

附录

附录

A 时序同步

A.1 时序同步与时间矫正的意义

A.2 常见的时间标准及转换

A.3 各传感器输出信息时间戳

A.4 时间同步方法

B Apollo中的各个坐标系

B.1 地心惯性坐标系（i 系）

B.2 地球坐标系（e系，地心地固坐标系，ECEF）

B.3 全球地理坐标系统（g系，大地坐标系）

B.4 局部地理坐标系统（导航坐标系统，N系）

B.5 载体坐标系统

B.6 内外参文件的解析

C 同步线制作与固件刷机

A 时序同步

A.1 时序同步与时间矫正的意义

时序同步：

- **统一时钟源**，并保证采用同一种计时标准。
- **保证各传感器成像的时间不一致**。这导致了成像结果之间无法有效对齐，无法进行有效的融合。

时间矫正：

- **消除时间延时误差**。传感器会输出一个时间戳 t_s ，但是由于时钟不同步的原因，传到本地系统时无法匹配，因此会将 t_s 修正为系统接受时刻的时间戳 t_s^{\wedge} 。这中间的差距就是相机的时间延迟误差，通常在几ms到几十ms之间。高速情景下，存在1 ms延时就能对系统造成明显的影响。

A.2 常见的时间标准及转换

1. 常见的时间标准及时间戳表示

- **GMT**，即格林尼治标准时间，也就是世界时。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**，即协调世界时。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**，即**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**，即本地时间。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。
- **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**。
- **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**）。

2. GPS timestamp 与 Unix timestamp 的相互转换：

- 不考虑闰秒情况下，两者的时间差异为：
 - 以世界时间计算： $315964800 = 315993600 - 28800$
 - 以北京时间计算： 315993600
- 闰秒插入时间表：

```
Current TAI - UTC = 37. (mean that: 2017 - 1970/01/01 = 37 seconds)
Current GPS - UNIX = 18. (mean that: 2017 - 1980/01/06 = 18 seconds)
=====+=====+=====+=====+=====+=====+
| Year | Jun 30 | Dec 31 | Year | Jun 30 | Dec 31 |
=====+=====+=====+=====+=====+=====+
| 1980 | (already +19) |  | 1994 | +1      | 0      |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1981 | +1      | 0      | 1995 | 0      | +1      |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1982 | +1      | 0      | 1997 | +1      | 0      |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1983 | +1      | 0      | 1998 | 0      | +1      |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1985 | +1      | 0      | 2005 | 0      | +1      |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1987 | 0      | +1      | 2008 | 0      | +1      |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1989 | 0      | +1      | 2012 | +1      | 0      |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1990 | 0      | +1      | 2015 | +1      | 0      |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1992 | +1      | 0      | 2016 | 0      | +1      |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1993 | +1      | 0      | 2017 | 0      | 0      |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
```

- 代码展示：详见 `modules/drivers/gnss/util/time_conversion.h`

A.3 各传感器输出信息时间戳

- lidar点云信息（`/apollo/sensor/lidar16/PointCloud2`）

```
header:
  timestamp: 1645954490.276059151
measurement_time: 1645925689.300303936
point: [0]
  x: 5.998190
  y: -0.836586
  z: -1.611391
  intensity: 27
  timestamp: 1645925689.201644032
```

- 该点云信息在与gnss时钟同步后，Apollo驱动中开启了使用激光时钟选项。可以看出 `measurement_time` 与 `header.timestamp` 相差了至少8小时，即28800。这是由于后者采用了北京时间而前者采用了UTC标准时间。

- 其中，`header.timestamp` 表示系统到达的时间，代码为
`cyber::Time().Now().ToSecond()`
`measurement_time` 表示点云的测量时间，取点云序列中最后一个点的时间戳（严格来说是点云最后一个点的测量时间除以1e9）作为整体的测量时间。
- 由于激光为慢速测量设备，因此需要记录**每个点的时间戳**，便于后续的运动畸变矫正。
- 相机信息：

```
header:
  timestamp: 1644554764.430842638
  measurement_time: 1644554764.399139166
```

- 相机情况需要分类讨论：对于**卷帘门相机**而言，实际曝光是一行一行进行的，每一行CMOS曝光后将信息传给行寄存器，再由行寄存器进行输出。最终时间戳会确定在**图像中间进行曝光时**；而对于**全局相机**而言，每个CMOS都有一个对应的寄存器，因此可以同时进行曝光，**时间戳位于同时曝光时**。但是全局相机价格高昂，同时工艺复杂，由于寄存器位置的限制，也很难做出大底的相机，因此卷帘门相机更加实用。
- 非定制相机模组**不支持时钟同步**，定制相机可选择支持。以卷帘门相机为例，需要和厂家进行沟通，在输出相机图像时把每一行的时间戳也发送出来，根据相应的算法进行补偿处理。

A.4 时间同步方法

1. Apollo内部时间同步机制：

- 系统同步：

采用**NTP网络同步**。以1s为周期，根据时钟偏差调整client时钟，可将时钟误差稳定控制在微秒级别。

- 执行命令：

```
bash docker/scripts/dev_into.sh
sudo apt-get -y update && sudo apt-get -y install ntpdate
bash scripts/time_sync.sh cn
```

- LiDAR设备同步：

- LiDAR设备**支持两种时钟同步**方式：

- IEEE 1588-2008(PTPv2)：**以太网接口同步**；
- **PPS脉冲信号+NMEA消息**（GPS），由于设备原因，采用第二种方式进行时钟同步；

- PPS脉冲信号+NMEA消息（GPS）配置演示

- **GPS配置**。打开CGI-410 配置界面（网页输入：`192.168.200.1`，账号：`admin`，密码：`password`）在 `io` 设置 内的 `串口A` 配置中设置波特率为9600 bps，输出协议为GPRMC，输出频率为1 Hz（最大）。
- **同步模式**：速腾16线雷达支持3种PPS同步模式，本车采用 `Mode 2`：取最后一个GPRMC，Lidar端PPS下降沿触发同步，对应PPS上升沿。注意：如果采用 `Mode 0`，则可能会出现1秒左右的延迟，此时需要下载上位机软件，**更改同步模式后刷新固件**。
- **物理连接**。RS-LiDAR-16 电源盒上面的 GPS_REC 接口规格为 `SH1.0-6P` 母座，引脚定义如图所示：

| Pin No. | V4.0 and later versions | Other versions |
|---------|-------------------------|----------------|
| 1 | GPS PULSE | GPS REC |
| 2 | +5V | GPS PULSE |
| 3 | GND | GND |
| 4 | GPS REC | NC |
| 5 | GND | NC |
| 6 | NC | +5V |

该接口支持采用 RS232 协议进行通讯与GPS端相连接。**由于没有固定连接线，因此需要手工制作。**其中：GND 和 TXD 由CGI-410中的 A_RS232 口提供（详见DB9口定义），分别对应激光的 GND 和 GPS REC，CGI-410中的PPS授时线连接激光的 GPS PULSE 接口，其余部分悬空即可。

同步线的制作详见附录C。

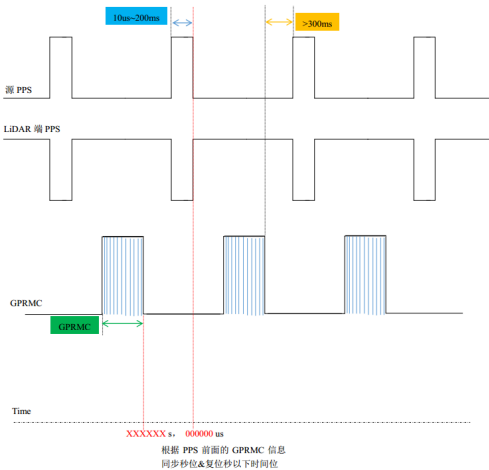
| Pin口 | CGI-410端 | Lidar端 |
|------|--------------|-----------|
| 1 | PPS授时端口 | GPS PULSE |
| 2 | 悬空 | 悬空 |
| 3 | A_RS232中的GND | GND |
| 4 | A_RS232中的TXD | GPS REC |
| 5 | 悬空 | 悬空 |
| 6 | 悬空 | 悬空 |

■ 同步模式选择：

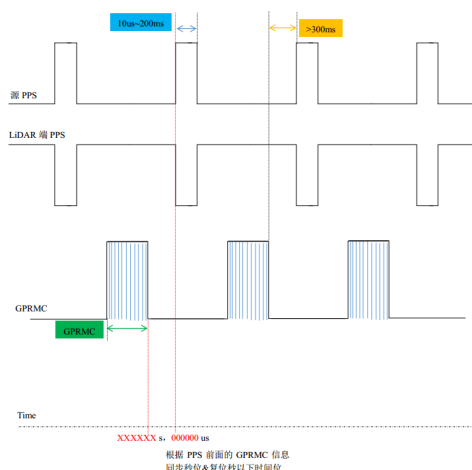
由于速腾激光雷达默认同步模式无法与华测惯导配合，因此需要对激光雷达的固件进行刷写。（该部分实际操作详见附录C）

速腾Lidar的时钟同步具有三种授时模式：**这里我们将采用Mode2的方式进行同步。**

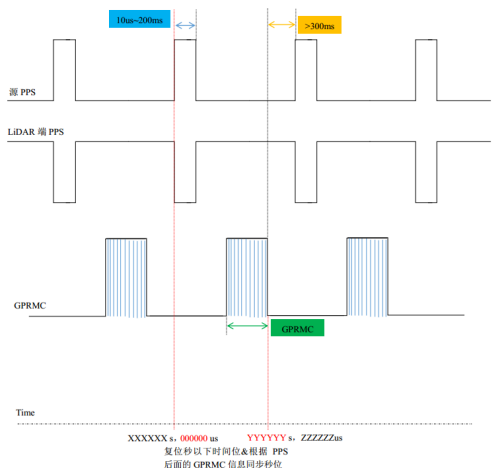
【Mode 0】：取 PPS 脉冲前一个 GPRMC，LiDAR 端 PPS 上升沿触发同步（对应源 PPS 下降沿）， 需要保证源 PPS 下降沿的稳定性——周期波动满足 $1s \pm 100\mu s$ 。最终同步后的时间满足： $RS + 1s + PPS \text{ 脉宽} = V$ （新固件之前的时间同步机制）



【Mode 1】：取 PPS 脉冲前一个 GPRMC，LiDAR 端 PPS 下降沿触发同步（对应源 PPS 上升沿），需要保证源 PPS 上升沿稳定性——周期波动满足 $1s \pm 100\mu s$ 。最终同步后的时间满足： $RS + 1s = V$ 。同时此模式下 V4.0 以上 16 线/V2.0 以上 32 线表现的同步效果和 V3.3 以下 16 线/V1.7 以下 32 线保持一致。



【Mode 2】：取后一个 GPRMC，LiDAR 端 PPS 下降沿触发同步（对应源 PPS 上升沿），需要保证源 PPS 上升沿稳定性——周期波动满足 $1s \pm 100\mu s$ 。最终同步后的时间满足： $RS = V$ 。



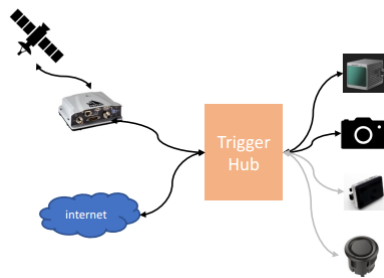
2. 工业级别的同步方式：硬件同步

自动驾驶系统中，几乎每个测量设备都有一个自己的时钟源，因此必须统一时钟源，以保证各个设备的时间戳是对齐的。考虑到原子钟的精确性，系统一般选择GNSS作为主时钟源，并对其他设备进行时间同步。注意，这里的时间同步并不是说仅仅同步一次就好，因为钟漂的存在，时间戳必须不断进行矫正。

考虑到在部分信号不好的地段，如隧道等场景下，GNSS信号会丢失而无法矫正时间，自动驾驶系统会指定一个晶振频率最高的设备（一般是专门的设备，如果imu或者lidar晶振很高也可能被选择）作为主时钟源，然后根据主时钟进行推断。

利用硬件同步方案，可以构造一个**触发装置**，在指定的时刻，发送触发信号，让所有的传感器触发成像，减少成像时刻误差。

- 连接GPS信号和NTP server，确保时钟实现微秒级同步；
- 设置触发逻辑（如LiDAR正前方的成像相位），同时触发LiDAR和Camera成像；
- 支持多LiDAR和多Camera，暂不支持Radar和超声波雷达
- 系统精度更高，可将系统**同步精度控制在5 ms以内**；缺点是丢失一些系统的灵活度和高频数据，camera成像频率原本可以更高的。



3. Camera设备的同步：

- 与IMU的同步，常见于VIO系统中：
 - imu、相机使用同一个时钟晶振：这样做的好处是不用考虑太多额外的因素，但是要求IMU和相机距离足够接近（这在自动驾驶场景下是不现实的），没有其他干扰，也不需要其他设备进行同步。
 - 常见的硬件同步解决方案：以IMU时钟触发Camera曝光
 - 软同步方法：具体内容详见 [VIO的第八讲](#)
- 与点云进行同步：
 - 常见的硬件同步解决方案：触发装置同时触发成像和曝光。
 - 常见的软件同步解决方案：由于lidar有成熟的硬件同步机制，可以将lidar与系统进行硬件同步，并将lidar点云逐步投影到相机中来，当某一帧能够对齐时候完成补偿。之后，分别在驱动中减去时间戳补偿，可以将这种时间误差补偿到10 ms以下。（详见 [多传感器融合感知第一章](#)）

B Apollo中的各个坐标系

在惯性导航中，一般将坐标系分为两类：**惯性坐标系**、**非惯性坐标系**。惯性坐标系包括：日心惯性系、地心惯性系。非惯性坐标系包括：地球坐标系、地理坐标系等。

B.1 地心惯性坐标系（i系）

惯性坐标系是指坐标轴指向保持不变的坐标系，例如地心惯性坐标系。它具有以下特征：

- 常用 $\{o_{ix} \ i_y \ i_z\}$ 表示，原点为地球中心。 $\{o_{ix} \ i_y\}$ 和 $\{o_{iy} \ i_z\}$ 在地球赤道平面内，其中前者指向春分点。 $\{o_{iz} \ i_z\}$ 轴为地球自转轴，指向北极， $\{o_{iy} \ i_z\}$ 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。

B.2 地球坐标系（e系，地心地固坐标系，ECEF）

- 表示形式为： $\{o_{ex} \ e_y \ e_z\}$ ，角标常用 $e(\text{earth})$ 表示。
- 地球中心为坐标原点 o ， oz 轴沿地球自转轴方向， ox 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）， oy 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。

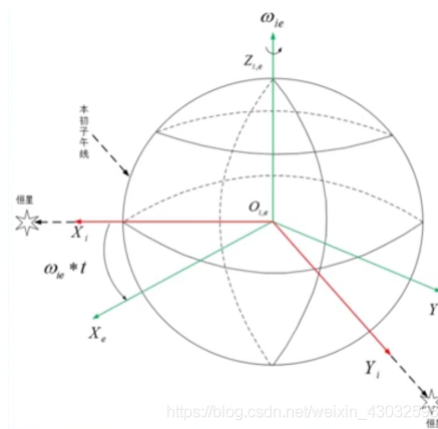
B.3 全球地理坐标系统（g系，大地坐标系）

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）。

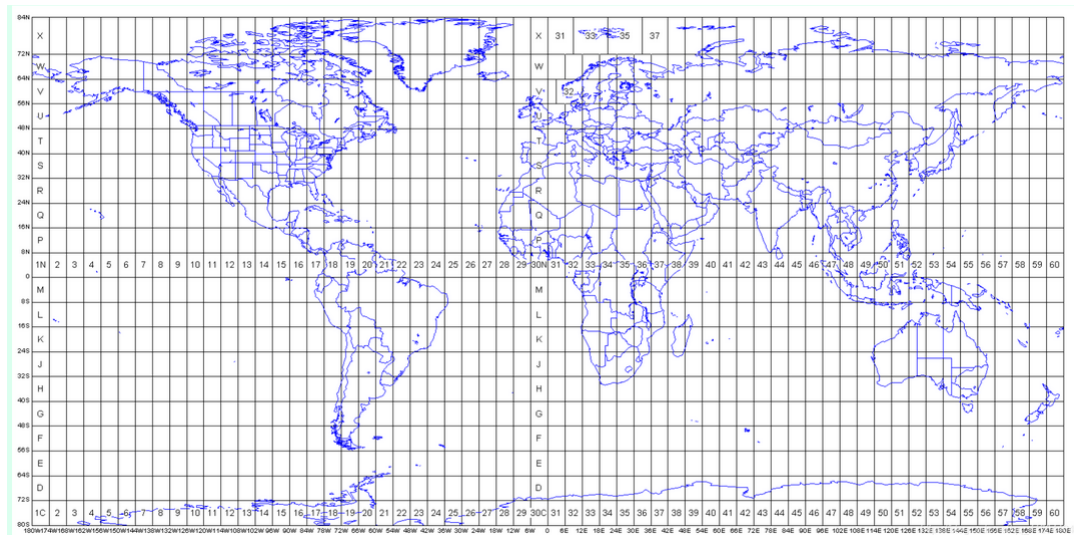
- 表示形式：通过使用该标准坐标系统，我们可以使用2个数字：x坐标和y坐标来唯一的确定地球表面上除北极点之外的所有点，其中x坐标表示经度（longitude），y坐标表示纬度（latitude）。

- WGS84坐标系的坐标原点位于地球的质心，Z轴指向BIH1984.0定义的协议地球极方向[指向格林威治子午线（本初子午线）]，X轴指向BIH1984.0的起始子午面和赤道的交点, 在**地球赤道平面内**相互垂直。
- 经度0.00001度（十万分之一度, $0^{\circ}0'0.036''$ ）,在赤道上对应的地球表面距离约为1米稍多,但在南北极极点上,则是0米.纬度0.00001度在地球表面任意地方对应的地球表面距离都是大约1米稍多。
WGS84椭球体也经常在转换中被使用。



UTM坐标系

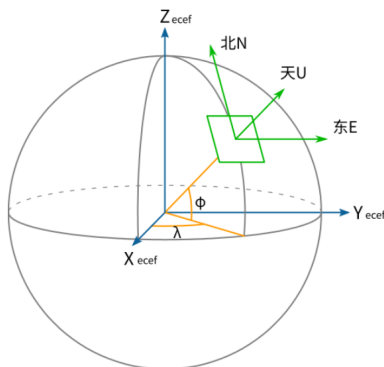
- 将球面经纬度坐标经过投影算法转换成的平面坐标，即通常所说的XY坐标，单位为米制。UTM相当于是把世界分成了若干个ENU坐标系，每个zone对应一个ENU。
- 表示形式：坐标\$(x,y)\$加上投影带号就能表示地球上的一点。例如，11U 358657mE 5885532mN ：
 - 11U 表示位于经度11区，位于纬度U区
 - 358657mE 表示东向位置为358657 m
 - 5885532mN 表示北向位置为5885532 m
- UTM投影坐标使用“等角横轴切割圆柱”模型划分，基于网格的方法进行表示：
 - 经度分区：编号1-60，其中58个区的东西跨度为 6°
 - 纬度分区：编号C-X (不含I,O,共20个区)，每个区的南北跨度为 8°
 - A, B, Y, Z覆盖南极和北极区
 - N为第一个北纬带，N之后的字母均为北纬带，N之前的字母均为南纬带
- 坐标系方向：UTM坐标系原点跟id有关。一个id对应一个原点。以正东方向为x轴正方向（UTM Easting），正北方向为y轴正方向（UTM Northing）。
- “WGS84”坐标系的墨卡托投影分度带（UTM ZONE）选择方法:
 - UTM是由美国制定，因此起始分带并不在本初子午线，而是在180度，因而所有美国本土都处于0—30带内。北京地区位于50带内；
 - 北半球地区，选择最后字母为“N”的带；
 - 可根据公式计算，带数=（经度整数位/6）的整数部分+31 如：江西省南昌新建县某调查单元经度范围 $115^{\circ}35'20''-115^{\circ}36'00''$ ，带数为 $115/6+31=50$ ，选 50N，即 WGS84 UTM ZONE 50N。



B.4 局部地理坐标系（导航坐标系，N系）

局部地理坐标系通常使用的有“东北天”坐标系和“北东地”坐标系。在Apollo系统中，局部坐标系的定义为：东北天坐标系（East-North-Up，ENU）。在惯导和组合导航中，导航坐标系通常选用地理坐标系，两者保持一致。

1. “东北天”坐标系：z轴 – 指向上方（和重力线成一条直线）；y轴 – 指向北面；x轴 – 指向东面。在该坐标系下，标准重力表示为： $[0, 0, -9.81]$ ，静止的物体表示为 $[0, 0, 9.81]$ 。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）。



2. 使用 Proj.4 库完成坐标转换：

- Proj.4 库介绍：Proj.4 是开源 GIS 最著名的地图投影库，功能主要有经纬度坐标与地理坐标的转换，坐标系的转换，包括基准变换等。百度Apollo系统中采用了该库作为转换工具。
- Proj.4 库常用的几种参数：

| | |
|----------|--------------------------------------|
| +proj | 投影名 |
| +zone | UTM区域 |
| +ellps | 椭球体名 |
| +towgs84 | 3或7参数基准面转换 |
| +units | m(米), us-ft (美国测量英尺) |
| +no_defs | 不要使用/usr/share/proj/proj_def.dat缺省文件 |
| | |
| +datum | 基准面名 |
| +lat_0 | 维度起点 |
| +lon_0 | 中央经线 |
| +k_0 | 比例因子 |
| +south | 表示南半球UTM区域 |

- 常用 `proj-strings` :

```
const char *UTM_TEXT =
    "+proj=utm +zone=50 +ellps=WGS84 +towgs84=0,0,0,0,0,0,0 +units=m
+no_defs";
const char *WGS84_TEXT = "+proj=latlong +ellps=WGS84";
```

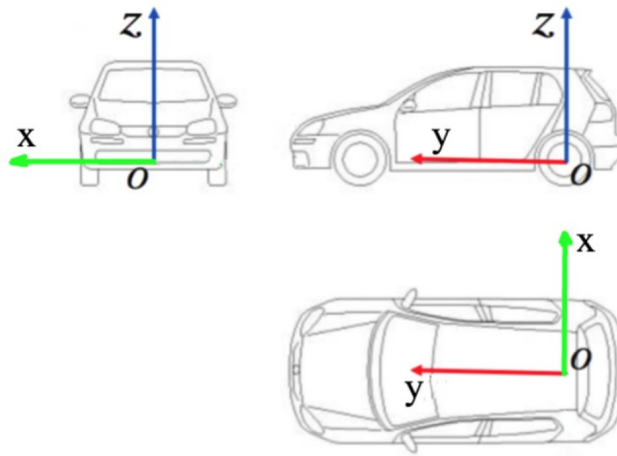
- `+proj=latlong` : 表示在WGS84坐标系下
 - `+proj=utm` : 表示在utm坐标系下
 - `+ellps=WGS84` : 地球模型采用WGS84椭球体
 - `+towgs84=0,0,0,0,0,0,0` : 基准面变换可以使用3参数空间变换(地心空间直角坐标系), 或7参数变换(平移 + 旋转 + 缩放)。WGS84与UTM基准一致, 无需没有额外变换。
 - `+no_defs` : 基准网格转换文件 `/usr/local/share/proj/ntv1_can.dat` 不会被加载
- 完成从WGS84到UTM坐标系的转换

```
#define ACCEPT_USE_OF_DEPRECATED_PROJ_API_H
#include <proj_api.h>
constexpr double DEG_TO_RAD_LOCAL = M_PI / 180.0;

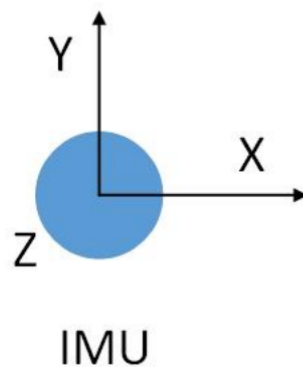
projPJ wgs84pj_source_ = pj_init_plus(WGS84_TEXT);
projPJ utm_target_ = pj_init_plus(UTM_TEXT);
double x = ins->position().lon();
double y = ins->position().lat();
x *= DEG_TO_RAD_LOCAL;
y *= DEG_TO_RAD_LOCAL;
pj_transform(wgs84pj_source_, utm_target_, 1, 1, &x, &y, NULL);
pj_free(wgs84pj_source_);
pj_free(utm_target_);
```

B.5 载体坐标系统

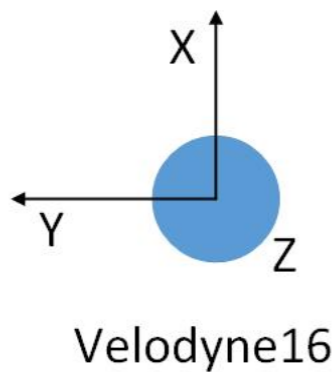
1. **车辆坐标系 (B系) : 右-前-上 (Right-Forward-Up RFU)**。车辆坐标系的原点在车辆后轮轴的中心。z轴 - 通过车顶垂直于地面指向上方; y轴 - 在行驶的方向上指向车辆前方; x轴 - 面向前方时, 指向车辆右侧。



2. **IMU坐标系**：Apollo中，imu坐标系和载体坐标系一致。和载体固定连在一起，和n系有一个旋转关系。IMU坐标系也是各个传感器的父坐标系。



3. **激光坐标系**：Apollo中采用前-左-上坐标系（FLU）



B.6 内外参文件的解析

以 `lidar16_novatel_extrinsics.yaml` 为例：

```
header:
  stamp:
    secs: 1570694831
    nsecs: 0
  seq: 0
  frame_id: novatel
child_frame_id: lidar16
transform:
  rotation:
    x: 0.0
    y: 0.0
```

```

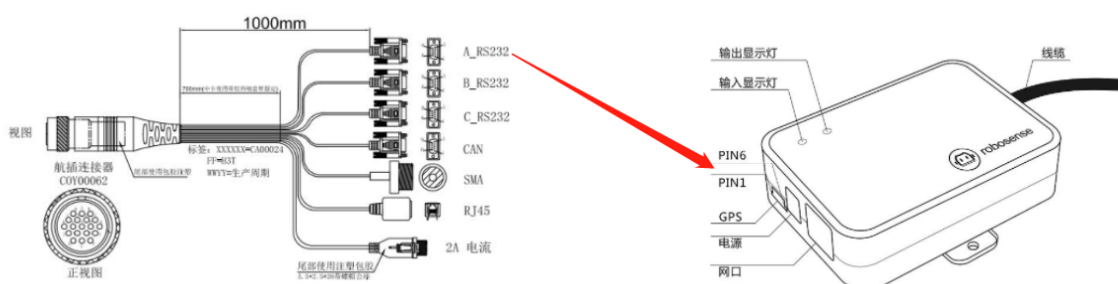
z: 0.7071
w: 0.7071
translation:
x: 0.0
y: 0.414
z: 0.897

```

这里的 `header.frame_id` 类似于ROS系统中的 `parent frame`，`child_frame_id` 中类似于ROS系统中 `child frame`，他们的关系如下：

- 从坐标系变换的角度：parent是原坐标系，child是变换后的坐标系，因此存在一个变换矩阵 $T^{\text{parent}}_{\text{child}}$ 。
- 从坐标系的角度：可以看做child坐标系在parent坐标系下的描述。

C 同步线制作与固件刷机



1. 时钟同步方法：

组合惯导通过串口A_RS232发布GPRMC数据为Lidar传输GPS时间，串口波特率对应为9600.

2. PPS脉冲信号+NMEA消息:

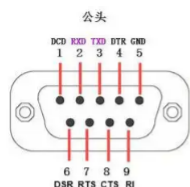
PPS信号以1hz的频率向Lidar发送整秒触发信号，一旦接收到GPS发来的PPS信号，则会对Lidar的时间整秒以下的时间进行清零，整秒及以上则是通过串口A发来的包含时间的GPRMC数据进行幅值来完成对Lidar的授时操作。

3. 制作材料准备：

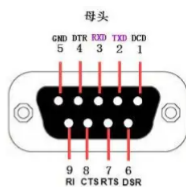
PPS信号线×1，DB9单公头串口线×1，SH1.0-6P接线端子，电烙铁，热缩管，剥线钳，绝缘胶带

4. 接线端口定义：

GNSS端



Lidar端



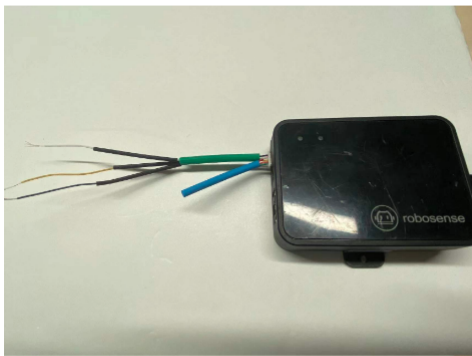
| 名 称 | 作 用 |
|-----------------------------|--------|
| DCD (Data Carrier Detect) | 数据载波检测 |
| RxD (Received Data) | 串口数据输入 |
| TxD (Transmitted Data) | 串口数据输出 |
| DTR (Data Terminal Ready) | 数据终端就绪 |
| GND (Signal Ground) | 地线 |
| DSR (Data Send Ready) | 数据发送就绪 |
| RTS (Request to Send) | 发送数据请求 |
| CTS (Clear to Send) | 清除发送 |

| Pin No. | V4.0 and later versions |
|---------|-------------------------|
| 1 | GPS PULSE |
| 2 | +5V |
| 3 | GND |
| 4 | GPS REC |
| 5 | GND |
| 6 | NC |

5. 接线操作：

| gnss | | lidar | |
|----------|---|-------|--------------|
| PPS | — | pin1 | 黑色 GPS PULSE |
| pin5 GND | — | pin3 | 白色 GND |
| pin2 TXD | — | pin4 | 黄色 REC |

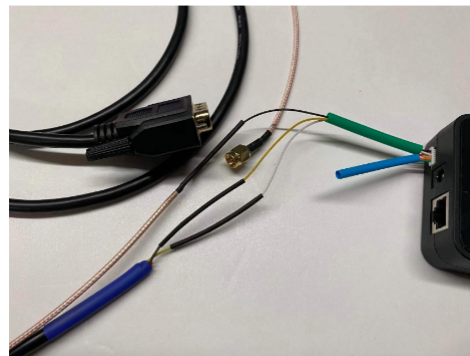
1



3



2



4

6. Lidar固件刷机

通过固件信息配置的方法，对Lidar的同步模式进行设定，根据速腾雷达的说明手册 [时间同步模式说明](#)，需要将Lidar的同步模式设定为模式2,具体操作参考传感器说明书 [手册_速腾16线 附录C](#)进行对同步模式进行配置。

RS-LiDAR Information

LiDAR IP: 192 . 168 . 20 . 82

PC IP: 192 . 168 . 20 . 40

MSOP Port: 8282 DIFOP Port: 9292

Mac: 40 : 2c : 76 : 86 : 1c : 54

Serial Number: 2400BADD95D6 Lidar Type: BP 3

Return Mode: last 2 Azimuth Calibration(Deg): 2.99

FOV(Deg): 0.00 to 360.00

Phase Lock: 0 Rotation Speed: 300

Time Mode: 0

Bot. F.W. Version: 09 00 0c 05 a1

Top F.W. Version: 02 03 04 04 00

Year: 17 Month: 1 Day: 1

Hour: 0 Minute: 7 Second: 27

Get Set LiDAR

