

# 自动驾驶课程

## 第3节：多传感器融合定位

主讲人 任乾





## 目录



1.定位系统概述



2.定位相关硬件介绍



3.定位地图



4.Apollo定位模块解析



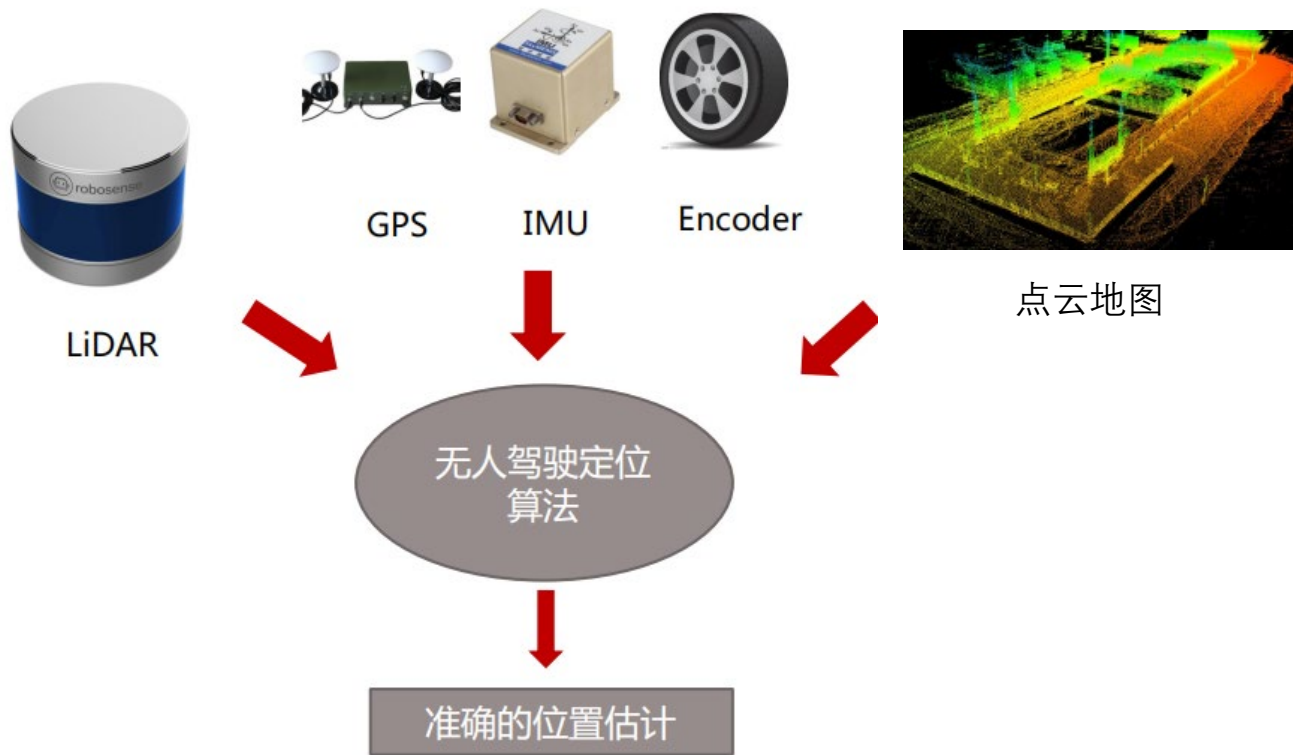
目录



## 1.定位系统概述



## 典型L4定位系统组成





## 定位系统概述

- ❑ 定位方案的选择主要取决于自动驾驶等级
- ❑ 一般L3及以下，依赖高精地图，以视觉为主；L4使用点云地图，以激光雷达为主



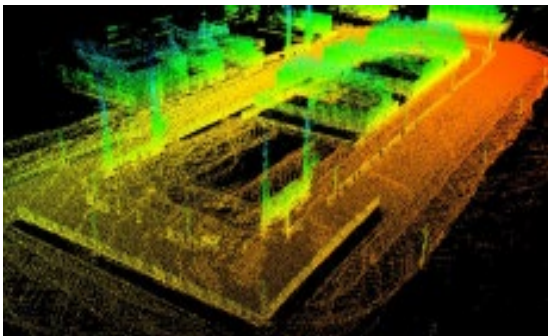


## 定位地图

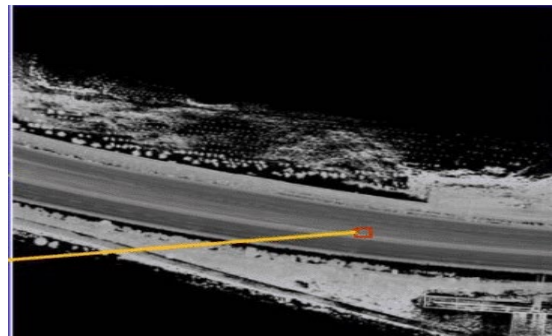
□ L4并非不使用高精地图，只是定位模块对高精地图依赖小，但其他模块仍然需要



高精地图



点云地图



栅格地图



目录

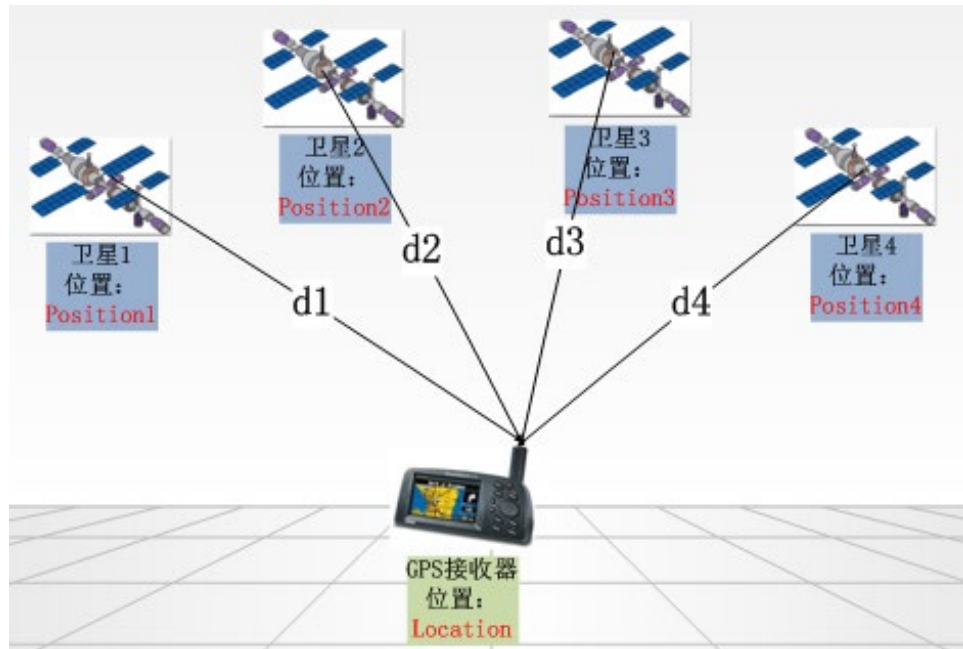


## 2.定位相关硬件介绍



# 卫星定位系统

## 1) GNSS定位原理



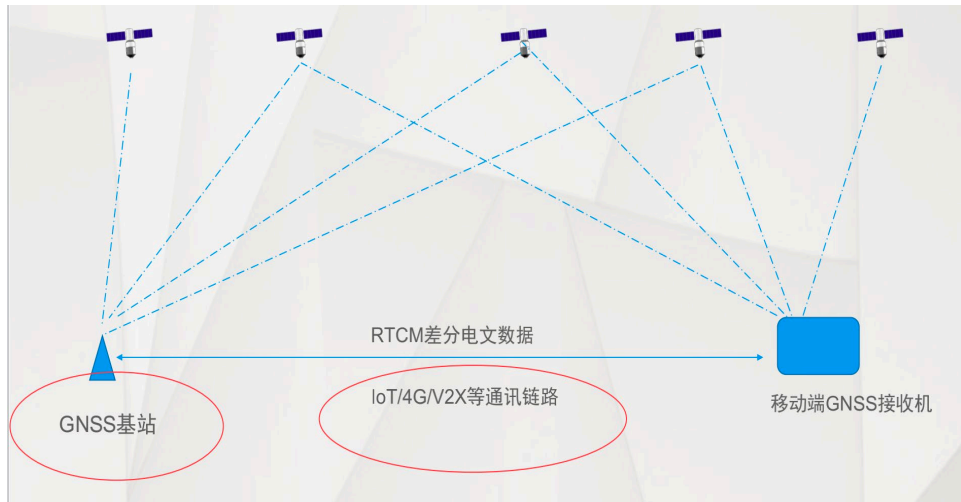
- 接收机接收卫星信号，并解析自己和卫星之间的相对距离(伪距)，多个卫星联合计算接收机位置





# 卫星定位系统

## 2)RTK定位原理



- 静止的基站计算出GNSS中和环境相关的误差（电离层延迟等），并把误差传输给移动端接收机，接收机补偿误差，得到更精确的定位结果



# 卫星定位系统

## 2)RTK定位原理

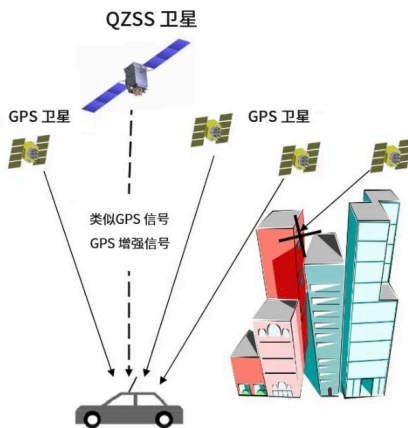


➤ 实际大规模大场景使用时，一般是基站组网使用

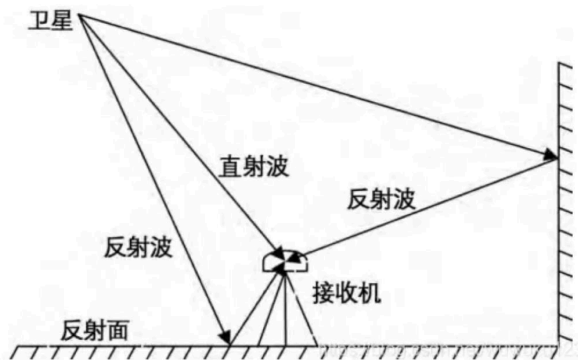


# 卫星定位系统

## 3)当前GNSS定位的主要问题



遮挡：可用来计算的卫星数过少



多路径：给出错误的和卫星相对距离



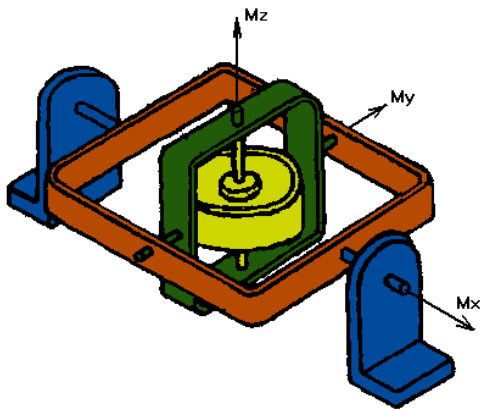
高动态：影响解算精度



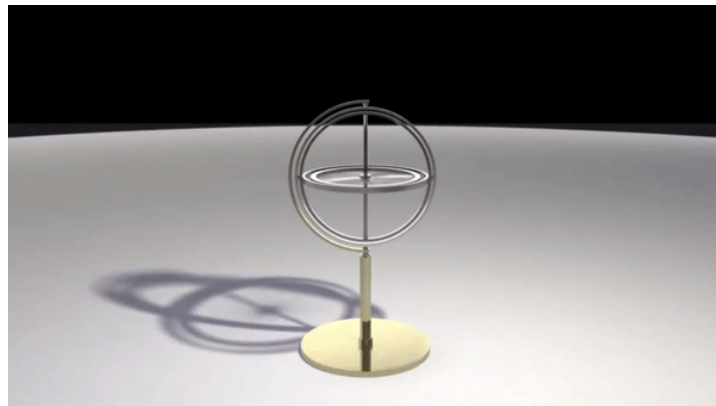
## 组合导航系统

### 1) Imu原理-机械陀螺

- **定轴性：**当陀螺转子以高速旋转时，在没有任何外力矩作用在陀螺仪上时，陀螺仪的自转轴在惯性空间中的指向保持稳定不变，即指向一个固定的方向；同时反抗任何改变转子轴向的力量。
- **进动性：**当转子高速旋转时，若外力矩作用于外环轴，陀螺仪将绕内环轴转动；若外力矩作用于内环轴，陀螺仪将绕外环轴转动。其转动角速度方向与外力矩作用方向互相垂直。



平台式惯导



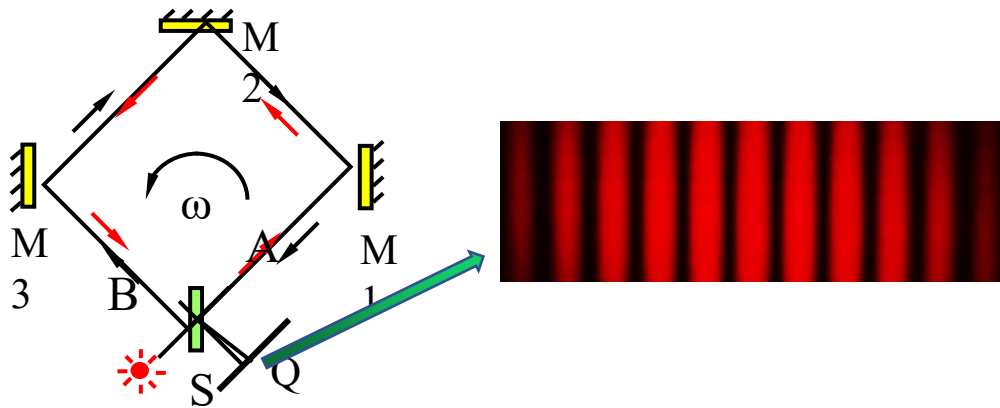
陀螺示意图



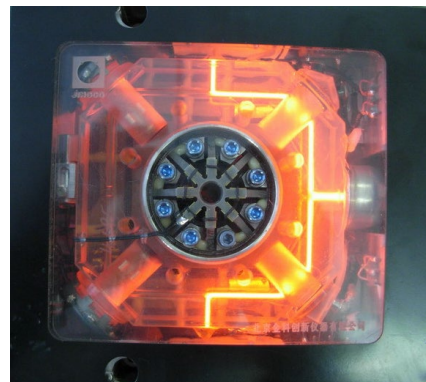
## 组合导航系统

### 1) Imu原理-激光陀螺

- Sagnac效应由法国物理学家 Sagnac 于 1913 年发现，其原理是干涉仪相对惯性空间静止时，光路 A 和 B 的光程相等，当有角速度时，光程不相等，便会产生干涉。



Sagnac效应示意



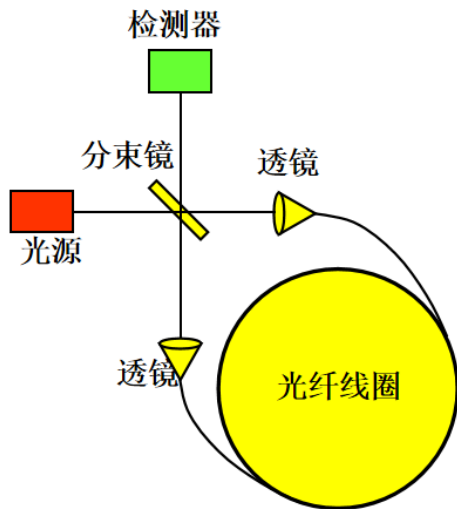
激光陀螺



# 组合导航系统

## 1) Imu原理-光纤陀螺

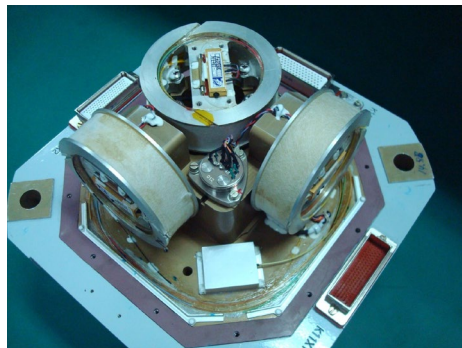
- 同样基于Sagnac效应，传播介质改成了光纤。



光纤陀螺原理示意



光纤陀螺



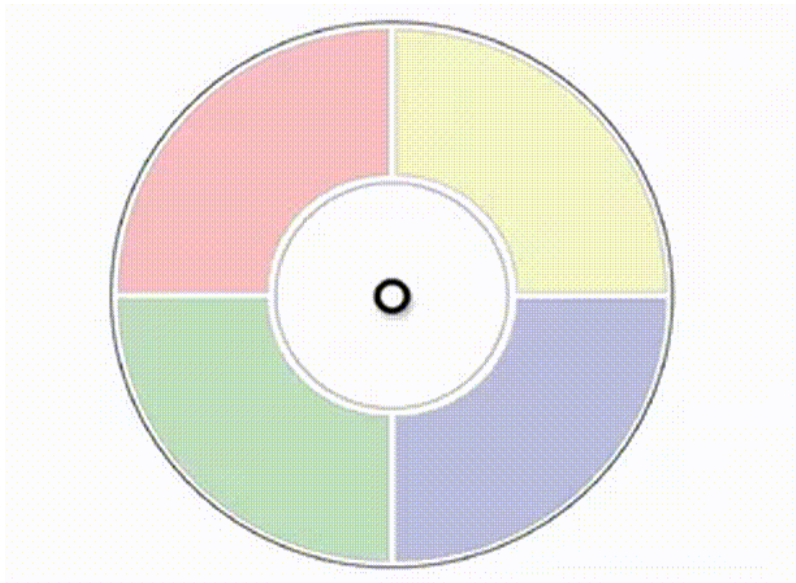
基于光纤陀螺的捷联式惯性导航系统



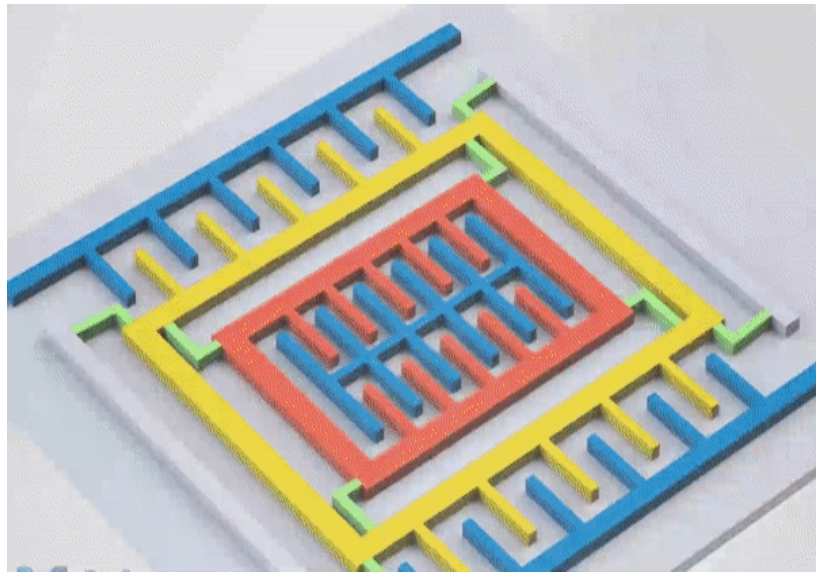
## 组合导航系统

### 1) Imu原理-MEMS陀螺

- 科里奥利力（Coriolis force，简称为科氏力），是对旋转体系（比如自转的地球，旋转的圆盘等）中进行直线运动的质点由于惯性相对于旋转体系产生的直线运动的偏移的一种描述。



科里奥利力



MEMS工作原理

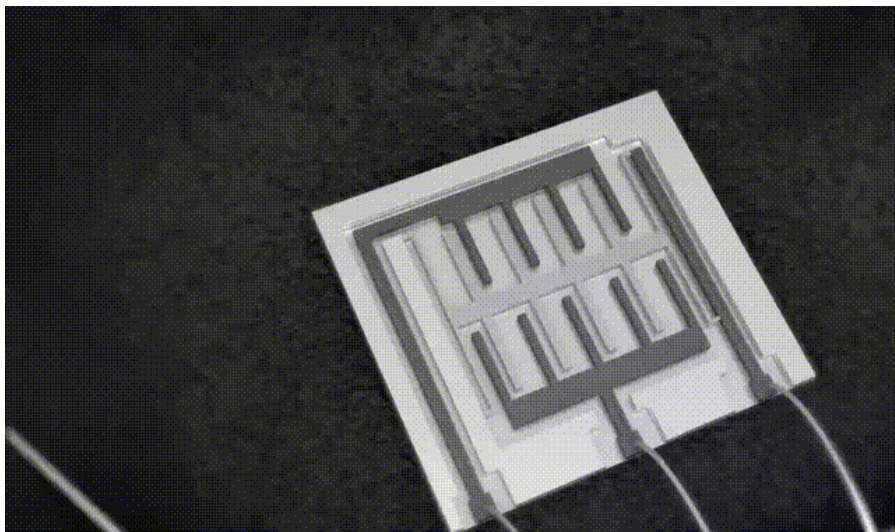




## 组合导航系统

### 1) Imu原理-加速度计

- 当运载体相对惯性空间做加速度运动时，仪表壳体也随之做相对运动，质量块保持惯性，朝着与加速度方向相反的方向产生位移（拉伸或压缩弹簧）。当位移量达到一定值时，弹簧给出的力使质量块以同一加速度相对惯性空间做加速运动，加速度的大小与方向影响质量块相对位移的方向及拉伸量。







## 组合导航系统

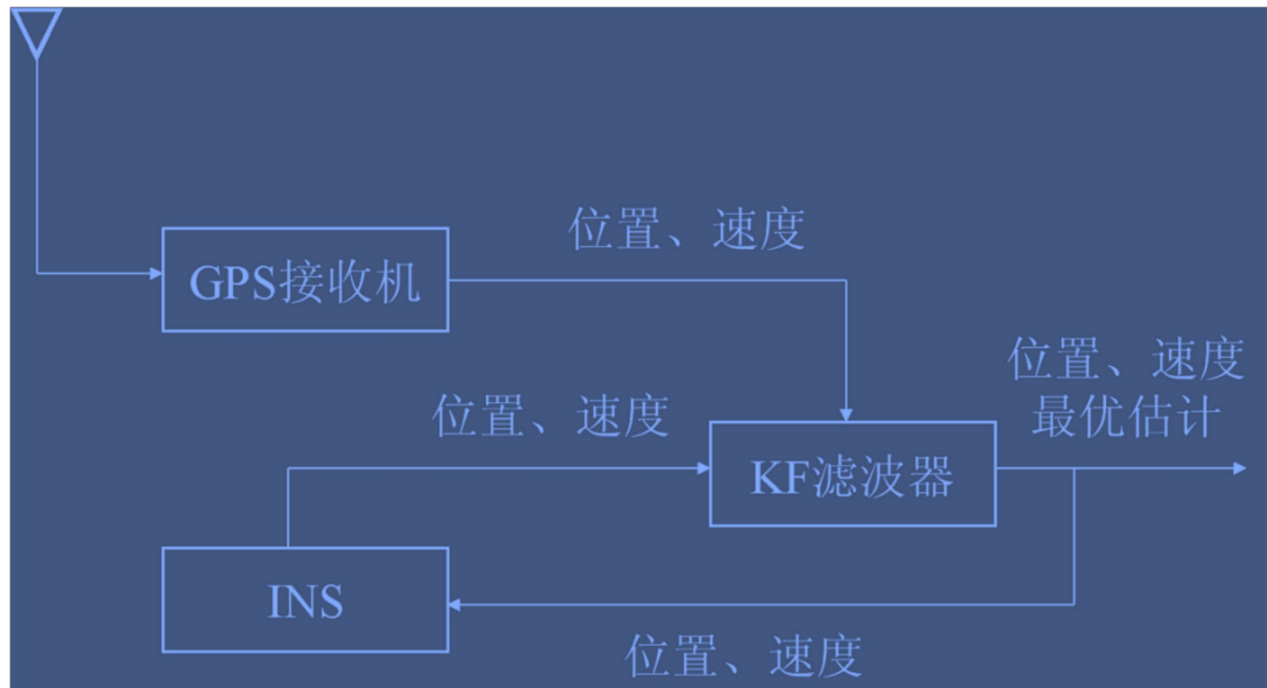
### 2) 组合导航原理

- GNSS有噪声，无累计误差；IMU噪声小，有累计误差，二者互补
- 组合导航有三种方式，理论精度由低到高为
  - a. 松耦合：使用GNSS位置与IMU融合
  - b. 紧耦合：使用GNSS伪距、伪距率与IMU融合
  - c. 深组合：在接收机信号捕获与跟踪时就引入IMU信息
- 松耦合最常见；
- 紧耦合仅在信号差(比如卫星个数经常少于四颗)的环境下有正向作用，而且使用条件苛刻，用不好会有反作用，收益与风险并存；
- 深组合工程化有很高的门槛，国内还未完全突破，国外也只是少数公司掌握(如Novatel)



## 组合导航系统

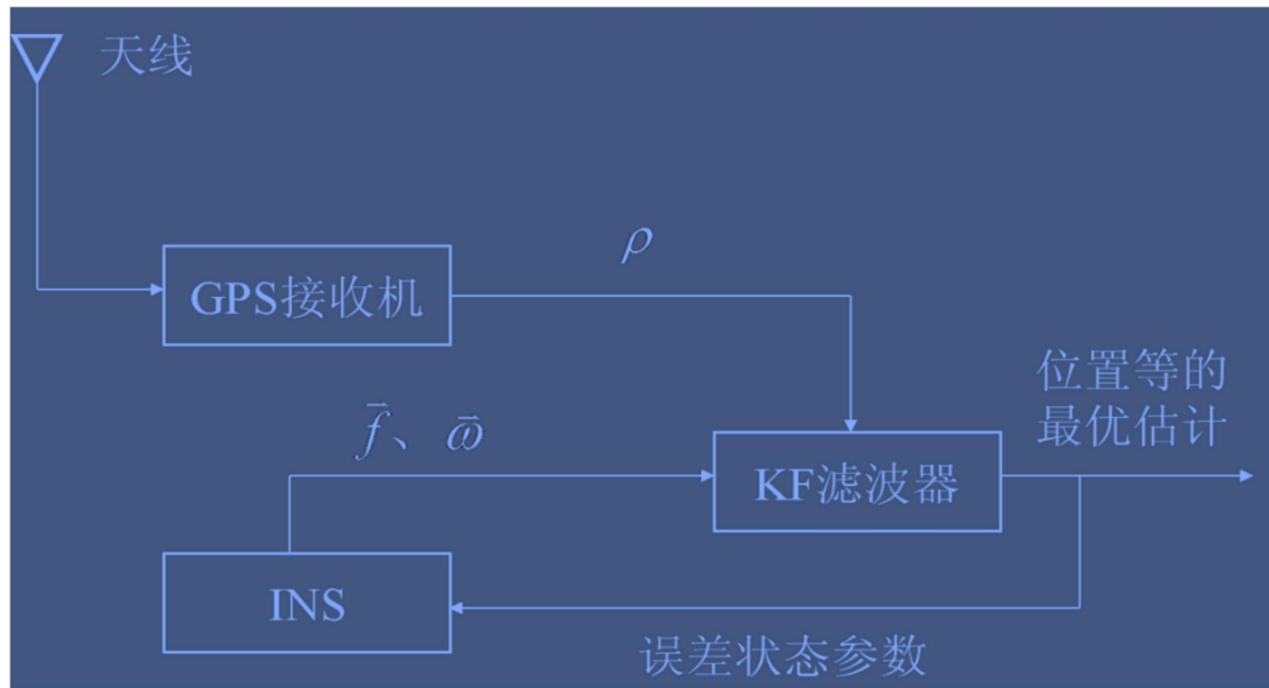
### 2) 组合导航原理-松组合





## 组合导航系统

### 2) 组合导航原理-紧组合





## 组合导航系统

### □ 国内外产品及厂商分布现状

#### 1) 早期垄断级：Novatel PP7.

- 同等价位里，更符合自动驾驶性能要求
- 同等性能下，比测绘级产品价格低很多(虽然仍较贵，15-20万)

#### 2) 第二梯队：Xsense MTI-G-710; SBG Ellipse(低); SBG EKINOX(中); SBG APOGEE(高); Honeywell N580

- 不是因为所有都比PP7精度差，而是PP7更符合自动驾驶需求

#### 3) 第三梯队：国内众厂商

- 主打价格优势，面向简单场景，如矿山、高速等



## 组合导航系统

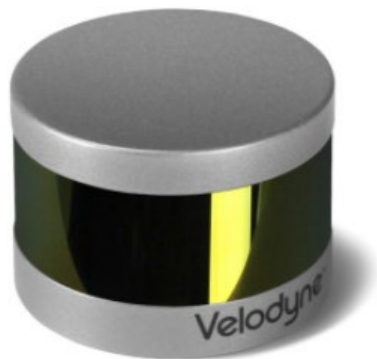
### □ 国内现状原因分析

- 1) 国内惯性领域早期的关注点在高精度导航领域，民用组合导航不是主要发展方向，需求也少，近年来的民用导航公司也多是军口转过来的
- 2) 民用场景和军用及测绘场景有区别，产品的成熟需要长期的场景测试，积累和改进需要时间
- 3) 一些核心技术确实有差距，如深组合，导致在恶劣环境下，性能差距明显，只能在简单场景下主打价格优势



## 激光雷达

❑ velodyne 是旋转式机械雷达的发明者



16线



32线



64线



128线



## 机械雷达

### ❑ velodyne 32线内部结构



从左往右 逐渐拆解



## 固态雷达

- ❑ 取消了机械旋转装置

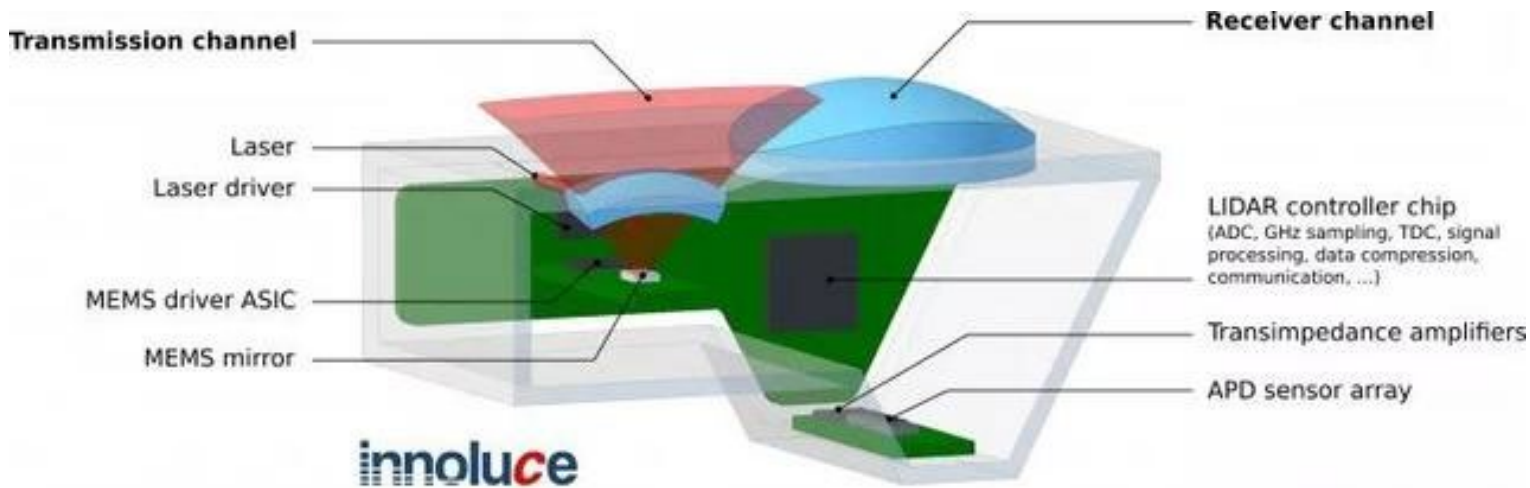






## 固态雷达

### 1) 微机械激光雷达原理

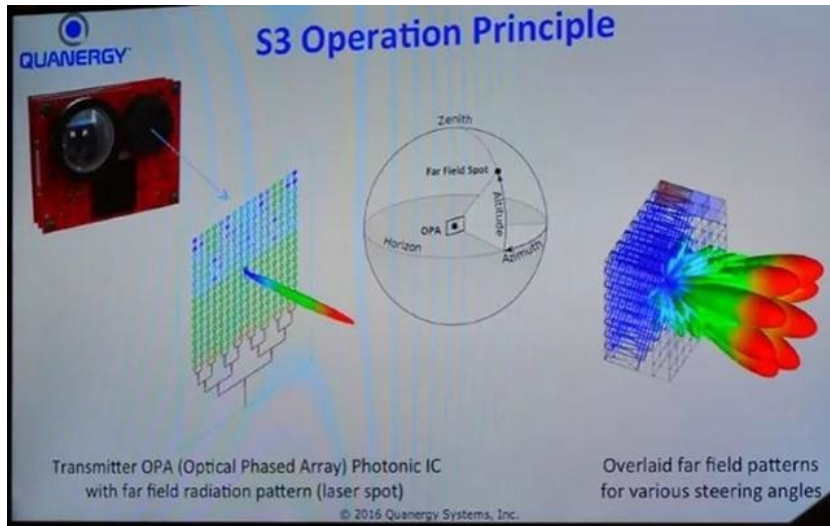


通过微机械改变光束方向

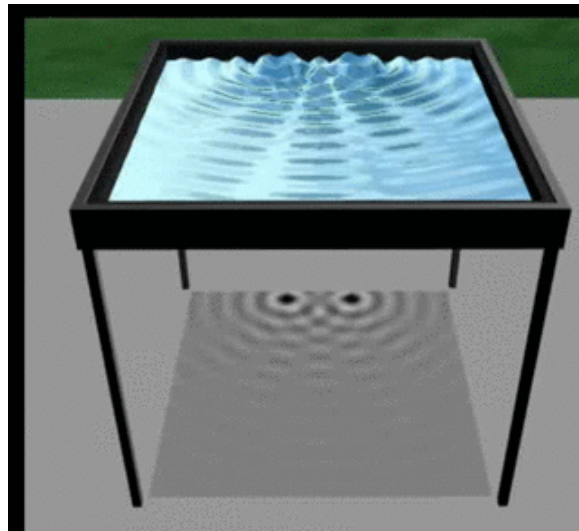


## 固态雷达

### 2) 相控阵雷达原理



通过不同光束之间的干涉，形成新方向的主光束

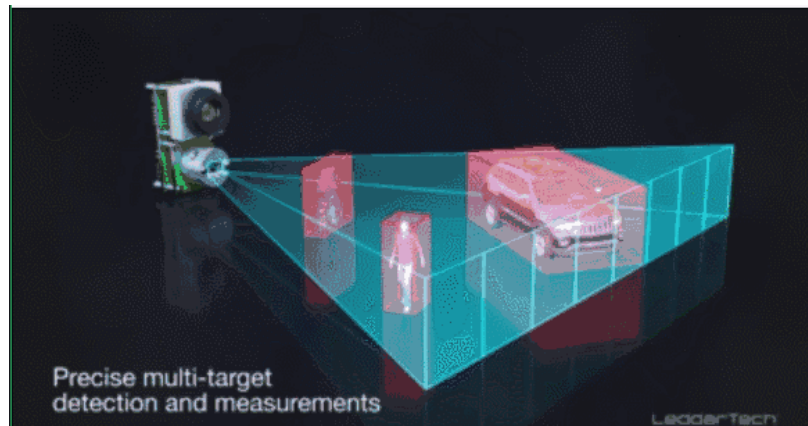


原理展示，与水波干涉类似



## 固态雷达

### 3) flash激光雷达原理



方法：一次性发射一整面光，属于非扫描式

- 优点：不需要考虑畸变等因素
- 缺点：一次性发送和接收量太大，互相干扰，导致远处测距不准，因此只用来近距离探测



## 相机

❑ 在乘用车上，摄像头数据更加丰富，乘用车也更多借助摄像头实现辅助驾驶，而非L4自动驾驶





目录

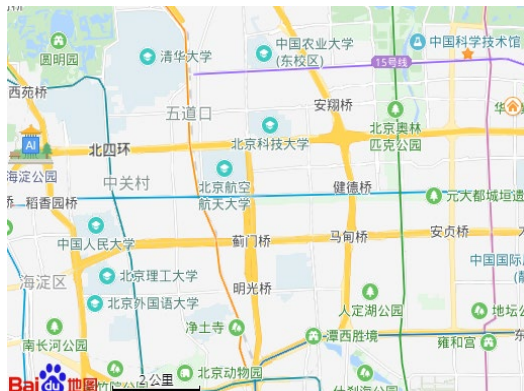


### 3.定位地图

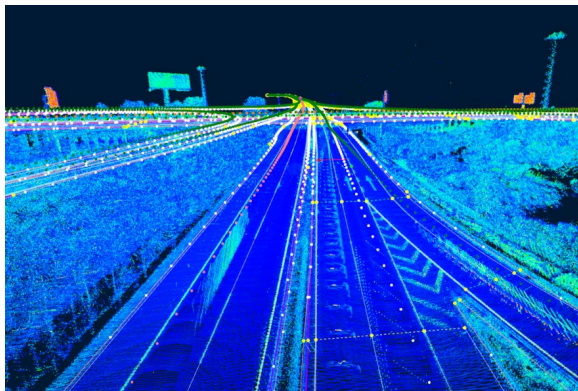


## 高精地图

- 高精度地图以精细化描述道路及其车道线、路沿护栏、交通标志牌、动态信息为主要内容，具有**精度高、数据维度多、时效性高**等特点，为自动驾驶车辆的定位、规划、决策、控制等应用提供安全保障，是自动驾驶解决方案的核心和基础。



普通导航地图



高精度地图



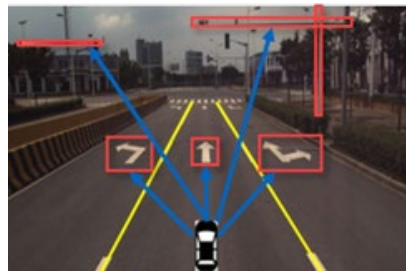
## 高精地图

### □ 高精度地图对自动驾驶的价值

辅助环境感知



辅助定位



辅助路径规划



辅助控制







## 高精地图

### 高精度地图数据处理







# 高精地图制作流程

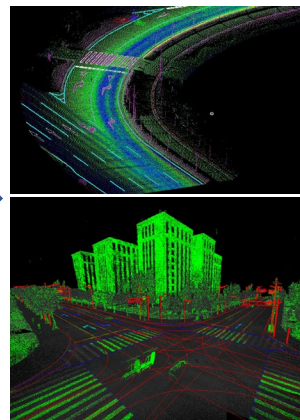
外业采集



资料解算



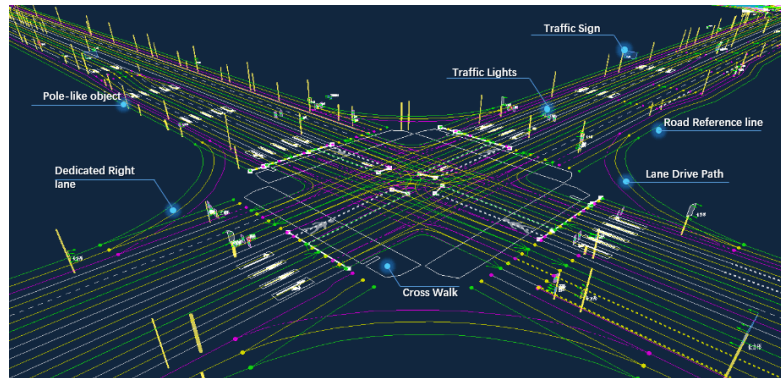
2d、3d几何要素识别



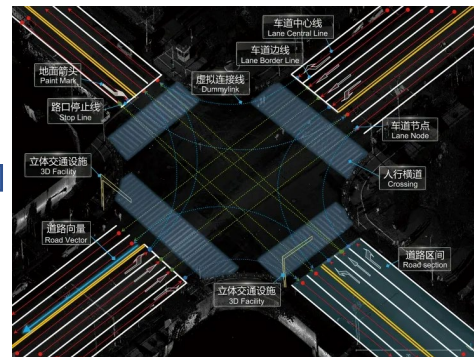
POI和属性识别



高精地图成品



属性关联和拓扑关系建立

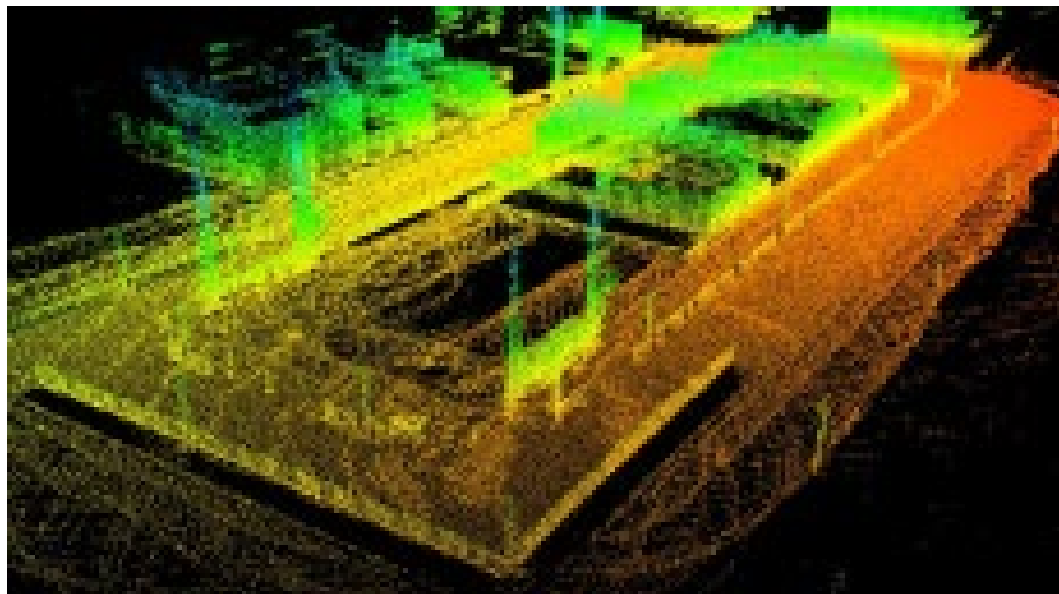


规格  
编译



## 点云地图

□ 点云地图的构建相比于高精地图就十分简单，甚至可以理解是为高精地图生产的一个中间环节





目录



## 4.Apollo定位模块解析



## Apollo定位

❑ Apollo中总共实现了3种定位算法，分别为rtk，ndt和msf，前两者开源，后者只提供了二进制的执行文件

➤ rtk定位:

简单来说就是把组合惯导(/apollo/sensor/gnss/odometry)发出的位姿重新打包成(/apollo/localization/pose)发出去，另外接收imu的信息，把里面的线加速度和角速度从车体坐标系转换成世界坐标系发出去。

➤ ndt定位:

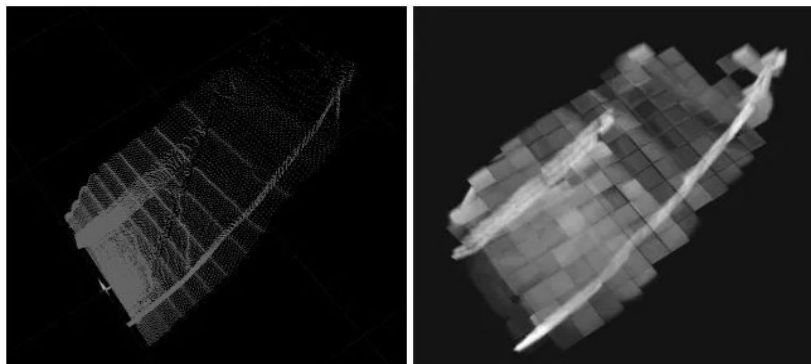
激光点云和ndt地图匹配获得位姿(10hz)，和组合惯导的位姿(100hz)，做最近20帧的加权平均（类似于考虑历史的互补滤波），输出当前位姿；

➤ msf定位:

接收各传感器信息（GPS，imu，激光点云），打包成/thirdparty/里msf二进制文件可以识别的消息类型，之后发送纯激光定位的结果和融合定位的结果。



# NDT原理



点集:

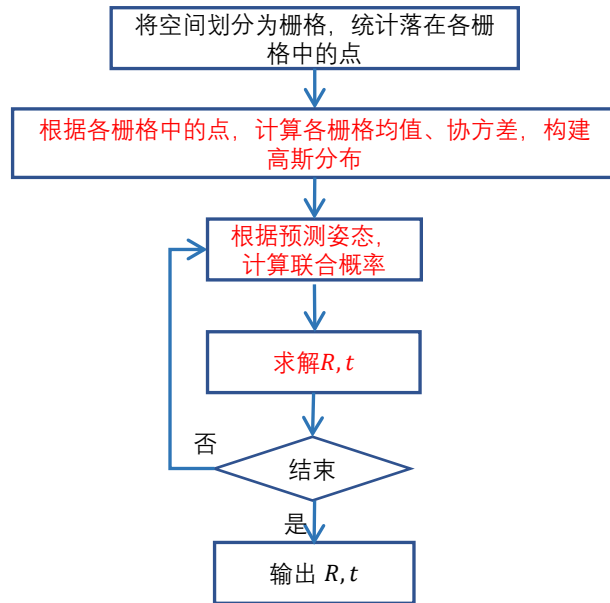
$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{N_x}\}$$

$$Y = \{u_1, u_2, \dots, u_{N_y}\}$$

目标:  $\max \Psi = \max \prod_{i=1}^{N_y} f(X, T(p, y_i))$

2D模型:  $p = p_3 = [t_x \ t_y \ \phi_z]^T$

3D模型:  $p = p_6 = [t_x \ t_y \ t_z \ \phi_x \ \phi_y \ \phi_z]^T$





## NDT原理

- ❑ NDT(Normal-Distributions Transform)算法与ICP算法一样是点云配准中常用的经典算法之一，其鲁棒性较好，计算代价和存储量较小，因此常用于自动驾驶定位模块中。
- ❑ 值得注意的是，Apollo内部并没有直接重写NDT算法，而是调用了PCL库中NDT配准算法的接口。PCL-NDT算法源于2009年Martin Magnusson 的博士论文，链接：

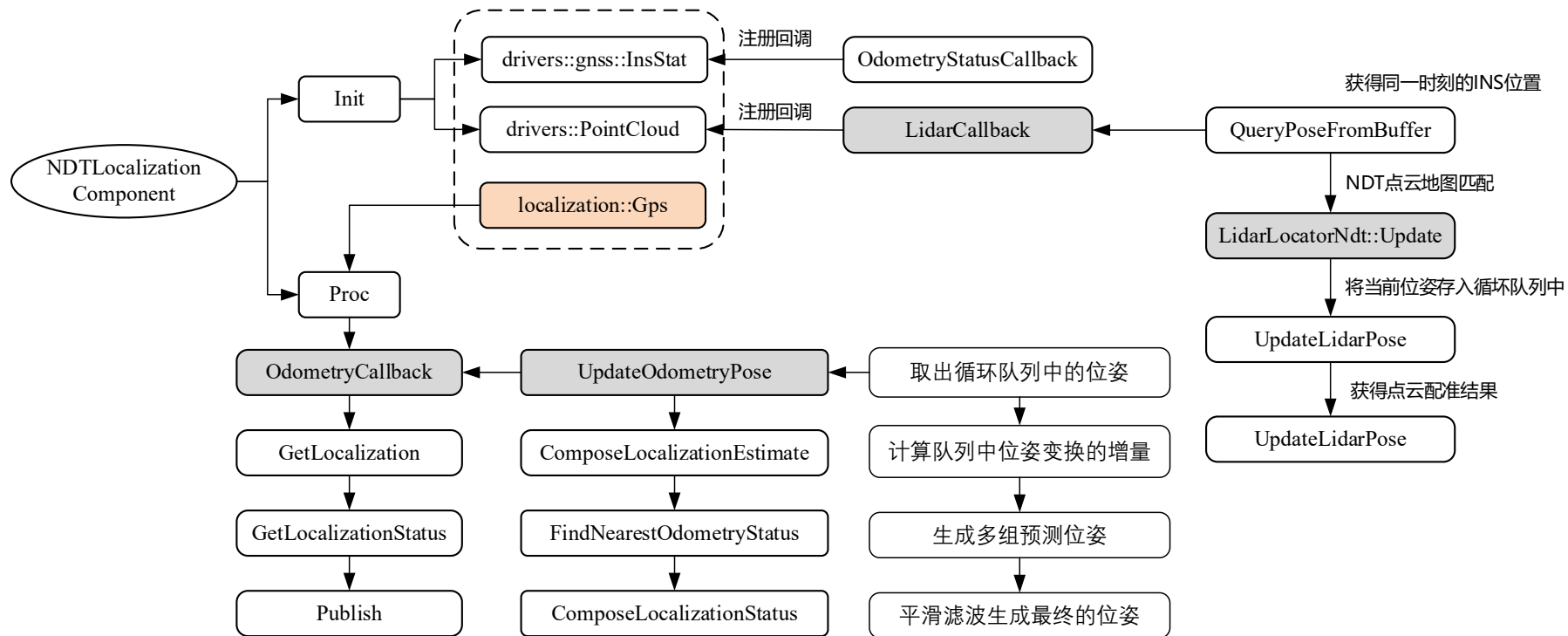
[www.divaportal.org/smash/get/diva2:276162/FULLTEXT02.pdf](http://www.divaportal.org/smash/get/diva2:276162/FULLTEXT02.pdf)

### 算法参数调整

- ndt\_max\_iterations：NDT匹配迭代优化的NDT最大迭代
- online\_resolution：在线点云的在线分辨率
- ndt\_target\_resolution：目标分辨率的NDT目标分辨率
- ndt\_line\_search\_step\_size：搜索迭代步长的NDT线搜索步长（More-Thuente线性搜索方法）
- ndt\_transformation\_epsilon：设置NDT迭代收敛阈值，即迭代增量的大小，阈值越小，迭代次数越多



# NDT算法框架





## NDT算法输入和输出

### ❑ 输入包含以下通道：

/apollo/sensor/lidar16/compensator/PointCloud2: 去畸变后的补偿点云；

/apollo/sensor/gnss/ins\_stat: 组合惯导的定位状态；

/apollo/sensor/gnss/odometry: 组合惯导的位姿和线速度；

预加载的定位地图（ndt\_map）及相关配置文件

### ❑ 输出包含以下通道：

/apollo/localization/pose: 融合定位的结果。包含utm坐标系下的位置，朝向，线速度，heading角；

/apollo/localization/ndt\_lidar: 激光里程计定位的结果；

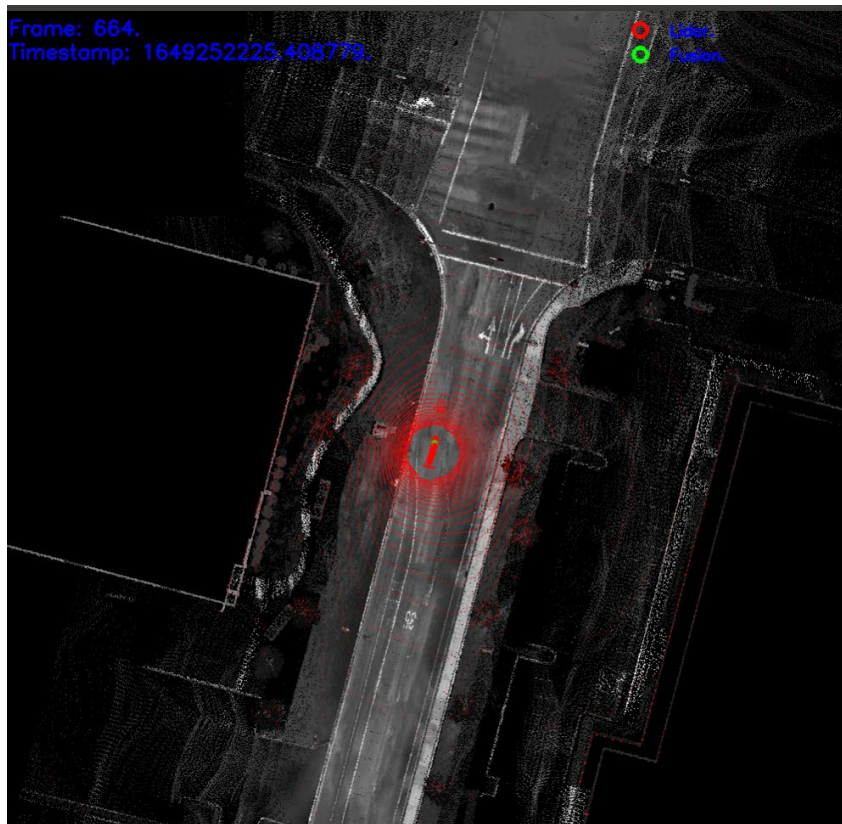
/apollo/localization/msf\_status: 最终的定位状态；

/tf: 增加了基坐标为world，子坐标为localization的坐标变换。





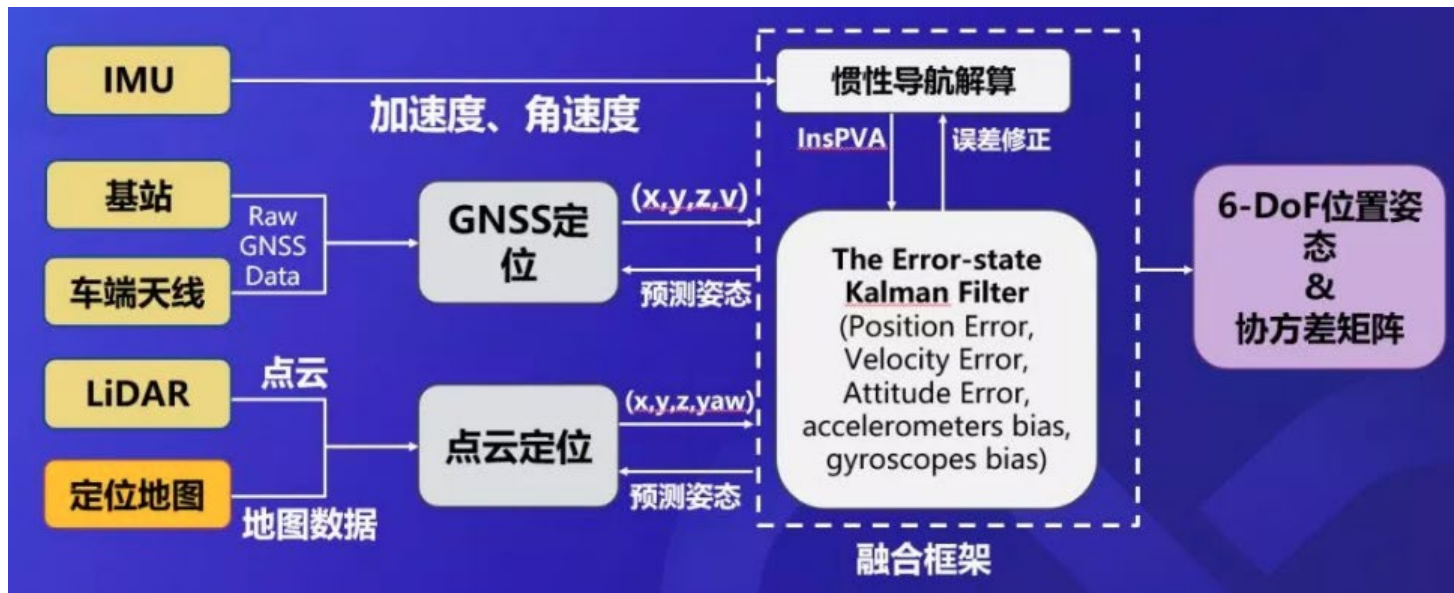
## NDT算法运行效果





## MSF定位

### □ MSF多传感器融合定位框架



Guowei Wan, Xiaolong Yang, Renlan Cai, Hao Li, Yao Zhou, Hao Wang, Shiyu Song. "Robust and Precise Vehicle Localization Based on Multi-Sensor Fusion in Diverse City Scenes," 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Brisbane, QLD, 2018, pp. 4670-4677.  
doi: 10.1109/ICRA.2018.8461224. [link](<https://ieeexplore.ieee.org/document/8461224>)

[https://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz=MzI1NjkxOTMyNQ==&mid=2247484445&idx=1&sn=9f5788fa3cbf8a9807151bcc3cc03e00&scene=19&exportkey=AdrO%2Bb8i7LnD%2BHecRuo%2F%2F%2B8%3D&acctmode=0&pass\\_ticket=VlurvqVg9Vd2n3hli%2BXDo5wv3x97RbGvImPQ5xVC0grgSrLeW4CRmEORCzqX%2B42H&wx\\_header=0](https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzI1NjkxOTMyNQ==&mid=2247484445&idx=1&sn=9f5788fa3cbf8a9807151bcc3cc03e00&scene=19&exportkey=AdrO%2Bb8i7LnD%2BHecRuo%2F%2F%2B8%3D&acctmode=0&pass_ticket=VlurvqVg9Vd2n3hli%2BXDo5wv3x97RbGvImPQ5xVC0grgSrLeW4CRmEORCzqX%2B42H&wx_header=0)

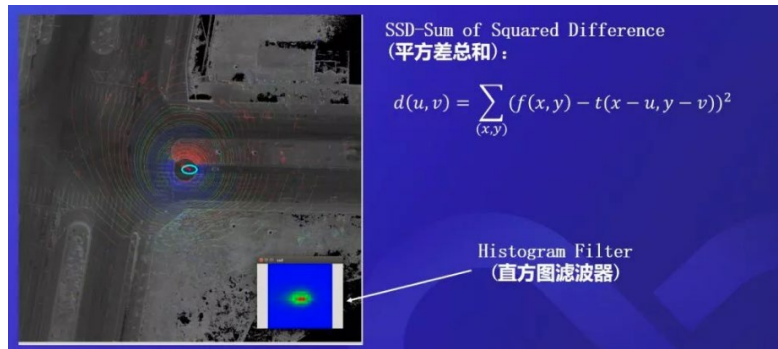


## MSF定位

- msf的激光定位基于直方图滤波器，它把每个激光点的反射值或者高度值和定位地图对应值相减，然后把差的平方加起来，每个度量值越小说明位置匹配的越好，之后采用优化的方法求得最终位姿。



激光点云定位算法框架

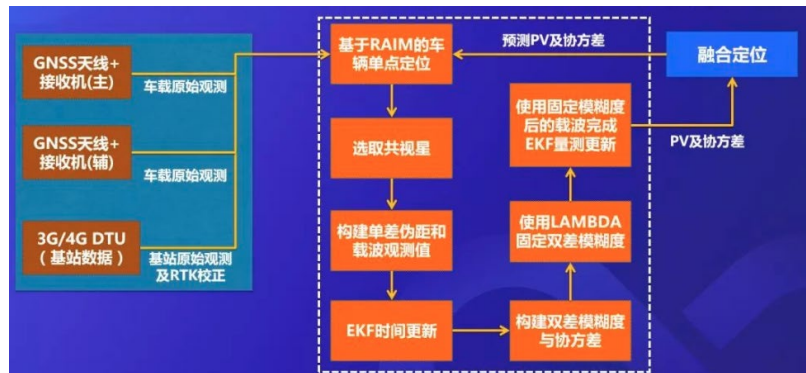


基于Histogram Filter的激光点云定位

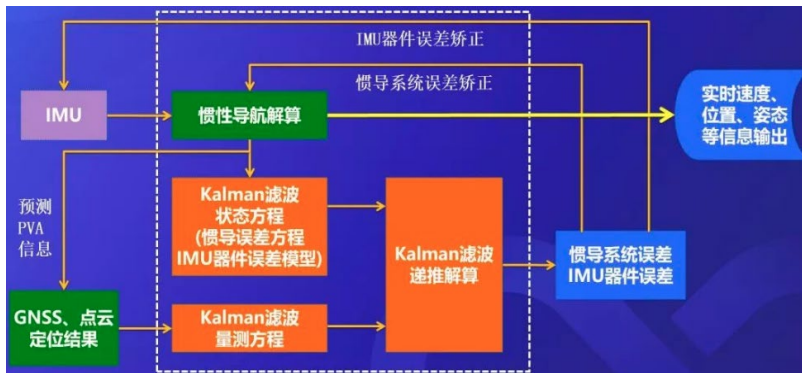


## MSF定位

- ❑ MSF使用松耦合的方式把惯性导航解算、GNSS定位、点云定位三个子模块融合在一起。使用误差状态卡尔曼滤波器，惯性导航解算的结果用于kalman滤波器的预测；而GNSS、点云定位结果用于kalman滤波器的量测更新。



GNSS-RTK定位流程图



基于Kalman滤波器的松耦合

感谢聆听



Thanks for Listening