

CVPR 第三次作业-相机标定

强基数学 002

吴天阳 2204210460, 马煜璇 2204220461, 陈博 2203623001

1 实验目的

- 1、掌握针孔相机成像的原理与特点；
- 2、掌握针孔成像系统中的坐标系（世界坐标、摄像机坐标、成像平面坐标、图像坐标）及各个坐标系之间关系；
- 3、掌握针孔相机模型中内参数与外参数的物理意义；掌握相机的经向畸变与切向畸变的特点及校正方法；
- 4、掌握基于平面模式的相机标定原理（张氏标定法）；
- 5、统计分析标定误差形成原因，思考提升标定参数精度的方法。

2 实验原理

2.1 针孔成像原理及特点

针孔成像原理：将三维欧氏空间中点 $P(X, Y, Z)$, ($Z \neq 0$)，通过中心 O （相机镜头透镜）的射线与成像平面的交点 p ，称为 P 的中心投影像点。其中成像平面是不过原点 O 的平面，我们假设成像平面为 $z = 1$ ，则通过向量等比例缩放可得投影像点为 $p'(X/Z, Y/Z, 1)$ 。

针孔成像特点：

1. 近大远小：假设三维空间中高为 h 的柱子，上端点位于 $(X, Y + h, Z)$ ，下端点位于 (X, Y, Z) ，则成像结果分别为 $(X/Z, (Y + h)/Z, 1)$, $(X/Z, Y/Z, 1)$ ，则成像平面上两点高度差为 $h' = h/Z$ ，若 Z 越大则 h' 越小， Z 越小则 h' 越大，即近大远小。

2. 平行线汇聚一点：设 A, B, C 是三维空间中的三条向量， α_1, α_2 分别从 A, B 出发沿着方向 C 传播，则 $\alpha_1(\lambda) : A + \lambda C$, $\alpha_2(\lambda) : B + \lambda C$ ，则 α_1, α_2 在成像平面上的投影分别为

$$\beta_1(\lambda) = \left(\frac{A_x + \lambda C_x}{A_z + \lambda C_z}, \frac{A_y + \lambda C_y}{A_z + \lambda C_z}, 1 \right) \rightarrow \left(\frac{C_x}{C_z}, \frac{C_y}{C_z}, 1 \right), (\lambda \rightarrow \infty),$$

$$\beta_2(\lambda) = \left(\frac{B_x + \lambda C_x}{B_z + \lambda C_z}, \frac{B_y + \lambda C_y}{B_z + \lambda C_z}, 1 \right) \rightarrow \left(\frac{C_x}{C_z}, \frac{C_y}{C_z}, 1 \right), (\lambda \rightarrow \infty).$$

这说明两条射线在相平面上投影的极限区域趋于一点，且起点分别为 $\left(\frac{A_x}{A_z}, \frac{A_y}{A_z}, 1 \right)$ 和 $\left(\frac{B_x}{B_z}, \frac{B_y}{B_z}, 1 \right)$ ，所以两条平行线投影到相平面上不再保持平行，称为消失点。

3. 无限延长平面汇聚成一条线：设三维平面为 $N_x X + N_y Y + N_z Z = d$ ，其中 (N_x, N_y, N_z) 是三维平面的法向量，则投影到二维平面上为

$$N_x X/Z + N_y Y/Z + N_z = N_x x + N_y y + N_z = d/Z \rightarrow 0, (\lambda \rightarrow \infty)$$

则其收敛到投影平面上的直线，称为消失线。

2.2 针孔成像系统中的坐标系

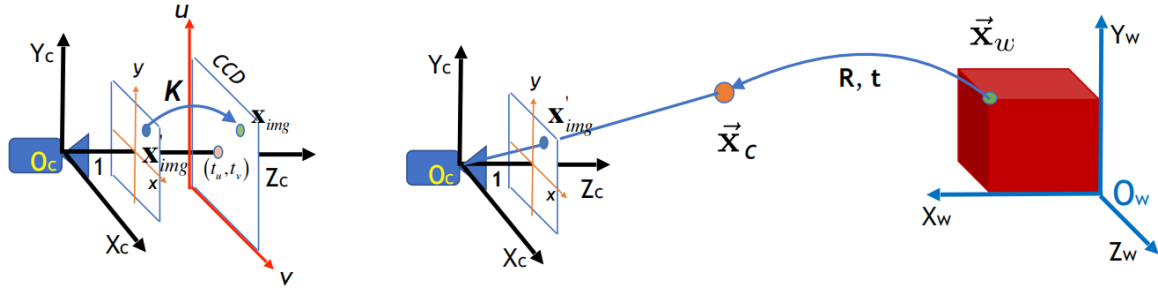


图 1: 四种坐标系转换

1. 世界坐标系：三维空间中建立的基准坐标系，用于标记空间点和摄像机位置，如图1中坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 所示。

2. 摄像机坐标系：以摄像机中心 O_c 作为原点，从 O_c 出发垂直于成像平面的射线作为主轴 Z_c ，从 O_c 出发与像平面水平平行作为 X_c 轴，从 O_c 出发与像平面平行且铅垂直作为 Y_c 轴，如图1中坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 所示。

3. 成像平面坐标系（规范化坐标系）：假设焦距为 $f = 1$ ，则成像平面为摄像机坐标系中 $Z_c = 1$ 的平面，记成像平面与 Z_c 的交点为原点 p ，以像平面水平线和铅垂线分别为 x 轴与 y 轴，如图1中坐标系 $p-xy$ 所示。

4. 图像坐标系：原点 o 位于图像的左下角，平行于 x 轴作为 u 轴，平行于 y 轴作为 v 轴，如图1中坐标系 $o-uv$ 所示。

这里需要引入齐次坐标概念，设三维坐标 $\mathbf{x}(X, Y, Z)$ ，则其对应的齐次坐标为四维坐标 $\mathbf{x}'(X, Y, Z, 1)$ ，升维以后的齐次坐标能够通过矩阵完成平移操作，便于表示。以下坐标定义均为齐次坐标。

我们记三维空间中物体的世界坐标为 \mathbf{x}_w ，摄像机坐标为 \mathbf{x}_c （单位：m 或 mm），成像平面坐标为 \mathbf{x}'_{img} ，图像坐标为 \mathbf{x}_{img} （单位：像素）。

则四个坐标系的转换关系如下图所示

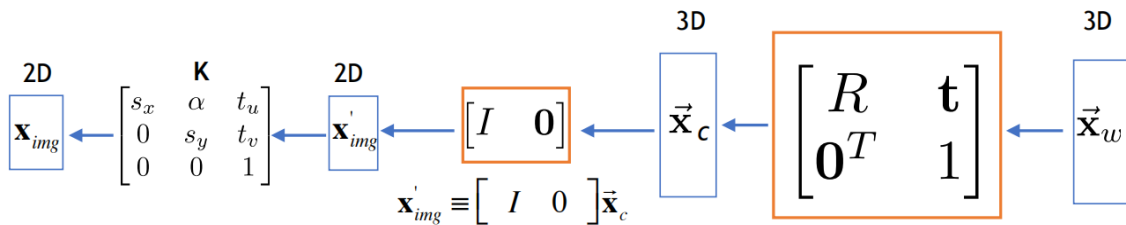


图 2: 四种坐标转换矩阵

上图变换主要包含三个矩阵：

1. 外参矩阵： 4×4 矩阵，包括 3×3 的旋转矩阵 R 以及一个 3×1 的平移向量 t 。该矩阵会随着物体或相机的移动而发生变化。

2. 投影矩阵: 3×4 矩阵, 取前三维分量, 然后转化为齐次坐标, 转化符号记为 \equiv . 注意, 该过程会产生尺度因子 λ , 即缩放比例. 如下式所示

$$[I \ 0] \mathbf{x}_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c & Y_c & Z_c \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{x}'_{img}$$

其中 $[I \ 0] \mathbf{x}_c = \lambda \mathbf{x}'_{img}$, $\lambda = 1/Z_c$.

3. 内参矩阵 K : 3×3 矩阵, 将像素从成像坐标系转化到图像坐标系中, 由相机的自有特性决定, 不随外部物体变化而变化. 其具体表示如下

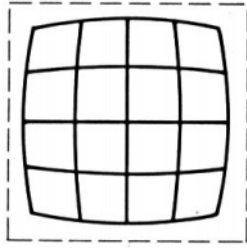
$$K = \begin{bmatrix} f_x & \alpha & t_u \\ 0 & f_y & t_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中 (t_u, t_v) 表示图像坐标系原点在成像坐标系中所处的位置. 由于需要从单位 m 或 mm 转化为像素, 所以还需要 f_x, f_y 分别表示沿 x 与 y 轴的缩放比例 (相机焦距), 由于 $o-uv$ 不一定正交, 所以还存在倾斜因子 α .

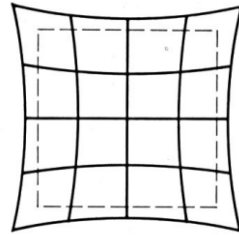
2.3 相机径向畸变与切向畸变的特点及矫正方法

在实际应用中, 由于光学透镜不是完美的, 通过透镜边缘的光线会发生偏转, 导致偏离成像位置, 发生扭曲, 称为光学畸变. 光学畸变主要分为两种:

1. 径向畸变: 主要由透镜问题产生, 是一种非线性扭曲, 畸变程度取决于与主点的距离, 光线距离透镜中心越远, 畸变效果更为严重. 有枕形畸变和桶形畸变两种.



(a) 桶形畸变



(b) 枕形畸变

2. 在摄像机安装过程中, 光轴与成像平面无法完成平行, 导致切向畸变.

两种畸变可用如下模型表示:

$$\begin{cases} x_d - x_c = \overbrace{(x_u - x_c)(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots)}^{\text{径向畸变}} + \overbrace{[p_1(r^2 + 2(x_u - x_c)^2) + 2p_2(x_u - x_c)(y_u - y_c)](1 + p_3 r^2 + \dots)}^{\text{切向畸变}} \\ y_d - y_c = \overbrace{(y_u - y_c)(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots)}^{\text{径向畸变}} + \overbrace{[p_2(r^2 + 2(y_u - y_c)^2) + 2p_1(x_u - x_c)(y_u - y_c)](1 + p_3 r^2 + \dots)}^{\text{切向畸变}} \end{cases}$$

(下述坐标均在成像坐标系中) 其中 (x_u, y_u) 表示理想像素点坐标, (x_d, y_d) 表示畸变图像点坐标, (x_c, y_c) 表示畸变中心, k_n 为镜像畸变系数, p_n 为切向畸变系数, $r^2 = (x_u - x_c)^2 + (y_u - y_c)^2$.

令 $(x_c, y_c) = (0, 0)$, 略去部分高阶项, 可得简化版畸变模型

$$\begin{cases} x_d = x_u(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1(r^2 + 2x_u^2) + 2p_2 x_u y_u \\ y_d = y_u(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_2(r^2 + 2y_u^2) + 2p_1 x_u y_u \end{cases} \quad (2.1)$$

通过对畸变参数 k_1, k_2, p_1, p_2 进行求解后, 反解求得理想像素点坐标 (x_u, y_u) .

2.4 张氏标定法

由于世界坐标系可以自由设定, 我们不妨取三维平面中的黑白棋盘作为 xOy 平面, 则棋盘上的点均有 $Z_w = 0$, 由相机成像原理可知

$$x_{img} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \equiv K[R \quad \mathbf{t}]x_w = K[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{r}_3 \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = K[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中 H 矩阵称为棋盘平面与图像平面之间的单应性 (Homography) 变换矩阵, 由于尺度因子的省略, H 矩阵对应了相机平面到全体同一偏转角度棋盘平面的一个同态映射.

通过大量的像素坐标以及对应的棋盘格坐标, 可建立多个关于 H 的方程组, H 为 3×3 矩阵, 但由于存在一个尺度因子, 所以共有 8 个待定参数. 一组对应坐标可以得到两个方程, 所以至少 4 组对应坐标, 更多的对应坐标可以通过最小二乘法估计得到 H 矩阵. 下面通过 H 矩阵分别求解内参矩阵 K , 外参矩阵以及径向畸变估计.

2.4.1 估计相机内参矩阵

$$H = [\mathbf{h}_1 \quad \mathbf{h}_2 \quad \mathbf{h}_3] = \lambda K[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}] \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{r}_1 = \frac{1}{\lambda} K^{-1} \mathbf{h}_1, \\ \mathbf{r}_2 = \frac{1}{\lambda} K^{-1} \mathbf{h}_2. \end{cases} \quad (2.2)$$

由于 $\mathbf{r}_1 \perp \mathbf{r}_2$, $\|\mathbf{r}_1\| = \|\mathbf{r}_2\|$, 于是

$$\begin{cases} \mathbf{h}_1^T (K^{-1})^T K^{-1} \mathbf{h}_2 = 0, \\ \mathbf{h}_1^T (K^{-1})^T K^{-1} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T (K^{-1})^T K^{-1} \mathbf{h}_2, \end{cases} \quad (2.3)$$

令

$$B = (K^{-1})^T K^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix}$$

由于 B 矩阵是对称阵, 所以只需确定下三角部分 6 个参数, 令

$$\mathbf{b} = [B_{11} \quad B_{12} \quad B_{22} \quad B_{13} \quad B_{23} \quad B_{33}]^T$$

则上述方程2.3可表示为方程
$$\begin{cases} \mathbf{v}_{12}^T \mathbf{b} = 0, \\ [\mathbf{v}_{11}^T - \mathbf{v}_{22}^T] \mathbf{b} = 0. \end{cases}, \text{ 其中 } \mathbf{v}_{ij} \text{ 由 } H \text{ 矩阵确定, 具体形式}$$

请见<https://zhuanlan.zhihu.com/p/136827980>. 由于每种不同角度的棋盘图像可以确定不同的 H 矩阵, 从而确定 \mathbf{v}_{ij} , 于是每张不同角度的棋盘图像可以确定两个关于 \mathbf{b} 的方程, 总共有 6 个待定参数, 所以需要至少 3 张不同角度的棋盘才能唯一确定内参矩阵.

2.4.2 估计相机外参矩阵

有了内参矩阵 K 以后, 我们通过式2.2可知

$$\lambda[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}] = K^{-1}[\mathbf{h}_1 \quad \mathbf{h}_2 \quad \mathbf{h}_3]$$

则

$$\begin{cases} \lambda = \|K^{-1}\mathbf{h}_1\|_2 = \|K^{-1}\mathbf{h}_2\|_2, \\ \mathbf{t} = K^{-1}\mathbf{h}_3/\lambda, \\ \mathbf{r}_1 = K^{-1}\mathbf{h}_1/\lambda, \\ \mathbf{r}_2 = K^{-1}\mathbf{h}_2/\lambda, \\ \mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2. \end{cases}$$

其中 $\|\cdot\|_2$ 为 2-范数 (欧式范数), 于是外参矩阵为 $[R \quad \mathbf{t}] = [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{r}_3 \quad \mathbf{t}]$.

在实际应用中, 由于数据中存在噪音, R 矩阵不一定完全满足旋转矩阵的性质, 所以通常使用奇异值分解求解 R .

2.4.3 最大似然估计

在实际标定过程中, 一般存在大量标定图片同时对参数进行估计, 这时使用最大似然估计对上述算法进行优化. 假设有 n 张标定图片, 每张图片中都有 m 个棋盘格角点, 且棋盘格大小一致, 棋盘中角点相对位置相同. 利用平方损失函数, 构造最小化风险函数如下

$$\min_{K, \mathbf{k}, R, \mathbf{t}, \lambda} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|x_{ij} - x'(K, \mathbf{k}, R_i, \mathbf{t}_i, \lambda_i, X_j)\|^2$$

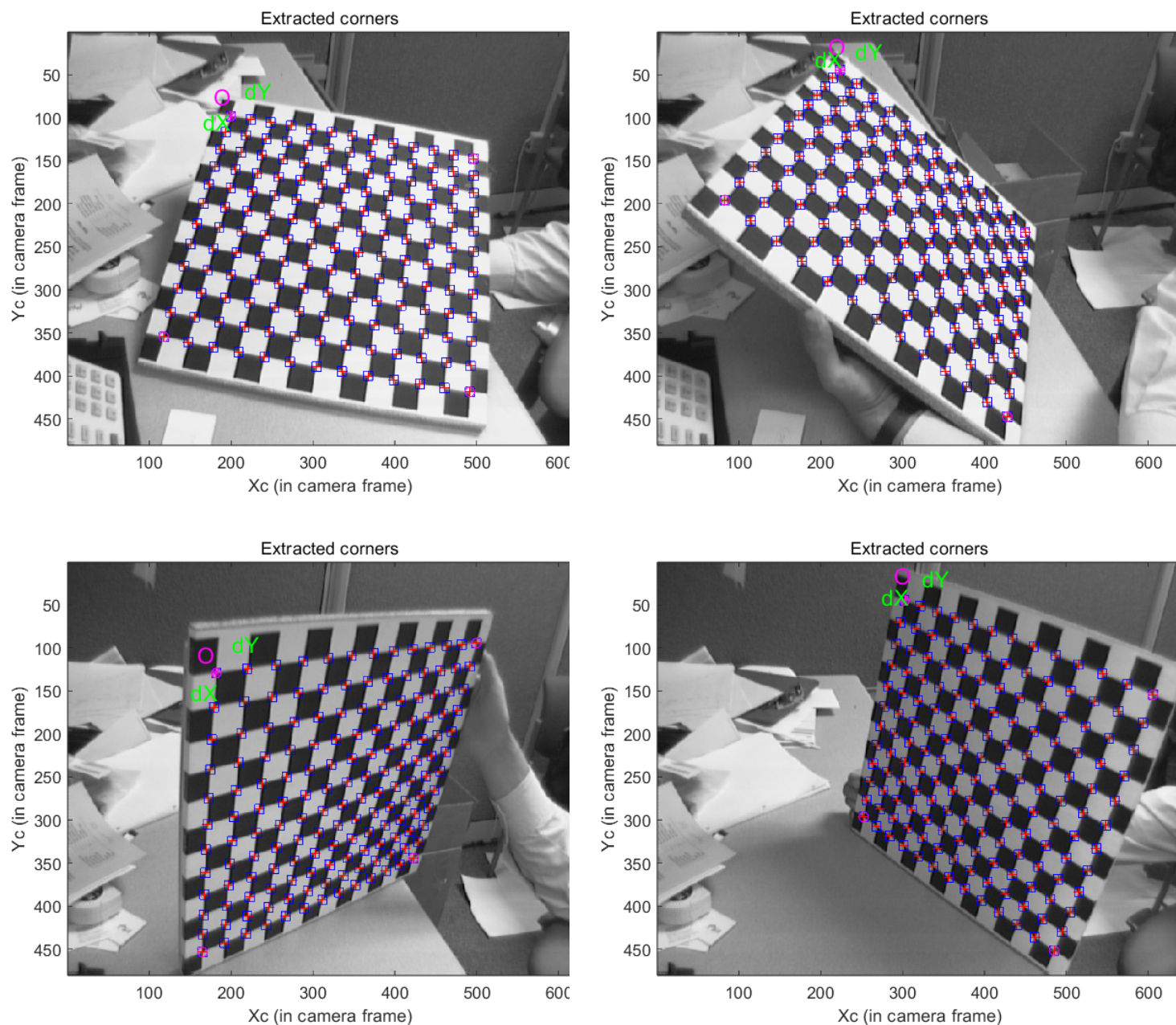
其中 K 为内参矩阵, \mathbf{k} 为径向畸变参数, $[R_i \quad \mathbf{t}_i]$ 为第 i 张图像对应的外参矩阵, λ_i 为第 i 张图像对应的尺度因子, 第 i 张图像中与棋盘中第 j 个角点坐标 X_j 对应的图像坐标为 x_{ij} , $x'(\cdot)$ 为根据棋盘中角点坐标 X_j 以及由该图片对应的外参数矩阵 $[R_i \quad \mathbf{t}_i]$ 、尺度因子 λ_i 及内参矩阵和径向畸变, 预测得到的图像像素坐标.

3 实验步骤与结果分析

利用 MATLAB 工具箱 Camera Calibration Toolbox for Matlab 进行相机标定.

3.1 提取棋盘格角点

提取 `calib_example` 中奇数编号的棋盘图片角点，角点矩阵大小为 $12 \times 13 = 156$ ，编号为 3,5,7,9 的图像角点检测结果如下图所示：



3.2 求解单应性矩阵

通过 `compute_homography.m` 文件计算每幅图像的单应性矩阵，下面通过上述角点检测计算出的 x, X 数组，分别为图像坐标和世界坐标，要求大小为 3×156 ，但 x 矩阵为 2×156 ，所以需要增加全为 1 的一行， X 矩阵为 3×156 ，但最下一行为 0，所以需要前两行的切片，再增加全为 1 的一行位于最下。代码如下

```

1 function [H] = calc_homography(x, X)
2     shape = size(x);
3     x_camera = [x; ones(1, shape(2))];
4     x_world = [X(1:2,:); ones(1, shape(2))];
5     H = compute_homography(x_camera, x_world);
6 end

```

得到图像奇数图像的 H 矩阵如下所示

1	H_1 =		H_11 =			
2	-0.2204	0.8074	166.6303	0.0612	0.9032	166.2815
3	0.2787	0.0759	178.1498	0.9289	0.1280	28.6891
4	-0.0009	0.0001	1.0000	0.0006	0.0000	1.0000
5	H_3 =		H_13 =			
6	-0.3254	0.8275	197.7143	0.0877	1.2629	145.6157
7	0.5622	0.1381	95.3857	1.2514	0.1500	71.6536
8	-0.0006	-0.0000	1.0000	0.0008	0.0003	1.0000
9	H_5 =		H_15 =			
10	-0.5147	0.7639	222.2079	0.0331	1.3813	40.7023
11	0.2629	0.5986	41.0748	1.4056	0.1315	64.2955
12	-0.0010	0.0003	1.0000	0.0005	0.0003	1.0000
13	H_7 =		H_17 =			
14	0.1342	1.5613	180.1398	0.2169	1.1970	124.6471
15	1.5318	0.0204	127.4220	1.3618	0.2535	58.2397
16	0.0012	0.0013	1.0000	0.0012	-0.0002	1.0000
17	H_9 =		H_19 =			
18	-0.0230	0.4463	301.6882	0.2281	2.0098	99.4373
19	0.9281	0.2101	40.7188	1.8122	-0.1245	90.3232
20	0.0005	-0.0007	1.0000	0.0019	0.0015	1.0000

通过逆变换，加深理解.

3.3 估计相机内参与外参

3.3.1 初始化内参

利用 `init_intrinsic_param.m` 计算初始化内参矩阵，得到以下输出结果：

```

1 Focal Length:      fc = [ 668.00353    668.00353 ]
2 Principal point:   cc = [ 319.50000    239.50000 ]
3 Skew:  alpha_c = [ 0.00000 ] => angle of pixel = 90.00000 degrees
4 Distortion:  kc = [ 0.00000    0.00000    0.00000    0.00000    0.00000 ]

```

于是内参矩阵为

$$K = \begin{bmatrix} 668 & 0 & 319.5 \\ 0 & 668 & 239.5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由上述推导可知, 约束条件为 $\mathbf{r}_1 \perp \mathbf{r}_2$, $\|\mathbf{r}_1\| = \|\mathbf{r}_2\|$.

由于没有相机规格书, 无法得知其物理含义.

3.3.2 计算外参

利用 `compute_extrinsic_init` 计算外参矩阵, 返回值中的 `Tckk` 为平移向量, `Rckk` 为旋转矩阵:

```

1 function [out] = calc_external_par(x, X, fc, cc)
2     [omckk,Tckk,Rckk] = compute_extrinsic_init(x,X,fc,cc,0,0);
3     out = [[Rckk, Tckk]; zeros(1, 4)];
4     out(4, 4) = 1;
5 end

```

于是外参矩阵为:

```

1 T_1 =
2     0.0742     0.9897     0.1226 -199.2004
3     0.6416     0.0467    -0.7656  -79.9566
4    -0.7634     0.1355    -0.6315  875.4722
5         0         0         0     1.0000
6 T_3 =
7    -0.1463     0.9861     0.0788 -144.6158
8     0.8508     0.1660    -0.4986 -171.5600
9    -0.5047    -0.0059    -0.8633  794.8232
10         0         0         0     1.0000
11 T_5 =
12    -0.2073     0.7679     0.6061 -111.9479
13     0.5806     0.5952    -0.5555 -224.5798
14    -0.7874     0.2367    -0.5692  758.0974
15         0         0         0     1.0000
16 T_7 =
17    -0.1607     0.7761     0.6098  -95.8754
18     0.8366    -0.2207     0.5014  -70.8197
19     0.5237     0.5908    -0.6138  452.0687
20         0         0         0     1.0000
21 T_9 =
22    -0.2121     0.7567    -0.6184  -22.9072

```



```

23  0.8961    0.4031    0.1858 -220.2822
24  0.3899   -0.5148   -0.7635  757.5272
25      0        0        0    1.0000

```

优化参数部分不理解原理无法实现.

3.4 分析标定误差

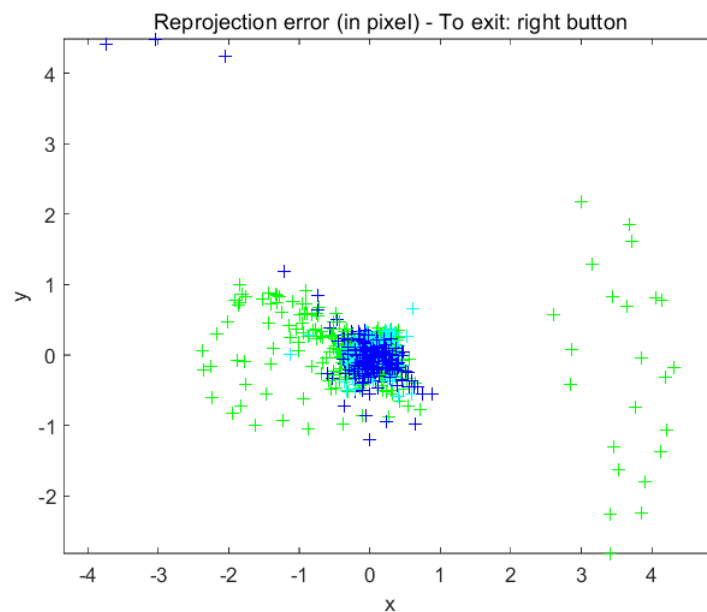
通过 Calibration 功能得到标定结果及误差 (全部奇数张图片, 共 10 张图片):

```

1  Focal Length: fc = [ 661.07479  665.06267 ] +/- [ 1.91695  2.10219 ]
2  Principal point: cc = [ 303.25670  241.93662 ] +/- [ 3.53331  3.43451 ]
3  Skew: alpha_c = [ 0.00000 ] +/- [ 0.00000 ] => angle of pixel axes =
    ↪ 90.00000 +/- 0.00000 degrees
4  Distortion: kc = [ -0.29392  0.38862  0.00060  -0.00101  0.00000 ] +/- [
    ↪ 0.01548  0.06653  0.00084  0.00087  0.00000 ]
5  Pixel error: err = [ 0.57177  0.33143 ]

```

误差分布



通过 Calibration 功能得到标定结果及误差 (全部奇数张图片, 共 5 张图片):

```

1  Focal Length: fc = [ 658.13644  658.74730 ] +/- [ 0.75708  0.81297 ]
2  Principal point: cc = [ 301.46396  246.52052 ] +/- [ 1.60017  1.55244 ]
3  Skew: alpha_c = [ 0.00000 ] +/- [ 0.00000 ] => angle of pixel axes =
    ↪ 90.00000 +/- 0.00000 degrees

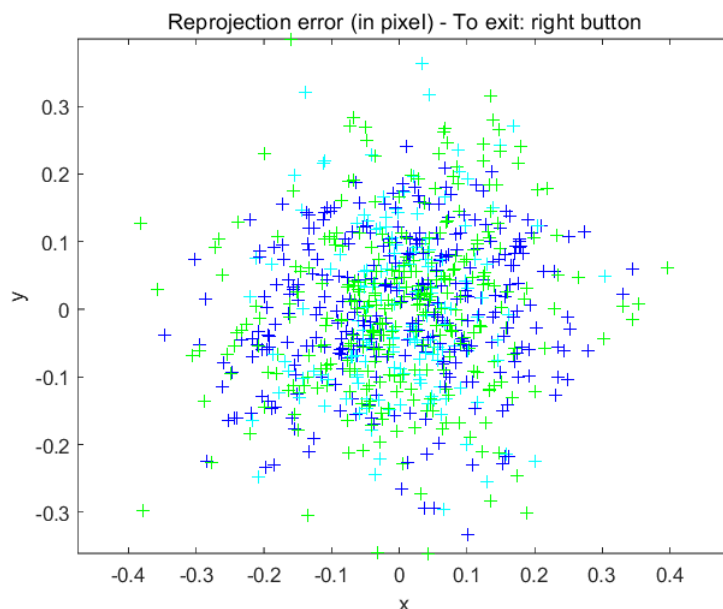
```

```

4 Distortion: kc = [ -0.26042  0.16194  0.00028  -0.00042  0.00000 ] +/- [
  ↪  0.00631  0.03001  0.00033  0.00036  0.00000 ]
5 Pixel error: err = [ 0.12323  0.11696 ]

```

误差分布



可以发现，虽然图像使用更多，但是可能导致噪声增多，误差分布中会出现较多的离散点，使得估计误差增大，而使用少量图像进行标定噪声数目较少，不会出现这种现象。说明每张标定图片降噪十分重要。

4 结论与讨论

通过本次实验，基本理解相机成像原理，以及张氏标定法具体计算方法，利用 MATLAB 工具箱进行相机标定，但由于没有具体相机参数，无法得知其物理含义，而且并不清楚优化参数部分原理，最后进行误差分析过程也是直接使用工具箱的功能，该部分理解较弱。