

Восстановление трехмерных моделей по изображениям

Виктор Ерухимов, Itseez3D



Восстановление трехмерных моделей

- Вход: изображения (RGBD, IMU) статической сцены
- Выход: одна или несколько моделей, каждая из которых представлена сеткой (набор треугольников) и (опционально) текстурой

Робототехника



Boston Dynamics, Spot Launch, <https://www.youtube.com/watch?v=wlkCQXHEgjA>

Autonomous drones

Tightly-Coupled Monocular Visual-Inertial Fusion for Autonomous Flight of Rotorcraft MAVs

Shaojie Shen, Nathan Michael, and Vijay Kumar



Дополненная реальность



Сканирование зубов

zshape 

Производство кино



Создание цифровых людей



Фотограмметрия



Image credit: James Busby, Ten 24 Media, <https://80.lv/articles/photogrammetry-how-does-it-help/>

Фотограмметрия



Основные этапы создания 3D моделей

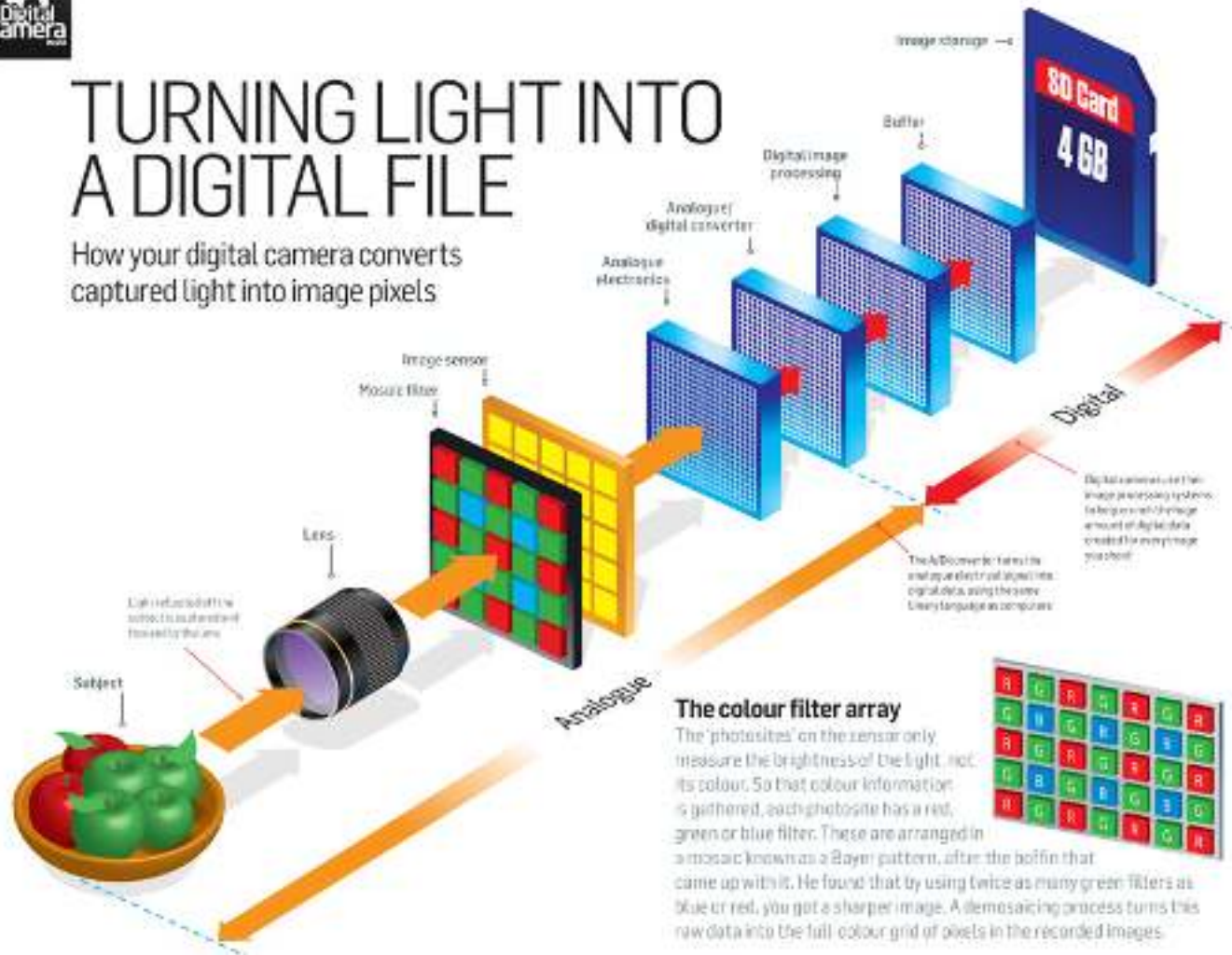
- Вычисление положения камер и координат трехмерных точек
- Построение поверхности
- Текстурирование

Камера

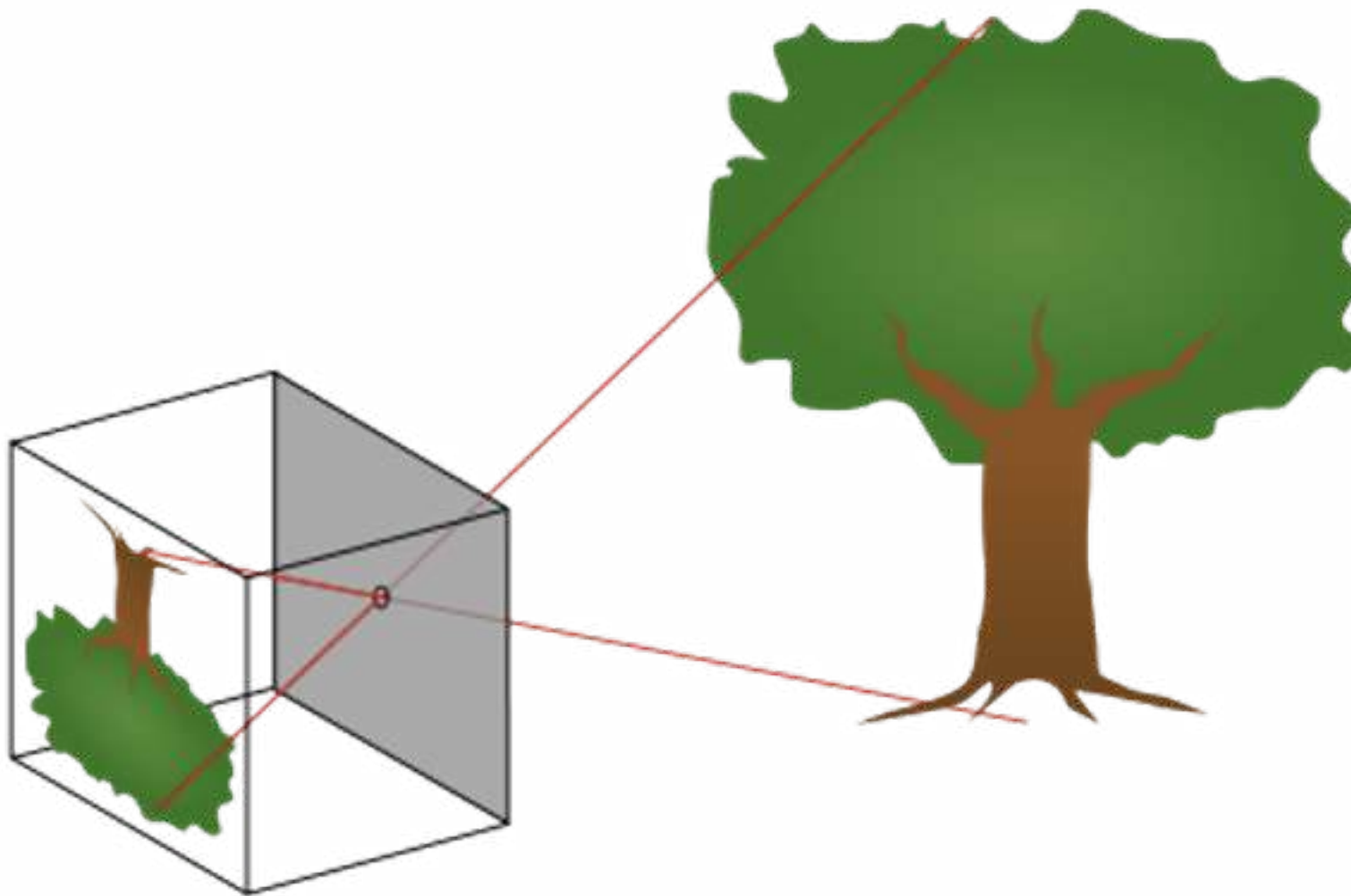


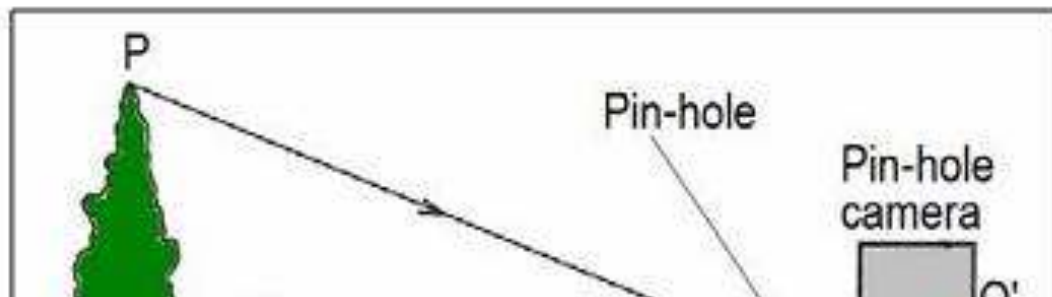
TURNING LIGHT INTO A DIGITAL FILE

How your digital camera converts captured light into image pixels



Камера-обскура (pinhole camera)

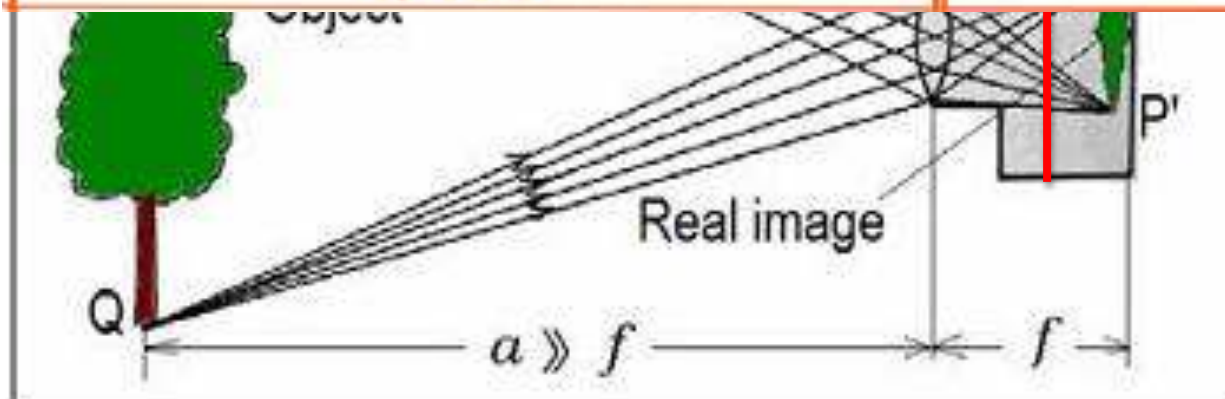




$f/1.8$



$f/22$



Проекция камеры-обскуры

- Прямые линии проектируются в прямые линии
- Параллельные прямые проектируются в пересекающиеся

Проекция до эпохи Возрождения



Дуччо ди Буонинсенья
«Благовещение»
1308-1311

Возникновение проективной геометрии (начало эпохи Возрождения)

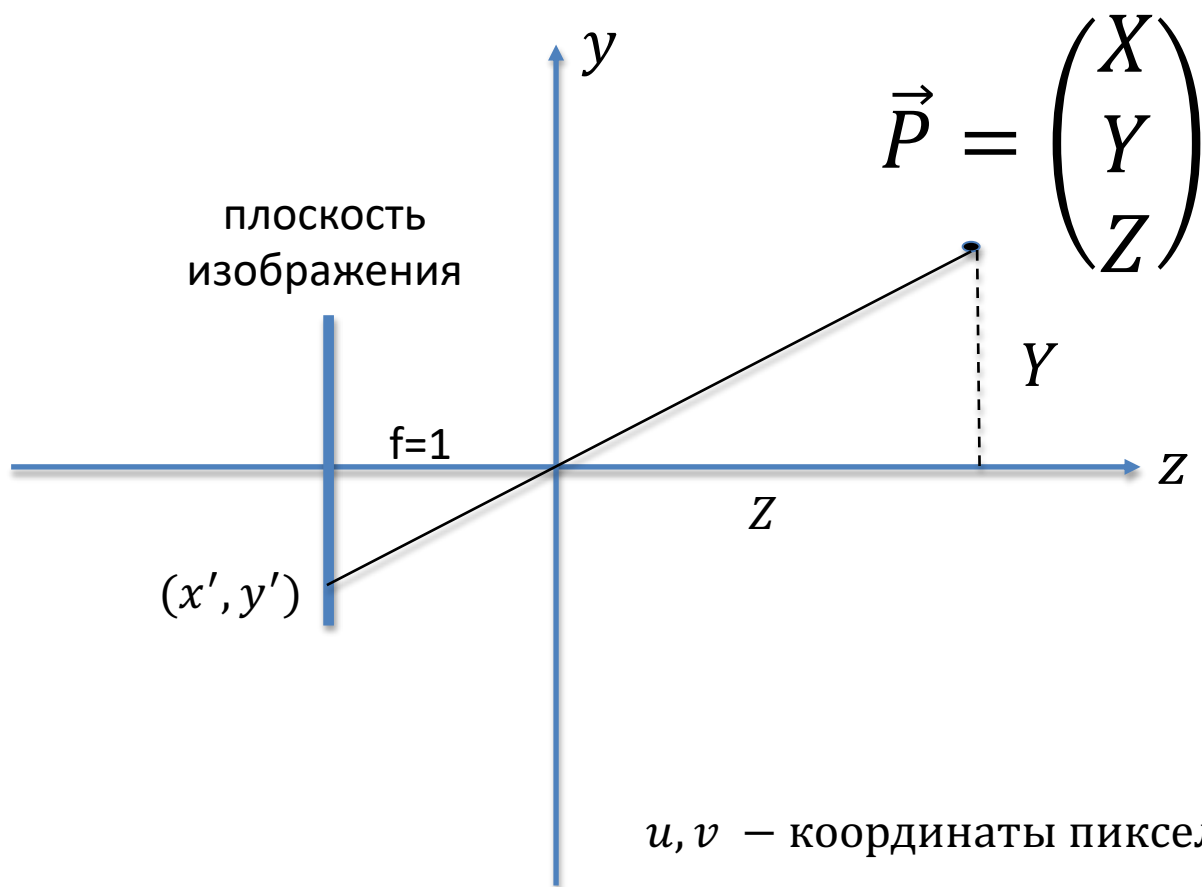


Томазо-ди-Джованни Мазаччо, «Уплата подати», 1427

Возникновение проективной геометрии

- Иоганн Кеплер и Жерар Дезарг (начало XVII века): бесконечно далекие точки, точка на бесконечности, прямая на бесконечности
- Жан-Виктор Понселе, Мишель Шаль (первая половина XIX века): проективное пространство
- Август Фердинанд Мебиус (середина XIX века): однородные координаты

Модель камеры-обскуры



$$x' = \frac{X}{Z}$$

$$y' = \frac{Y}{Z}$$

$$u = f_x x' + c_x$$

$$v = f_y y' + c_y$$

u, v — координаты пикселей на изображении

Проективное пространство

- Состоит из множества прямых линий, проходящих через нулевую точку линейного пространства, включает точку на бесконечности
- Если линейное пространство трехмерное, то проективное пространство называют проективной плоскостью \mathbf{P}^2

Однородные координаты

Точка на проективной плоскости $\vec{p} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} \in P^2$

ставится в соответствие всем точкам из трехмерного пространства, проектирующимся в нее:

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = z \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3$$

(x, y, z) называют однородными координатами точки p .

Однородные координаты

Уравнение прямой:

$$p^T l = 0 \quad p_x l_x + p_y l_y + p_z l_z = 0$$

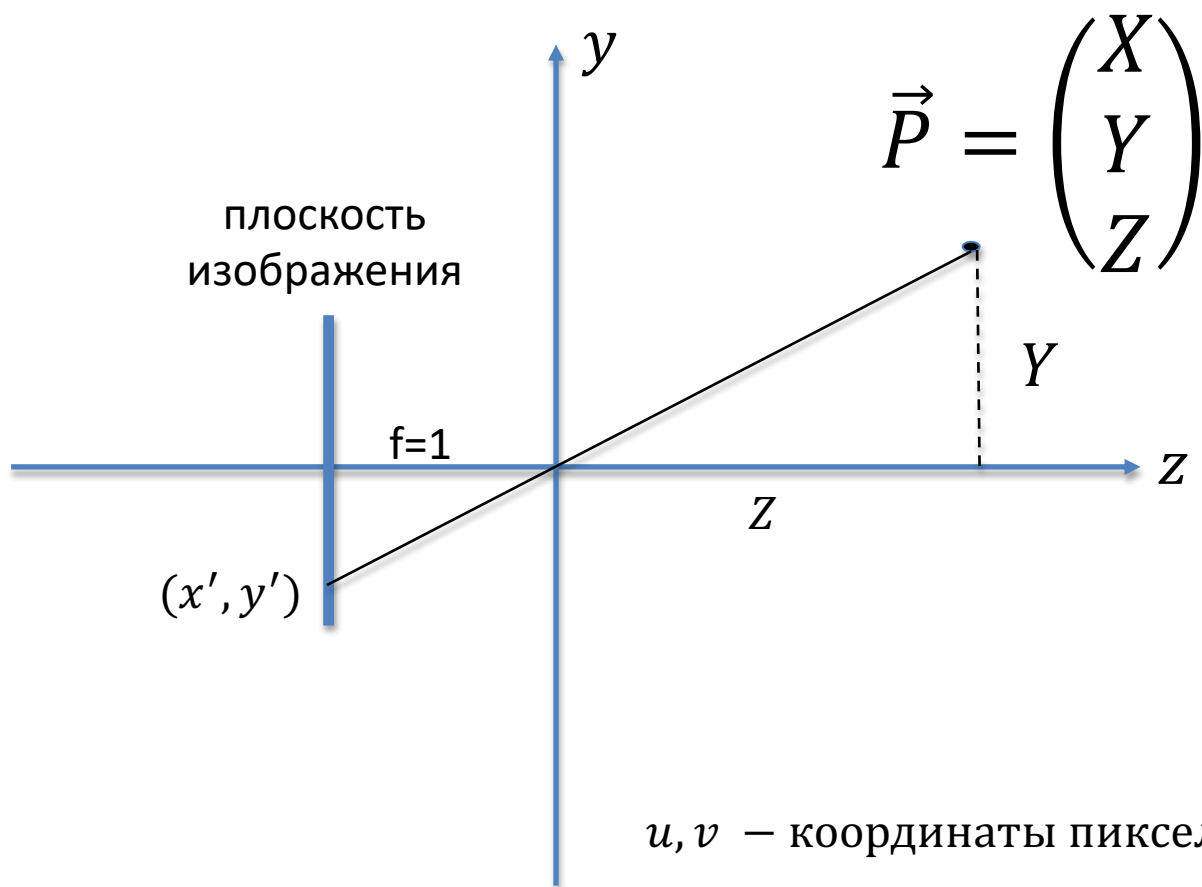
Прямая, проходящая через две точки:

$$l = p_1 \times p_2 \quad p_i^T p_1 \times p_2 = 0$$

Пересечение прямых:

$$p = l_1 \times l_2 \quad l_i^T l_1 \times l_2 = 0$$

Модель камеры-обскуры



$$x' = \frac{X}{Z}$$

$$y' = \frac{Y}{Z}$$

$$u = f_x x' + c_x$$

$$v = f_y y' + c_y$$

u, v — координаты пикселей на изображении

Матрица проекции камеры

$$w \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Матрица проекции камеры

$$w \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} [R|T] \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

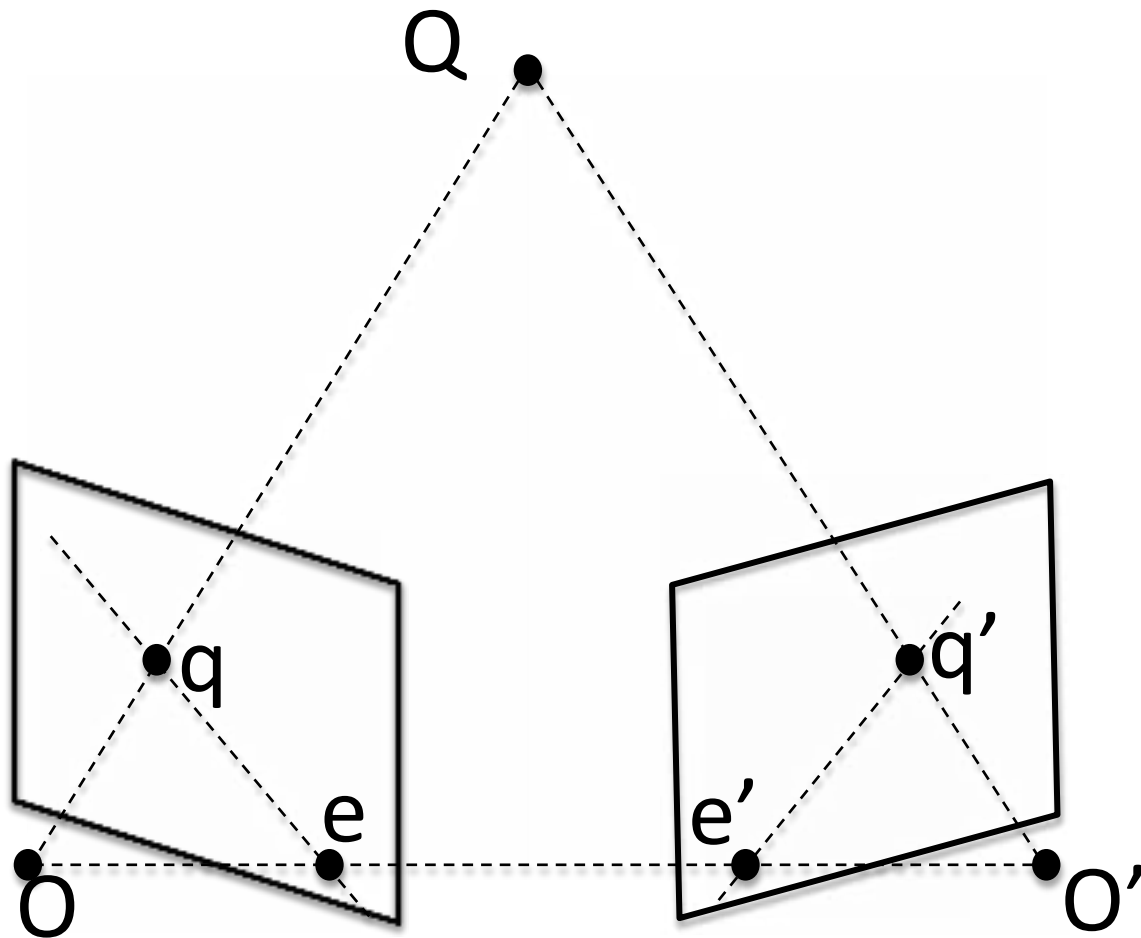
Матрица проекции камеры

$$q = \underbrace{\begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_K \underbrace{[R | T]}_P Q$$

$$q \in P^2$$

$$Q \in P^3$$

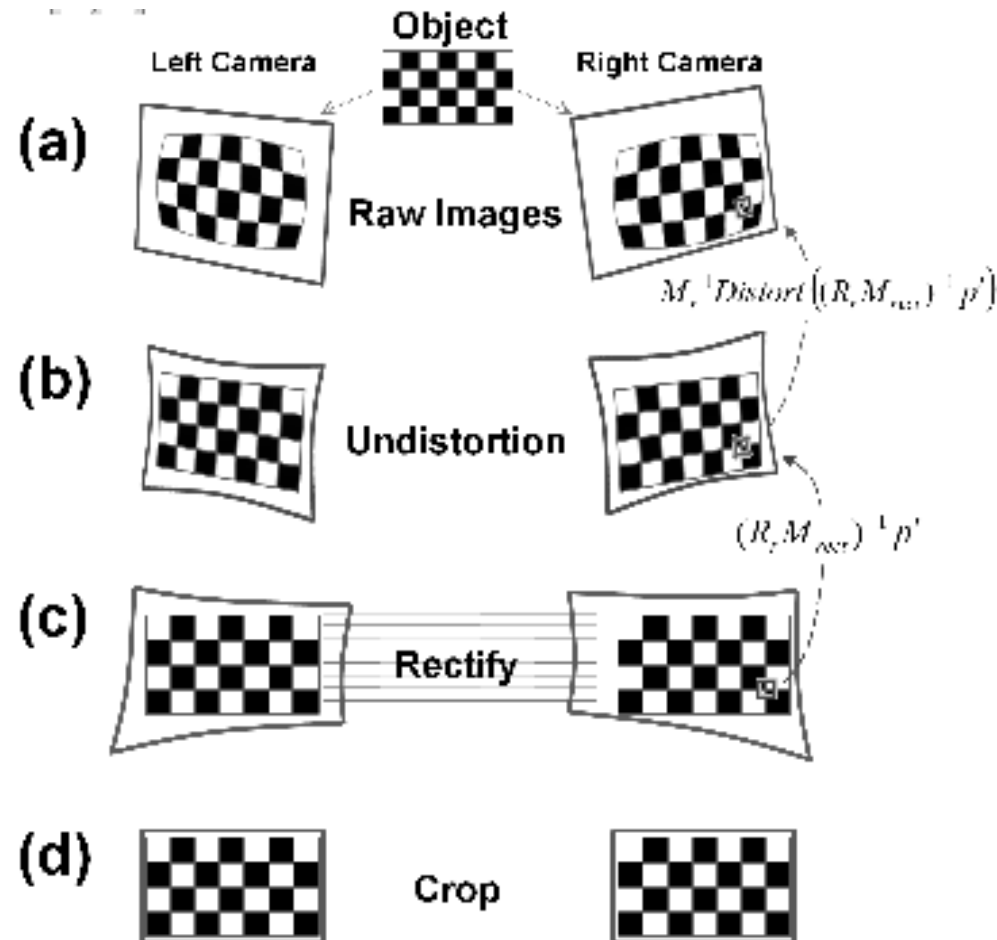
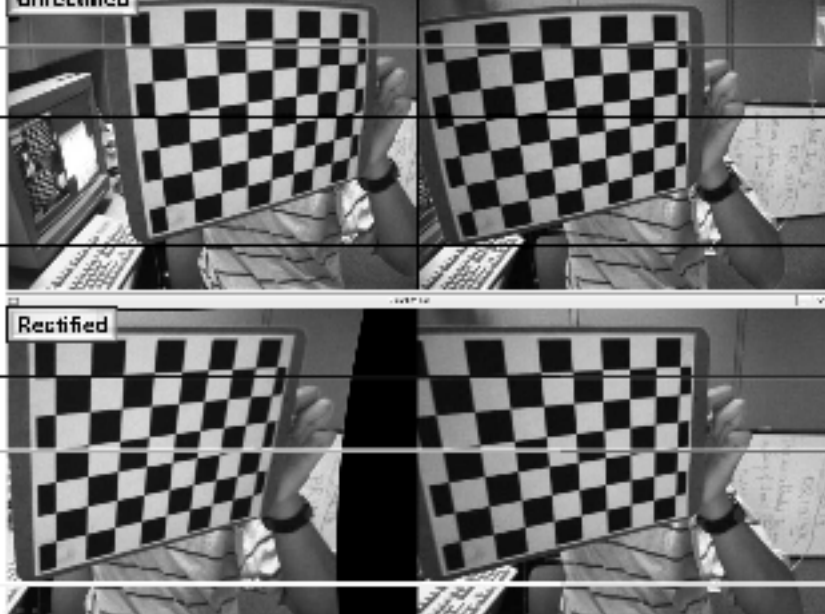
Стереозрение



Стерео ректификация

- После калибровки стереопары, мы можем сделать эпиполярные линии горизонтальными

Result: Epipolar alignment of features:



Stereo correspondence block matching



For each block in left image:

Search for the corresponding block in the right image such that SSD or SAD between pixel intensities is minimum

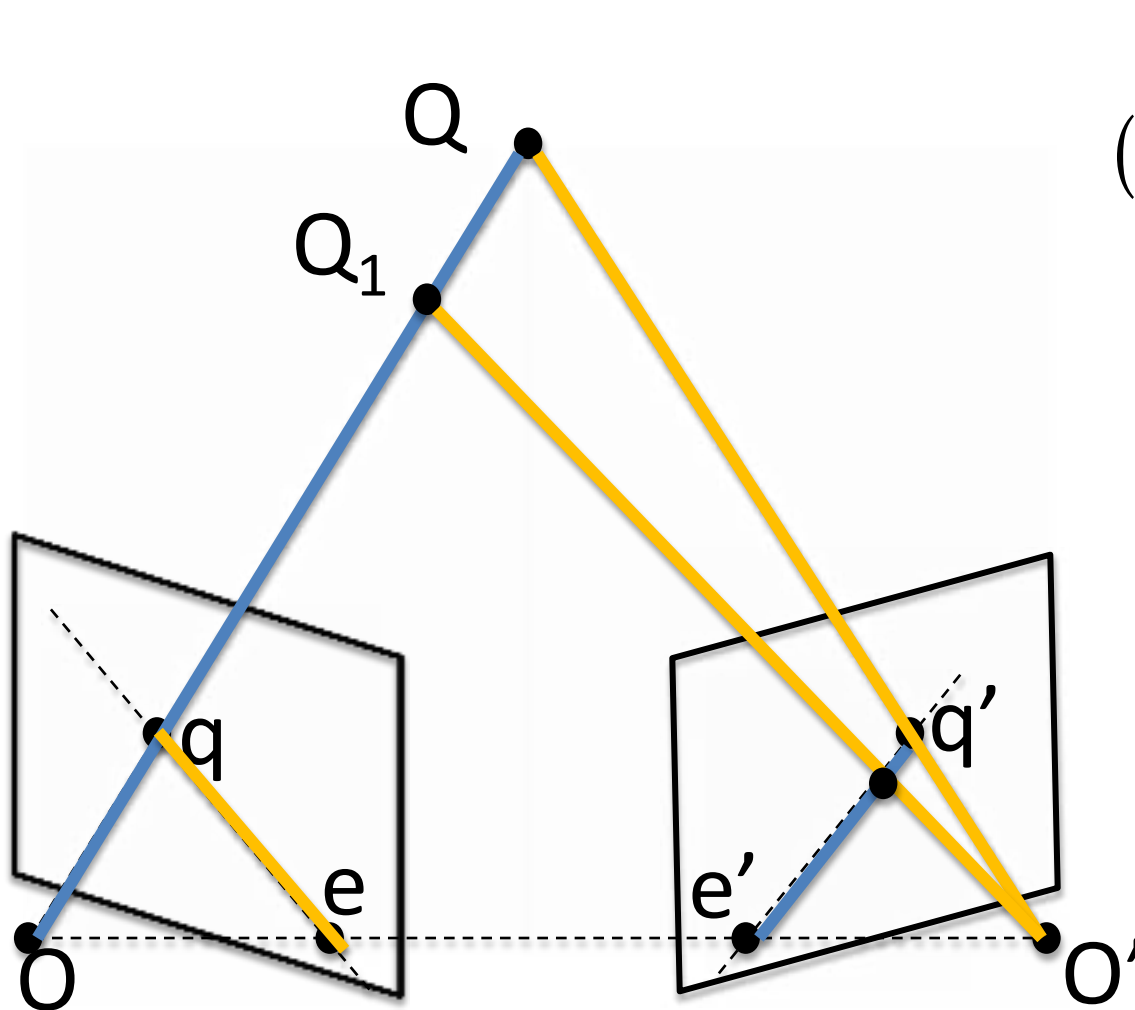


iPhone X True Depth camera



**HOW FACE ID
ACTUALLY WORKS**

Стереозрение



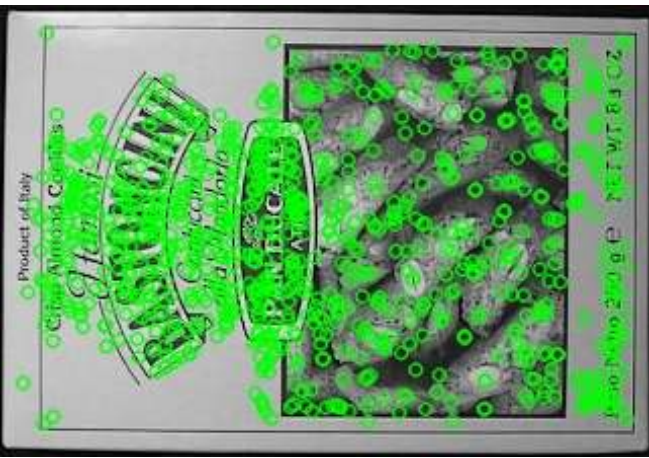
$$(u', v', 1) \cdot F \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = 0$$

$$q'^T F q = 0$$

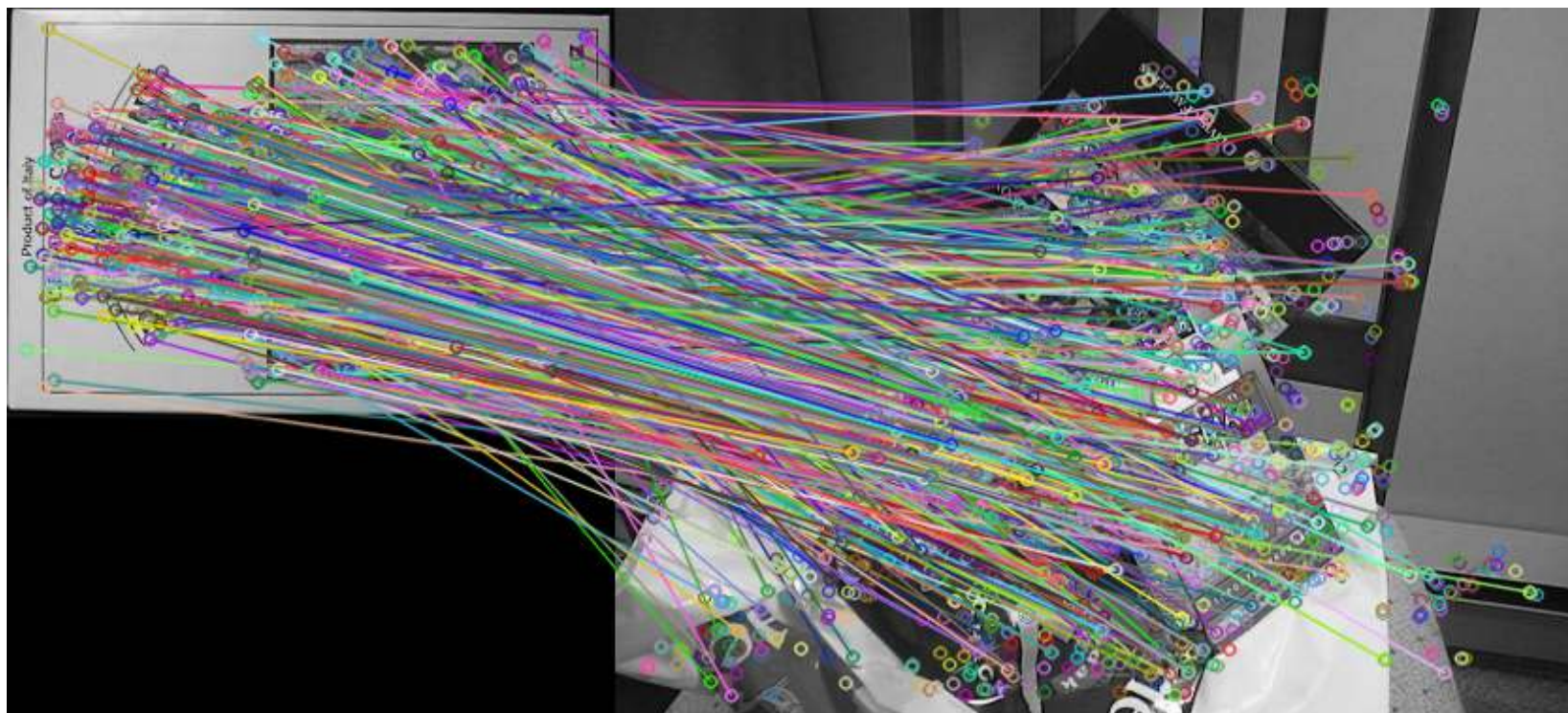
Нахождение фундаментальной матрицы

- Находим ключевые точки и соответствия между ними (SIFT etc)
- При помощи RANSAC фильтруем неправильные соответствия и находим фундаментальную матрицу

Ключевые точки



Соответствия

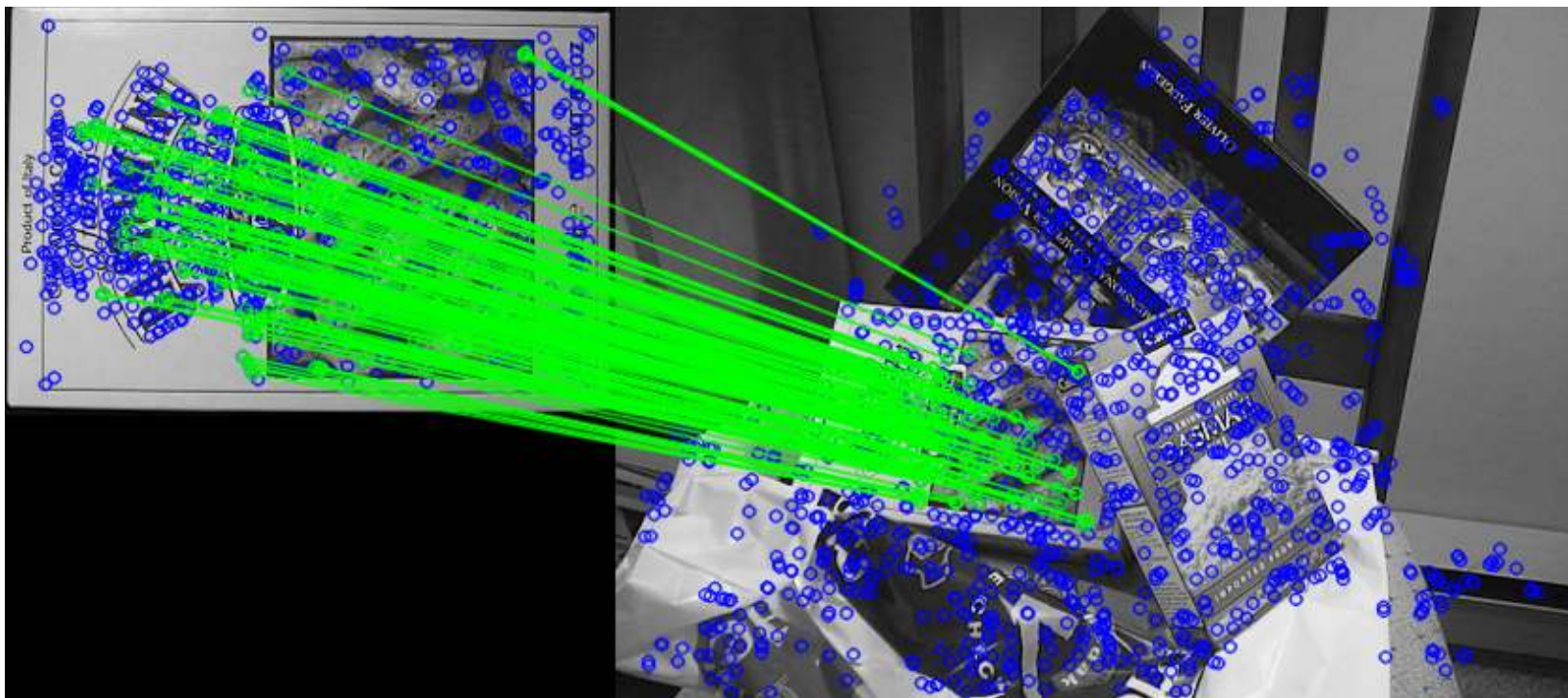


Random Sample Consensus

- Do n iterations until $\#inliers > inlierThreshold$
 - Draw k matches randomly
 - Find the transformation
 - Calculate inliers count
 - Remember the best solution

The number of iterations required $\sim 10 * \left(\frac{\# matches}{\# inliers} \right)^k$

Финальный результат



Оценка позы объекта (задача PnP)

Точки,
найденные на
изображении:

$$\left\{ \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \end{pmatrix} \right\}_{i=1..n}$$

Трехмерные
координаты в
системе отсчета
объекта

$$\left\{ \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} \right\}_{i=1..n}$$

Класс решений –
поворот и
трансляция:

$$f \left[\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, R, T \right] = R \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + T$$

Ошибка репроекции

$$w_i \begin{pmatrix} u_i^p \\ v_i^p \\ 1 \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$error(P) = \sum_i \left[\begin{pmatrix} u_i \\ v_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} u_i^p \\ v_i^p \end{pmatrix} \right]^2$$

Perspective-n-Points problem

$$\min_{R, T} \text{error}(K, R, T)$$

- P3P, P4P
- Levenberg-Marquardt
- RANSAC
- $O(N)$ closed-form methods
 - See Hesch J.A., Roumeliotis S.I. A direct least-squares (DLS) method for pnp; Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision; Barcelona, Spain. 6–13 November 2011; pp. 383–390.

Восстановление 3Д сцены при помощи одной камеры

- SLAM: Simultaneous Localization and Mapping



Structure from Motion

Даны два изображения одной и той же сцены. Требуется восстановить трехмерную структуру.

- 1) Внутренние параметры камеры известны
- 2) Внутренние параметры камеры неизвестны

Теорема о проективной реконструкции

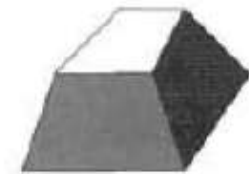
- P_i, P'_i – матрицы проекции камер
- $q_i, q'_i \in \mathbb{P}^2, Q_{ki} \in \mathbb{P}^3$.
- Пусть $\{(q_i, q'_i)\}$ – пары соответствующих точек на двух изображениях, и существует единственная F такая, что $q'_i F q_i = 0$ для всех i . Пусть $(P_1, P'_1, \{Q_{1i}\})$ и $(P_2, P'_2, \{Q_{2i}\})$ – две реконструкции, соответствующие $\{(q_i, q'_i)\}$.
- Тогда существует несингулярная матрица H такая, что $P_2 = P_1 H^{-1}$, $P'_2 = P'_1 H^{-1}$ и $Q_{2i} = H Q_{1i}$, для всех i , кроме точек, лежащих на линии, соединяющей центры камер.

Проективное преобразование \mathbf{R}^3

$$X = \frac{H_{11}X_0 + H_{12}Y_0 + H_{13}Z_0 + H_{14}}{H_{41}X_0 + H_{42}Y_0 + H_{43}Z_0 + H_{44}}$$

$$Y = \frac{H_{21}X_0 + H_{22}Y_0 + H_{23}Z_0 + H_{24}}{H_{41}X_0 + H_{42}Y_0 + H_{43}Z_0 + H_{44}}$$

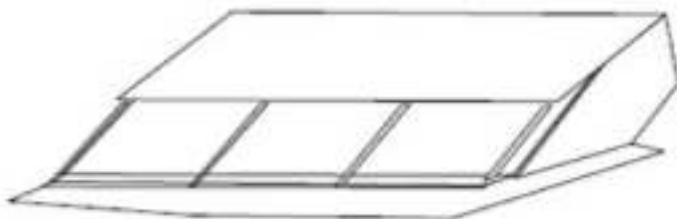
$$Z = \frac{H_{31}X_0 + H_{32}Y_0 + H_{33}Z_0 + H_{34}}{H_{41}X_0 + H_{42}Y_0 + H_{43}Z_0 + H_{44}}$$



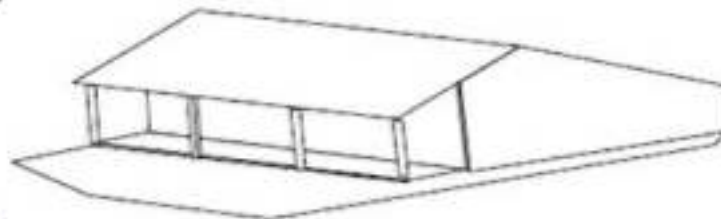
Нахождение плоскости на бесконечности



a



b



Structure from Motion

- При известных внутренних параметрах камеры и наличии достаточного количества правильных соответствий (минимум 5), можно однозначно восстановить относительные позы камер (кроме вырожденных случаев) с точностью до масштаба

ORB-SLAM2



Universidad
Zaragoza



Instituto Universitario de Investigación
en Ingeniería de Aragón
Universidad Zaragoza

ORB-SLAM2: an Open-Source SLAM System
for Monocular, Stereo and RGB-D Cameras

Raúl Mur-Artal and Juan D. Tardós

raulmur@unizar.es

tardos@unizar.es

Sparse Bundle Adjustment

$$\min_{i,j} \sum_i \sum_j v_{ij} d(P_j Q_i, q_{ij})^2$$

P_j -- матрица проекции j -й камеры

$Q_i \in P^3$ -- i -я точка в трехмерном пространстве

$q_{ij} \in P^2$ -- ее проекция на j -е изображение

v_{ij} равно 1, если q_{ij} присутствует на изображении j , иначе 0

Large-Scale SLAM: Colosseum



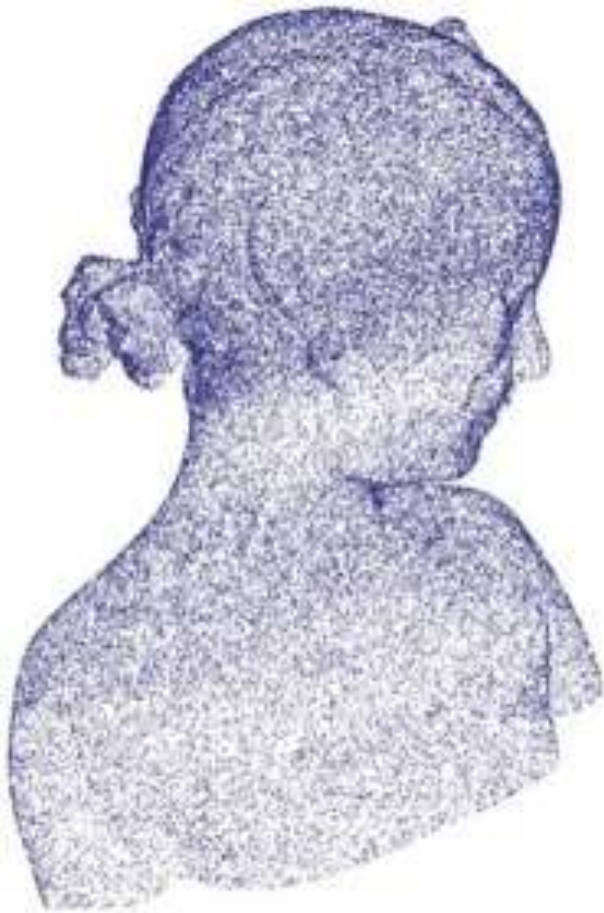
Agarwal, Noah Snavely, Ian Simon, Steven M. Seitz and Richard Szeliski, *Building Rome in a Day*. ICCV 2009

Large-Scale SLAM: Dubrovnik

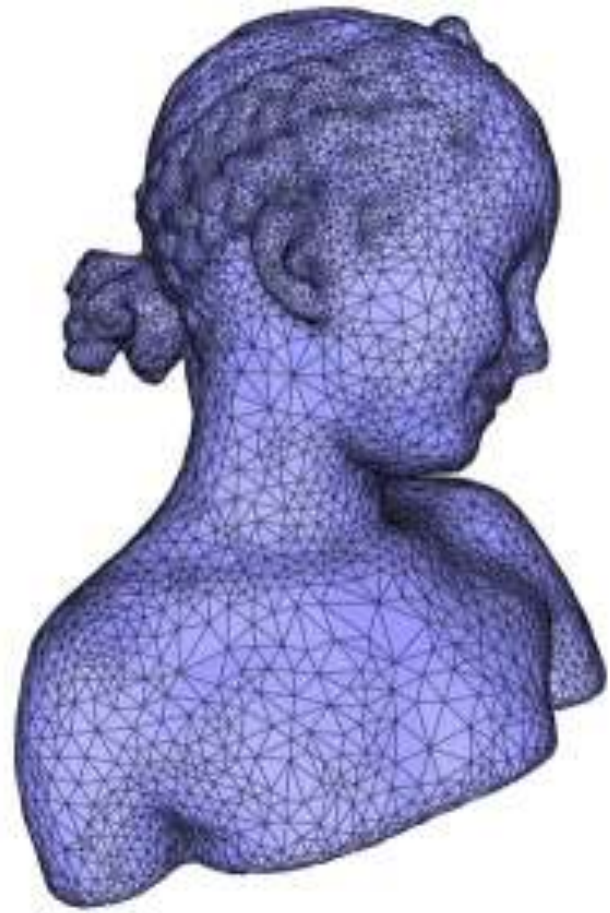
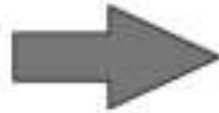


Agarwal, Noah Snavely, Ian Simon, Steven M. Seitz and Richard Szeliski, *Building Rome in a Day*. ICCV 2009

Meshing



point cloud



reconstructed mesh

Poisson Surface Reconstruction

Seminal paper:

M. Kazhdan, M. Bolitho, and H. Hoppe.

Poisson Surface Reconstruction.

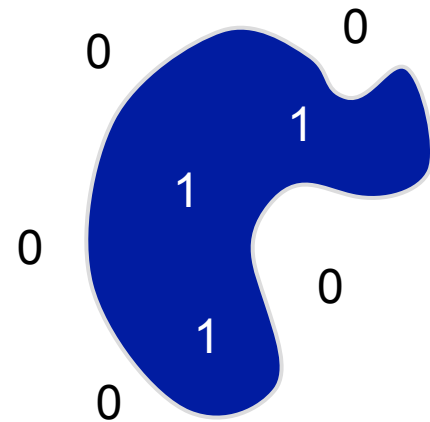
Symposium on Geometry Processing, 2006

2000 citations

The Indicator Function

- Reconstruct the surface of the model by solving for the indicator function of the shape:

$$\chi_M(p) = \begin{cases} 1 & \text{if } p \in M \\ 0 & \text{if } p \notin M \end{cases}$$

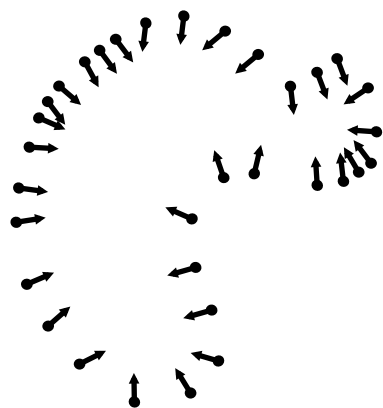


Indicator function

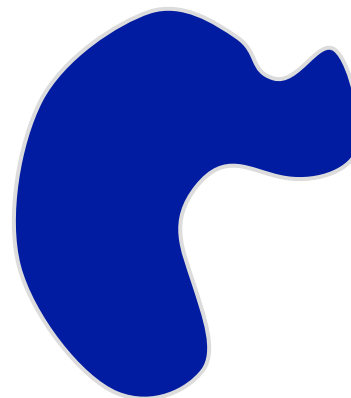
χ_M

Challenge

- How to construct the indicator function?



Oriented points

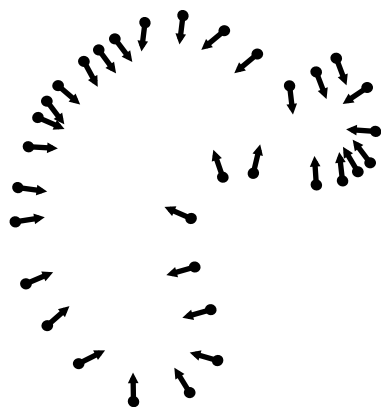


Indicator function

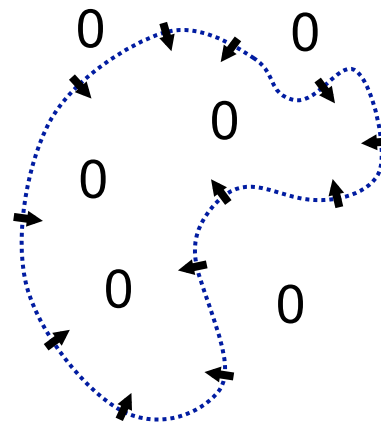
$$\chi_M$$

Gradient Relationship

- There is a relationship between the normal field and gradient of indicator function



Oriented points



Indicator gradient

$$\nabla \chi_M$$

Integration

- Represent the points by a vector field \vec{V}
- Find the function χ whose gradient best approximates \vec{V} :

$$\min_{\chi} \left\| \nabla \chi - \vec{V} \right\|$$

Integration as a Poisson Problem

- Represent the points by a vector field \vec{V}
- Find the function χ whose gradient best approximates \vec{V} :

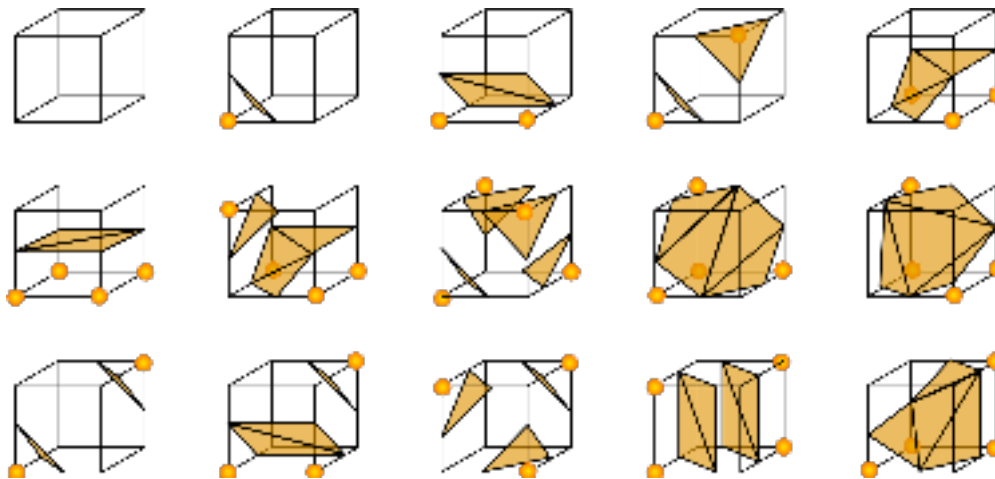
$$\min_{\chi} \left\| \nabla \chi - \vec{V} \right\|$$

- Applying the divergence operator, we can transform this into a Poisson problem:

$$\nabla \cdot (\nabla \chi) = \nabla \cdot \vec{V} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta \chi = \nabla \cdot \vec{V}$$

Implementation details

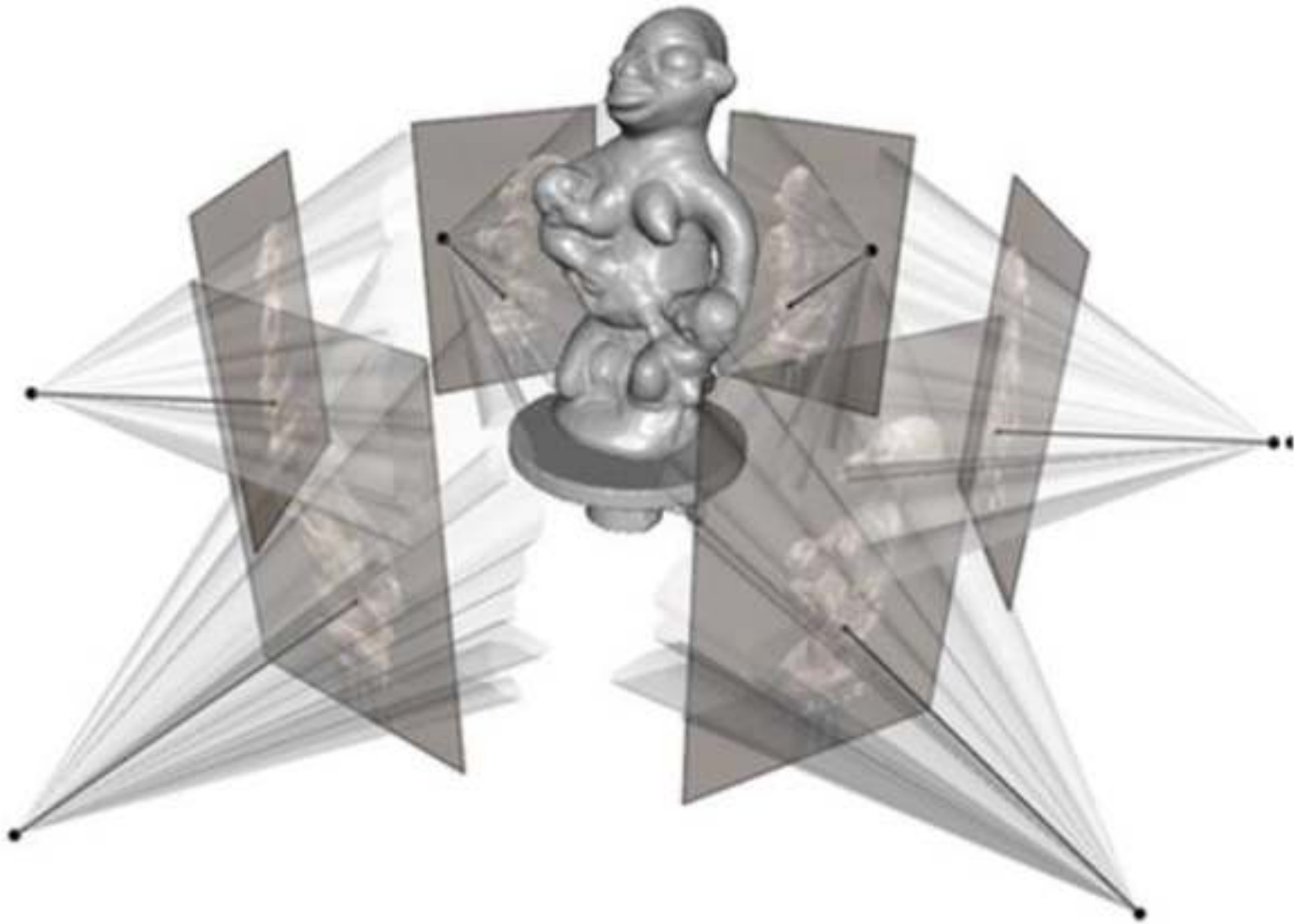
- Octree to represent the field V
- Laplace equation solved for the octree
- Marching cubes to represent the resulting surface as polygons



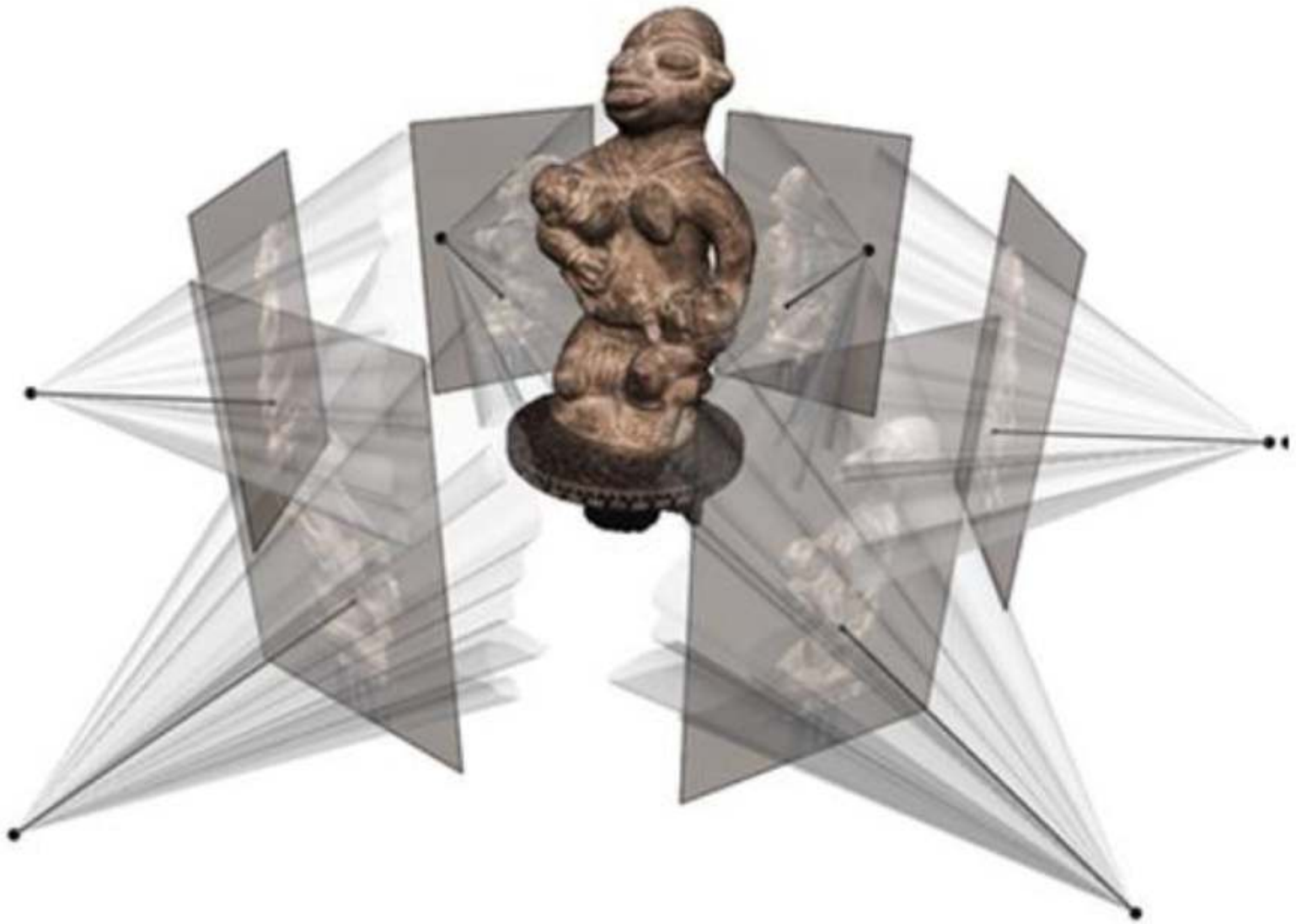
Example of results



Texturing



Texturing



Texturing

- Naïve: for each vertex take average color across all images
- Better: take *weighted* average

Texturing

■ Example:

Callieri, M., Cignoni, P., Corsini, M. and Scopigno, R.

Masked photo blending: Mapping dense photographic data set on high-resolution sampled 3D models.

Computers & Graphics 2008

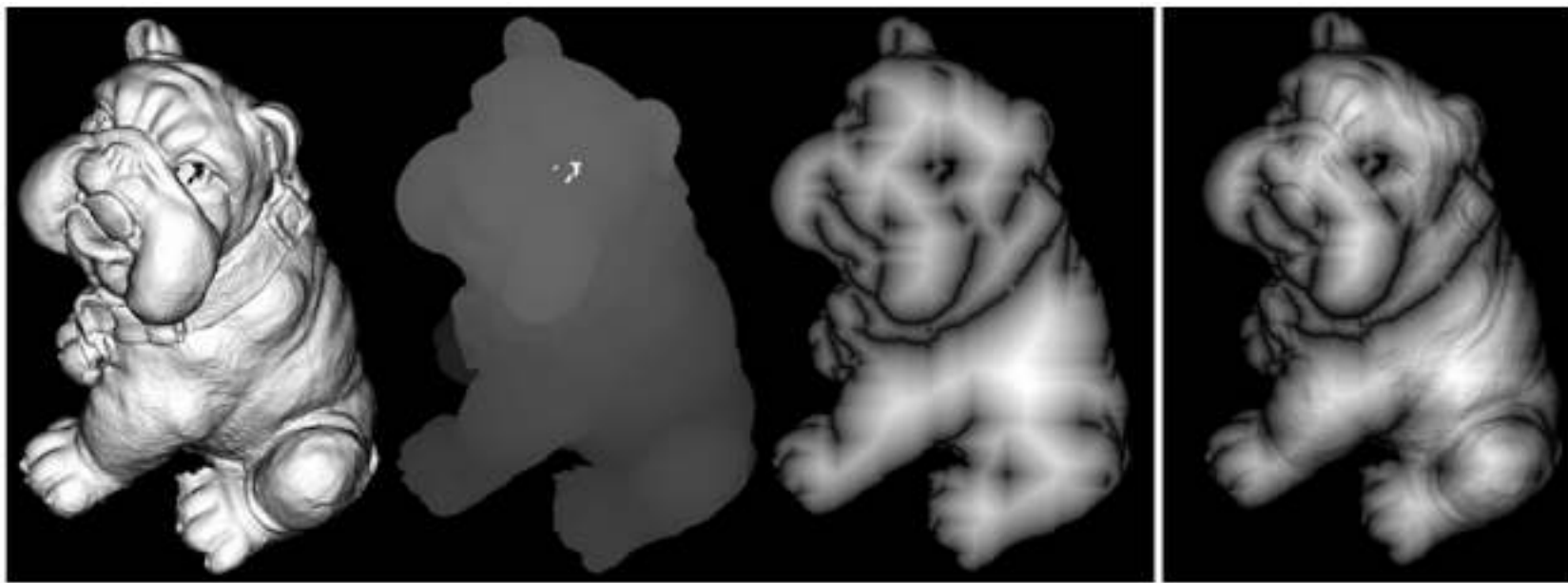


Fig. 2. An example of the core weighting masks. From left to right: Angle Mask, Depth Mask, Border Mask. Rightmost, all the masks combined in the final mask. Caveat: the contrast of the depth and border masks has been increased for enhanced readability.

Example of results





Initial point cloud



Computed mesh



Final 3D model

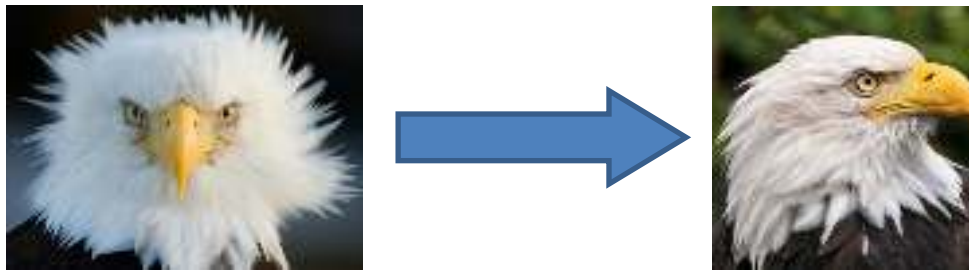
Disclaimer: itSeez3d may or may not use the described algorithms.

Трёхмерное сканирование



Восстановление модели лица человека по одной фотографии

- Данных недостаточно



- Изображение сильно зависит от освещения, камеры и внешнего вида человека



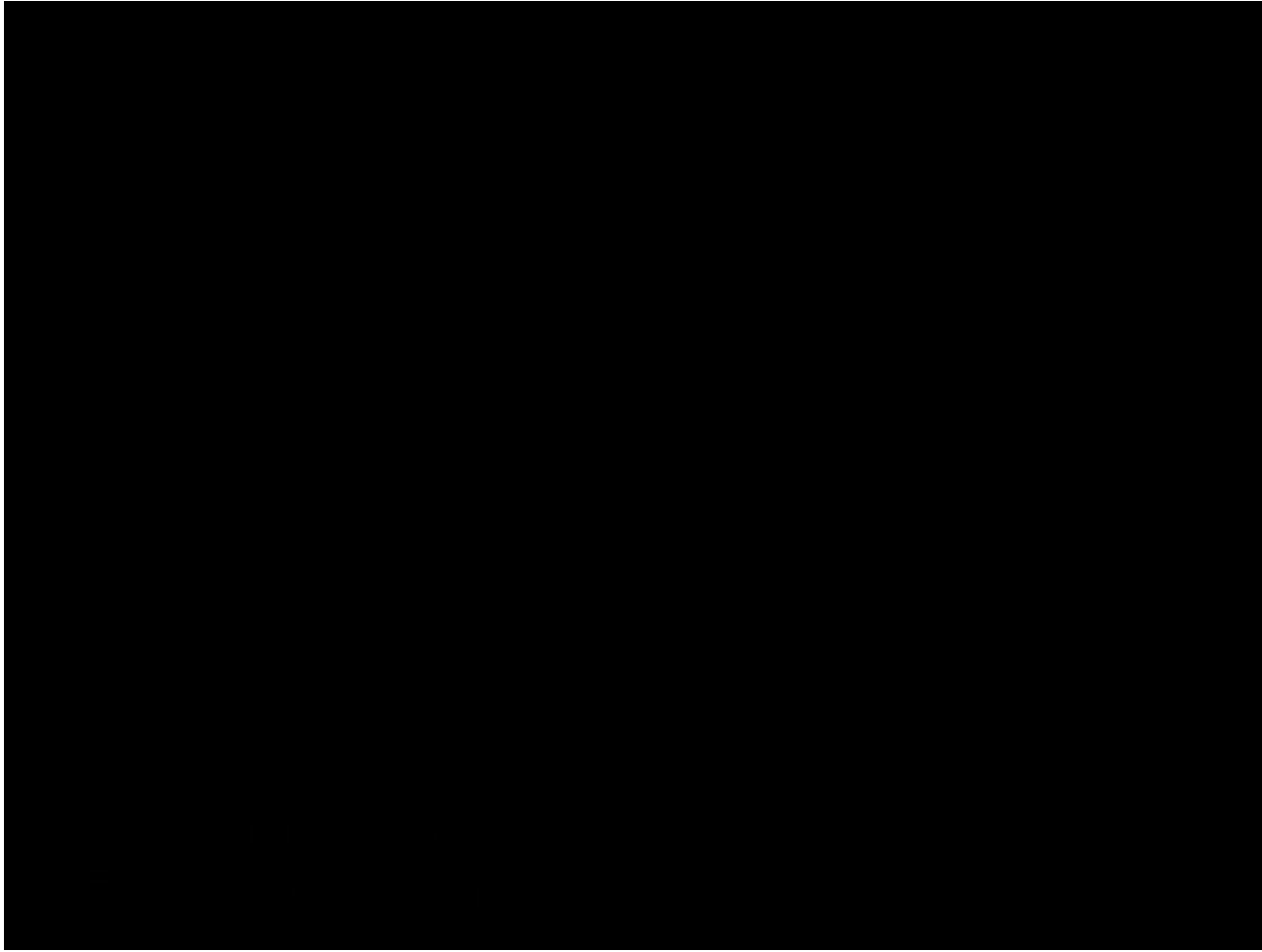
Параметрическая модель лица

- Множество трехмерных моделей лиц приводится к одной топологии и одному размеру
- Обучается параметрическая модель с относительно небольшим количеством параметров
- Тренируется модель, предсказывающая эти параметры по изображению

V. Blanz, T. Vetter. A Morphable Model For The Synthesis Of 3D Faces. SIGGRAPH 1999.

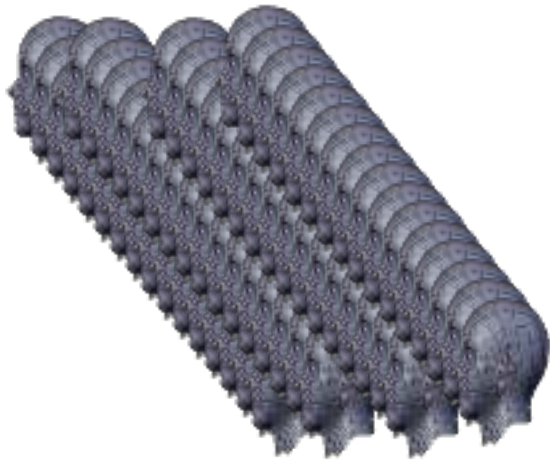
A. Jackson et al, Large Pose 3D Face Reconstruction from a Single Image via Direct Volumetric CNN Regression, ICCV 2017

Параметрическая модель лица

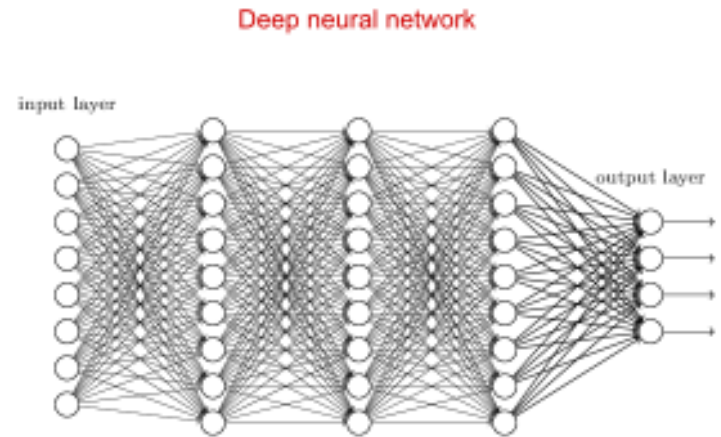
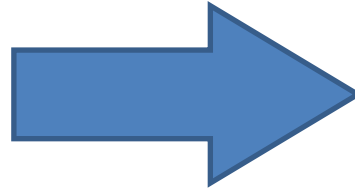


V. Blanz, T. Vetter. A Morphable Model For The Synthesis Of 3D Faces.
SIGGRAPH 1999.

Avatar SDK



50K high quality
3D models of
faces



30 million parameters,
trained for a month on
2x Titan X (Maxwell)

Unique shape and texture for each image!

Examples of Avatar SDK Head avatars



Examples of Avatar SDK

Head avatars



Некоторые нерешенные задачи

- Robust SLAM, работающий на маломощной архитектуре
- Реконструкция нетвердых объектов
- Фотореалистичная реконструкция по неполным данным
- Реконструкция по неполным данным без базы трехмерных моделей

ДЖ. ГОЛУБ, Ч. ВАН ДУН

МАТРИЧНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
OZON.RU

Copyrighted Material

SECOND EDITION

Multiple View Geometry

in computer vision



Richard Hartley and Andrew Zisserman

Copyrighted Material

CAMBRIDGE

Спасибо!

Виктор Ерухимов
Itseez3D
support@itseez3d.com

