

1.标定意义及目标

2.鱼眼相机内参标定

2.1 鱼眼相机模型

2.2 鱼眼相机内参标定方案

2.3 内参标定结果

2.4 内参标定结果评估

3.相机-车体外参标定

3.1 外参标定方案概述

3.2 相机-车体外参标定

3.3 外参标定结果

3.4 外参标定结果评估

表0.1 修订记录

No.	变更日期	版本	修改描述	作者	审核
1	2021.9.18	v.0.1	初始版本	孙沁璇	王冬生
2	2021.9.22	v.0.2	1.根据王工意见：增加内参标定重投影误差评估，修改表3.3.1表头顺序； 2.使用9.22采集标定布数据更新外参标定实验数据以及结果。	孙沁璇	王冬生
3	2021.9.23	v.0.3	1.根据王工意见：加入内外参标定结果； 2.修改外参输出方式，保存成yaml文件格式。	孙沁璇	

1.标定意义及目标

相机内参标定以及多传感器外参标定是定位与建图任务的基础，而标定精度也对SLAM系统的性能有着很重要的作用。内参标定包含相机内参矩阵、相机模型参数、以及模型畸变参数的估计，当已知相机内参后，便可以完成相机坐标系下3D点到相机成像平面的投影。而外参标定主要解决多传感器相对位姿计算的问题，是多传感器观测数据之间进行数据关联、对齐以及配准的基础。

2.鱼眼相机内参标定

2.1 鱼眼相机模型

为了兼容相机-车体外参标定中所使用的AprilTag定位代码，采用[OpenCV fisheye](#)模型对鱼眼相机内参进行标定。对于一个在相机坐标系下的3D点 $X_c = (x, y, z)^T$ ，令

$$\begin{aligned}a &= \frac{x}{z}, \quad b = \frac{y}{z} \\r &= \sqrt{a^2 + b^2} \\\theta &= \text{atan}(r)\end{aligned}$$

鱼眼相机图像畸变模型可以表示为

$$\theta_d = \theta (1 + k_1\theta^2 + k_2\theta^4 + k_3\theta^6 + k_4\theta^8)$$

经过模型畸变后，3D点在归一化平面的坐标 $(x', y')^T$ 为

$$x' = \left(\frac{\theta_d}{r} \right) a$$

$$y' = \left(\frac{\theta_d}{r} \right) b$$

最后鱼眼图像上的像素坐标 $(u, v)^T$ 为

$$u = f_x (x' + \alpha y') + c_x$$

$$v = f_y y' + c_y$$

其中 f_x, f_y, c_x, c_y 为相机的内参。

2.2 鱼眼相机内参标定方案

鱼眼相机内参标定代码可见[camera_vehicle_calibration\(gitlab\)](#)下的opencv_calibration目录。

在进行相机内参标定时，首先对四个鱼眼相机分别进行标定数据的采集，如图2.2.1-图2.2.4所示。在进行数据采集时，应尽量使得标定板在各个维度进行相应的运动，在不离开视野区域的前提下，运动范围尽量遍布相机视野。

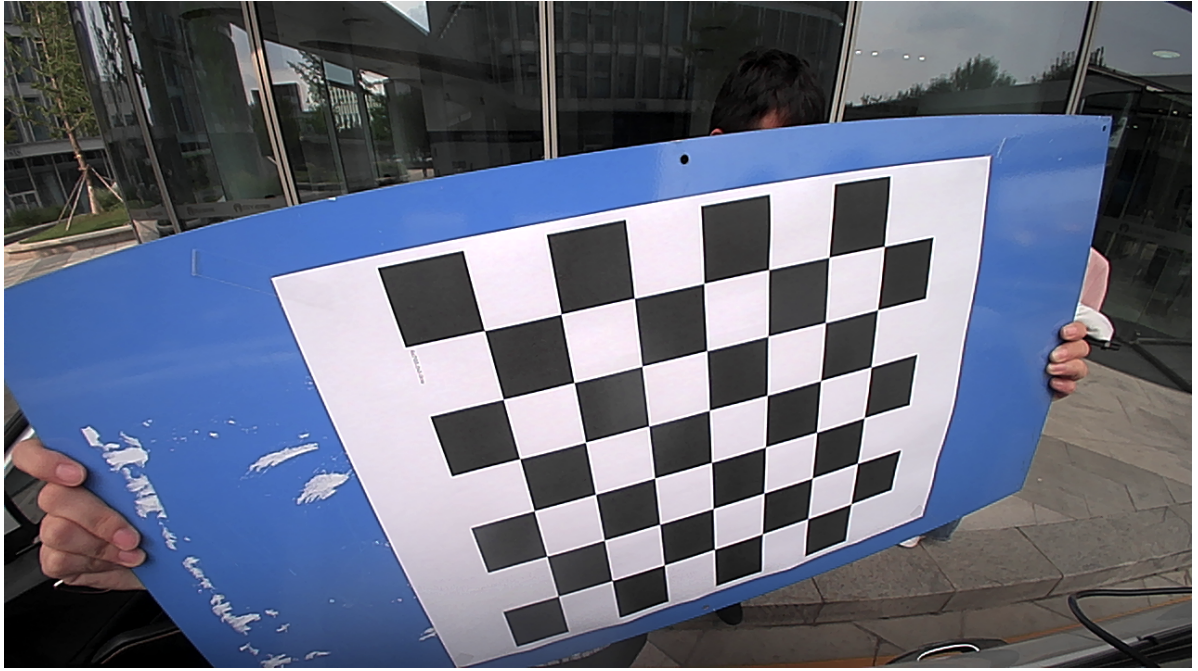


图2.2.1 右视鱼眼相机内参标定图像

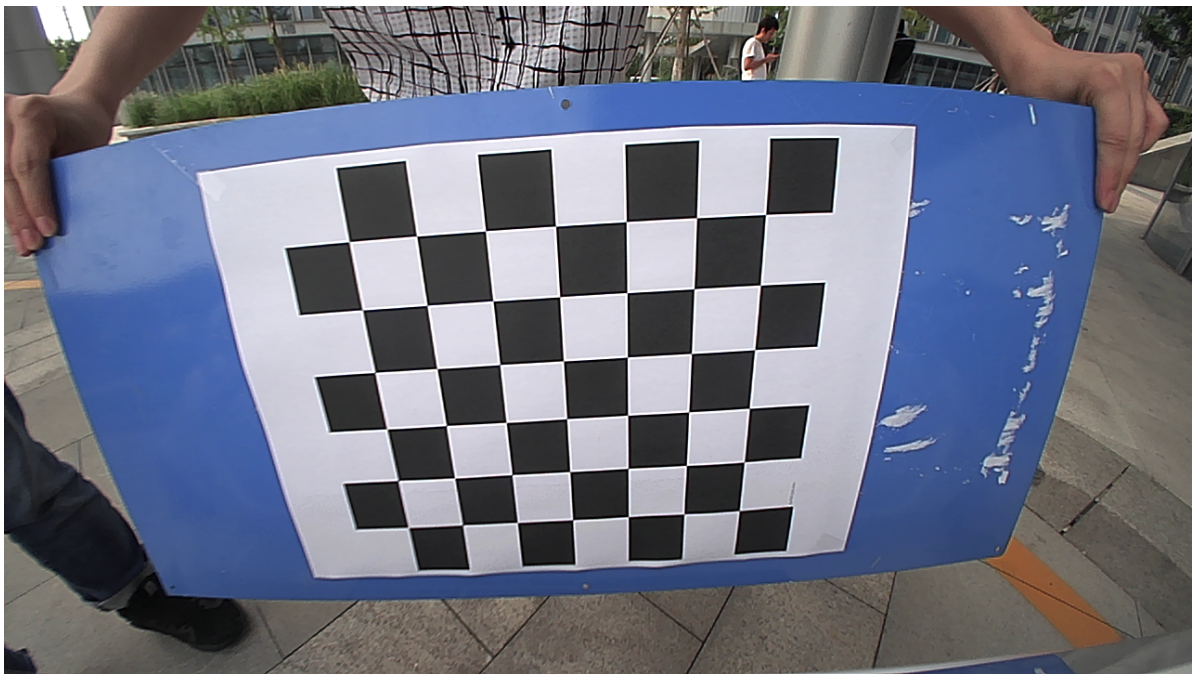


图2.2.2 前视鱼眼相机内参标定图像

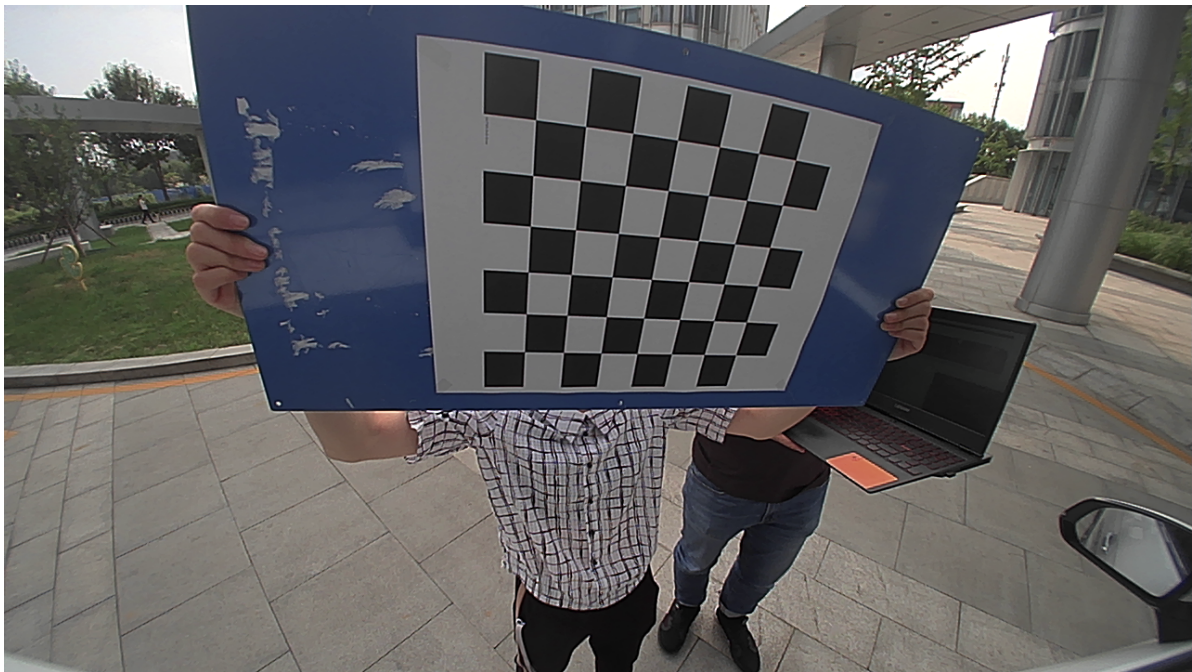


图2.2.3 左视鱼眼相机内参标定图像

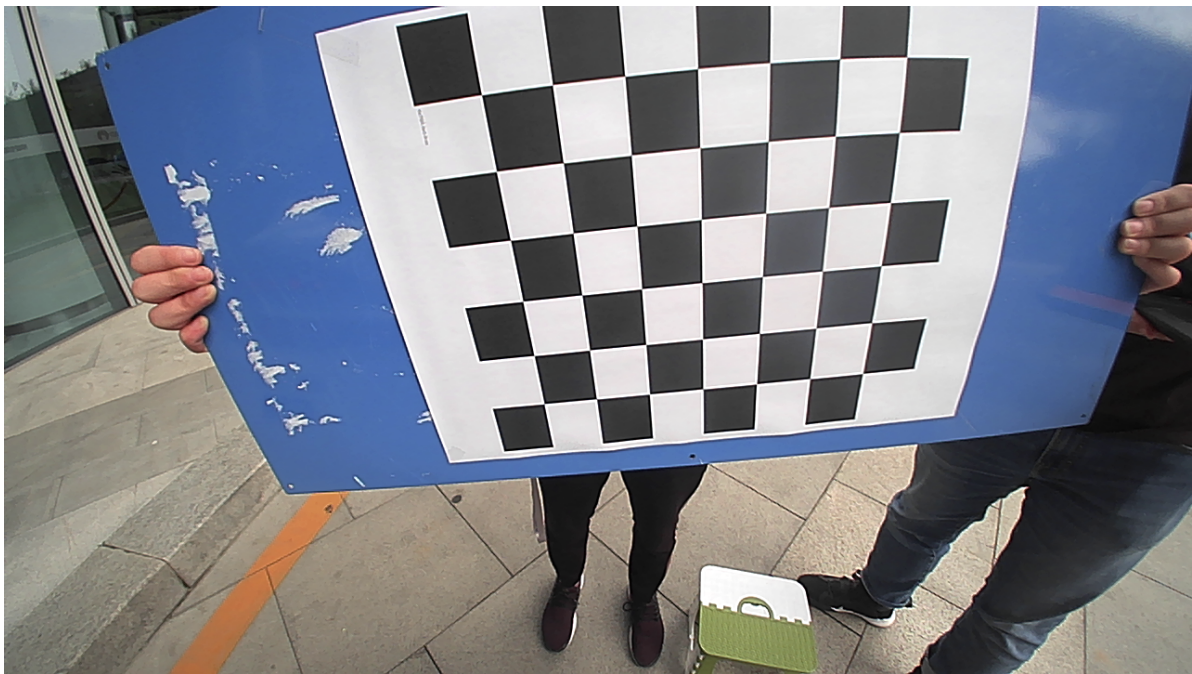


图2.2.4 后视鱼眼相机内参标定图像

在标定图像采集完成后，在工程目录下建立 `img_${camera}` 文件夹存放采集好的标定图像，并生成 `img_${camera}.txt` 文件，列出所有标定图像的相对路径。以右视相机为例，标定图像存放在 `./img_right` 目录下，其对应的 `./img_right.txt` 文件内容为：

```
# ./img_right.txt
img_right/1631690408.524919.png
img_right/1631690409.663292.png
img_right/1631690410.457858.png
img_right/1631690411.546102.png
img_right/1631690412.438392.png
...
```

按上述方法完成标定图像布署后，在工程目录(`./opencv_calibration`)下运行 `run.sh` 即可完成四个环视相机的内参标定。

```
# -----
# run.sh
# -----

#!/bin/sh

./calibration img_right.txt calib_right.yaml
./calibration img_front.txt calib_front.yaml
./calibration img_left.txt calib_left.yaml
./calibration img_rear.txt calib_rear.yaml

cp ./calib_right.yaml ../data/img/calib_right.yaml
cp ./calib_front.yaml ../data/img/calib_front.yaml
cp ./calib_left.yaml ../data/img/calib_left.yaml
cp ./calib_rear.yaml ../data/img/calib_rear.yaml
```

标定输出 `calib_${camera}.yaml` 配置文件，其中包含图像分辨率、相机内参矩阵和畸变模型参数，可直接用于相机-车体外参标定。以右视相机为例，其输出配置文件内容为：


```
# -----
# calib_right.yaml
# -----

image_width: 1280
image_height: 720
camera_name: camera
camera_matrix:
  rows: 3
  cols: 3
  data: [429.74459114051712, 0, 619.22596643438362, 0, 429.83803063011919,
401.92878121320769, 0, 0, 1]
distortion_coefficients:
  rows: 1
  cols: 4
  data: [0.29938336892050299, 0.073557008355643466, -0.069200024479249625,
0.010450303044365006]
```

2.3 内参标定结果

相机内参矩阵和畸变参数记为

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

$$D = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4]$$

四个环视相机以右下标的形式进行标识，记录内参标定结果如下：

$$K_{right} = \begin{bmatrix} 429.74 & 0 & 619.23 \\ 0 & 429.84 & 401.93 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_{right} = [0.299 \quad 0.073 \quad -0.069 \quad 0.010]$$

$$K_{front} = \begin{bmatrix} 433.16 & 0 & 595.30 \\ 0 & 432.75 & 386.14 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_{front} = [0.309 \quad 0.063 \quad -0.040 \quad -0.012]$$

$$K_{left} = \begin{bmatrix} 431.10 & 0 & 614.08 \\ 0 & 431.83 & 399.31 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_{left} = [0.304 \quad 0.116 \quad -0.136 \quad 0.043]$$

$$K_{rear} = \begin{bmatrix} 431.71 & 0 & 654.41 \\ 0 & 431.32 & 389.04 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_{rear} = [0.299 \quad 0.085 \quad -0.090 \quad 0.022]$$

2.4 内参标定结果评估

通过重投影误差的计算，对内参标定精度进行评估，如表2.3.1所示。

	camera_right	camera_front	camera_left	camera_rear
reprojection error	0.26px	0.28px	0.20px	0.21px

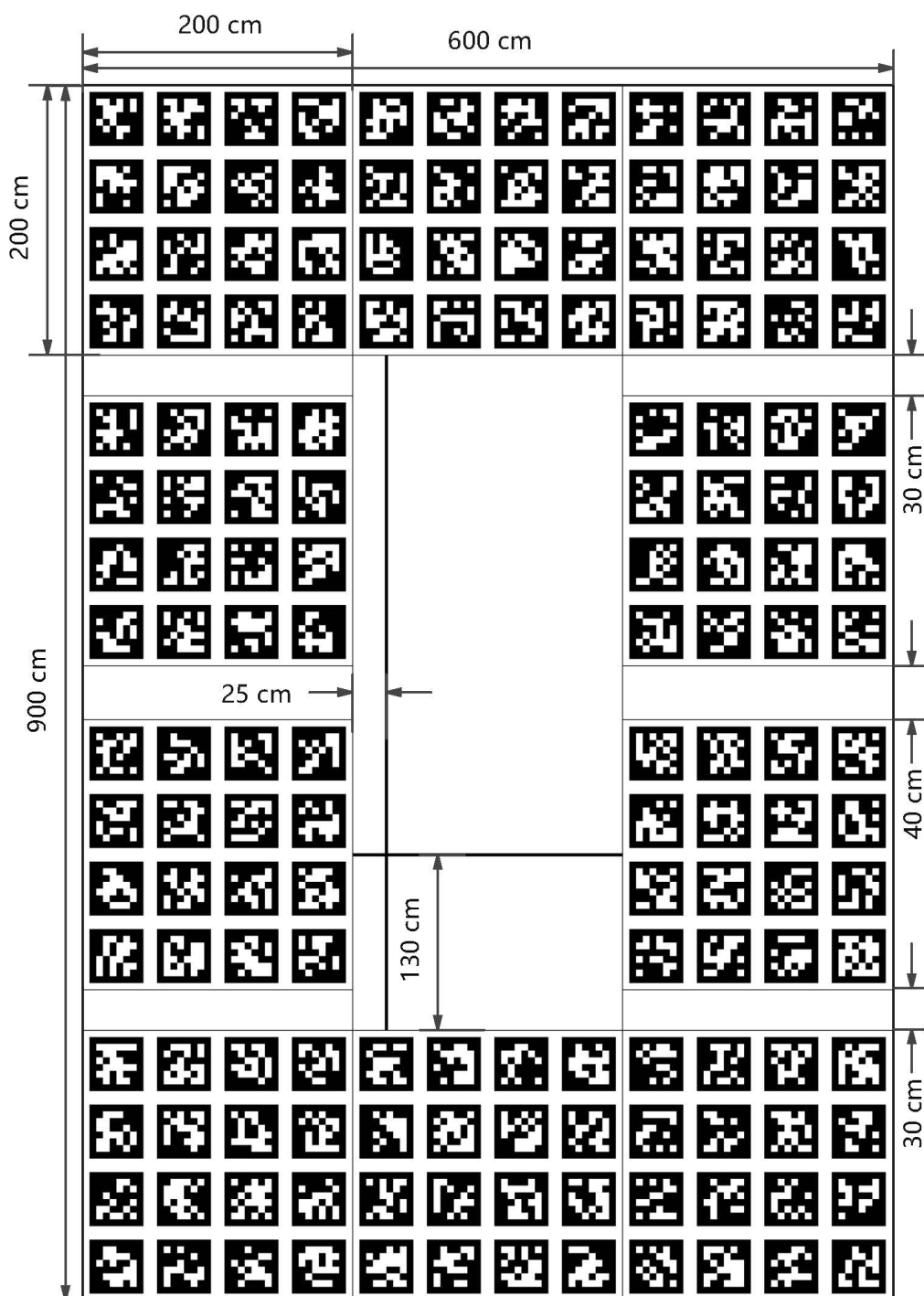
3.相机-车体外参标定

3.1 外参标定方案概述

考虑到四个环视相机固定在车体四周，而IMU安装在车体后轴中心，无法对该视觉-惯导系统进行有效的三轴激励。经过多方调研，最终确定基于AprilTag地面标定布的相机-车体外参标定方案。

在进行相机-车体外参标定时，将车停放在标定布中心空白区域，车的左后轮停于十字交点处，左前轮和右后轮分别位于十字竖线和横线上。

为了进一步保证AprilTag检测以及定位的准确性和鲁棒性，采用[Bundle Calibration](#)的标定模式，对于由若干tag组成的bundle，计算tag码共同的bundle位姿。根据所选用的AprilTag码以及标定布尺寸，录入AprilTag配置文件 `./src/apriltag_ros/apriltag_ros/config/tags.yaml`。



3.2 相机-车体外参标定

相机-车体外参标定代码可见[camera_vehicle_calibration\(gitlab\)](#)。

当车体位于标定布上正确位置后，便可以进行外参标定图像的采集，如图3.2.1-图3.2.4所示，并将采集好的标定图像放置于工程数据目录(`./data`)下，四个相机对应的目录组织方式与内参标定中相同。接着，生成文件 `img.txt`，列出所有的标定图像文件名。


```
# ./data/img.txt  
img1.jpg  
img2.jpg  
img3.jpg  
...
```



图3.2.1 右视鱼眼相机外参标定图像

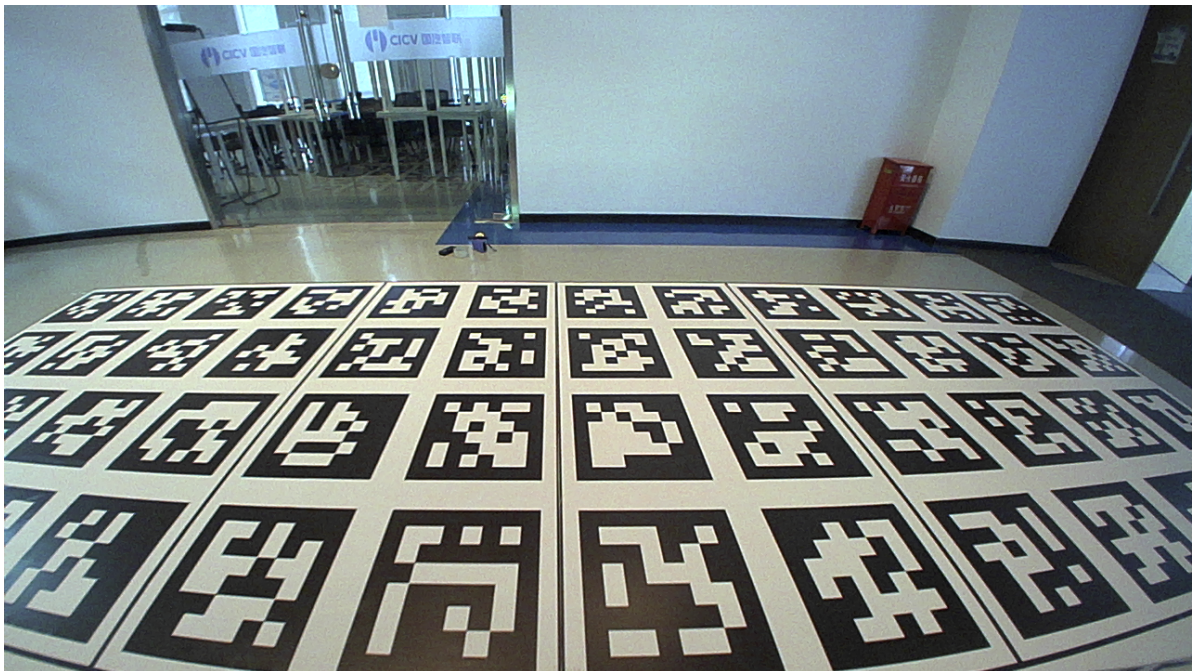


图3.2.2 前视鱼眼相机外参标定图像



图3.2.3 左视鱼眼相机外参标定图像



图3.2.4 后视鱼眼相机外参标定图像

按上述方式组织好采集的标定图像后，运行 `image_to_msg` 节点，发布标定图像，发布话题为 `/cv_camera_${camera}/image_raw` 以及 `/cv_camera_${camera}/camera_info`。

```
roslaunch image_to_msg image_to_msg
```

接着，运行 `continuous_detection` 节点，完成AprilTag的检测以及Tag码在相机坐标系下的位姿估计。

```
roslaunch apriltag_ros continuous_detection.launch
```

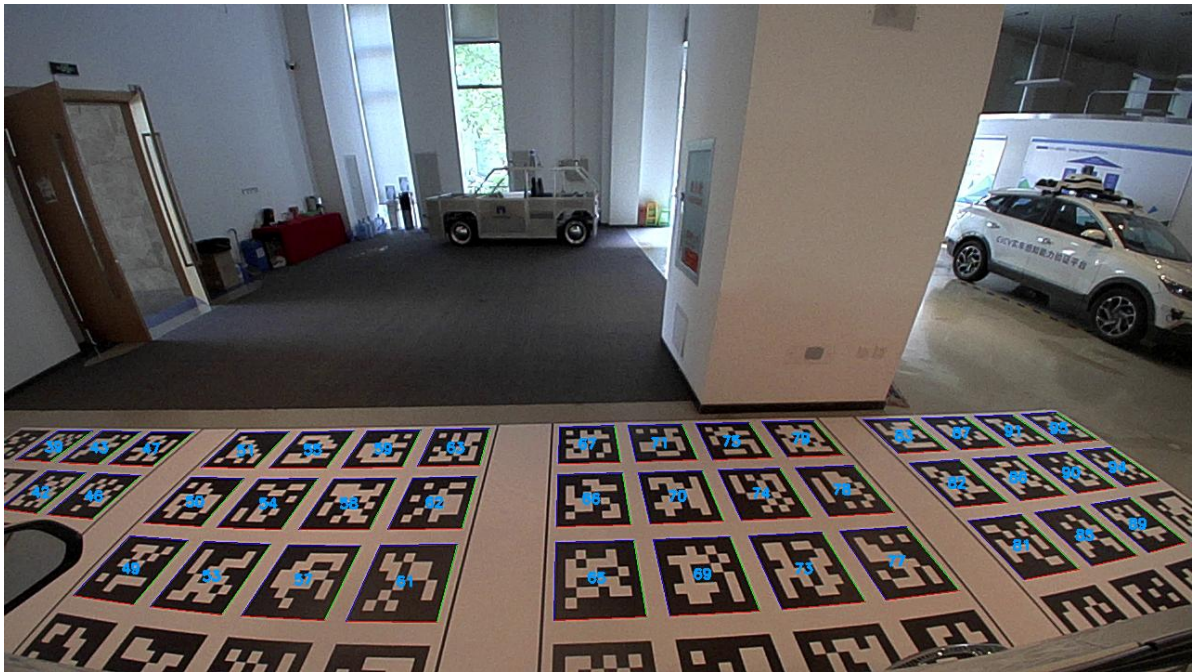



图3.2.5 右视鱼眼相机AprilTag检测结果

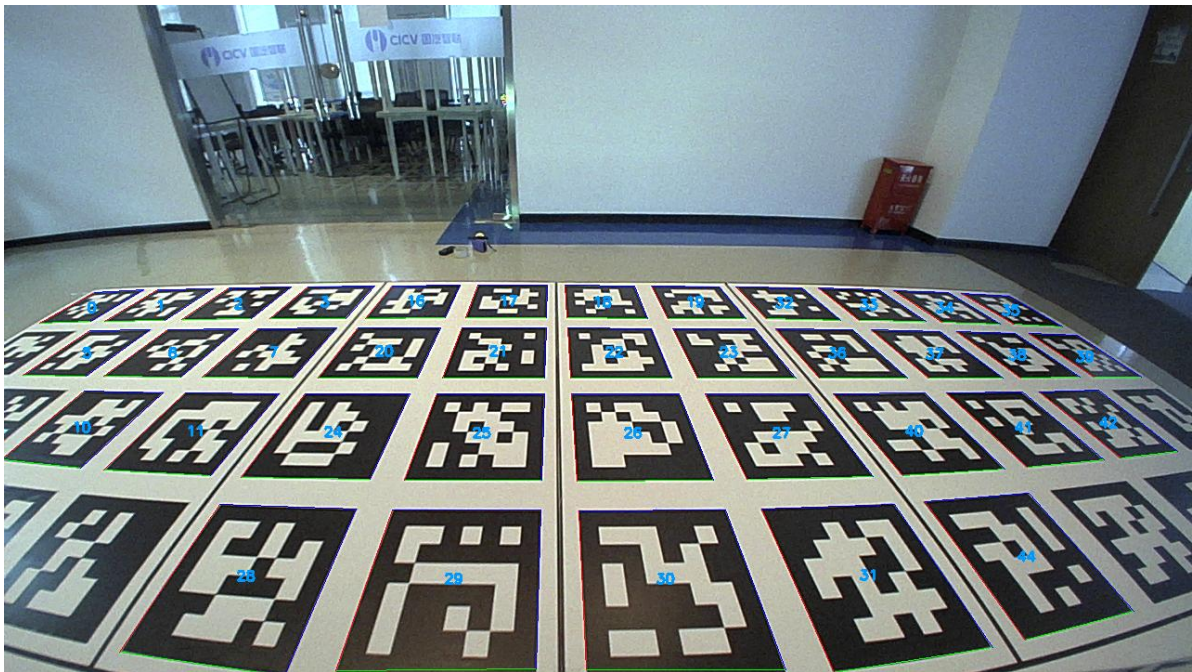


图3.2.6 前视鱼眼相机AprilTag检测结果

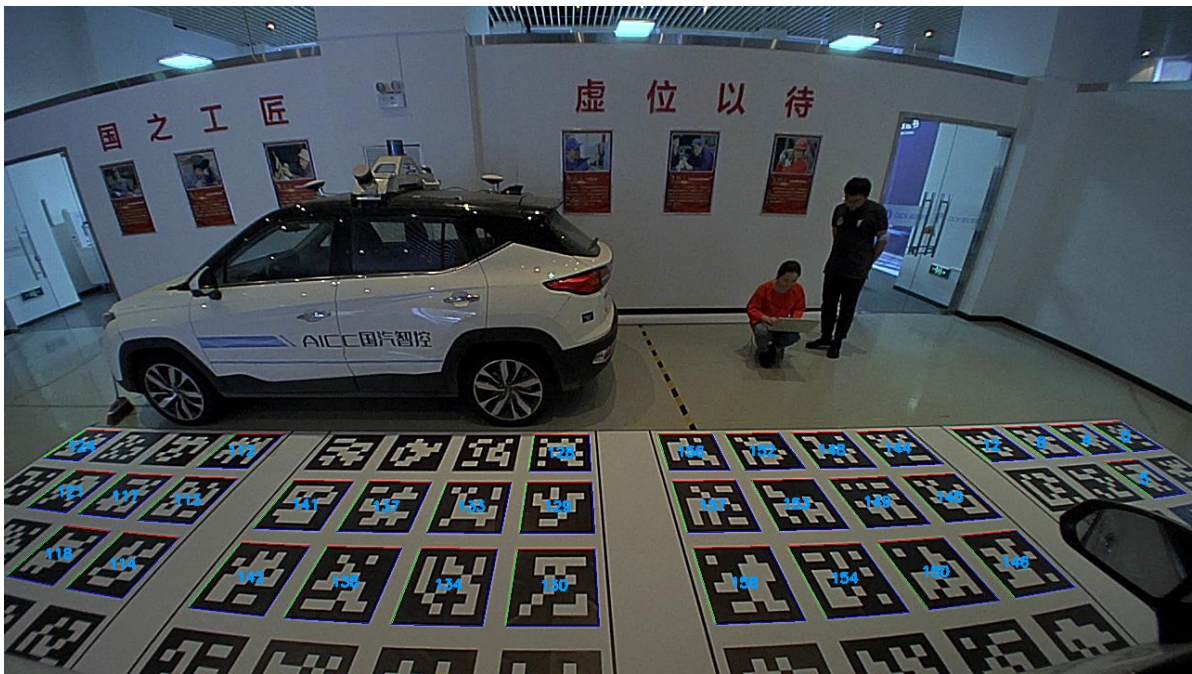


图3.2.7 左视鱼眼相机AprilTag检测结果

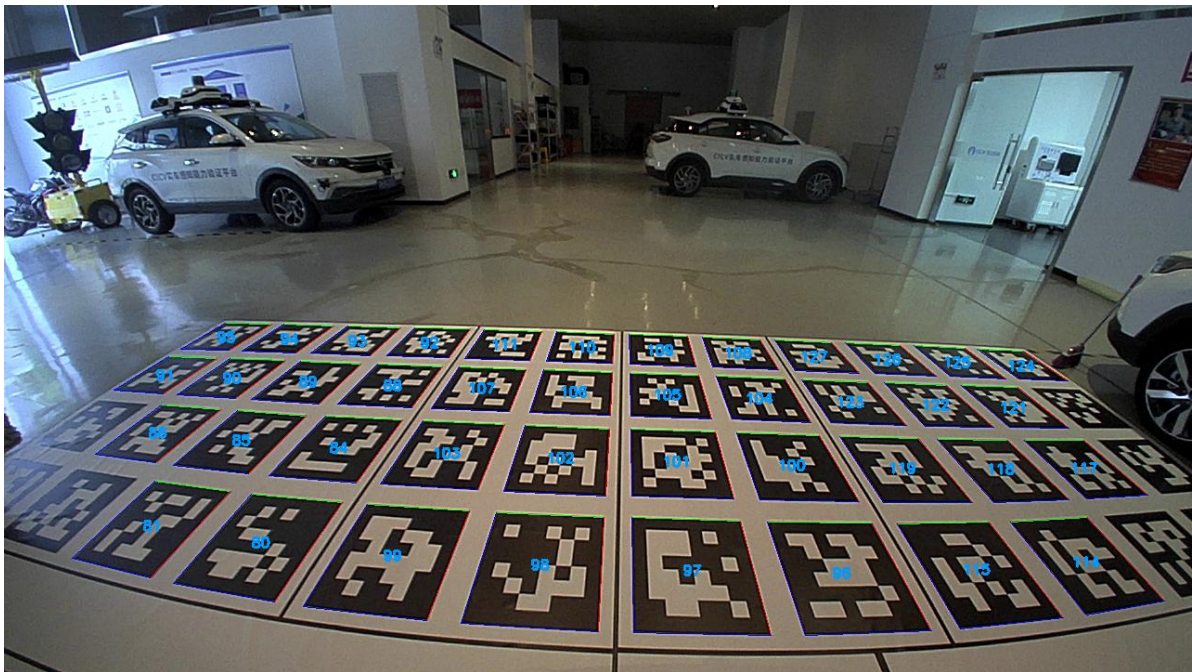


图3.2.8 后视鱼眼相机AprilTag检测结果

在确保AprilTag正常检测后，运行 `localize` 节点，对定位结果进行整合，并通过已知tag bundle坐标系之间的转换关系，最终得到四个环视相机相对于地面标定布十字交点(即车体右后轮中心)的位置和姿态，并保存为 `calib_extrinsic.yaml` 文件。

```
# -----
# calib_extrinsic.yaml
# -----

frame_id: bundle_all
pose_wheel_camera_right: [0.85776595366551245, -1.3297249786546665,
1.70759463357486, -0.0037461082991290216, 0.012662183501864755,
0.85994211722375269, -0.51022072753496184]
pose_wheel_camera_front: [3.4728684909554812, -0.73169474983827887,
0.92578770800106336, 0.32955744240001894, -0.6233047217244837,
0.62466249399100093, -0.33567824569915911]
pose_wheel_camera_left: [0.84327463846461403, -0.22055318829518084,
1.7250547956887143, 0.52043734275821096, -0.8538966208432508,
0.0017313909010818068, 0.0015923130339794826]
pose_wheel_camera_rear: [-0.77796316183817105, -0.77092134403012258,
1.236664981364999, -0.34863975481374709, 0.60202525692481423,
0.62964173407872581, -0.34578490148408281]
```

3.3 外参标定结果

假设 t_{wc} 和 q_{wc} 分别表示相机坐标系相对于标定布十字交叉处（即车体后轮）坐标系的平移和旋转变换，四个环视相机以右下标的形式进行标识。

外参标定结果记录如下：

$$\begin{aligned} t_{wc_right} &= [0.857 \quad -1.329 \quad 1.707]^T \\ q_{wc_right} &= [-0.003 \quad 0.012 \quad 0.859 \quad -0.510]^T \\ t_{wc_front} &= [3.472 \quad -0.731 \quad 0.925]^T \\ q_{wc_front} &= [0.329 \quad -0.623 \quad 0.624 \quad -0.335]^T \\ t_{wc_left} &= [0.843 \quad -0.220 \quad 1.725]^T \\ q_{wc_left} &= [0.520 \quad -0.853 \quad 0.001 \quad 0.001]^T \\ t_{wc_rear} &= [-0.778 \quad -0.771 \quad 1.236]^T \\ q_{wc_rear} &= [-0.348 \quad 0.602 \quad 0.629 \quad -0.345]^T \end{aligned}$$

3.4 外参标定结果评估

利用外参标定结果，推算得到地面标定布tag bundle之间的相对位姿，与groudtruth进行对比，对外参标定结果进行简单地评估，如表3.3.1所示。

表3.3.1 外参标定精度

	RMSE_position	RMSE_orientation	NEES_position
camera_right	0.013m	0.25°	0.23%
camera_front	0.010m	0.28°	0.12%
camera_left	0.022m	0.50°	0.66%
camera_rear	0.007m	0.17°	0.19%

