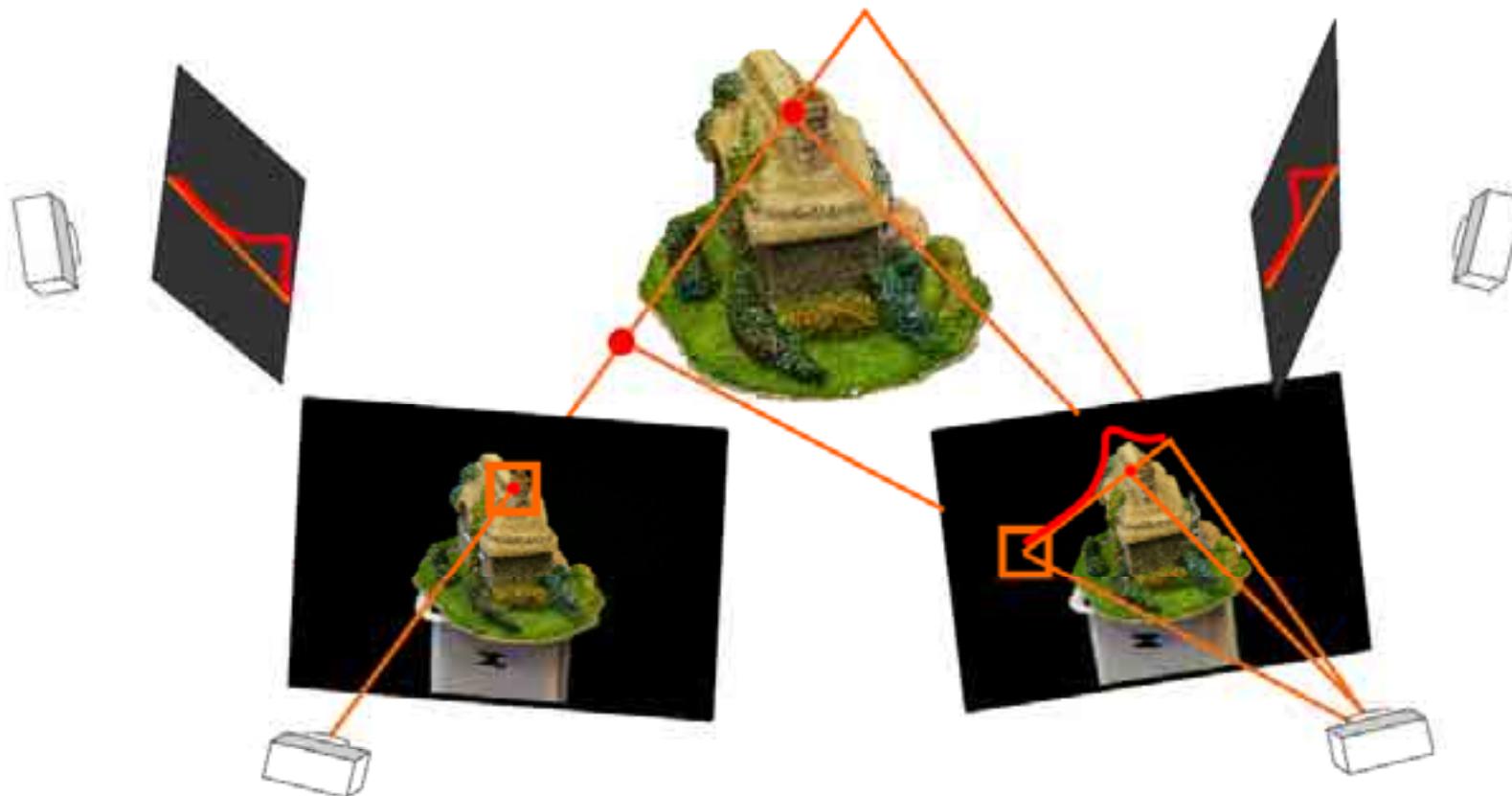


Общий подход

- Вычисляем бинокулярные карты глубины для каждого вида строго без регуляризации
- Затем объединяем наблюдения



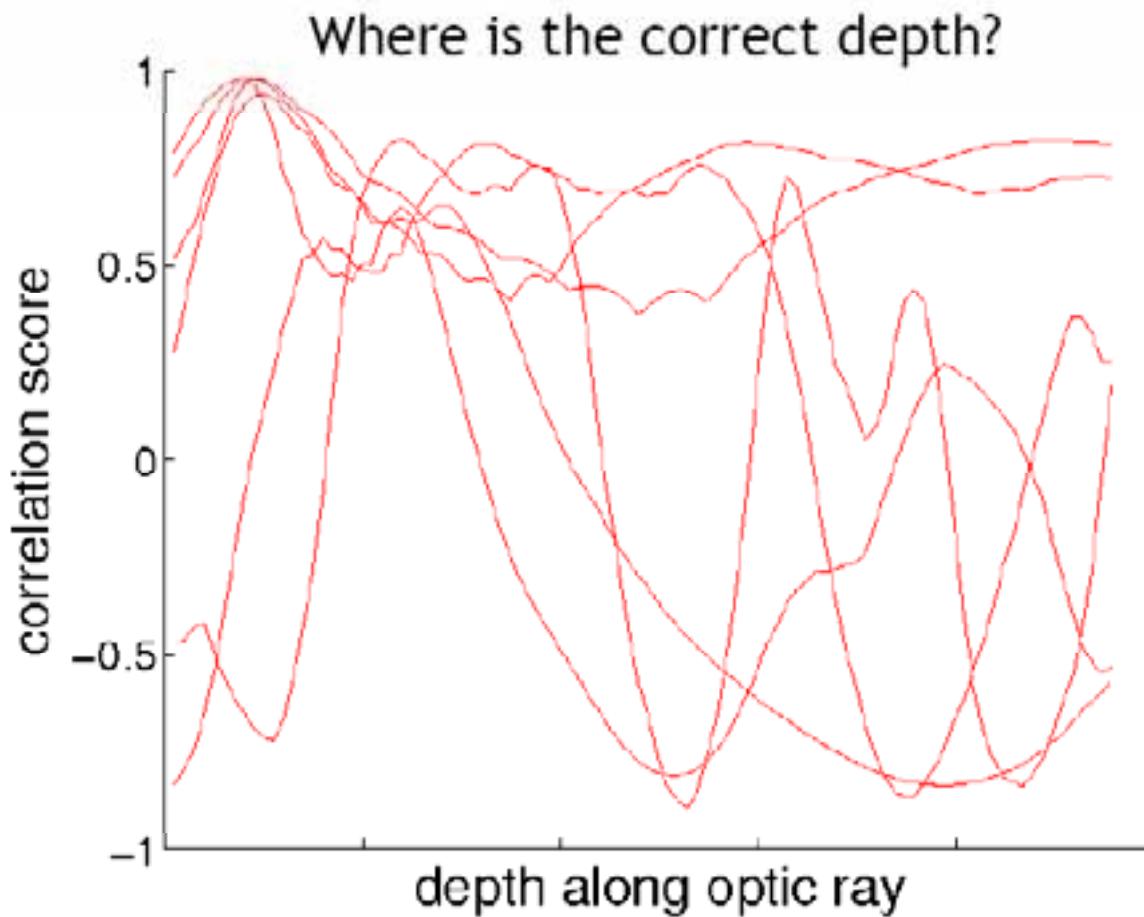
Вычисление стерео



- Для каждого пикселя на базовом изображении вычислим кривую корреляции от глубины точки для всех дополнительных изображений



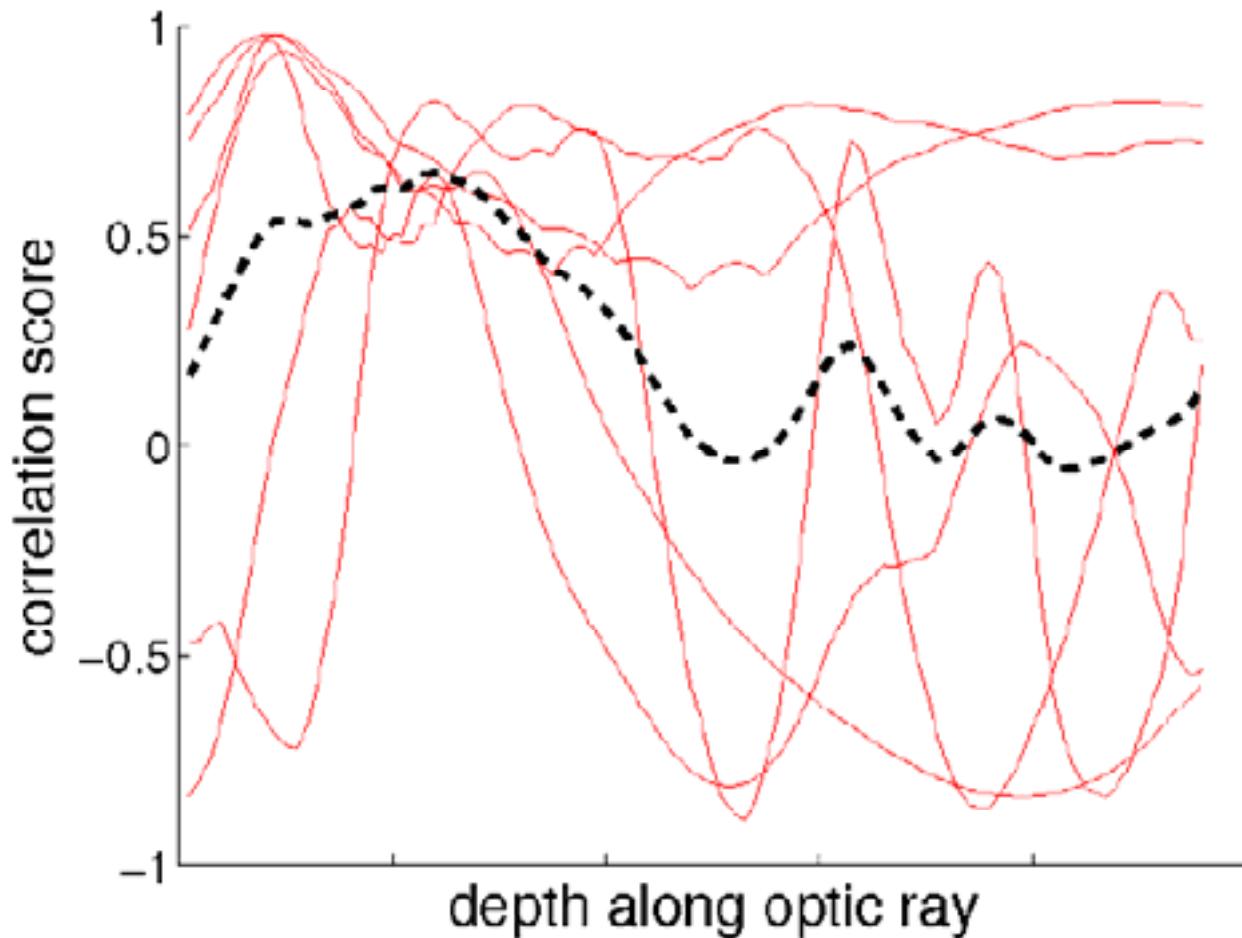
Объединение наблюдений



- Объединим кривые корреляции

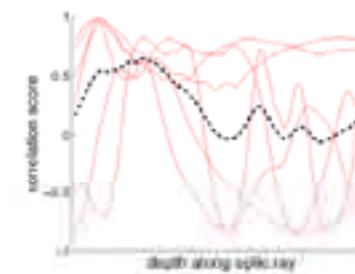


Простое усреднение

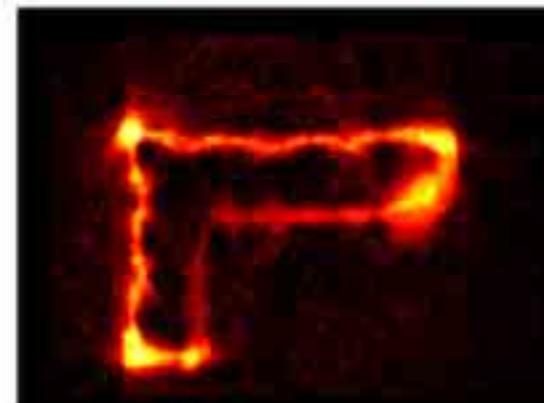




Простое усреднение

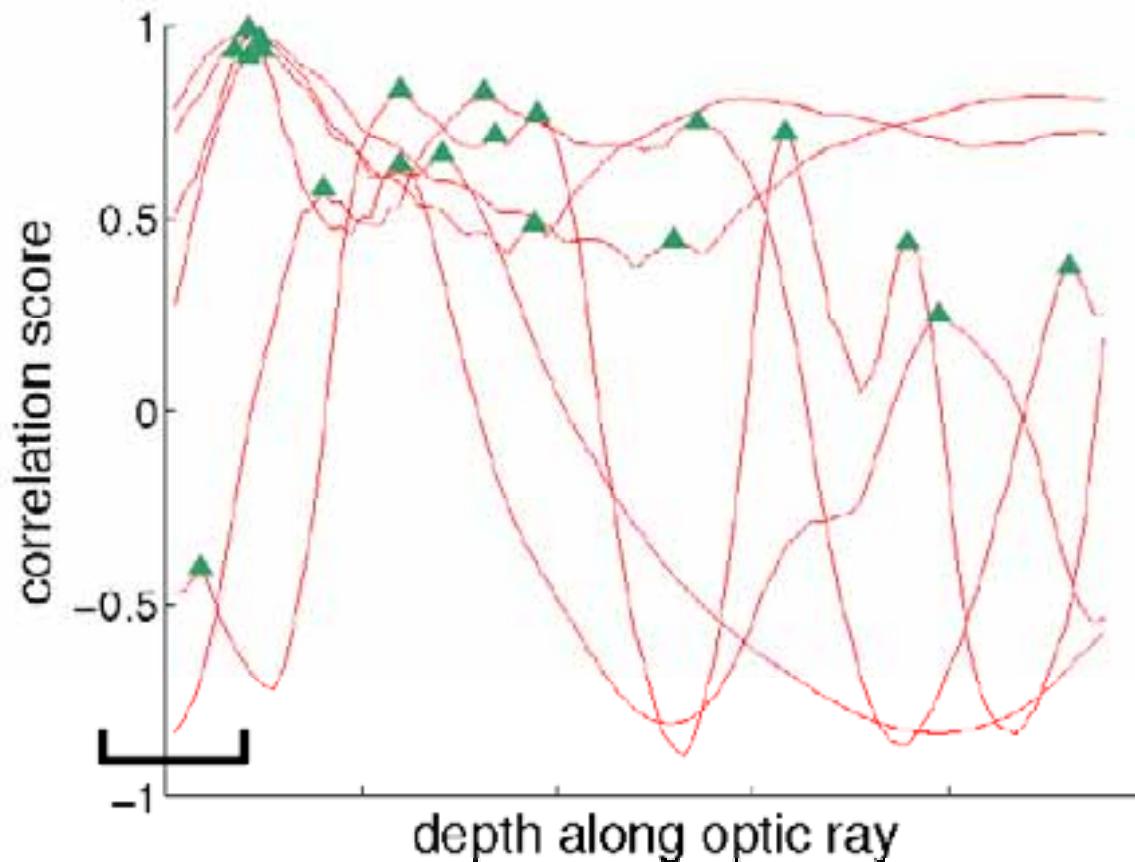


In 3d





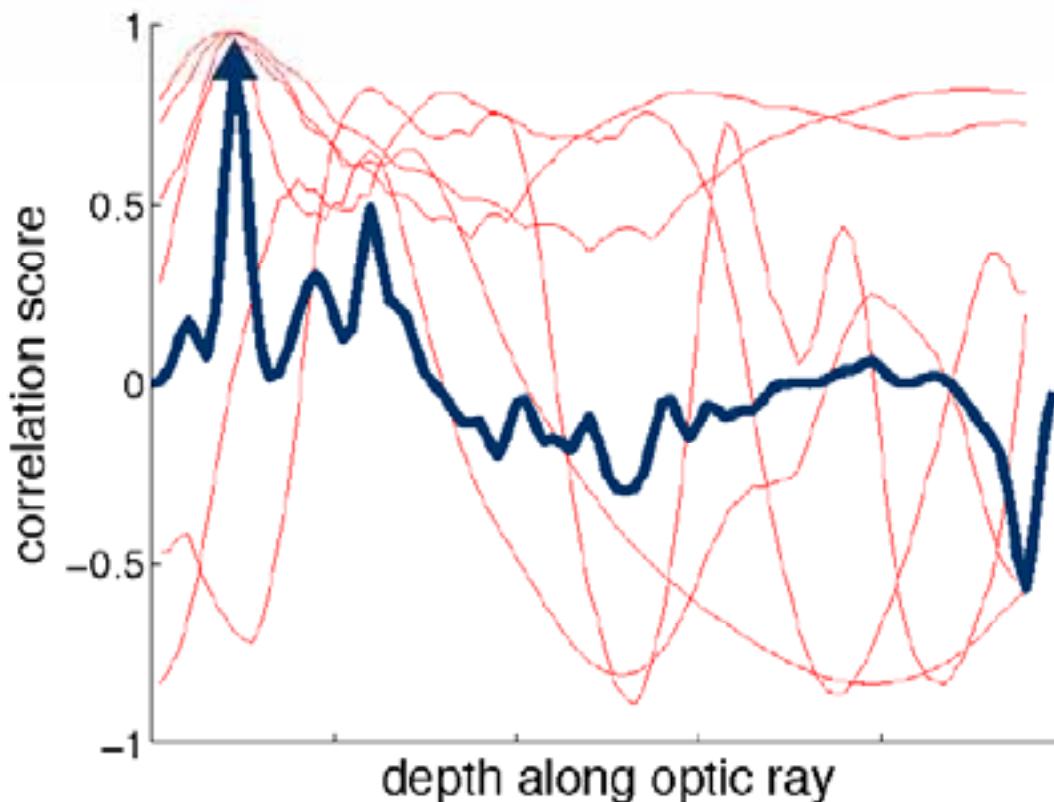
Пики



- Ключевое предположение
 - правильная глубина соответствует одному из локальных пиков одной из локальных кривых



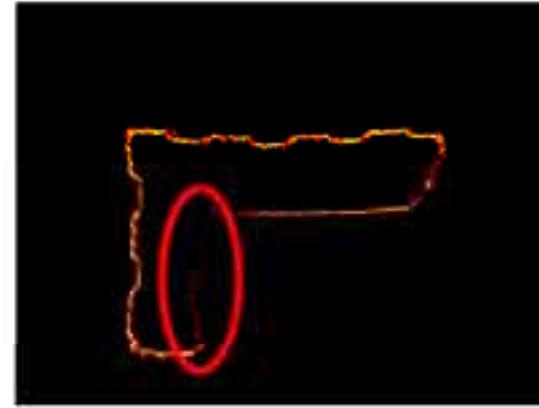
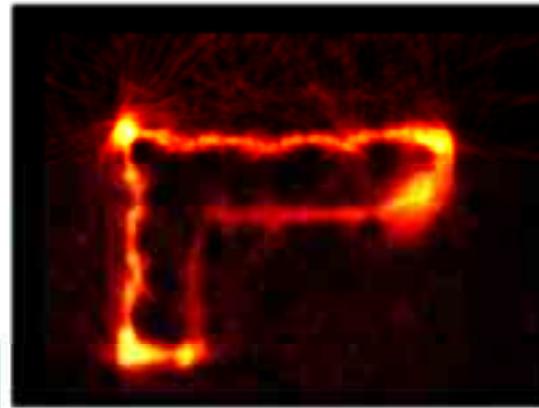
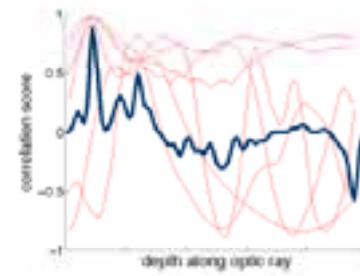
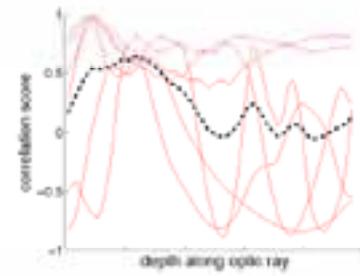
Непараметрическая оценка



- Окна Парзена – непараметрическая оценка количества локальных максимумов по окну



Максимальный отклик

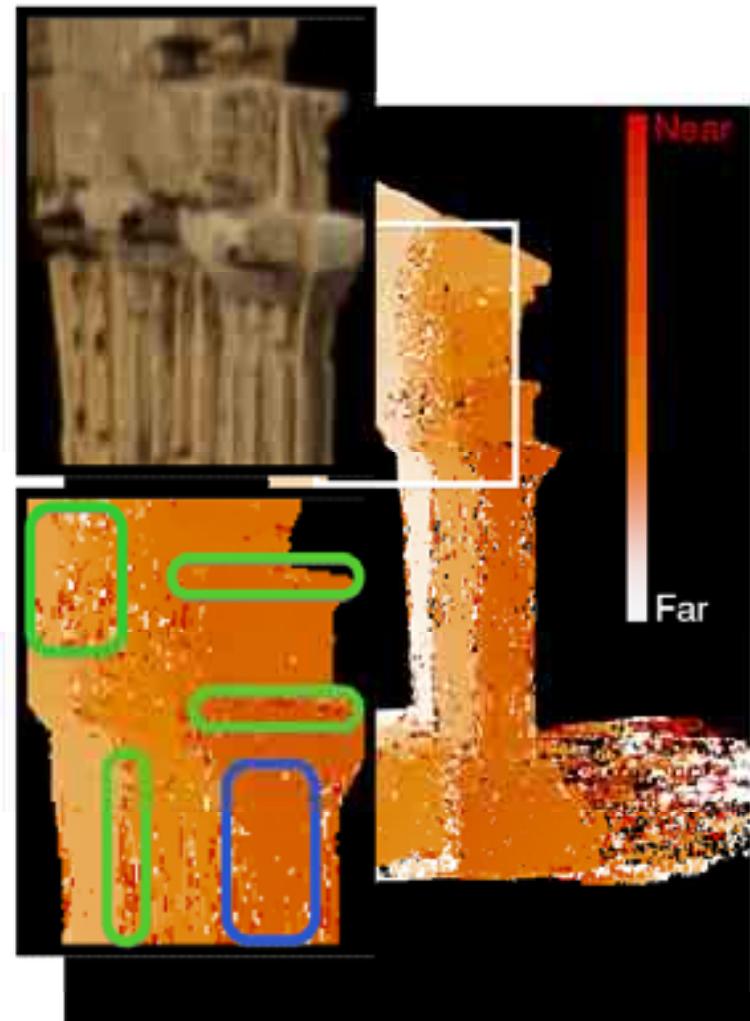


MATLAB



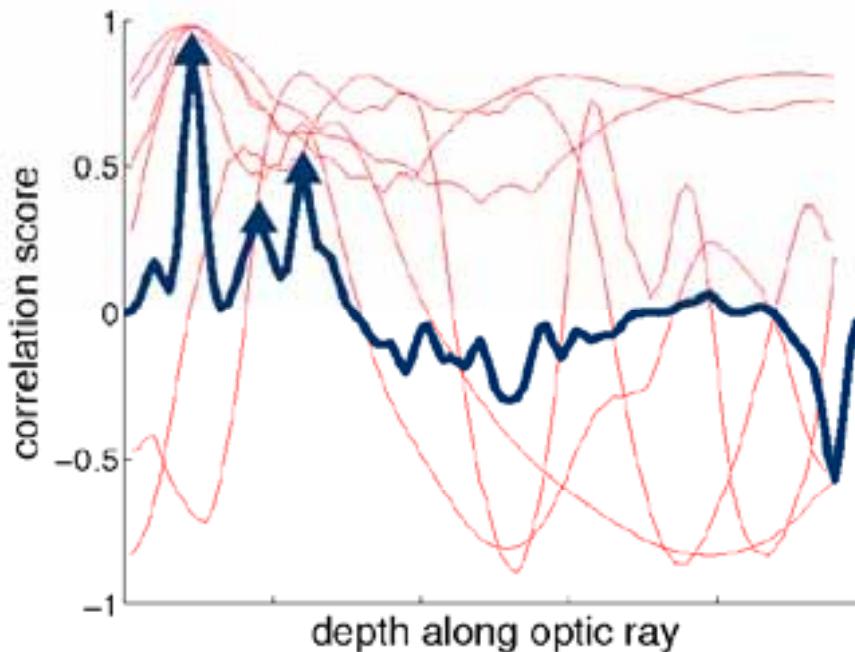
Ошибки

- Повторяющаяся текстура
- Ошибки сопоставления
 - Отсутствие текстуры
 - Шум в изображении и т.д.





Регуляризация



- Любой локальный пик может быть соответствием
- Используем избыточность данных и свойство непрерывности поверхности
 - У соседних пикселей должно быть похожая глубина!



Схема MRF

- Выберем k самых сильных пиков как гипотезы глубины для пикселя. Дополним U - неизвестной

$$k_i \in \{1 \dots K, U\}$$

- Зададим функционал энергии:

$$\sum_i \phi(k_i) + \sum_{(i,j)} \psi(k_i, k_j)$$

- Унарный потенциал пенализирует малые пики
- Парный потенциал пенализирует резкие изменения глубины
- Метка U нужна, чтобы добавить устойчивость к шуму
 - Небольшое пенальти за U
 - Небольшое константное пенальти за соседство с U

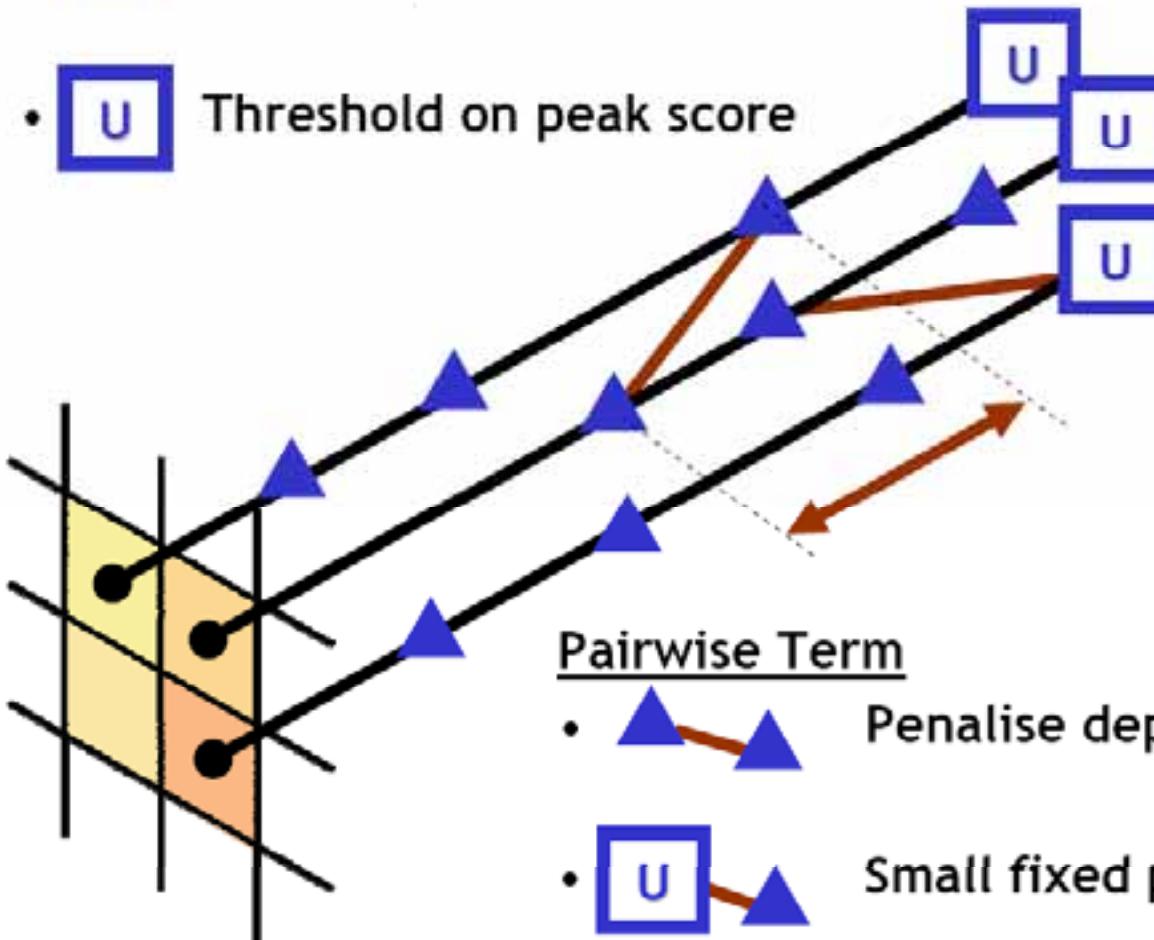


Схема

Unary Term

- Penalise peaks with low score

- Threshold on peak score





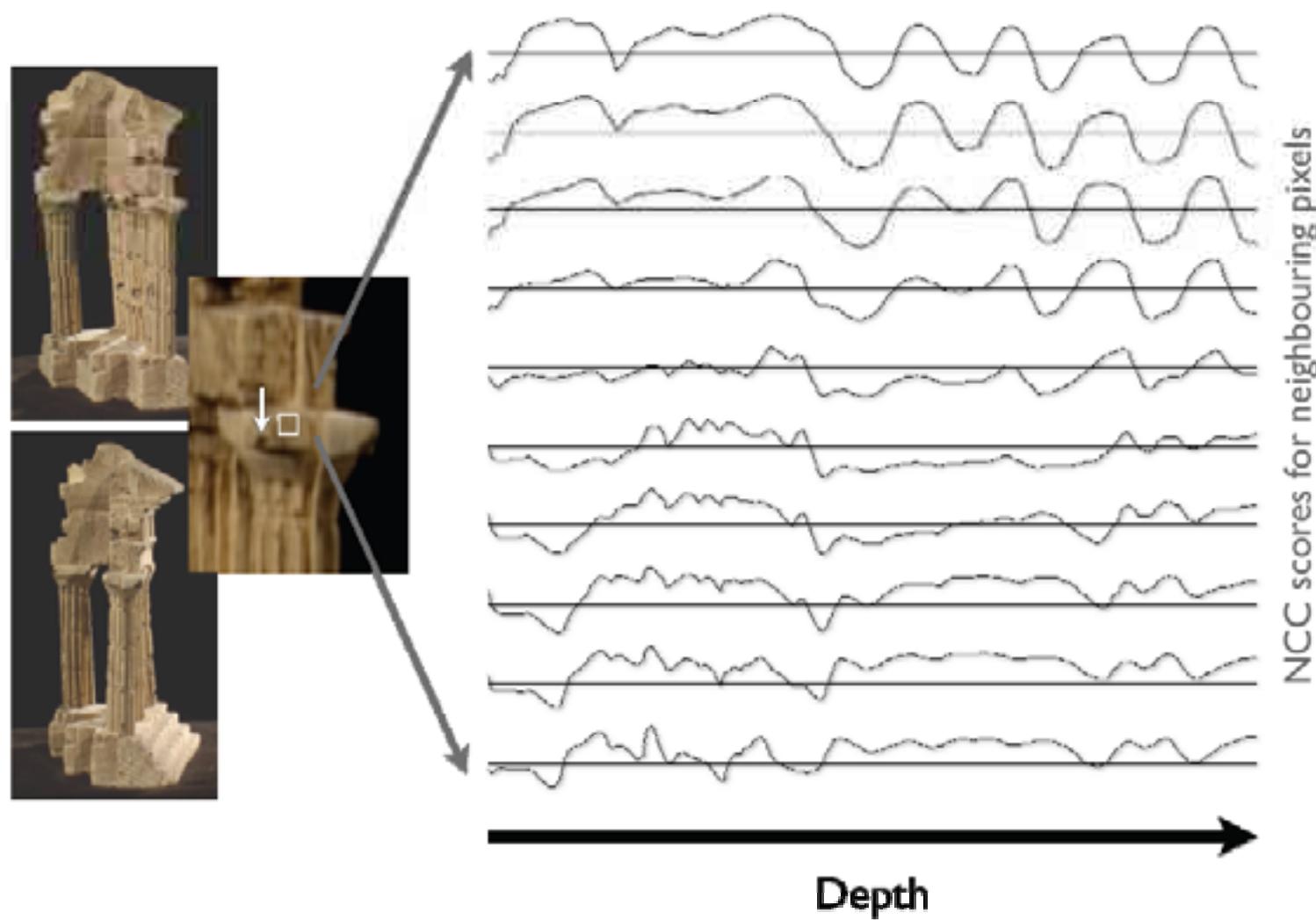
Ранняя регуляризация?

- Да, но с оговорками...
 - Мы фильтруем ненадежные данные
 - Если для глубины пикселя нет хороших гипотез, мы записываем как «неизвестное значение»
 - Мы не интерполируем промежуточные значения



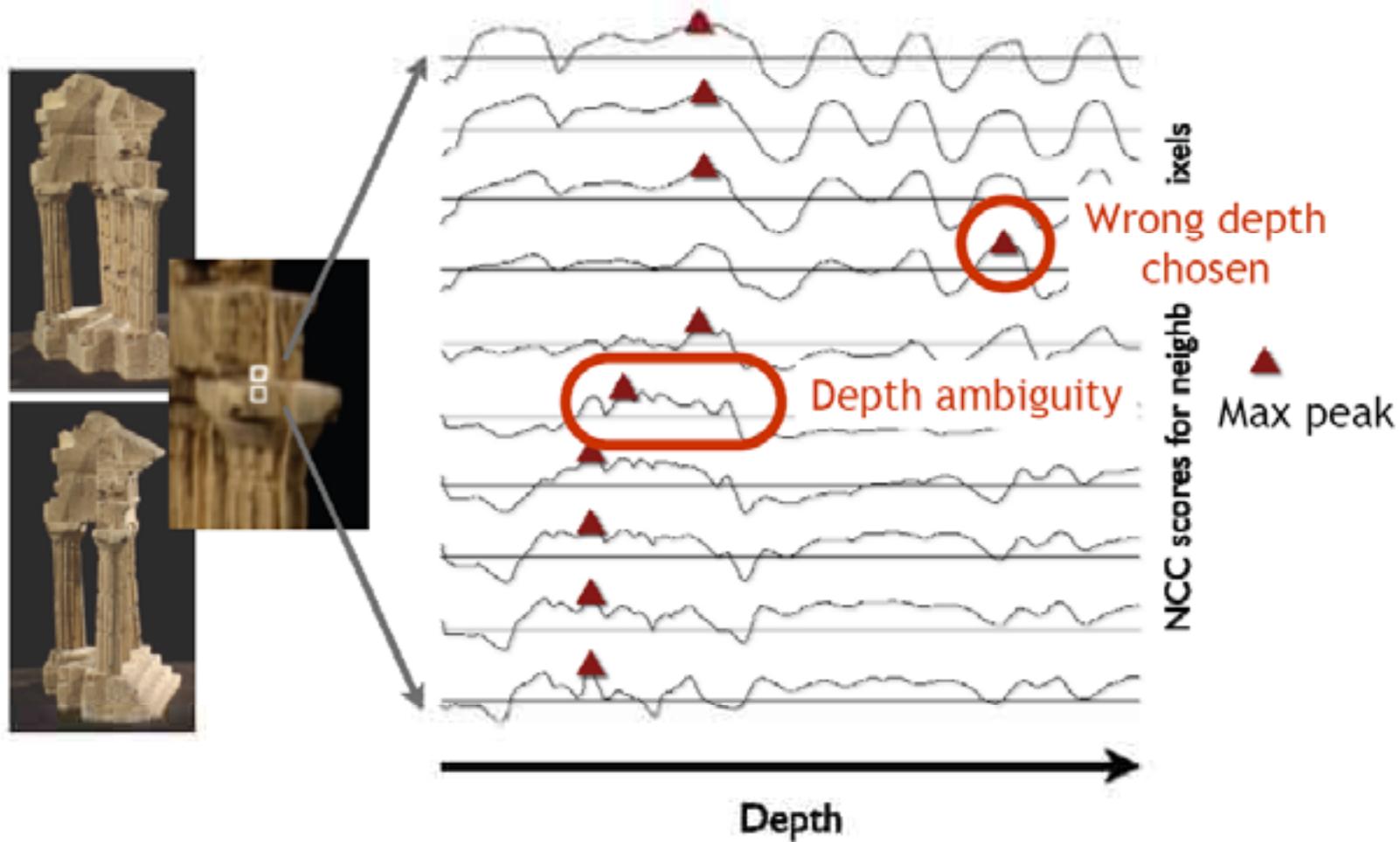
Пример

Microsoft:
Research



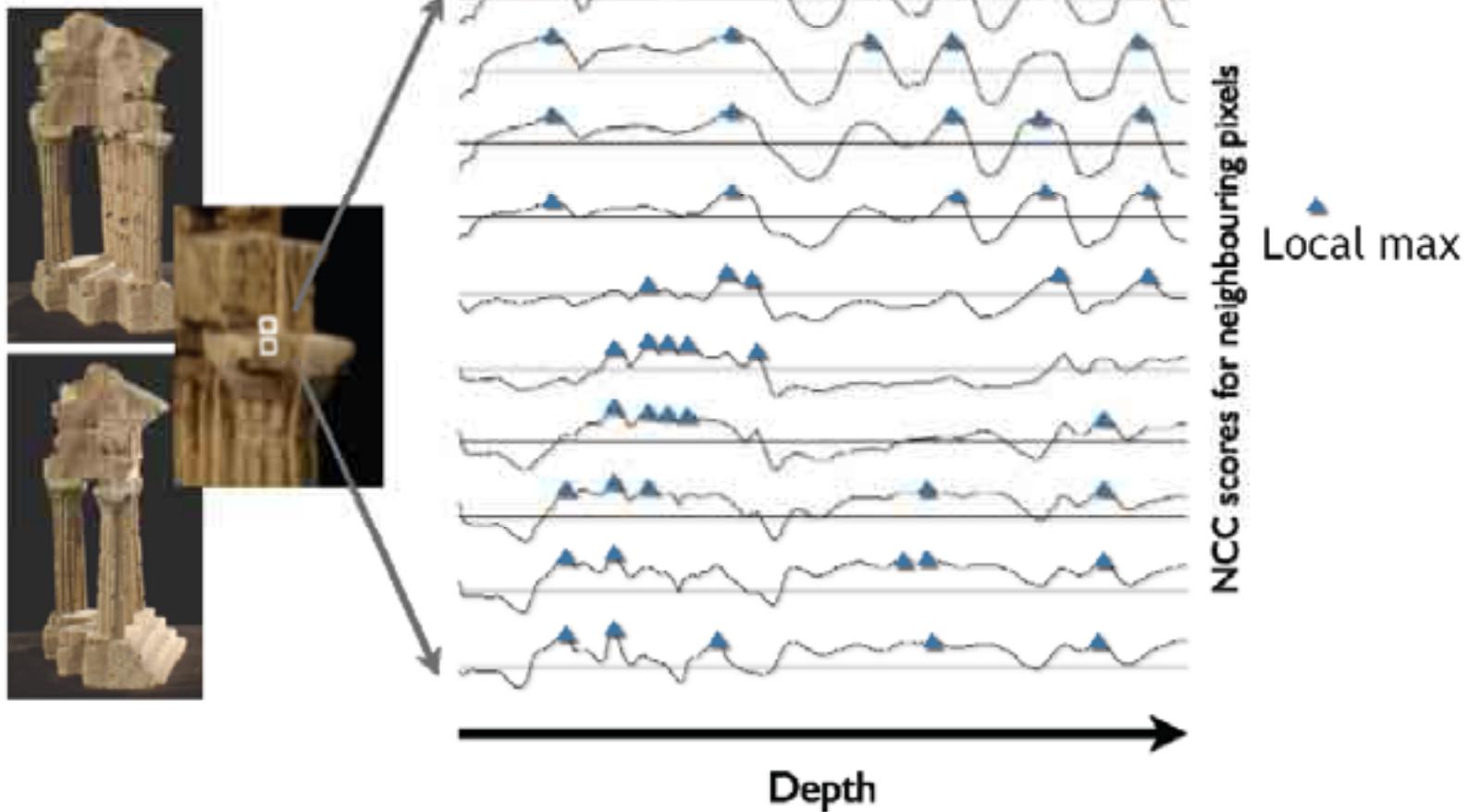


Пример



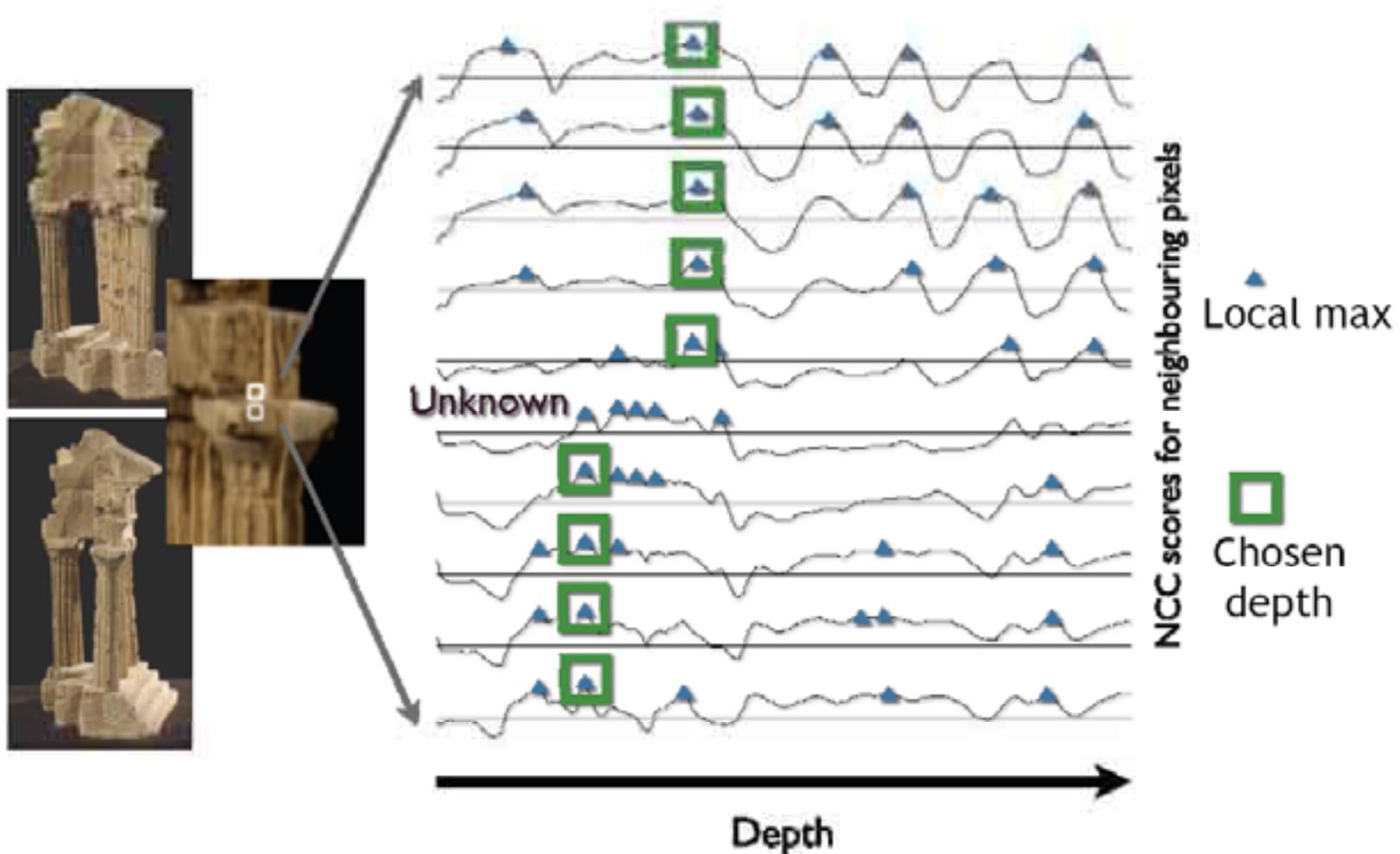


Пример



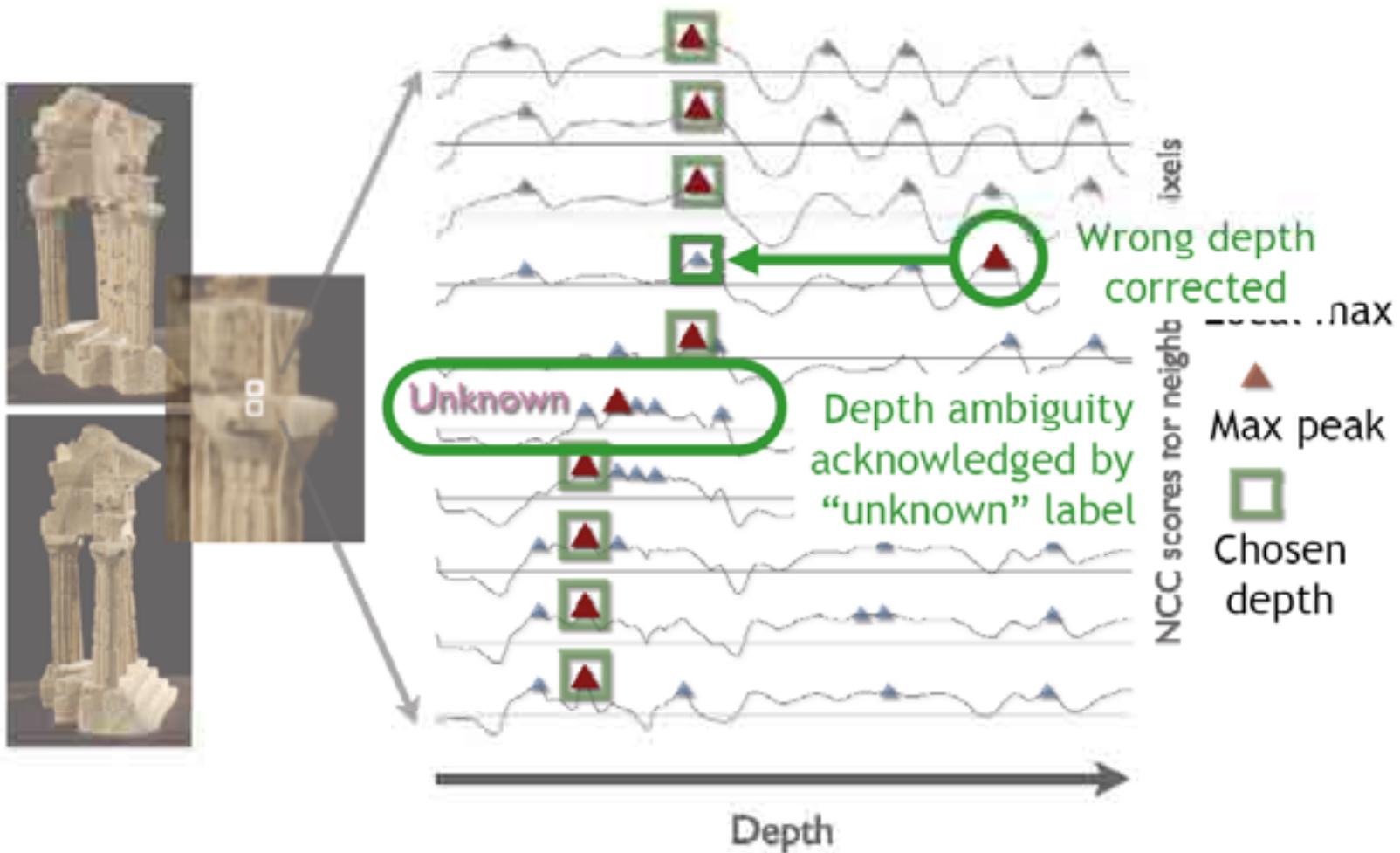


Пример



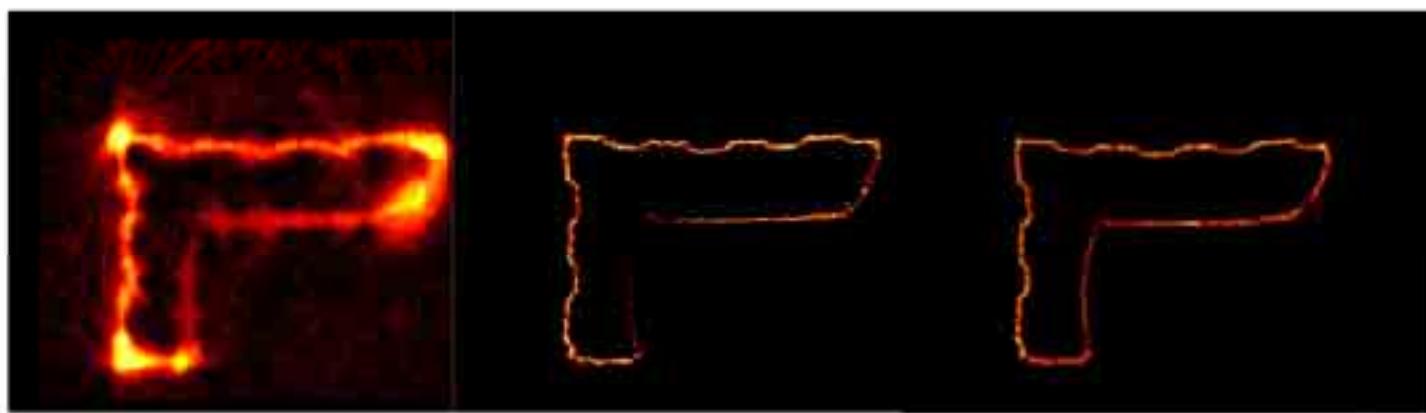
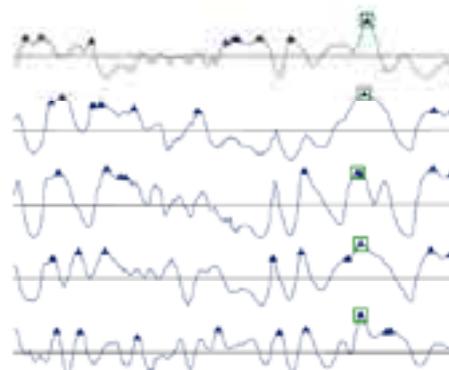
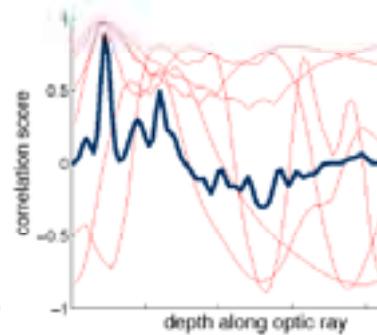
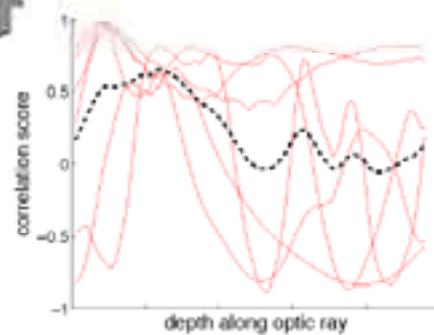


Пример





Результат





Пример

Microsoft:
Research





Пример

Microsoft:
Research





Пример

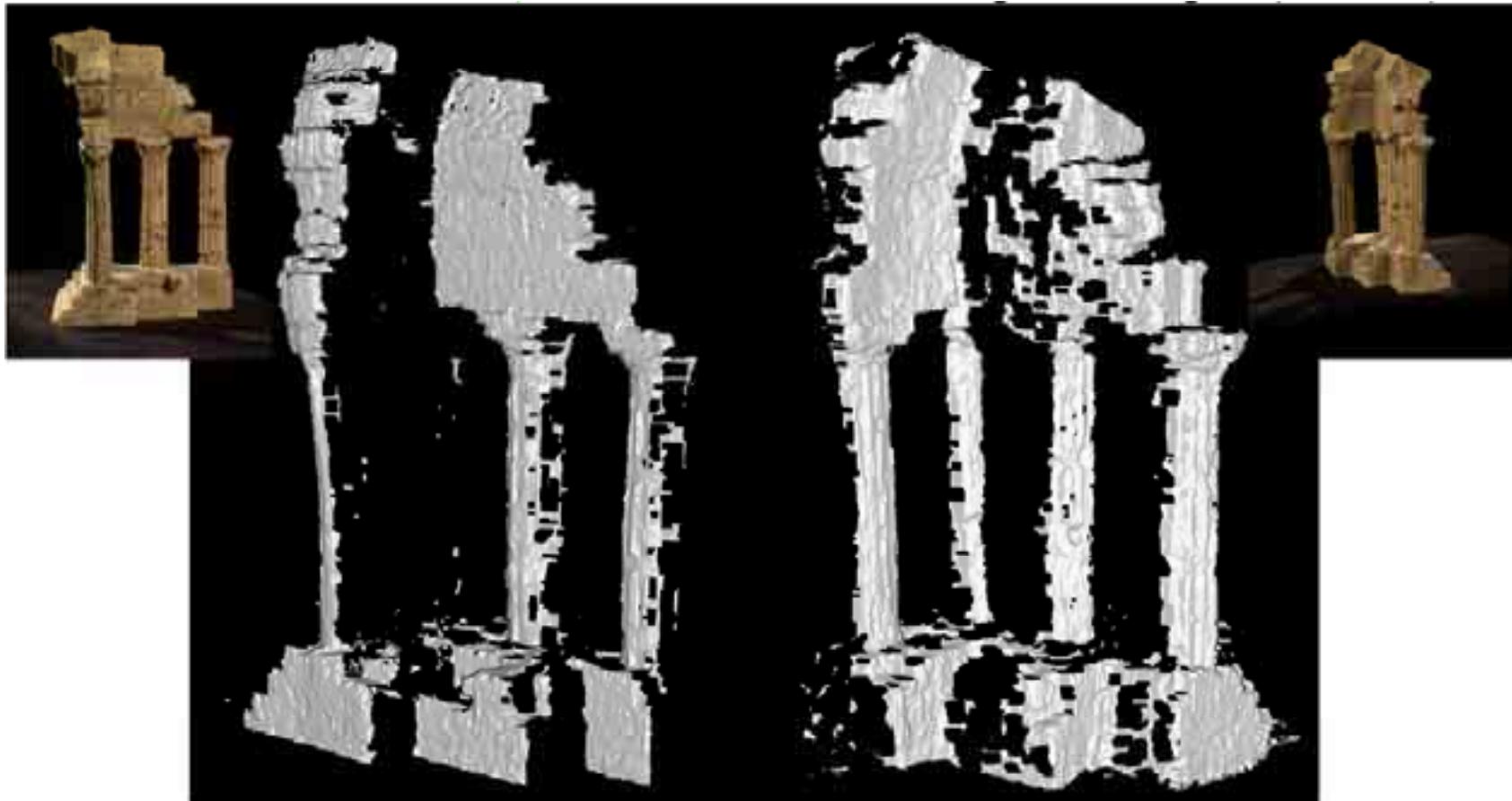
Microsoft:
Research





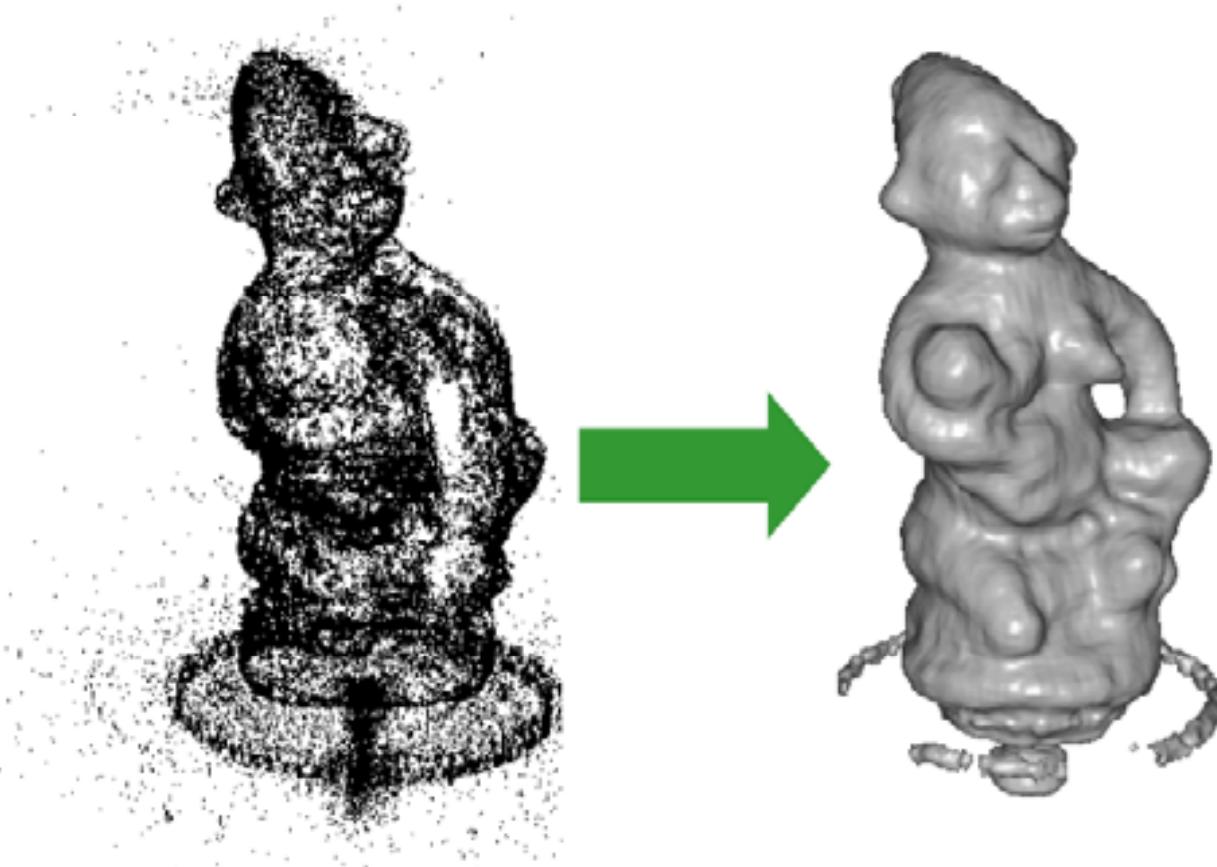
Карты глубины

Microsoft:
Research





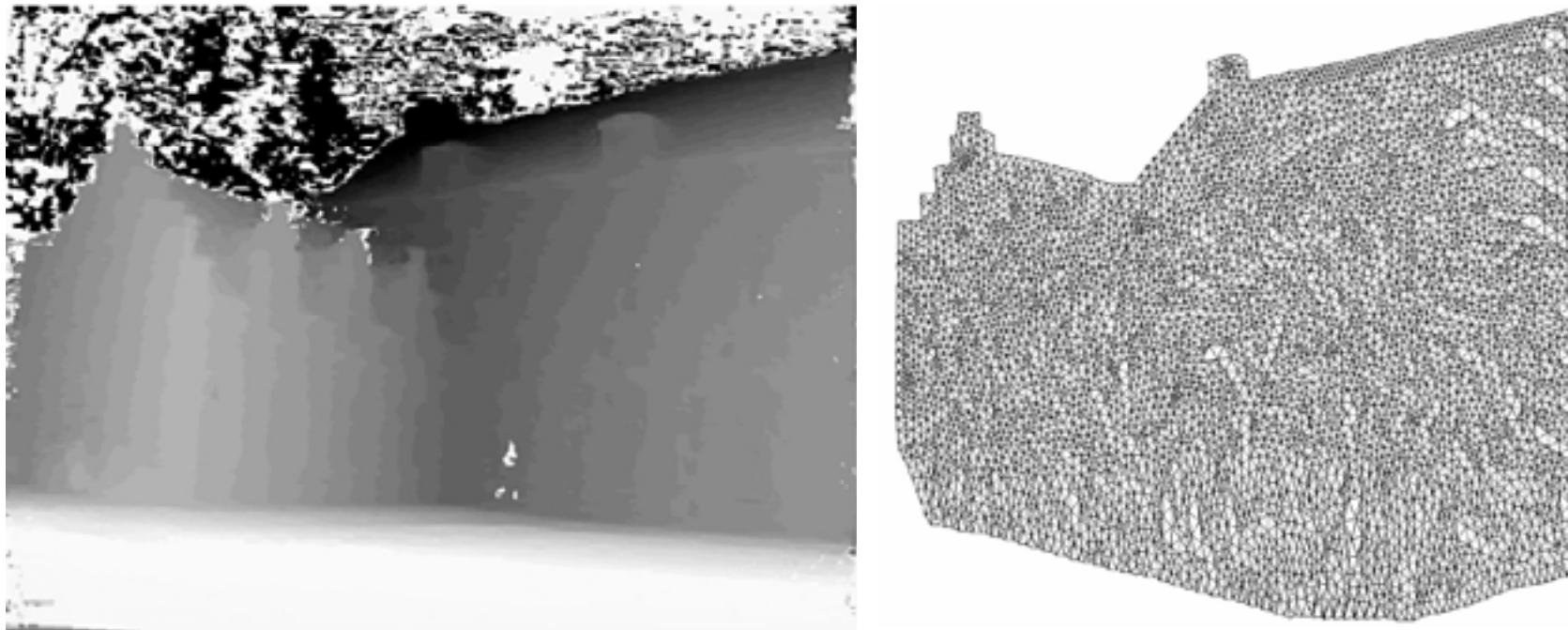
Извлечение поверхности



- Простые подходы
- Деформируемые модели
- Оптимизация на основе разрезов графов



Триангуляция карты глубины

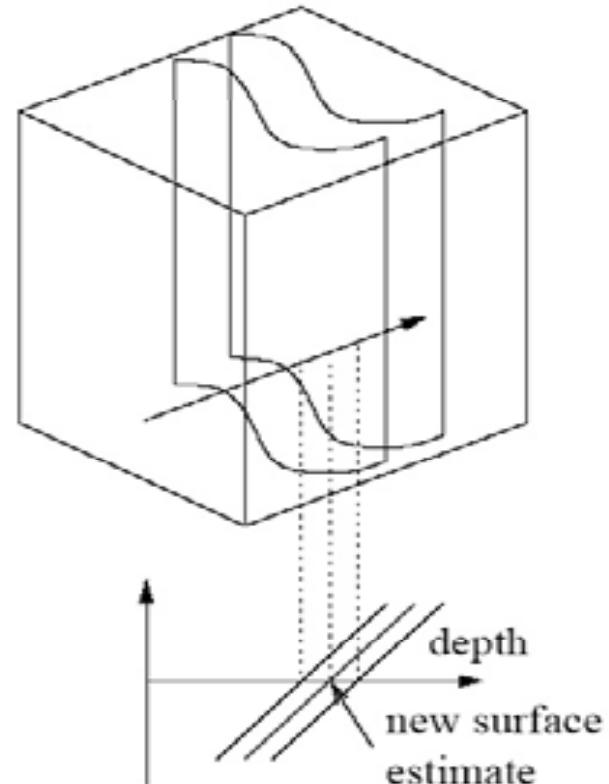


- Каждому пикселью изображения сопоставляется вершина
- Соседние вершины объединяются
- Глубина вершины берется из карты глубины
- Слишком узкие и наклоненные треугольники отбрасываются



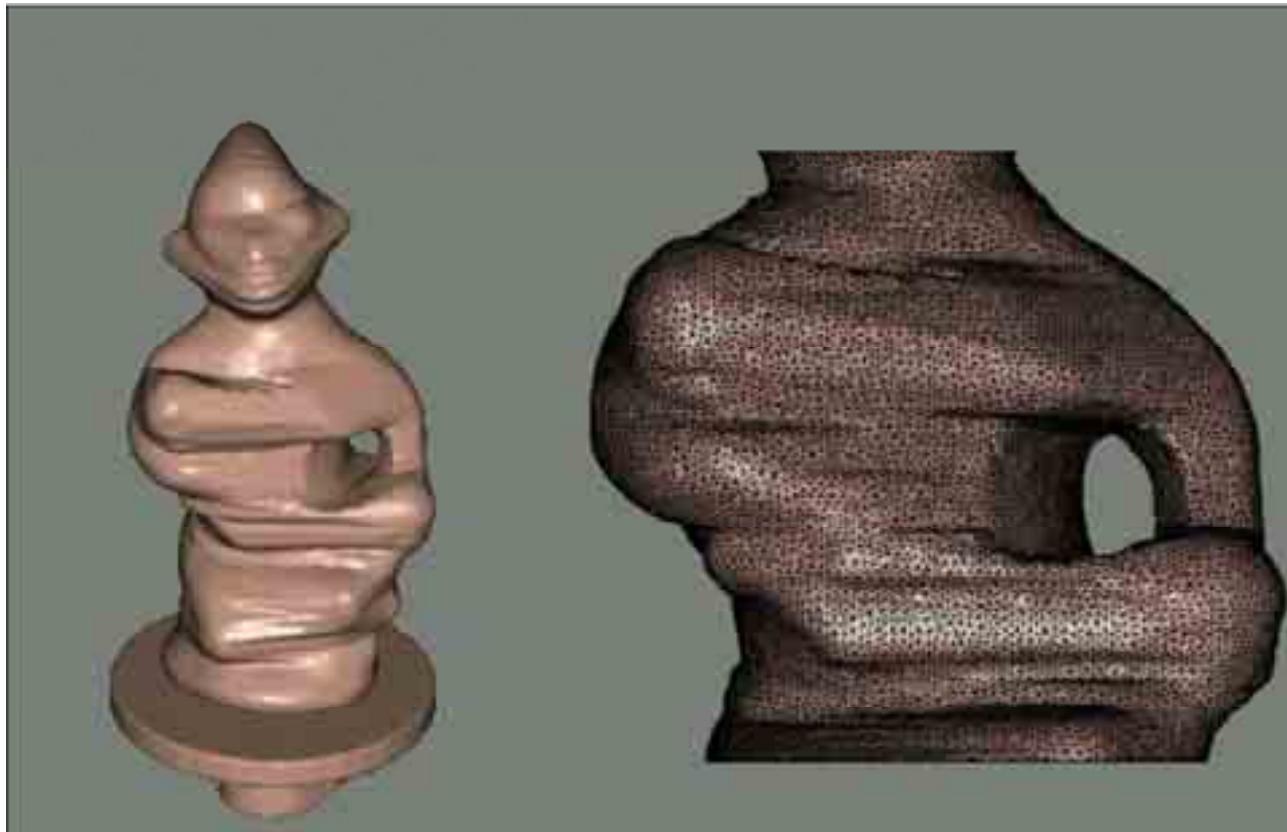
Объединение сеток

- Воксельный подход
 - Строим сетку для каждой карты глубины (кроме дырок)
 - Пространство разбивается на воксели
 - Все сетки помещаются в воксельное пространство
 - Если несколько сеток попадают в один воксель – они объединяются





Деформируемые поверхности



- Строим сетку-приближение
- Оптимизируем сетку, добиваясь фотосогласованности поверхности
- Очень медленно, бывают локальные минимумы



Результат

Microsoft:
Research





План лекции

- Введение
- Многовидовое пассивное стерео
 - Воксельные подходы
 - Подход на основе объединения сеток
 - **Разрастание регионов**
- Активное стерео
- Приложение: реконструкция головы человека



Методы на основе фрагментов



[Lhuillier and Quan,
PAMI 05]



[Furukawa and Ponce,
CVPR 07]



[Habbecke and Kobbelt,
CVPR 07]



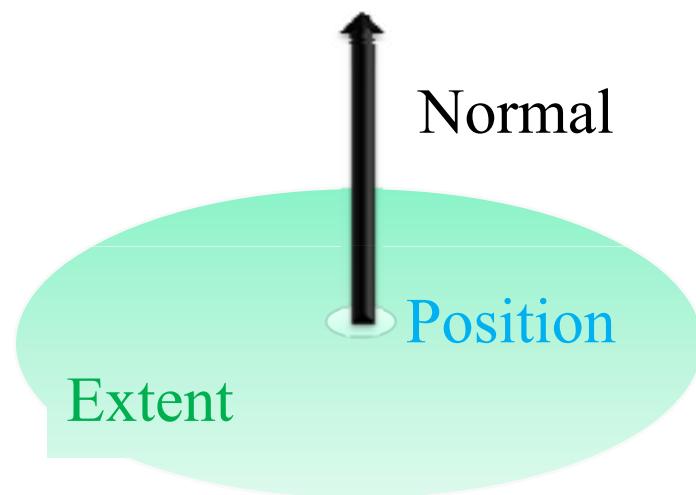
Что такое фрагмент?

- Definition of a patch
- Photo-consistency of a patch
- Reconstructing a patch
- Verifying a patch



Определение фрагмента

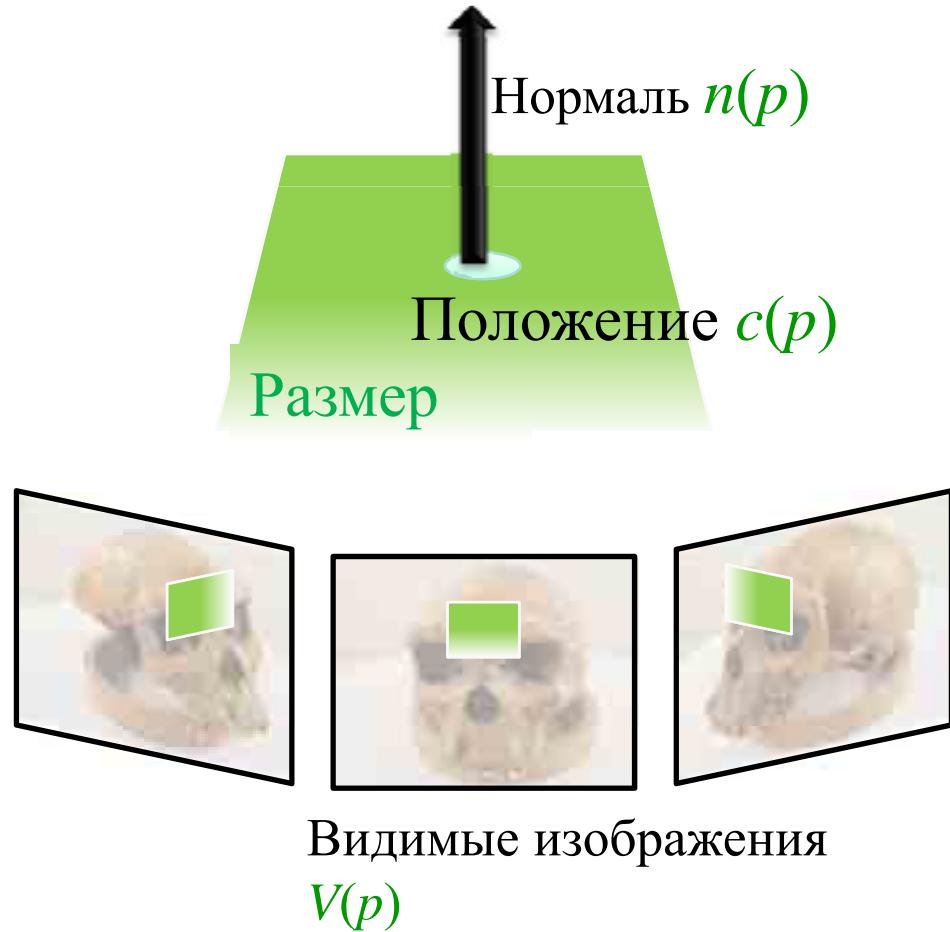
- Положение, нормаль, и размер





Patch definition

- Фрагмент p определен
 - Положением $c(p)$
 - Нормалью $n(p)$
 - Видимыми изображениями $V(p)$
- Размер выбирается так, чтобы p был примерно 9x9 пикселей в $V(p)$

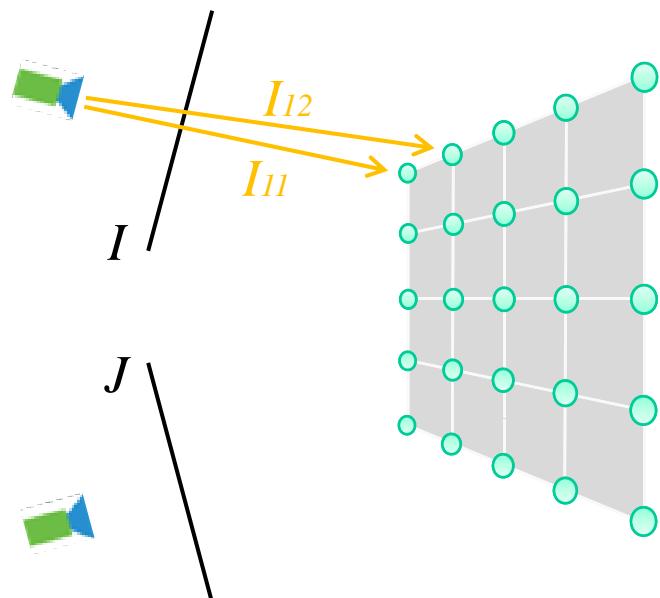




Фотосогласованность

- Фотосогласованность $N(I, J, p)$ фрагмента p между изображениями I и J

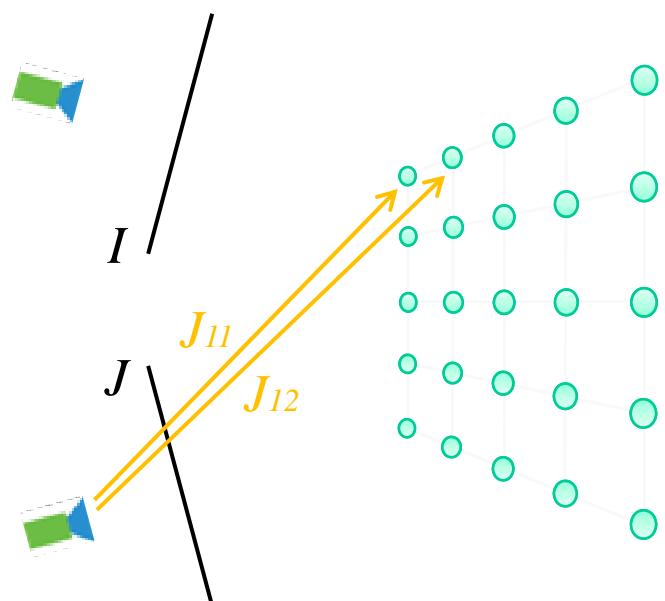
I_{xy} : цвет в изображении I





Фотосогласованность

- Фотосогласованность $N(I, J, p)$ фрагмента p между изображениями I и J



I_{xy} : цвет в изображении I

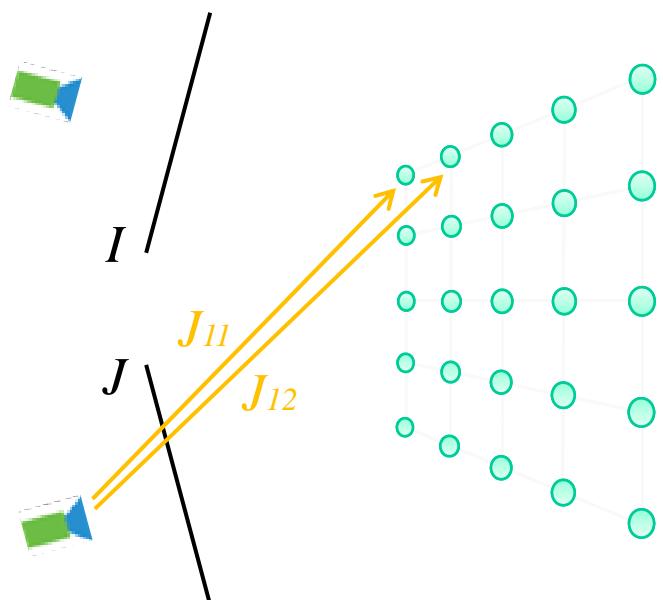
J_{xy} : цвет в изображении J

$$N(I, J, p) = \frac{\sum (I_{xy} - \bar{I}_{xy}) \cdot (J_{xy} - \bar{J}_{xy})}{\sqrt{(I_{xy} - \bar{I}_{xy})^2} \sqrt{(J_{xy} - \bar{J}_{xy})^2}}$$



Фотосогласованность

- Фотосогласованность $N(I, J, p)$ фрагмента p между изображениями I и J



I_{xy} : цвет в изображении I

J_{xy} : цвет в изображении J

Фотосогласованность $N(p)$

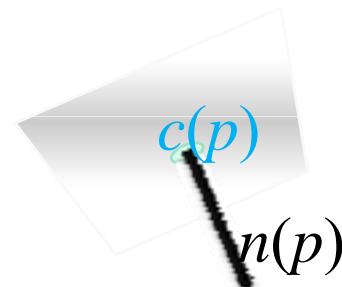
$$N(I, J, p) = \frac{\sum (I_{xy} - \bar{I}_{xy}) \cdot (J_{xy} - \bar{J}_{xy})}{\sqrt{(I_{..} - \bar{I}_{..})^2} \sqrt{(J_{..} - \bar{J}_{..})^2}}$$

$$N(p) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n N(I_i, J_j, p)}{(n+1)n/2}$$

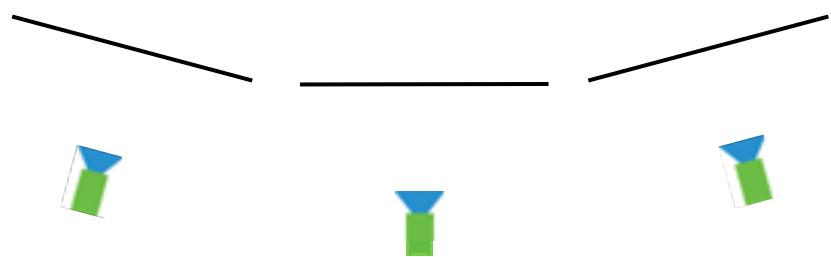


Реконструкция фрагмента p

- Даны начальные приближения
 - Положения $c(p)$
 - Нормали $n(p)$
 - Видимых изображений $V(p)$
- Уточним $c(p)$ и $n(p)$



$$\{c(p), n(p)\} = \arg \max_{\{c(p), n(p)\}} N(p)$$

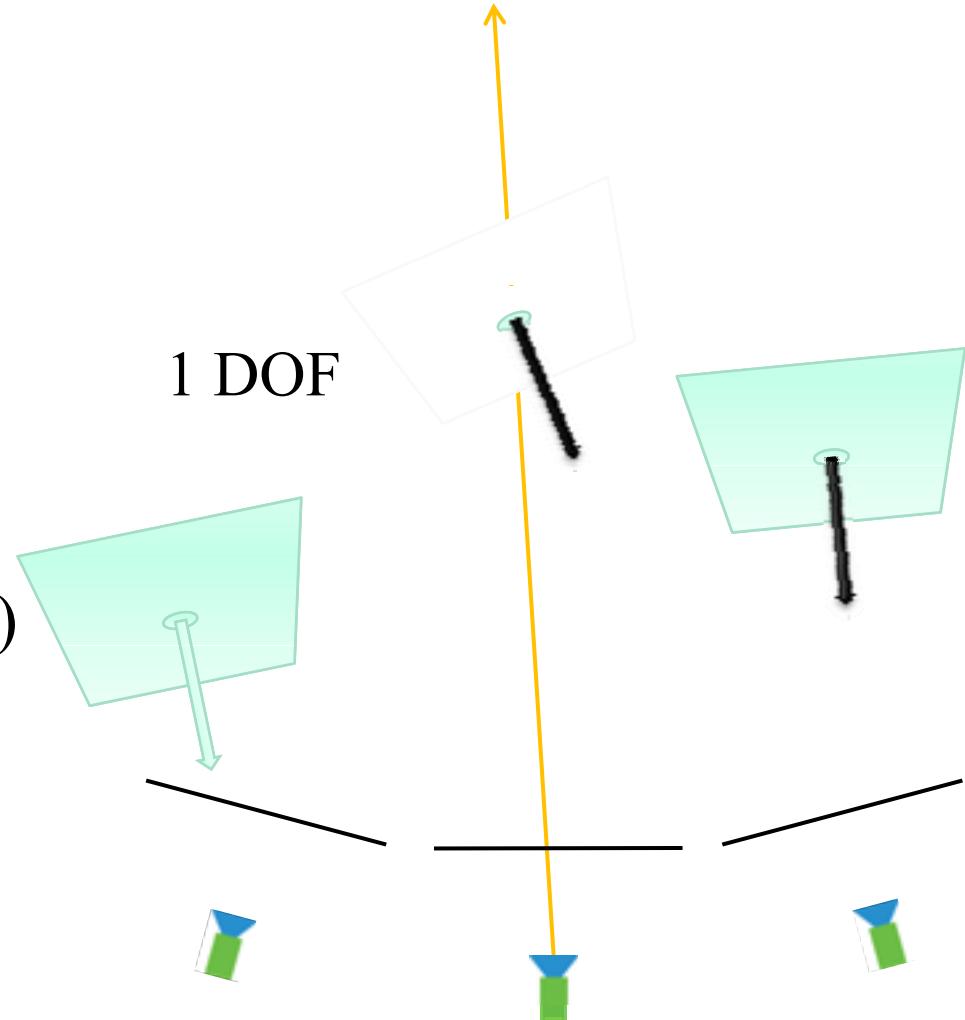




Реконструкция фрагмента p

- Даны начальные приближения
 - Положения $c(p)$
 - Нормали $n(p)$
 - Видимых изображений $V(p)$
- Уточним $c(p)$ и $n(p)$

$$\{c(p), n(p)\} = \arg \max_{\{c(p), n(p)\}} N(p)$$

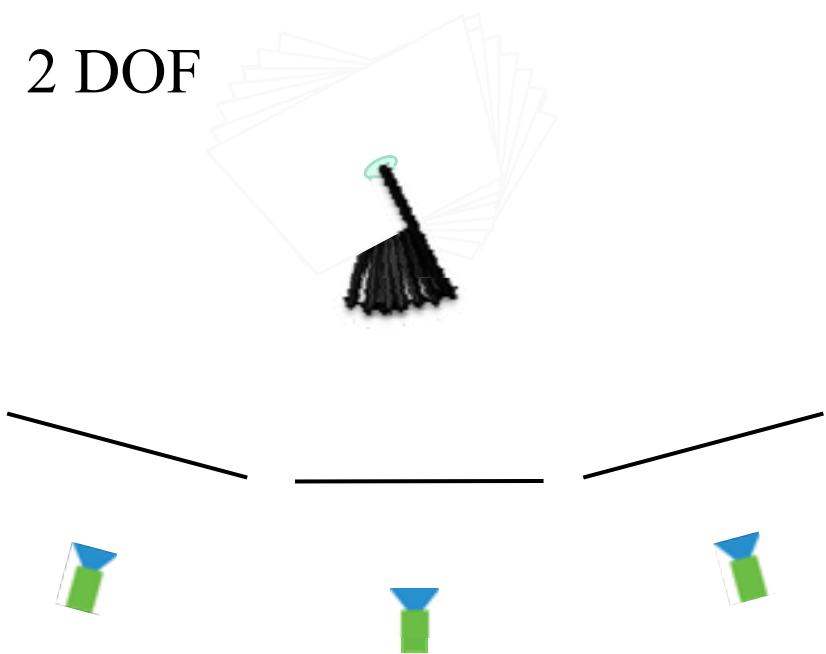




Реконструкция фрагмента p

- Даны начальные приближения
 - Положения $c(p)$
 - Нормали $n(p)$
 - Видимых изображений $V(p)$
- Утончим $c(p)$ и $n(p)$
$$\{c(p), n(p)\} = \arg \max_{\{c(p), n(p)\}} N(p)$$

2 DOF





Подтверждение фрагмента

- Текстура может случайно совпасть
- Фотосогласованность может быть высокой
- Проверка
 - Оставляем только изображения с высокой фотосогласованностью в $V(p)$
 - Принимаем фрагмент при $|V(p)| \geq 3$



Обновление $V(p)$

$V(p) = \{\text{Image1}, \text{Image2}, \cancel{\text{Image3}}, \text{Image4}\}$

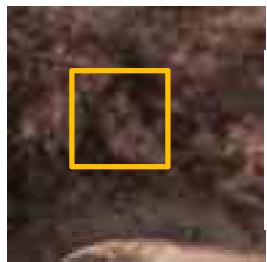


Image1

Image2



Image4

Image3

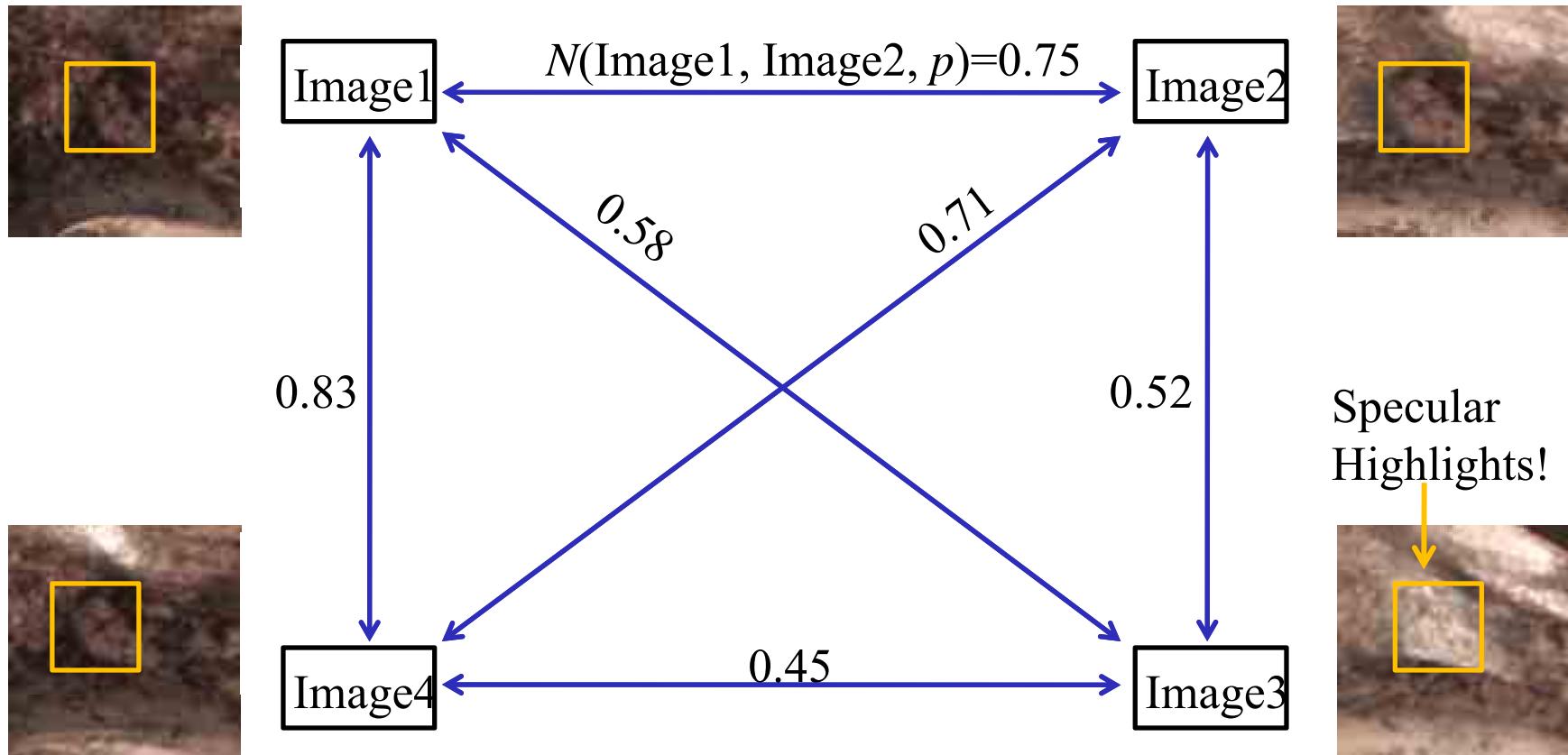


Specular
Highlights!



Обновление $V(p)$

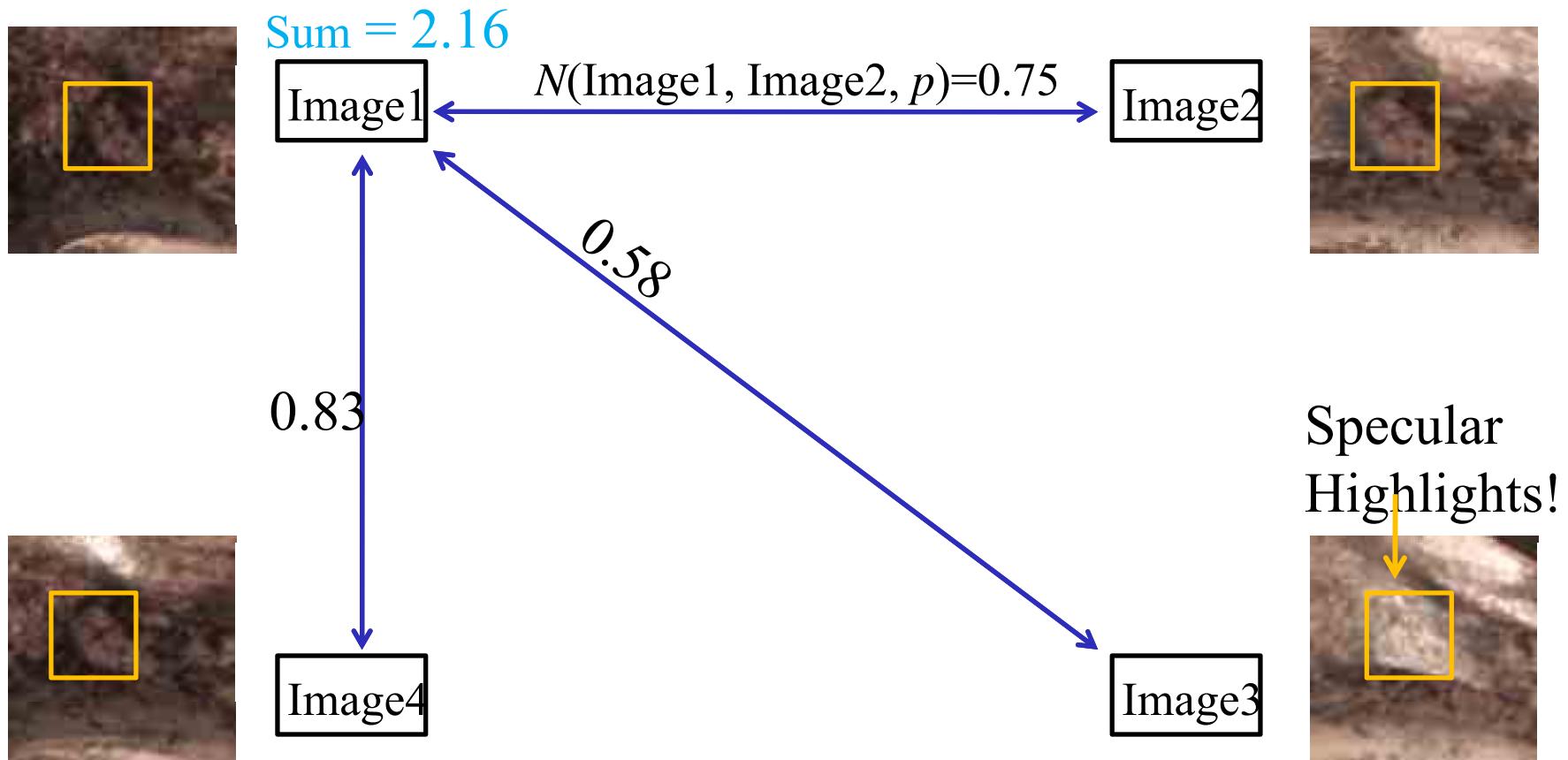
$$V(p) = \{\text{Image1}, \text{Image2}, \text{Image3}, \text{Image4}\}$$





Обновление $V(p)$

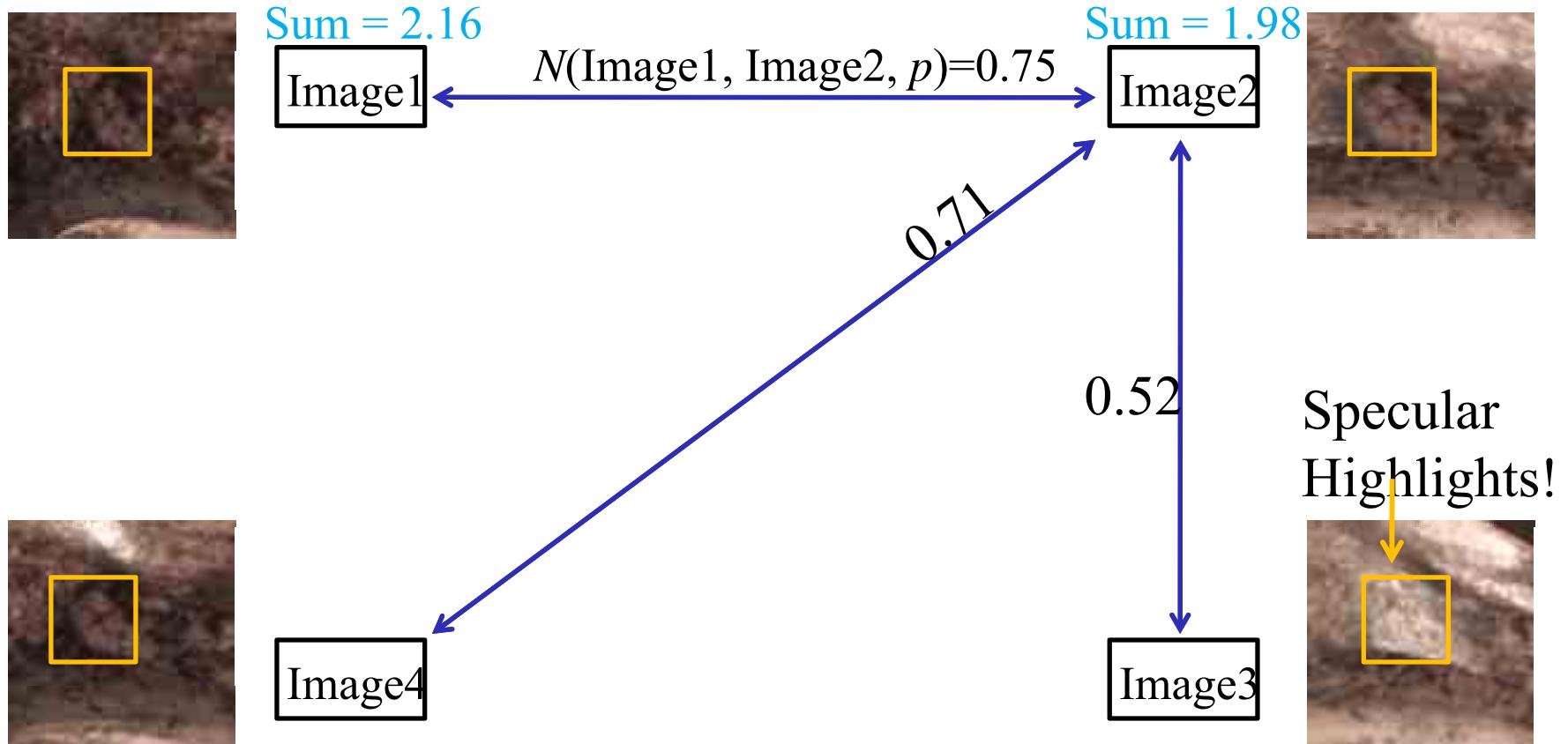
$$V(p) = \{\text{Image1}, \text{Image2}, \text{Image3}, \text{Image4}\}$$





Обновление $V(p)$

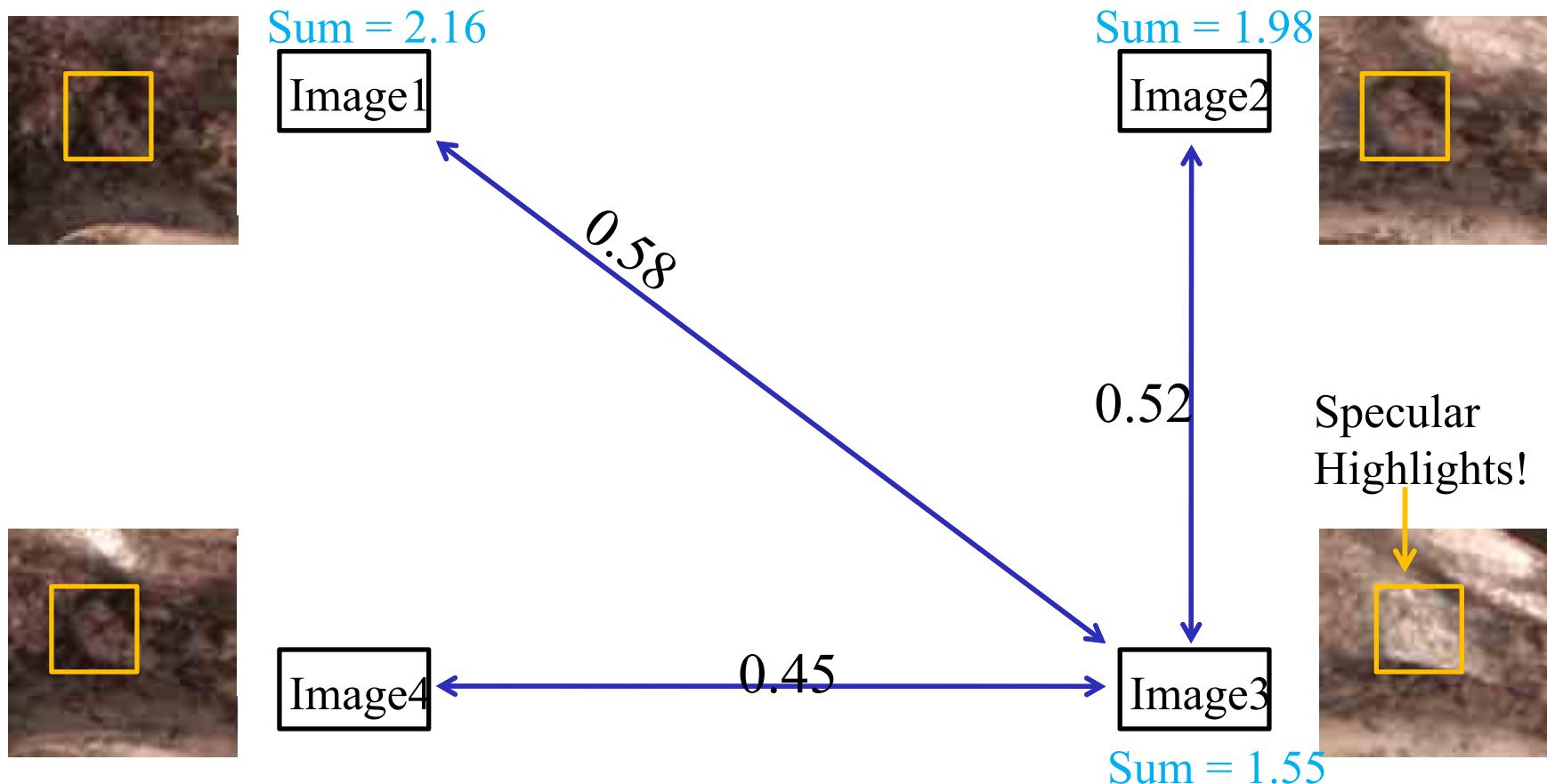
$$V(p) = \{\text{Image1}, \text{Image2}, \text{Image3}, \text{Image4}\}$$





Обновление $V(p)$

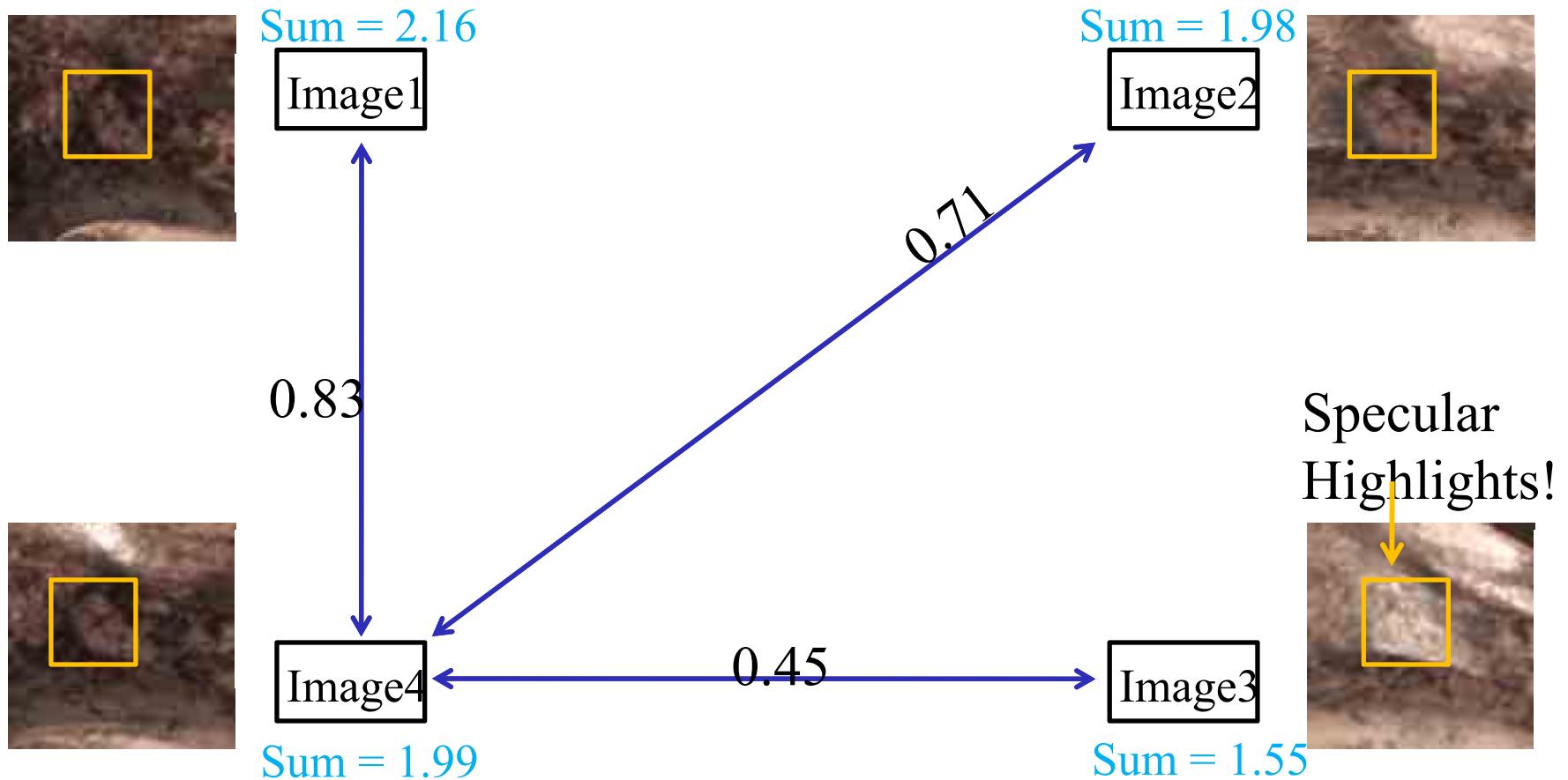
$$V(p) = \{\text{Image1}, \text{Image2}, \text{Image3}, \text{Image4}\}$$





Обновление $V(p)$

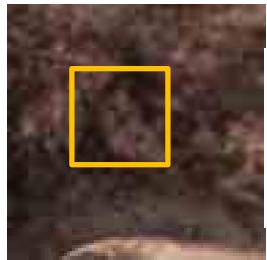
$$V(p) = \{\text{Image1}, \text{Image2}, \text{Image3}, \text{Image4}\}$$





Обновление $V(p)$

$V(p) = \{\text{Image1}, \text{Image2}, \text{Image3}, \text{Image4}\}$



Sum = 2.16

Image1

Sum = 1.98

Image2

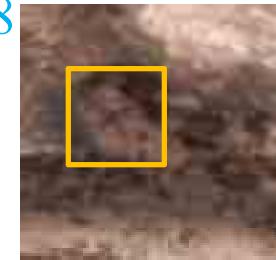


Image4

Sum = 1.99



Image3

Sum = 1.55

Specular
Highlights!



Обновление $V(p)$

$V(p) = \{ \text{Image1}, \text{Image2}, \text{Image3}, \text{Image4} \}$



Sum = 2.16

Image1

Image2



Image4

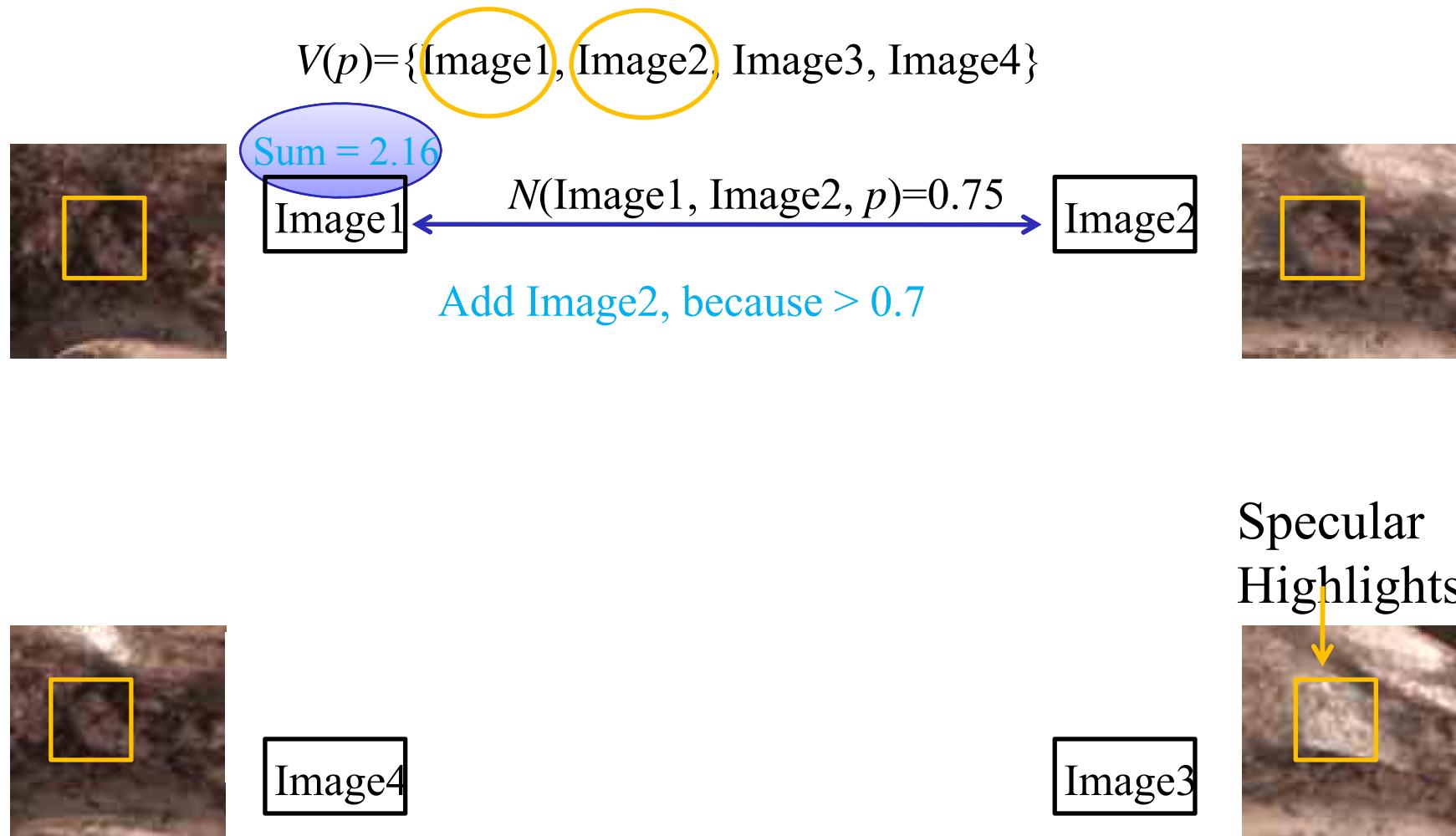
Image3



Specular
Highlights!

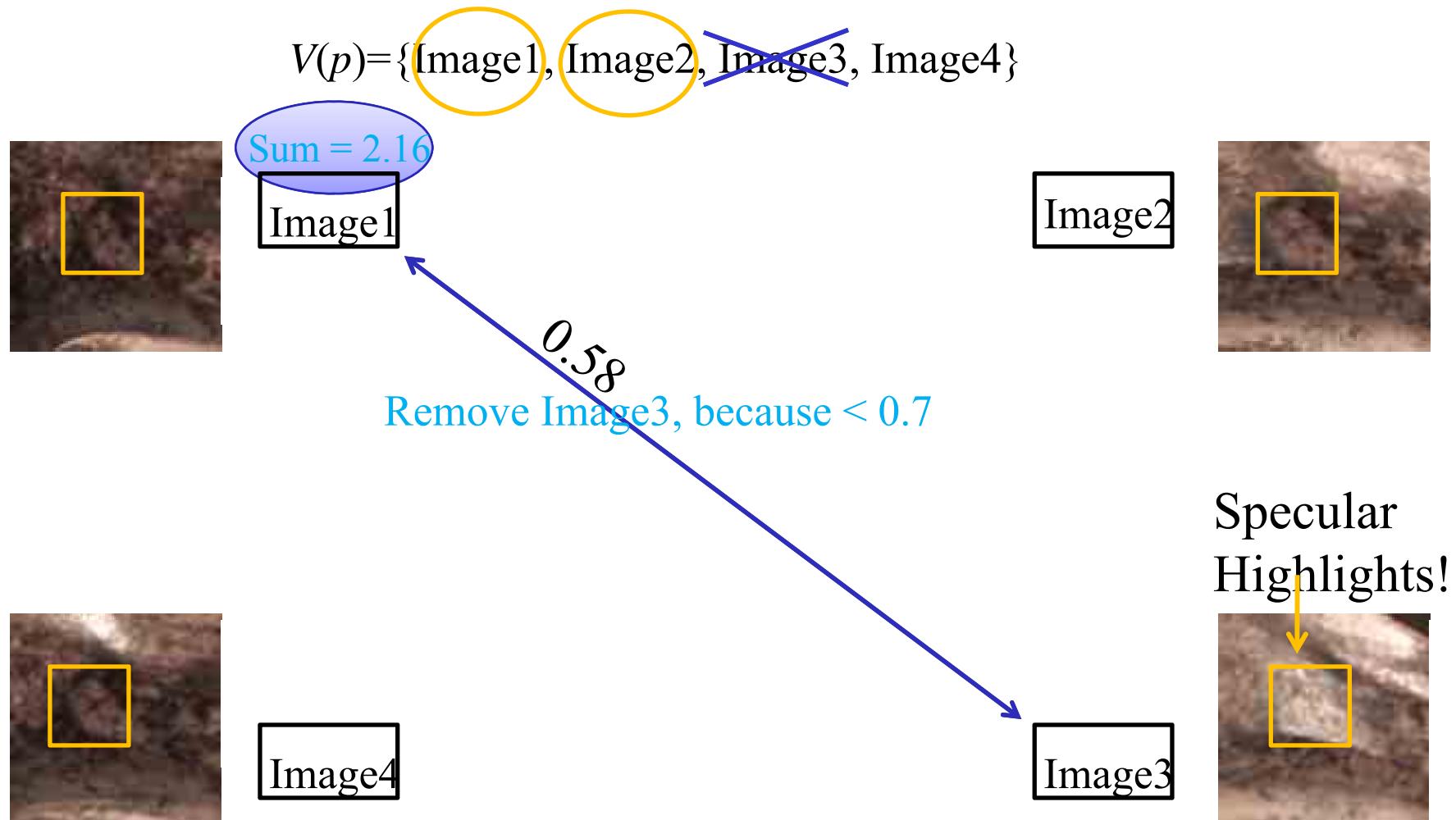


Обновление $V(p)$



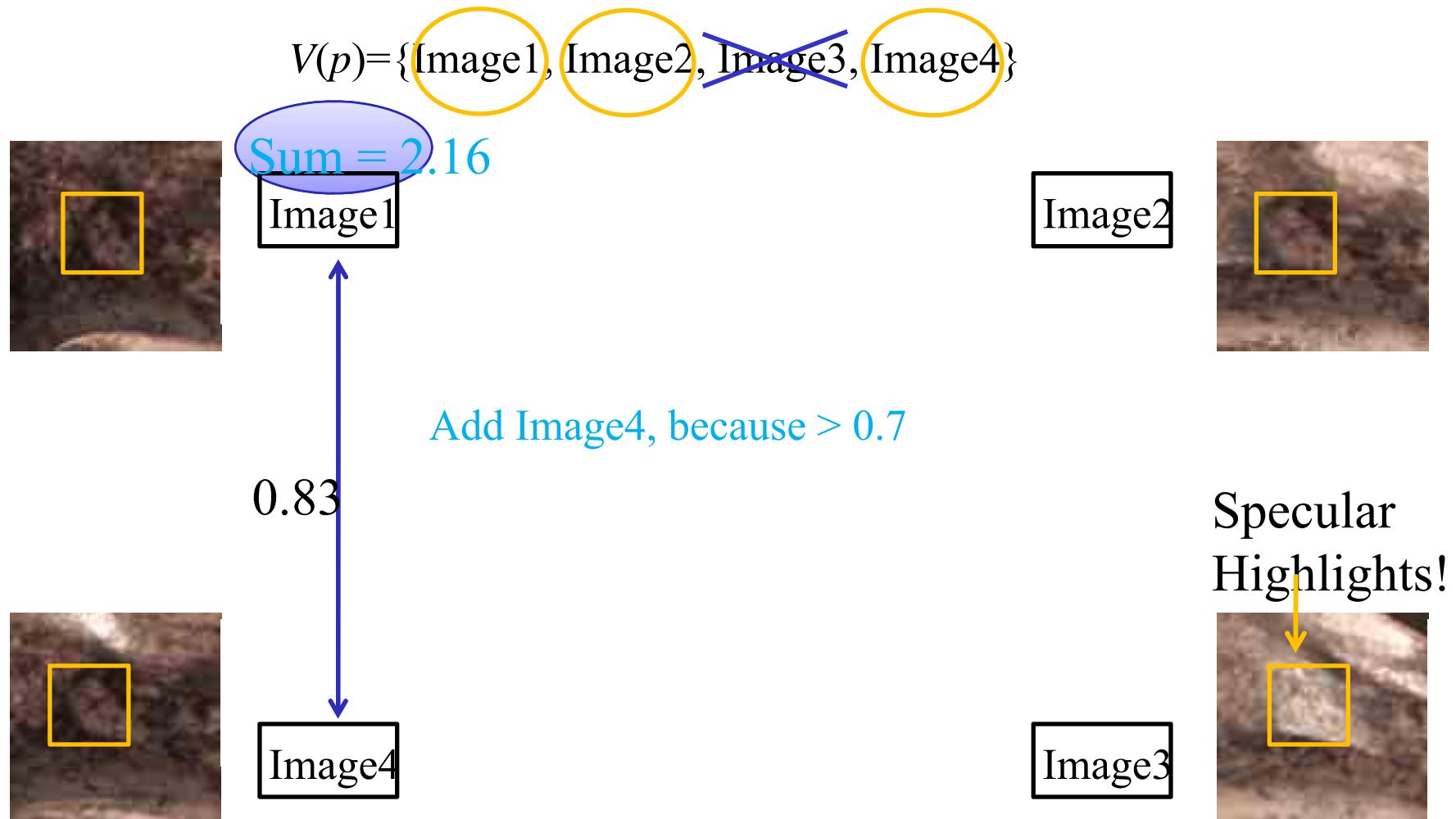


Обновление $V(p)$





Обновление $V(p)$





Обновление $V(p)$

$$V(p) = \{\text{Image1}, \text{Image2}, \text{Image4}\}$$

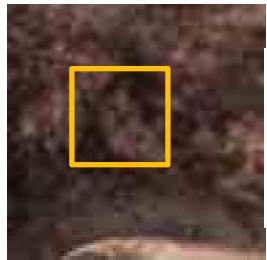


Image1



Image2



Image4

Image3

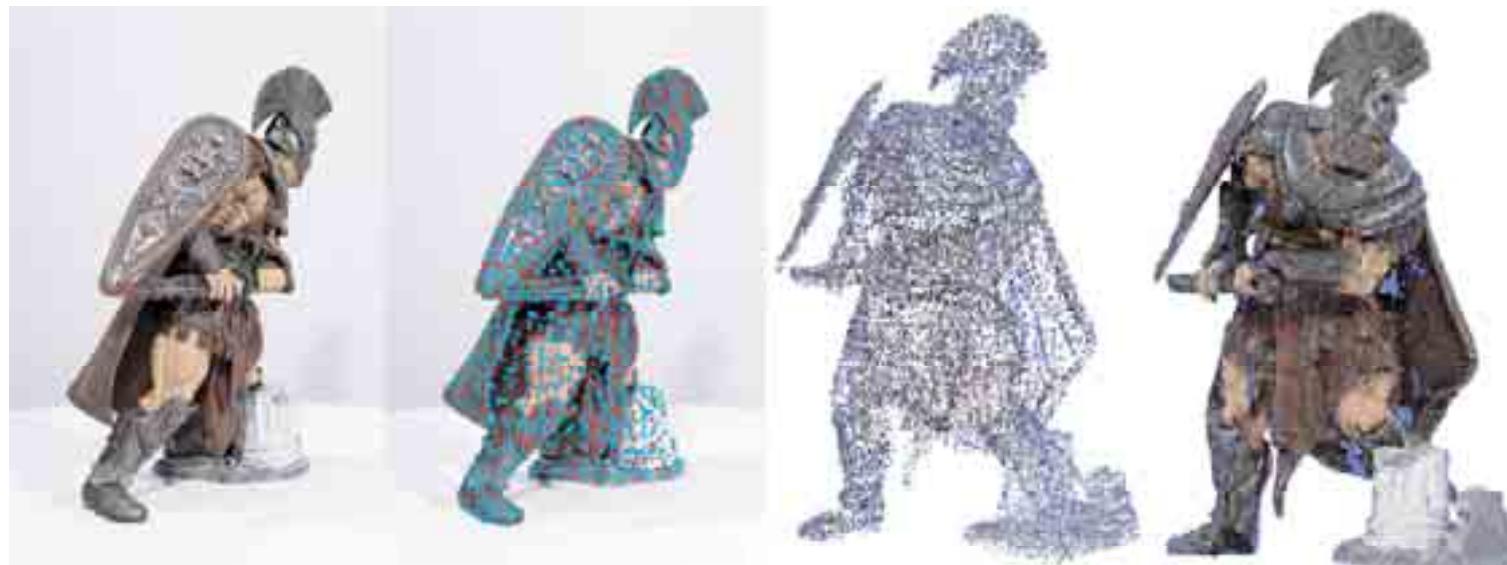


Specular
Highlights!



Алгоритм на основе фрагментов

- #1. Поиск особых точек
- #2. Инициализация точек
- #3. Расширение патчей и фильтрация



Input image

#1

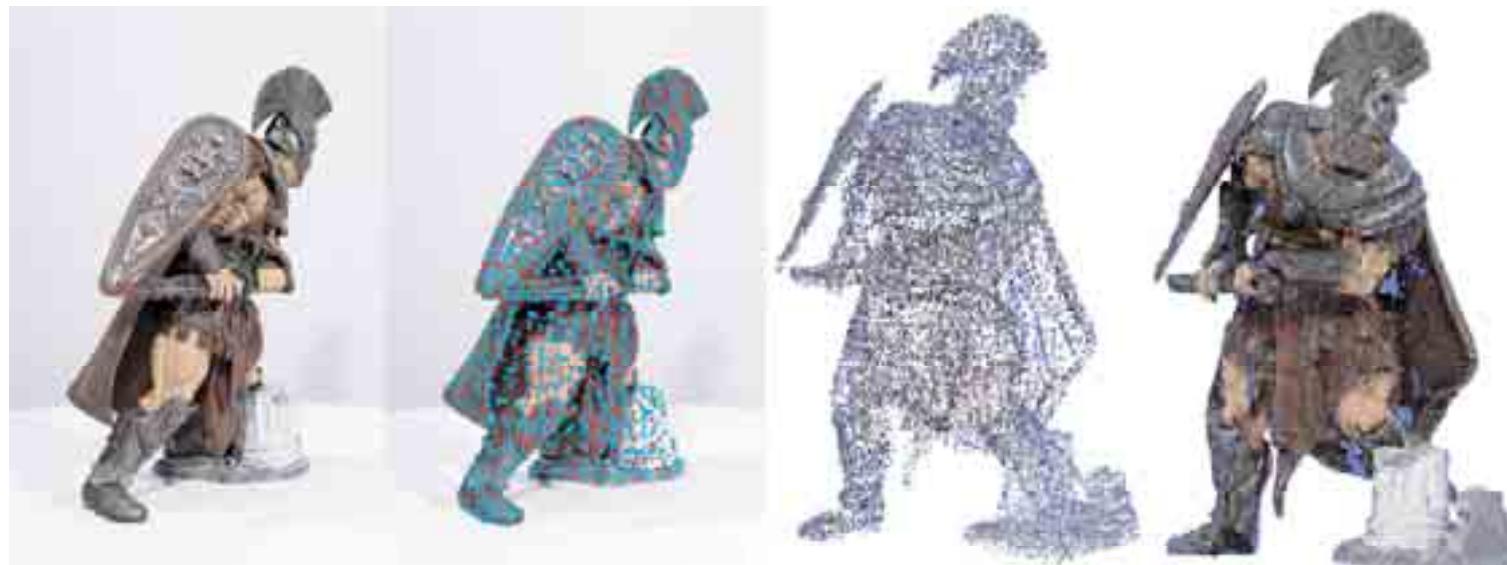
#2

#3



Алгоритм на основе фрагментов

- #1. Поиск особых точек
- #2. Инициализация точек
- #3. Расширение патчей и фильтрация



Input image

#1

#2

#3



Поиск точек

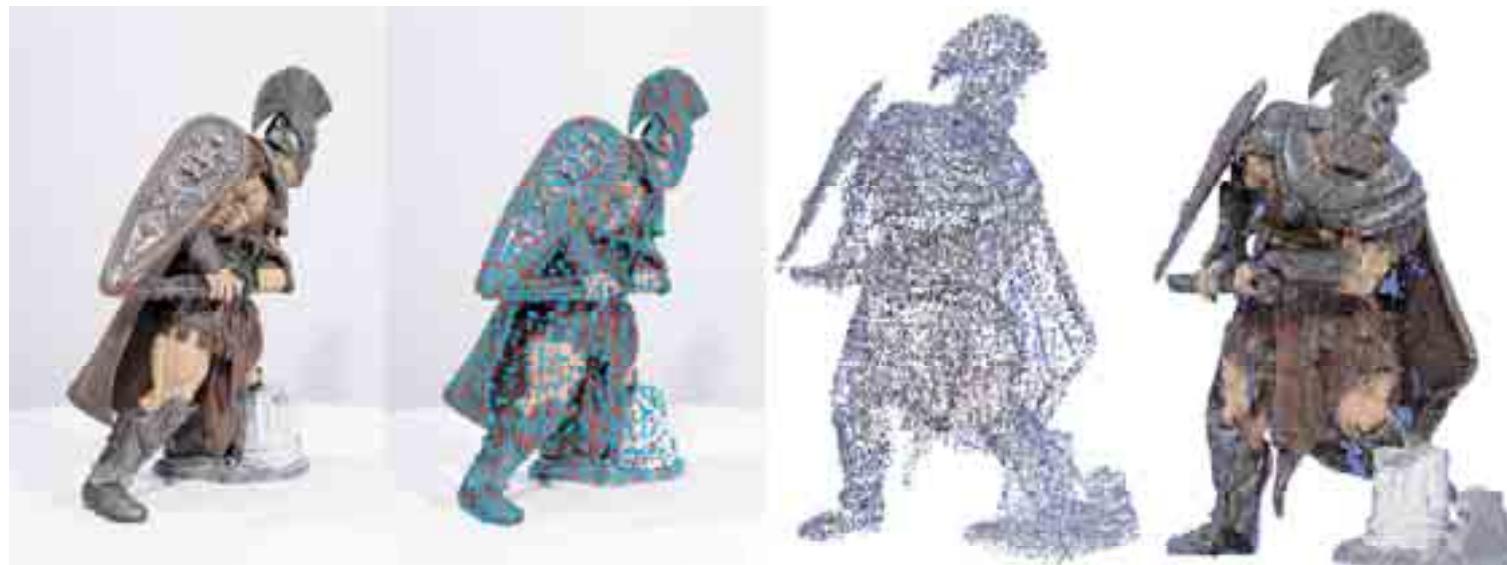
- Harris corner detector (corners)
- Difference of Gaussian (blobs)





Алгоритм на основе фрагментов

- #1. Поиск особых точек
- #2. Инициализация точек
- #3. Расширение патчей и фильтрация



Input image

#1

#2

#3

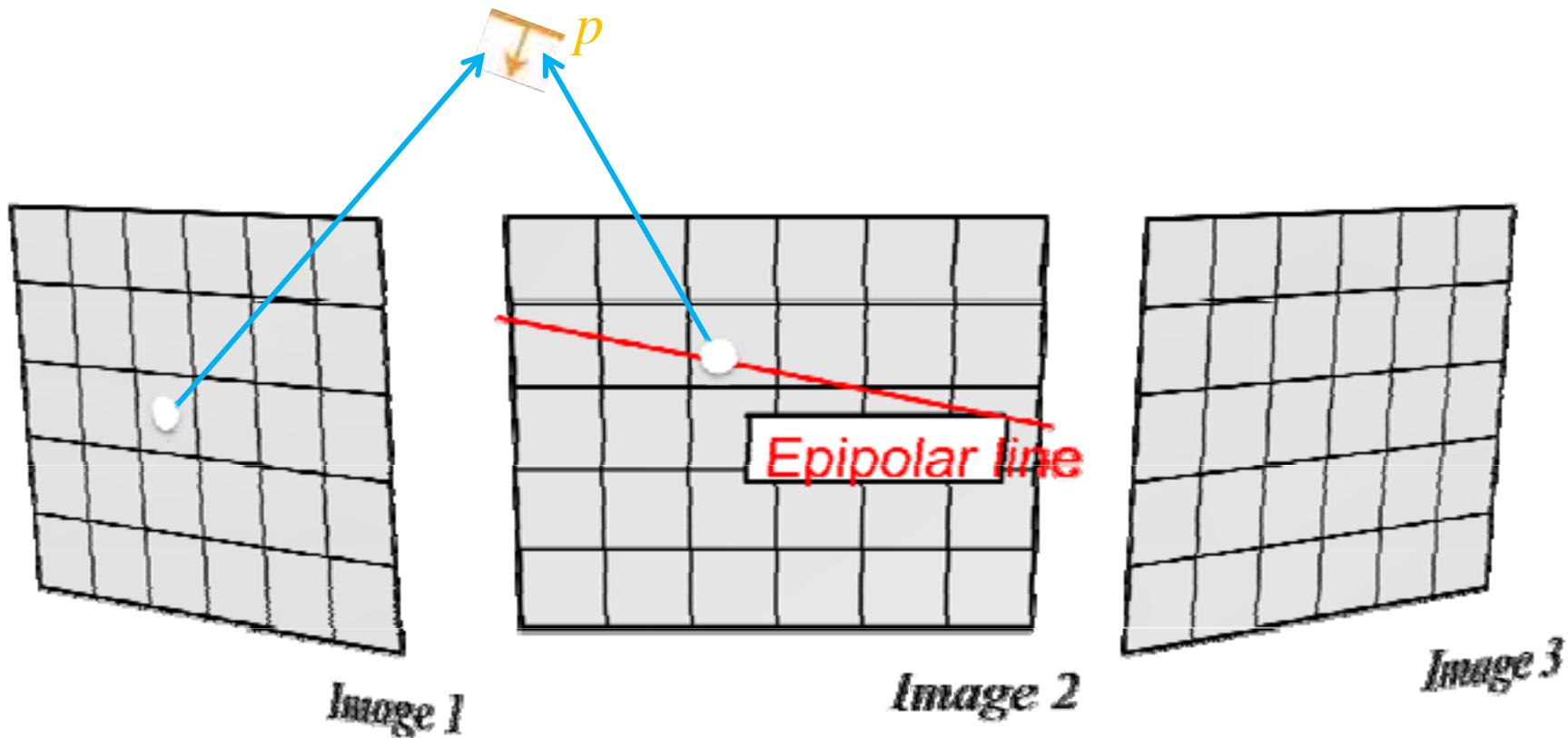


Инициализация точек

$c(p)$: triangulation

$n(p)$:

$V(p)$:



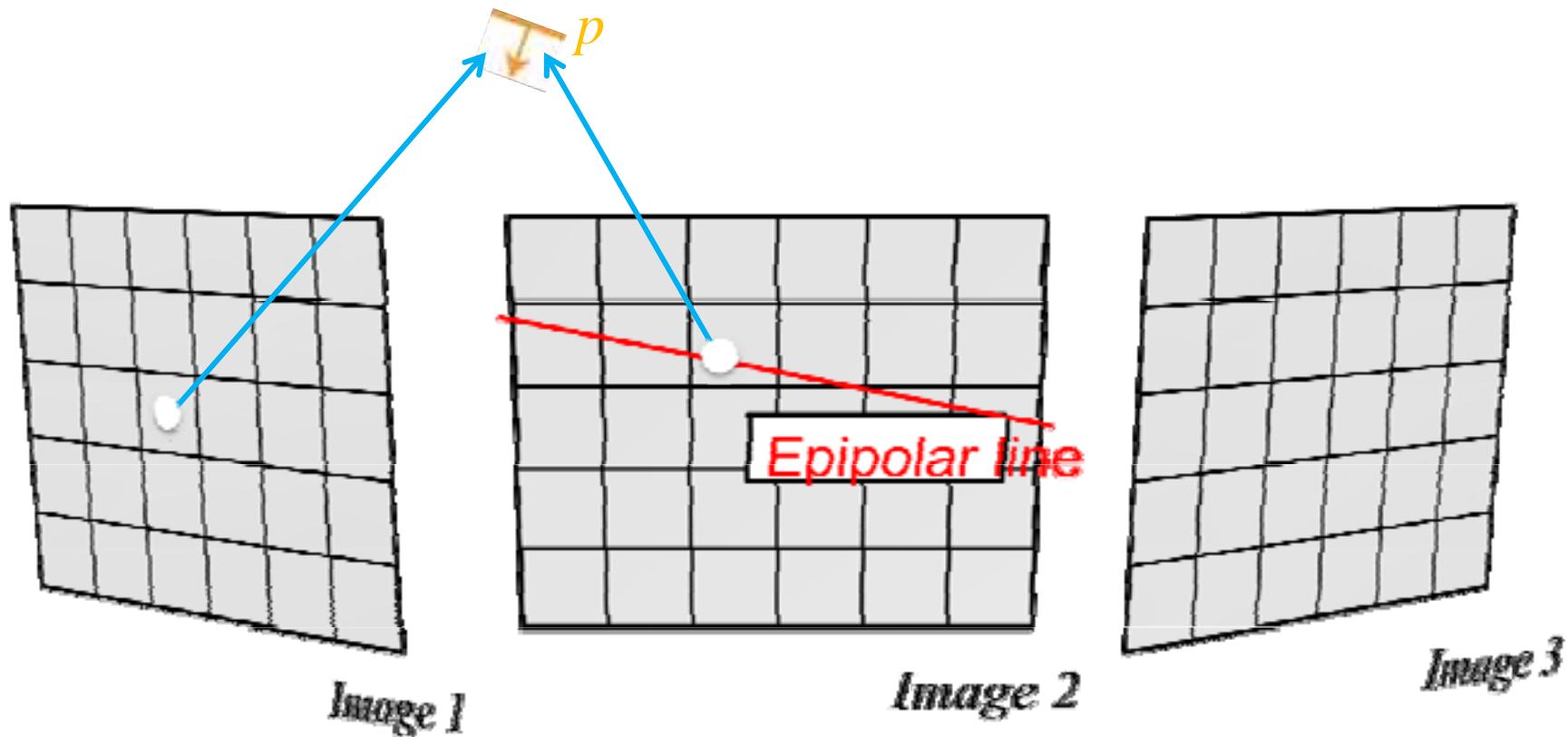


Инициализация точек

$c(p)$: triangulation

$n(p)$: parallel to *Image1*

$V(p)$: $\{\text{Image1}, \text{Image2}\}$



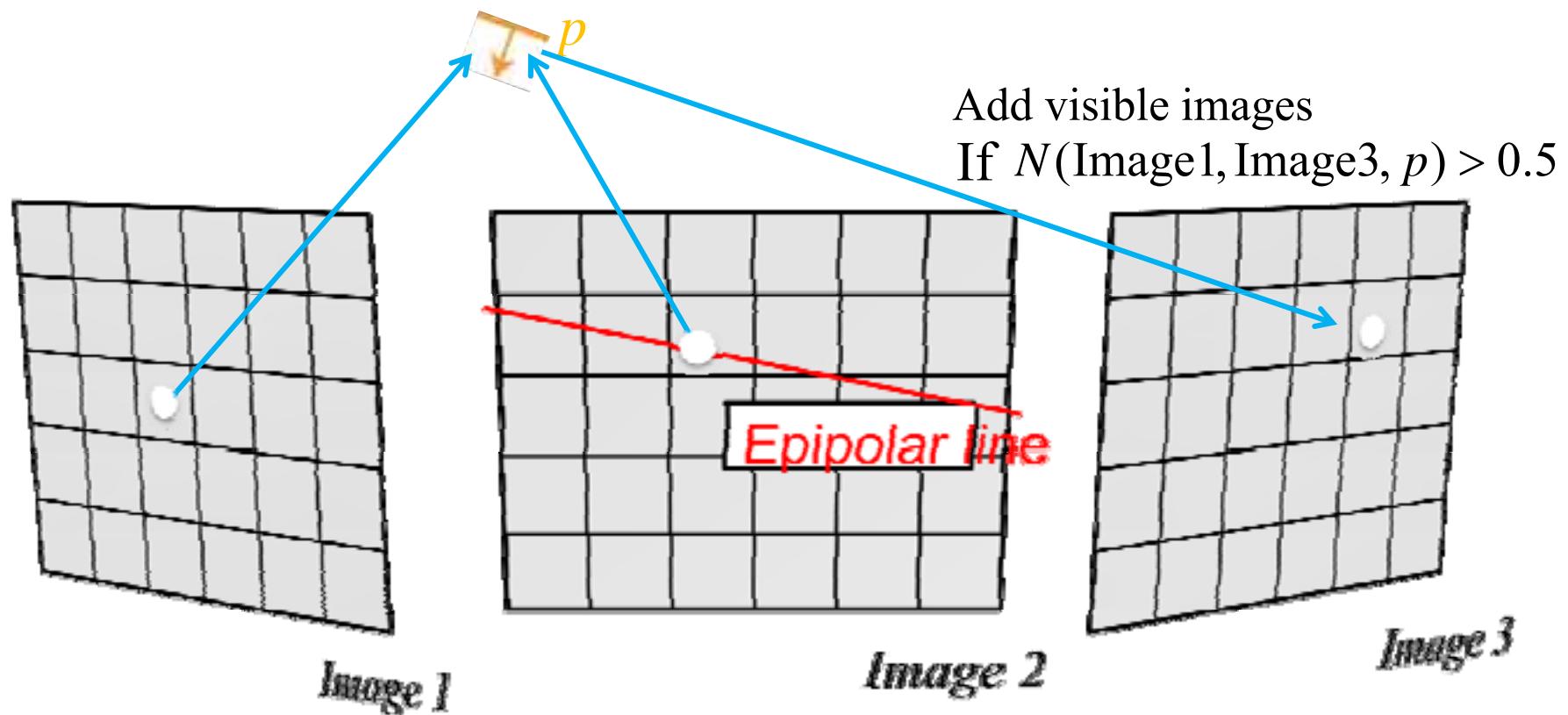


Инициализация точек

$c(p)$: triangulation

$n(p)$: parallel to *Image1*

$V(p)$: $\{\text{Image1}, \text{Image2}, \text{Image3}\}$



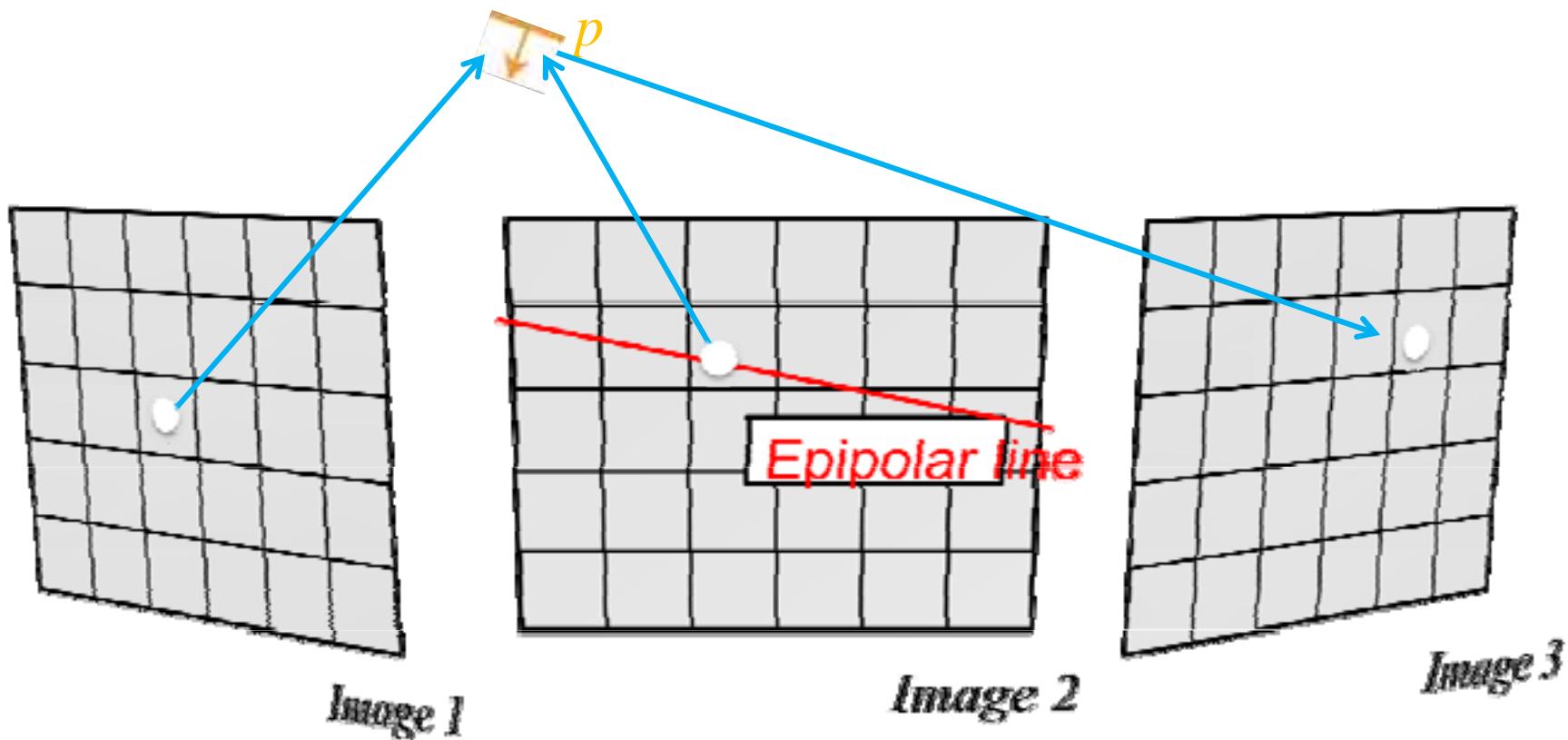


Инициализация точек

$c(p)$: triangulation

$n(p)$: parallel to $Image1$

$V(p)$: $\{Image1, Image2, Image3\}$





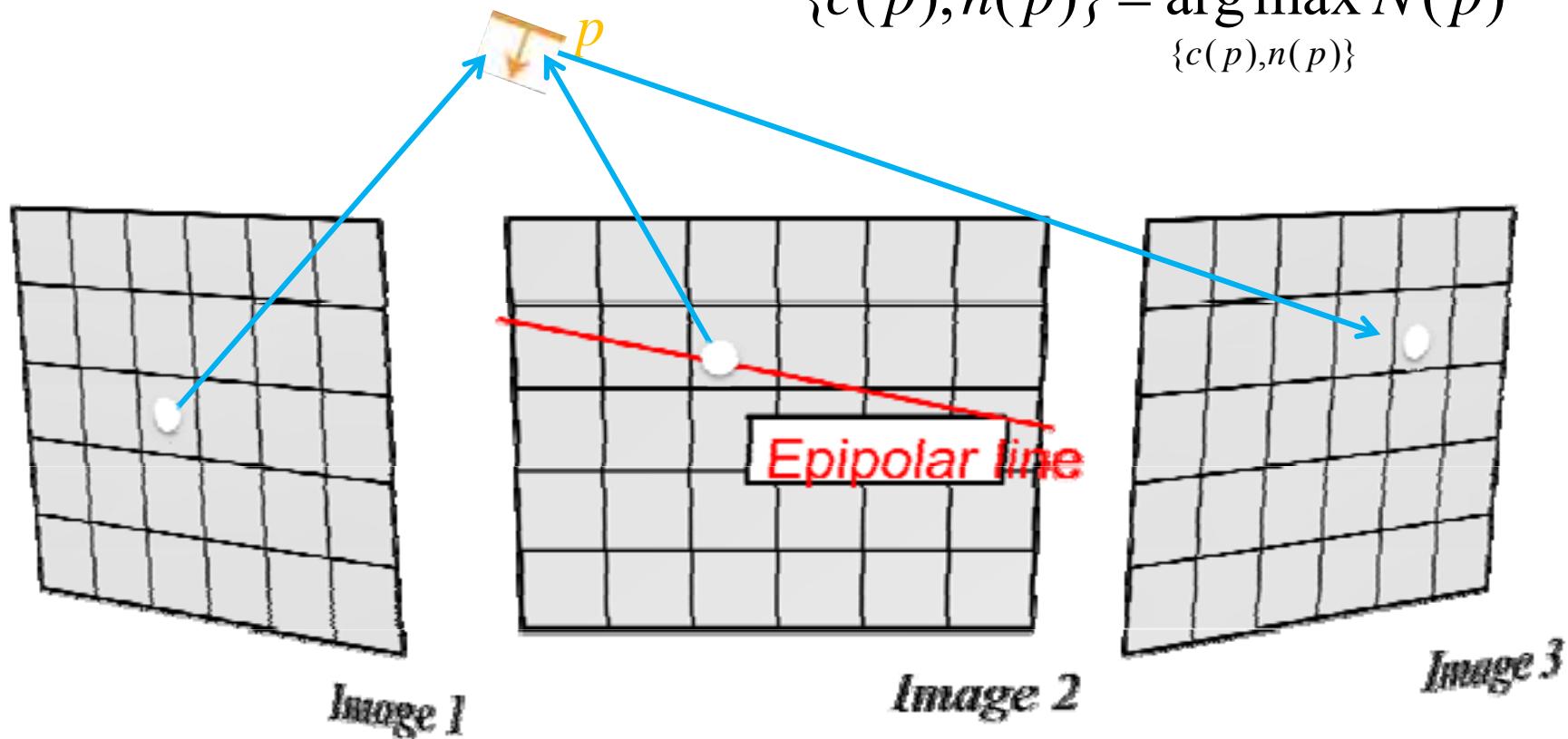
Инициализация точек

$c(p)$: refine

$n(p)$: refine

$V(p)$: {Image1, Image2, Image3}

$$\{c(p), n(p)\} = \arg \max_{\{c(p), n(p)\}} N(p)$$





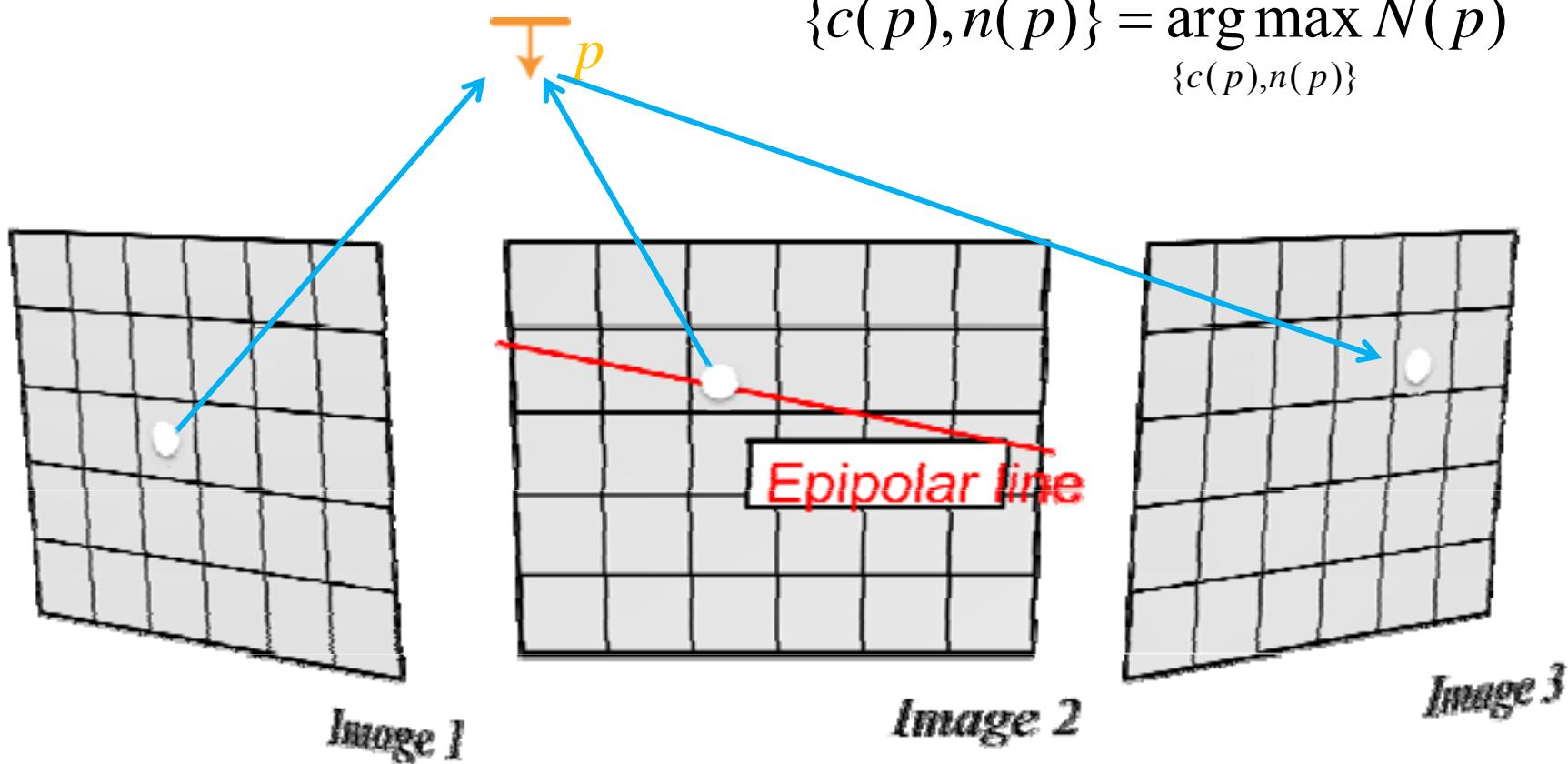
Инициализация точек

$c(p)$: refine

$n(p)$: refine

$V(p)$: {Image1, Image2, Image3}

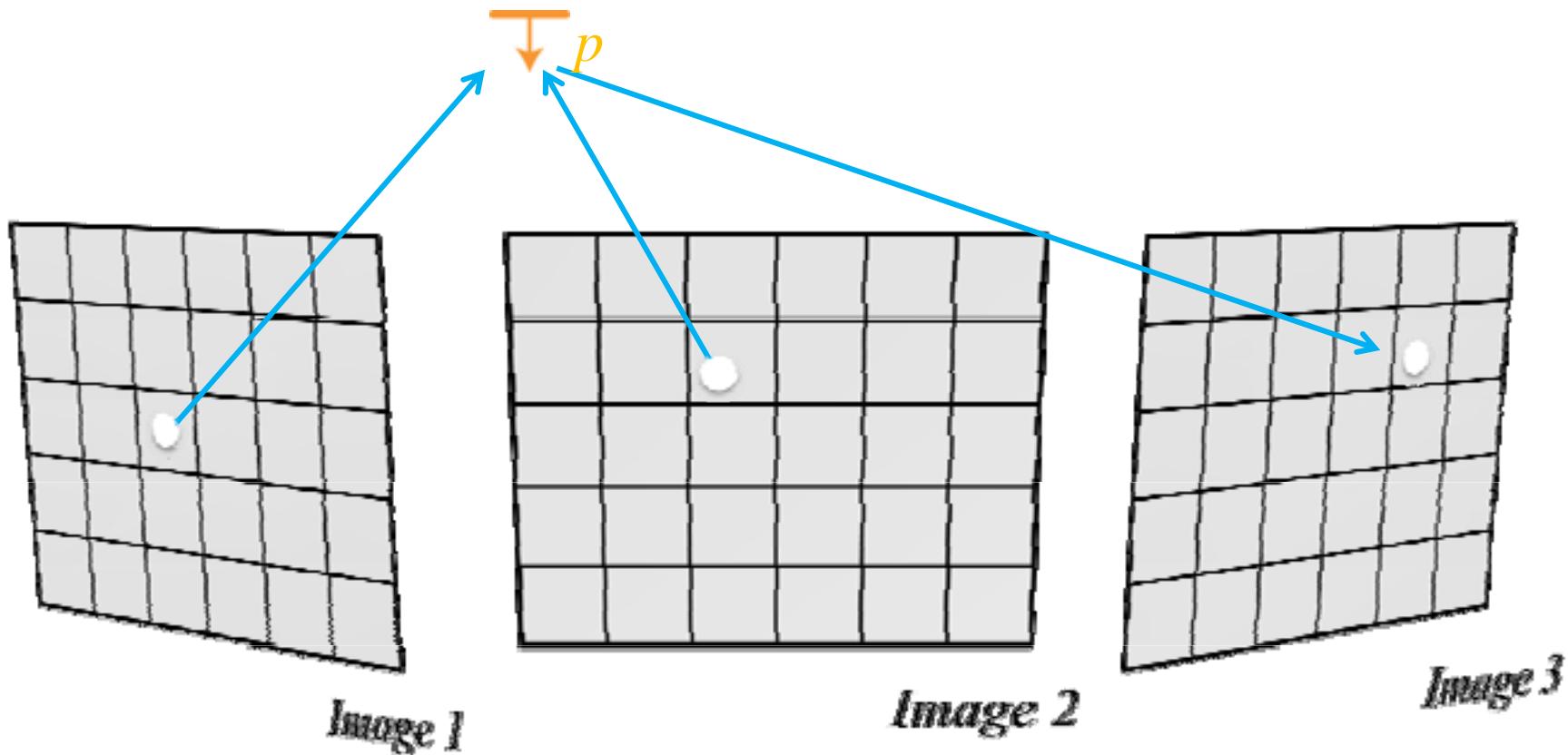
$$\{c(p), n(p)\} = \arg \max_{\{c(p), n(p)\}} N(p)$$





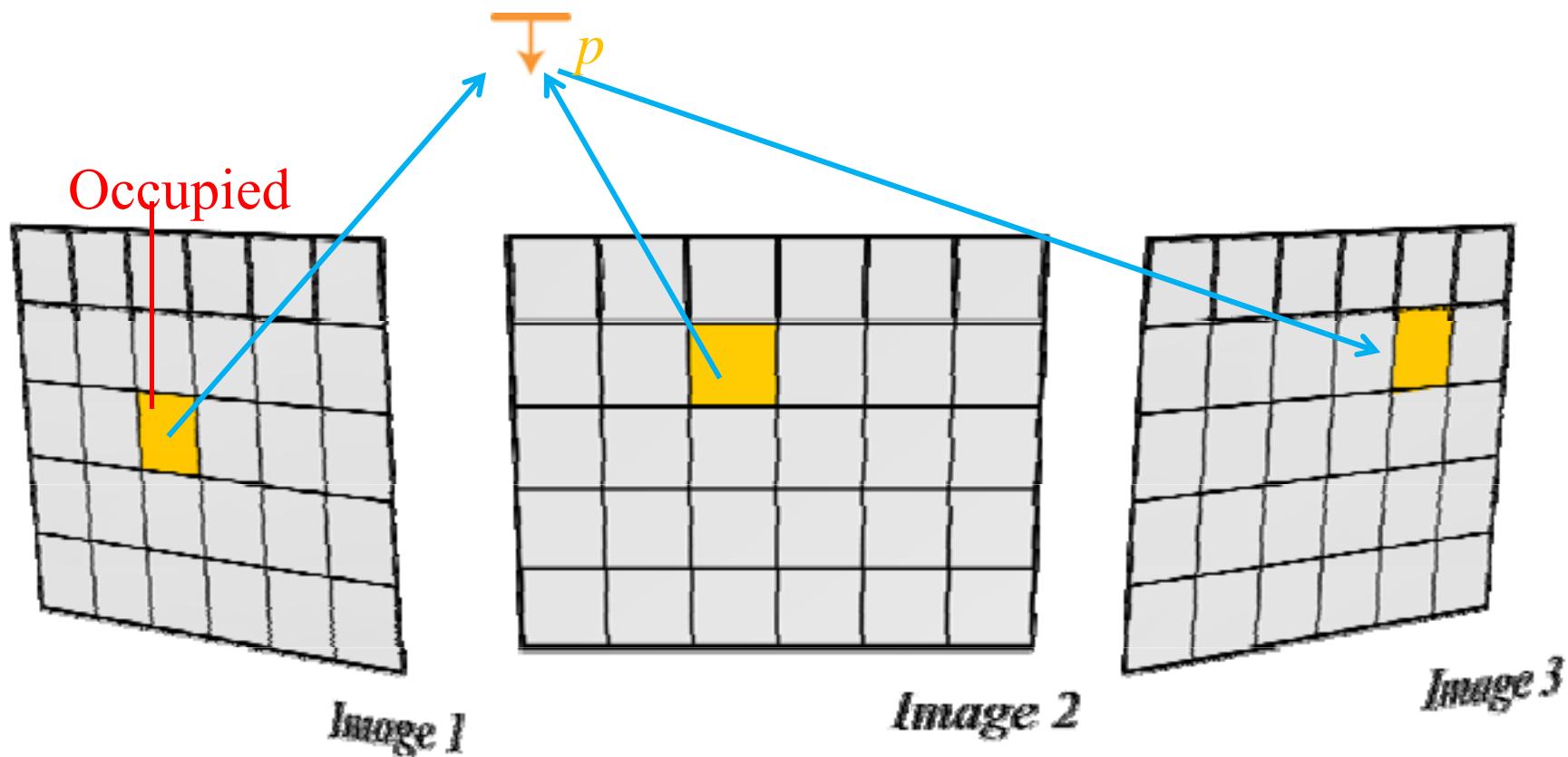
Инициализация точек

Verification
(update $V(p)$ and check $|V(p)| \geq 3$)



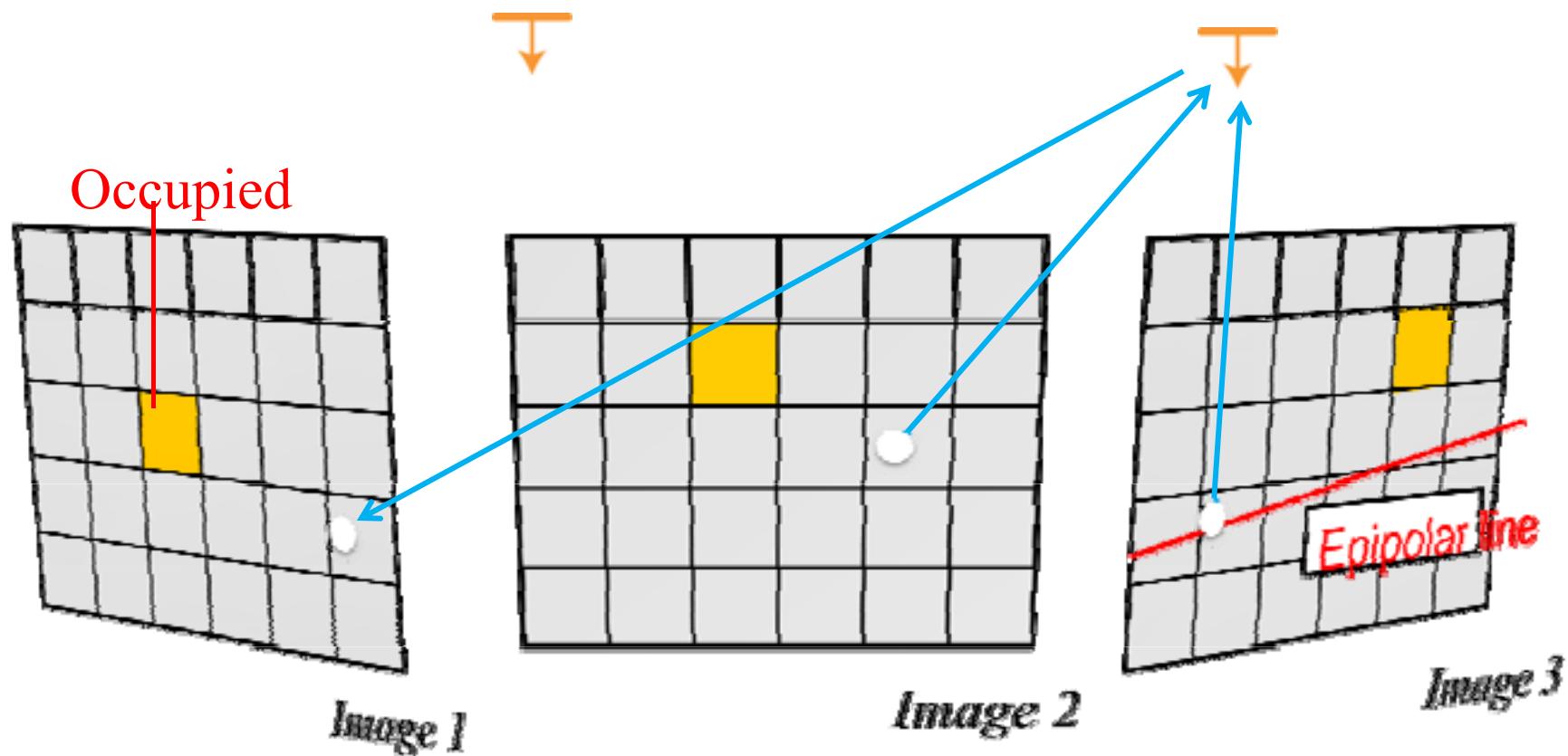


Инициализация точек



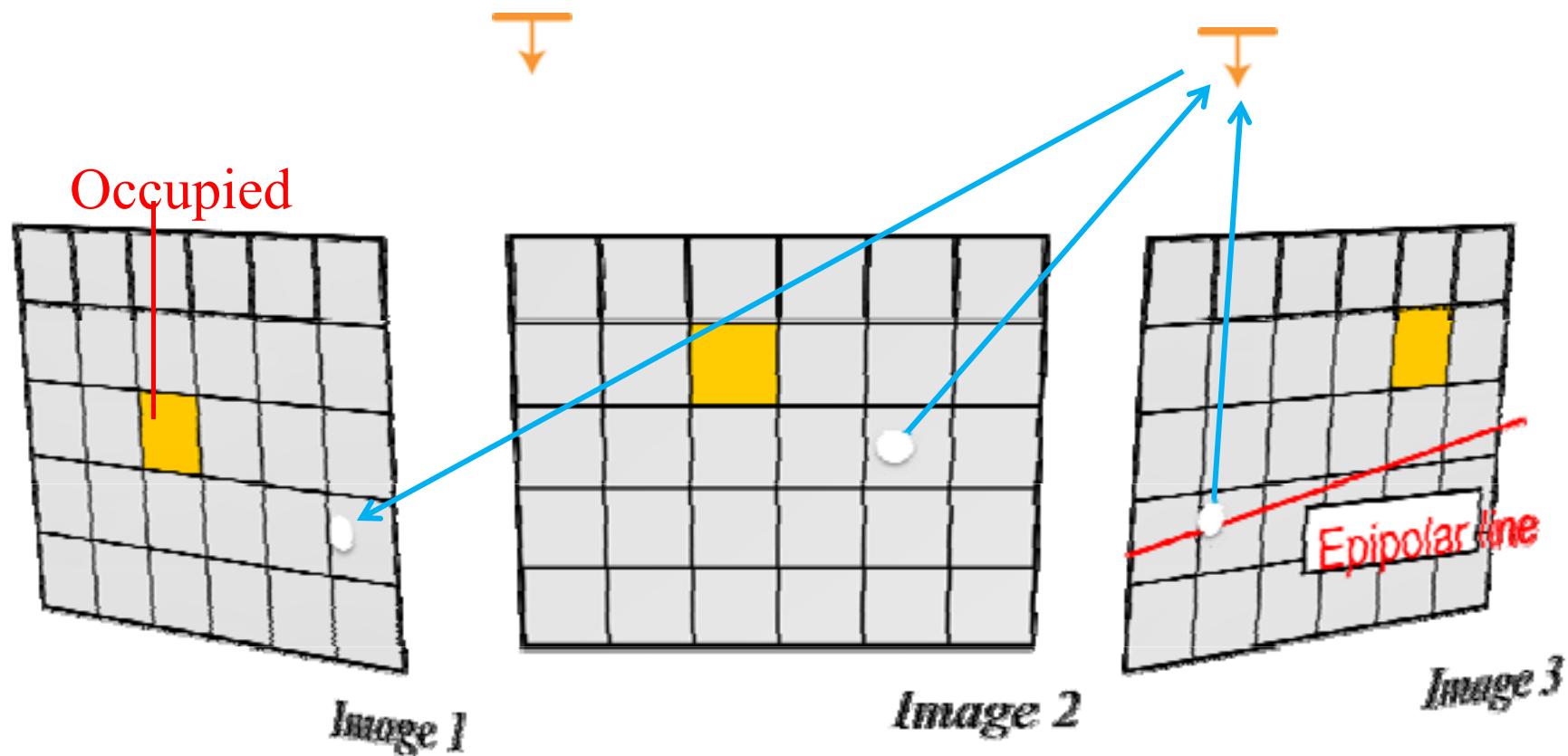


Инициализация точек



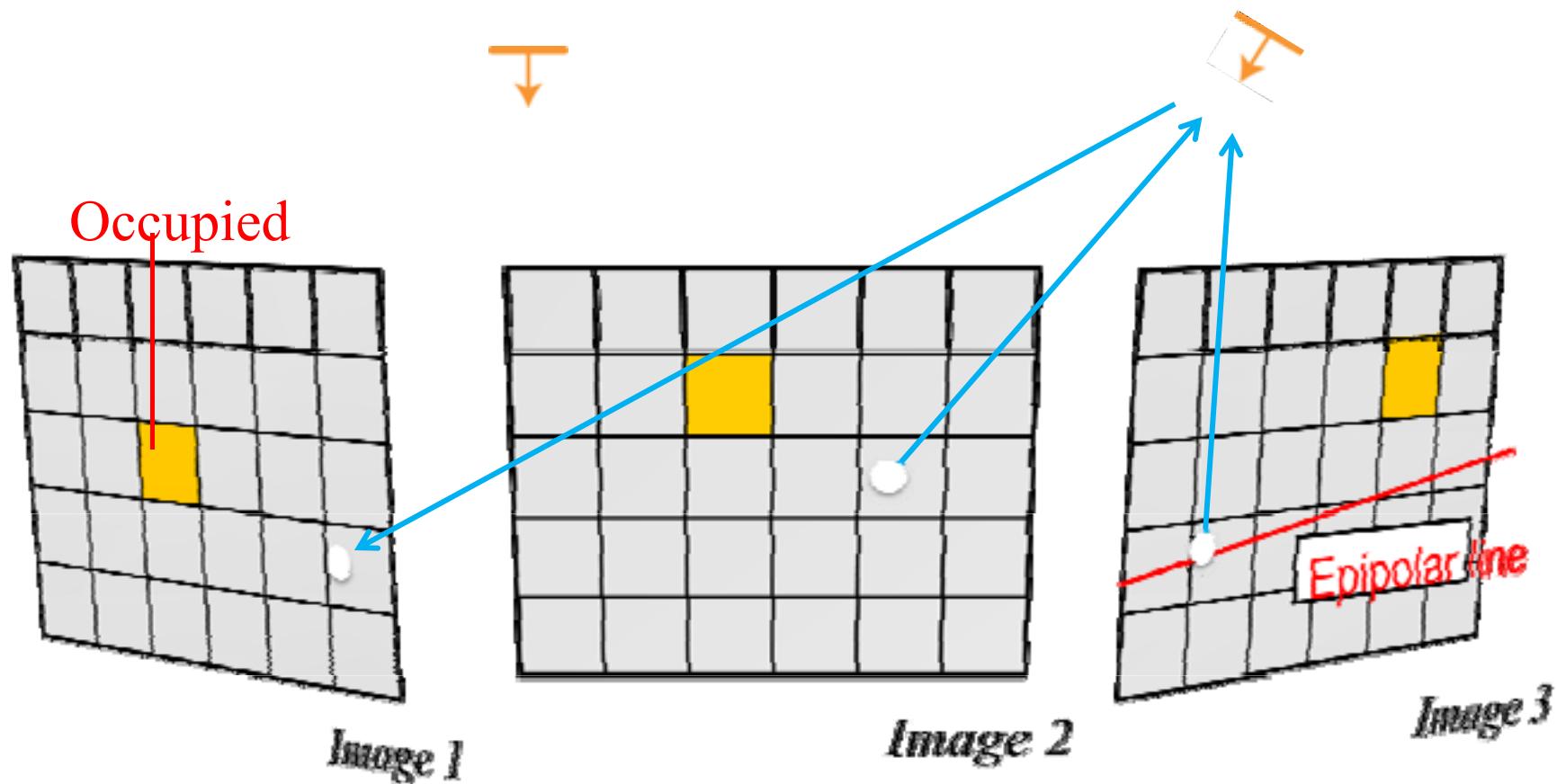


Инициализация точек





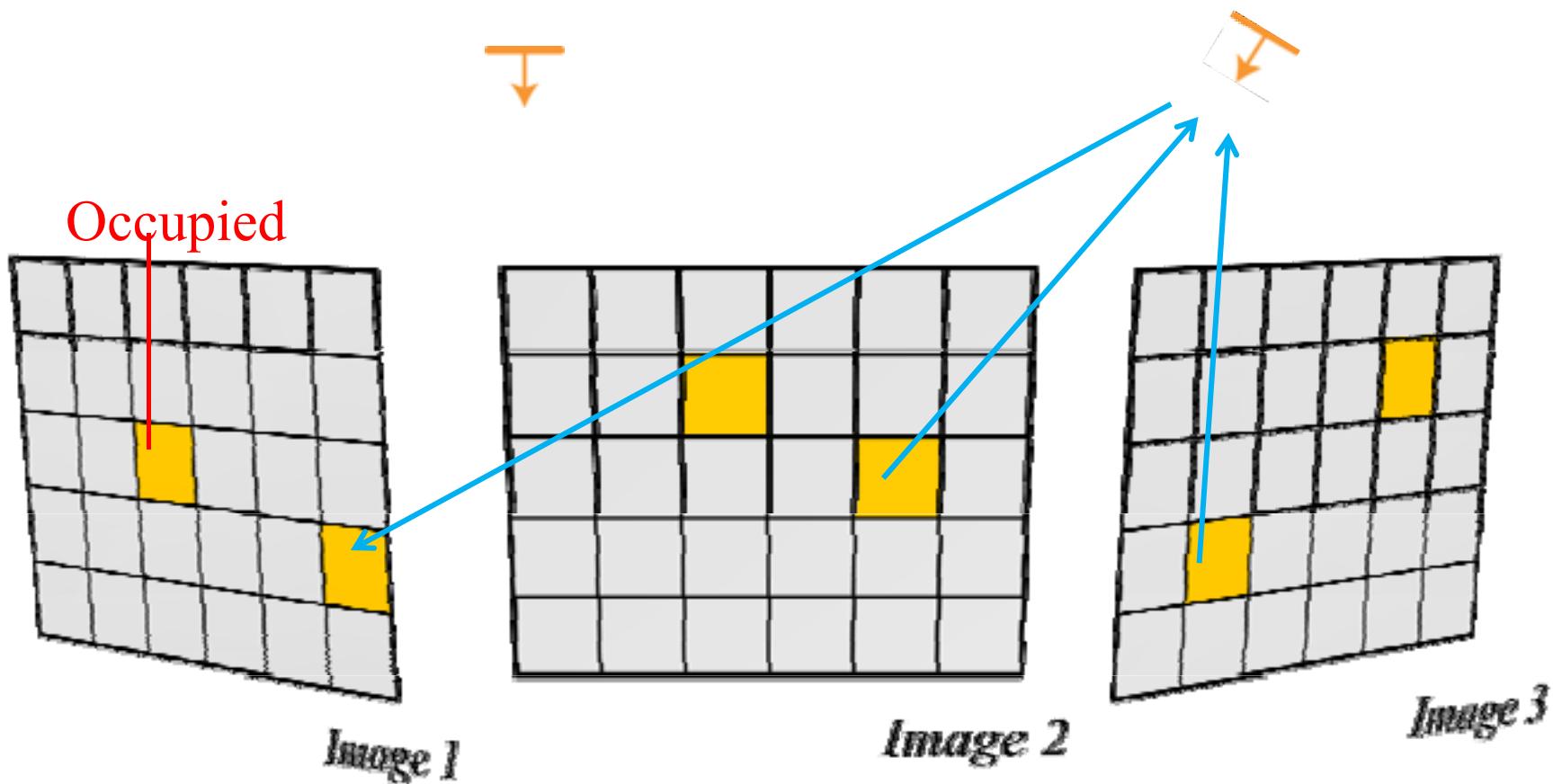
Инициализация точек





Инициализация точек

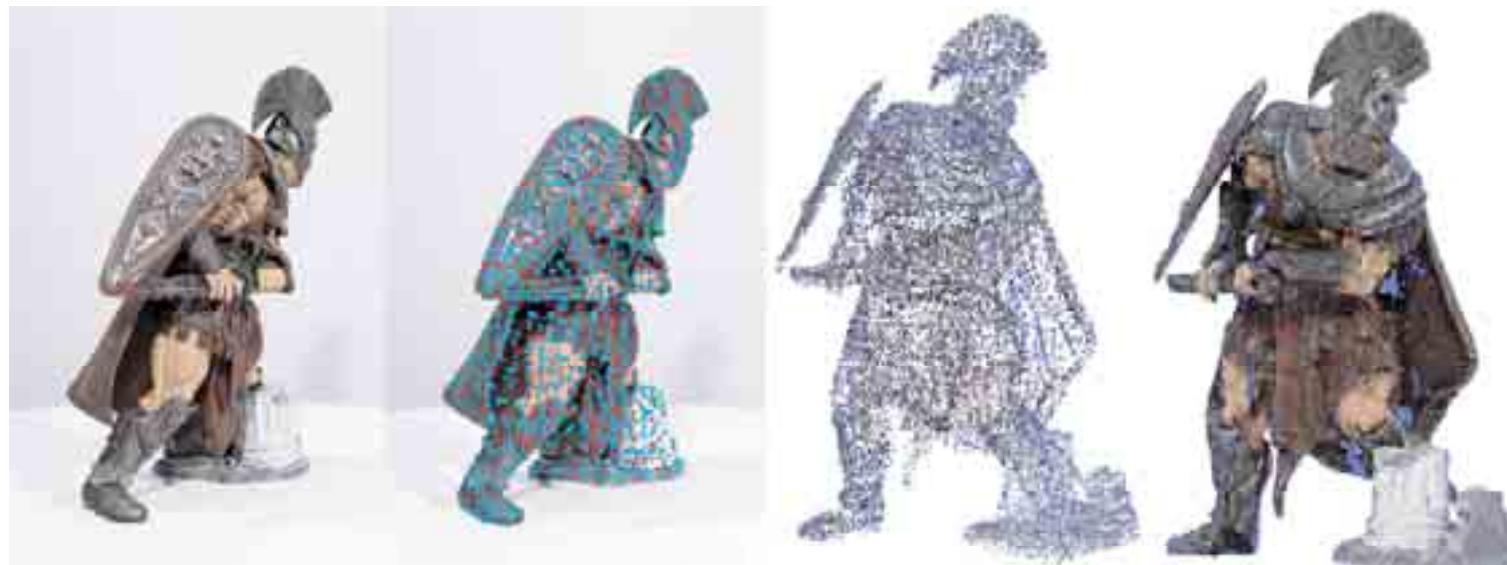
- Повторяем для всех найденных точек





Алгоритм на основе фрагментов

- #1. Поиск особых точек
- #2. Инициализация точек
- #3. Расширение патчей и фильтрация



Input image

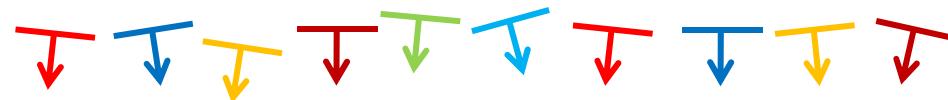
#1

#2

#3



Расширение фрагментов



Занятый пиксель

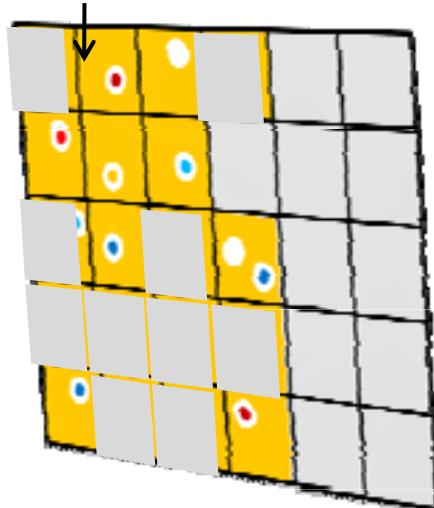


Image 1

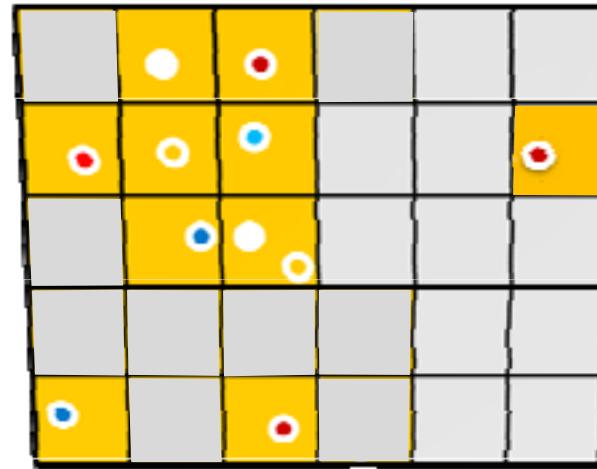


Image 2

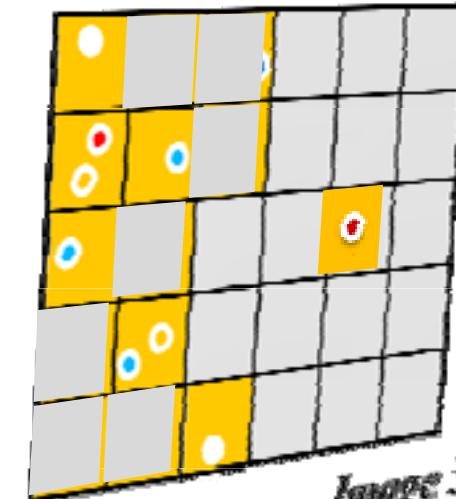
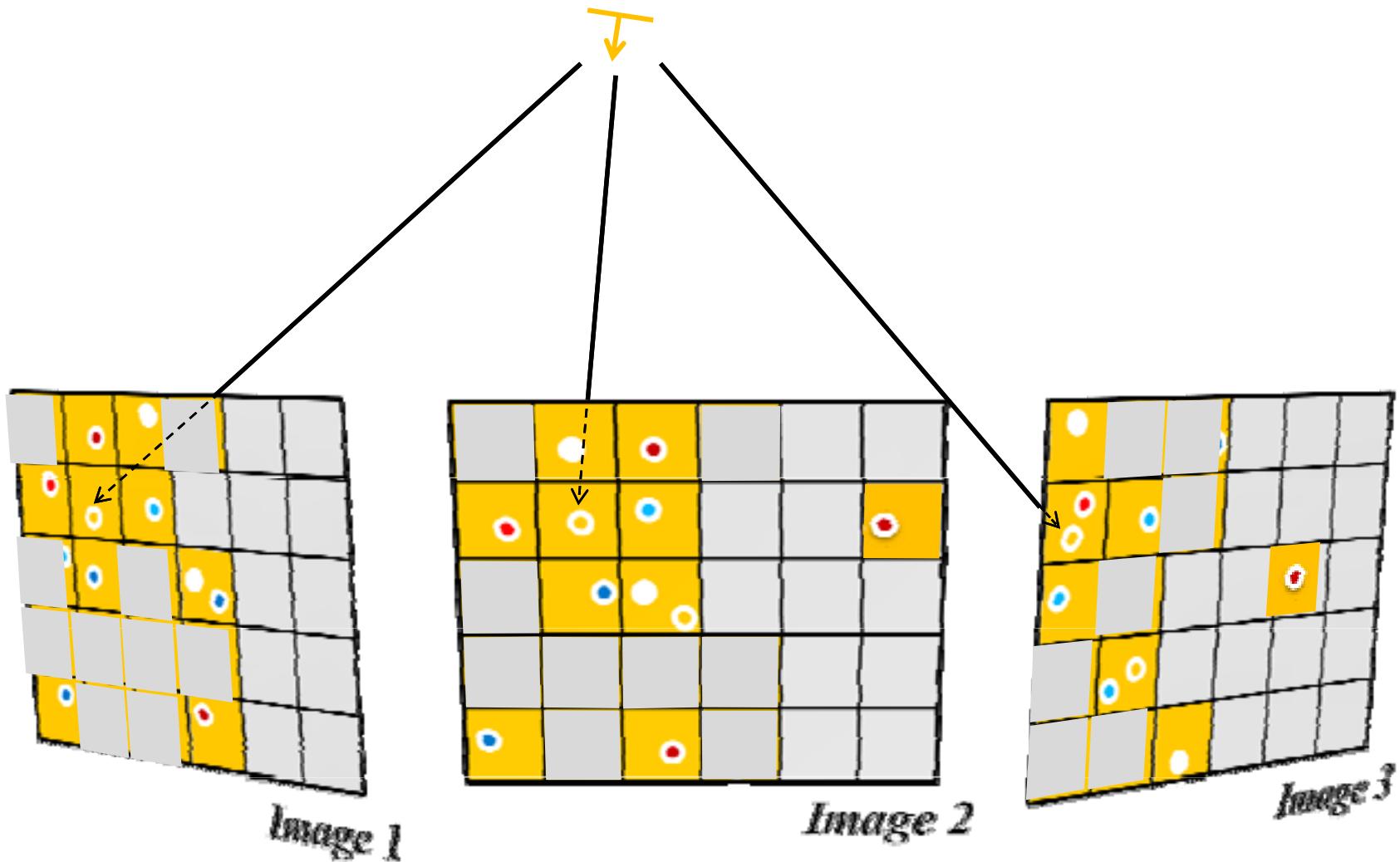


Image 3



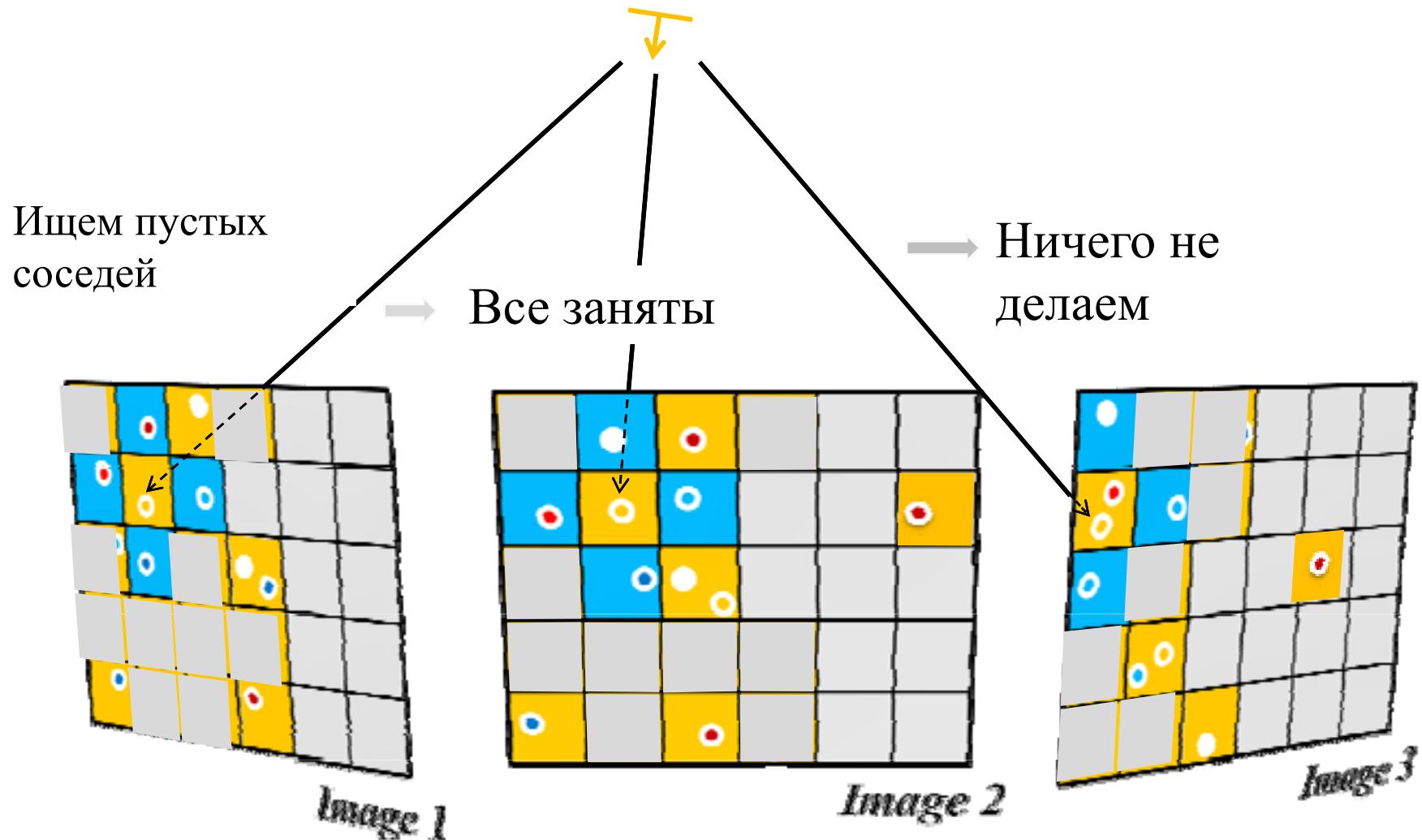
Расширение фрагментов

Выбираем фрагмент





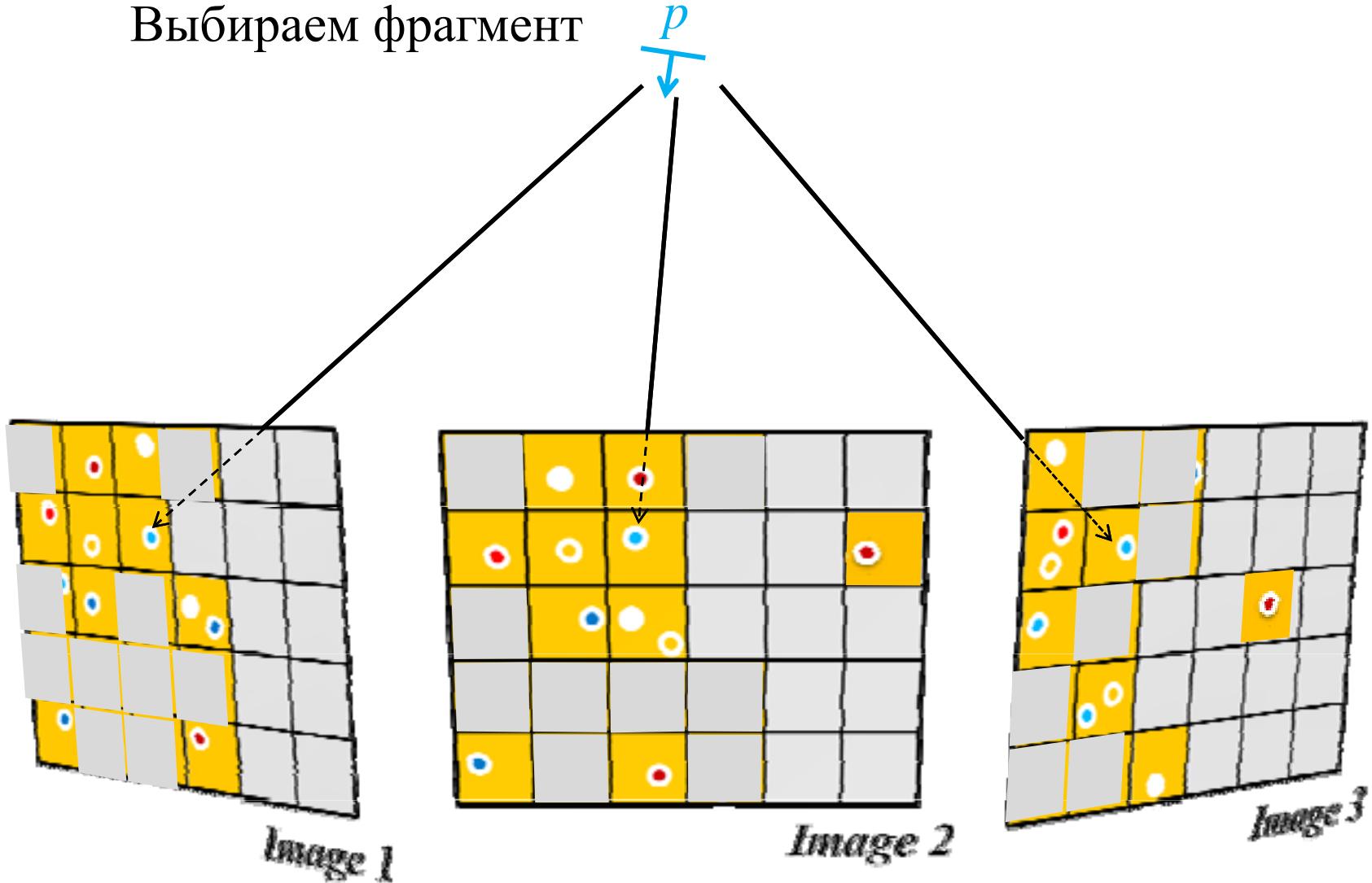
Расширение фрагментов





Расширение фрагментов

Выбираем фрагмент





Расширение фрагментов

Ищем
пустых
соседей

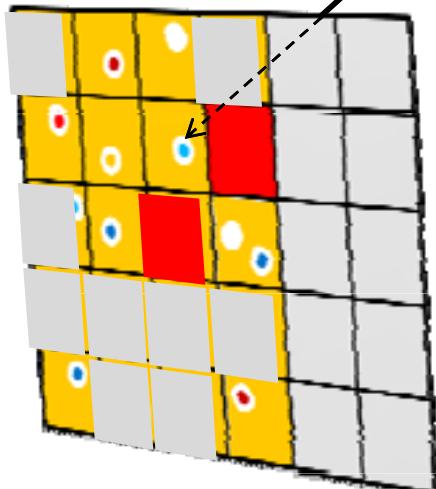


Image 1

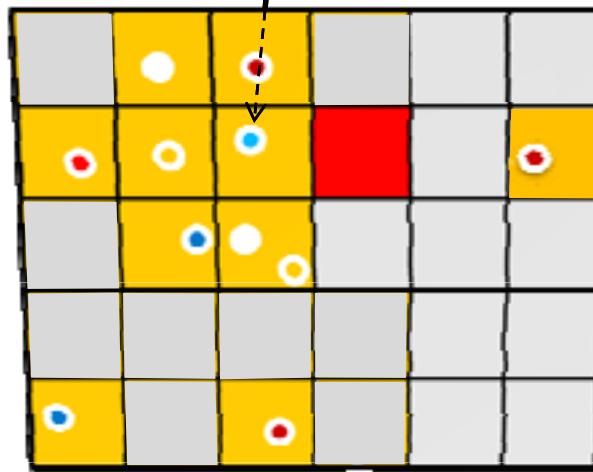


Image 2

p

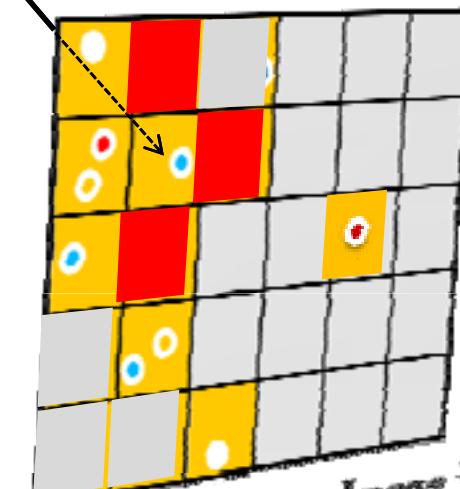
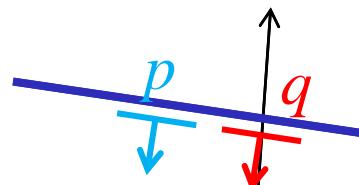


Image 3



Расширение фрагментов

Реконструируем
фрагменты во
всех соседних
пикселях



$c(q)$: {пересечение
касательной
плоскости и луча}

$n(q)$:

$V(q)$:

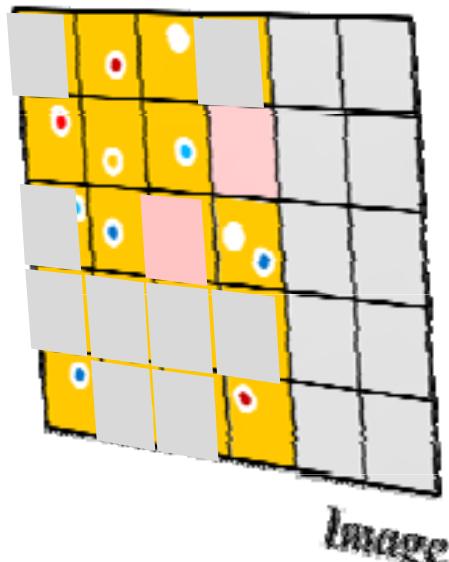


Image 1

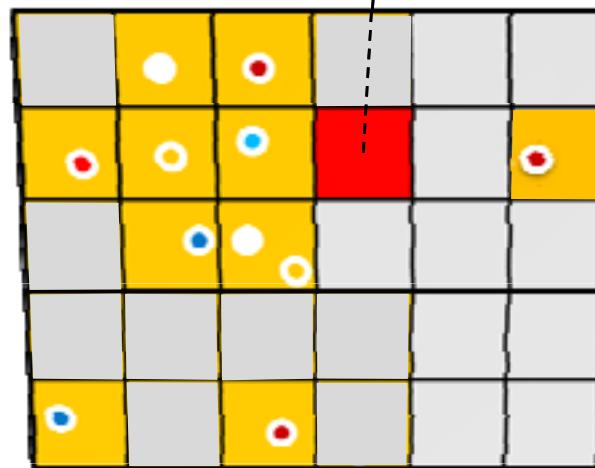


Image 2

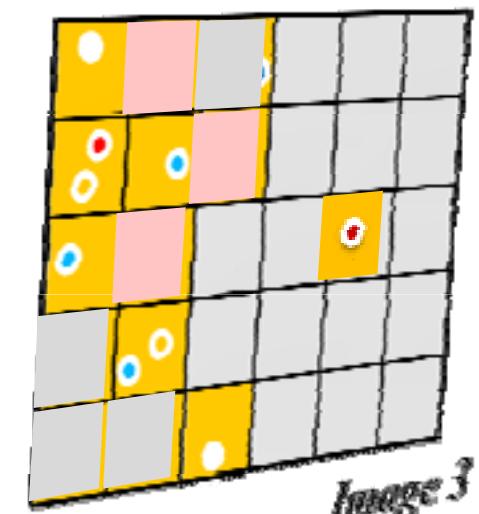


Image 3



Расширение фрагментов

p
↓
 q
↗

$c(q)$: уточняем

$n(q)$: уточняем

$V(q)$: $V(p)$

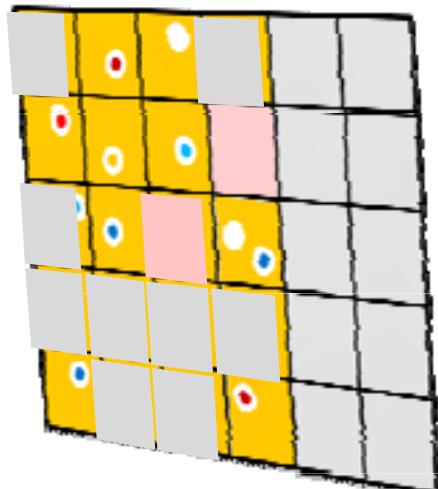


Image 1

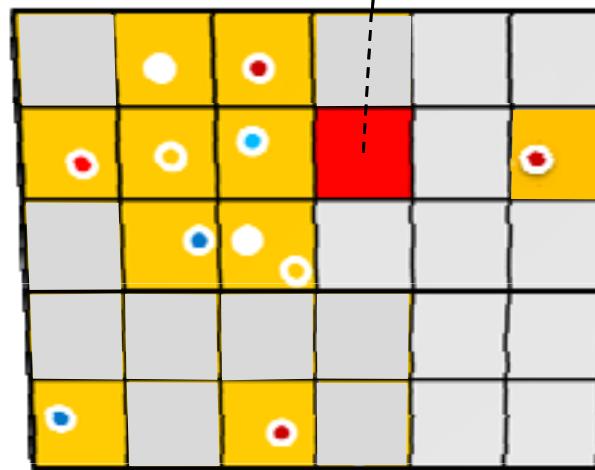


Image 2

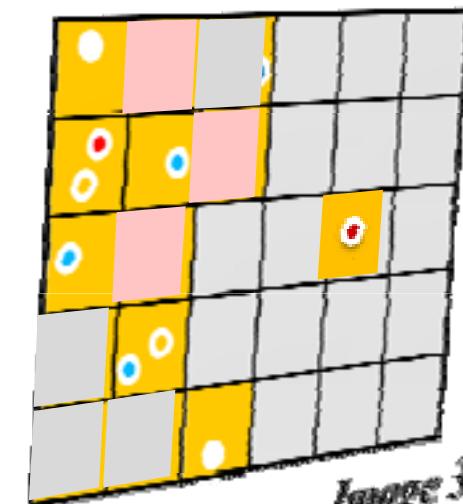
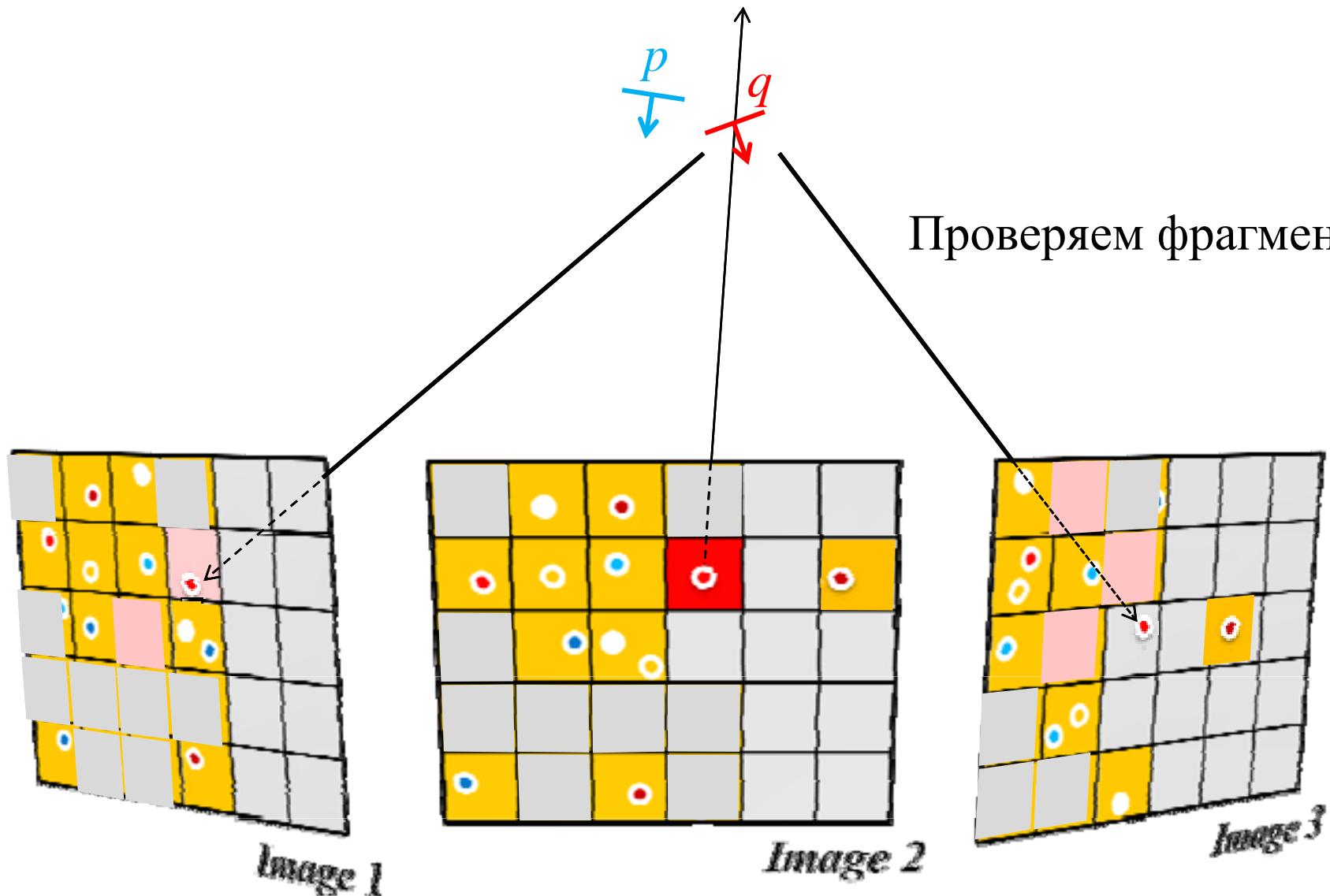


Image 3

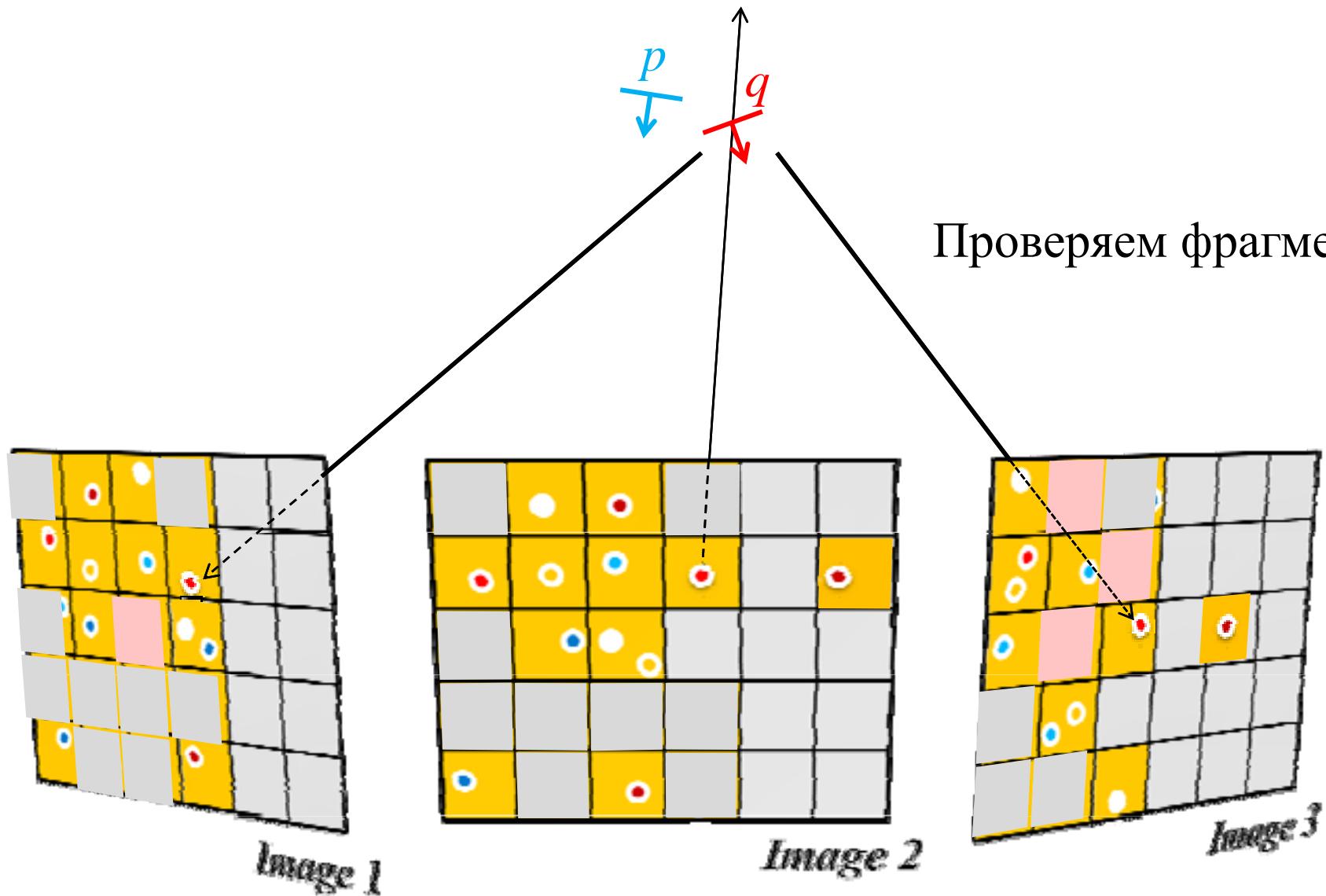


Расширение фрагментов



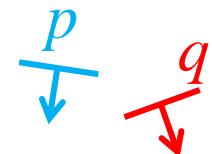


Расширение фрагментов





Расширение фрагментов



Повторяем

- Для каждого фрагмента
- Для каждого соседнего пустого пикселя

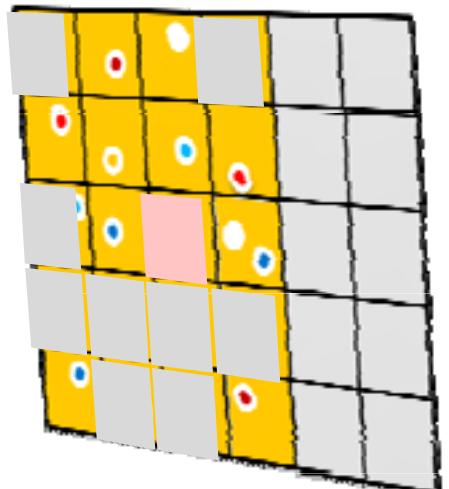


Image 1

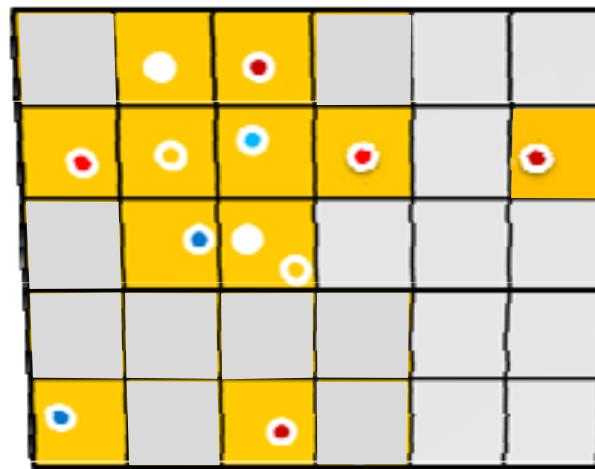


Image 2

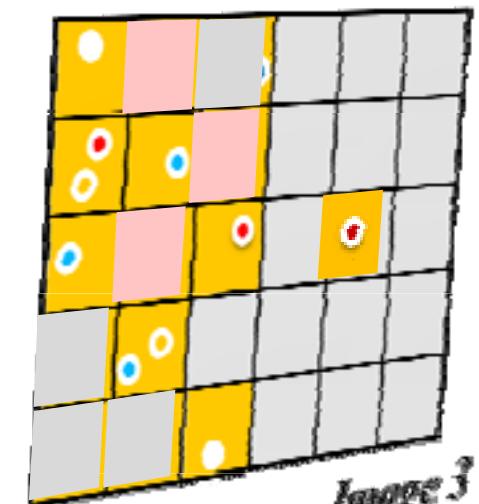


Image 3

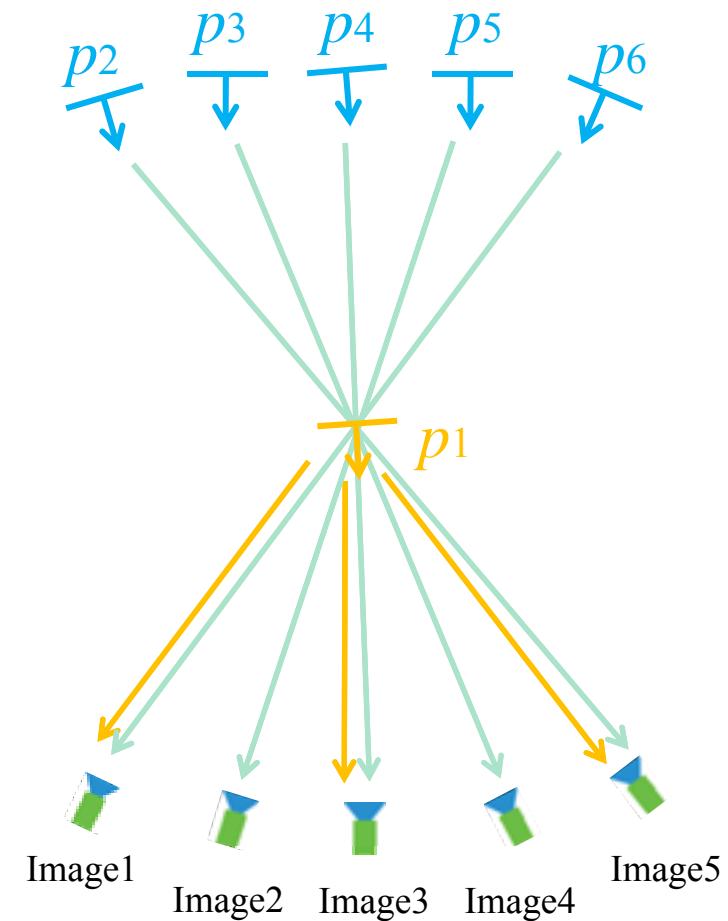


Фильтрация патчей

- Согласование видимости

Убираем p_1 если

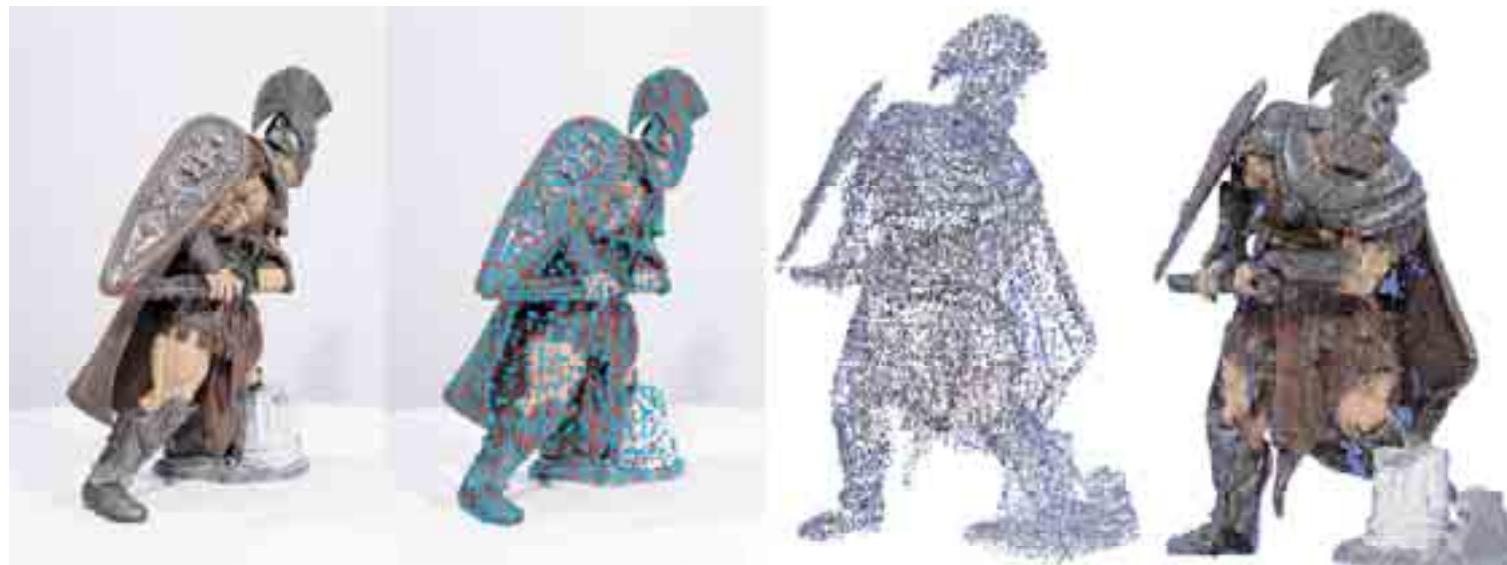
$$|V(p_1)| N(p_1) < \sum_{i=2}^6 N(p_i)$$





Алгоритм на основе фрагментов

- #1. Поиск особых точек
- #2. Инициализация точек
- #3. Расширение патчей и фильтрация



Input image

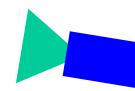
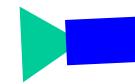
#1

#2

#3

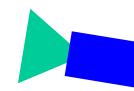
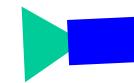


Резюме алгоритма





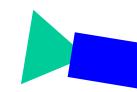
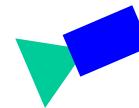
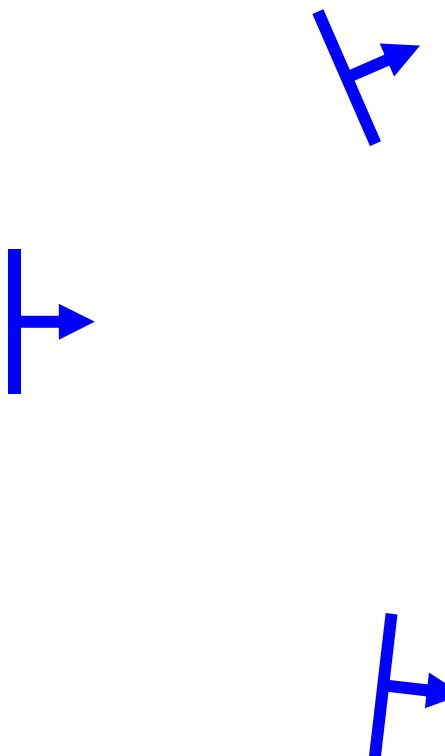
Резюме алгоритма



Поиск
особенностей



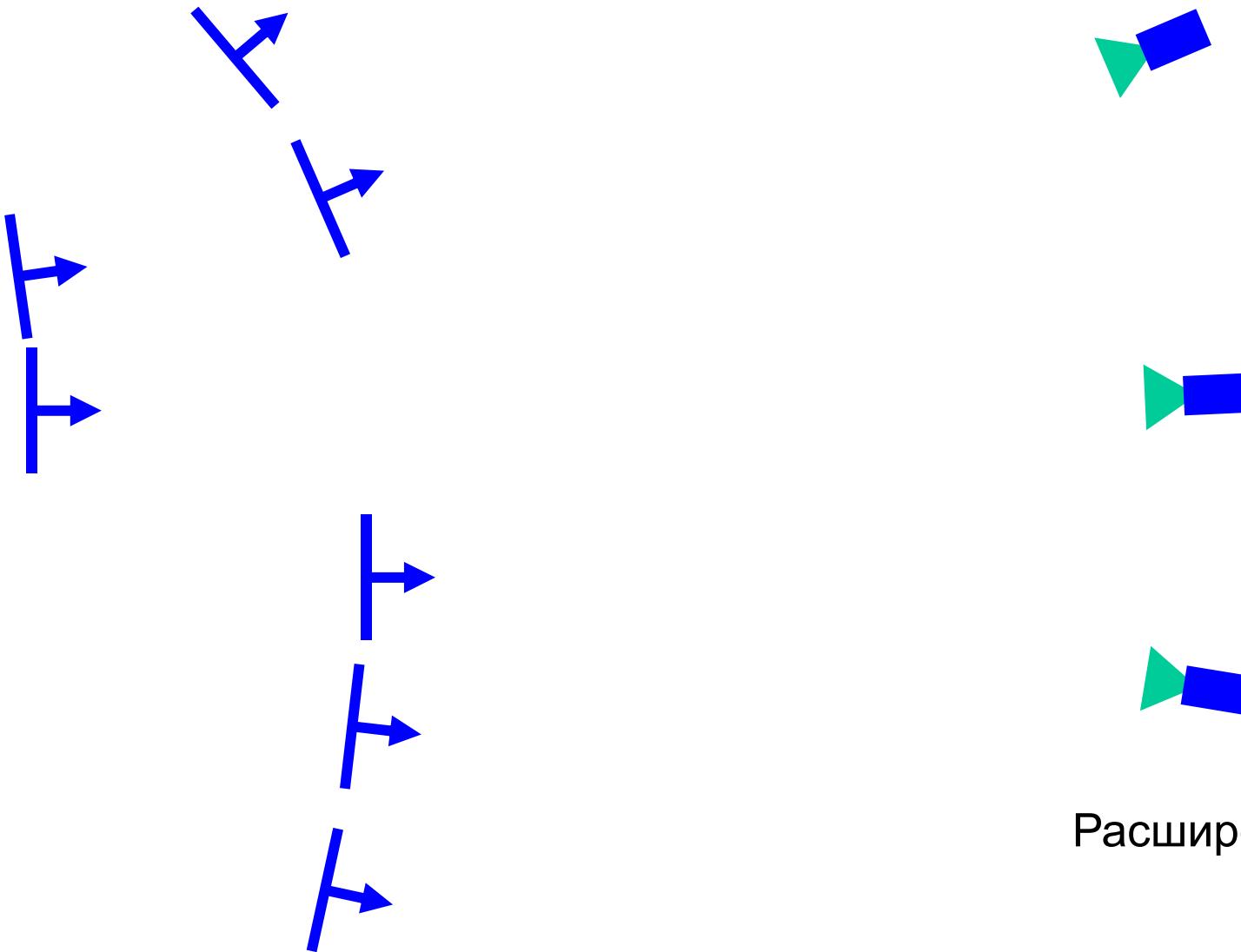
Резюме алгоритма



Сопоставление
особенностей



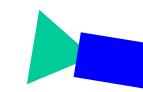
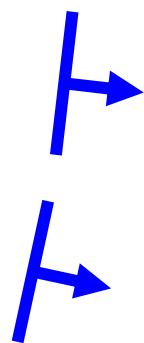
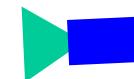
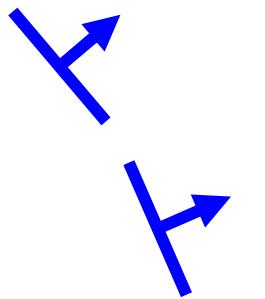
Резюме алгоритма



Расширение



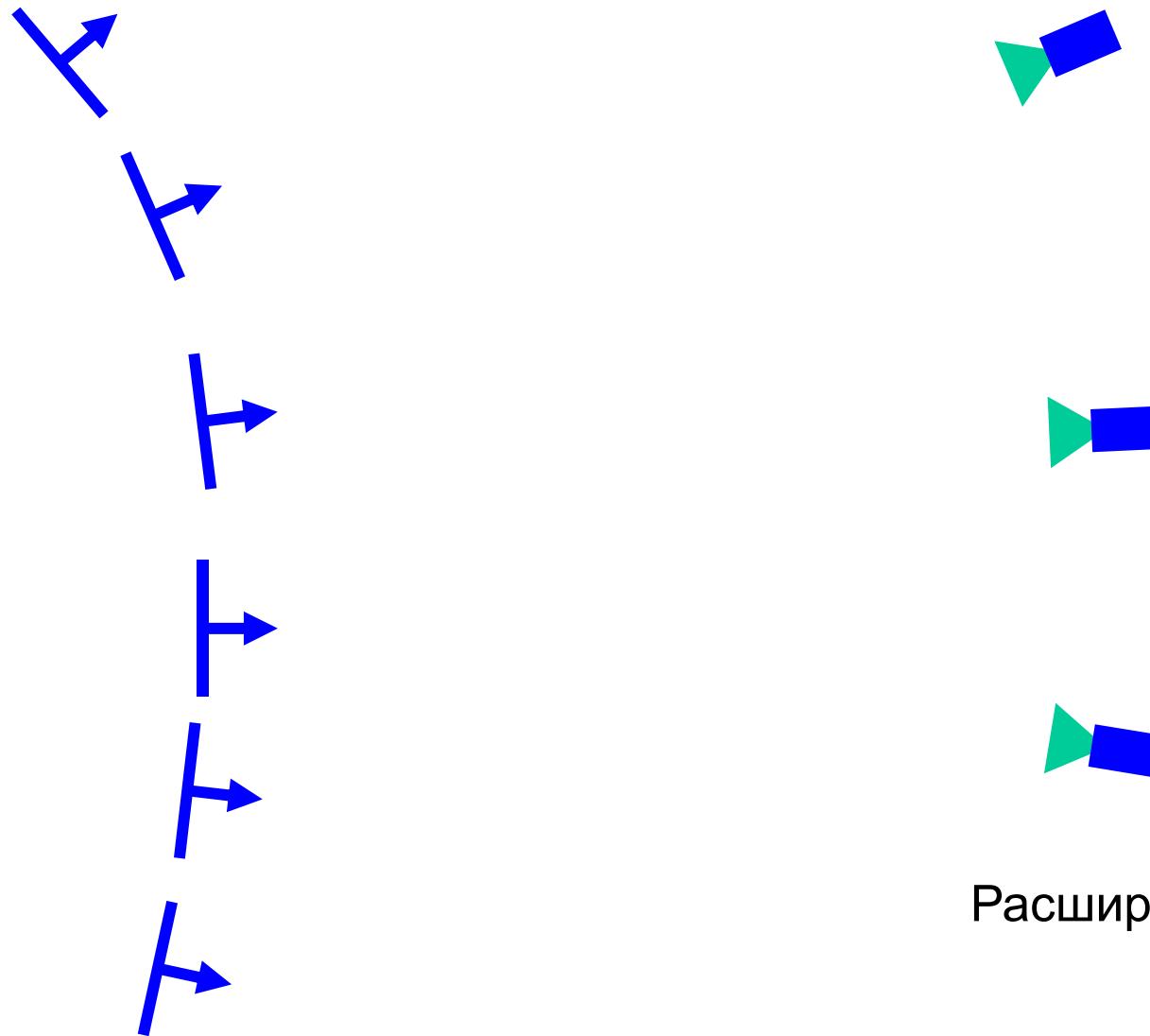
Резюме алгоритма



Фильтрация



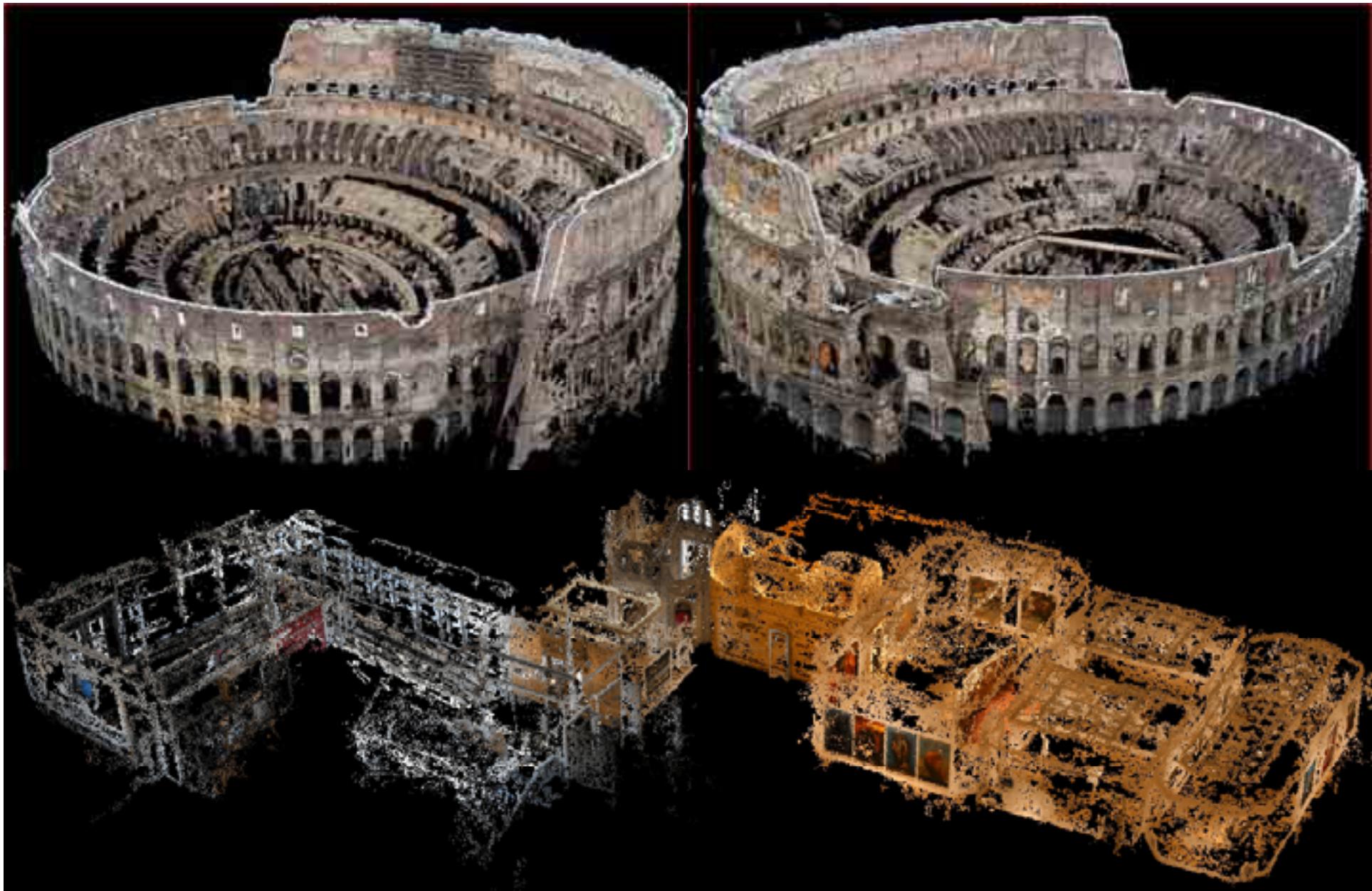
Резюме алгоритма





Примеры

Microsoft:
Research





Видео

Microsoft:
Research

Towards Internet-scale Multi-view Stereo

CVPR 2010

Yasutaka Furukawa¹ Brian Curless²

Steven M. Seitz^{1,2} Richard Szeliski³

Google Inc.¹
University of Washington²
Microsoft Research³



Развитие метода

- Архитектурные сцены состоят из плохо текстурированных плоскостей с большим количеством бликов
- Обычные методы на фрагментах работают плохо
- Но можно учесть дополнительные ограничения

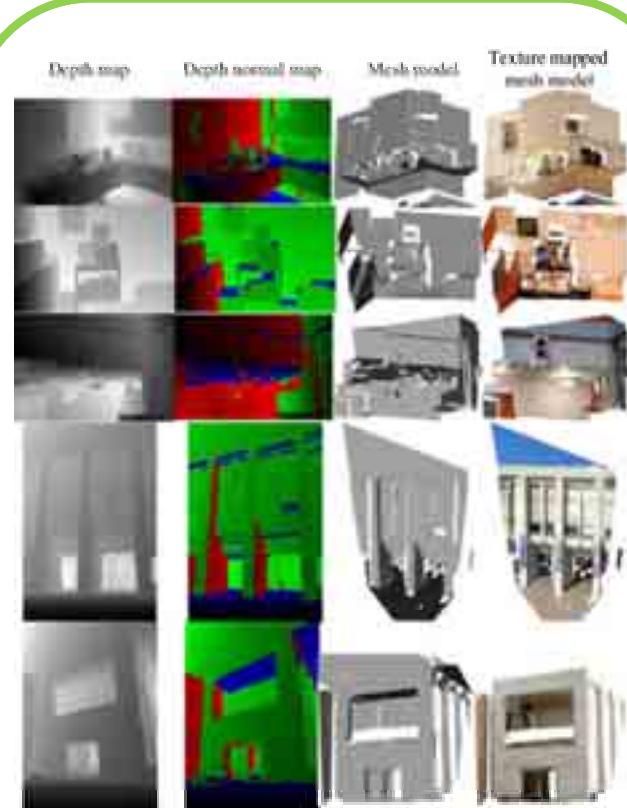




Примеры работ



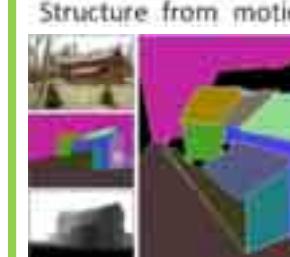
[Zebедин et al.,
ECCV 2008]



[Furukawa et al.,
CVPR 2009]



55 images
Multiple Plane Detection



Structure from motion



3D Line Reconstruction

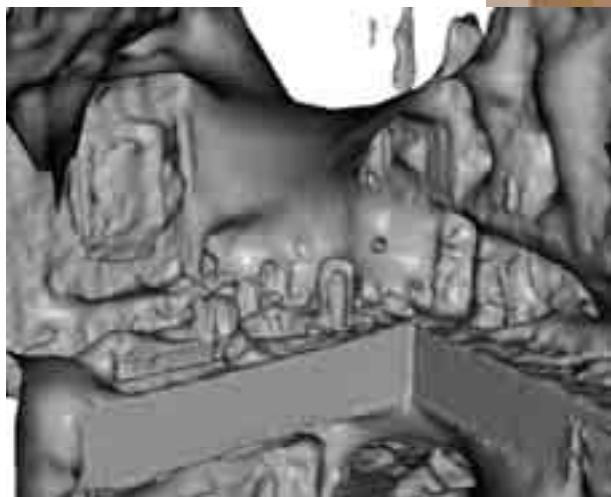


[Sinha et al.,
ICCV 2009]



Пример

Microsoft:
Research



Обычная поверхность
Простая интерполяция



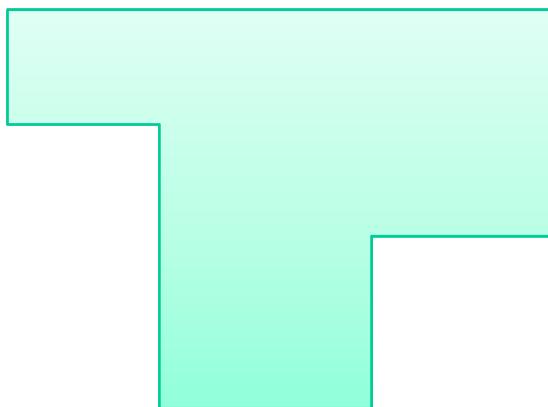
Набор плоскостей
Умная интерполяция



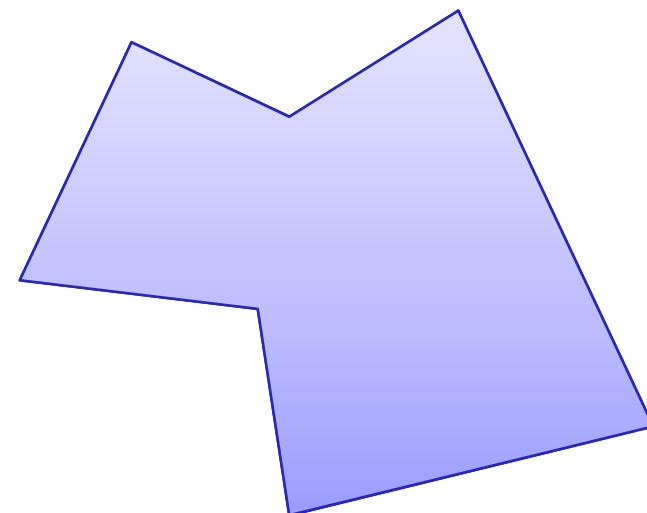
Manhattan-world Stereo

- Состоит ли сцена из набора выровненных по осям плоскостей?

Да

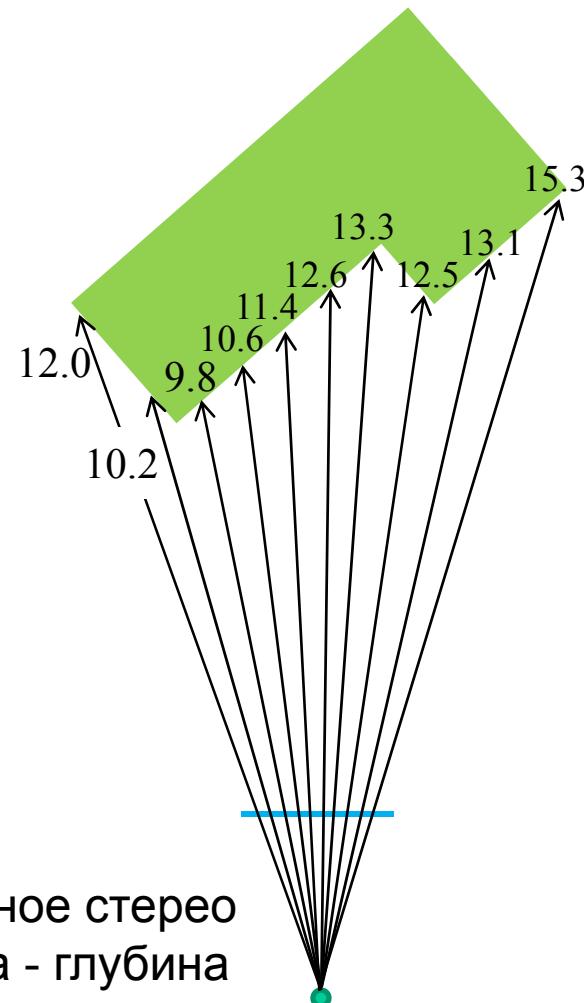


Нет

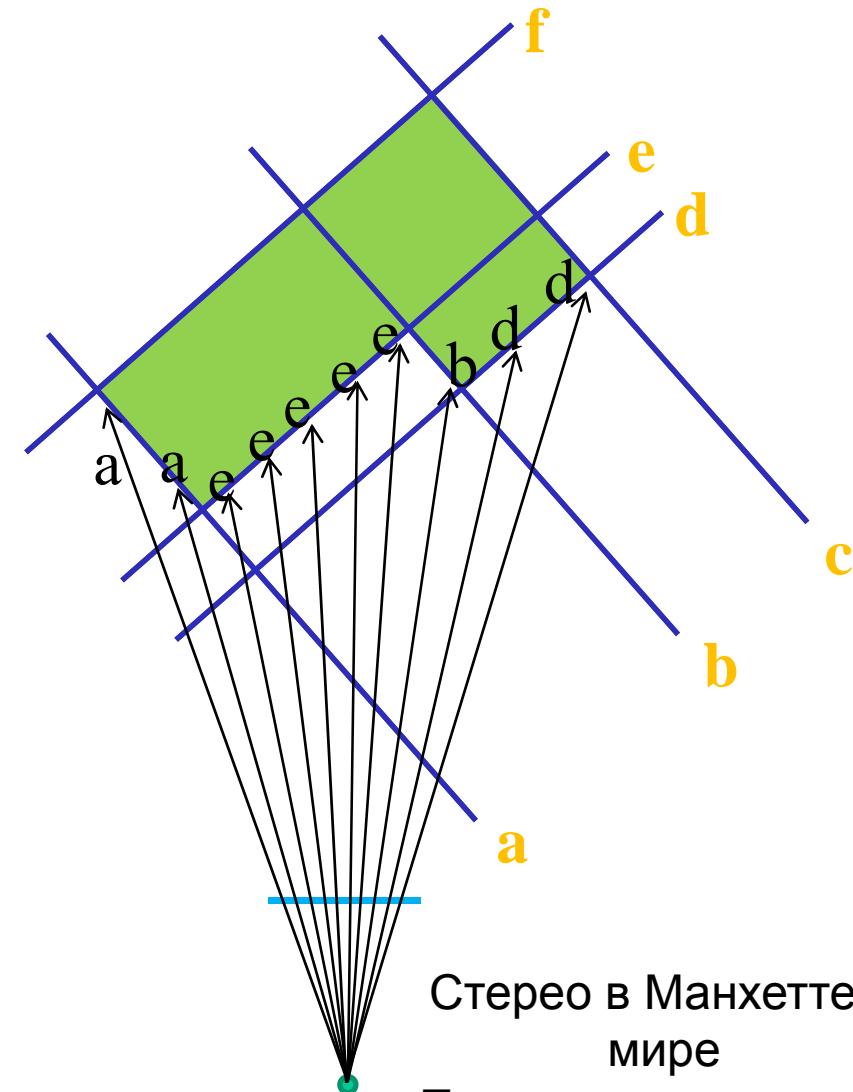




Manhattan-world Stereo



Обычное стерео
Метка - глубина



Стерео в Манхэттен-
мире
Плоскость на пиксель



Manhattan-world Stereo

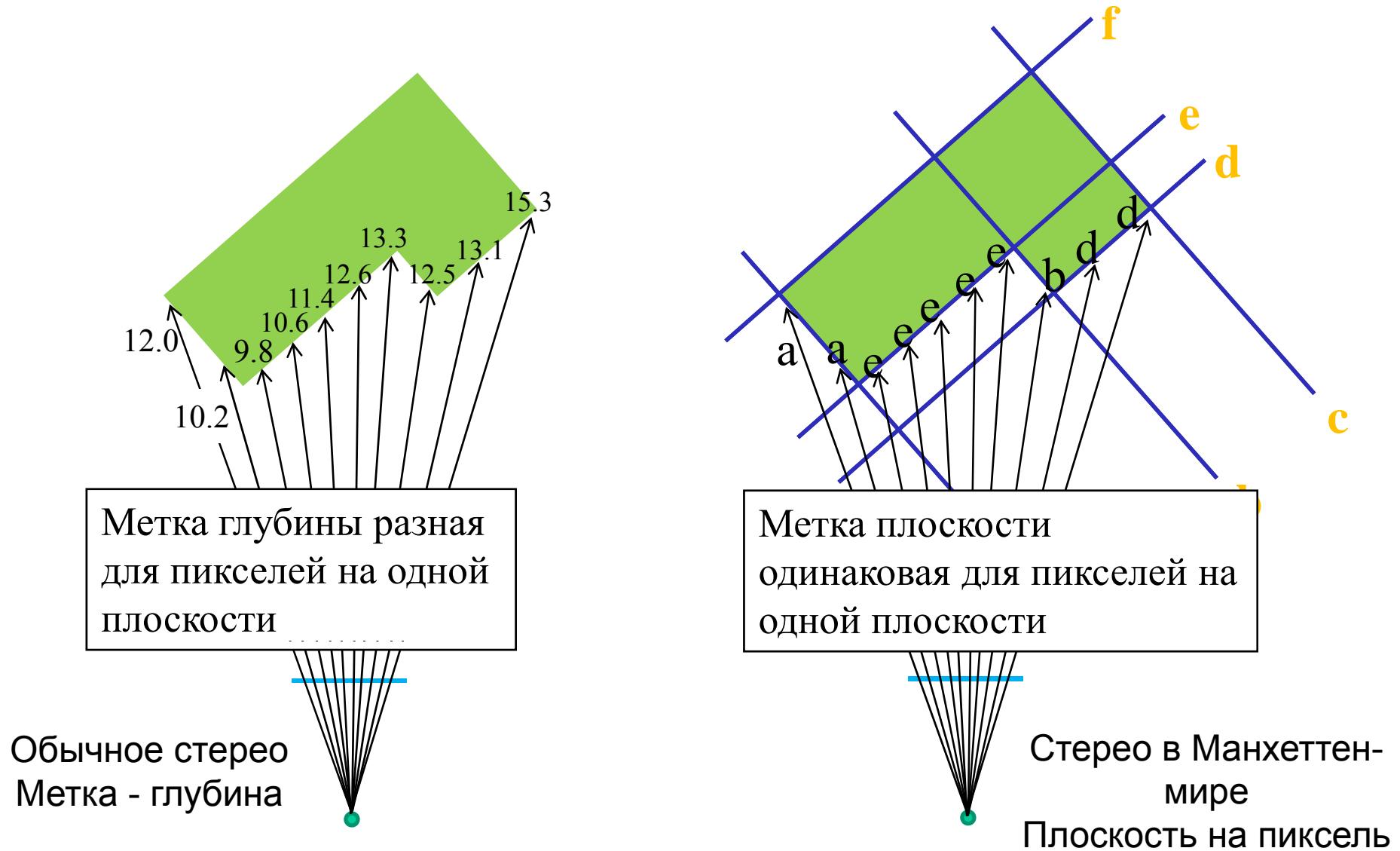
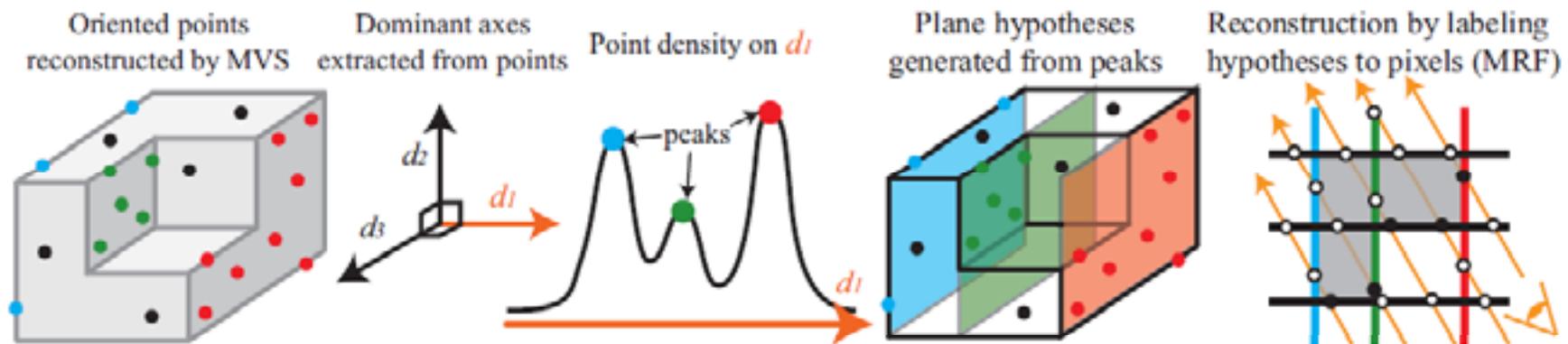




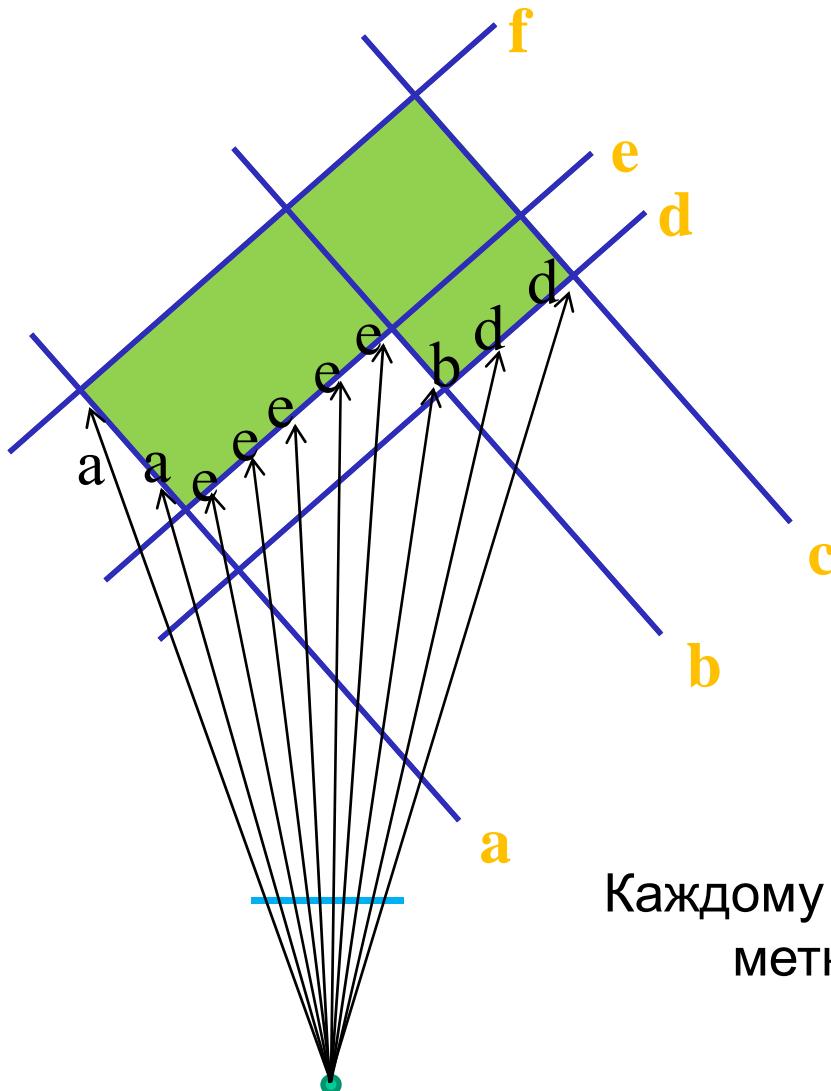
Схема метода

1. Реконструируем фрагменты
2. Извлекаем доминантные оси
3. Вычисляем гипотезы плоскостей
4. Вычисляем карту глубины (#плоскости)





Manhattan-world Stereo



Каждому пикселью назначим
метку - плоскость



Вычисление разметки через MRF

- Назначим метку плоскости h_p пикслю p .

$$h_p \leftarrow \{\text{plane_}1, \text{plane_}2, \text{plane_}3, \dots, \text{plane_}n\}$$

Минимизируем:

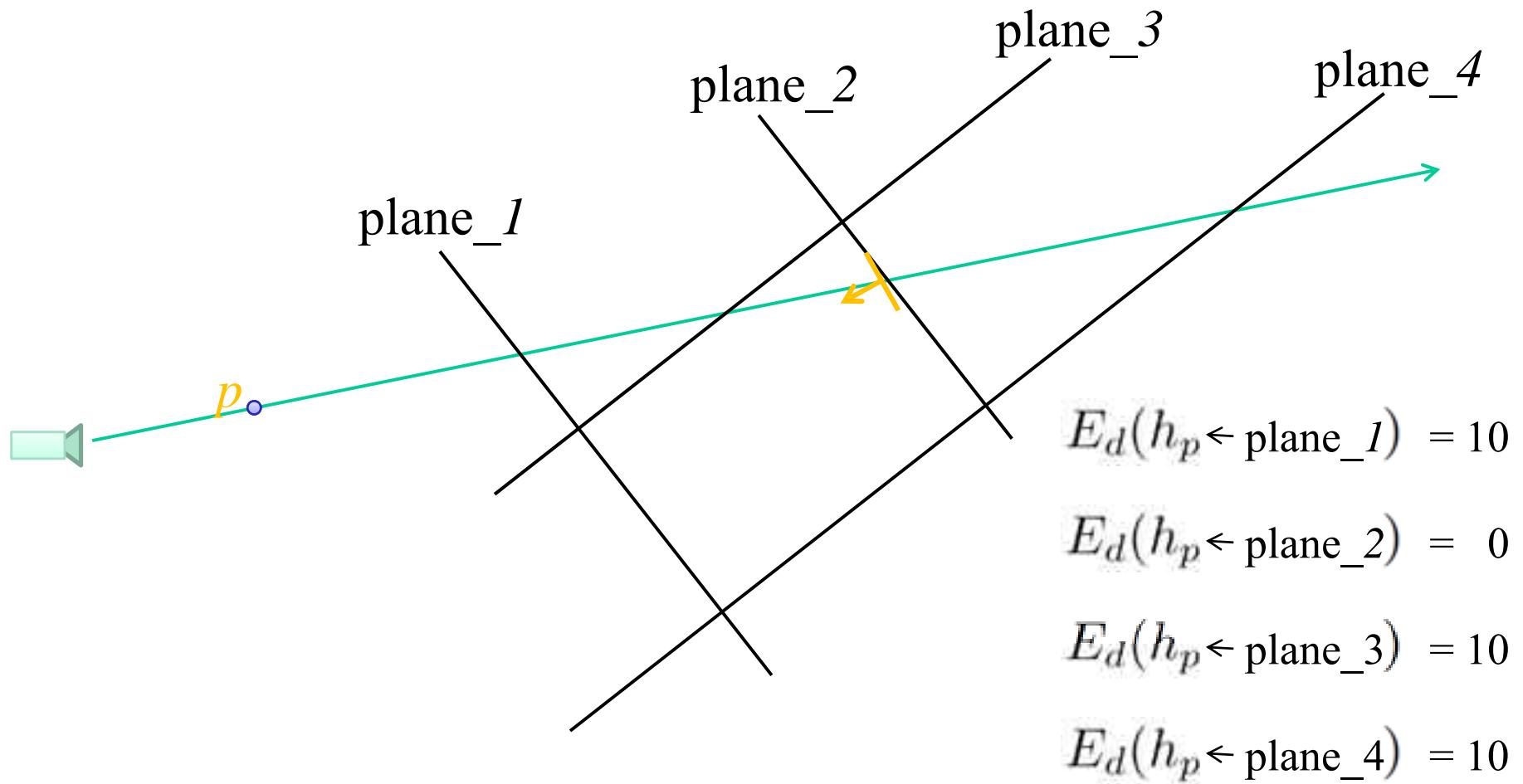
$$E = \sum_p E_d(h_p) + \lambda \sum_{\{p,q\} \in \mathcal{N}(p)} E_s(h_p, h_q)$$

Вес

Соседние пиксели

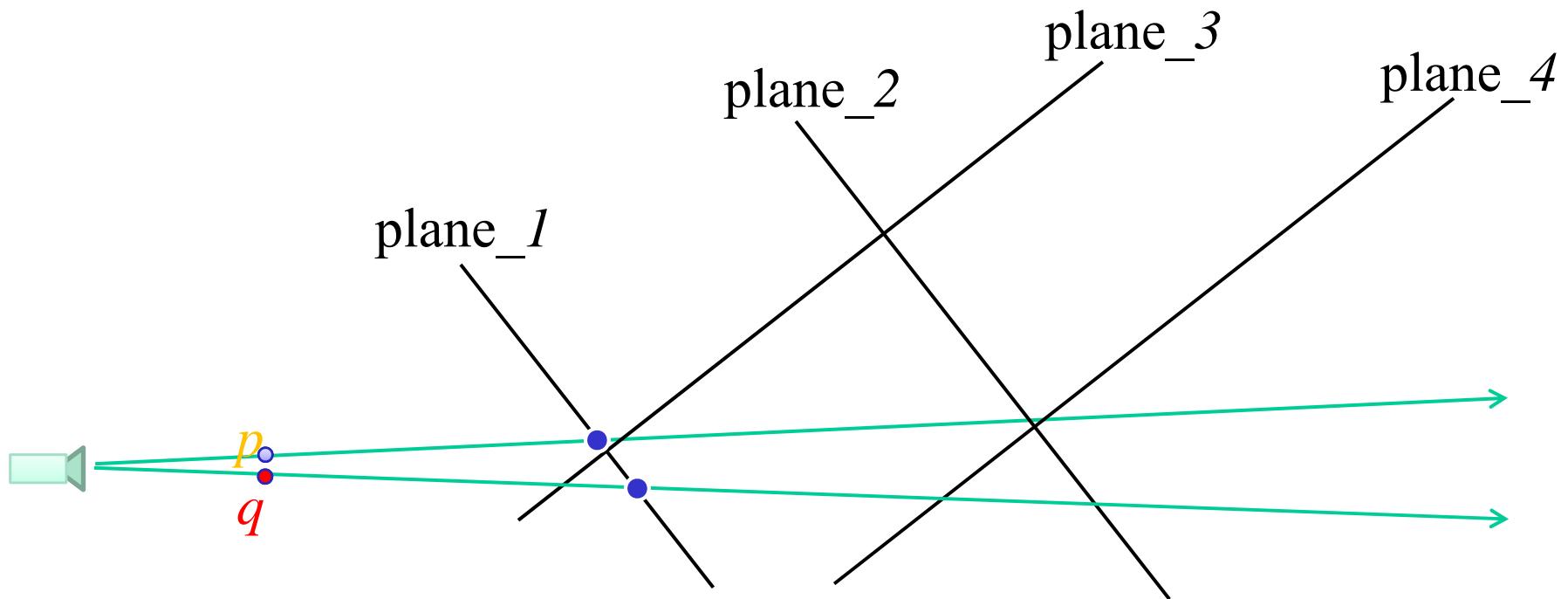


Унарный потенциал $E_d(h_p)$





Парный потенциал $E_s(h_p, h_q)$

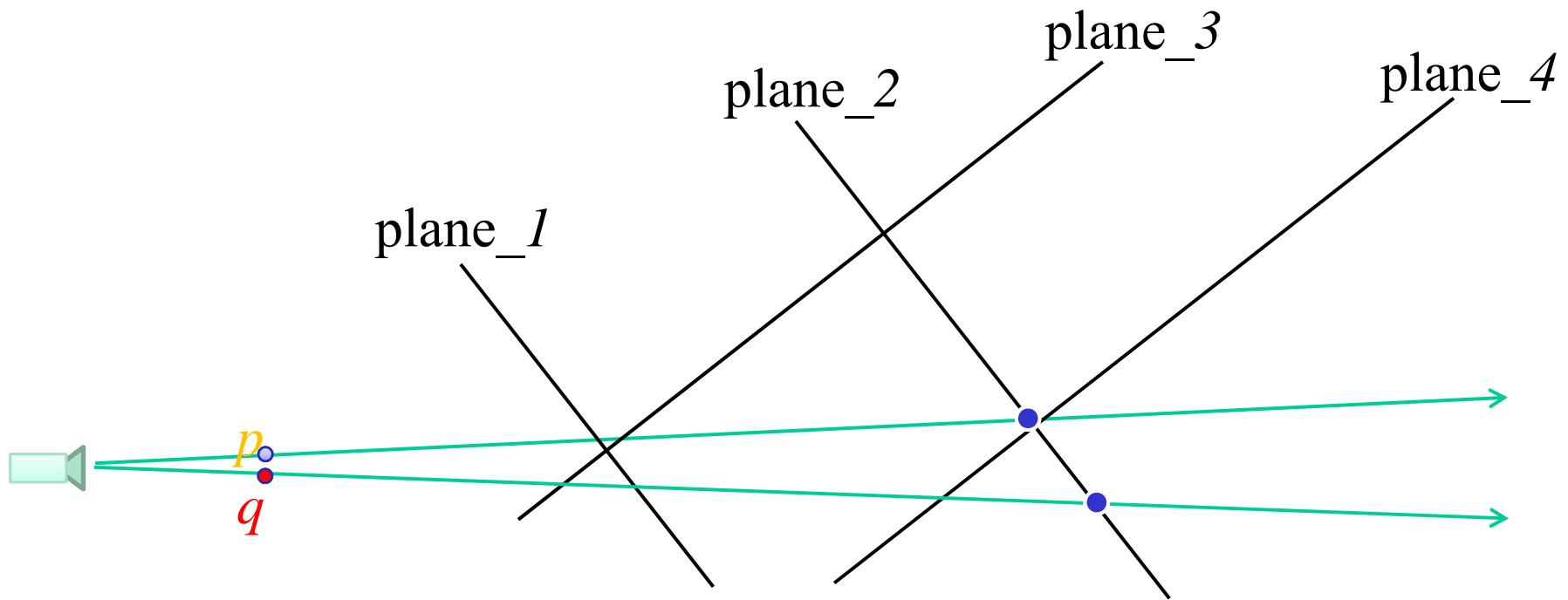


$$E_s(h_p \leftarrow \text{plane_1}, h_q \leftarrow \text{plane_1}) = 0$$

Разница по глубине



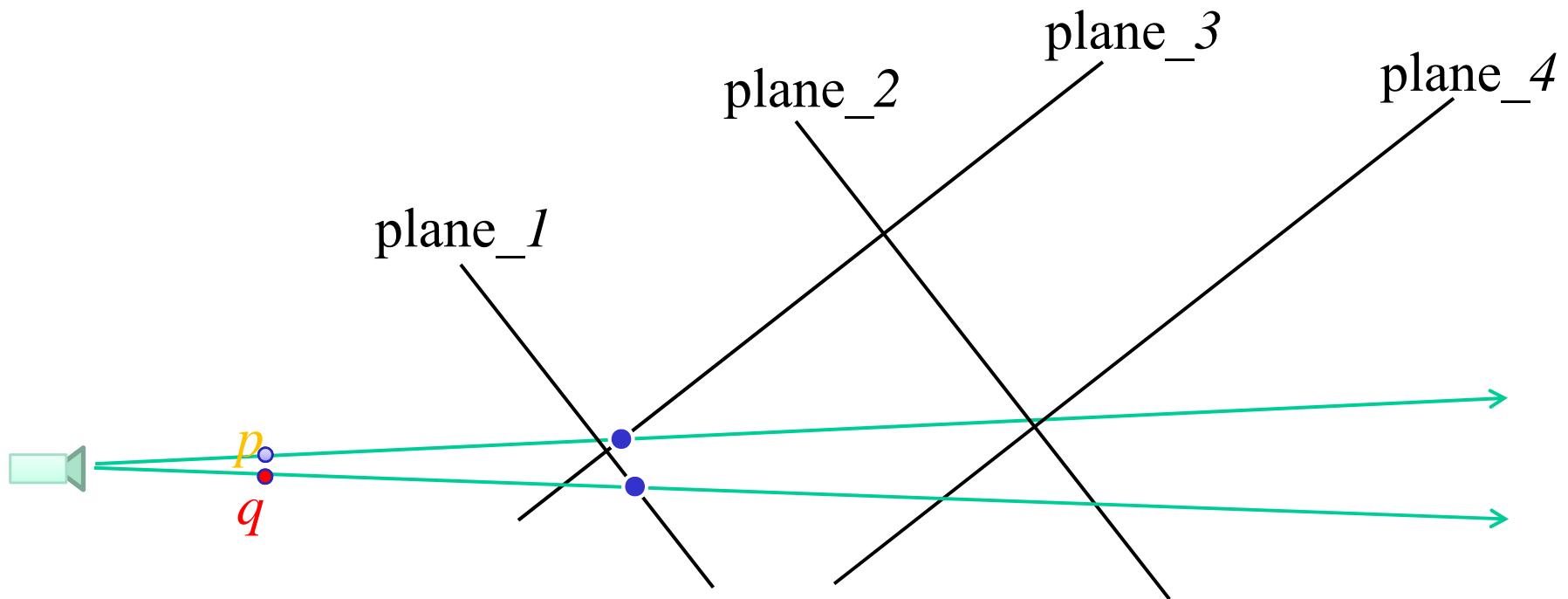
Парный потенциал $E_s(h_p, h_q)$



$$E_s(h_p \leftarrow \text{plane_2}, h_q \leftarrow \text{plane_2}) = 0$$



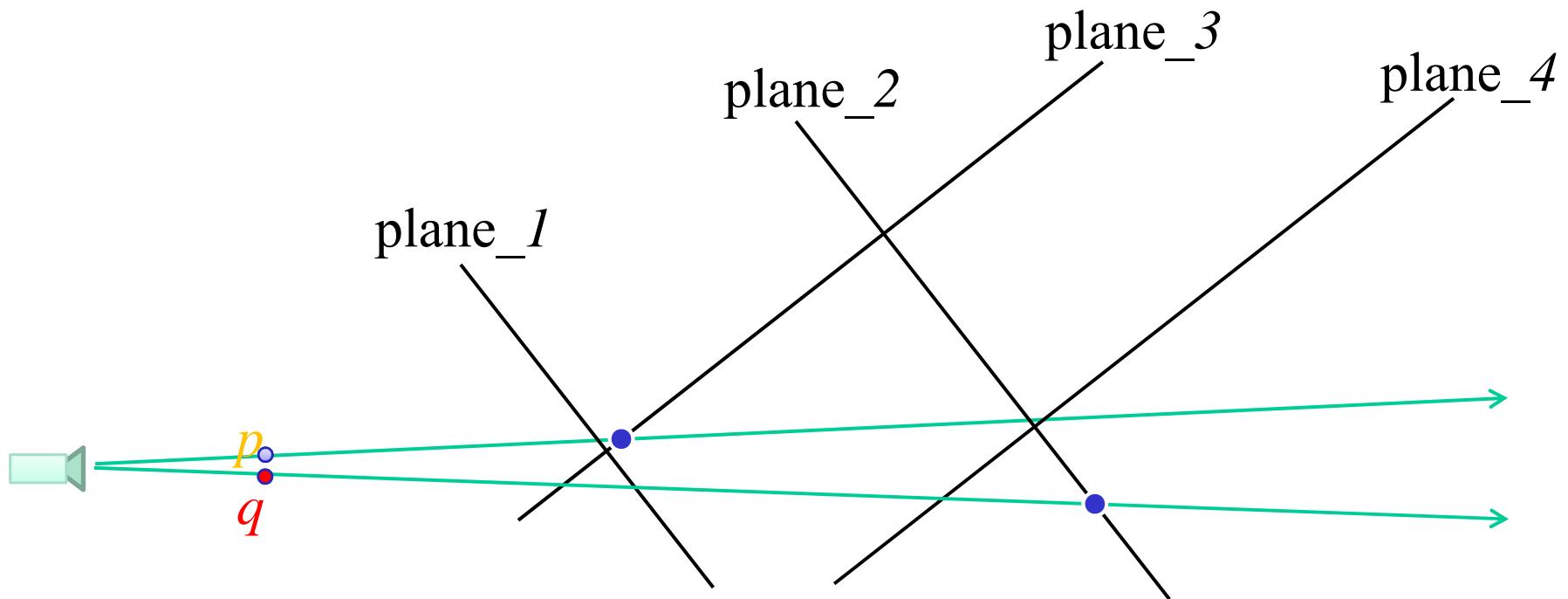
Парный потенциал $E_s(h_p, h_q)$



$$E_s(h_p \leftarrow \text{plane_3}, h_q \leftarrow \text{plane_1}) = 2$$



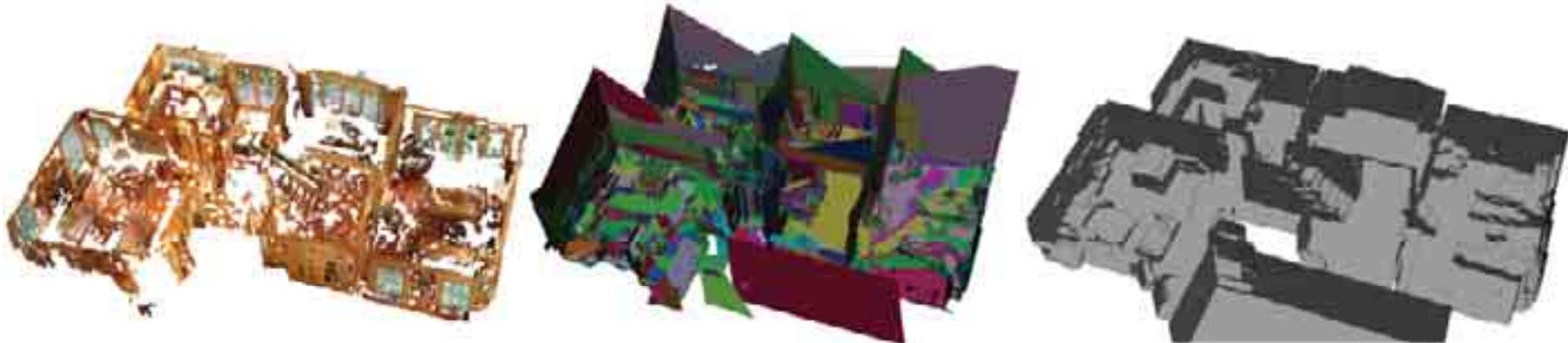
Парный потенциал $E_s(h_p, h_q)$



$$E_s(h_p \leftarrow \text{plane_3}, h_q \leftarrow \text{plane_2}) = 18$$



Результат



- Смотрим видео

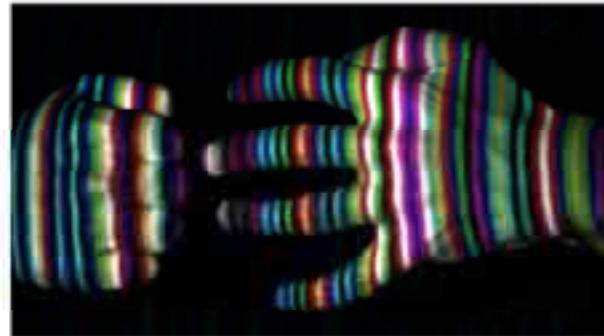


План лекции

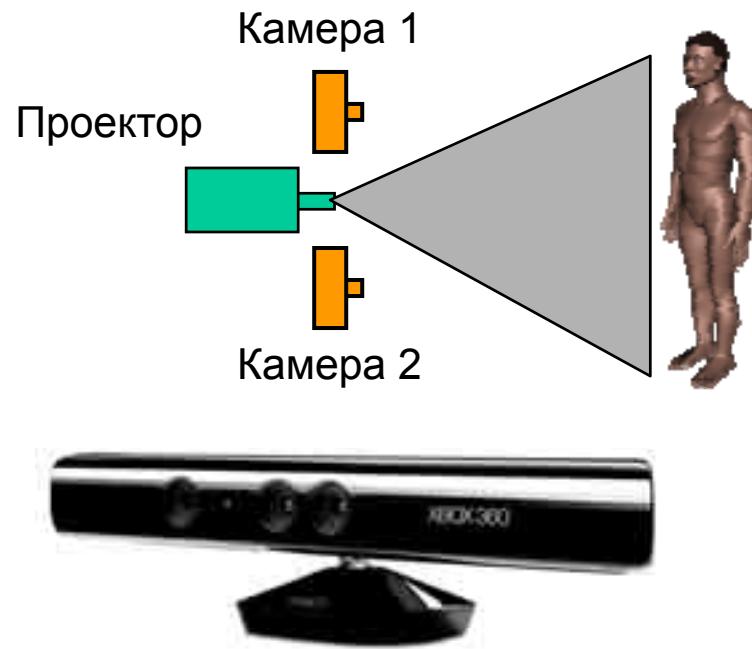
- Введение
- Многовидовое пассивное стерео
 - Воксельные подходы
 - Подход на основе объединения сеток
 - Разрастание регионов
- Активное стерео
- Приложение: реконструкция головы человека



Активное стерео

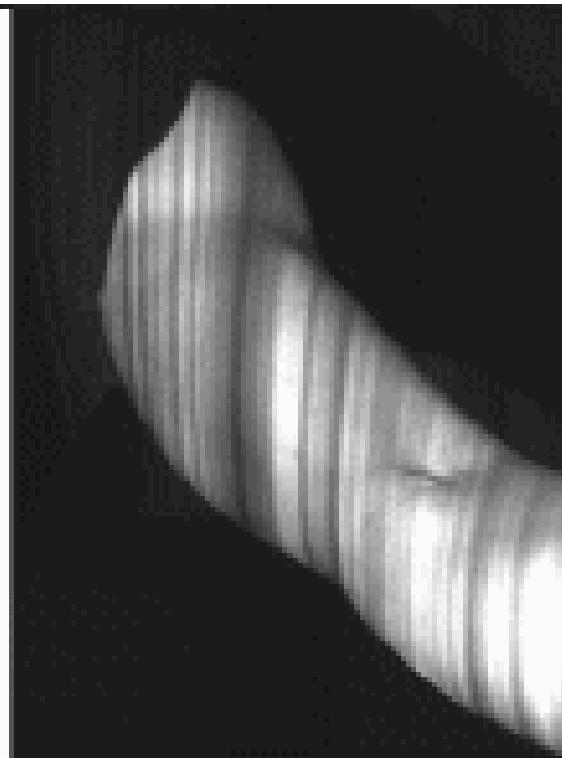
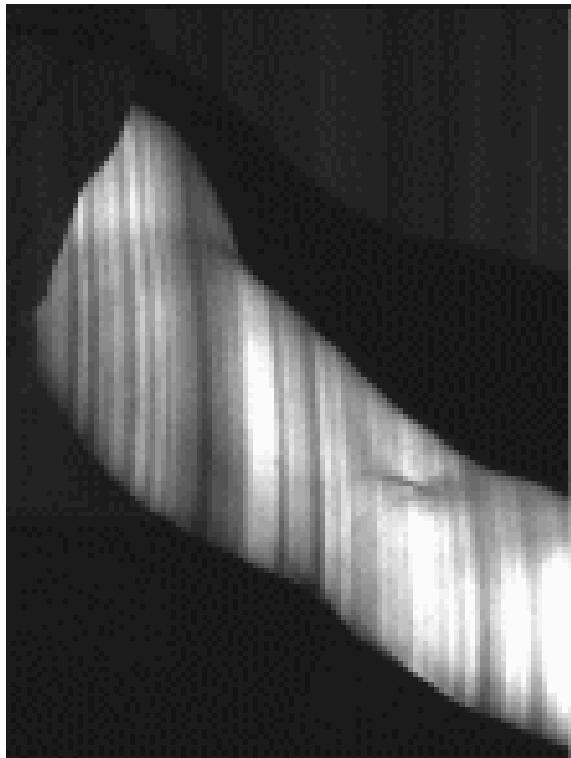


- Проецируем специальный «шаблон» на объект («структуренный свет»)
- Шаблон даёт «текстуру» по всей поверхности объекта
- Решаем задачу стерео либо по 2м камерам, либо с калиброванным проектором
- Подсветка может быть в видимом диапазоне, а может быть ИК (“Kinect”)

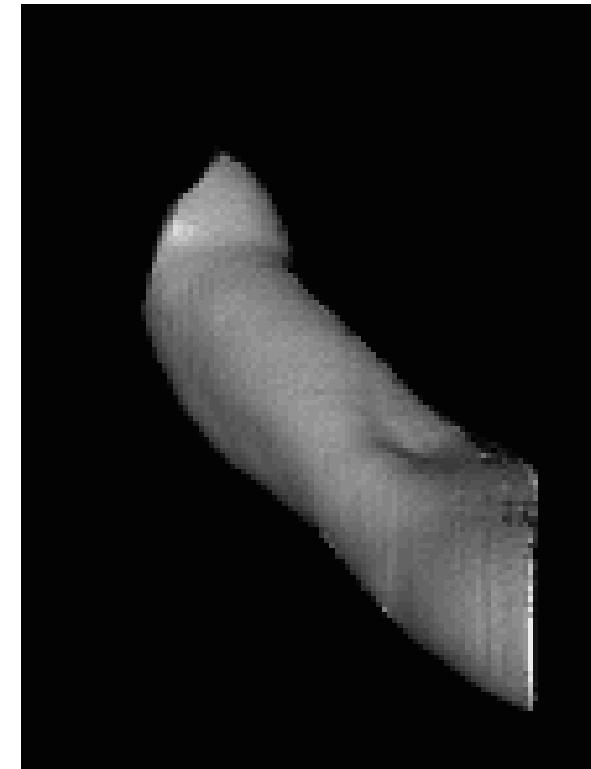




Пример реконструкции



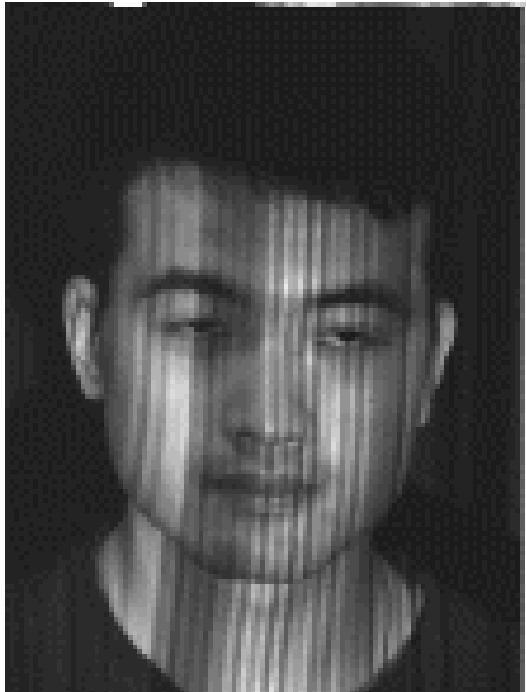
Исходные видео-потоки



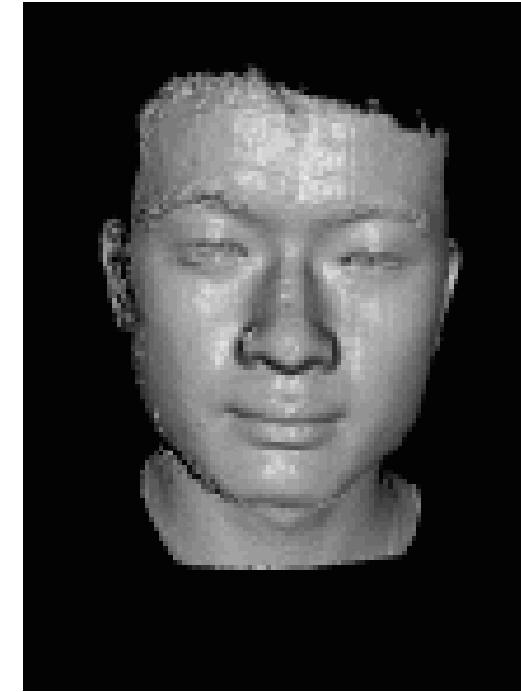
Реконструкция



Пример реконструкции



Исходные видео-потоки



Реконструкция



Kinect

Microsoft:
Research





Лазерные сканеры

Достоинства:

- Непосредственное измерение 3D модели
- Высокая точность/надежность

Недостатки:

- Измеряют только форму объекта без цвета
- Скорость работы ниже, чем у фотографирования

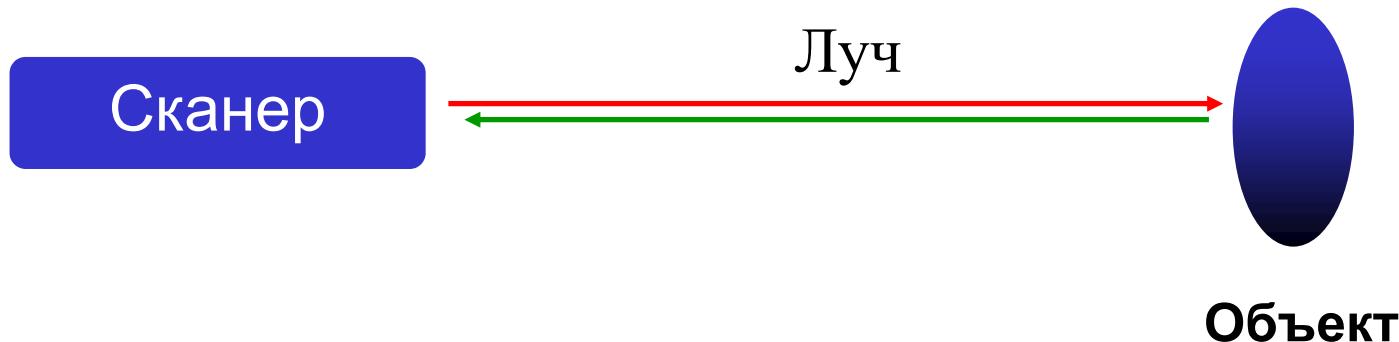
Сейчас:

- Дополняют фотокамерой, потом совмещают изображения и облака точек
- Скорость сканирования в дорогих моделях очень высокая





Как устроен сканер ?



- Измерение времени отражения лазерного луча t
- Вычисление расстояния:

$$D = V \cdot t$$

V – скорость света

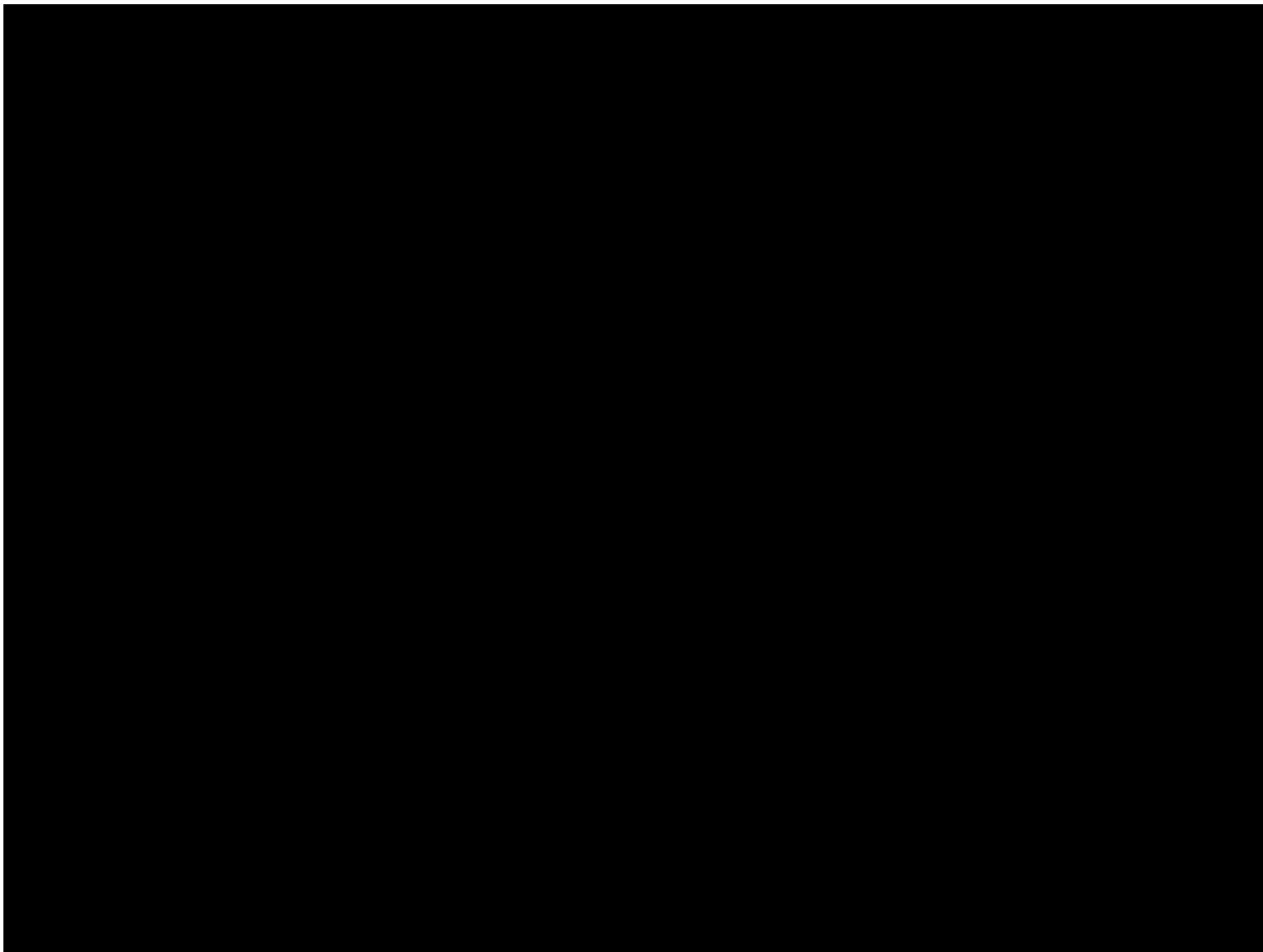
D – расстояние от сканера до объекта

- Иногда бывают множественные отклики от нескольких объектов от одного луча



Пример работы

Microsoft:
Research





План лекции

- Введение
- Многовидовое пассивное стерео
 - Воксельные подходы
 - Подход на основе объединения сеток
 - Разрастание регионов
- Активное стерео
- Приложение: реконструкция головы человека



3Д захват лица



- Пассивная многокамерная система (14 камер)

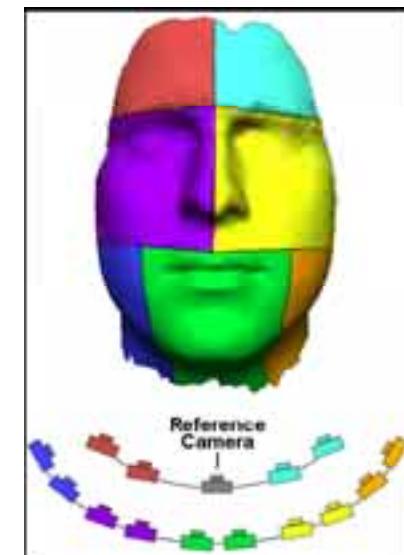
D. Bradley, W. Heidrich, T. Popa, A. Sheffer [High Resolution Passive Facial Performance Capture](#), SIGGRAPH 2010



Устройство системы



- 7 стереопар высокого разрешения Sony HDR-SR7
- Система подсветки на основе LED
- Каждая стереопара видит свою зону на лице





Разрешение изображений

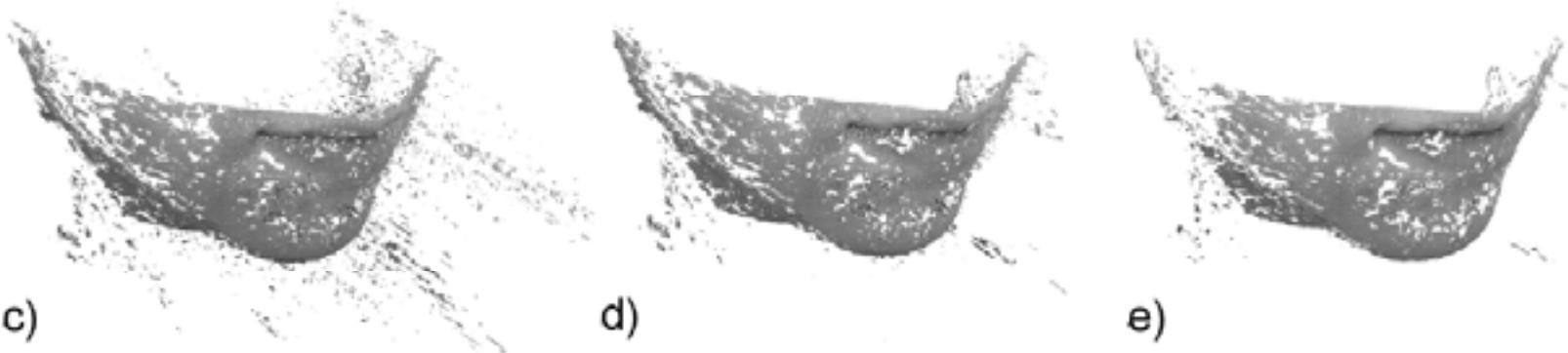


- При таком высоком разрешении и равномерной подсветке поры на коже дают достаточно текстуры для вычисления пассивного стерео

BRADLEY, D., BOUBEKEUR, T., AND HEIDRICH, W. Accurate multi-view reconstruction using robust binocular stereo and surface meshing. CVPR. 2008.



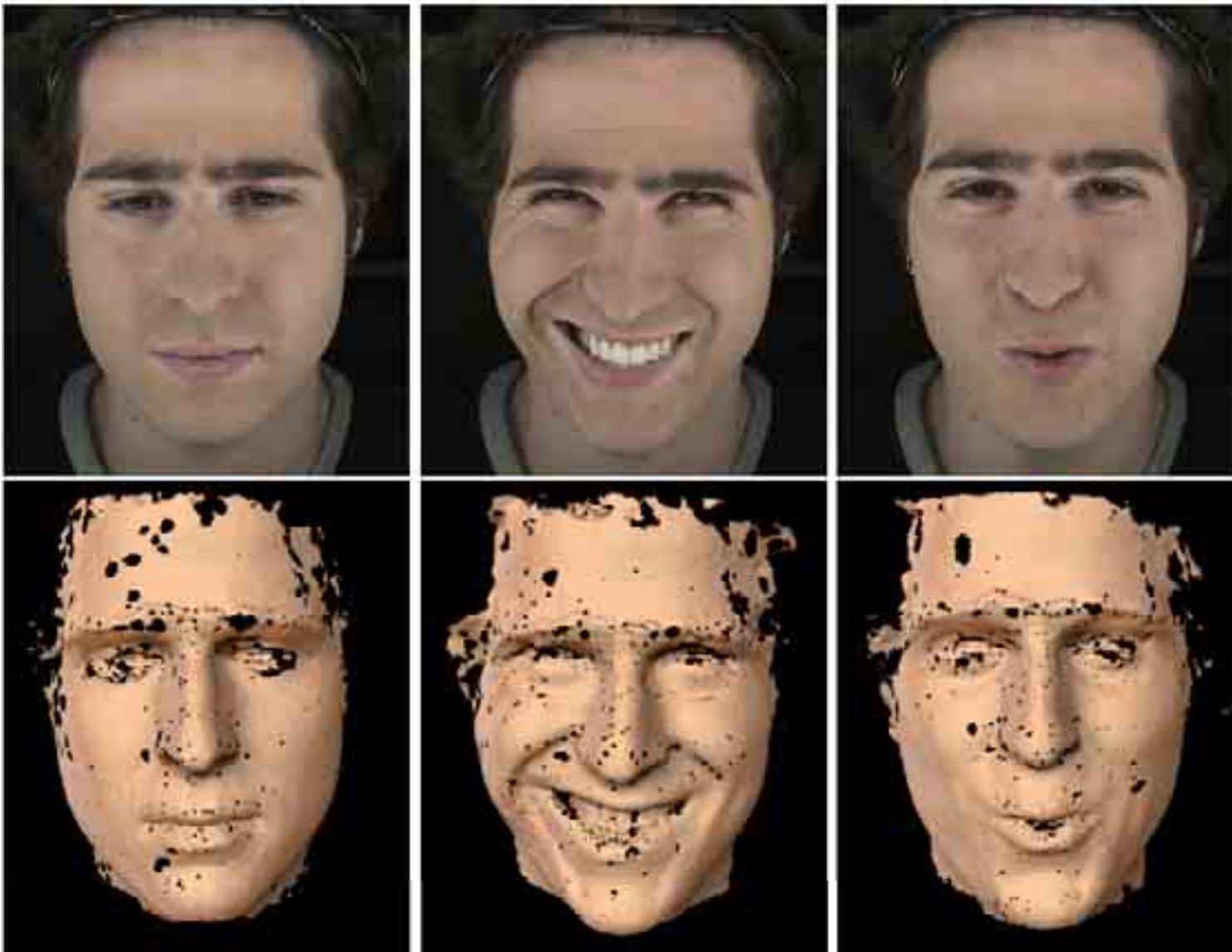
Пассивное стерео и обработка



- Каждая стереопара даёт карту глубины и облако точек (шумное)
- Итеративное сглаживание и вычисление порогов для отброса шумов



Результат по 1 кадру





Отслеживание

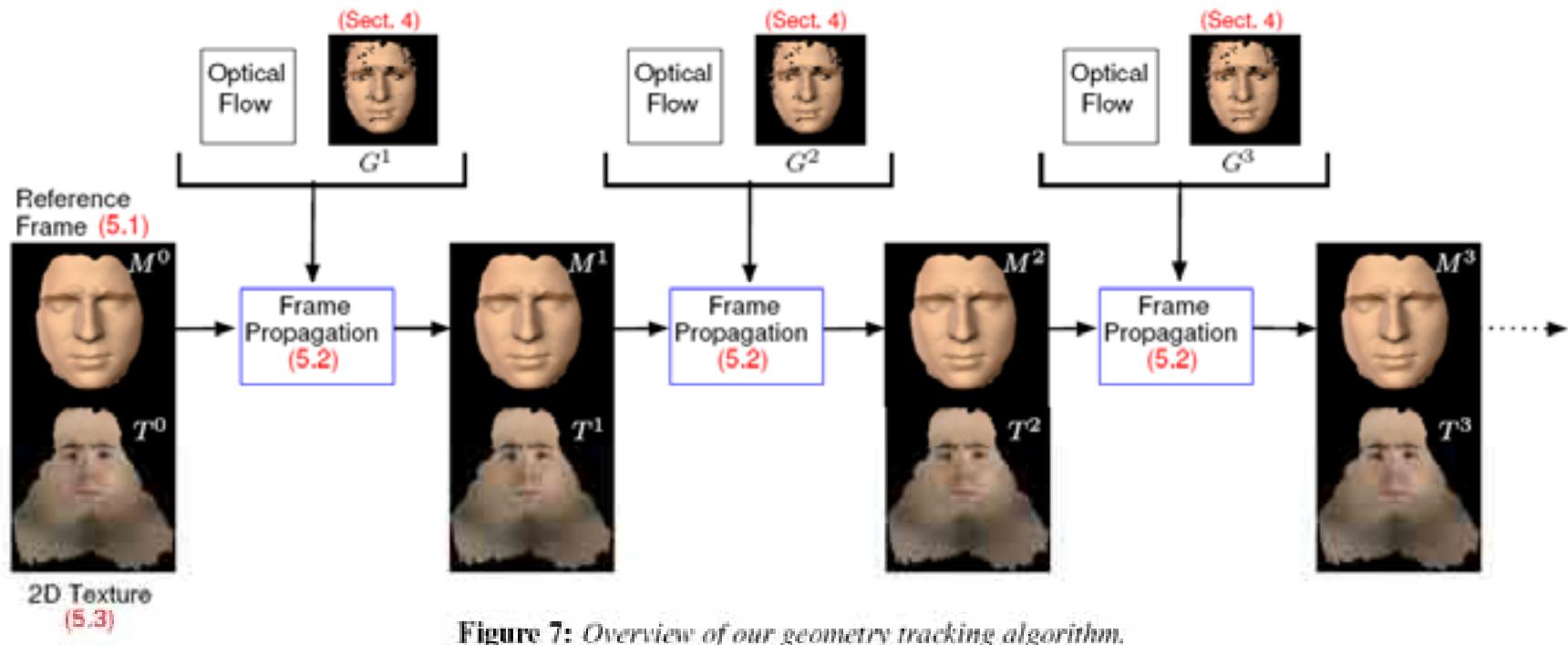


Figure 7: Overview of our geometry tracking algorithm.

- Выбирают базовую модель и прослеживают её на протяжении всего видео



Текстурирование



- Участки текстуры копируются со своих камер
- Поскольку камеры без цветовой калибровки, при прямом копировании текстуры видны резкие цветовые переходы (артефакты)
- Для обработки используется композиция по Пуассону



Результат

Microsoft:
Research

Results



Моментальное 3Д

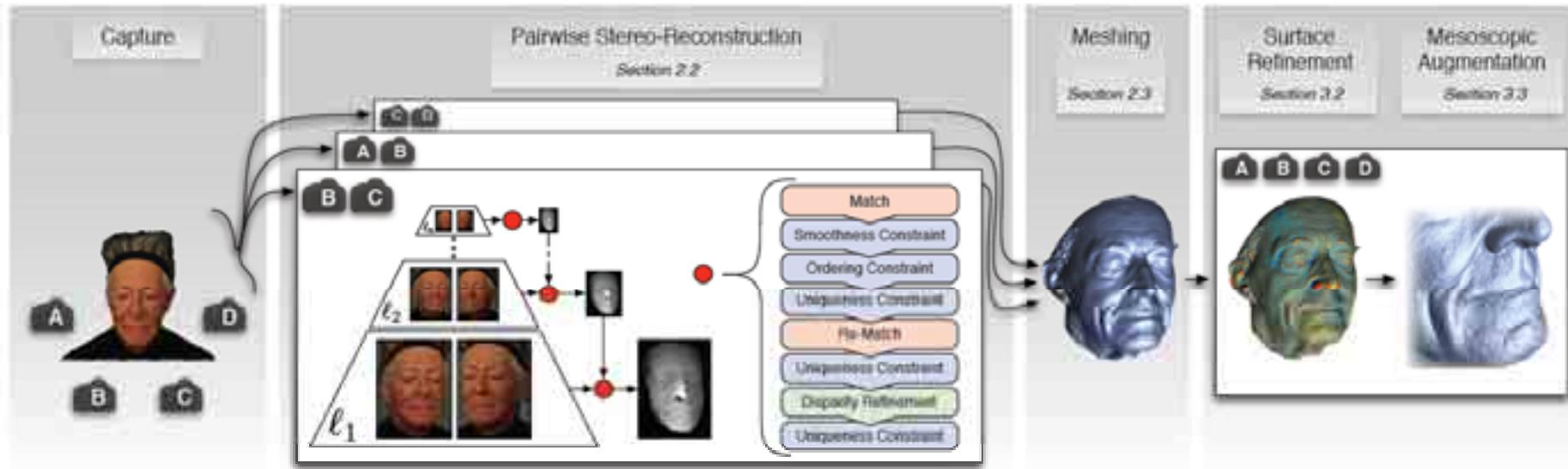


- Построение высокодетализированной 3Д модели лица человека
- От одной стереокамеры до нескольких стереокамер

T. Beeler, B. Bickel, P. Beardsley, R. Sumner, M. Gross [High-Quality Single-Shot Capture of Facial Geometry](#), SIGGRAPH 2010



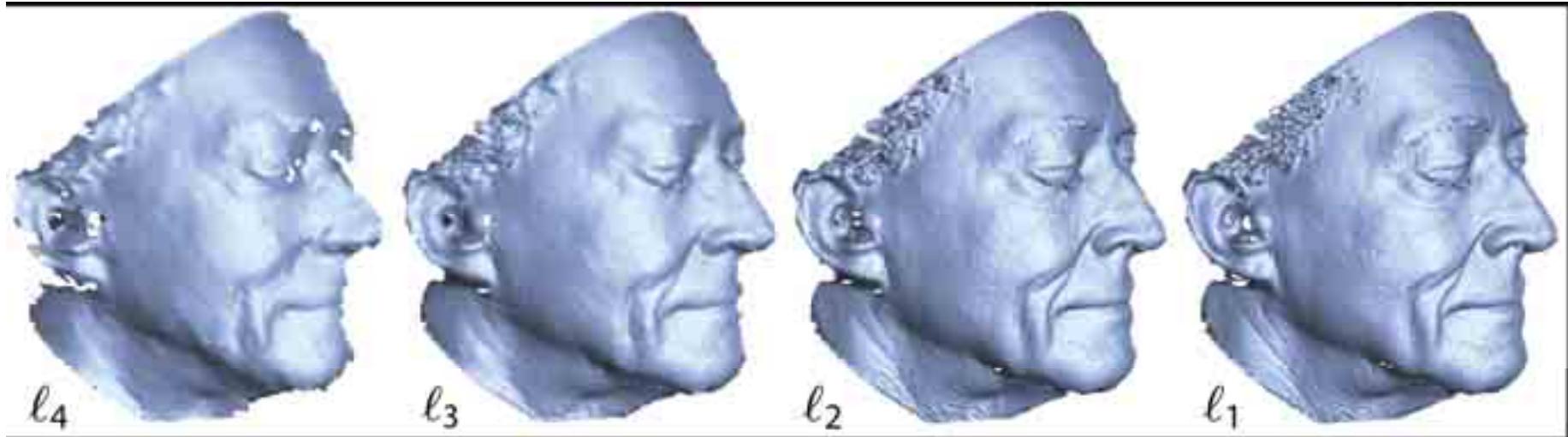
Схема системы



- Иерархическое стереосопоставление с итеративным уточнением
 - От разрешения 160*160 до 1280*1280
 - Локальные методы - без использования глобальной оптимизации, сегментации и т.д.



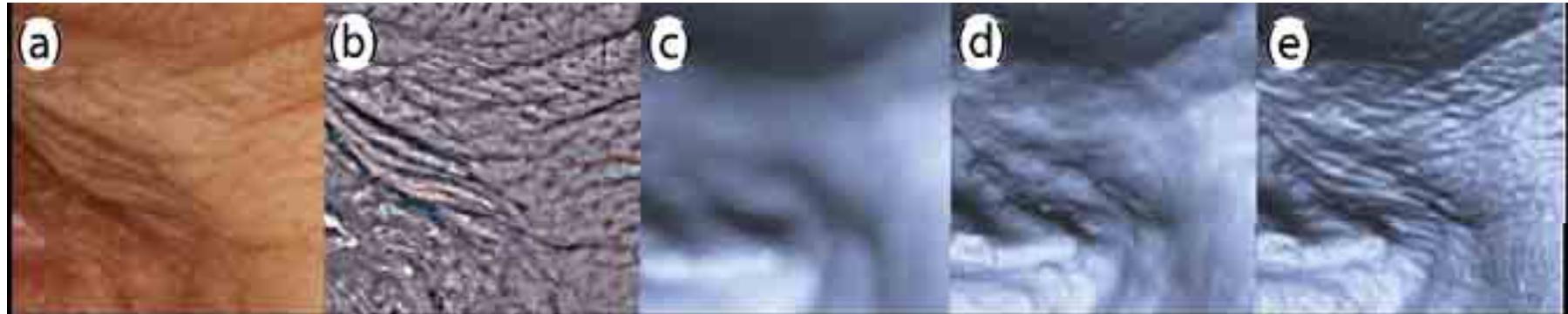
Результат стерео



- Последовательное уточнение геометрии модели
- Субпиксельное уточнение диспаритета



Mesoscopic Augmentation



- Вычисляем высокочастотную составляющую изображения
- Высокие частоты соответствуют мелким деталям на коже человека
- «Искажаем» геометрию согласно специальной формуле



Результат

Results



Применение в жизни





Резюме

- Методы 3Д реконструкции на основе активного стерео уже давно вошли в коммерческое использование
- Появление дешевых активных сенсоров (Kinect) открывает возможности по массовому их внедрению
- Методы на основе пассивного стерео по качеству начали приближаться к методам активного стерео и тоже начинают находить практическое применение