

# 自动驾驶课程

## 第2节：传感器标定和时间同步

主讲人 陈嘉皓





## 目录



1.传感器标定背景介绍



2.坐标系定义



3.传感器时间同步



4.实战任务：摄像头激光雷达标定



5.实战任务：油门加速度标定



6.其它传感器标定简介



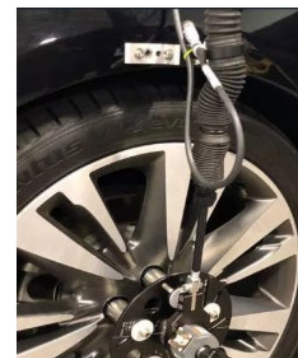
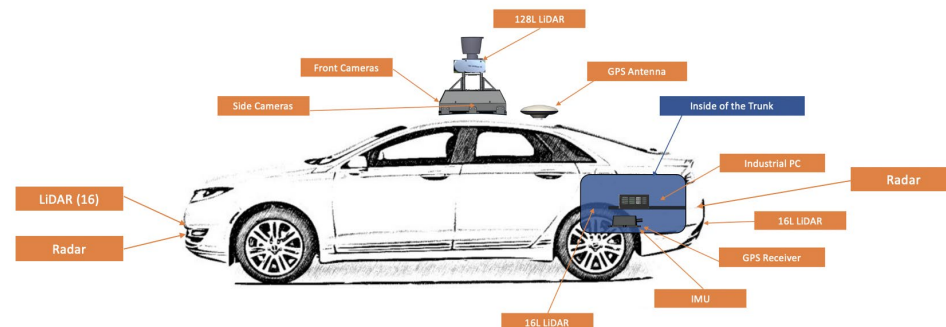
## 1. 传感器标定背景介绍



# 传感器标定背景介绍

- 自动驾驶都涉及哪些传感器：

摄像头、激光雷达、毫米波雷达、组合惯导、轮速计等等





## 传感器标定背景介绍

标定主要分为内参标定和外参标定两个部分：

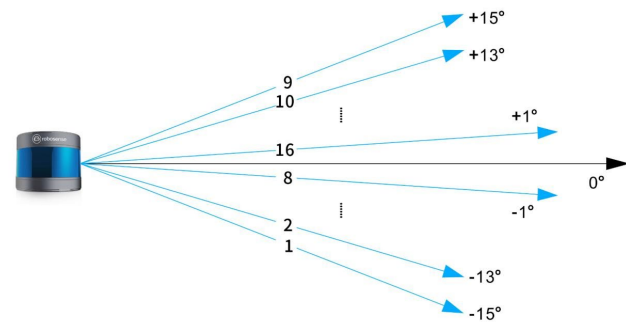
➤ 内参为传感器的自身性质，有些由厂家提供，有些需要自行标定

- Camera的焦距和畸变系数（自行标定）
- 轮速计的脉冲数和行进距离的比例系数（自行标定）
- Lidar中各激光管的垂直朝向角（厂家标定）
- .....

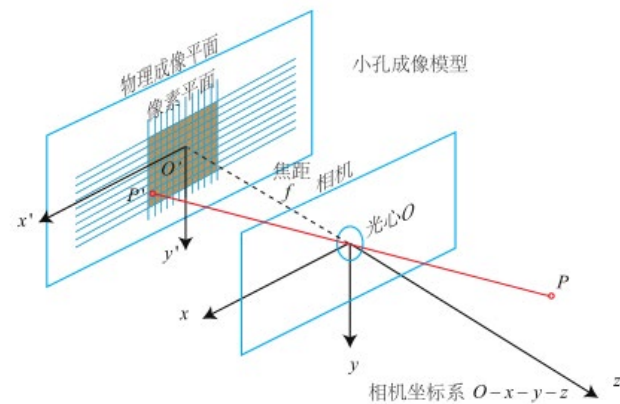
➤ 外参是传感器之间的相对位置和朝向

- Lidar-INS外参标定
- Lidar-Camera外参标定
- .....

标定的精度对算法很重要。传感器的时间和空间同步是后续各种融合算法模块精度的重要保证，是无人驾驶安全运行的基础。



RS-LiDAR-16 垂直朝向角定义



相机焦距内参示意



目录



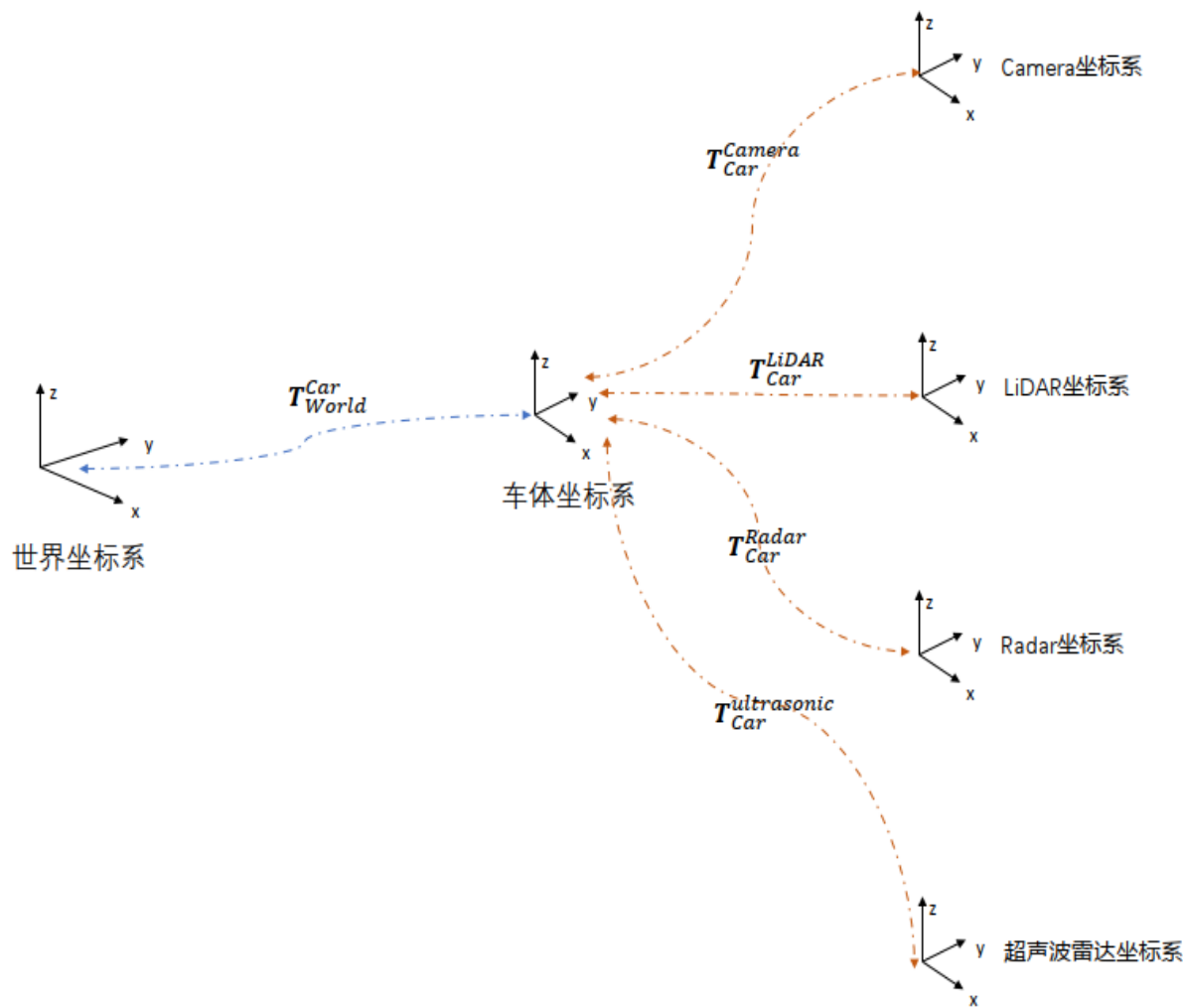
## 2.坐标系定义



## 坐标系定义

自动驾驶涉及到多个坐标系，标定的任务就是将各个不同的传感器坐标系转到同一个基坐标系中进行统一：

- **不同的世界坐标系定义规则：** 高精地图（HD map）一般采用全球地理坐标系来表达，即经纬高。但是这并不便于计算。
- **从车体坐标系到世界坐标系：** 定位一般输出的为车体坐标系（右前上）在东北天坐标系（ENU）下的变换
- **传感器坐标系到车体坐标系的外参：** 可以直接标各传感器与车体坐标系，也可以标部分传感器与车体坐标系，其余通过传感器之间实现标定





## 地心与地球坐标系定义

### 地心惯性坐标系 (i系)

- 常用  $O_i x_i y_i z_i$  表示，原点为地球中心。 $O_i x_i$  和  $O_i y_i$  在地球赤道平面内，其中前者指向春分点。 $O_i z_i$  轴为地球自转轴，指向北极， $O_i y_i$  轴沿右手规则确定。
- IMU测量得到的加速度，角速度都是相对于这个坐标系的。

### 地球坐标系 (e系，地心地固坐标系，ECEF)

- 表示形式为  $O_e x_e y_e z_e$ ，角标常用 e 表示。
- 地球中心为坐标原点  $O_e$ ， $O_e z_e$  轴沿地球自转轴方向， $O_e x_e$  轴是赤道平面和本初子午面的交线（注意本初子午面只有一个）， $O_e y_e$  轴沿右手规则确定。
- 地球坐标系是和地球固连的，它与地球一起相对惯性坐标系以地球的自转角速度进行转动。



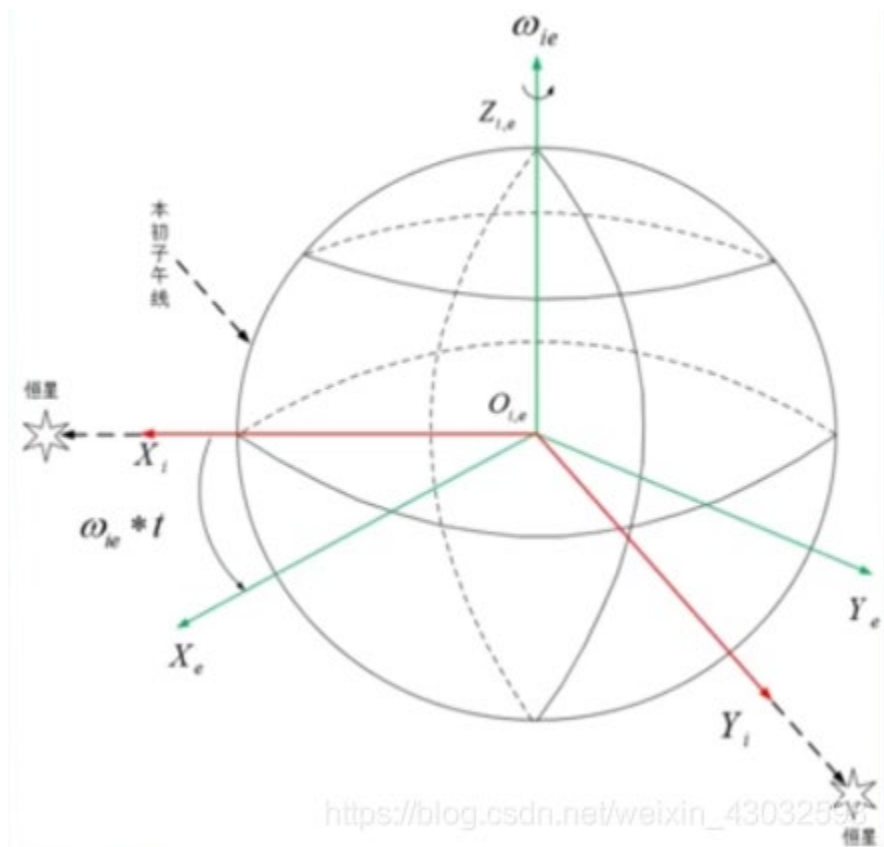


# 全球地理坐标系统

## WGS84坐标系

Apollo采用的是WGS84（World Geodetic System 1984）作为标准坐标系来表示物体的纬度，经度和高度（LLT）。

- 可以利用经度 (longitude) 和纬度 (latitude) 来唯一的确定地球表面上除北极点之外的所有的点;
- WGS84坐标系的坐标原点位于地球的质心，Z轴指向指本初子午线，X轴指向BIH1984.0定义的起始子午面和赤道的交点, 在地球赤道平面内相互垂直。





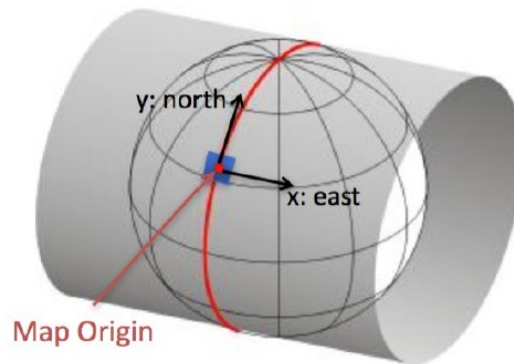
# 局部坐标系

## 东-北-天坐标 (ENU)

定位一般表示在局部3D笛卡尔坐标系下，即从定义的地图原点处展开一个平面，在该平面上

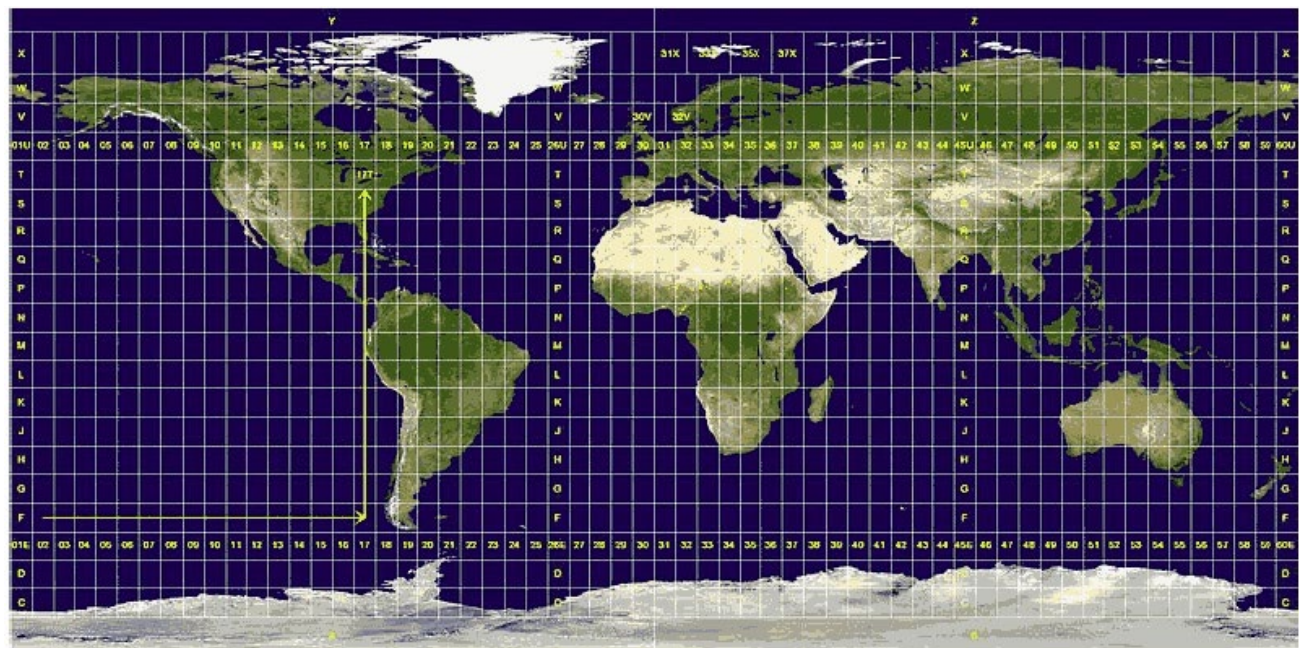
- x轴 - 指向东面
- y轴 - 指向北面
- z轴 - 指向上方，和重力方向相反

ENU一般采用三维直角坐标系来描述地球表面，实际应用较为困难，因此一般使用简化后的二维投影坐标系来描述（即 UTM 坐标系）。在Apollo系统中，球面经纬度坐标经过 Proj.4 投影库转换成的平面 UTM坐标，单位为米制。



上图为椭球体表面上一点进行展开

Apollo使用通用横轴墨卡托正形投影（Universal Transverse Mercator, UTM）来表示局部坐标系，即把地球分成若干区域，每个区域拥有一个ENU原点。

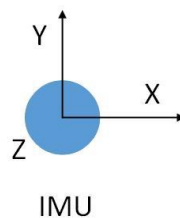
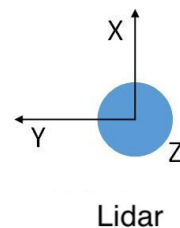
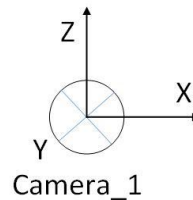
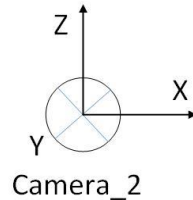
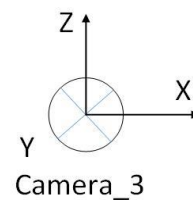
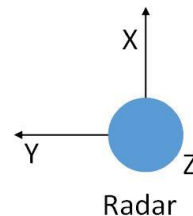
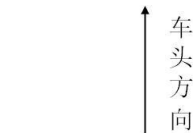
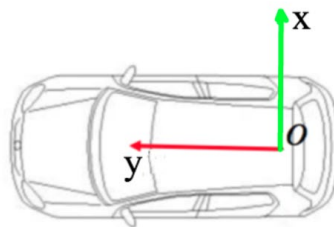
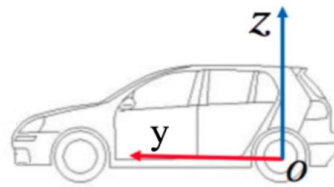
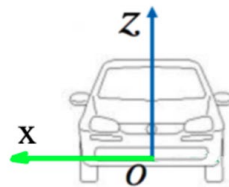




# 坐标系定义

## 其他坐标系

- 车辆坐标系：原点定义在车辆后轴中心，xyz轴对应右-前-上
- 相机坐标系：原点定义在相机光轴中心，xyz轴对应右-下-前
- 激光坐标系：速腾16线雷达坐标原点定义在雷达结构中心，高度距离底座39mm，xyz轴对应前-左-上
- Radar坐标系：原点定义在雷达正面最突出部分几何中心，xyz轴对应前左上
- 惯导坐标系：原点定义在惯导几何中心，xyz轴对应右-前-上。  
在测量杆臂时，GNSS天线原点定义在蘑菇头几何中心。





# 相机坐标系

- 通过相机的内参矩阵，将相机的右-下-前坐标系和像素坐标系联系起来

成像两阶段：

1. 相机坐标系  $\rightarrow$  图像坐标系
2. 图像坐标系  $\rightarrow$  像素坐标系

1. 相机坐标系  $\rightarrow$  图像坐标系

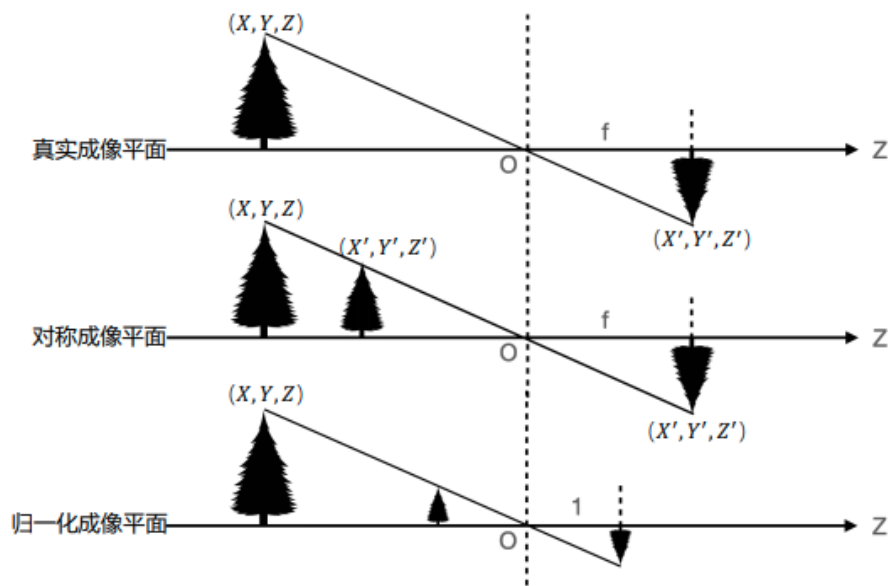
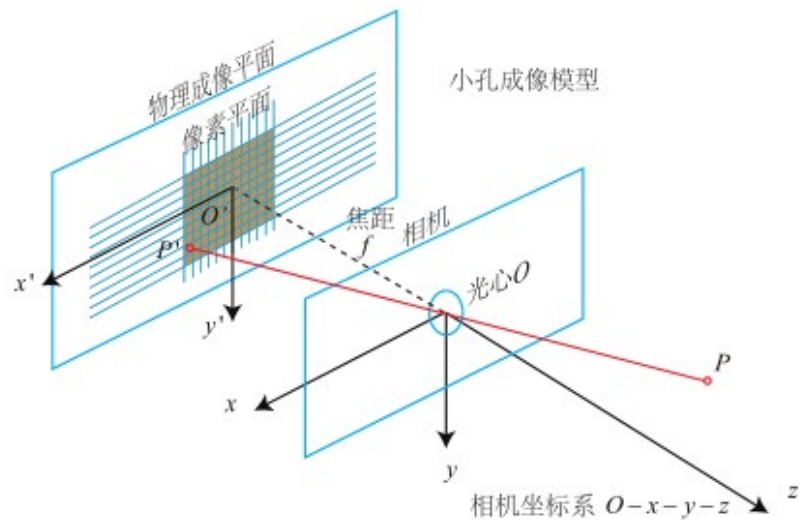
$$\frac{Z}{f} = \frac{X}{X'} = \frac{Y}{Y'} \Rightarrow \begin{aligned} X' &= f \cdot \frac{X}{Z} \\ Y' &= f \cdot \frac{Y}{Z} \end{aligned}$$

2. 图像坐标系  $\rightarrow$  像素坐标系

$$\begin{aligned} u &= \alpha \cdot X' + c_x \\ v &= \beta \cdot Y' + c_y \end{aligned} \xrightarrow[f_y = \beta \cdot f]{f_x = \alpha \cdot f} \begin{aligned} u &= f_x \frac{X}{Z} + c_x \\ v &= f_y \frac{Y}{Z} + c_y \end{aligned}$$

记内参矩阵为  $K$ ，则：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z} \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{Z} K \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$





## 外参格式

- Apollo标定的内外参文件在“modules/calibration/车辆名字/”目录下，通常以yaml文件进行存储。
- 外参格式如右图所示
- /tf 和/tf\_static 数据通道是 Apollo 系统的定位模块输出的世界坐标系到车体坐标系转换矩阵的通道，用法与ROS的tf类似： header是原坐标系，child是变换后的坐标系，可以看做child坐标系在header坐标系下的描述。
- 通过tf树也可得到任意两个坐标系之间的相对关系

数据名称	数据解释	取值	单位
header-timestamp_sec	消息时间戳	(0.0, +∞)	s
header-frame_id	目标坐标系唯一标识	-	-
child_frame_id	源坐标系唯一标识	-	-
transform-translation-x	平移矩阵x坐标	(-∞, +∞)	m
transform-translation-y	平移矩阵y坐标	(-∞, +∞)	m
transform-translation-z	平移矩阵z坐标	(-∞, +∞)	m
transform-rotation-qx	旋转矩阵qx	(-∞, +∞)	-
transform-rotation-qy	旋转矩阵qy	(-∞, +∞)	-
transform-rotation-qz	旋转矩阵qz	(-∞, +∞)	-
transform-rotation-qw	旋转矩阵qw	(-∞, +∞)	-



目录



## 3.传感器时间同步





## 常见的时间标准及时间戳表示

GMT，格林尼治标准时间。

GMT的正午是指当太阳横穿格林尼治子午线（本初子午线）时的时间。但由于地球自转不均匀不规则，导致GMT不精确，现在已经不再作为世界标准时间使用。

UTC，协调世界时。

UTC是以原子时秒长为基础，在时刻上尽量接近于GMT的一种时间计量系统。为确保UTC与GMT相差不会超过0.9秒，在有需要的情况下会在UTC内加上正或负闰秒（`leap second`）。UTC现在作为世界标准时间使用。

TAI，国际原子时钟。

1967年第13届国际度量衡会议上通过一项决议，定义 1s 为铯-133原子基态两个超精细能级间跃迁辐射 9,192,631,770周所持续的时间，这是利用铯原子振荡周期极为规律的特性。

LT，本地时间。

东区是加相应的时区差，西区是减时区差。如北京是东八区，则北京时间=UTC+8。



# 常见的时间标准及时间戳表示

## Unix timestamp

计算机记录UTC时间以Unix timestamp形式存储。定义为从格林威治时间1970年01月01日00时00分00秒起至现在的总秒数，不考虑闰秒。Apollo系统中所有时间戳除GPS测量时间外，均以Unix时间戳进行记录。

## GPS timestamp

即GPS原子时。它的时间基准是1980年1月6日0点与世界协调时刻相一致，以后按原子时秒长累积计时（考虑闰秒）。Apollo系统中GPS测量时间采用GPS timestamp进行记录。

- 关于时间两种时间转换可以参考代码：`modules/drivers/gnss/util/time_conversion.h`





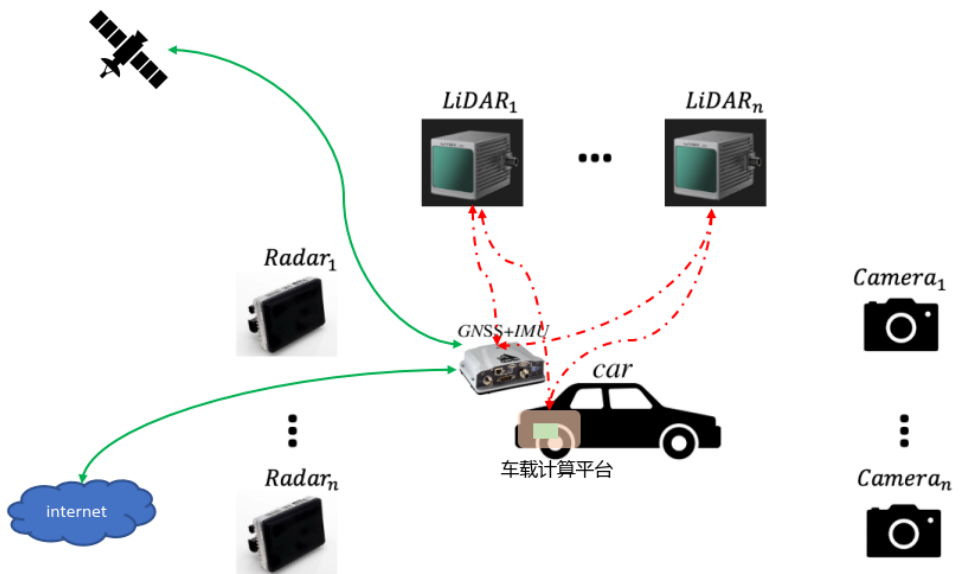
## 传感器时间同步

无人驾驶各个传感器有自己的时钟/晶振，除了要做内外参标定实现空间坐标系的统一，还需要将各个传感器的时钟源统一，即进行时间同步。

- 时间同步一方面可以通过硬件改造的方案，将各个传感器接到一个时钟源上，这种方案精度最高，代价也最高，且涉及到不同的传感器硬件改造时，非常复杂；
- 另一种通过一个主时钟源给各个传感器进行时钟同步，主时钟源通过gps原子钟进行时间修正，其它传感器的时间则跟主时钟源进行对齐

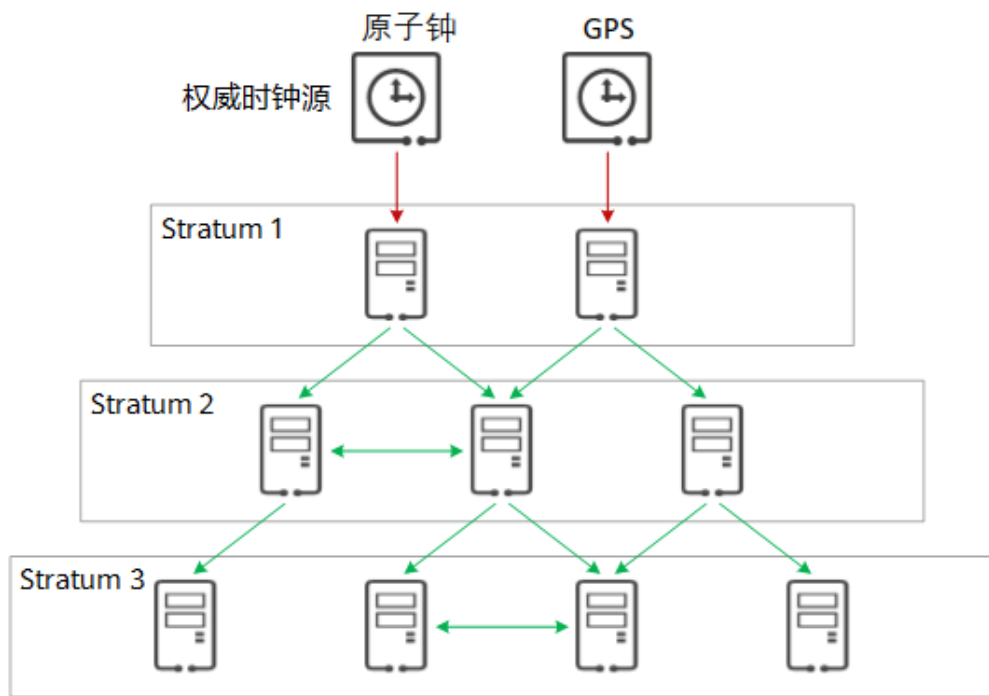
无人驾驶主流的时间同步方案有3种：

NTP, PTP, PPS+GPRMC

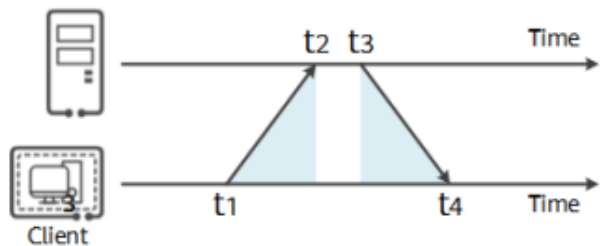




# 网络NTP时间同步原理



NTP Server集群服务结构



传输延迟:  $delay = ((t_4 - t_1) - (t_3 - t_2))/2$

假设时钟偏差为  $offset$ ,

$$\begin{cases} t_2 = t_1 + offset + delay \\ t_4 = t_3 - offset + delay \end{cases}$$

则:

$$offset = \frac{(t_2 - t_1) + (t_3 - t_4)}{2}$$

以1s为周期, 根据 $offset$ 调整client时钟, 可将时钟误差稳定控制在毫秒级别



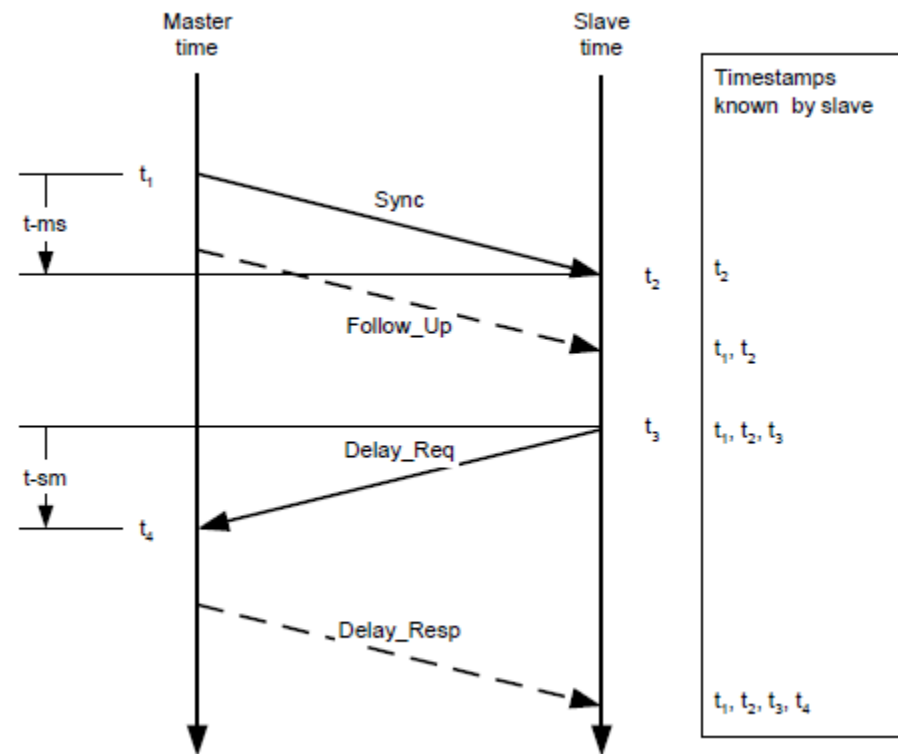
## PTP时间同步原理

- 亚微秒量级的时间同步精度
- 与NTP一样的原理，PTP（Precision Time Protocol，精确时间同步协议）可精准记录时间同步网络报文接受或发送的时刻，实现对链路时延的准确计算，可实现亚微秒级拥塞的t1~t4这四个时间戳，由此可计算出主、从时钟间的往返总延时为：

$$\text{Delay} = [(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)] / 2$$

- 时间偏移：

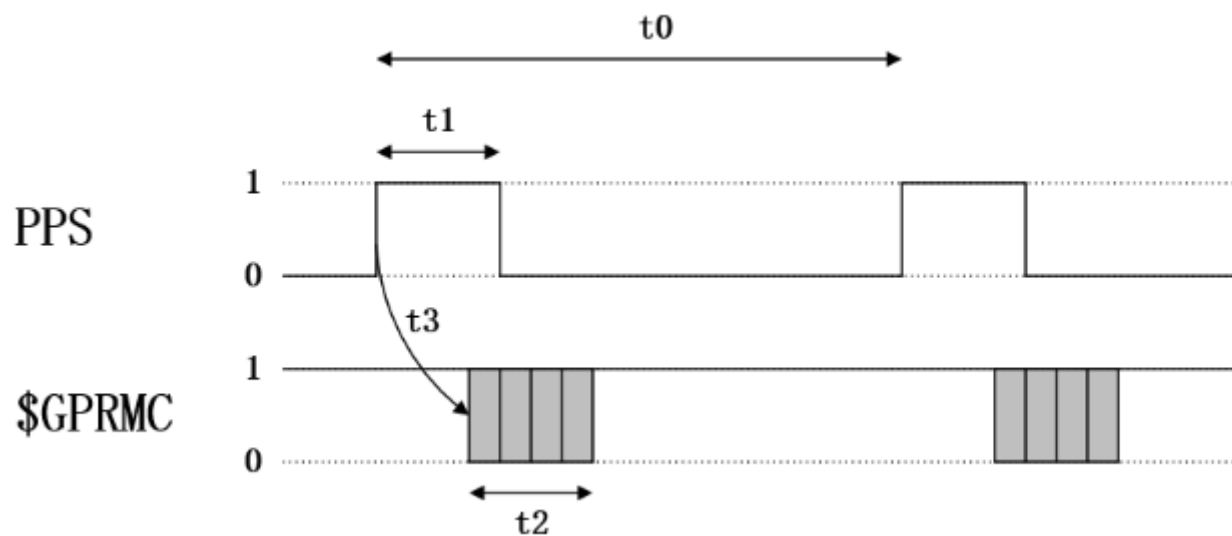
$$\text{Offset} = (t_2 - t_1) - \text{Delay} = [(t_2 - t_1) + (t_3 - t_4)] / 2$$





## GPS和Lidar时间同步原理

- GPS时钟源的PPS端口每秒发送一次硬件脉冲（PPS信号），随后数据端口发送一次对应这个脉冲上升沿的时间信息（GPRMC格式）
- 当激光雷达接收到PPS信号时，会去置零微秒定时器。当合法有效的GPRMC信号到来的时候，系统抽取GPRMC信号中的时间，换算成整秒，修正激光雷达整秒的时间戳





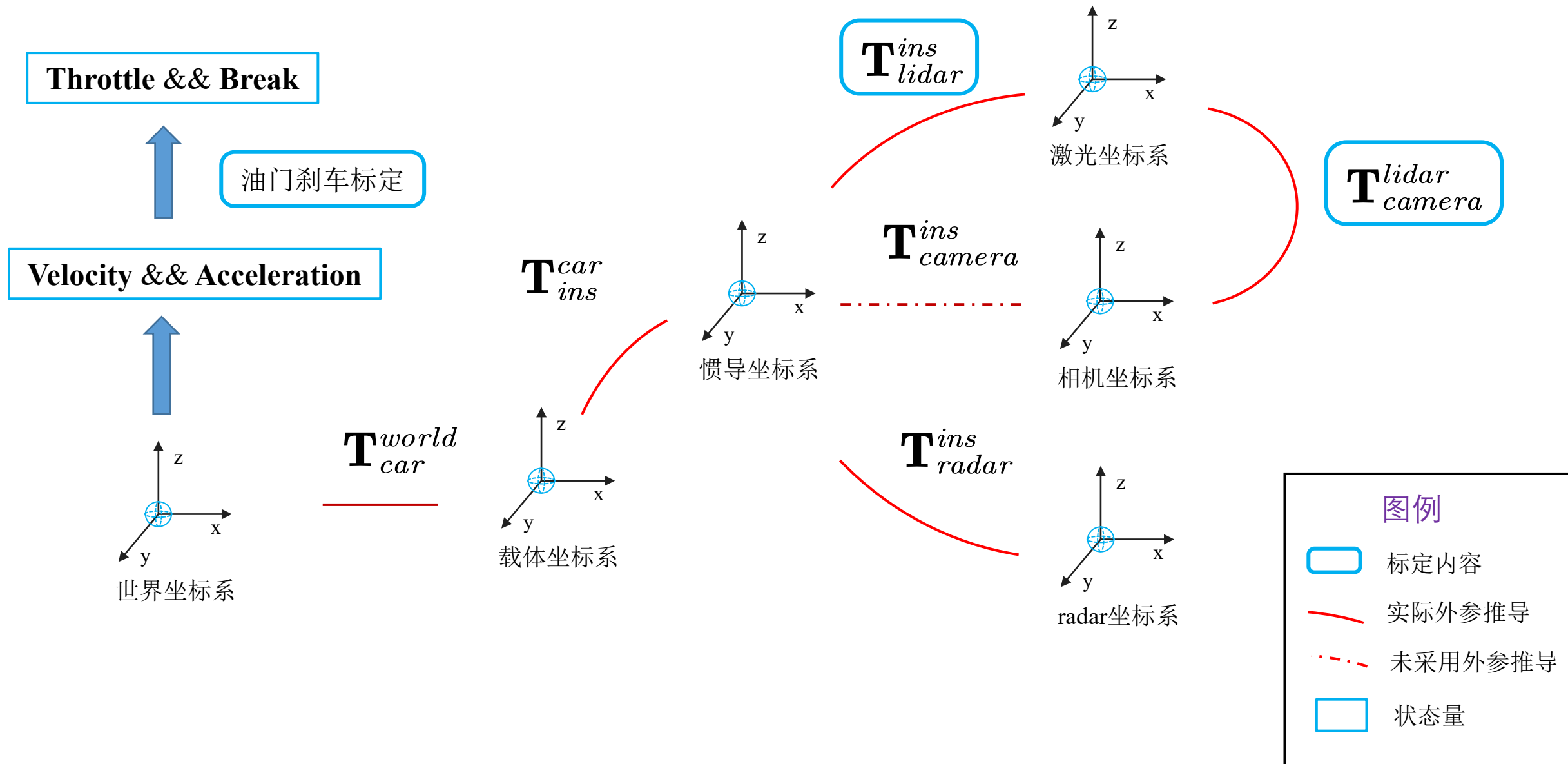
目录



## 4.传感器标定实践



# Apollo标定需求





## Apollo云端标定介绍

**Apollo在3.5版本之前**，标定在本地进行。标定数据通过ROS消息采集，标定工具为本地的二进制文件，或数据上传云端进行标定，包括：

- Multiple-LiDAR GNSS Calibration （多激光惯导标定）
- Camera-to-Camera Calibration （相机与相机标定）
- Camera-to-LiDAR Calibration （相机与雷达标定）
- Radar-to-Camera Calibration （Radar与相机标定）
- IMU-to-Vehicle Calibration （IMU与车辆标定）
- Lidar-to-IMU Calibration （云端标定）

具体操作说明见：

1. [https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/r2.5.0/docs/quickstart/apollo\\_2\\_0\\_sensor\\_calibration\\_guide.md](https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/r2.5.0/docs/quickstart/apollo_2_0_sensor_calibration_guide.md)
2. [https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/r3.0.0/docs/specks/apollo\\_lidar\\_imu\\_calibration\\_guide.md](https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/r3.0.0/docs/specks/apollo_lidar_imu_calibration_guide.md)
3. [https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/r3.0.0/docs/quickstart/multiple\\_lidar\\_gnss\\_calibration\\_guide.md](https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/r3.0.0/docs/quickstart/multiple_lidar_gnss_calibration_guide.md)

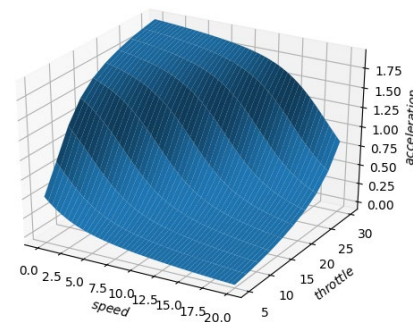
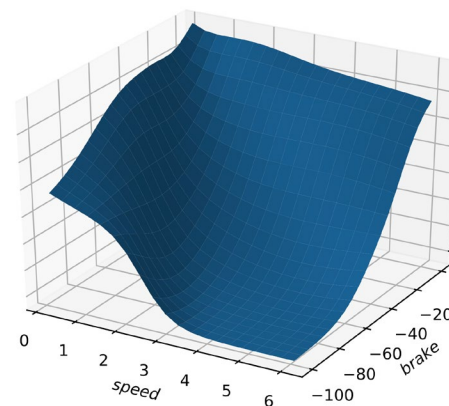
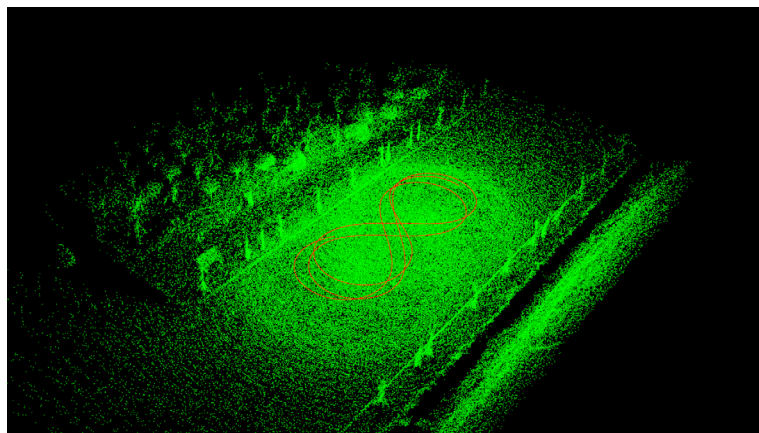
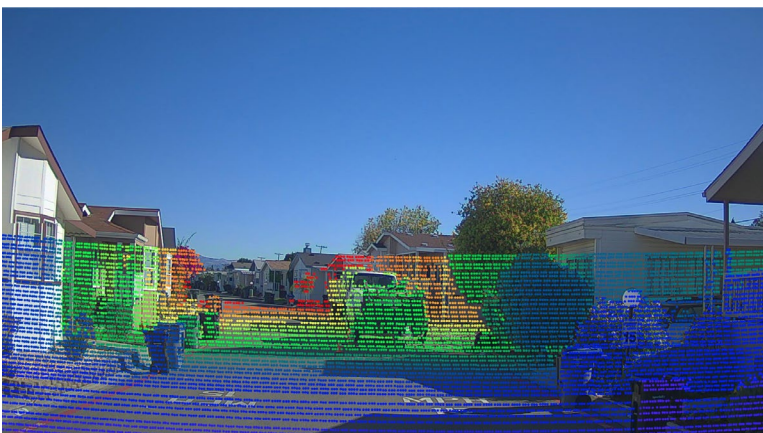


# Apollo云端标定介绍

- Apollo 3.5版本之后标定变为 本地采集->数据上传->云端标定

具体操作说明见：

1. [https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/master/docs/D-kit/Camera\\_Based\\_Auto\\_Driving/sensor\\_calibration\\_cn.md](https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/master/docs/D-kit/Camera_Based_Auto_Driving/sensor_calibration_cn.md)
2. [https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/master/docs/D-kit/Lidar\\_Based\\_Auto\\_Driving/sensor\\_calibration\\_cn.md](https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/master/docs/D-kit/Lidar_Based_Auto_Driving/sensor_calibration_cn.md)
3. [https://github.com/ApolloAuto/apollo/tree/master/docs/Apollo\\_Fuel/Vehicle\\_Calibration\\_Online](https://github.com/ApolloAuto/apollo/tree/master/docs/Apollo_Fuel/Vehicle_Calibration_Online)
4. [https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/master/docs/D-kit/Waypoint\\_Following/vehicle\\_calibration\\_online\\_cn.md](https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/master/docs/D-kit/Waypoint_Following/vehicle_calibration_online_cn.md)







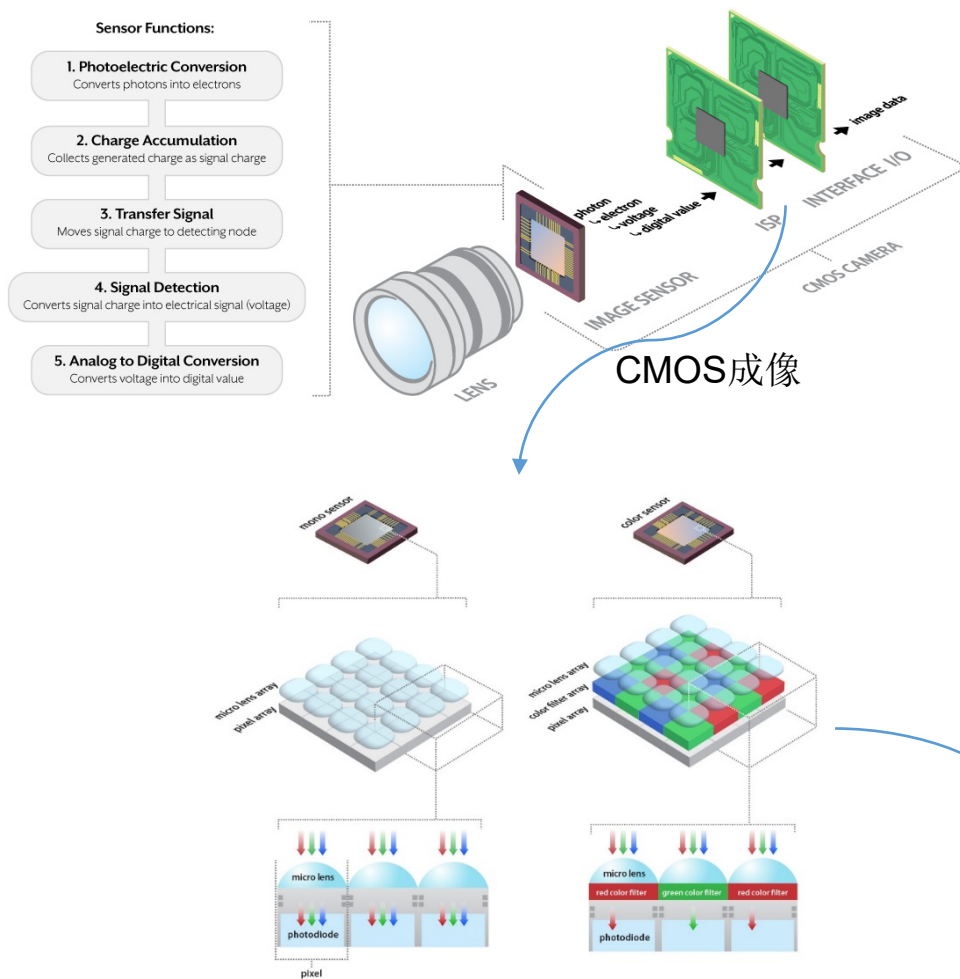
## 传感器标定实践

本次实战，需要完成以下任务：

- a) 标定相机内参，
- b) 标定激光雷达和组合惯导外参
- c) 标定激光雷达和摄像头外参
- d) 标定底盘的油门加速度标定表



# 摄像头内参标定

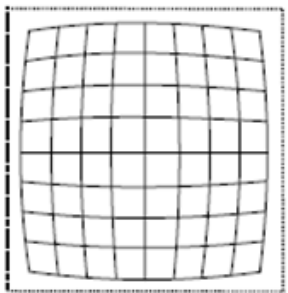


## 成像特点分析:

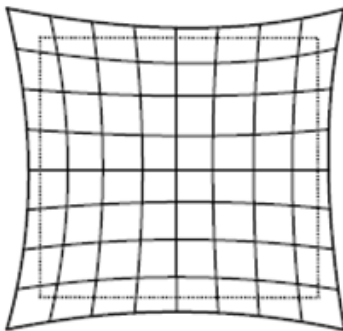
- **曝光触发方式:** 卷帘门相机与全局相机
  - 按行触发: 成像时间为中间行的时间, 有时间误差;
  - 全局触发: 统一触发, 无时间误差。
- **标定工具:** OpenCV, ROS, 深蓝标定箱等都可以
- **标定算法:** 张正友标定法
- **相机模型:** Apollo 中支持pinhole radtan模型



# 畸变模型与张正友标定法



桶形失真



枕形失真

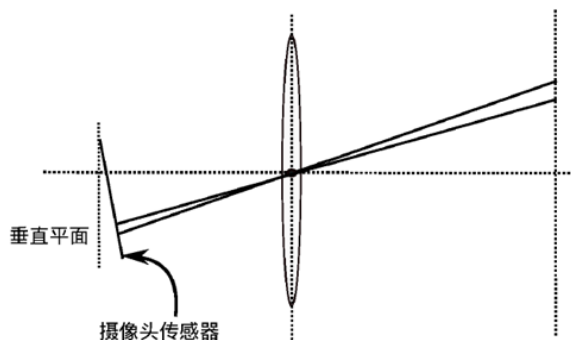


图 5-4 切向畸变来源示意图。

径向畸变

$$\hat{x} = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6)$$

$$\hat{y} = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6)$$

切向畸变

$$\hat{x} = x + (2p_1y + p_2(r^2 + 2x^2))$$

$$\hat{y} = y + (p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2x)$$

综合畸变

$$\begin{cases} x_{distorted} = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y_{distorted} = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy \end{cases}$$

## 张正友标定法原理

- [A Flexible New Technique for Camera Calibration](#)

## 张正友标定法输入

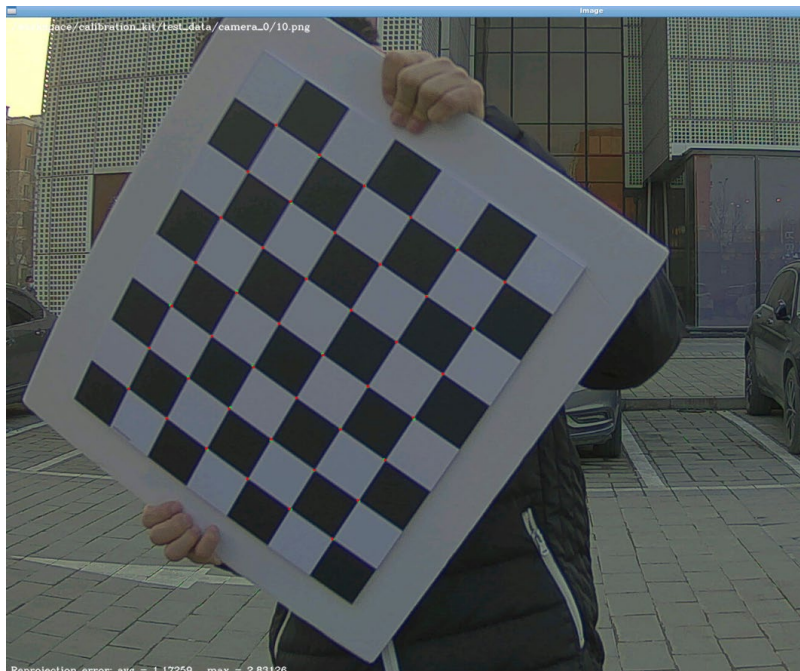
- 一组包含标定的图像序列

## 张正友标定法输出

- 相机内参:  $\begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
- 相机外参:  $\begin{pmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
- 相机径向畸变系数:  $(k_1, k_2, k_3)$
- 相机切向畸变系数:  $(p_1, p_2, p_3)$



## 摄像头内参标定实践



准备阶段：一个标准的棋盘格标定板， 9x6网格， 每格50mm



数据采集：启动ros图像采集程序，按空格进行图像采集



标定程序：运行深蓝开发的标定工具箱代码，执行内参标定程序

```
root@45dc756b4e7e:/workspace/calibration_kit# ./build/calibration_kit
```

```
Input directory : /workspace/calibration_kit/test_data/camera_0
```

```
file-extension : png
```

```
prefix :
```

```
camera_name : a
```

```
width : 9 height : 6
```

```
square_size : 50.000000
```

```
kannala-brandt | mei | pinhole | scaramuzza | Use OpenCV | View Results | verbose
```

```
Start
```

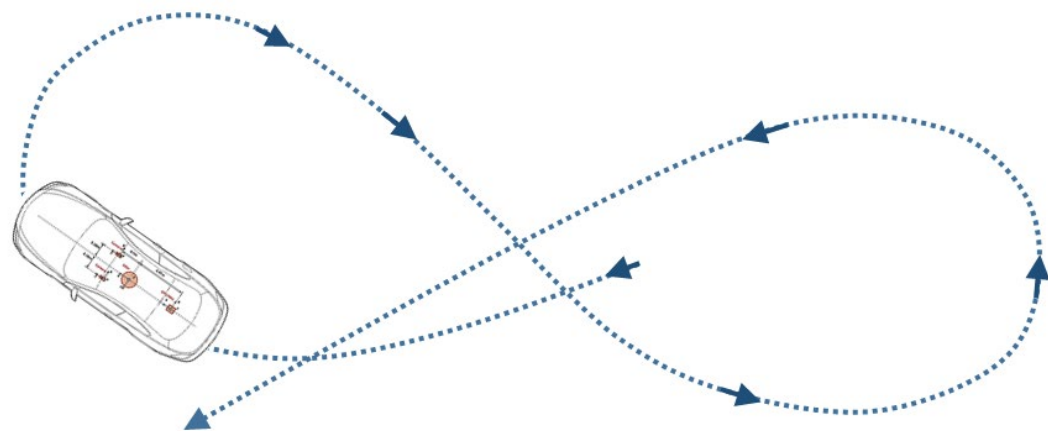
```
Back
```



## 激光雷达组合惯导外参标定

控制车辆在信号好的地方绕八字，保证在各个方向上有足够的运动约束。采集足够多有效数据后，通过以下两种方式进行标定：

- 激光SLAM拼出一个轨迹，组合惯导自己有一个轨迹，两者进行手眼标定求解外参，其中惯导的位姿可以直接获得，激光的位姿可以由里程计推算求解；将获得到的外参作为初值后，构建优化方程进行求解；
- 通过直尺测量出大致的平移后，给定初始旋转。由于误差的存在，不同位置采集的点云拼接后存在对齐误差，具体体现在视觉效果模糊，边缘不锐利，墙壁出现重影等。使用自动或者手动标定的方法使点云变薄，ICP误差降低，就能够获得相对精确的外参。





## 激光雷达组合惯导外参标定

解。假设在  $t_i$  时刻组合惯导的位置姿态为  $T_i^{ins}$ ，使用激光雷达里程计或者SLAM技术得到多线激光雷达的位置为  $T_i^{lidar}$ ，则经典的手眼标定问题为求解  $T_{lidar}^{ins}$ ，使得：

$$T_{i,i+1}^{ins} T_{lidar}^{ins} = T_{lidar}^{ins} T_{i,i+1}^{lidar}, \quad (1)$$

其中  $T_{i,i+1}^{ins} = T_{i+1}^{ins} (T_i^{ins})^{-1}$ ,  $T_{i,i+1}^{lidar} = T_{i+1}^{lidar} (T_i^{lidar})^{-1}$  是两个传感器的相对运动。由于车辆在近似平面内运动，将问题简化为二维的手眼标定问题，则有以下式子成立：

$$(R_{ins} - I)t = R t_{lidar} - t_{ins}, \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}, \\ \left( R_{ins} - I \mid \begin{array}{cc} -t_{lidar}^x & t_{lidar}^y \\ -t_{lidar}^y & -t_{lidar}^x \end{array} \right) \begin{pmatrix} t^x \\ t^y \\ \cos\theta \\ \sin\theta \end{pmatrix} = -t_{ins}. \end{array} \right.$$

参考资料：

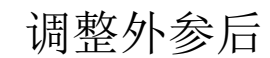
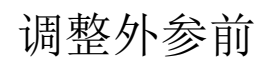
- 关于手眼标定：

<https://zhuanlan.zhihu.com/p/436719493>

- 关于外参标定：

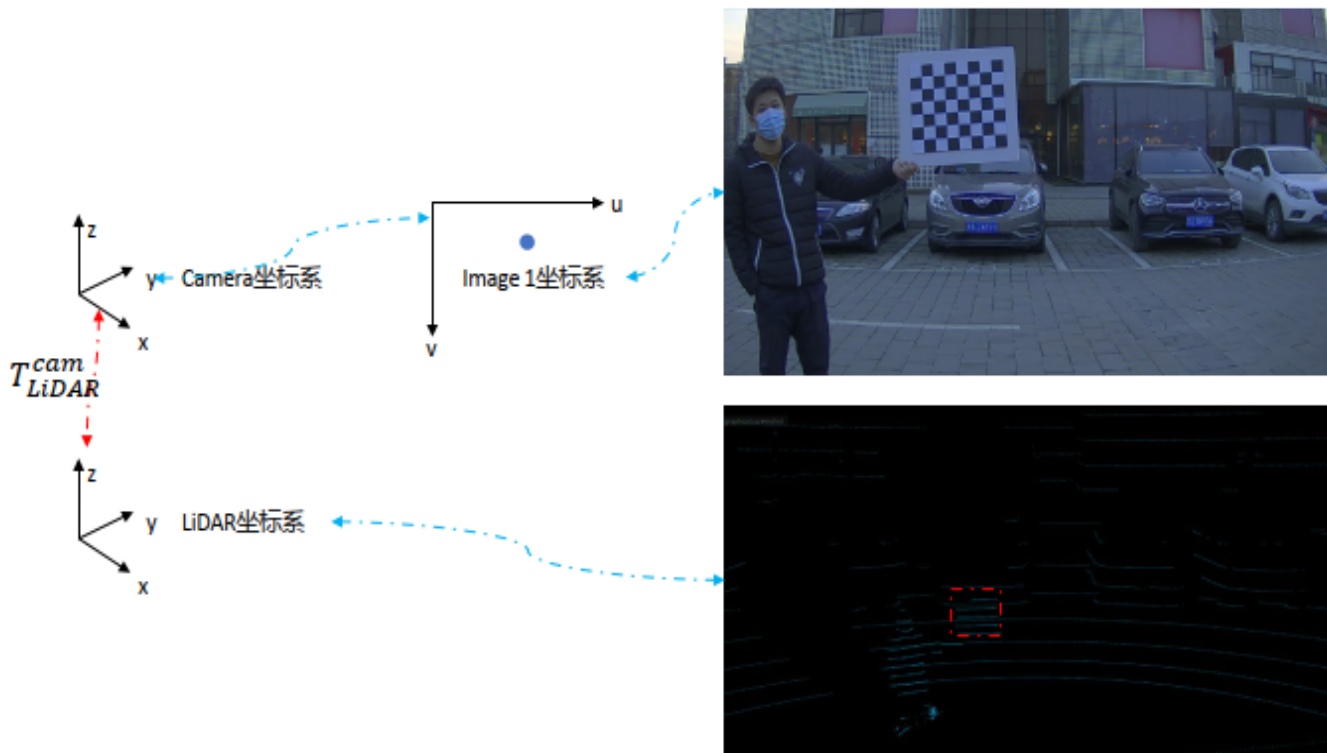
[https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/r3.0.0/docs/specs/lidar\\_calibration\\_cn.pdf](https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/r3.0.0/docs/specs/lidar_calibration_cn.pdf)







## 摄像头雷达外参标定实践



要求：LiDAR与Camera之间有视野重叠

$$p_{LiDAR} = T_{LiDAR}^{cam} p_{cam}$$

注意：对于16线激光雷达而言，由于线束过于稀疏，很难对标定板进行覆盖，因此，在这里并不使用特征的方法，而是简单的将点云投影到图像上。







目录



## 5.油门加速度标定



## 油门加速度标定实践

- 车辆在某一速度基础上，需要通过车辆的油门和刹车来获得期望加速度。汽车在不同的行驶速度下，想要获取相同的加速度，则其油门和刹车的大小也会不同。
- Apollo中，通过双插值（即先对速度进行插值，得到加速和油门，再对加速度进行插值）使车辆的速度和加速度与油门刹车形成简单的映射，即油门刹车映射表。

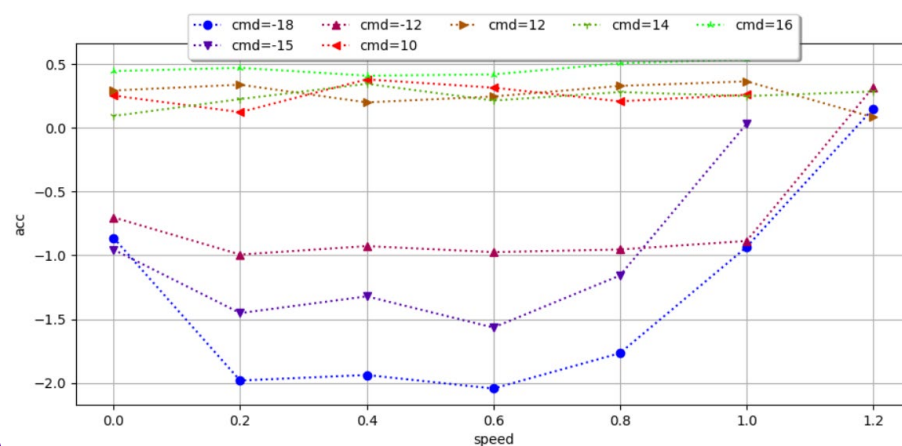


# 油门加速度标定实践

## 目标设定

x (油门)	y (速度)	z (刹车)
6	1	-10
6	1.5	-12
8	1	-10
8	1.5	-10
15	8	-30
20	7	-60

## 数据采集



## 插值结果

```
calibration_table {  
  calibration {  
    speed: 0.0  
    acceleration: -1.43  
    command: -70.0  
  }  
  calibration {  
    speed: 0.0  
    acceleration: -1.3  
    command: -90.0  
  }  
}
```



## 6.其他传感器标定简介



## 其他标定

其它标定：

➤ 其他的标定需要靠尺子量。包括：

- 天线到惯导的杆臂值
- 惯导到车辆后轴中心的外参

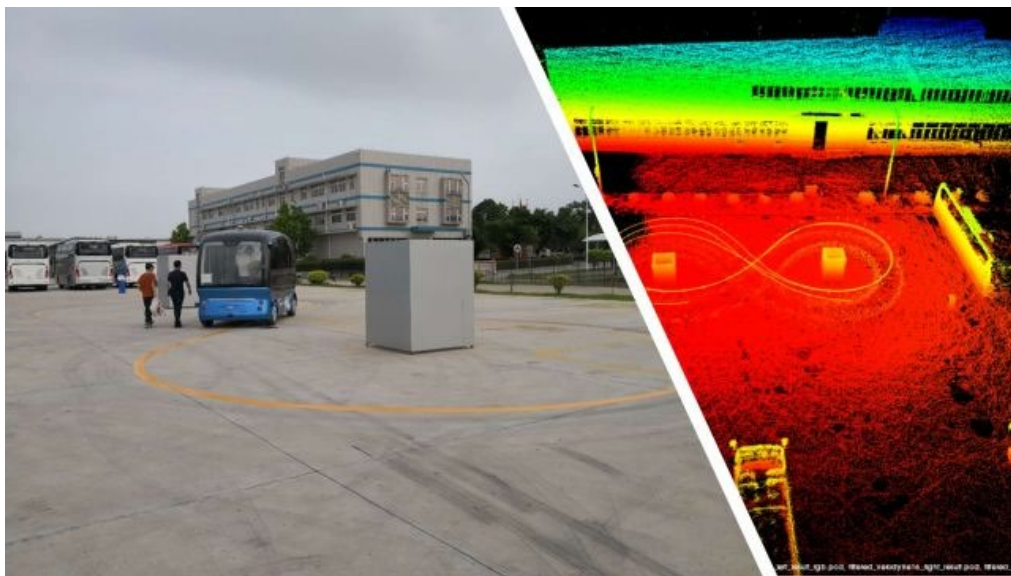
➤ 暂时没用到但之后要标定的：

- 毫米波雷达，
- 多相机外参标定；
- 多雷达外参标定；



## 量产标定方案简介

- 厦门金龙合作Apollo小巴项目时，搭建了整套标定系统。在如图所示的标定间内，车每次开到固定位置之后，产线工人即可完成一键标定，不需要工程师参与。
- 下图是室外的GPS以及多激光雷达的标定场地。为了获取结构化数据，在场地中间部署了一些结构化的物体，提供一些边缘的信息，让标定更准确。右图是标定后的可视化效果，该方案可以实时给标定打分，解决了标定结果依赖人工确认的问题。





## 本日任务

1. 激光雷达同步线制作，激光雷达时间同步（可选）；
2. 激光组合惯导标定；
3. 相机内参标定；
4. 相机激光雷达外参标定；
5. 油门刹车加速度表标定；

**感谢聆听**



**Thanks for Listening**