

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、机体坐标系等。

2.1 惯性坐标系

惯性坐标系是指坐标轴指向保持不变的坐标系，例如，**eci地心惯性坐标系**，它是一个非常固定的坐标系，**IMU测量得到的加速度，角速度都是相对于这个坐标系的**。由于和导航系统关联不大，这里不再详细描述。

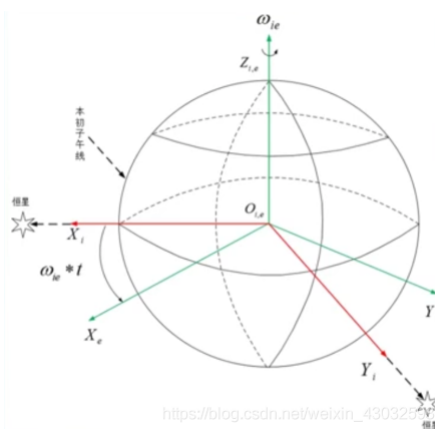
2.2 地球坐标系。

- 表示形式为： $O-X_eY_eZ_e$ ，角标常用 e (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。

2.3 全球地理坐标系（大地坐标系）

1. **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。

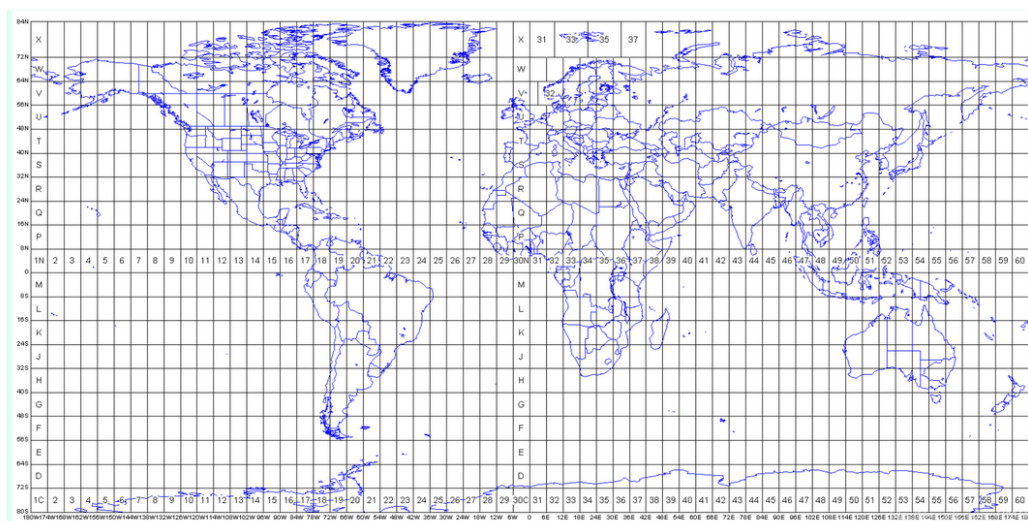
- 表示形式：通过使用该标准坐标系，我们可以使用2个数字： x 坐标和 y 坐标来唯一的确定地球表面上除北极点之外的所有点，其中 x 坐标表示**经度（longitude）**， y 坐标表示**纬度（latitude）**。
- WGS84坐标系的坐标原点位于地球的质心， Z 轴指向BIH1984.0定义的协议地球极方向[指向格林威治子午线（本初子午线）]， X 轴指向BIH1984.0的起始子午面和赤道的交点，在**地球赤道平面内相互垂直**。
- 经度0.00001度（十万分之一度， $0^{\circ}0'0.036''$ ），在赤道上对应的地球表面距离约为1米稍多，但在南北极极点，则是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。



2. **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：

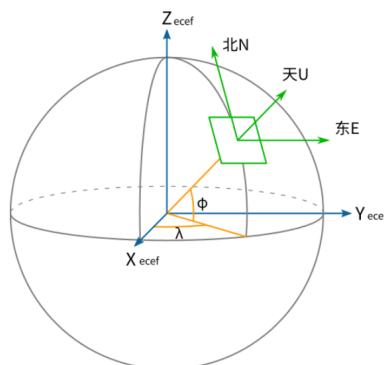
- 经度分区：编号1-60，其中58个区的东西跨度为 6°
- 纬度分区：编号C-X (不含I,O,共20个区)，每个区的南北跨度为 8°
- A, B, Y, Z覆盖南极和北极区
- N为第一个北纬带，N之后的字母均为北纬带，N之前的字母均为南纬带
- 坐标系方向：UTM坐标系原点跟id有关。一个id对应一个原点。以正东方向为x轴正方向（UTM Easting），正北方向为y轴正方向（UTM Northing）。
- “WGS84”坐标系的墨卡托投影分度带（UTM ZONE）选择方法：
 - UTM是由美国制定，因此起始分带并不在本初子午线，而是在180度，因而所有美国本土都处于0—30带内。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。



2.4 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： $[0, 0, -9.81]$ 。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：

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

- 常用 proj-strings：

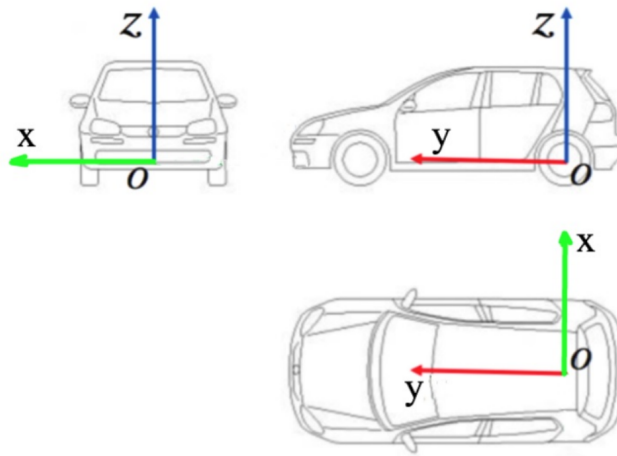
```
1 const char *UTM_TEXT =
2     "+proj=utm +zone=50 +ellps=WGS84 +towgs84=0,0,0,0,0,0,0 +units=m
3     +no_defs";
4 const char *WGS84_TEXT = "+proj=latlong +ellps=WGS84";
```

- +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

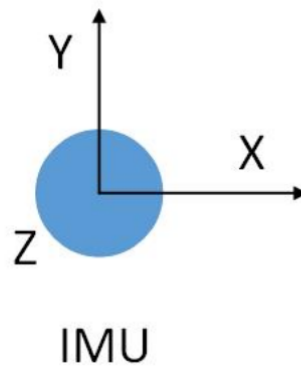
```
1 #define ACCEPT_USE_OF_DEPRECATED_PROJ_API_H
2 #include <proj_api.h>
3 constexpr double DEG_TO_RAD_LOCAL = M_PI / 180.0;
4
5 projPJ wgs84pj_source_ = pj_init_plus(WGS84_TEXT);
6 projPJ utm_target_ = pj_init_plus(UTM_TEXT);
7 double x = ins->position().lon();
8 double y = ins->position().lat();
9 x *= DEG_TO_RAD_LOCAL;
10 y *= DEG_TO_RAD_LOCAL;
11 pj_transform(wgs84pj_source_, utm_target_, 1, 1, &x, &y, NULL);
12 pj_free(wgs84pj_source_);
13 pj_free(utm_target_);
```

2.5 载体坐标系

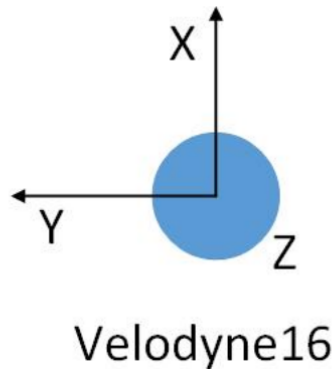
1. 车辆坐标系 (B系)：右-前-上 (Right-Forward-Up RFU)。车辆坐标系的原点在车辆后轮轴的中心。z轴 - 通过车顶垂直于地面指向上方；y轴 - 在行驶的方向上指向车辆前方；x轴 - 面向前方时，指向车辆右侧。



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）



2.6 内外参文件的解析

以 `lidar16_novatel_extrinsics.yaml` 为例：

```

1  header:
2    stamp:
3      secs: 1570694831
4      nsecs: 0
5    seq: 0
6    frame_id: novatel
7  child_frame_id: lidar16
8  transform:
9    rotation:
10     x: 0.0
11     y: 0.0
12     z: 0.7071

```

```
13     w: 0.7071
14     translation:
15         x: 0.0
16         y: 0.414
17         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_{child}^{parent} 。
- 从坐标系的角度：可以看做child坐标系在parent坐标系下的描述。