

进阶课程⑱ | Apollo感知之旅——传感器标定

传感器标定的分类包括：**绝对标定**、**相对标定**或**比较标定**、**静态标定**和**动态标定**。

1. **绝对标定**—被测量是由高精度的设备产生并测量其大小的，特点：精度较高，但较复杂。
2. **相对标定或比较标定**—被测量是用根据绝对标定法标定好的标准传感器来测量的，特点：简单易行，但标定精度较低。
3. **静态标定**—确定传感器的静态指标，主要有线性度、灵敏度、迟滞和重复性。
4. **动态标定**—确定传感器的动态指标，主要有时间常数、自然振荡频率和阻尼比等。

以下，ENJOY

传感器标定

apollo 开发者社区

标定的目的

在选好、安装完传感器之后，需要对传感器进行标定。标定的核心概念是得到传感器之间的相对位置，将不同传感器的数据在同一个坐标系中表示。标定分为**内参标定**和**外参标定**。内参是传感器自身性质，有些是厂家提供，有些需要自行标注，例如Camera焦距的定期矫正，Lidar中各激光管的垂直朝向角。外参是传感器之间的相对位置和朝向，一般由6个自由度表示，自由度的旋转矩阵和自由度的水平位移。

传感器标定算法

本节简要介绍常用的**标定算法**。有些算法是在搭建的标定间完成，有些是在自然环境中完成，在自然环境中标定对算法的依赖度比较强。

- Lidar内参标定：相对于摄像头，激光雷达的内参标定有一定的**特殊性**。
- Lidar-to-GPS外参标定：计算出Lidar与车上GPS的相对位置。GPS的位置由世界坐标系中的3D点表示，因此计算出外参之后可以计算得到Lidar在世界坐标系中的位置。
- Lidar-to-Lidar外参标定：计算不同Lidar之间的相对位置。
- Lidar-to-Camera外参标定：计算Lidar和相机之间的相对位置。
- Camera-to-Camera外参标定：计算不同相机之间的相对位置。
- 自然场景中的Lidar-to-Camera外参标定：在自然环境中，驾驶车辆进行两种不同传感器之间的位置关系求解。
- 自然场景中的Bifocal Camera外参标定：双焦点摄像头之间外参的计算，也就是不同焦点的相对位置。
- Camera-to-Radar外参标定：摄像机到毫米波雷达的外参计算。

标定案例解析

apollo 开发者社区

3D标定间制作

在空旷房间的墙面贴满不同的二维码，然后在标定间中间放置一个基于激光雷达的毫米级高精度Rigel激光扫描仪，通过对墙上二维码的多次扫描，完成3D建模，获得了标定间任何一个点的3D位

置。根据建模结果输出一个查找表，查找表由两栏组成，第一栏是Tag_ID，表示各个二维码的ID编号，第二栏是二维码四个角的3D位置信息。之后即可在标定间进行不同传感器的参数标定。

2

Part 2 传感器和标定：基于标定间的多Lidar-Camera标定

• 标定间



3D 标定间 – 使用毫米级精度激光扫描仪对标定间进行3D建模

Apriltag – 具有高鲁棒性和识别精度的二维码

Riegl反射值AprilTags检测

Tag ids	四角3D坐标
id_0	$\{x, y, z, \dots\}$
id_1	$\{x, y, z, \dots\}$
...	...

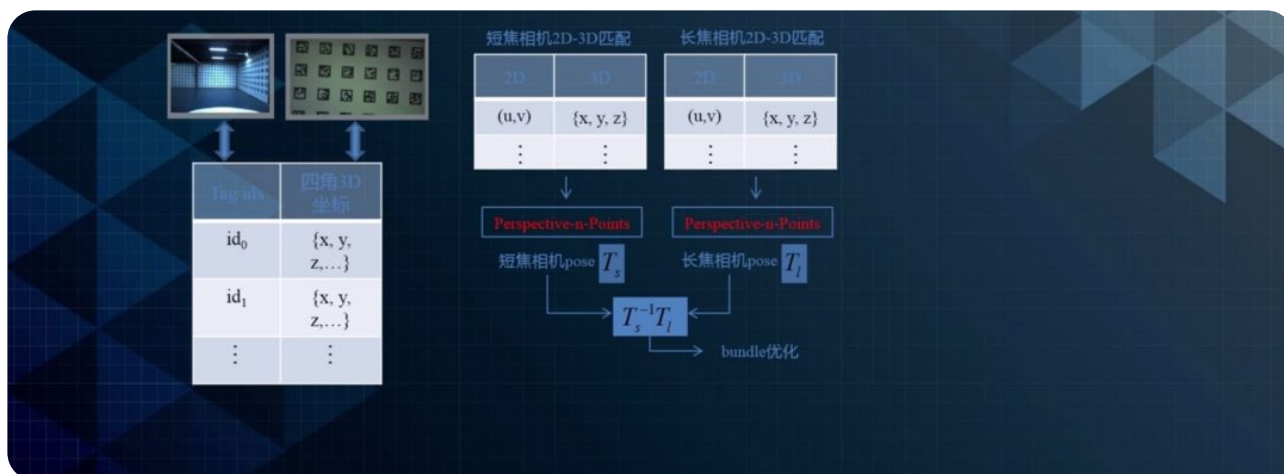
LUT – 预先建立的保存有Tag ID到四角空间坐标映射的查找表

3D标定间制作

Camera-to-Camera外参标定

假设在采集车前部安装双Camera，Camera1是60度广角短焦距相机，Camera2为30度广角长焦距相机，两者视角部分重叠。

将车开到标定间，双Camera采集标定间的二维码，获得多个二维码对应四个角点的UV坐标，同时通过查找表得到对应点在3D世界坐标系(Riegl)中的坐标。求解采集点的PNP问题的，得到相机相对于世界坐标系的位移矩阵 T_s 和 T_l ，将这两个相对位移矩阵相互传递，得到二者之间的相对位置。整个流程如下图所示。需要注意的是，标定完传感器之后需要进行验证。相机标定的验证方法为，将长焦相机的图像投影到广角相机图像中，看看重合度如何。如果出现重影或者连接不好，则需要重新标定。

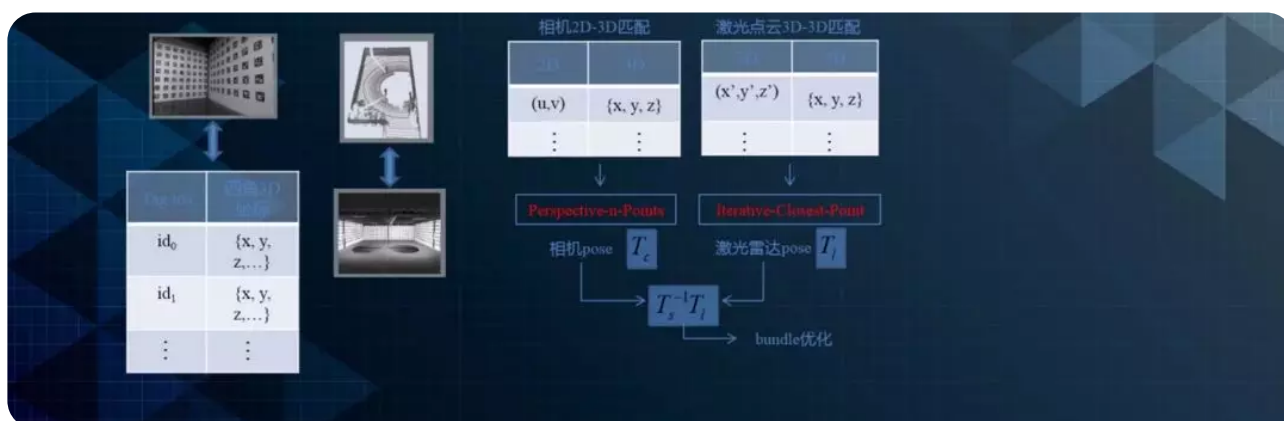


标定间双Camera标定流程

Lidar-to-Camera外参标定

将Camera看到的所有Tag角点与Rigel扫出的对应点的3D坐标进行匹配，求解PNP问题，得到Camera相对于Rigel世界坐标系的相对位置。

将Lidar激光雷达扫描得到的点云与Rigel是稠密的点云之间进行**ICP**（Iterative Closest Point，迭代最近点）匹配，得到激光雷达相对于Rigel的位置。最后将两个位置矩阵相互传递得到Camera 和Lidar之间的相对位置，具体流程如下所示。其标定结果验证方法是将激光雷达感知到的3D点云投影到Camera拍摄的图像上，看边界是否一致，如果不一致需要重新标定。



Lidar-to-Camera标定流程

Lidar-to-Lidar外参标定

将每一个Lidar 激光雷达扫描得到的点云与Rigel是稠密的点云之间进行**ICP** (Iterative Closest Point , 迭代最近点) 匹配，分别得到激光雷达相对于Rigel的位置。最后将两个位置矩阵相互传递得到Lidar和 Lidar之间的相对位置。

验证方法为：将两个激光雷达采集到的点云都投到真实物理世界中，看点云是否模糊、是否锐利。如果比较模糊，则需要重新标定。

Lidar内参标定

借助Rigel，在开阔平坦的场景下进行完整扫描，得到场景的点云。然后，将要标定的激光雷达对同一个场地进行同样的扫描。之后对两次扫描的点云进行匹配，如果激光雷达的内参不准确，会出现远距离地面点浮在空中的现象。

Lidar-to-GPS外参标定

将车辆在空旷地区绕八字行驶多次，记录多个时间点GPS给出的**车辆位置信息**(相对于GPS为原点的世界坐标系)，将Lidar捕捉的多帧点云投影到世界坐标系中，并进行拼接，求解优化获得外参。

自然场景的Lidar-to-Camera外参标定

由于没有了Rigel-Tag，需要在标定的场景中寻找具有明显边缘的物体作为参照物，将该参照物的点云边缘和Camera拍摄图像的边缘对齐作为参数标定效果的考量指标，如果对齐，这表示标定结果良好。

自然场景中的Bifocal Camera外参标定

过程类似于Camera-to-Camera外参标定，但是需要在**自然场景**中找到边缘锐利的物体作为参照物。

Camera-to-Radar外参标定

Camera-to-Radar外参标定的重点是得到Radar相对于Camera的Pitch角的上下倾斜问题。通常情况下Radar是水平安装的，问题就转换为求得Camera相对于地面的Pitch角。由于Camera-to-Lidar已经标定好，可以通过**Lidar采集**到的平面信息解决倾角问题。



END
