

# Калибровка камер

Нижникова В. С.

# Определение

- ▶ **Калибровка камеры** — это задача получения внутренних и внешних параметров камеры по имеющимся фотографиям или видео, отснятыми ею.

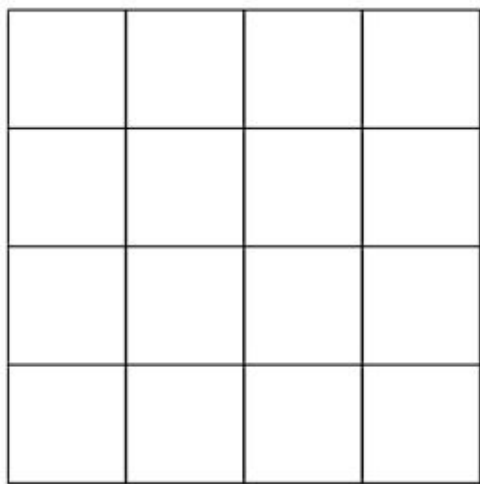
Калибровка камеры часто используется на начальном этапе решения многих задач компьютерного зрения и в особенности дополненной реальности. Кроме того, калибровка камеры помогает исправлять дисторсию на фотографиях и видео

# Дисторсии

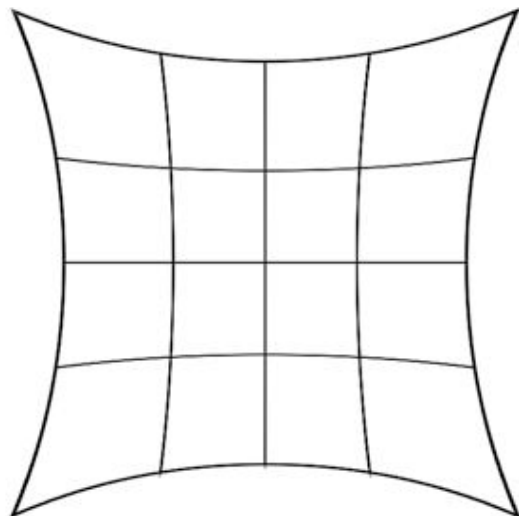
*distortio* – искривление, коэффициент линейного увеличения изменяется по полю зрения объектива.

При этом нарушается геометрическое подобие между объектом и его изображением

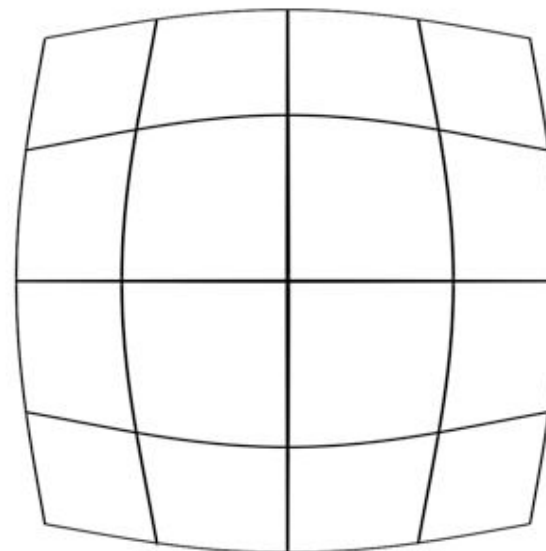
Нулевая  
дисторсия



Положительная  
дисторсия  
“подушка”



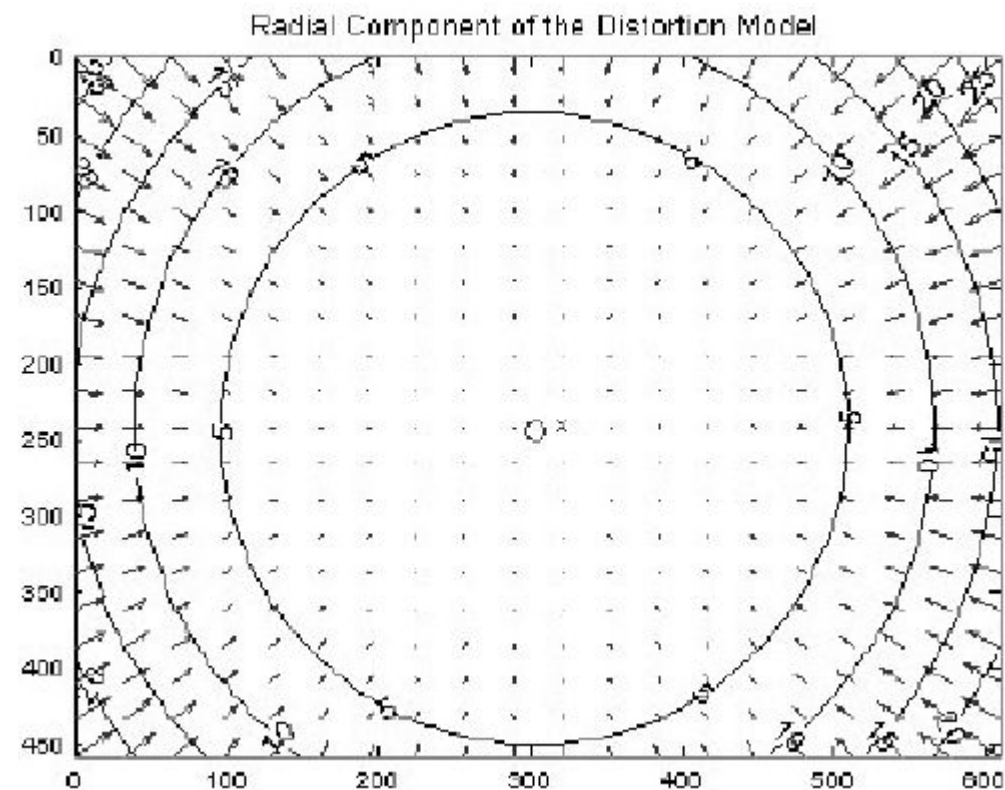
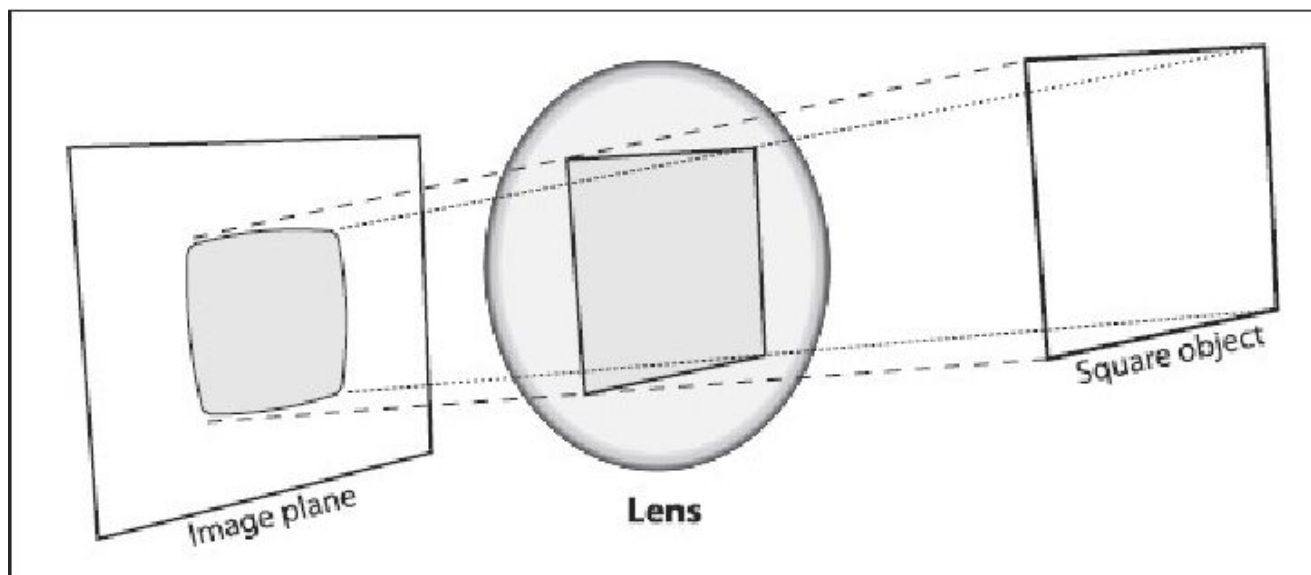
Отрицательная  
дисторсия  
“бочка”



- ▶ Радиальные искажения возникают в результате формы объектива
- ▶ Тангенциальные искажения возникают как результат сборки камеры в целом.

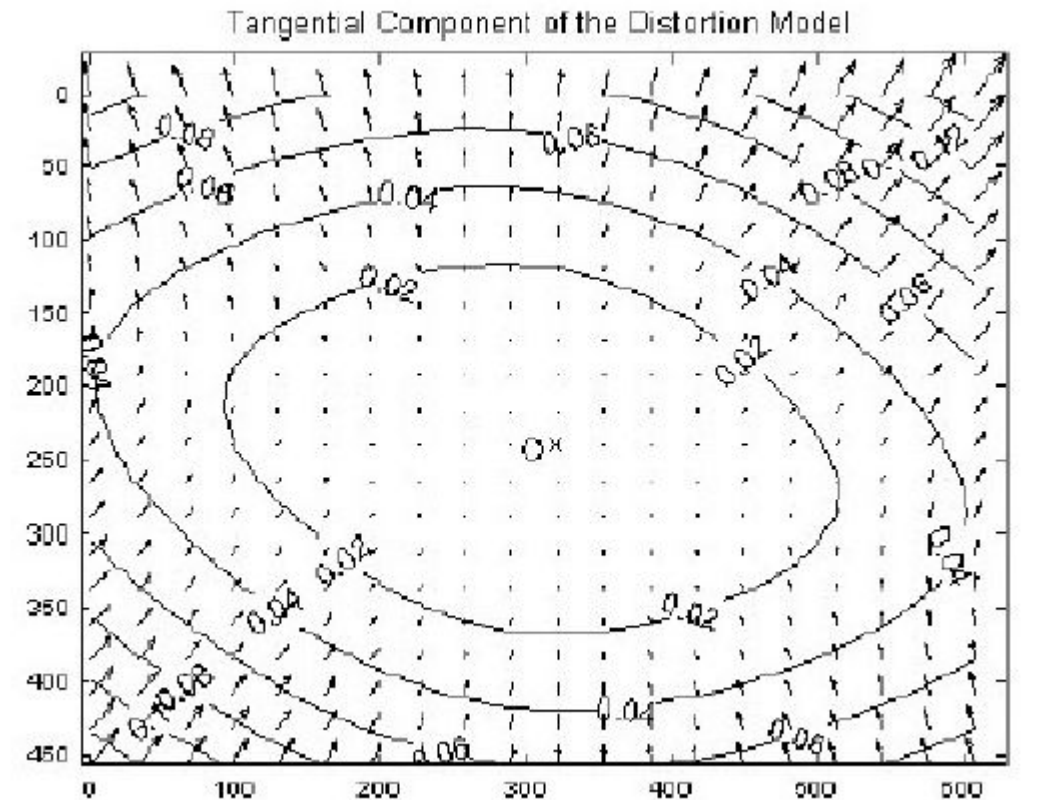
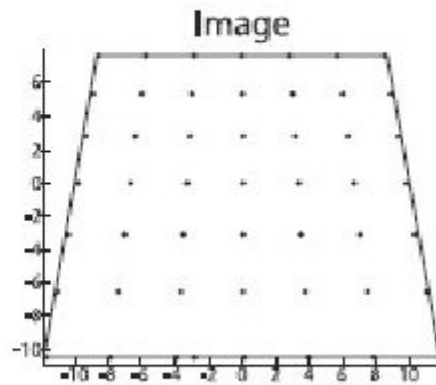
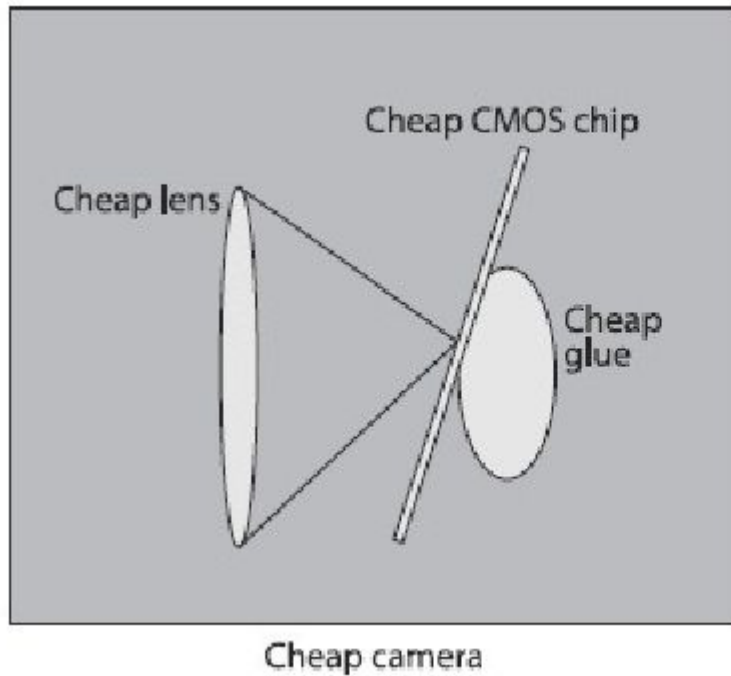
# Радиальные искажения

- ▶ Линзы реальных камер часто искажают расположение пикселей вблизи краев фотоприёмника. Это выпуклое явление появляется в результате эффекта «бочка» или «рыбий глаз»



# Тангенциальные искажения

- ▶ возникают в результате производственных дефектов, возникающих от не точно параллельноустановленных линз к плоскости изображения

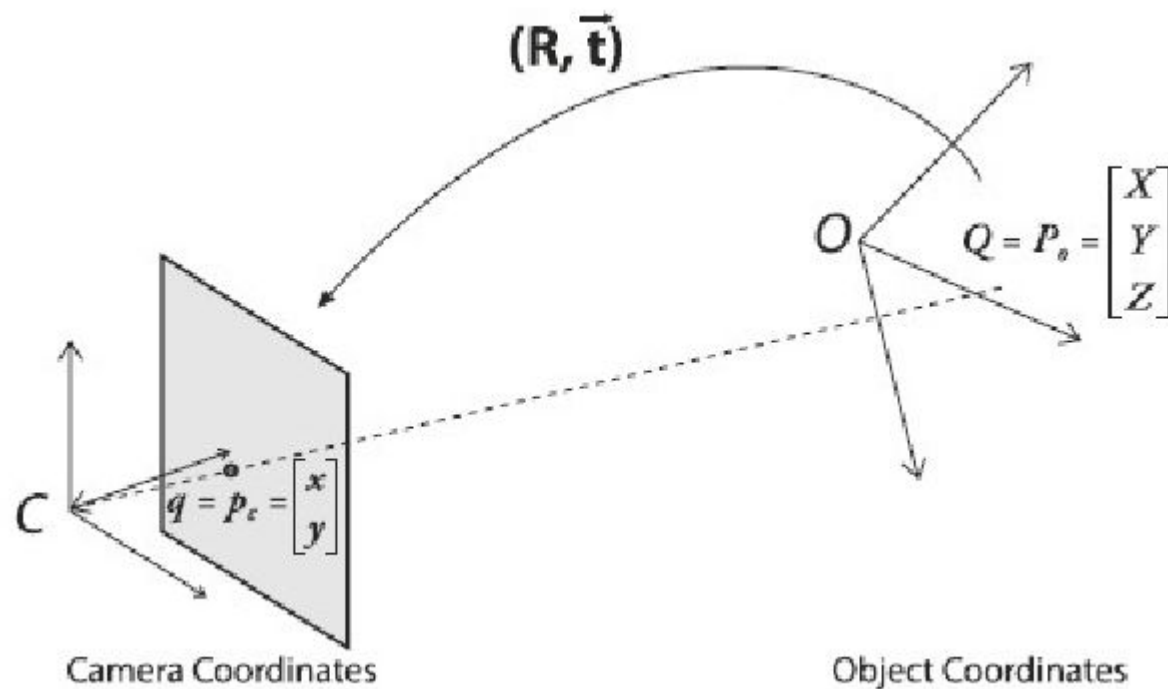


- ▶ Существует ещё множество других видов искажений, которые возникают в системах визуализации, но они, как правило, имеют малый эффект по сравнению с радиальным и тангенциальным искажениями. Связи с эти данные (другие) искажения далее рассматриваться не будут.

- ▶ OpenCV предоставляет несколько алгоритмов для вычисления внутренних параметров. Калибровка выполняется при помощи функции `cvCalibrateCamera2()`.
- ▶ В данной функции метод калибровки предоставленной камеры заключается в формировании структуры, содержащей множество индивидуальных и идентифицируемых точек. При рассмотрении данной структуры под разными углами можно в последующем вычислить (относительное) положение и ориентацию камеры во время каждого получаемого кадра, а также внутренние параметры камеры. Для получения набора представлений, необходимо поворачивать и смещать объект, поэтому вначале необходимо рассмотреть эти процессы более подробно.



Для каждого кадра, содержащего определенный объект, существует возможность описать позу данного объекта по отношению к системе координат камеры в условиях вращения и смещения.



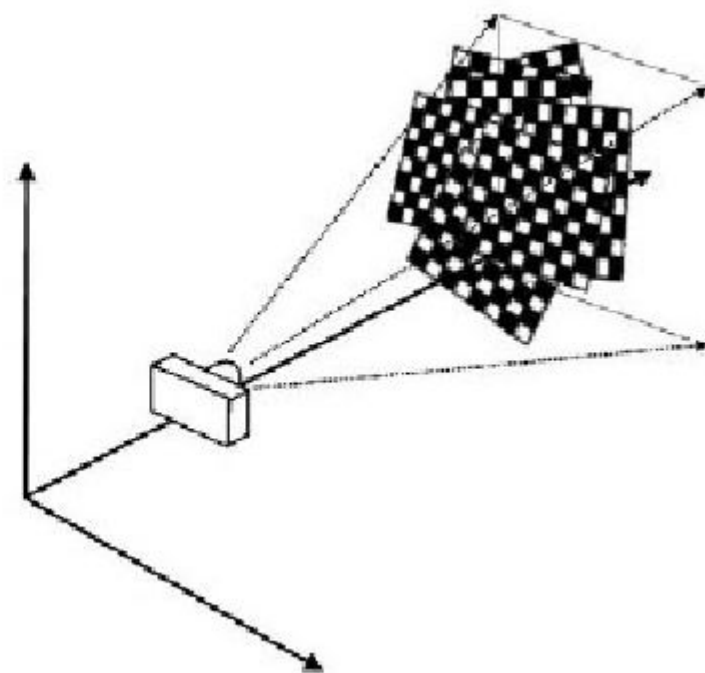
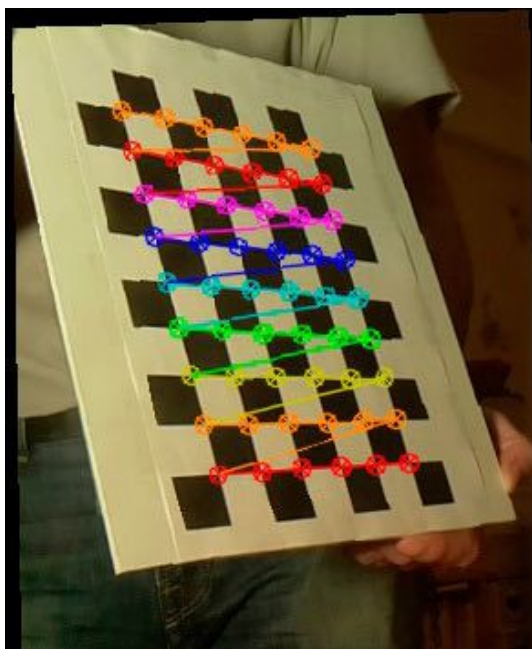
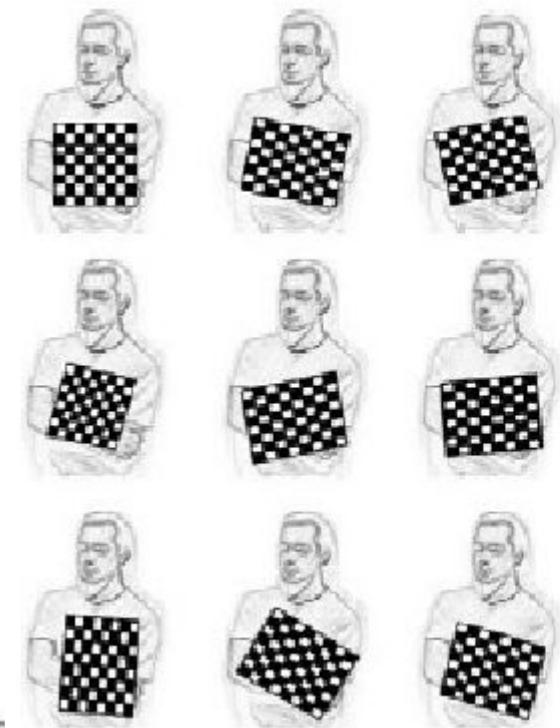
# Что может быть калибровочным объектом

- ▶ Калибровочным объектом в OpenCV является плоская сетка с чередующимися черными и белыми квадратами, которую обычно называют "шахматной доской" (хотя и не обязательно иметь восемь квадратов или даже равное количество квадратов в каждом из направлений).
- ▶ В принципе, любой достаточно характерный объект может быть использован в качестве калибровочного объекта, однако, практичней всего использовать такой шаблон, как шахматная доска.



# Калибровка «Шахматной доской» в OpenCV

Изображение шахматной доски (или человека, держащего шахматную доску) можно использовать в функции OpenCV **cvFindChessboardCorners()** для поиска углов шахматной доски

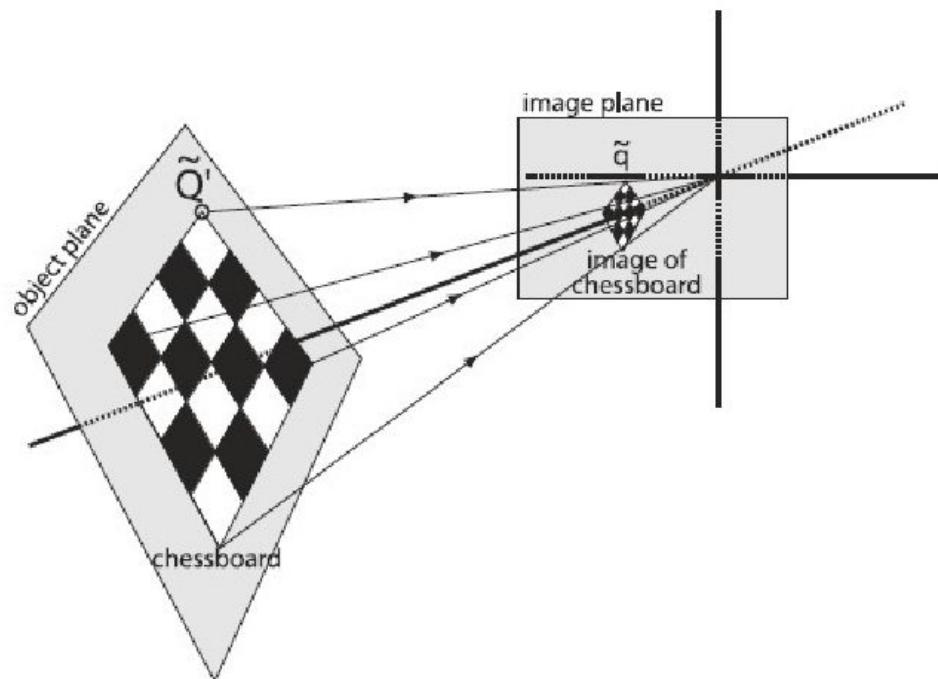


# Субпиксельные углы

- ▶ Углы, возвращаемые **cvFindChessboardCorners()** являются приблизительными. На практике это означает, что положения точны только в пределах устройства обработки изображения, т.е. с точностью до пикселя. Функция разделения должна быть использована для вычисления точного расположения углов (после получения приблизительного положения и исходного изображения) с точностью до субпикселя.
- ▶ Для этого необходимо использовать функцию **cvFindCornerSubPix()** т.к. углы шахматной доски это всего на всего частный случай более общего случая углов Harris; просто углы шахматной доски проще найти и отследить. Пренебрежение субпиксельным уточнением может привести к существенным ошибкам в калибровке.

# Гомография

- ▶ В компьютерном зрении плоская гомография определяется как проективное отображение из одной плоскости в другую.
- ▶ Таким образом, отображение точек на двумерную плоскую поверхность фотоприёмника камеры является примером плоской гомографии.





# Математика преобразований

$$\tilde{Q} = [X \ Y \ Z \ 1]^T$$

$$\tilde{q} = [x \ y \ 1]^T$$

$$\tilde{q} = sH\tilde{Q}$$

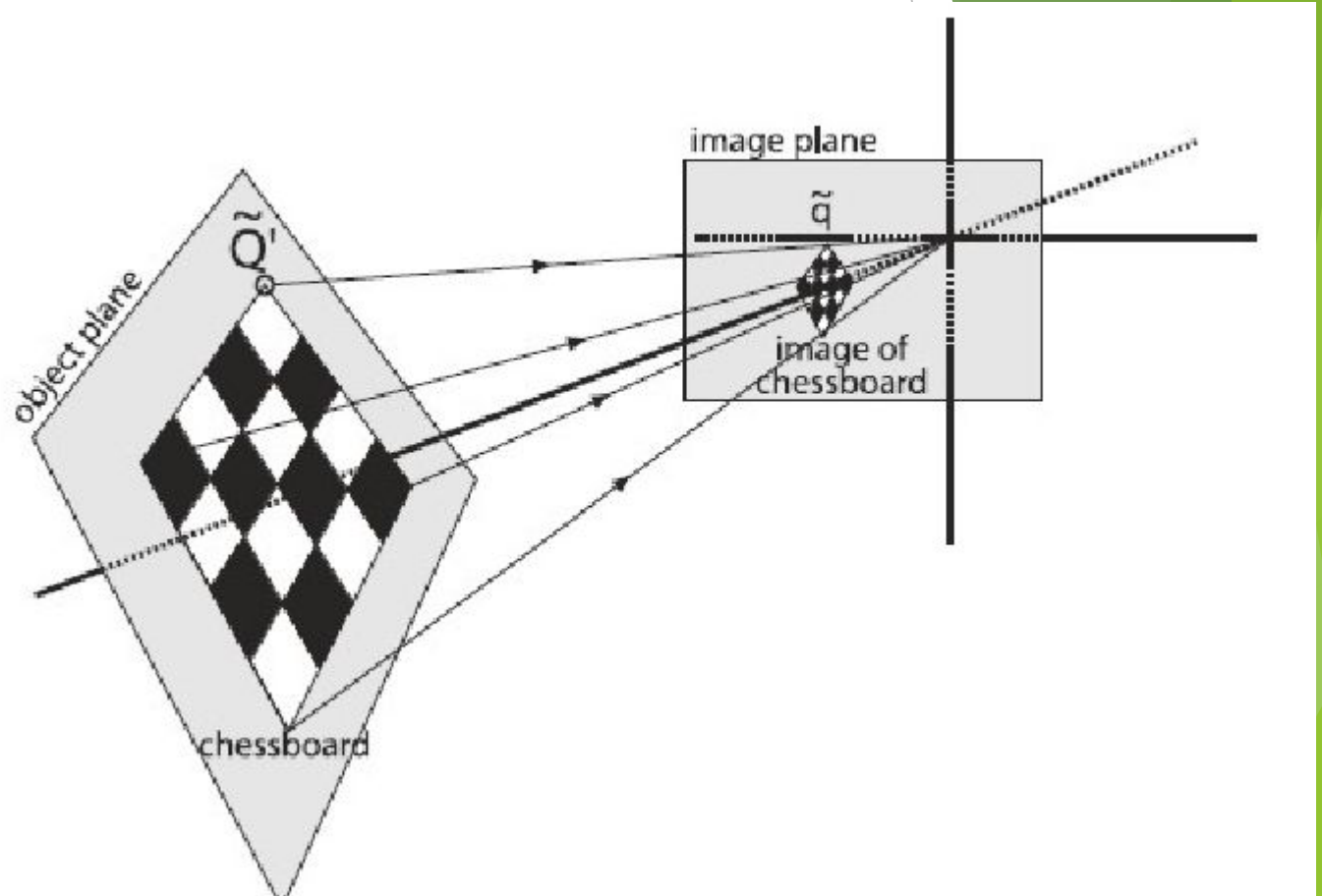
$$W = [R \ t]$$

$$\tilde{q} = sMW\tilde{Q}, \text{ где } M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R = [r_1 \ r_2 \ r_3]$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = sM \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = sM \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{q} = sH\tilde{Q}'$$



# Количество неизвестных

- ▶ Вращение 3 угла
- ▶ Перемещение 3 смещения
- ▶ Это нормально, т.к. известно, что плоский объект (например, шахматная доска) дает восемь уравнений - т.е. отображение квадрата в четырехугольник можно описать четырьмя  $(x, y)$  точками
- ▶ Каждый новый кадр дает восемь уравнений за счет шести новых внешних неизвестных

1 изображение  
6 неизвестных

1 кадр  
8 уравнений

$$p_{dst} = H p_{src}, \quad p_{src} = H^{-1} p_{dst}$$

$$p_{dst} = \begin{bmatrix} x_{dst} \\ y_{dst} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad p_{src} = \begin{bmatrix} x_{src} \\ y_{src} \\ 1 \end{bmatrix}$$

- ▶ Теперь пусть имеется  $N$  углов и  $K$  изображений шахматной доски (в различных позициях). Как много представлений и углов необходимо иметь для преодоления ограничений всех ранее представленных параметров?
- ▶  $K$  изображений шахматной доски обеспечивает  $2NK$  ограничений (коэффициент 2 используется в связи с тем, что каждая точка изображения имеет две координаты  $(x, y)$ )
- ▶ Не принимая во внимание параметры искажения, имеется 4 внутренних параметра и  $6K$  внешних параметра (т.к. необходимо найти 6 параметров положения шахматной доски для каждого представления  $K$ )
- ▶ Для решения также необходимо, чтобы  $2NK \geq 6K + 4$  (или, что эквивалентно  $(N - 3)K \geq 2$ )



# Ну и как считать?

- ▶ Матрица гомографии  $H$  связывает положения точек плоскости исходного изображения с точками плоскости конечного изображения (как правило, плоскости фотоприёмника) следующими уравнениями

$$p_{dst} = Hp_{src}, \quad p_{src} = H^{-1}p_{dst}$$

$$p_{dst} = \begin{bmatrix} x_{dst} \\ y_{dst} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad p_{src} = \begin{bmatrix} x_{src} \\ y_{src} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Существует возможность вычислить  $H$ , ничего не зная о встроенных параметрах камеры. На самом деле, вычисление множества гомографий из нескольких представлений - это метод, который использует OpenCV для вычисления внутренних параметров камеры.

## cvFindHomography()

Необходимо как минимум четыре точки, чтобы найти  $H$ , однако, всегда имеется возможность предоставить гораздо большее количество точек (при условии рассмотрения шахматной доски размера большего, чем  $3 \times 3$ ). Использование большего количества точек гораздо выгоднее, т.к. всегда имеется шум и иные несоответствия, влияние которых необходимо сводить к минимуму.

# А как параметры камеры вычислить?

- ▶ Функция калибровки

После получения углов от нескольких изображений можно вызывать функцию **cvCalibrateCamera2()**. Эта функция производит математические вычисления и предоставляет необходимую информацию.

В частности, в результате будет получена

- ▶ матрица внутренних параметров камеры,
- ▶ коэффициенты искажения,
- ▶ вектор вращения и вектор перемещения

Кому интересна математика  
приближенных вычислений

Learning openCV

# Не все так просто

- ▶ Для того, чтобы воспользоваться алгоритмом в `cvCalibrateCamera2()`, необходимо
- ▶ Воспользоваться функцией `cvUndistort2()`, которая выполняет все необходимое для одного кадра, или парой функций `cvInitUndistortMap()` и `cvRemap()`, которые позволяют обрабатывать некоторые вещи в видео немного более эффективно или ситуации, в которых имеется множество изображений от одной и той же камеры

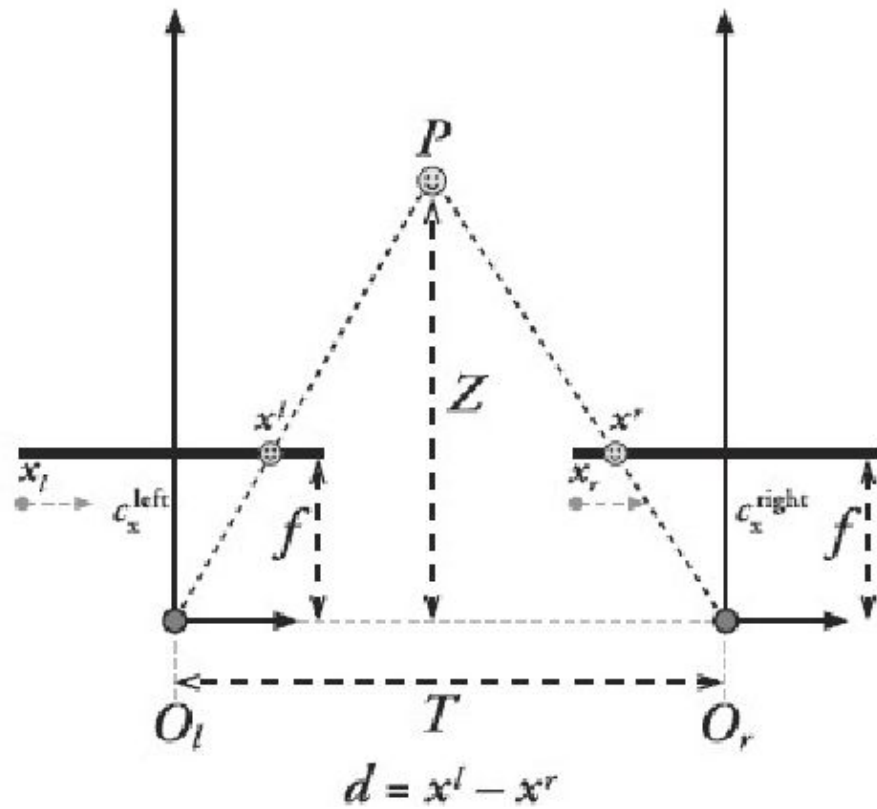
Строится карта,  
которая потом  
используется для  
удаления искажений



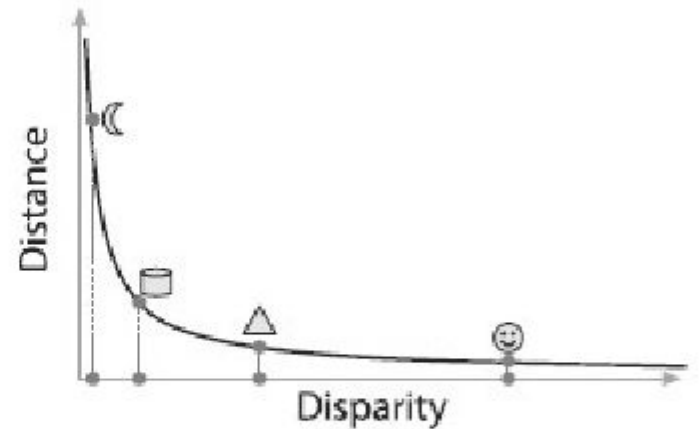
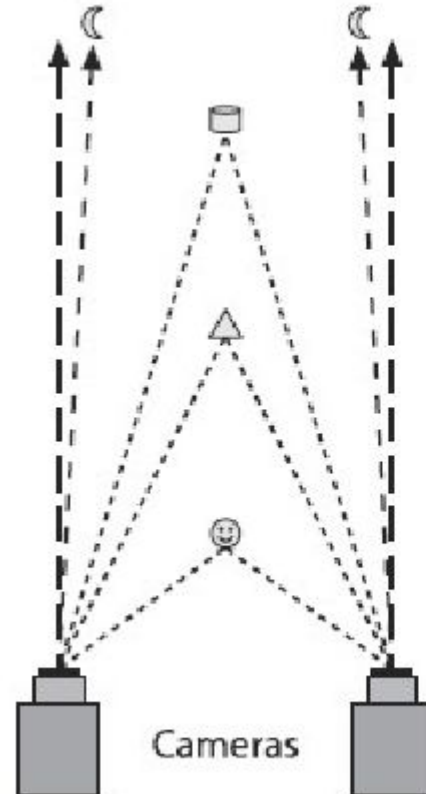
# Стереокалибровка и стереозрение

- ▶ 1. Математически удаляются радиальные и тангенциальные искажения объектива. На выходе будет получено неискаженное изображение.
- ▶ 2. Настраиваются углы и расстояния между камерами, так называемый процесс уточнения. На выходе будут получены выровненные по строкам
- ▶ 3. Ищутся особенности на представлениях левой и правой камер (процесс сопоставления). На выходе будет получена карта несоответствий, где различия будут соответствовать различиям в x-координате плоскости изображения для одного и того же рассматриваемого признака левой и правой камер.
- ▶ 4. Зная геометрическое расположение камер, развертывается карта несоответствий за счет триангуляции. Это так называемое перепроецирование, в результате чего получается карта глубины.

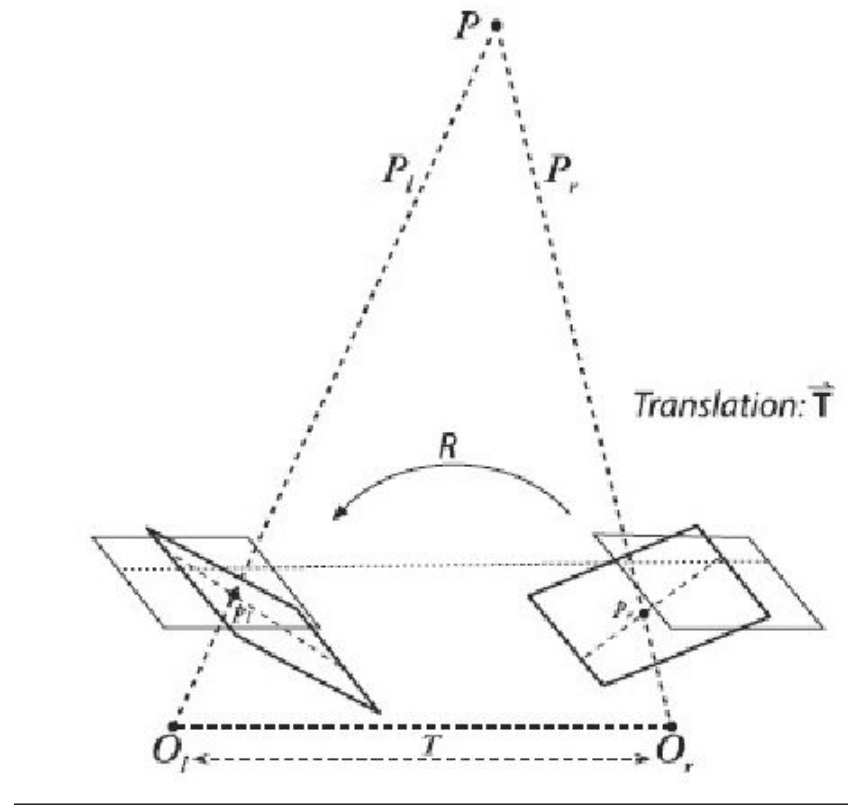
# Как можно получить глубину?



$$\frac{T - (x^l - x^r)}{Z - f} = \frac{T}{Z} \Rightarrow Z = \frac{fT}{x^l - x^r}$$



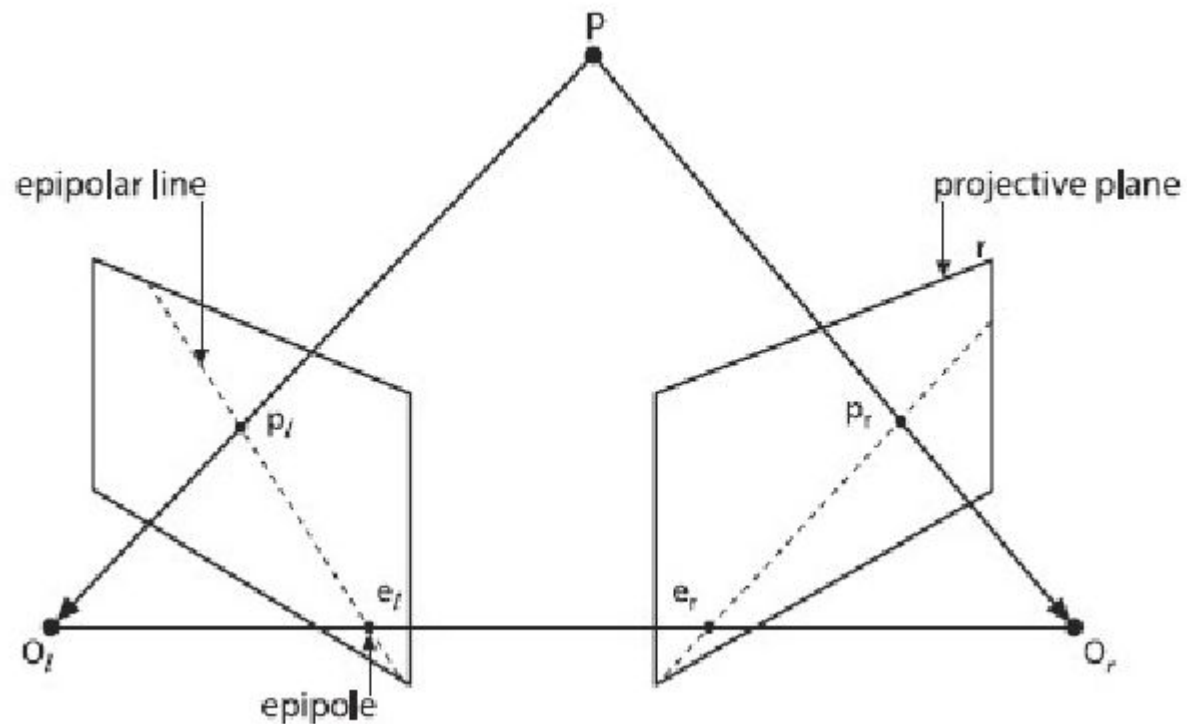
# Горизонтально ровно и фронтально параллельно



# Эпиполярная геометрия

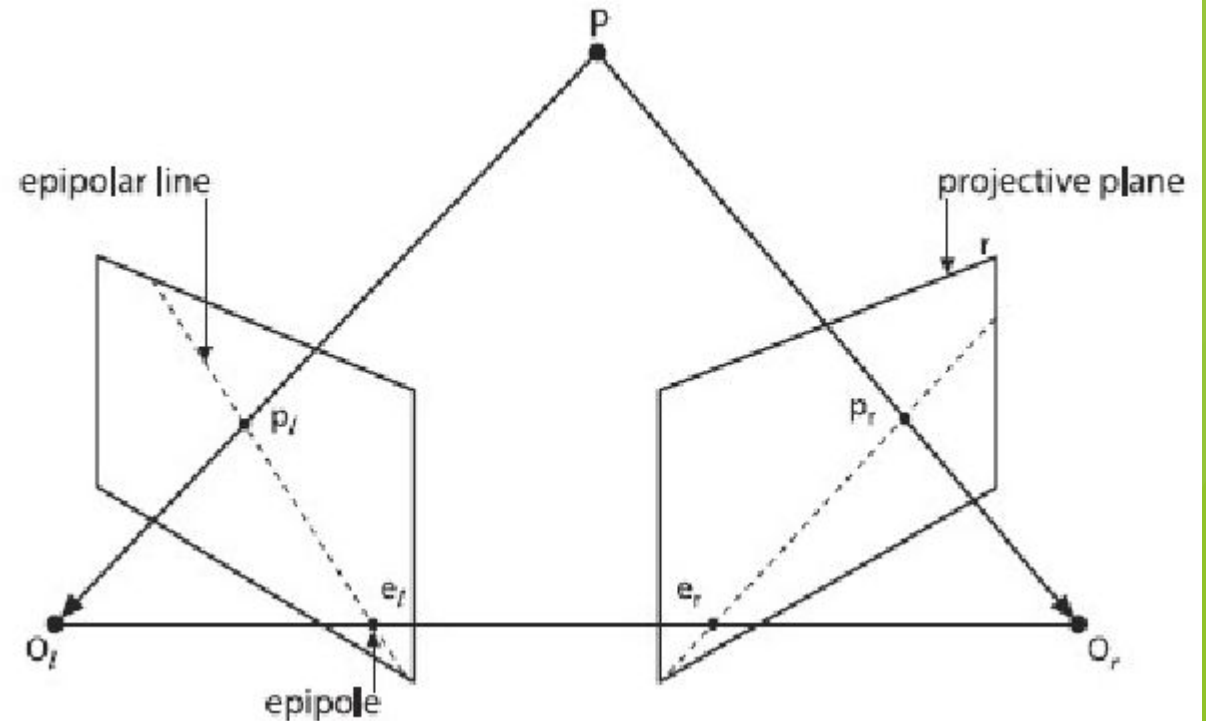
- ▶ 2 камеры обскуры
- ▶ Керновые точки - центр проекции изображения другой камеры
- ▶ Керновая плоскость:  $p \in l \in e_r$
- ▶ Эпиполярные линии:  $p \in l, p \in e_r$

$p_l$  - точка материального мира  
 $p_r$  - проекция  $p$  на плоскость камеры 1  
 $p_l$  - проекция  $p$  на плоскость камеры 2  
 $O_l$  и  $O_r$  - центры проекций  
 $e_l$  и  $e_r$  - керновые точки



# Зачем предыдущий слайд?

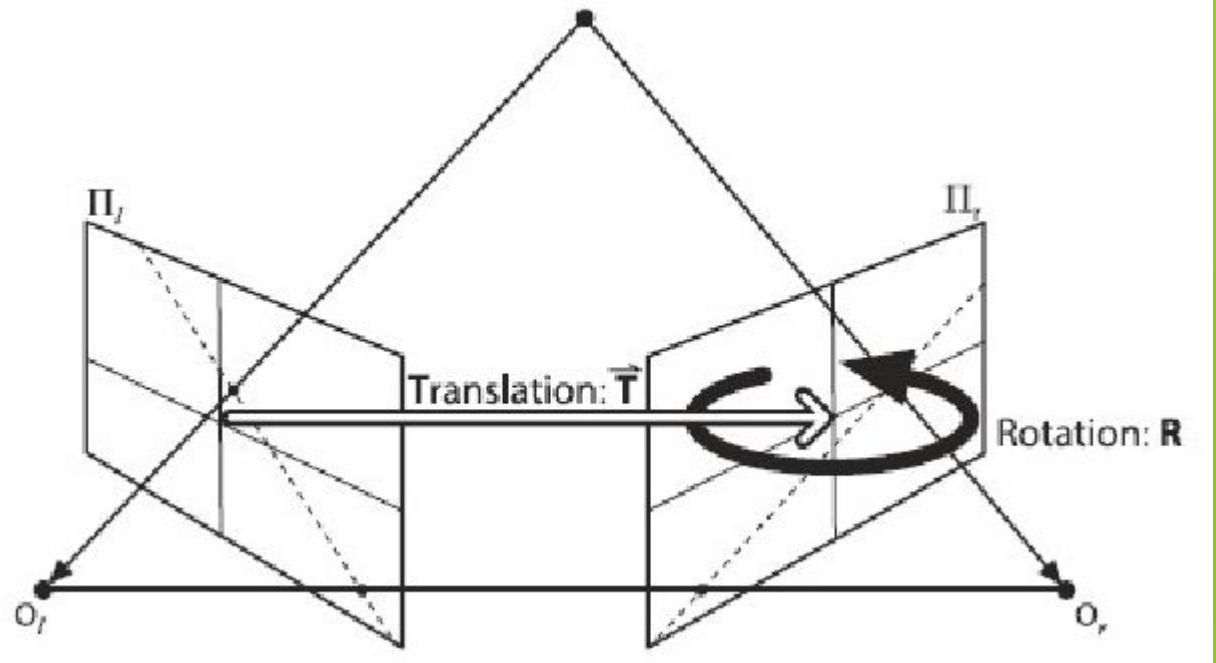
- ▶ Каждая трехмерная точка представлений камер располагается на эпилярной плоскости, которая пересекает каждое изображение по эпилярной линии.
- ▶ Учитывая особенности одного изображения, соответствующее представление другого изображения должно лежать вдоль соответствующей эпилярной линии. Это известно, как эпилярное ограничение.
- ▶ Двумерный поиск становится одномерным





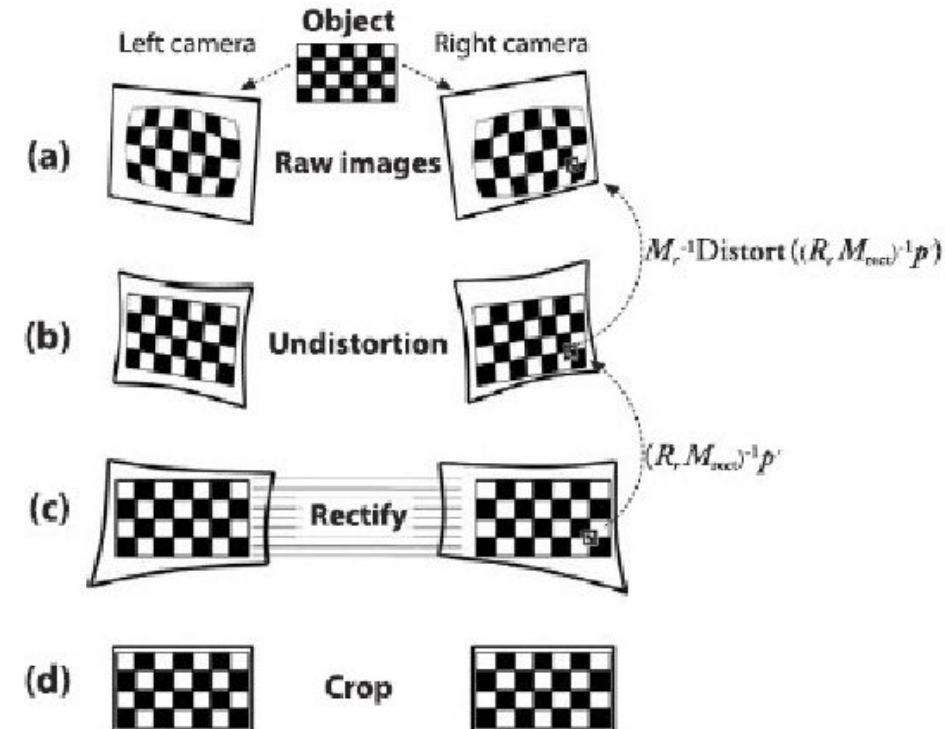
# Еще 2 матрицы

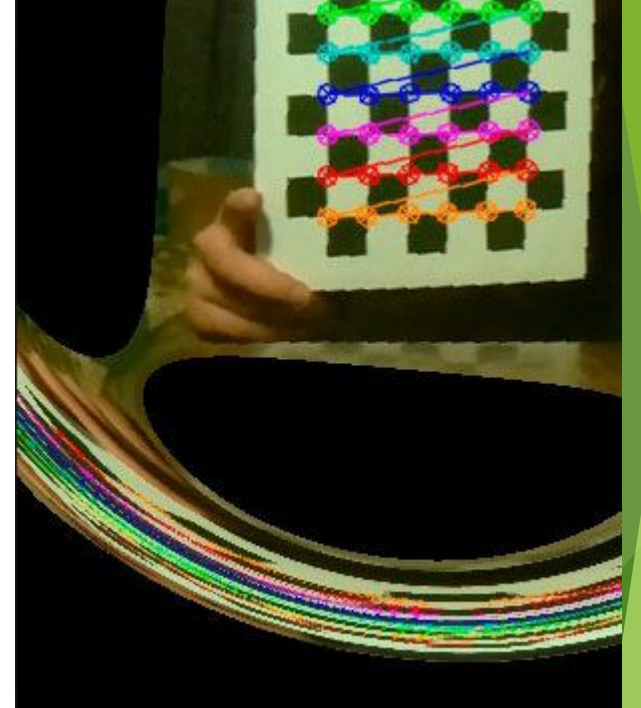
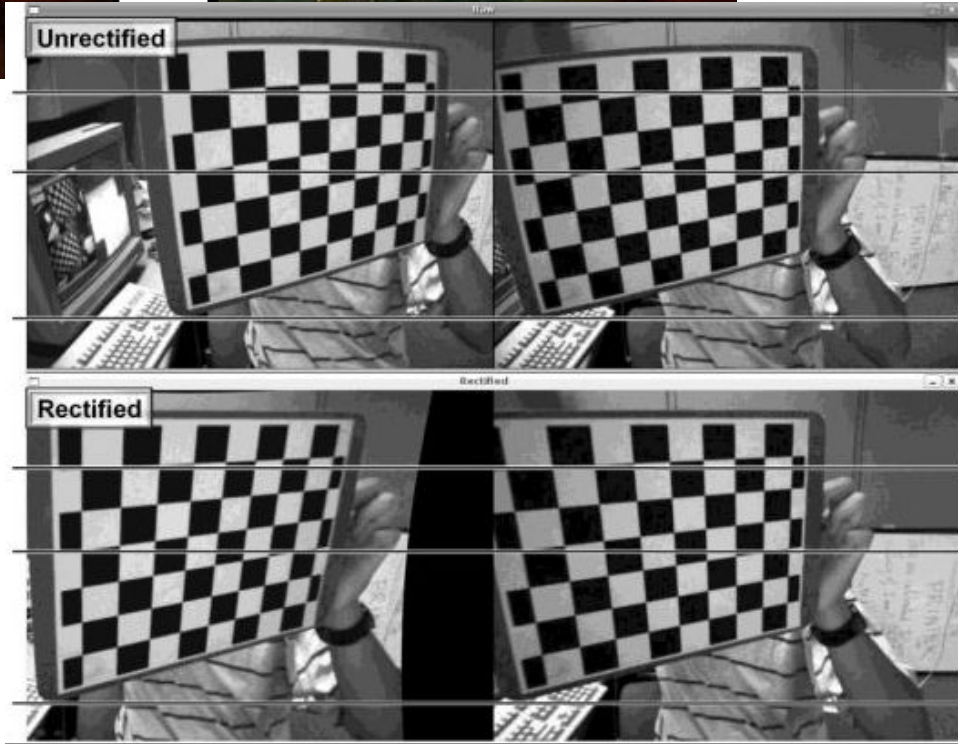
- ▶ Существенная  $E$  - перемещение и смещение камер в пространстве
- ▶ Фундаментальная  $F$  - как  $E$  + информацию о внутренних параметрах, относящихся к двум камерам в пиксельных координатах



# Как в OpenCV

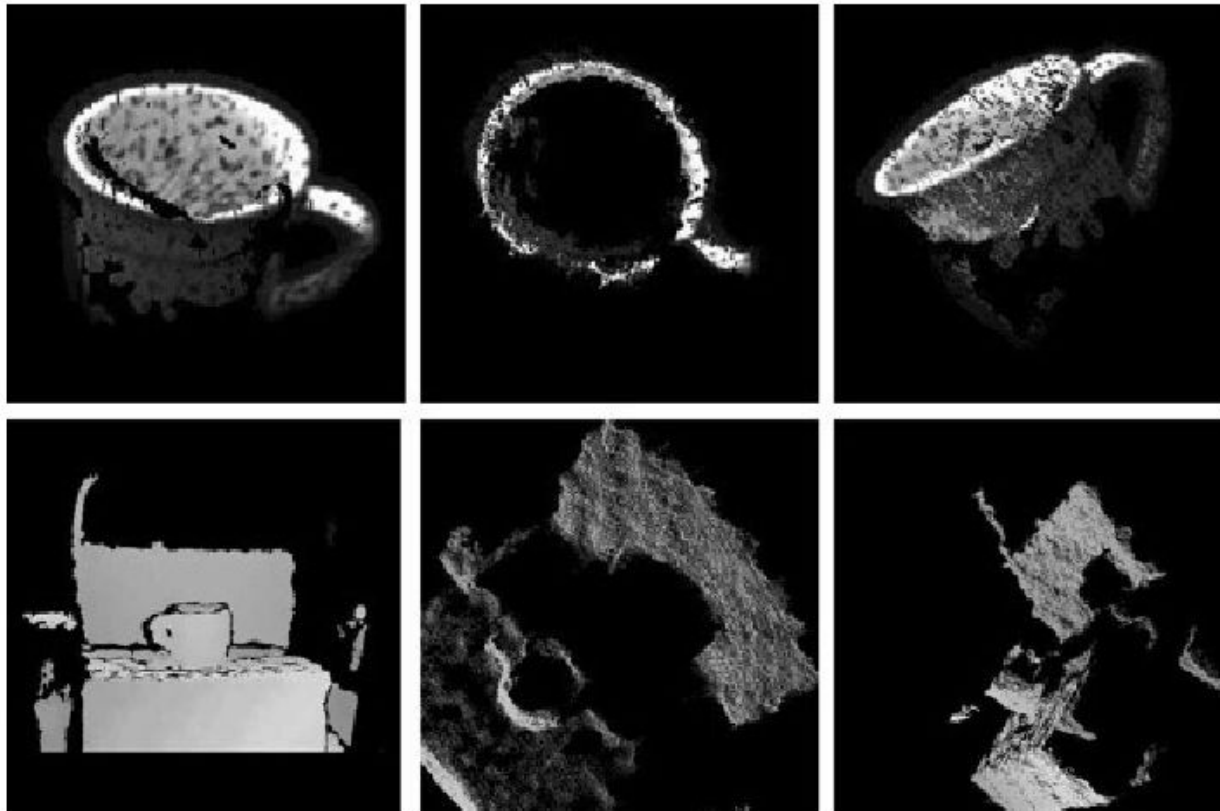
- ▶ Аалогично с калибровкой одной камеры
- ❖ предоставляем изображения шахматной доски, снятые правой и левой камерами
- ❖ находим углы досок (`cvFindChessboardCorners()`)
- ❖ `cvFindFundamentalMat()`
- ❖ `cvComputeCorrespondEpilines()`
- ❖ `cvStereoCalibrate()` - аналогично `cvCalibrateCamera2()`, но ищется одна матрица смещений и перемещений
- ❖ Применяем алгоритм стереоисправлений (Hartley или Bouguet)
- ❖ Вычисляем карты исправлений `cvInitUndistortRectifyMap()` для левой и правой камер
- ❖ Исправляем новые изображения для камер `cvRemap()`





# Карты глубины трехмерного перепроецирования

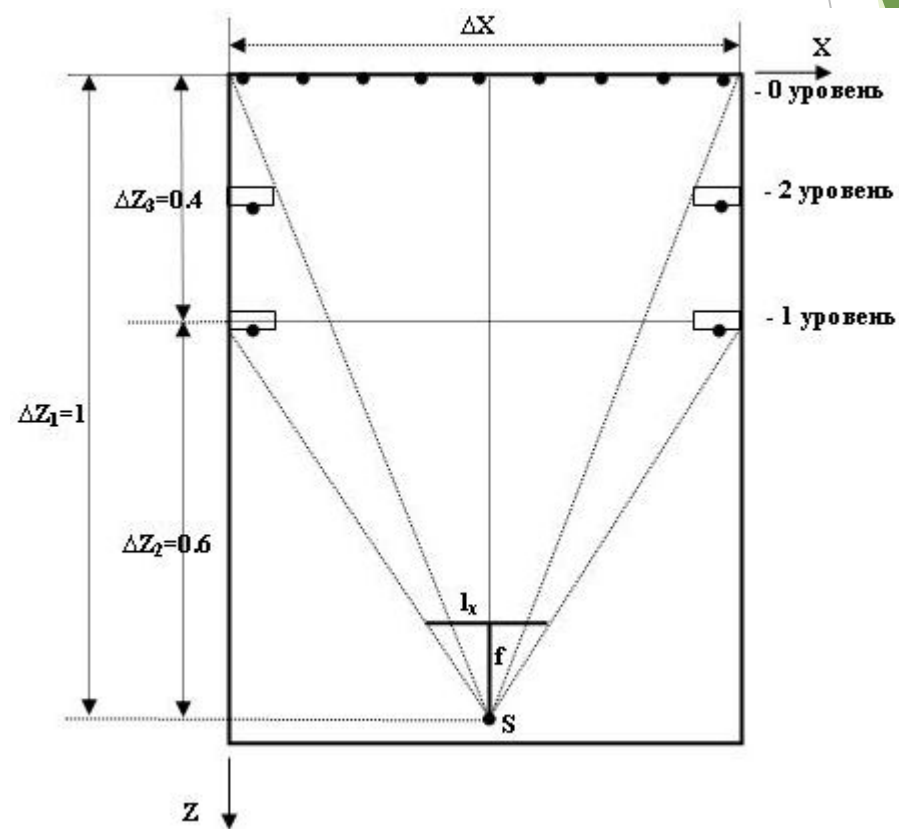
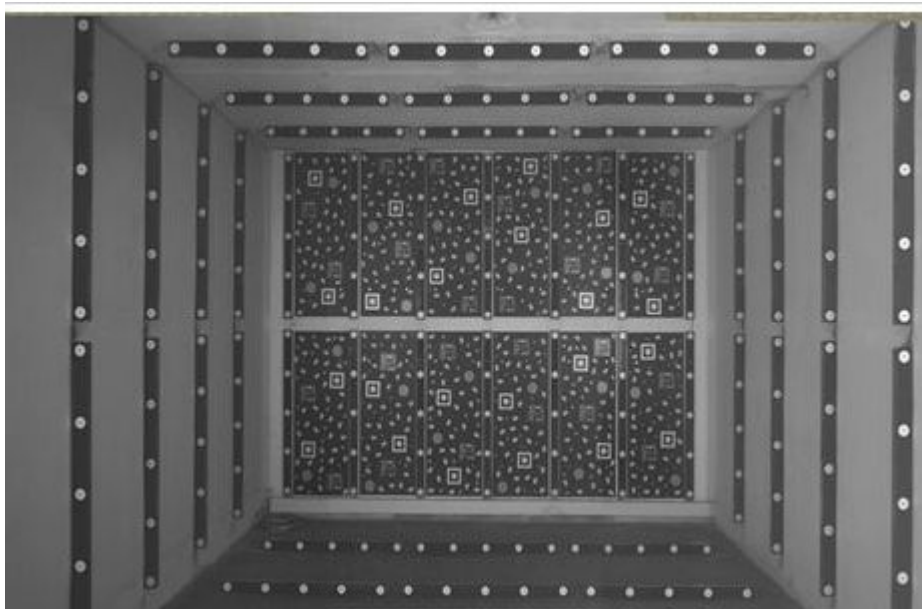
- ▶ `cvReprojectImageTo3D()`



# Фотограмметрическая калибровка

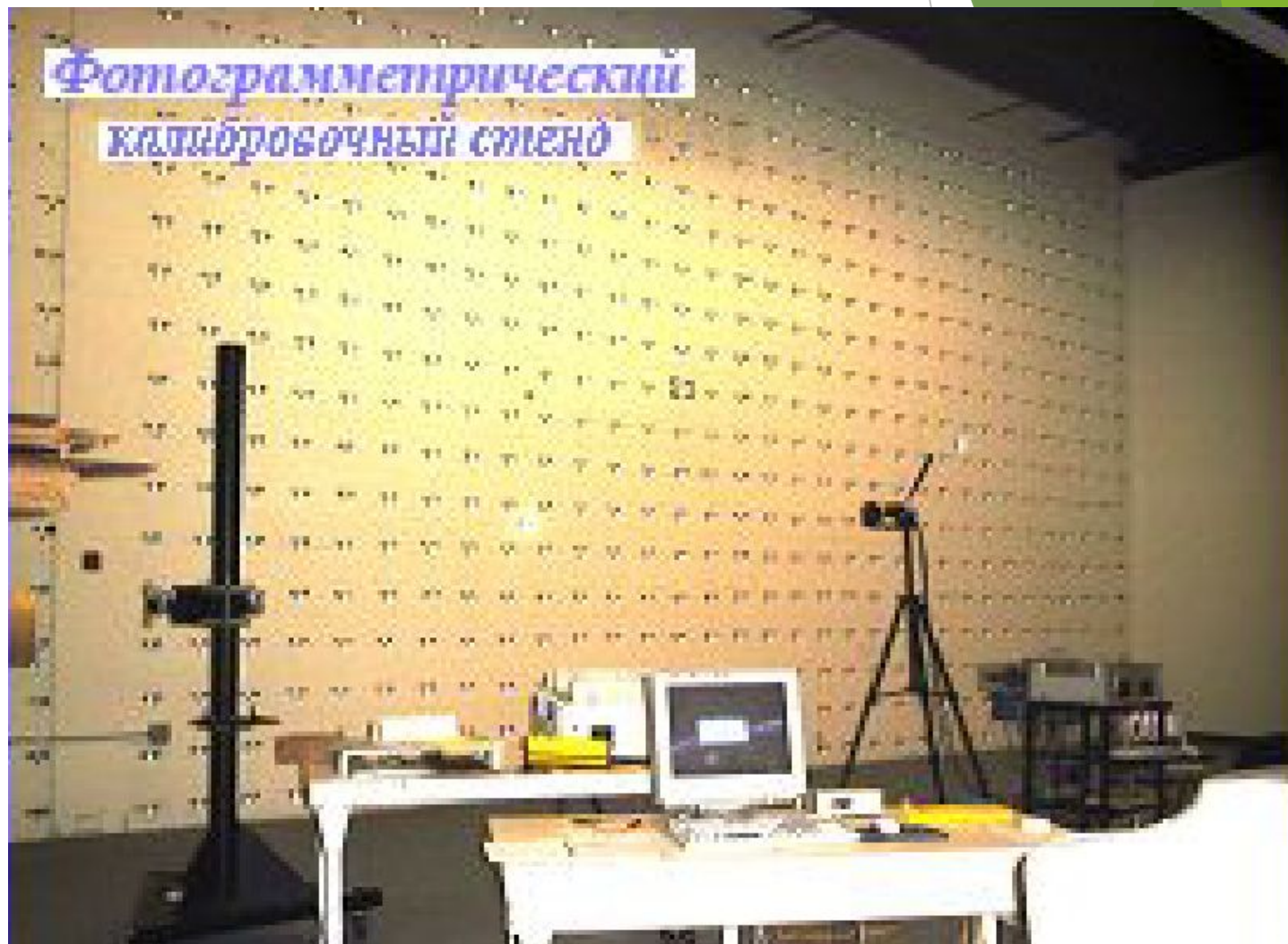
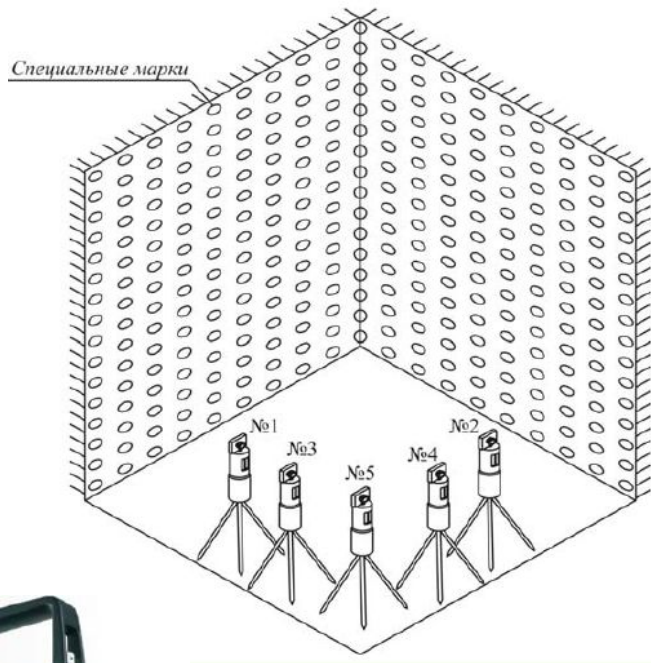
- ▶ Калибровка камер производится наблюдением за калибровочным объектом, геометрия которого в 3D пространстве известна с большей точностью.
- ▶ Калибровка может быть сделана очень рационально. Калибровочный объект обычно состоит из 2 или 3 плоскостей ортогональных друг другу.
- ▶ Иногда плоскости подвергаются точно заданному преобразованию. Эти подходы нуждаются в дорогих калибровочных аппаратах и их скрупулезной установке.

# по снимкам пространственного тест-объекта

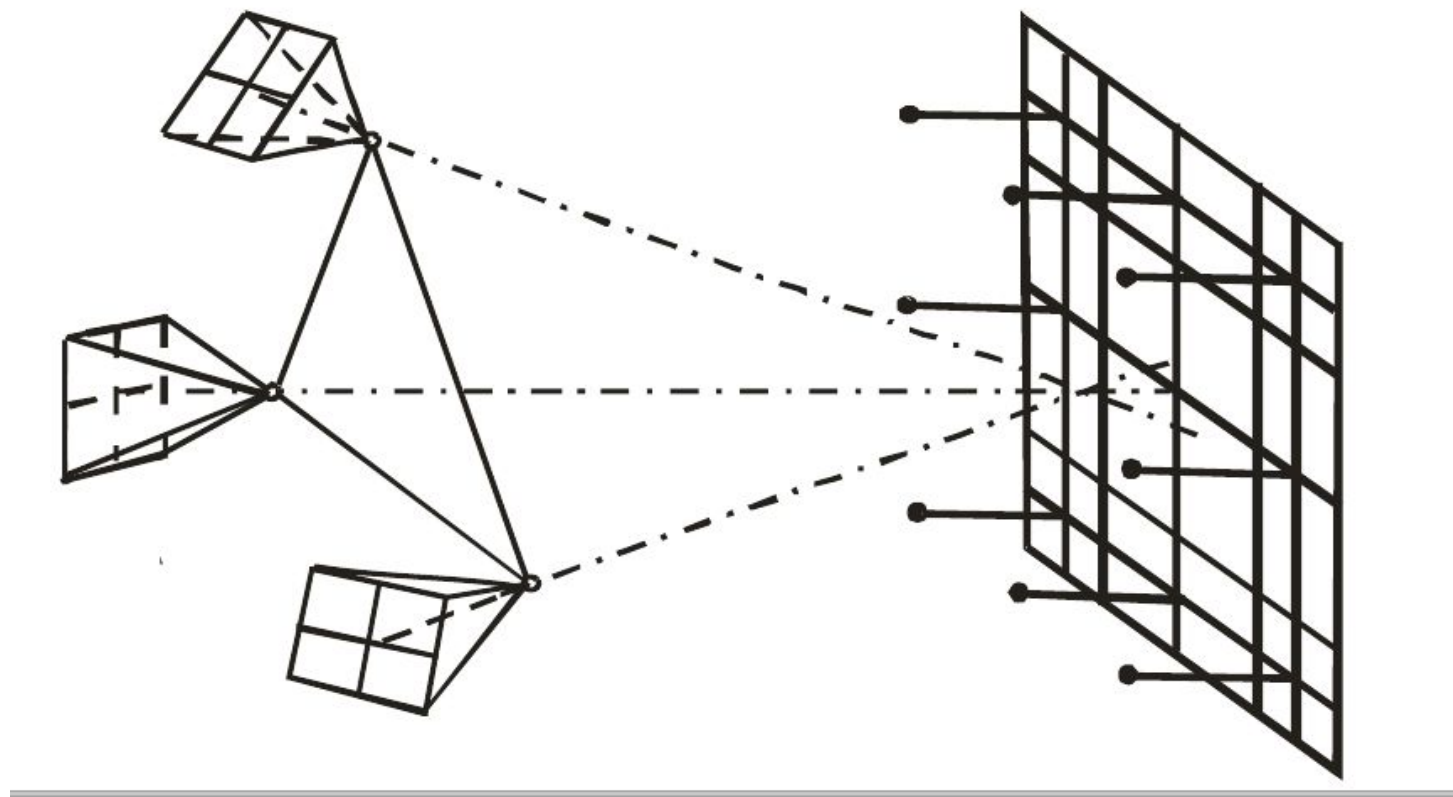




# Установка калибровочных маркеров

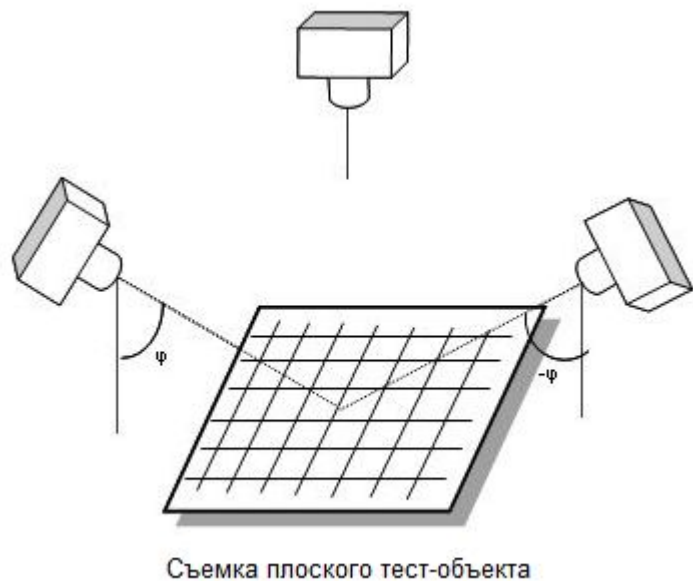


# Съемка стенда





# ПО СНИМКАМ ПЛОСКОГО ТЕСТ-ОБЪЕКТА



Определение параметров фотограмметрической калибровки по полученным таким образом снимкам производится в результате совместной обработки результатов измерений по всем полученным снимкам, таким же образом, как и при обработке снимков пространственного тест-объекта.

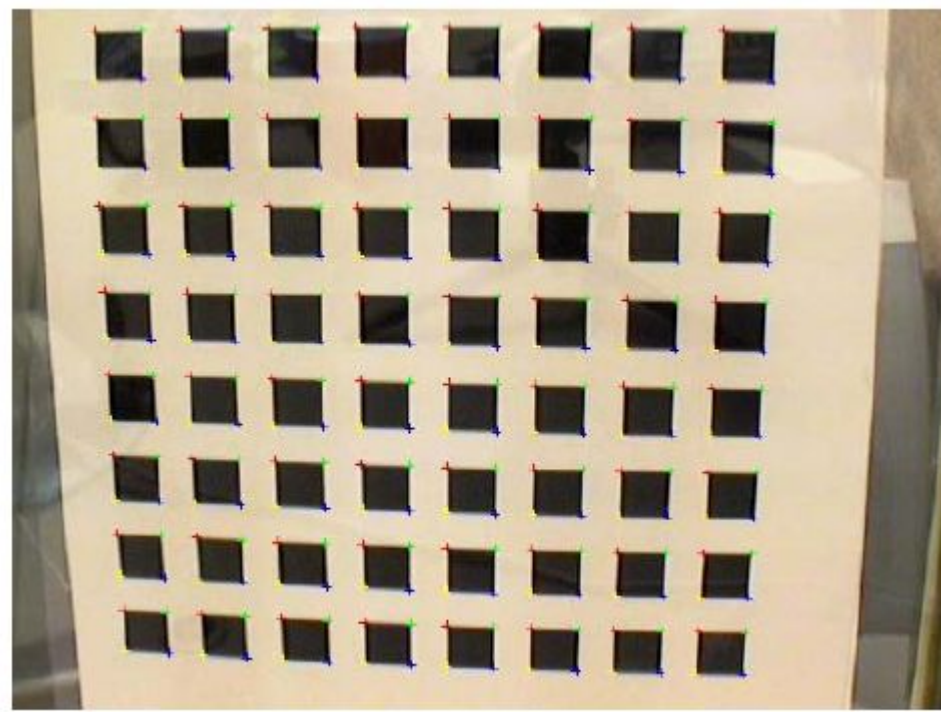
# Самокалибровка

- ▶ Не использует калибровочных объектов.
- ▶ Использует движение камеры в статической сцене. Если изображения будут братья от тех же самых камер с фиксированными внутренними параметрами, соответствия между тремя картинками достаточно для получения и внутренних, и внешних параметров, которые позволят реконструировать 3D структуру.



# Технология, представленная Zhengyou Zhang

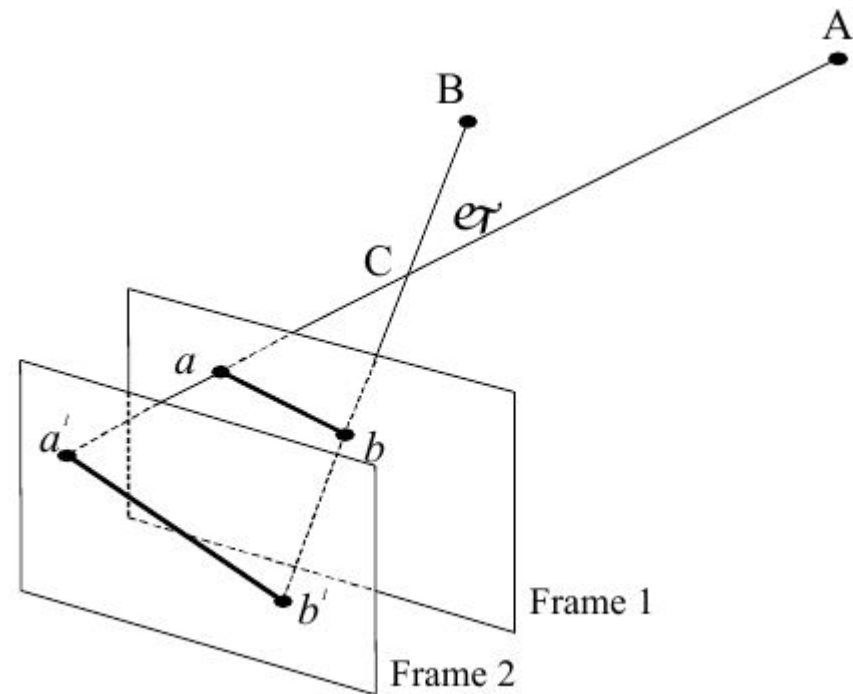
- ▶ требует только камеру для наблюдения за плоским объектом, показанным с нескольких сторон
- ▶ Фотограмметрическая + самокалибровка



# Объективом с переменным фокусным расстоянием

- ▶ Способ предложила Марина Колесник в своей статье «Техника калибровки для объективов с переменным фокусным расстоянием»

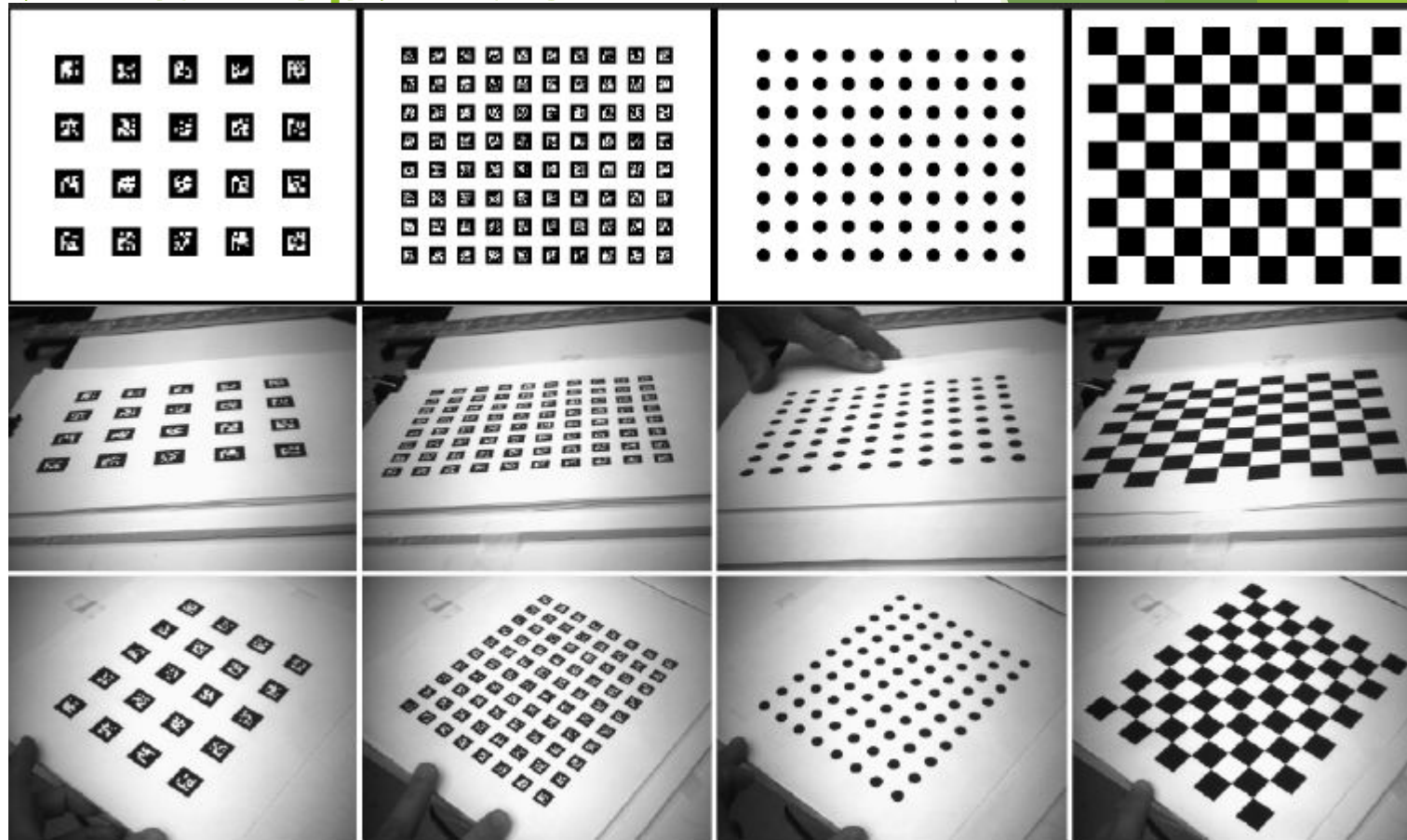
Совершаются снимки из одного положения с изменением фокусного расстояния(фреймы)  
Затем они сопоставляются



# Калибровка с помощью нейронных сетей и генетических алгоритмов

- ▶ вход - искаженные изображения
- ▶ выход - выпрямленные
- ▶ на практике результат хуже стандартных методов

([www.sicpro.org/sicpro12/proc/procdngs/0547.pdf](http://www.sicpro.org/sicpro12/proc/procdngs/0547.pdf))



[1] Learning OpenCV (перевод на русский)

[2] С.И. Герасимов, В.И. Костин «Калибровка неметрических цифровых фото- и видеокамер для фотограмметрических измерений»

[3] Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration // Microsoft Research, One Microsoft Way, США, Рэдмонд. — 1998.

[4] Kolesnik M. Calibration Update Technique for a Zoom Lens // CAIP, 1999, — P.435-443