

Курс «Трёхмерное компьютерное зрение»

Лекция №2
«Камера»

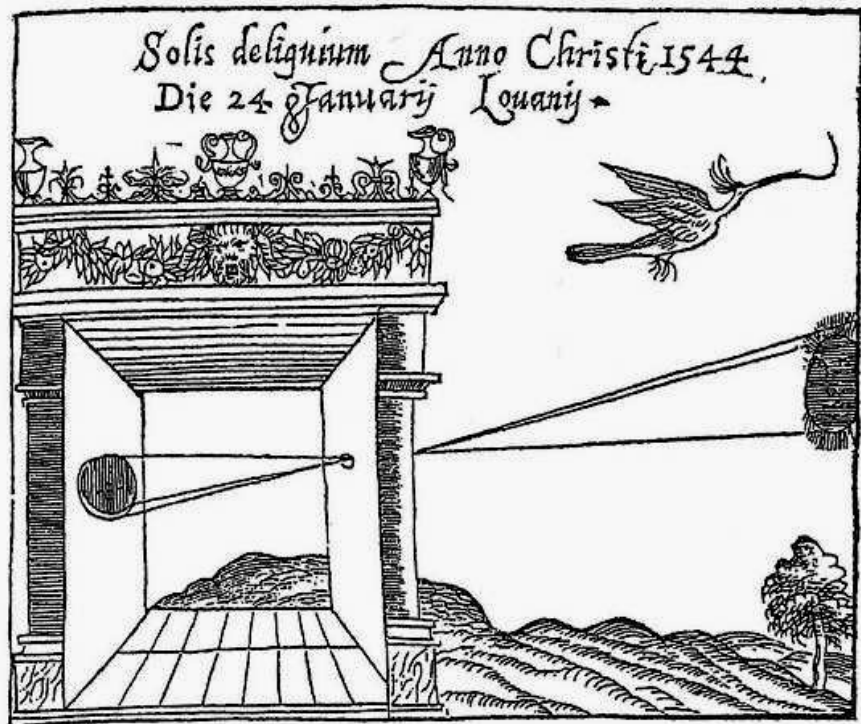
Антон Конушин

2025 год



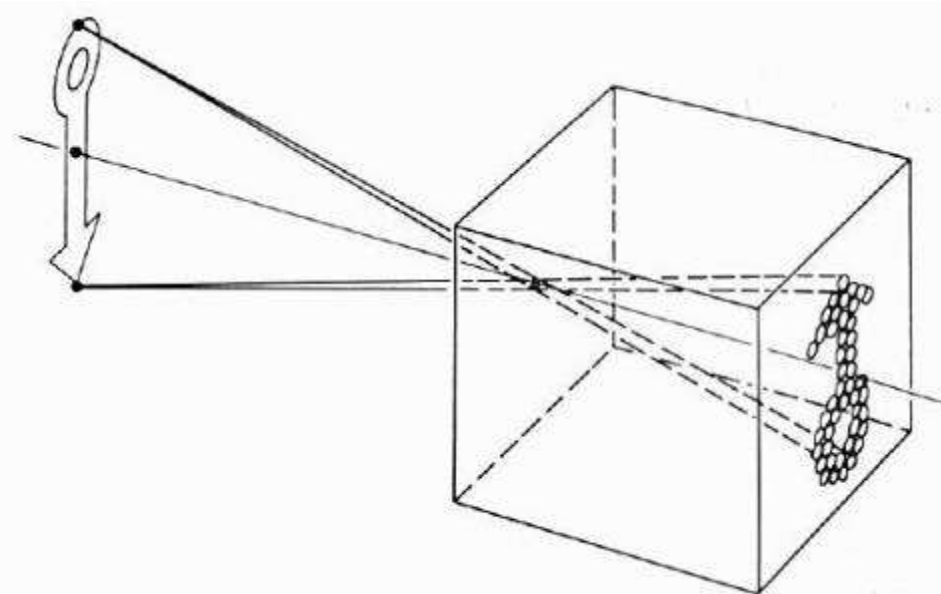
Камера-обскура и цифровая камера

Камера-обскура



Gemma Frisius, 1558

- Принцип был известен еще Аристотелю (384-322 до Н.Э.)
- Помогала художникам: описана Леонардо да Винчи (1452-1519)

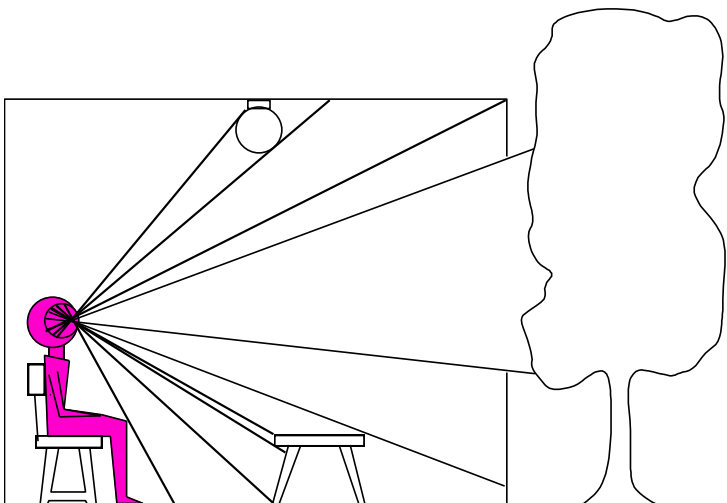


- Захватывает пучок лучей, проходящих через одну точку
- Точка называется Центр проекции (фокальная точка / **focal point**)
- Изображение формируется на картинной плоскости (**Image plane**)

Машина Понижения Размерности

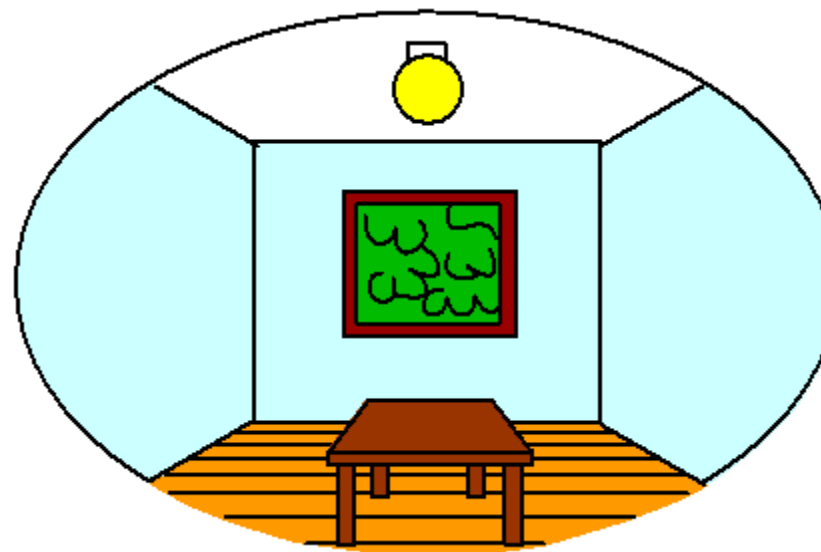


3D мир



Point of observation

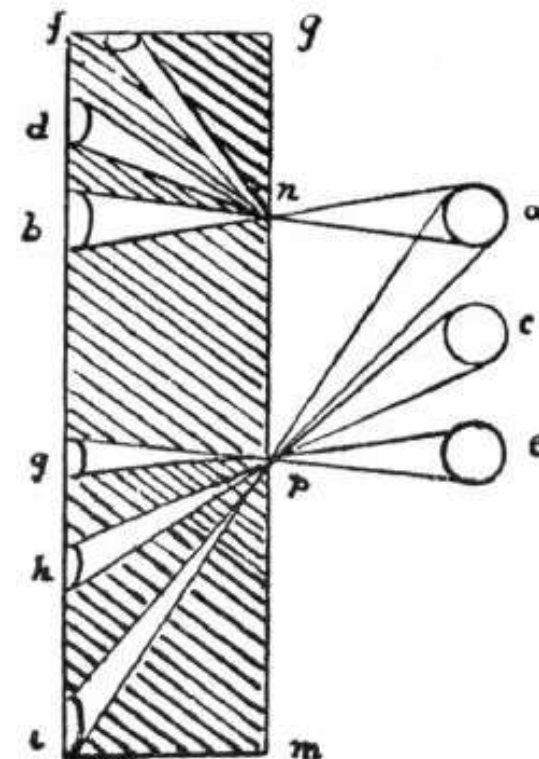
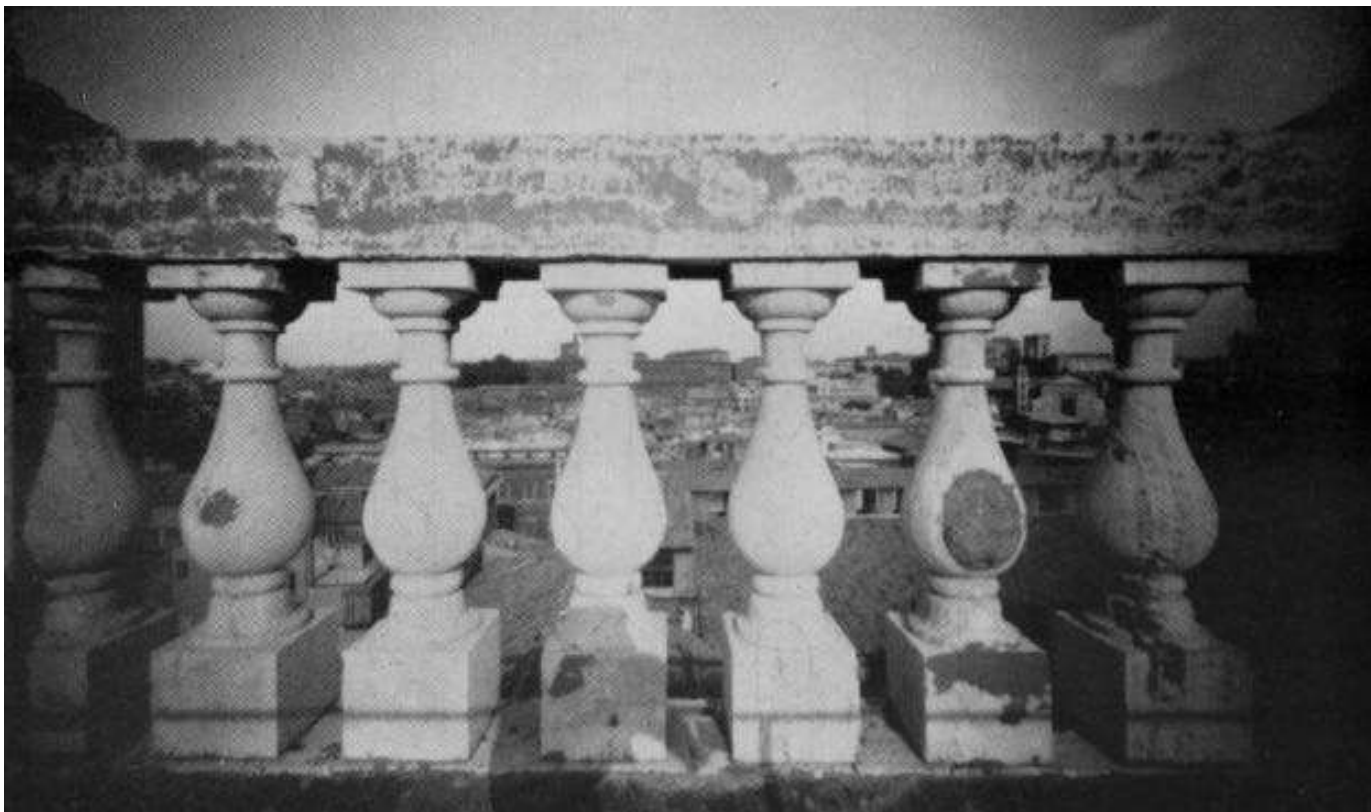
2D картина



Что мы теряем?

- Углы
- Расстояния и длины

Перспективные искажения

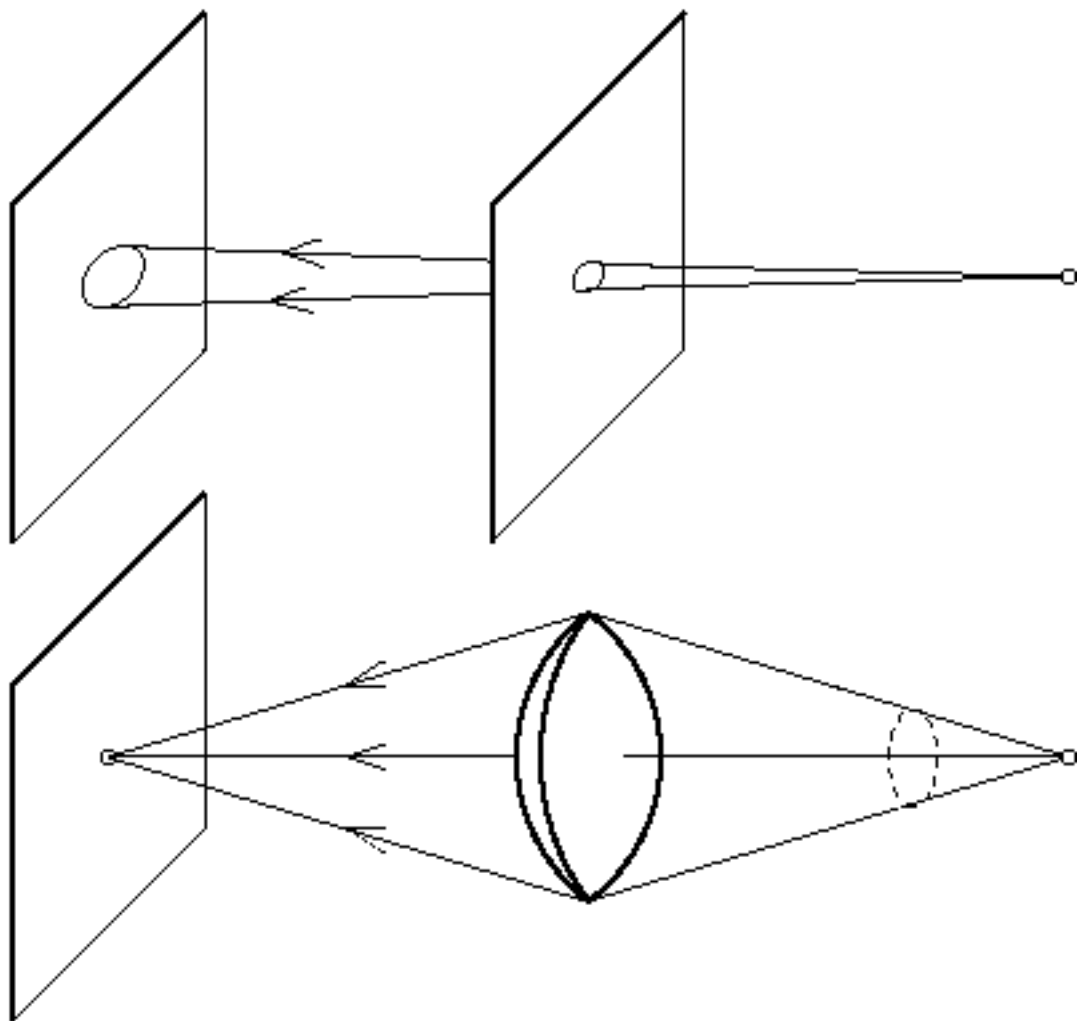


- Крайние колонны кажутся толще
- Эти искажения вызваны не погрешностью линз!
- Проблема была отмечена еще да Винчи

Перспективные искажения: люди



Линза!

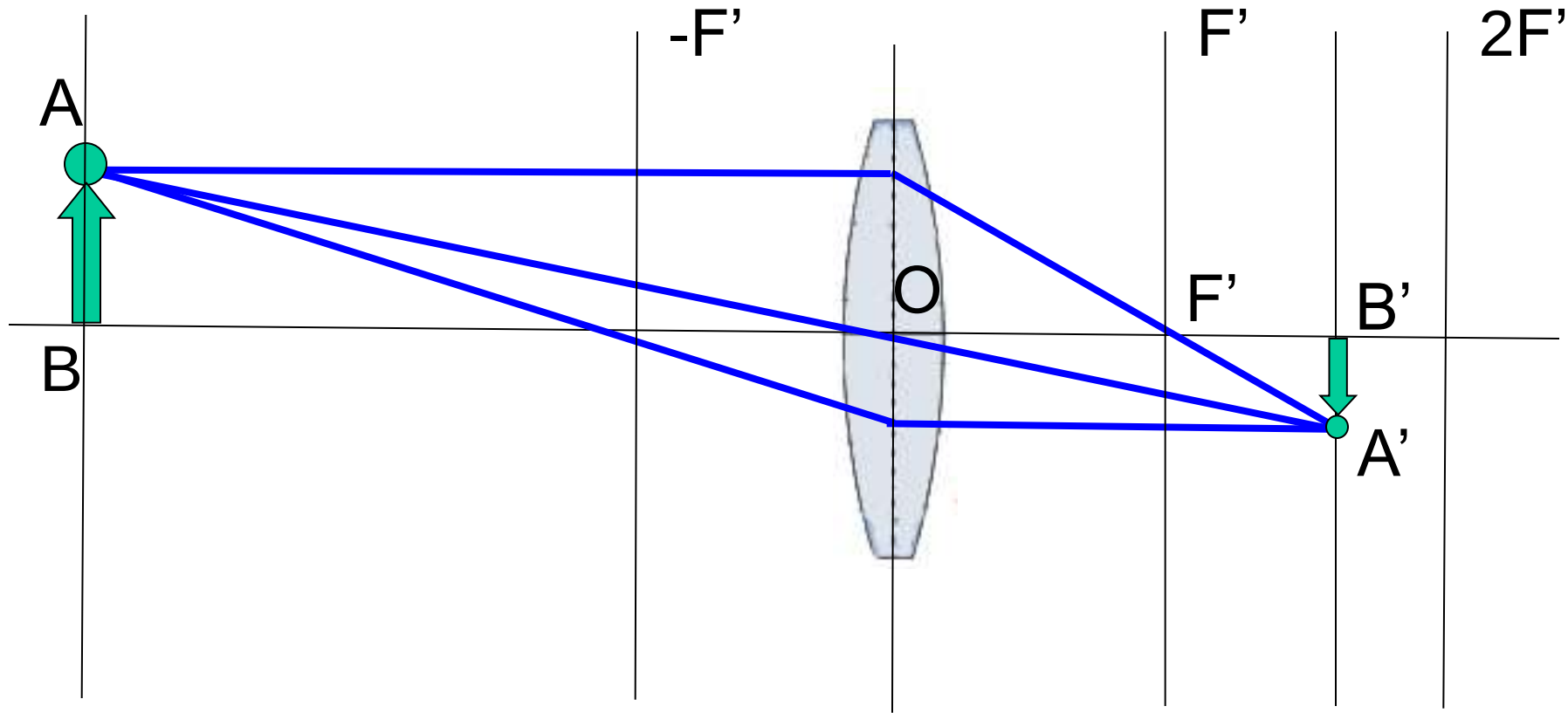


Линза:

диск из прозрачного
однородного материала,
ограниченный двумя
полированными
сферическими, или
плоской и сферической,
поверхностями

Линза позволяет увеличить поток света от каждой точки

Линза



- Лучи от одной точки объекта, преломляясь линзой, фокусируются в одной точке позади линзы
- Луч, проходящий через центр линзы не преломляется
- Система точно как камера-обскура, но собирает больше света
 - O – центр проекции (центр линзы)

Фотоаппарат

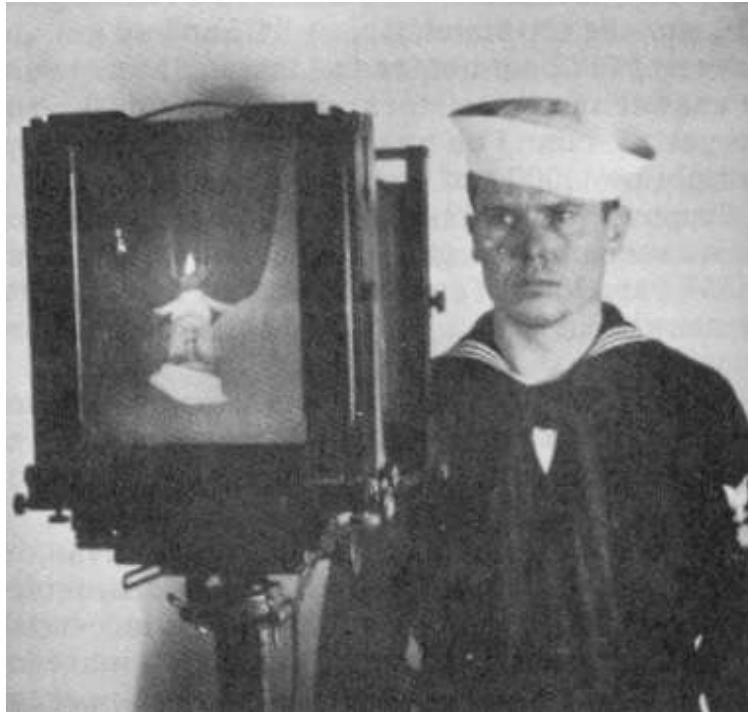
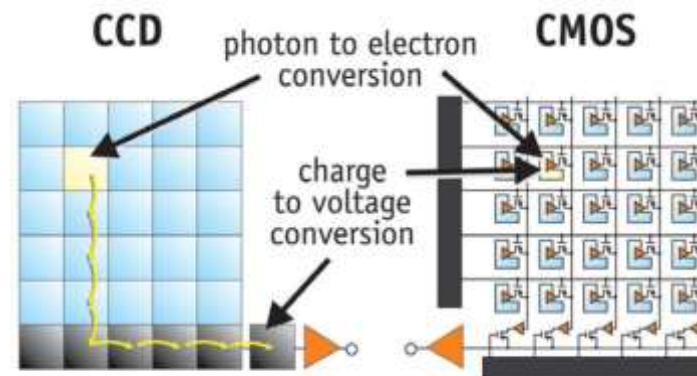


Figure from US Navy Manual of Basic Optics and Optical Instruments, prepared by Bureau of Naval Personnel. Reprinted by Dover Publications, Inc., 1969.

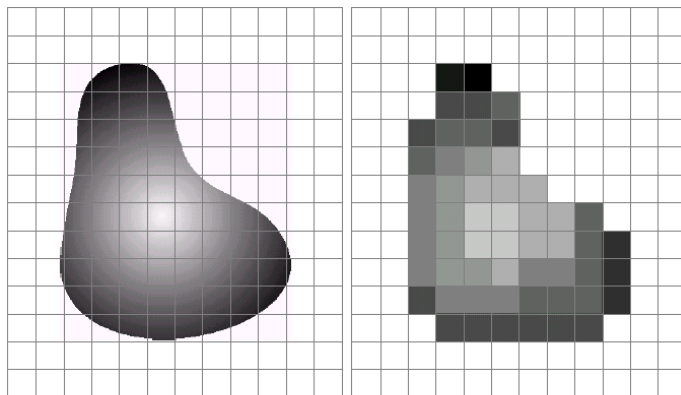


- Все фотоаппараты устроены на описанном принципе
 - Вместо линзы более сложная оптическая система (объектив)
 - Изображение формируется на плёнке или матрице

Цифровая камера

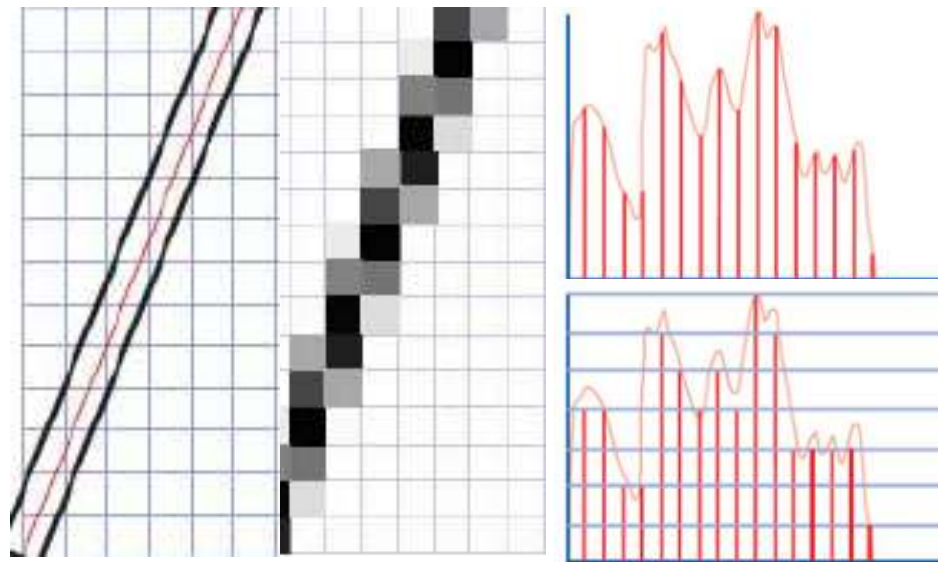


CCDs move photogenerated charge from pixel to pixel and convert it to voltage at an output node. CMOS imagers convert charge to voltage inside each pixel.

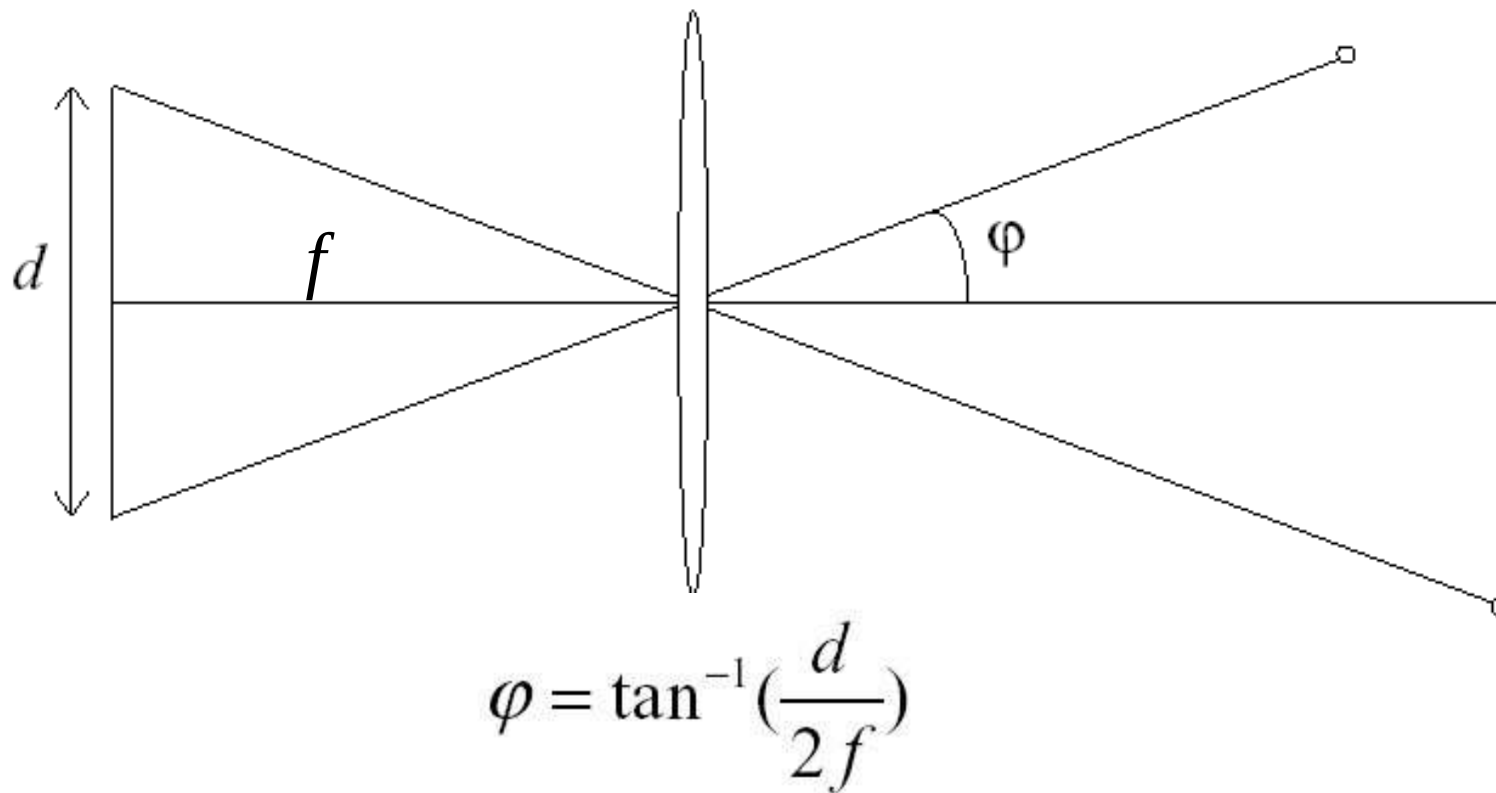


a b

FIGURE 2.17 (a) Continuous image projected onto a sensor array. (b) Result of image sampling and quantization.

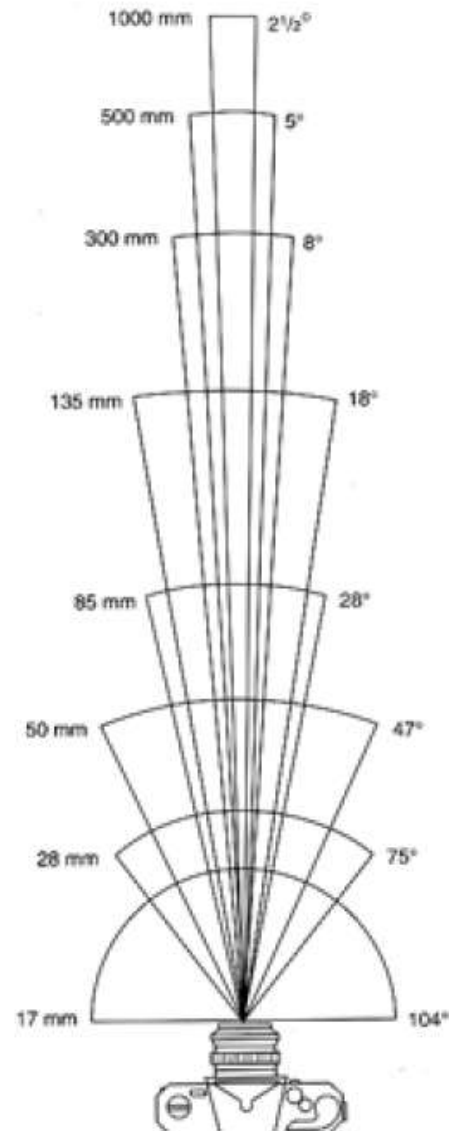


Угол обзора (Field of View)



- Размер матрицы ограничен – ограничен угол обзора
- Больше фокусное расстояние – меньше угол обзора
- Меньше фокусное расстояние – больше угол обзора

Трансфокация (Zoom)



17mm



28mm



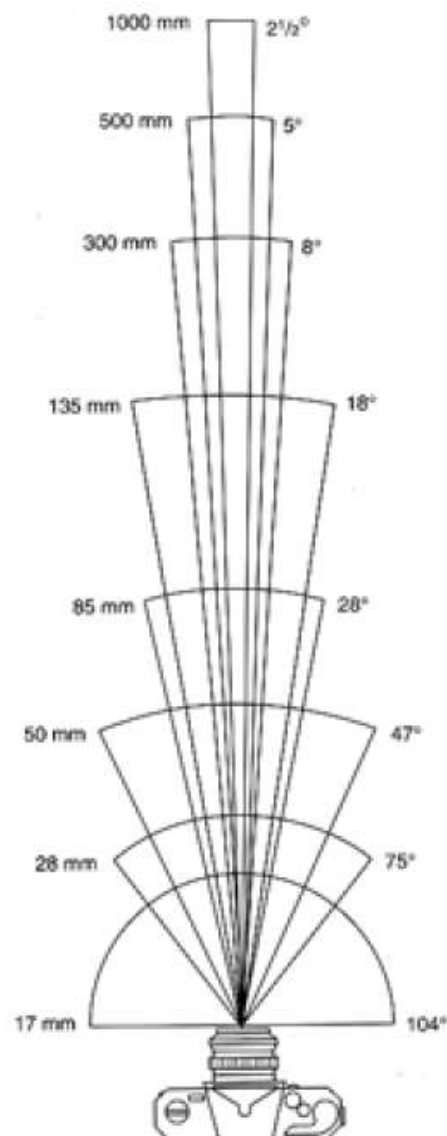
50mm



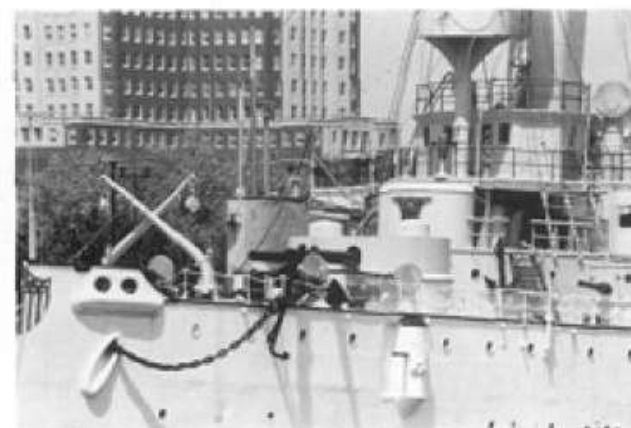
85mm

From London and Upton

Трансфокация (Zoom)



135mm



300mm



17mm



104°

From London and Upton

Забавные эффекты



<http://www.hash.com/users/js herwood/tutes/focal/Zoomin.mov>



Figure 5.1

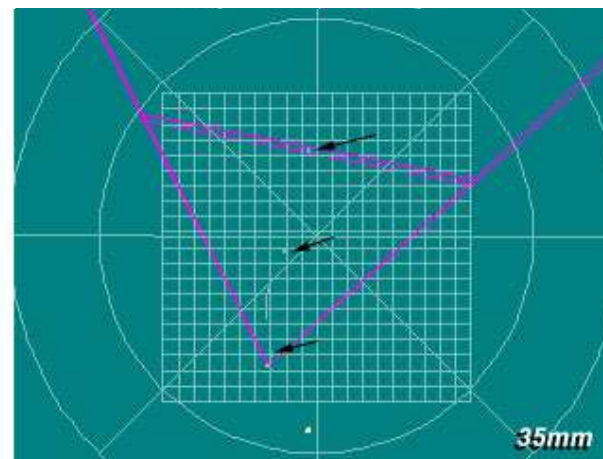


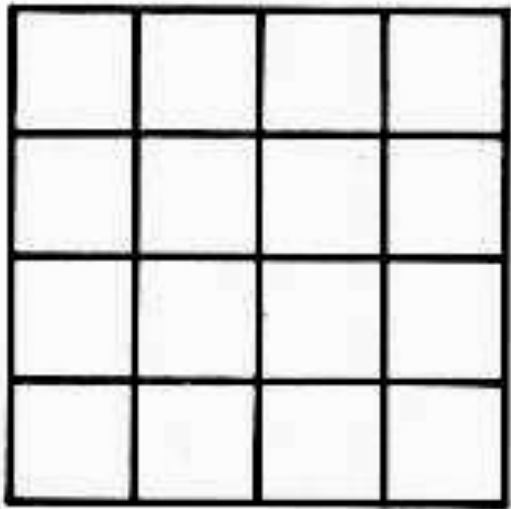
Figure 5.2

Радиальная дисторсия

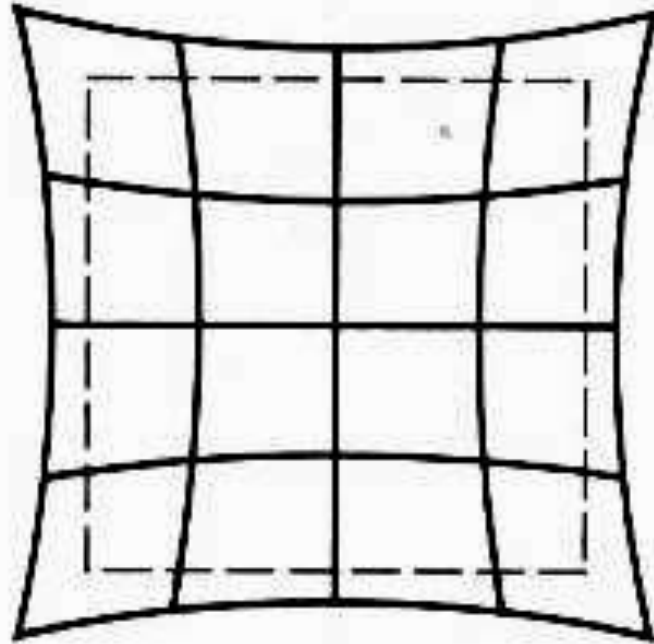


Прямые линии по краям изображения превращаются в кривые

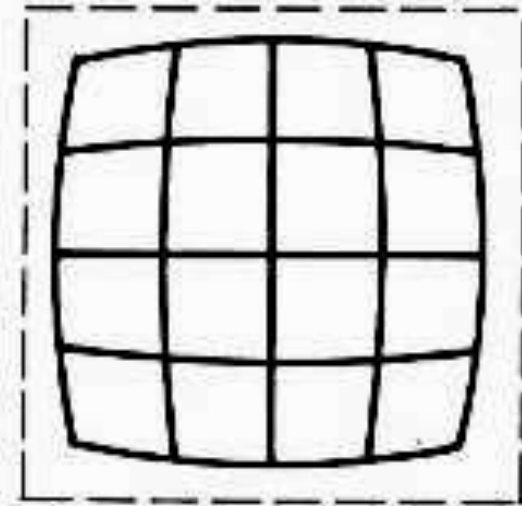
Радиальная дисторсия



Нет дисторсии



«Подушка» (положительная)



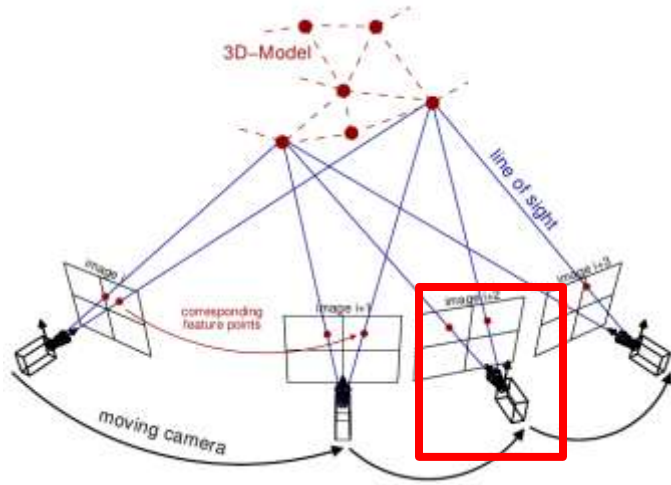
Бочкообразная

- Идеально тонких линз не бывает!
- Нарушается допущение $\sin(x) \sim x$
- Искажения наиболее заметны по краям изображения
- Приходится отдельно моделировать и устранять

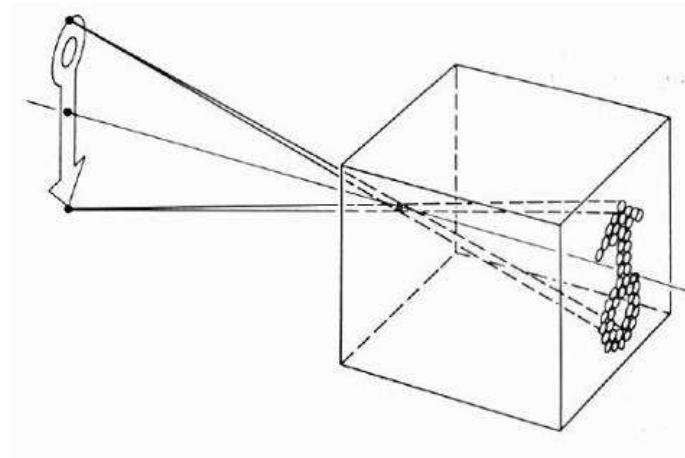


Модель перспективной проекции

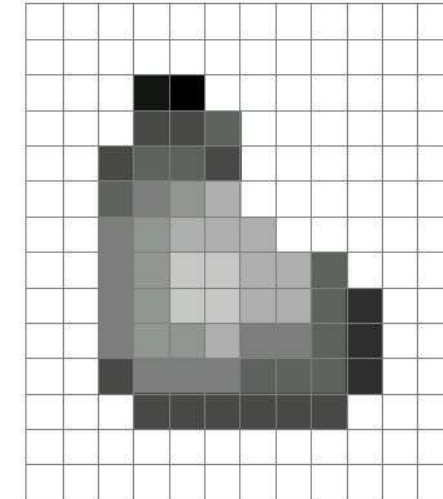
Модель формирования изображения



- Преобразование из мировой (общей) системы координат в камеру
- Определяется положением камеры в пространстве и ориентацией

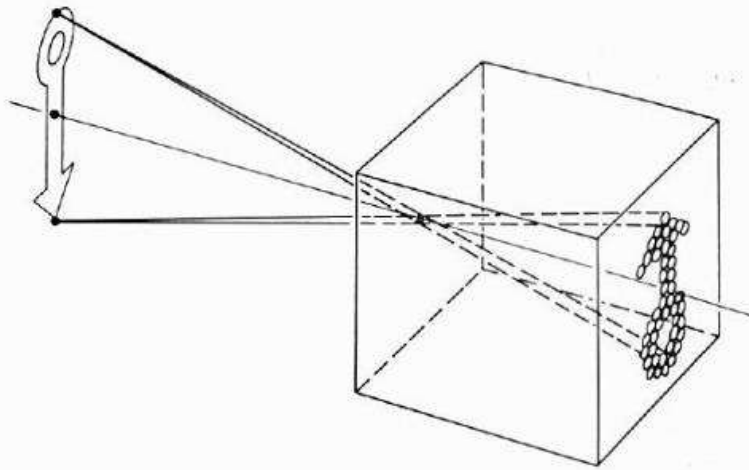


- Перспективная проекция
- Важно фокусное расстояние



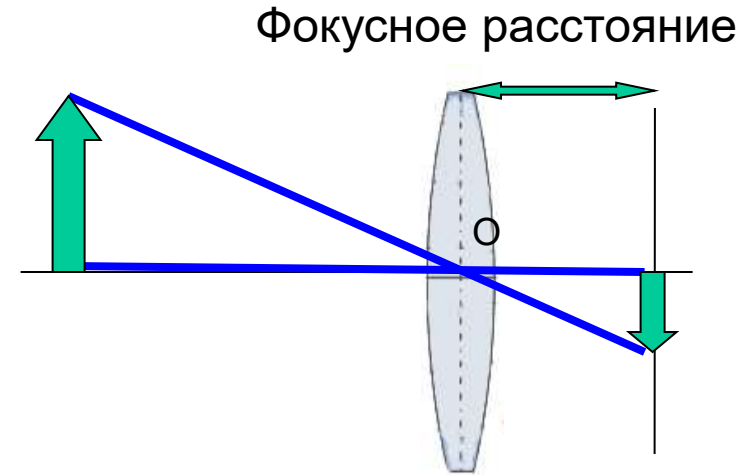
- Дискретное изображение на матрице

Модель камеры

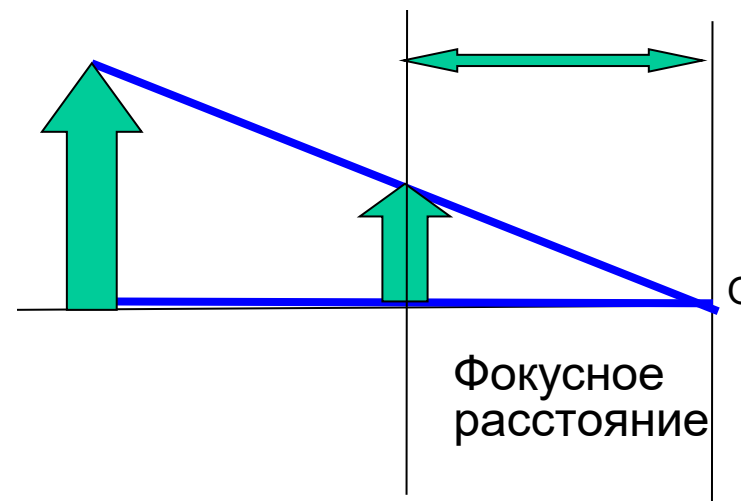


Камера-обскура

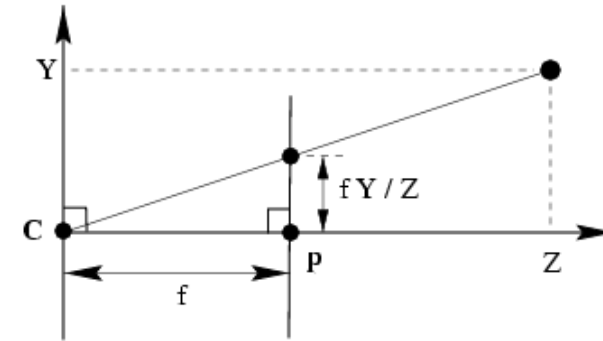
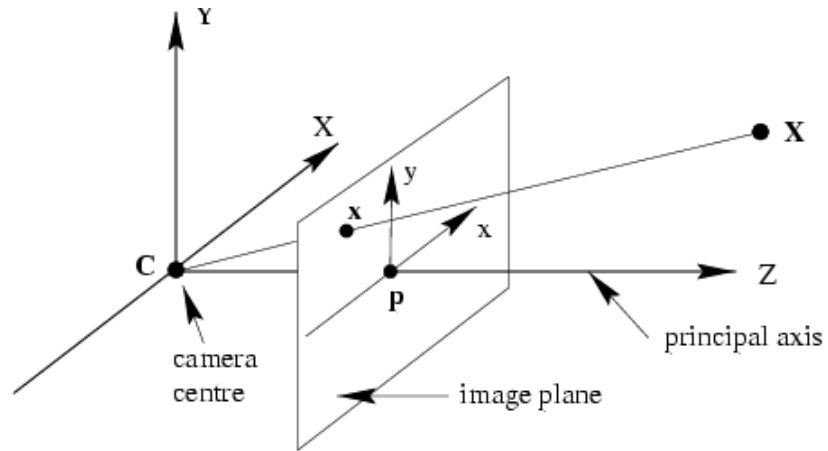
- Модель камеры-обскуры - перспективная проекция
- Перенесем объект на противоположенную сторону
- То же самое фокусное расстояние!
- Изображение нормальное, не перевернутое



Изображение перевернутое



Перспективная проекция



- $C = (0,0,0)$ – центр камеры (проекции)
- $X=(X,Y,Z)$ – точка в 3х мерном пространстве
- $x=(x,y,f)$ – проекция X на картинную плоскость

Тогда простейшее уравнение перспективной проекции:

$$x = f \frac{X}{Z} \quad y = f \frac{Y}{Z}$$

Перспективная проекция – нелинейное преобразование!

C , x , X лежат на одной прямой

Однородные координаты



Для удобства записи преобразований в матричной форме вводятся «однородные» (homogenous) координаты. Они активно используются в проективной геометрии, но нам они только ограниченно понадобятся

Перевод из обычных («неоднородных») в однородные:

$$(x, y) \Rightarrow \begin{bmatrix} wx \\ wy \\ w \end{bmatrix}$$

Однородные координаты
2D точки изображения

$$(x, y, z) \Rightarrow \begin{bmatrix} wx \\ wy \\ wz \\ w \end{bmatrix}$$

Однородные координаты
3D точки сцены

Перевод из однородных в обычные:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \Rightarrow (x/w, y/w)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} \Rightarrow (x/w, y/w, z/w)$$

Матрица перспективной проекции



$$x = f \frac{X}{Z} \quad y = f \frac{Y}{Z} \quad \rightarrow \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Простейшая запись

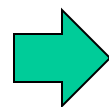
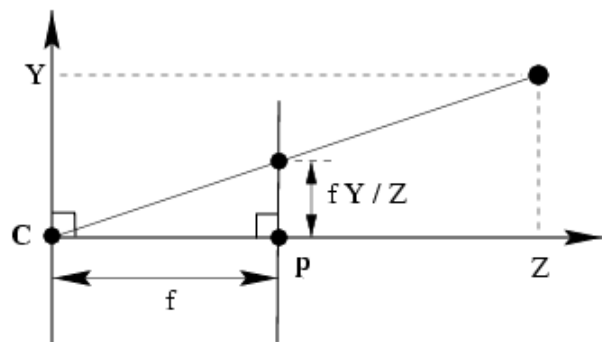
$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 \\ P_5 & P_6 & P_7 & P_8 \\ P_9 & P_{10} & P_{11} & P_{12} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Полная матрица перспективной проекции

Матрица проекции и внутренняя калибровка



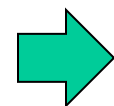
Факторизуем матрицу перспективной проекции



$$x = f \frac{X}{Z} \quad y = f \frac{Y}{Z}$$



$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$



$$P = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

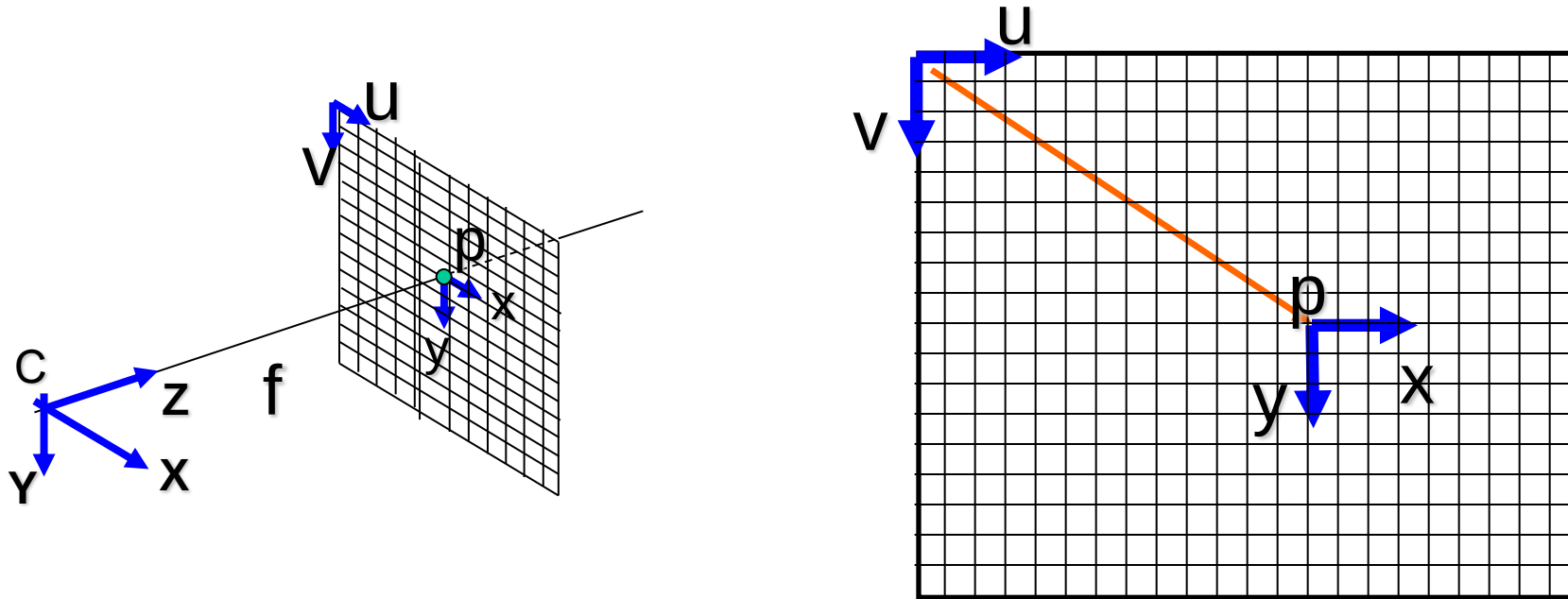


K



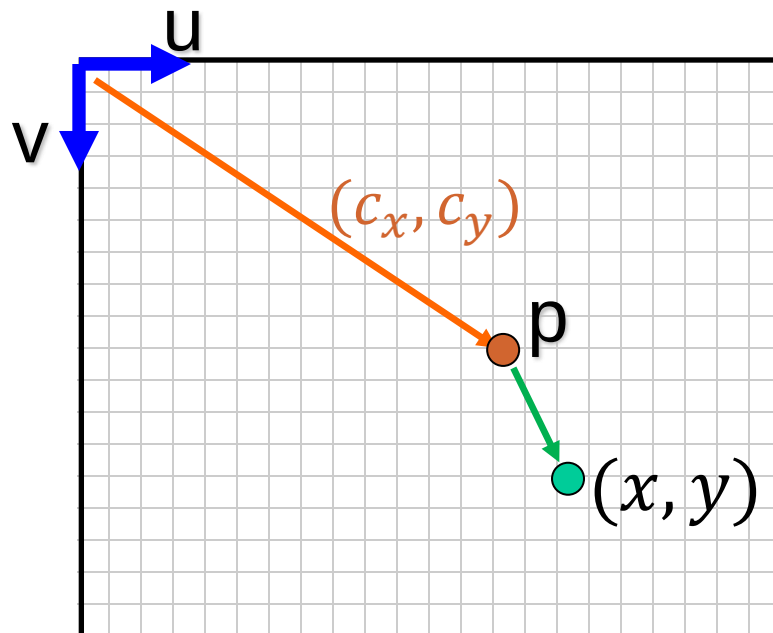
$[I | 0]$

Внутренняя калибровка



- p – основание перпендикуляра из C на картинную плоскость (принципиальная точка)
- $p = (0, 0, f)$ в координатах камеры, центр системы координат в картинной плоскости
- В картинной области расположена матрица (изображение)
- Нужно преобразовать из координат камеры в пиксельные

Внутренняя калибровка



- Для перевода в координаты изображения в пикселях нужно сделать масштабирование и сдвиг

$$(x, y) \rightarrow (sx + c_x, sy + c_y) \cong (x / pix + c_x, y / pix + c_y)$$

Где pix – размер пикселя, (c_x, c_y) – принципиальная точка в координатах изображения



$$(x, y) \rightarrow (sx + c_x, sy + c_y) \cong (x / pix + c_x, y / pix + c_y)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} 1 / pix & 0 & c_x \\ 0 & 1 / pix & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x / pix + c_x \\ y / pix + c_y \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 / pix & 0 & c_x \\ 0 & 1 / pix & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} f / pix & 0 & c_x \\ 0 & f / pix & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Внутренняя калибровка

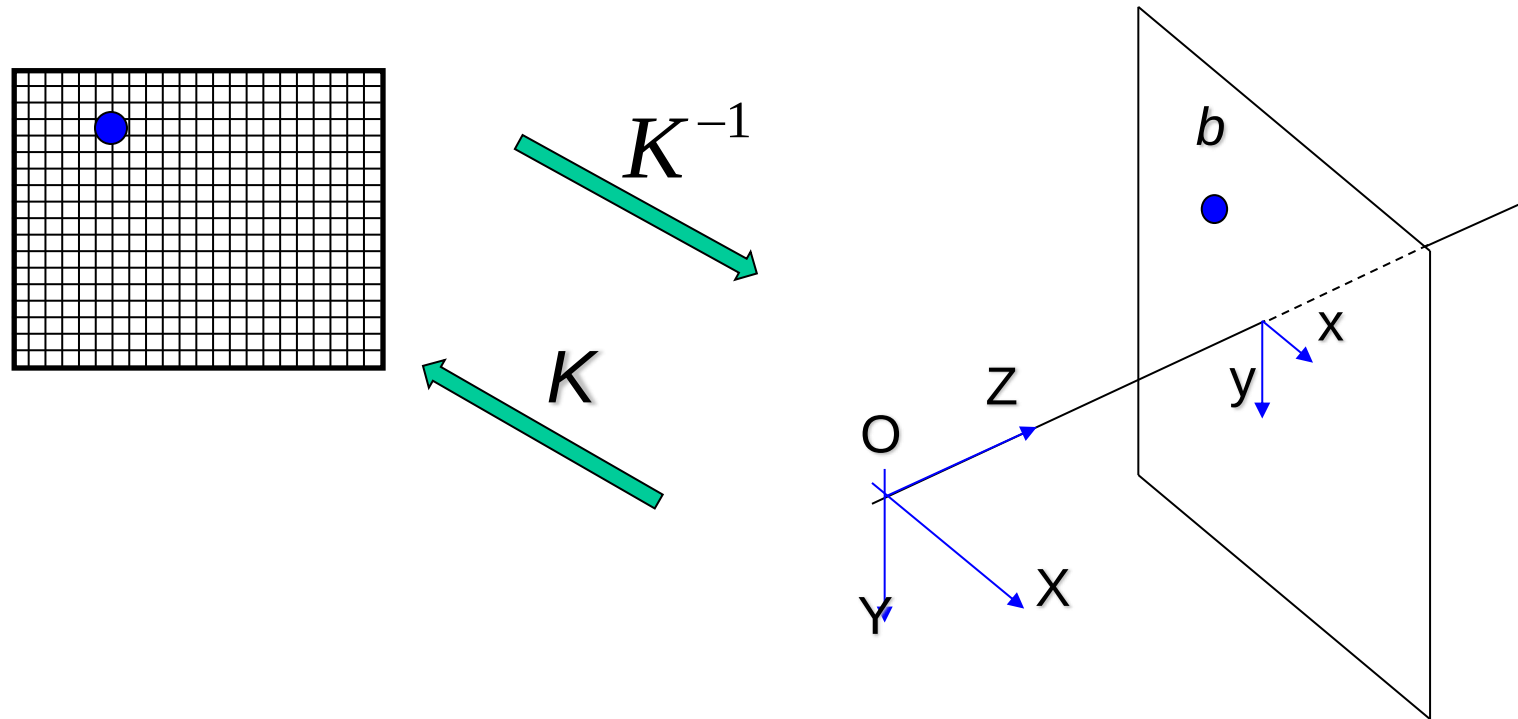


Или internal calibration, intrinsic calibration

$$K = \begin{bmatrix} a_x & s & c_x \\ 0 & a_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f / pix & s & c_x \\ 0 & f / pix & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

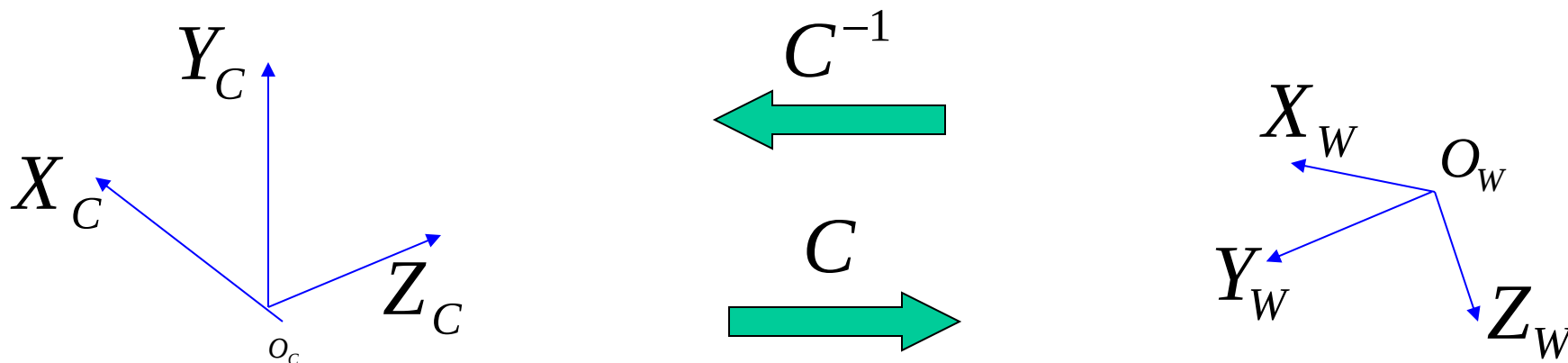
- a – масштабирующие коэффициенты
- s – наклон, угол между осями x и y изображения
- c – положение принципиальной точки изображения (в пикселях)
- f , pix – фокусное расстояние, размер пиксела

Полезно о внутренней калибровке



- Внутренняя калибровка K отображает точки с картинной плоскости (плоскости на расстоянии 1, в системе координат камеры) на изображение (в пиксели)
- Обратная матрица K^{-1} отображает точки изображения (в пикселях) на картинную плоскость (в систему координат камеры, с $f=1$)
 - Координаты в пространстве с центром в C будут $(x, y, 1, 1)$
 - Отображение точек на изображении в лучи

Из мировой в координаты камеры



$$C = \begin{bmatrix} R & T \\ [0,0,0] & 1 \end{bmatrix}$$

- Положение и ориентация камеры в мировых координатах задается евклидовым преобразованием C
- Обратное преобразование
 - Из мировых координат в координаты камеры
 - Обратное к C преобразование! – $\text{Inverse}(C)$

Внешняя калибровка



- Матрица преобразования из мировой системы координат в систему координат камеры называется матрицей *внешней калибровки* (*external calibration, extrinsic calibration*)

$$C^{-1} = \left(\begin{bmatrix} R & T \\ [0,0,0] & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} = \begin{bmatrix} R^T & -R^T T \\ [0,0,0] & 1 \end{bmatrix}$$

- Внешняя калибровка определяется положением и ориентацией камеры в пространстве

Углы поворота камеры

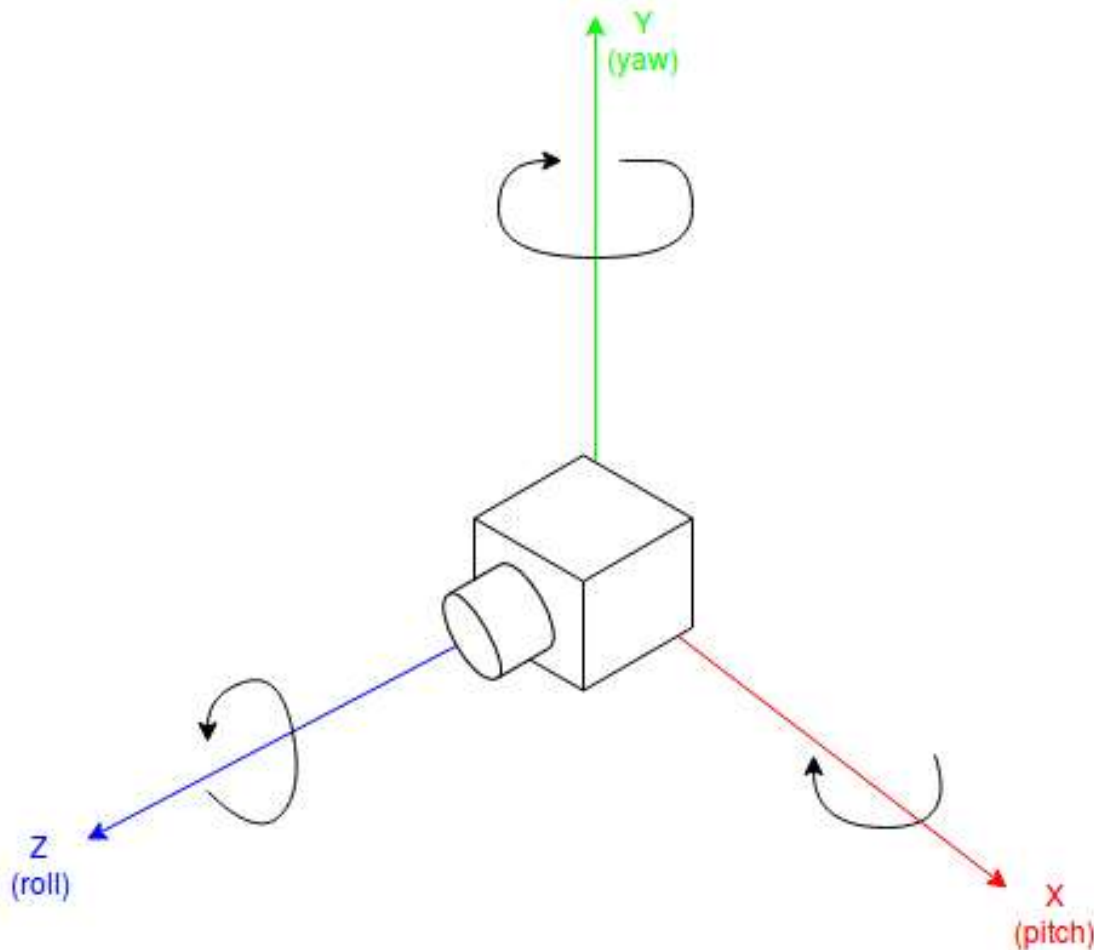


Origin: Pitch, yaw and roll are all zero when camera lays horizontally and points to North.

Pitch: goes positive if camera is pointing up, negative if camera is pointing down.

Yaw: goes positive if camera is pointing to the East, negative if camera is pointing to the West.

Roll: goes positive if camera is rotating to the right, negative if camera is rotating to the left.



Уравнение перспективной проекции



В матричном виде $X = PX$, где X - точка в 3D, x – точка на цифровом изображении (в пикселях), P – матрица проекции

$$P = K \cdot [I \mid 0] \cdot C^{-1}$$

Матрица проекции камеры Внутренняя калибровка Центральная проекция Внешняя калибровка

$$K = \begin{bmatrix} a_x & s & c_x \\ 0 & a_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f / \text{pix} & s & c_x \\ 0 & f / \text{pix} & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Внутренняя калибровка отображает точки с идеальной картинной плоскости в пиксели

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Проекция на идеальную картинную плоскость

$$C^{-1} = \left(\begin{bmatrix} R & T \\ [0,0,0] & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} = \begin{bmatrix} R^T & -R^T T \\ [0,0,0] & 1 \end{bmatrix}$$

Матрица внешней калибровки определяется положением и ориентацией камеры в мировой системе координат

Радиальная дисторсия



- Прямые линии по краям изображения превращаются в кривые
- Точки смещаются вдоль радиуса от принципиальной точки
- Модель дисторсии Tsai:

$$\hat{x} = x + L(r)x \quad r^2 = x^2 + y^2$$

$$\hat{y} = y + L(r)y \quad L(r) \approx k_1 r^2 + k_2 r^4$$

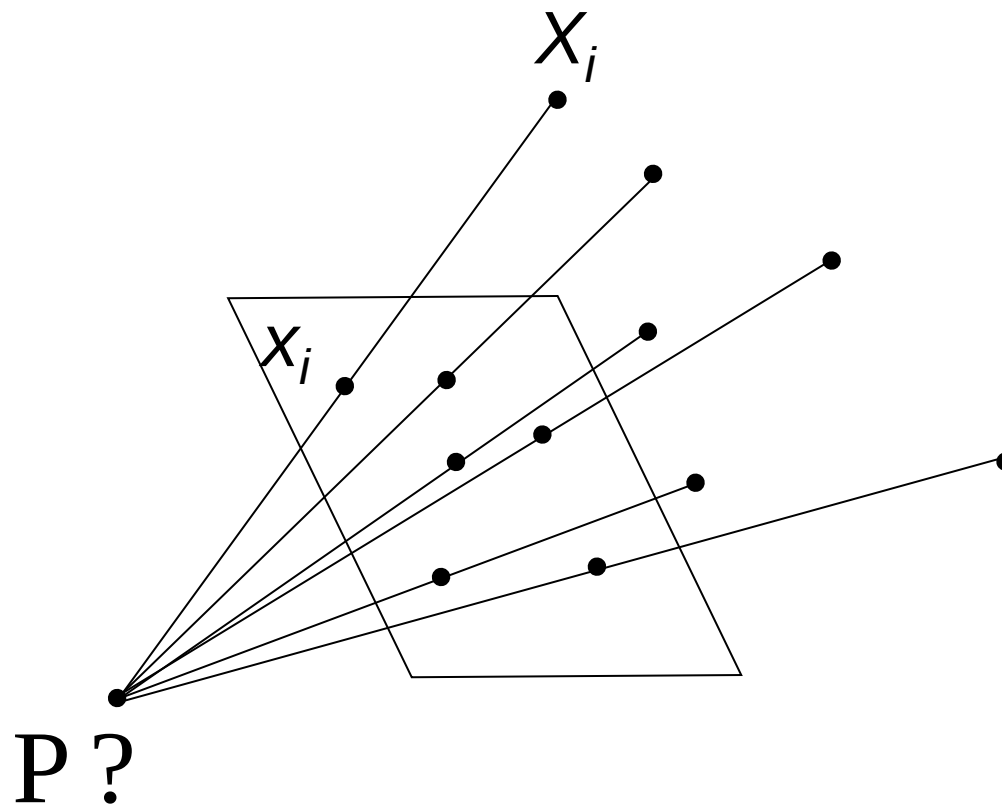


Калибровка камеры

Калибровка камеры (PnP-проблема)



Perspective- n -point problem (PnP) - даны n точек с известными 3D координатами X_i и известными проекциями x_i , оценить параметры камеры



DLT-метод



Direct Linear Transformation (прямое линейное преобразование)

$$\lambda \mathbf{x}_i = \mathbf{P} \mathbf{X}_i \quad \lambda \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1^T \\ \mathbf{P}_2^T \\ \mathbf{P}_3^T \end{bmatrix} \mathbf{X}_i \quad \begin{bmatrix} wx \\ wy \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} p_{12} p_{13} p_{14} \\ p_{21} p_{22} p_{23} p_{24} \\ p_{31} p_{32} p_{33} p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

- Каждая пара 2D-3D даёт нам 2 линейно-независимых уравнения на параметры матрицы калибровки
- У $\mathbf{P}$ 11 степеней свободы (12 параметров, но масштаб произвольный)
- 6 соответствий необходимо для решения (p6p)



- Нам известны (x, y) и (X, Y, Z) , нужно найти p

$$\begin{bmatrix} wx \\ wy \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

- Выпишем 3 уравнения на wx , wy , w , избавимся от w :

$$\begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -xX & -xY & -xZ & -x \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 1 & -yX & -yY & -yZ & -y \end{bmatrix} p = 0$$

- Сводим к задаче $Ap = 0$ при $\|p\| = 1$, которую можем решить с помощью МНК



- $Ap = 0$ при $\|p\| = 1$
- Пусть $A = USV^T$ (SVD-разложение), где U, V – ортогональные, S – диагональная из сингулярных чисел
- $\|USV^T p\| = \|SV^T p\|$ и $\|V^T p\| = \|p\|$ из-за ортогональности U и V
- Сделаем замену $y = V^T p$
- Тогда нам нужно найти минимум $\|Sy\|$ при $\|y\| = 1$
- Это достигается при $y = [0, 0, \dots, 0, 1]$, т.к. сингулярные числа упорядочены по убыванию
- $p = Vy$ и значит p равно последнему столбцу V



Калибровка камеры

- Когда мы получили матрицу проекции, нам необходимо извлечь из неё внутренние и внешние параметры калибровки
- Представим матрицу проецирования в следующем виде:

$$P = KR^T [I \mid -T] = [M \mid -MT]$$

- $T=C$ (центр камеры). Его можно найти так:
 - $PC = 0$
 - Применим SVD разложение к P
 - C – правый сингулярный вектор, соответствующий наименьшему сингулярному числу
- Для разложения M в KR^T воспользуемся RQ-факторизацией
 - Q – ортогональная матрица
 - K – верхнетреугольная

“Gold Standard”



- Метод «Золотого стандарта» – метод, оптимизирующий параметры по наиболее корректной, оптимальной метрике
- В случае калибровки камеры, это расстояния от проекций 3D точек до их измеренных значений (ошибка репроекции):

$$\min_P \sum_i d^2(x_i, PX_i)$$

- Требует использования нелинейных методов оптимизации (градиентный спуск и т.д.)
- Лучше использовать «мягкие» ограничения на параметры

$$\min_P \sum_i d^2(x_i, PX_i) + w_1 s^2 + w_2 (f_x - f_y)$$

Как быть при наличии ошибок в данных?



- Нужен робастный метод
- Подойдет метод RANSAC
- Идея RANSAC:
 - Берём случайно выборку из 6 точек (2d,3d)
 - Оценим камеру по ним
 - Посчитаем, сколько всего точек удовлетворяет модели (имеют ошибку ниже порога)
 - Оставим наиболее согласованную со всеми точками

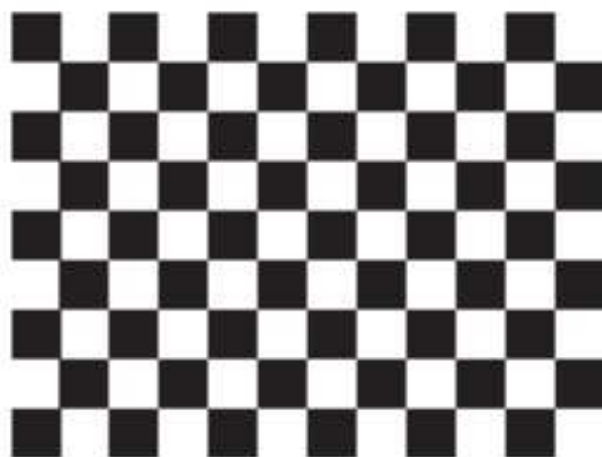
Схема калибровки камеры



- RANSAC с DLT-методом для получения матрицы проецирования
- RQ-факторизация для извлечения матрицы внутренней калибровки K и внешней калибровки R и T
- Уточнение параметров калибровки с помощью нелинейной оптимизации ошибки репроекции:

$$\min_P \sum_i d^2(x_i, P X_i)$$

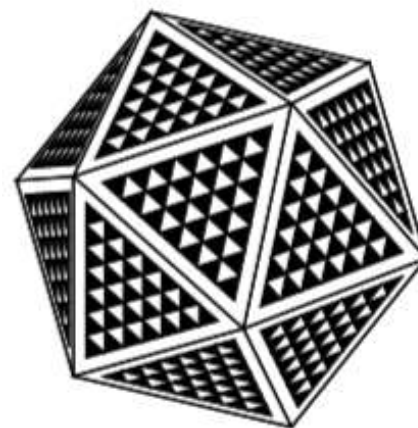
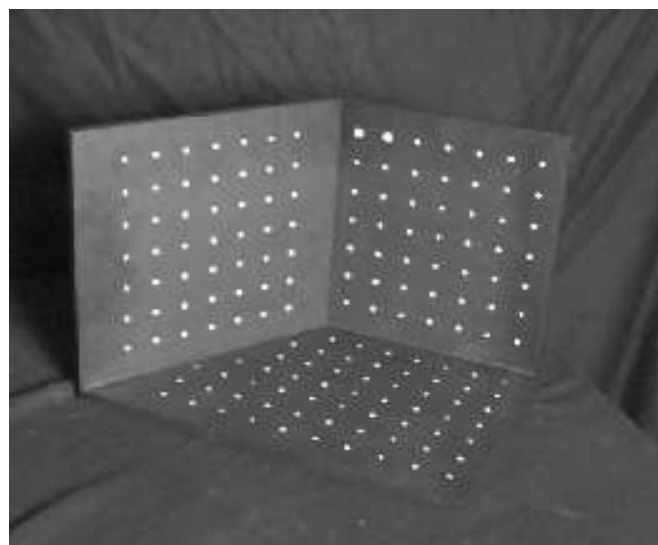
Калибровочные шаблоны



(a) Checkerboard



(b) Deltille Grid



(c) Icosahedron



Что мы можем узнать из фотографии?

Обычные фотографии



- Получены разными пользователями с разных фотоаппаратов



iPhone 3G



Nikon D3

Внутренняя калибровка



File size : 85111 bytes
File date : 2005:12:16 04:17:12
Camera make : Panasonic
Camera model : DMC-FZ20
Date/Time : 2005:03:19 12:52:33
Resolution : 450 x 600
Flash used : No
Focal length : 6.0mm
Exposure time: 0.0012 s (1/800)
Aperture : f/5.6
ISO equiv. : 80
Whitebalance : Auto
Metering Mode: matrix
Exposure : program (auto)

Структура EXIF-данных

Параметры камеры



Digital Photography Review
dpreview.com

search

Latest News
Reviews / Previews
Lens Reviews
Camera Database
Timeline
Buying Guide
Sample Galleries
Challenges
Discussion Forums
Learn / Glossary
Feedback
Newsletter
Blog
Feeds
About

Panasonic Lumix DMC-FZ20 digital camera specifications

Image	
More information	In-depth review Samples gallery Announced 21-Jul-04 All Panasonic products Panasonic website
Discussion	Panasonic Talk Forum Find related discussion
Owners opinions	★★★★★ Read owners opinions (201) Post / Edit your opinion
Format	Compact SLR-like
Price (street)	
Also known as	
Release Status	Discontinued
Max resolution	2560 x 1920
Low resolution	2048 x 1536, 1920 x 1080, 1600 x 1200, 1280 x 960, 640 x 480
Image ratio w:h	4:3, 16:9
Effective pixels	5.0 million
Sensor photo detectors	5.3 million
Sensor size	1/2.5" (5.75 x 4.31 mm, 0.24 cm ²)
Pixel density	20 MP/cm ²
Sensor type	CCD

http://www.dpreview.com/reviews/specs/Panasonic/panasonic_dmc-fz20.asp



$$K = \begin{bmatrix} f/pix & s & c_x \\ 0 & f/pix & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

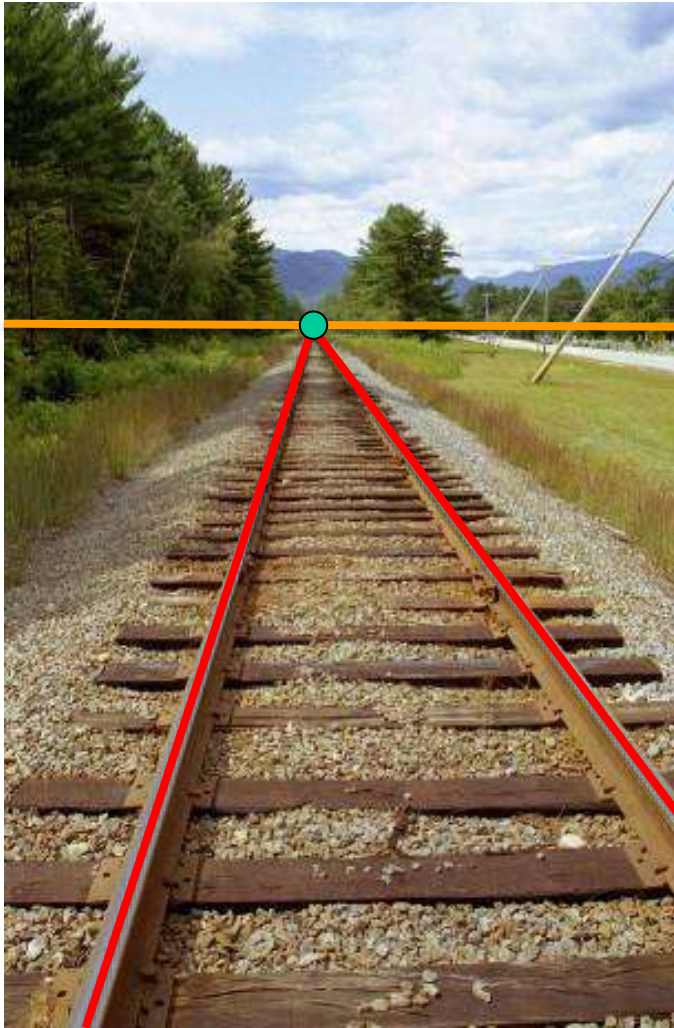
- $pix = \frac{sensor\ width}{image\ width}$
- $f_{pix} = \frac{focal\ length}{pix}$
- $c_x = \frac{imagewidth}{2}$
- $c_y = \frac{imageheight}{2}$
- $s = 0$

Хорошее начальное приближение!



Точки и линии схода

Некоторые геометрические свойства

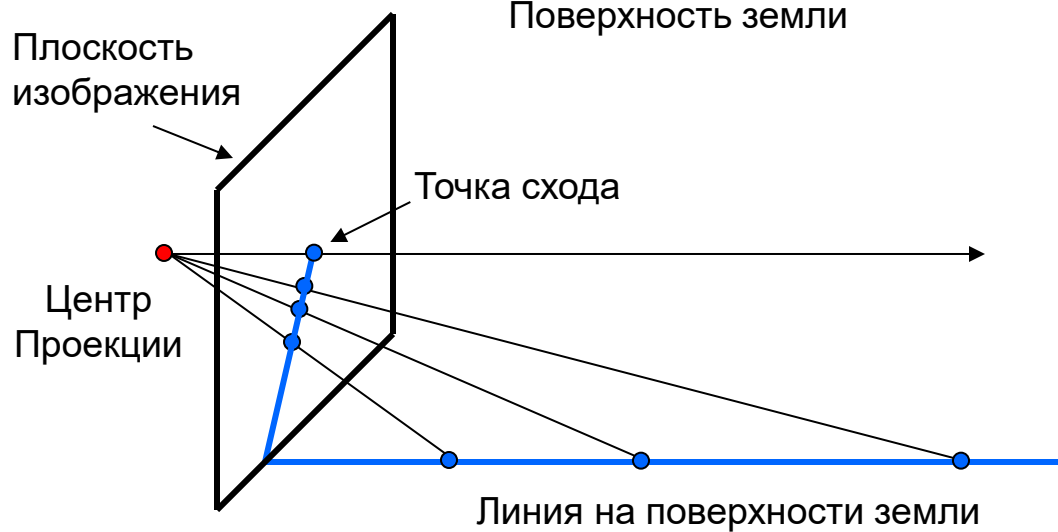
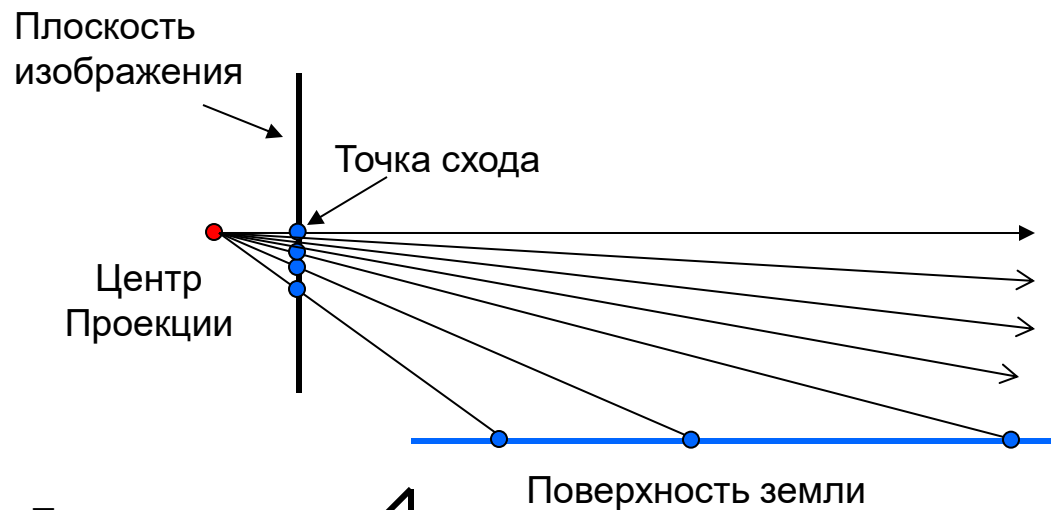


- **Линия горизонта** – линия пересечения плоскости земли и плоскости в бесконечности
- **Параллельные** (в 3D) **линии** пересекаются в точке, лежащей на линии горизонта
- Эта точка называется **точкой схода** (исчезающей точкой, vanishing point)

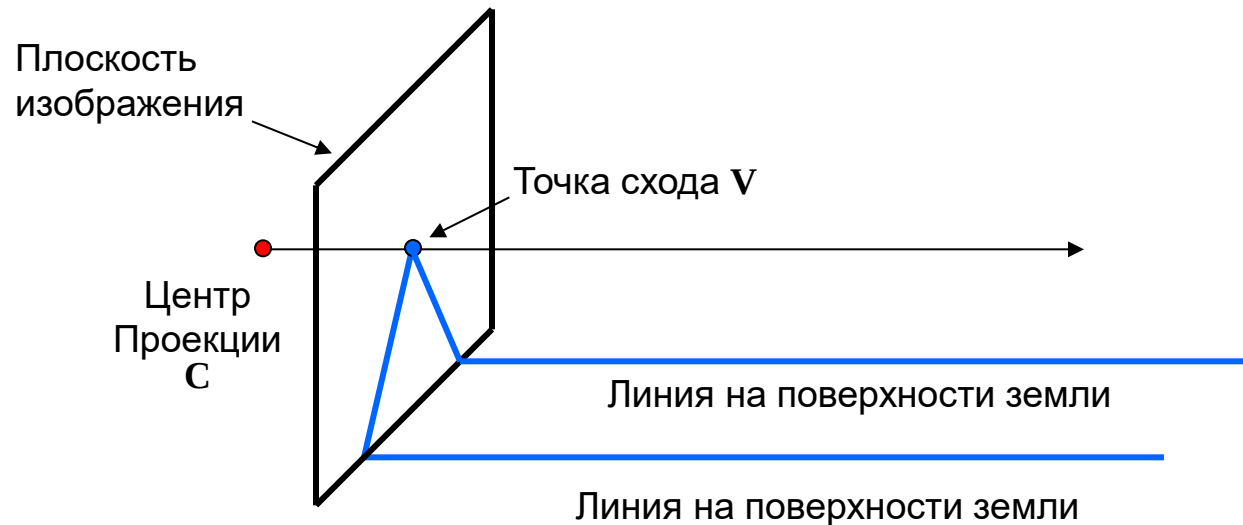
Точки схода (Vanishing point)



Проекция точки в бесконечности

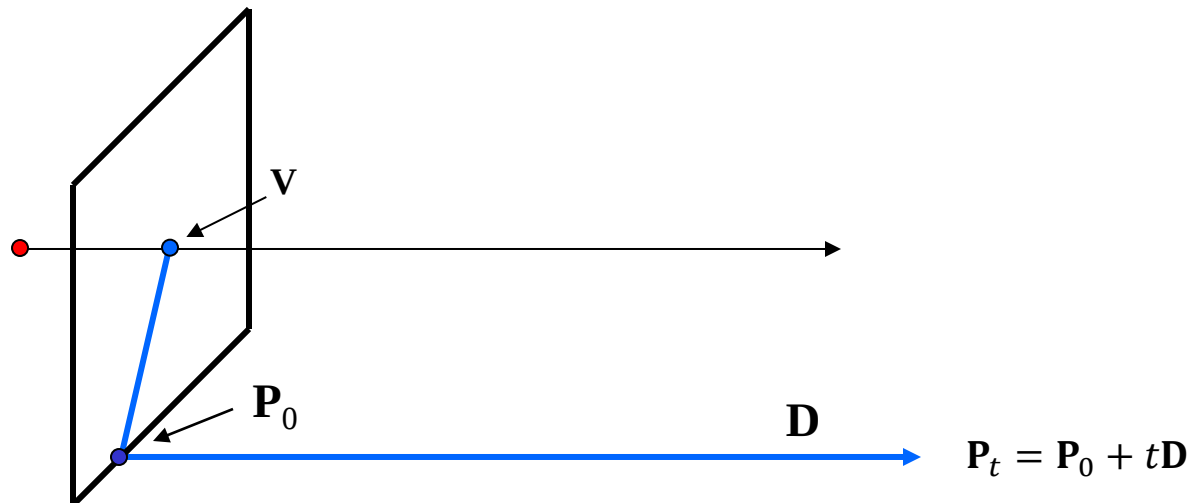


Свойства точек схода



- Луч из центра проекции **С**, проходящий через точку схода **v**, параллелен линии, которая породила эту точку схода **v**
 - Почему?
 - » Лежат в одной плоскости
 - » Не пересекаются
- У всех параллельных линий одна и та же точка схода **v**
- Точка схода – точка на изображении, где пересекаются проекции параллельных в пространстве прямых
- На изображении может быть сколько угодно точек схода
 - Каждый пиксель может быть точкой схода

Вычисление точек схода

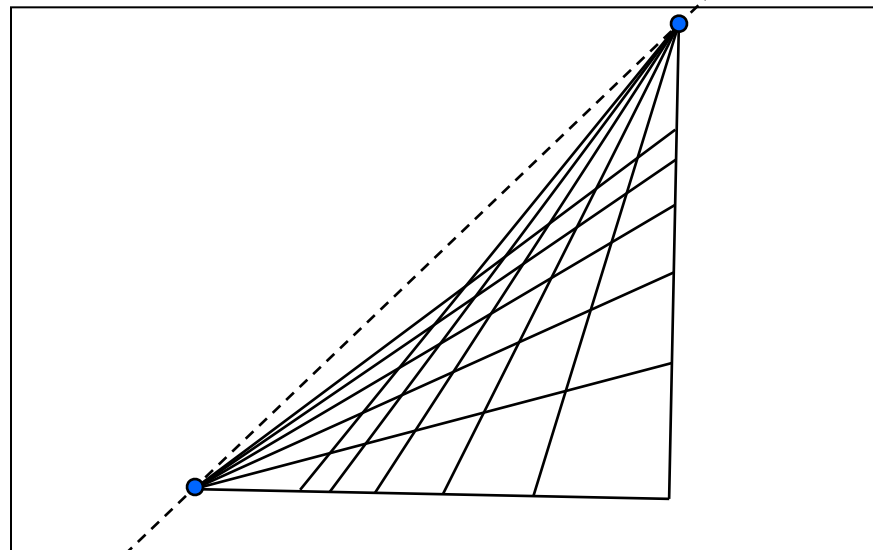
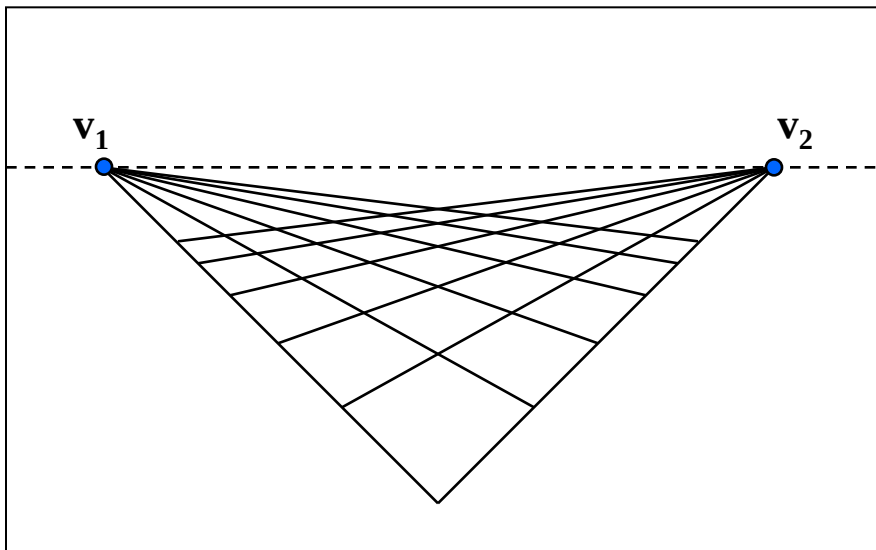


$$\mathbf{P}_t = \begin{bmatrix} P_X + tD_X \\ P_Y + tD_Y \\ P_Z + tD_Z \\ 1 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} P_X / t + D_X \\ P_Y / t + D_Y \\ P_Z / t + D_Z \\ 1/t \end{bmatrix} \quad t \rightarrow \infty \quad \mathbf{P}_\infty \cong \begin{bmatrix} D_X \\ D_Y \\ D_Z \\ 0 \end{bmatrix}$$

Свойства $\mathbf{v} = \mathbf{P}\mathbf{P}_\infty$

- $\mathbf{P}_\infty$ - точка в бесконечности, $\mathbf{v}$ – ее проекция
- Они зависят от направления прямой
- Все параллельные линии $\mathbf{P}_0 + t\mathbf{D}$, $\mathbf{P}_1 + t\mathbf{D}$ пересекаются в $\mathbf{P}_\infty$

Линия схода (vanishing line)

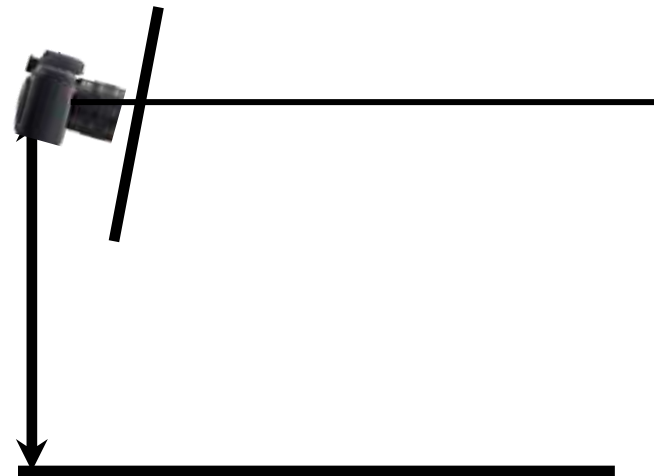
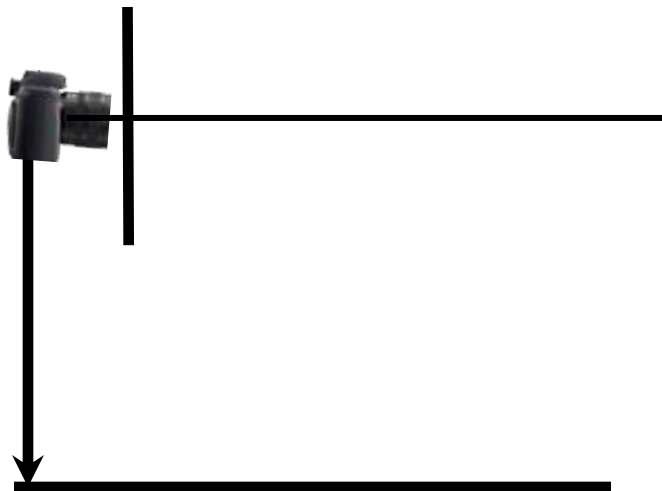


- Каждая точка изображения – точка схода для «пучка» параллельных прямых
- Совокупность точек схода для всех пучков параллельных прямых, лежащих в одной плоскости, составляет прямую линию
- Такая прямая линия называется **линией схода (или исчезающей линией)**
- Для горизонтальной плоскости - **линия горизонта**
- Различные плоскости определяют различные линии схода



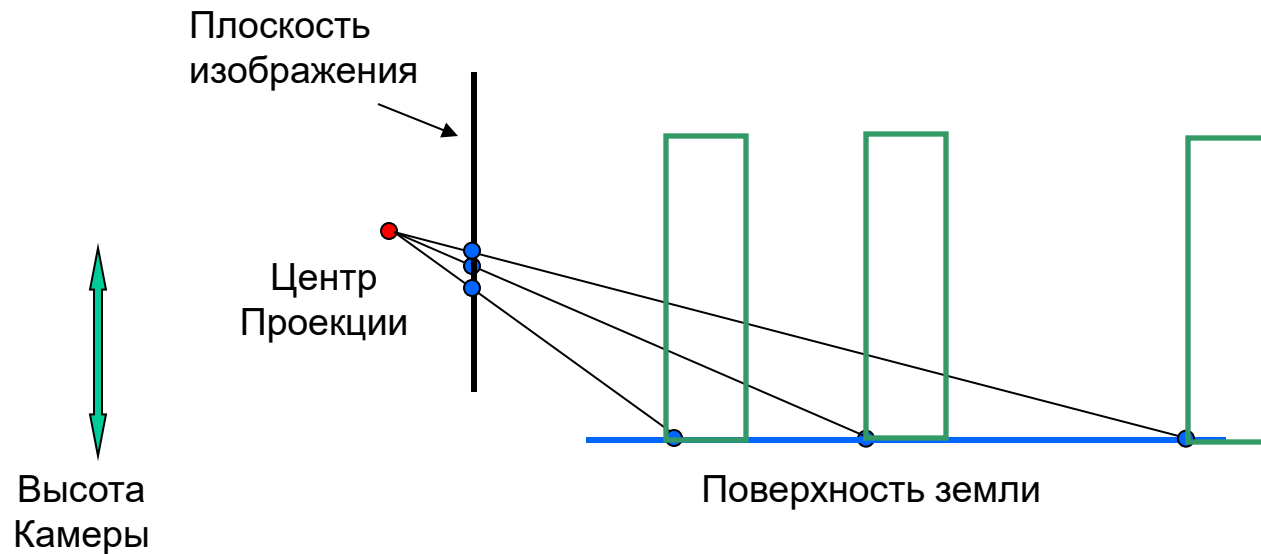
Применение линии горизонта

Линия горизонта



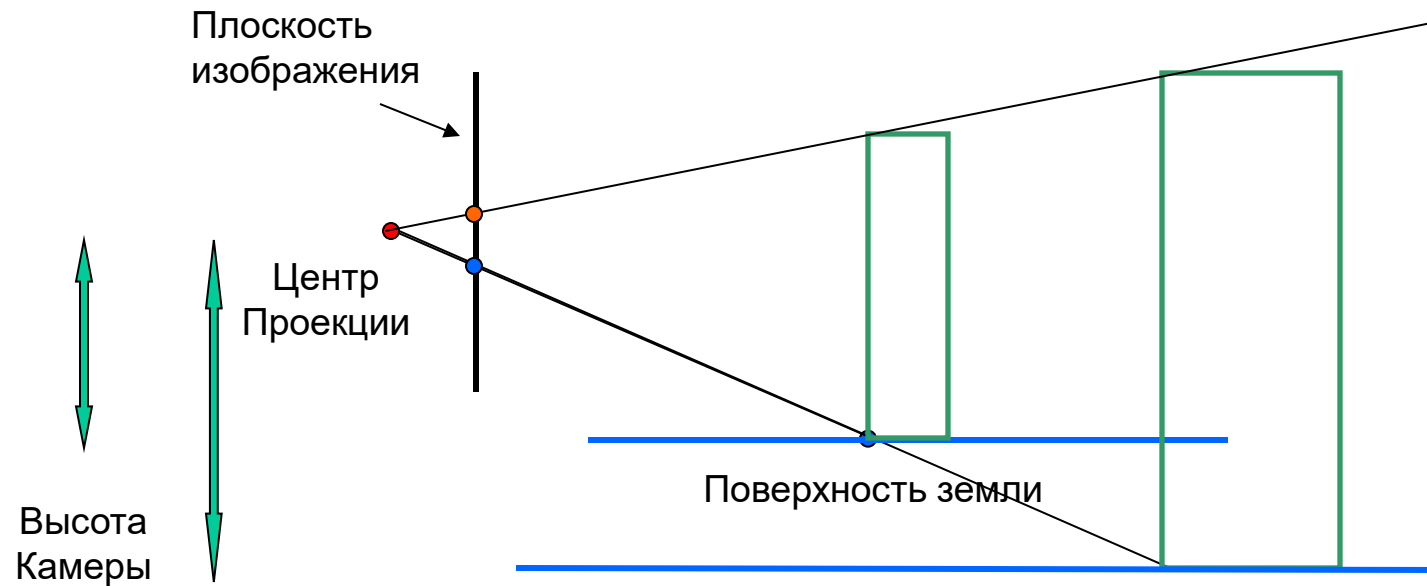
- Положение линии горизонта на изображении задает ориентацию камеры относительно плоскости «земли»
 - Если известна внутренняя калибровка камеры
 - Для JPEG-файлов калибровку можем считать известной
- Определение линии горизонта дает ориентацию из внешней калибровки камеры

Применение горизонта



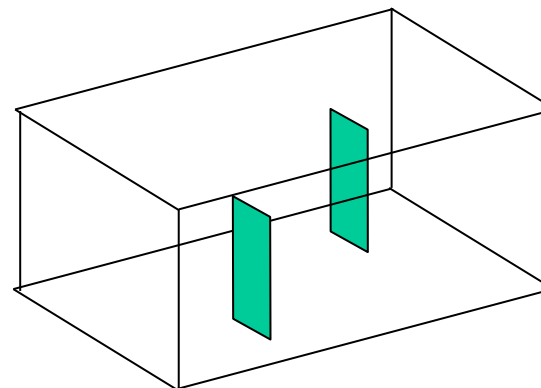
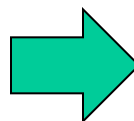
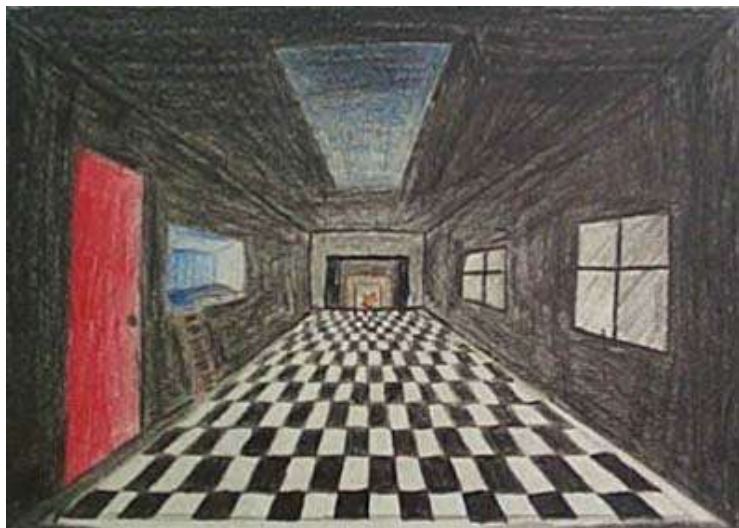
- Определив линию горизонта (калибровку камеры) и зафиксировав высоту камеры мы можем вычислять положение и размер объектов, расположенных на земле
- Пересечение луча из ЦП проходящего через выделенную точку здания с плоскостью земли определяет его положение на земле
- Объекты можно моделировать их с помощью спрайта (плоскости с маской прозрачности)

Высота камеры



- Высота камеры задает масштаб реконструируемой сцены
- Известная высота камеры позволяет вычислять истинные расстояния и размеры объектов
- Может быть задана как высота человека или штатива

«Tour into picture»



- Интерактивная система реконструкции
- Модель сцены в виде «комнаты»
- Объекты в виде «спрайтов»

Y. Horry et al., "Tour Into the Picture: Using a spidery mesh user interface to make animation from a single image", Proc. SIGGRAPH 97, 1997.

Схема

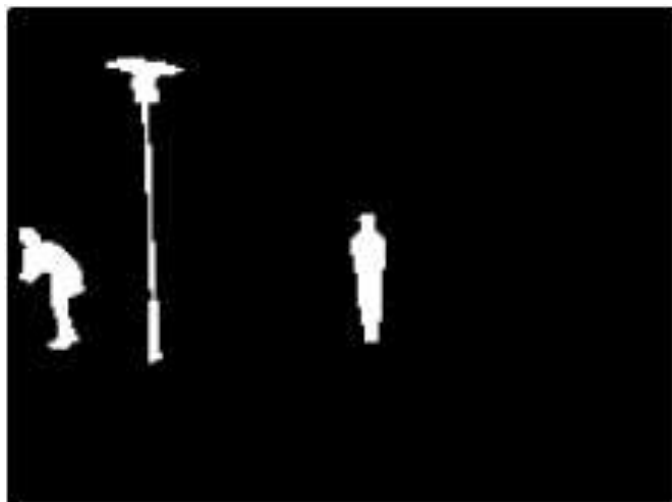


- Пользователь задает точку схода на изображении по прямым линиям
- Прямоугольником задает заднюю «стенку» сцены

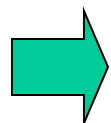
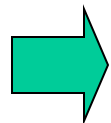
TIP: Моделирование объектов



Модель сцены



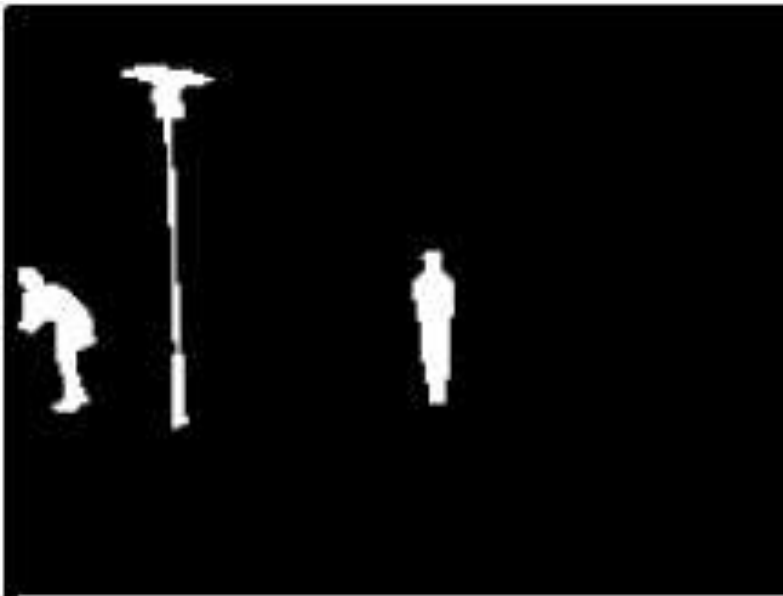
Выделенные объекты



Спрайты

- Спрайт – 2Д полигон с текстурой с картой прозрачности
- Карта прозрачности задаётся маской сегментации
- Глубина спрайтов определяется по положению на земле

TIP: Реконструкция текстуры



- Текстура, скрытая дополнительными объектами должна быть реконструирована
- В простейшем случае – с помощью копирования текстуры с видимых областей (“cloning brush”)

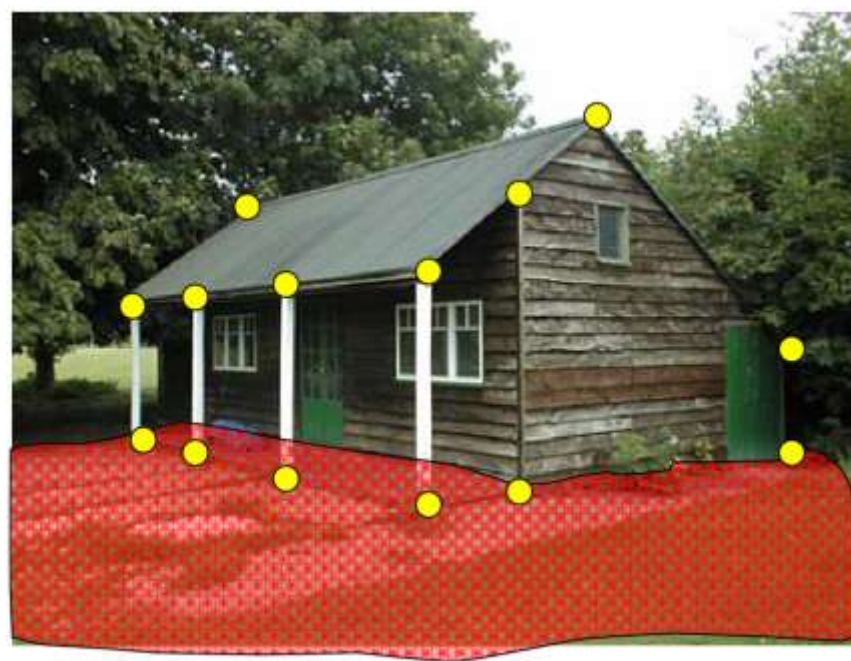
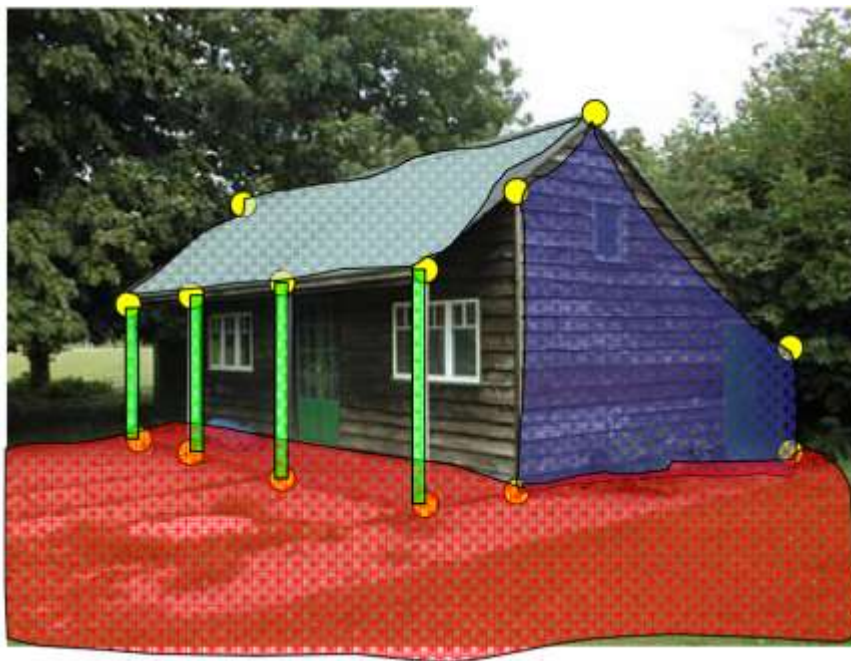
Пример визуализации



Single View Metrology



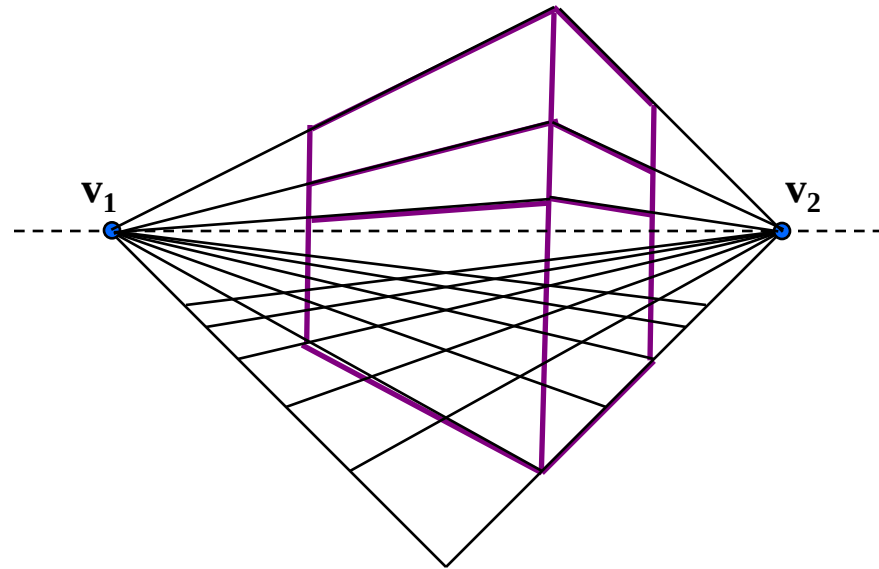
- Измерения между параллельными линиями
- Измерения между параллельными плоскостями
- Определение позиции камеры





Нахождение точек схода и линии горизонта

Вычисление линии горизонта



- В городских сценах много прямых линий (отрезков) параллельных и перпендикулярных земле
 - Линии не обязательно должны лежать на плоскости земли
- Точка схода для вертикальных линий – «зенит»
- Точки схода для горизонтальных линий лежат на линии горизонта
- Мы можем выбрать линию горизонта как самую «горизонтальную»

Вычисление точек схода



- Поиск прямых отрезков / линий на изображении
- Группировка линий по точкам пересечения
 - Робастные методы (схемы голосования, RANSAC)
- Уточнение точек схода для каждой группы линий



a



b



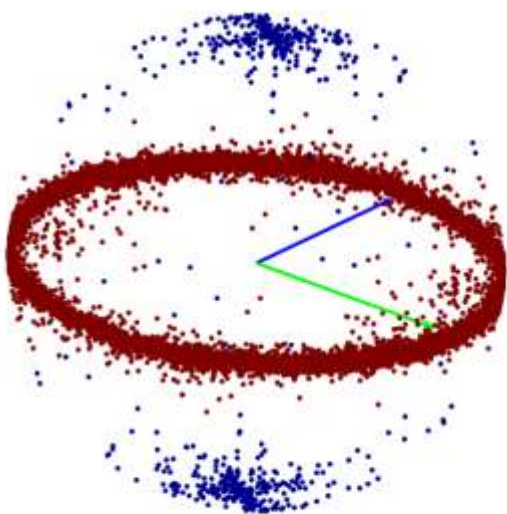
Нейросетевые методы



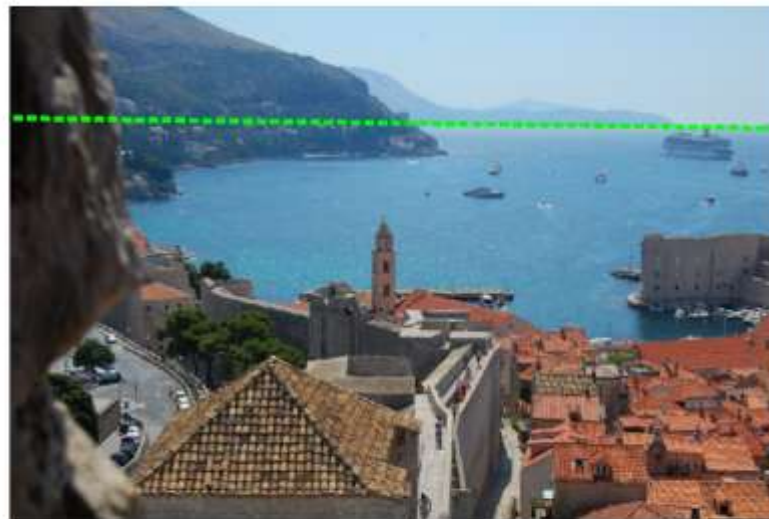
Наивный подход – дискретизируем сеткой точки схода,
каждая ячейка – класс, предсказываем «класс» сеткой
(красный – top1, синие – top5)

<https://arxiv.org/pdf/1609.00967.pdf>

Deep Horizon



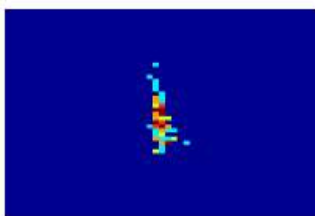
(a)



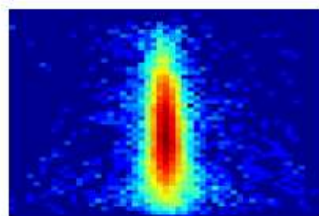
(b)



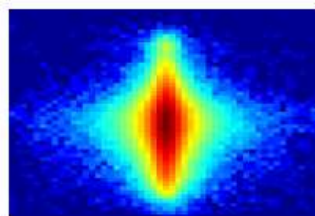
(a) ECD



(b) YUD



(c) HLW



(d) HLW + Street-Side

Figure 3: Distribution of horizon lines for images in HLW versus other benchmark datasets (red = higher likelihood). The x -axis is slope and the y -axis is vertical offset.

Table 1: Evaluation of our networks on HLW and ECD.

Loss		HLW (<i>held</i>)		HLW (<i>all</i>)		ECD	
		(θ, ρ)	(l, r)	(θ, ρ)	(l, r)	(θ, ρ)	(l, r)
Classification							
ImageNet	Softmax	64.49%	62.10%	69.02%	67.08%	82.28%	82.99%
Places	Softmax	65.73%	59.54%	69.97%	67.38%	83.96%	80.45%
PoseNet	Softmax	60.49%	61.35%	61.65%	63.56%	78.36%	77.77%
Salient	Softmax	64.65%	62.10%	67.60%	67.25%	82.62%	80.11%
Random	Softmax	62.27%	56.64%	67.58%	62.75%	78.63%	77.17%
Regression							
Places	L_2	44.54%	45.86%	46.84%	49.10%	71.43%	69.70%
Best	L_2	55.54%	56.55%	60.78%	62.16%	76.65%	76.59%
Places	Huber	53.11%	53.85%	57.79%	58.78%	76.72%	76.72%
Best	Huber	62.86%	63.23%	67.19%	67.27%	81.19%	81.85%
Regression (regularized w/ classification)							
Best	L_2	57.29%	58.48%	63.92%	64.41%	79.24%	82.89%
Best	Huber	60.38%	60.51%	67.18%	66.66%	81.79%	82.55%
Other							
Lezama et al. [14]		51.32%		52.59%		89.57%	
Zhai et al. [23]		57.33%		58.24%		90.80%	

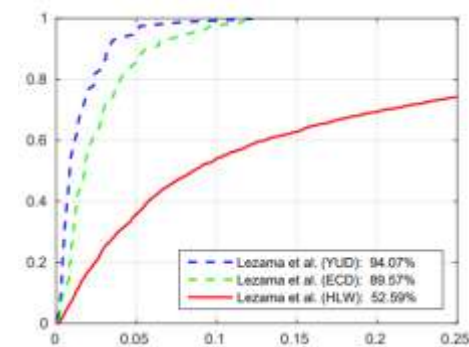
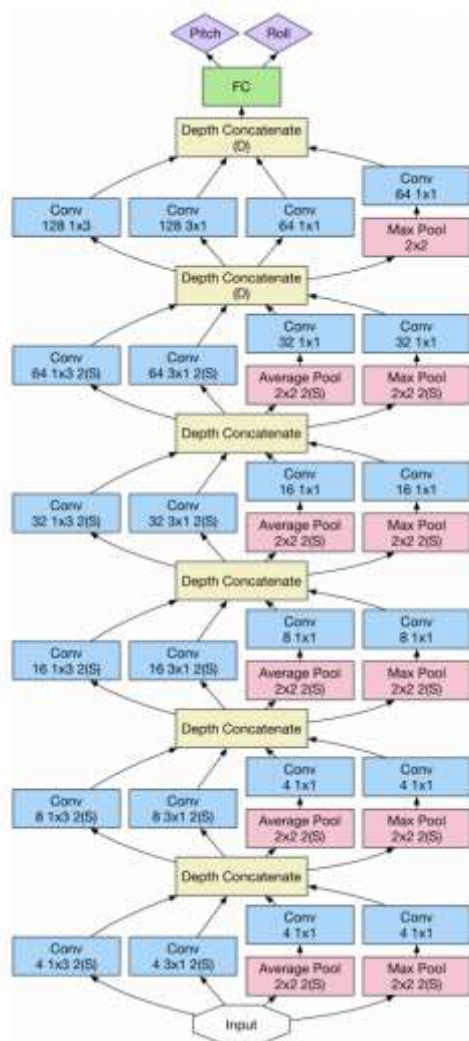
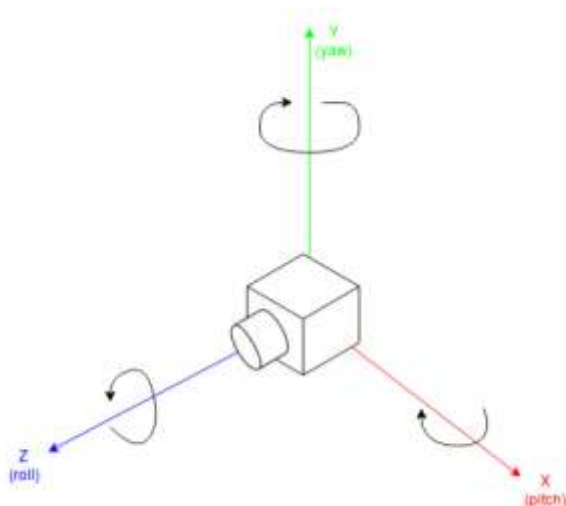


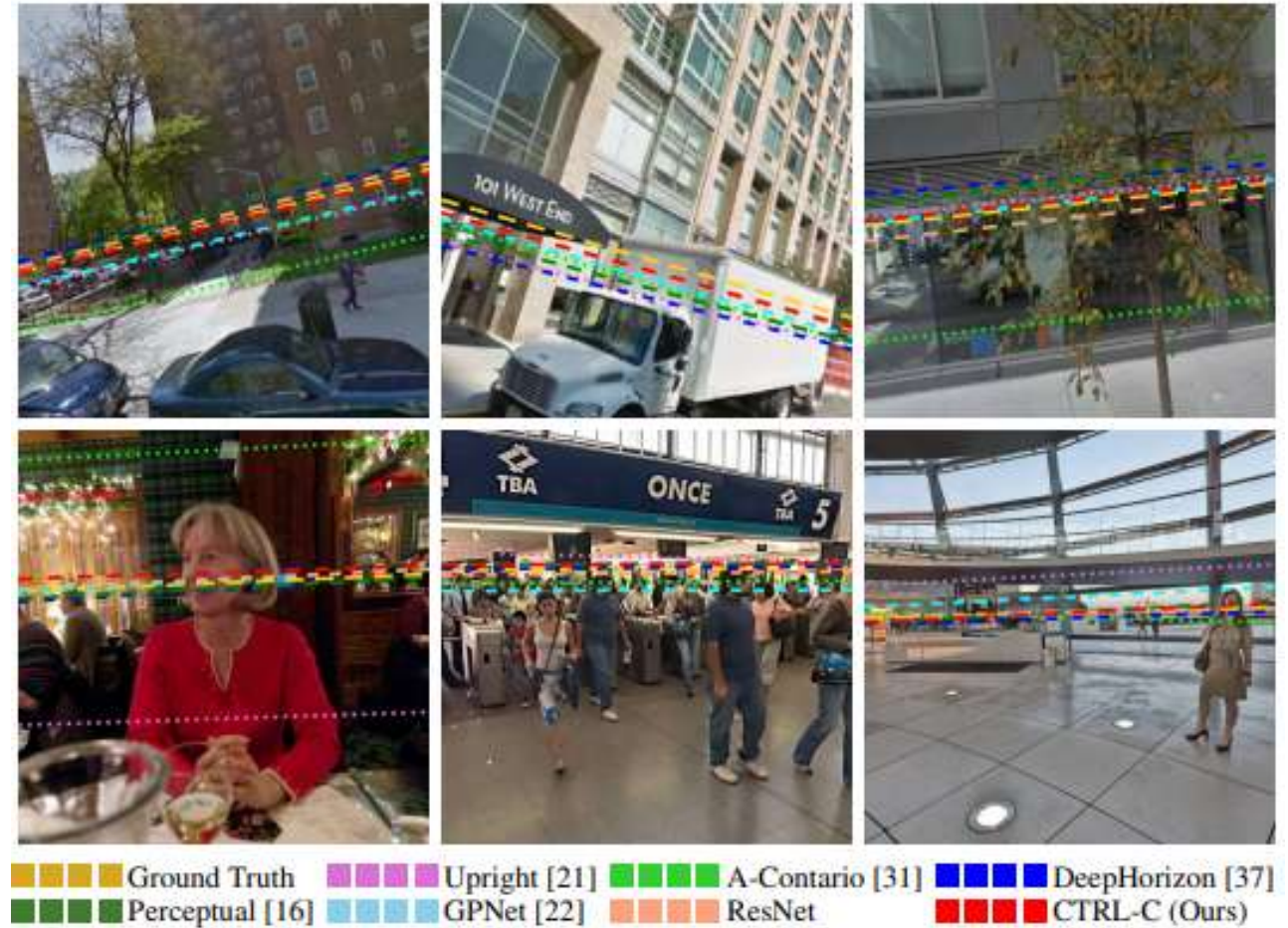
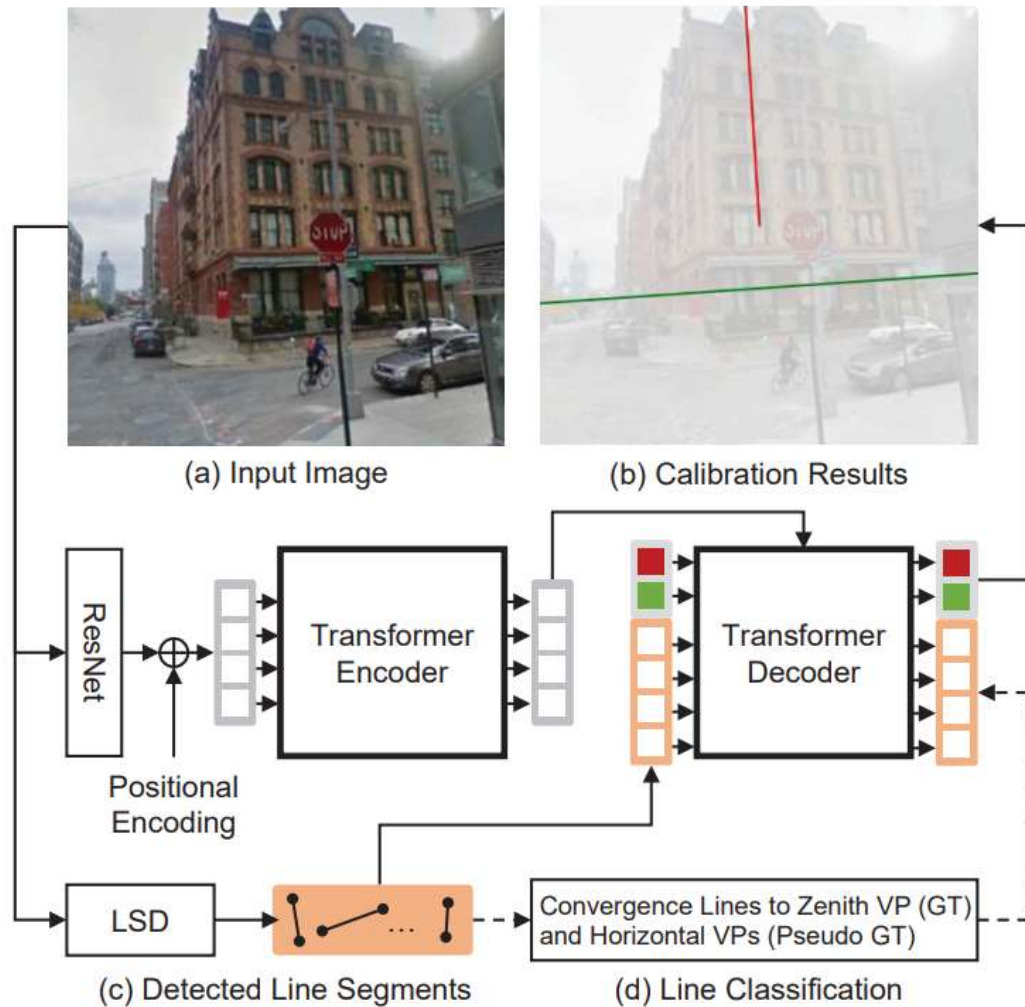
Figure 4: Evaluating the recent state-of-the-art method by Lezama et al. [14] on HLW. The fraction of images (y -axis) with a horizon error less than a threshold (x -axis). The AUC is shown in the legend.

Регрессия параметров камеры



http://visionlab.engr.ccny.cuny.edu/ccvcl/assets/publications/126/paper/CRV2017-Pitch_and_Roll_Camera_Orientation_From_a_Single_2D_Image_Using_Convolutional_Neural_Networks.pdf

CTRL-C



Резюме лекции



- Обычная камера хорошо описывается моделью перспективной проекции
- Все выкладки с перспективной проекцией удобно записывать в матричном виде с помощью перехода в однородные проективные координаты, которые «упрятывают» нелинейность в перевод из однородных в неоднородные координаты
- Матрицу перспективной проекции можно факторизовать в произведение внутренней калибровки, идеальной проекции и внешней калибровки
- Калибровка камеры – это оценка параметров внутренней и внешней калибровки
- Скалибровать камеру можно по калибровочному шаблону
- Параметры внутренней калибровки можно вычислить по данным из jpg файла и из информации о модели камеры
- Нахождение линии горизонта и точек схода в изображении даёт возможность оценить внешнюю калибровку камеры относительно сцены