Lecture 9

BanGVision! It’s MyCode!!!

工业相机成像原理

光电效应

金属被光线照射时，会产生电子

光强越大，电子越多。

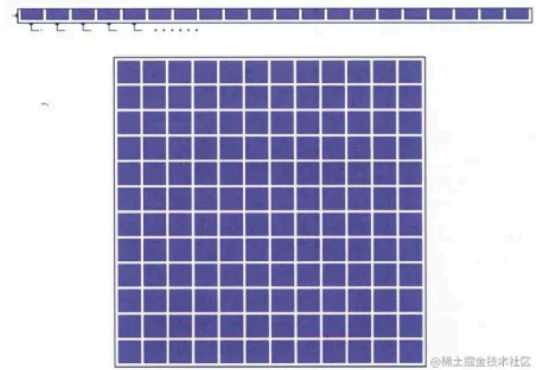
光电二极管

被光照射时能溢出电子的设备

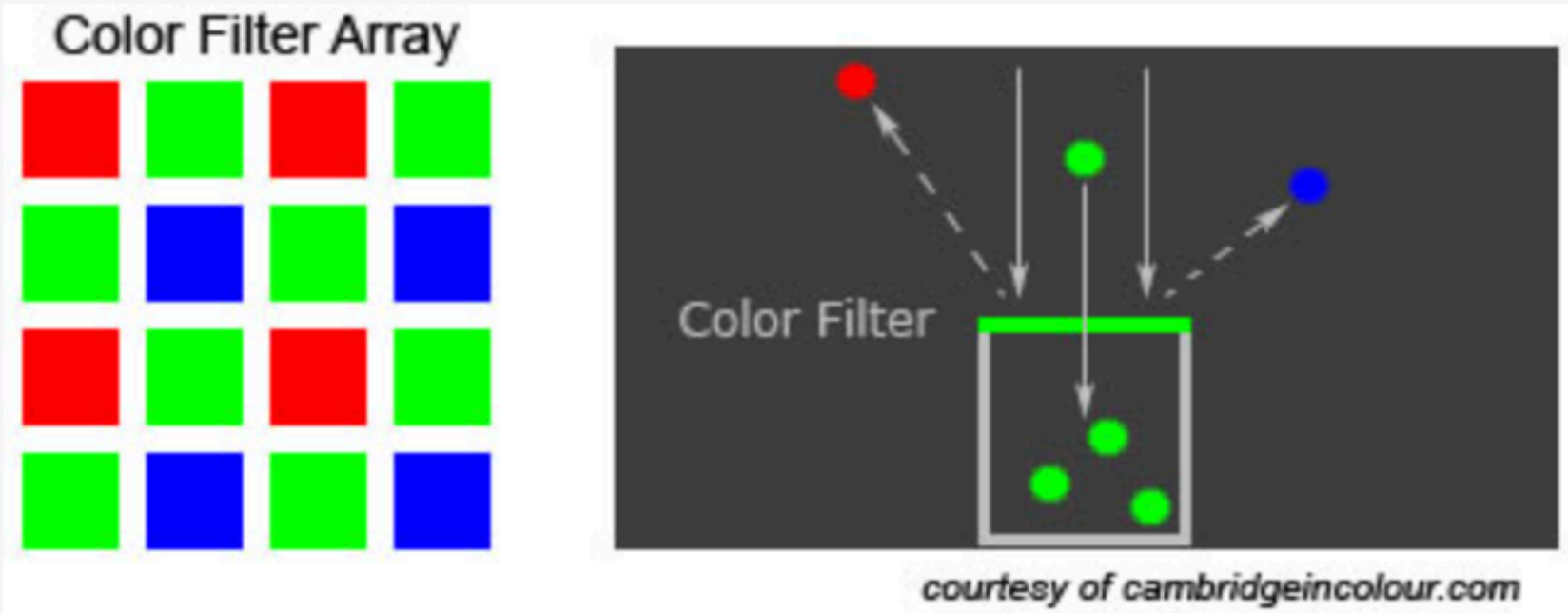
阵列传感器

由多个传感器构成的传感器阵列

- 势阱：储存光电二极管溢散电子的设备
- 颜色滤镜：透过指定颜色光的滤镜，一般由染料或薄膜干涉实现。

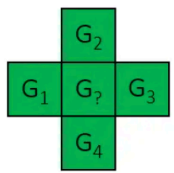


Bayer 传感器阵列

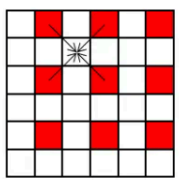


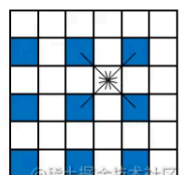
这样，每个传感器能够获取一种颜色的光强。以此生成的图片叫做raw**图**

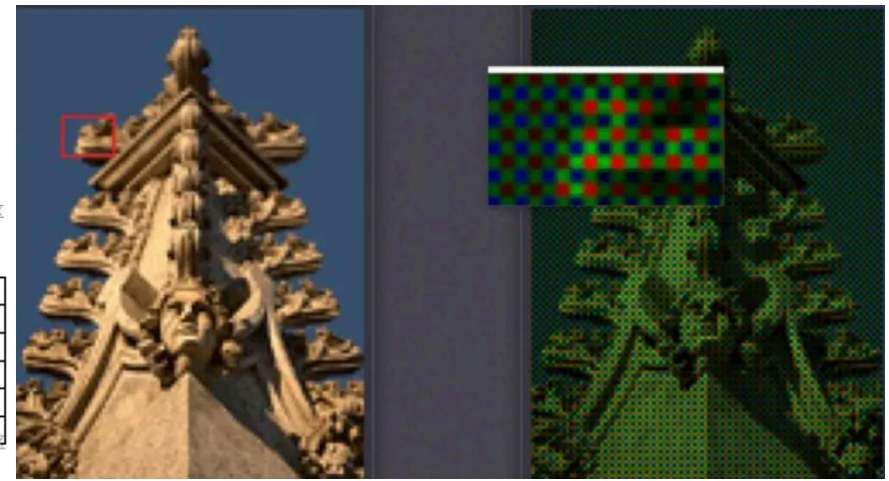
RGB 图像的合成: 去马赛克



$$G_? = \frac{G_1 + G_2 + G_3 + G_4}{4}$$



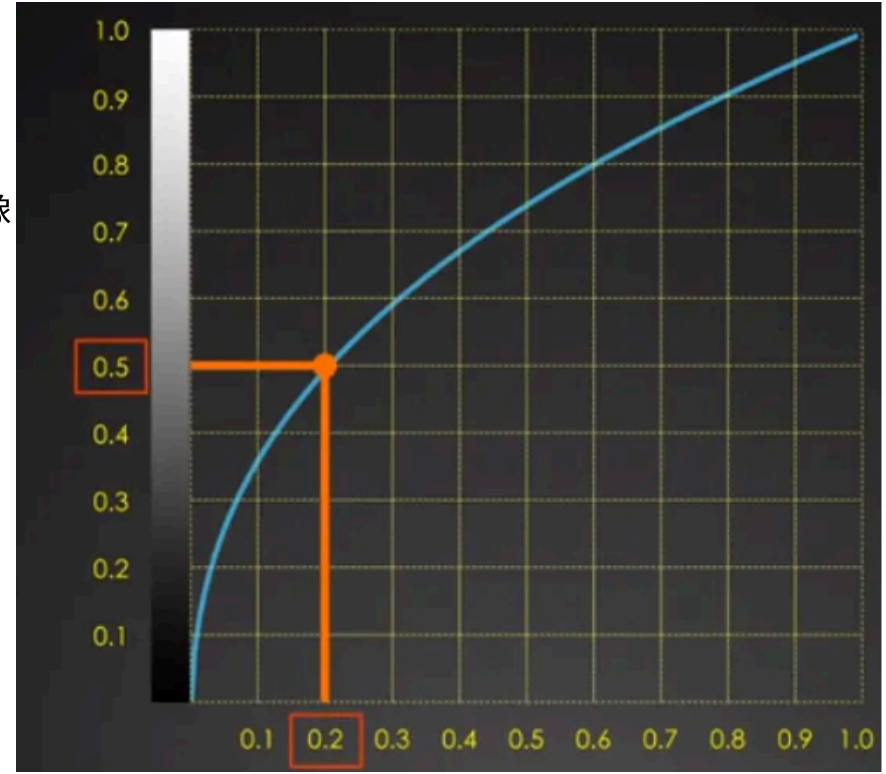




亮度平衡： gamma矫正

人眼对与暗处的细节更加敏感。

如果令图像亮度（灰度）与光强呈线形关系，会让图像看起来更暗。



重要参数

靶面尺寸：传感器最大尺寸。一般表示方法为斜对角线长度(如1/2.8‘表示传感器斜对角线长度为2.8分之一英寸) **镜头靶面尺寸应该至少不小于传感器的尺寸。**

动态范围：相机能够捕捉的最大光强。一般与势阱最大容量有关

焦距：平行光入射时，光线汇聚处与镜头中心的距离。

曝光时间：每一帧图像上，每一个传感器接收光线的时间。曝光时间越长，二极管产生的电荷越多，图像越亮

增益：传感器读取势阱电压，转为数字信号时，乘上的系数。

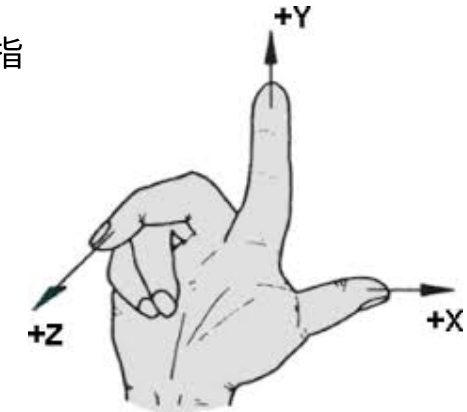
gamma：gamma矫正时，衡量曲线的参数。gamma越大，图像越亮，越关注暗处细节

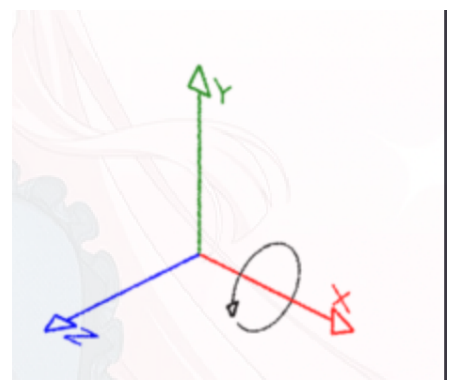
相机标定

右手坐标系

以右手手心为坐标原点，大拇指朝右，食指朝上，中指对着自己

- 大拇指为x轴
- 食指为y轴
- 中指为z轴





坐标转换

参数定义规范

${}^{A}_{B}x$

A 表示相对坐标系，B 表示当前坐标系， x 表示参量，这里指 x 坐标。

这里表示 B 坐标系相对于A 坐标系的x 坐标值。

对于 ${}^{A}_{B}T$ 这个坐标变换阵，采用矩阵左乘的计算方式，表示的是从坐标系 A 到坐标系 B 的坐标系变换。

三维**坐标变换阵**的通式如下：

$$T = \begin{bmatrix} R_{3\times3} & t_{3\times1} \\ O_{1\times3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

坐标变换阵主要由 **旋转矩阵**(rotation matrix) R 和 **平移向量**(translation) t 组成，此外还有一部分齐次坐标。

其中**旋转矩阵** R 是一个3×3 的正交矩阵，描述在三维空间中的旋转。旋转矩阵具有以下性质：

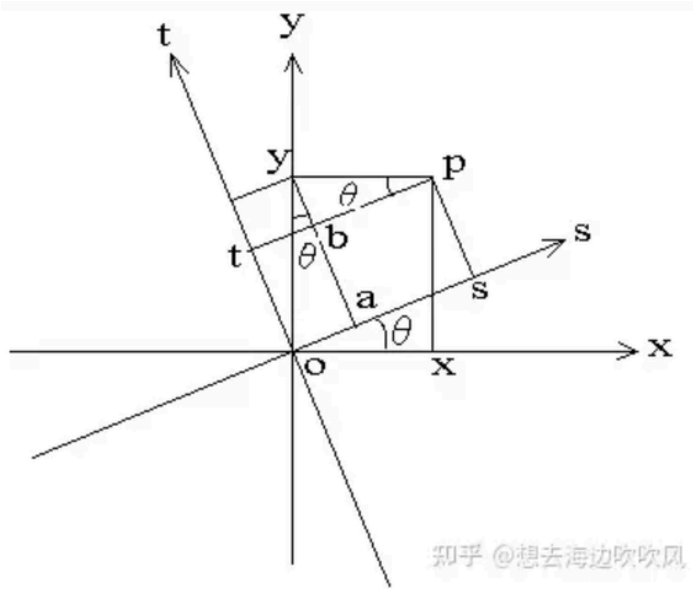
- **正交性**：$R^T R = I$，即矩阵的转置等于其逆。
- **行列式为** 1：$\left| R \right| = 1$，表示旋转不改变空间的体积。

旋转矩阵表示的是两个坐标系之间坐标轴的空间指向的旋转关系。

坐标转换

常见的旋转矩阵可以通过绕坐标轴旋转的方式构造

2维平面的坐标系旋转θ度示例：



- Example: 绕 x、y、z 轴的三维旋转矩阵分别为：

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

坐标转换

平移向量 t 是一个 1×3 的列向量，表示两个坐标的坐标原点之间的平移关系。它可以表示为：

$$t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$$

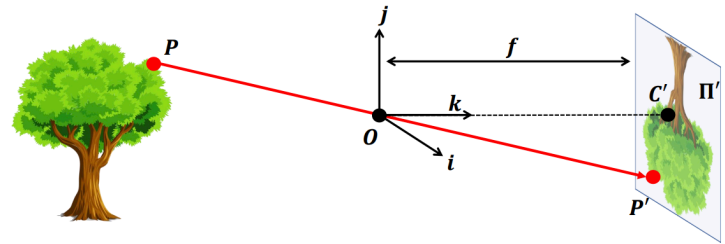
齐次坐标 为了将平移和旋转结合在一个统一的框架下，使用齐次坐标表示。齐次坐标的引入使得在数学上更方便地处理三维变换。齐次坐标将三维点 (x, y, z) 扩展为四维点 $(x, y, z, 1)$.

一个简单的例子如下，通过 ${}^{R}_{F}T$ 完成了从扇叶坐标系F 坐标值 到 机器人坐标系R 坐标值的坐标变换。

$$\begin{bmatrix} {}^{R}x \\ {}^{R}y \\ {}^{R}z \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{R}_{F}T \begin{bmatrix} {}^{F}x \\ {}^{F}y \\ {}^{F}z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{3\times3} & {}^{R}_{F}t_{3\times1} \\ O_{1\times3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{F}x \\ {}^{F}y \\ {}^{F}z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{F}x \\ {}^{F}y \\ {}^{F}z \\ 1 \end{bmatrix}$$

小孔相机 & 相机投影

- f_x, f_y: 相机焦距 (why two focal length?)
- X_c, Y_c, Z_c: 相机坐标系中的点
- u, v: 成像平面上对应点的坐标
- s: 缩放尺度。对齐像素坐标系与成像平面坐标系。

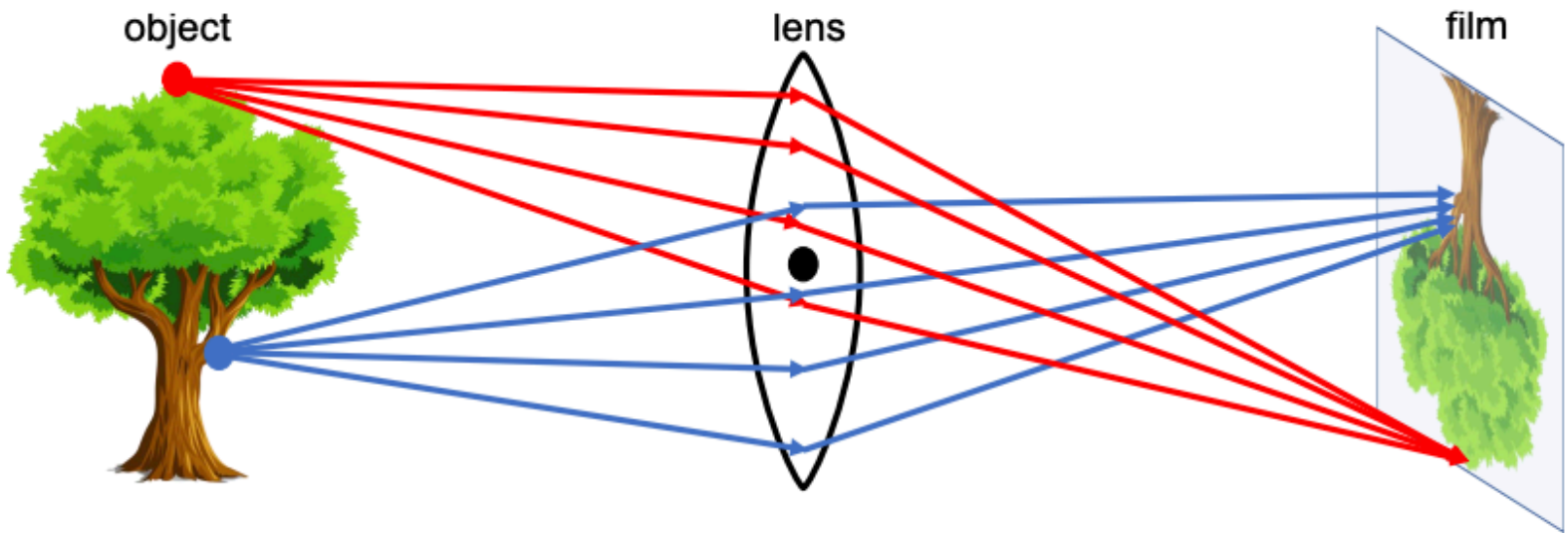


$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x X_c / Z_c + c_x \\ f_y Y_c / Z_c + c_y \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}.$$

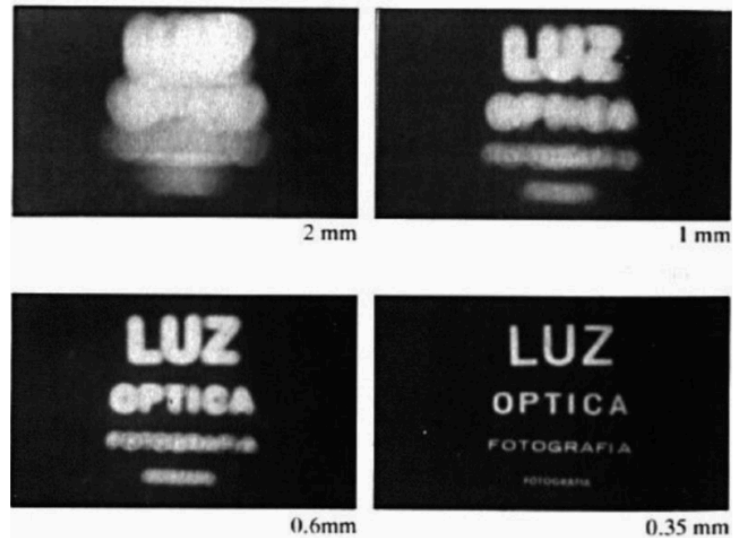
凸透镜成像



- 在小孔成像中, 成像越清晰，透过小孔的光线越少，画面越暗

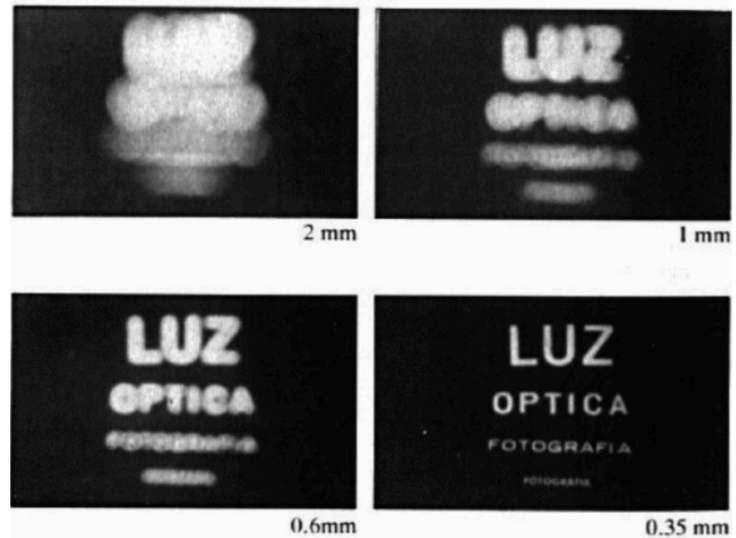
凸透镜成像

- 凸透镜成像时，需要保证成像平面位于光线汇聚处.
  (对于近距离物体，光线汇聚处不是焦距)

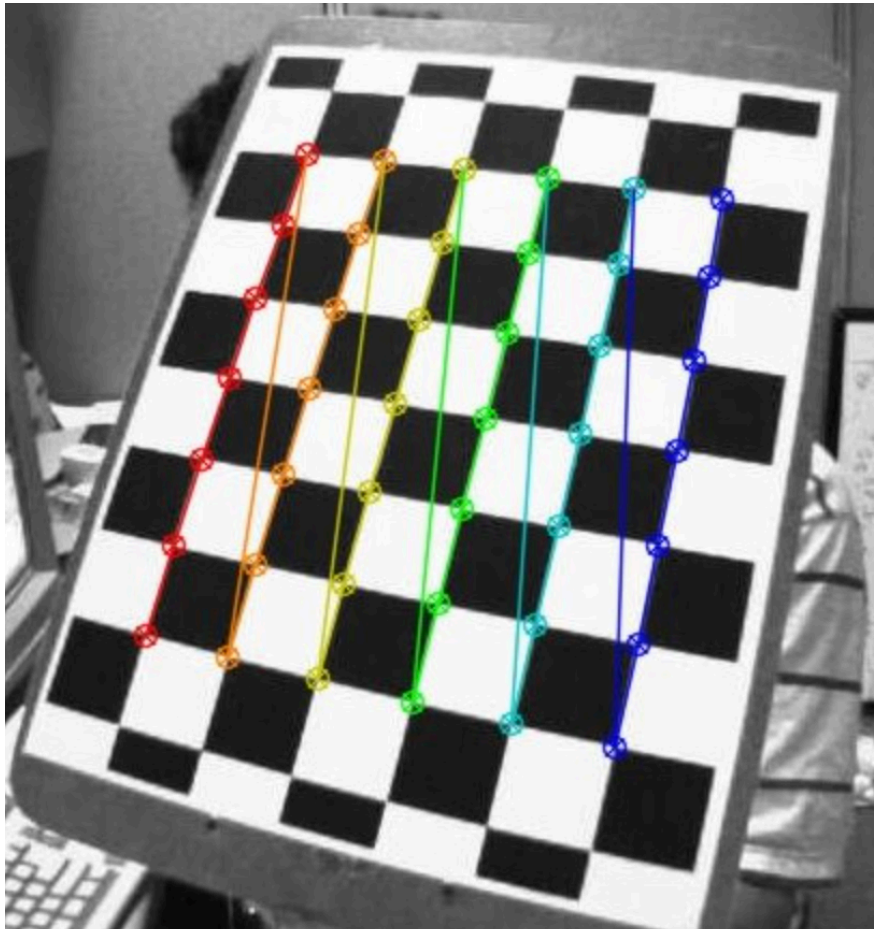


凸透镜成像

- 凸透镜成像时，需要保证成像平面位于光线汇聚处.
  (对于近距离物体，光线汇聚处不是焦距)
- 景深：相机能够清晰成像的有效工作距离



相机标定



相机标定

cv::calibrateCamera 是 OpenCV 中用于相机标定的函数，主要用于计算相机内参矩阵和畸变系数。

```
double cv::calibrateCamera(
    const std::vector<std::vector<cv::Point3f>>& objectPoints,
    const std::vector<std::vector<cv::Point2f>>& imagePoints,
    cv::Size imageSize,
    cv::Mat& cameraMatrix,
    cv::Mat& distCoeffs,
    std::vector<cv::Mat>& rvecs,
    std::vector<cv::Mat>& tvecs,
    int flags = 0,
    cv::TermCriteria criteria = cv::TermCriteria(cv::TermCriteria::EPS + cv::TermCriteria::COUNT, 30, DBL_EPSILON)
);
```

objectPoints: 3D点的集合，通常是世界坐标系中的物体点

imagePoints: 2D点的集合，对应于图像中检测到的物体点。

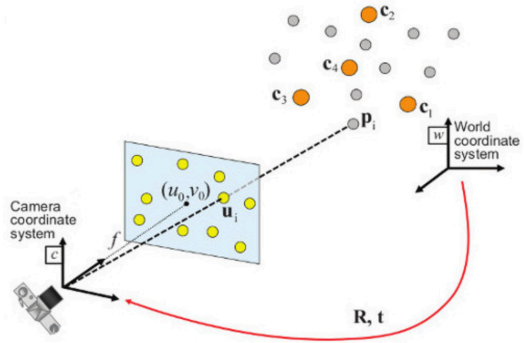
imageSize: 输入图像的尺寸（宽度和高度）

cameraMatrix: 输出参数，表示相机内参矩阵。 distCoeffs: 输出参数，表示相机的畸变系数。

rvecs: 输出参数，旋转向量（相机相对于世界坐标系的旋转）。 tvecs: 输出参数，平移向量。

pnp解算

pnp 算法通过建立相机像素平面上特征点的2D**信息**和实际物体对应特征点的3D坐标信息，完成了目标坐标系和相机坐标系之间的**位置**和**姿态**的解算




```cpp
bool cv::solvePnP(
    const std::vector<cv::Point3f>& objectPoints,
    const std::vector<cv::Point2f>& imagePoints,
    const cv::Mat& cameraMatrix,
    const cv::Mat& distCoeffs,
    cv::Mat& rvec,
    cv::Mat& tvec,
    bool useExtrinsicGuess = false,
    int flags = cv::SOLVEPNP_ITERATIVE
);
```

objectPoints: 3D点的集合，表示物体在空间中的位置。

imagePoints: 对应的2D点集合，表示在图像中的位置。

cameraMatrix: 相机内参矩阵，包含焦距和主点信息。

distCoeffs: 相机畸变系数，描述镜头的畸变情况。

rvec: 输出参数，表示相机的旋转向量。

tvec: 输出参数，表示相机的平移向量。

useExtrinsicGuess: 是否使用外部猜测值