○ 第3章 自动驾驶汽车技术架构

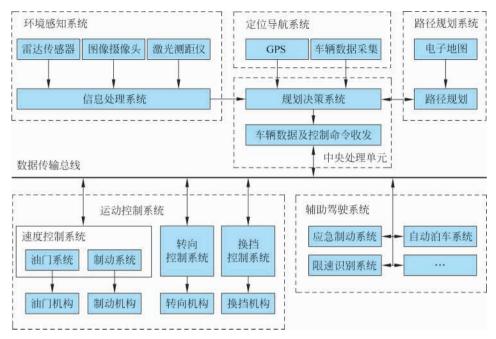
3.1 自动驾驶汽车整体架构

汽车自动驾驶技术,是依靠计算机与人工智能技术在没有人为操纵的情况下,完成完整、安全、有效的驾驶的一项前沿科技。在 21 世纪,由于汽车用户的不断增加,公路交通面临的拥堵、安全事故多发等问题越发严重。自动驾驶技术在车联网技术和人工智能技术的支持下,能够协调出行路线与规划时间,从而大幅度提高出行效率,并在一定程度上减少能源消耗。自动驾驶汽车同时还能减少醉驾、疲劳驾驶等安全隐患,减少驾驶员失误,提升安全性。自动驾驶技术也因此成为世界各国近年来的一项研发重点。

自动驾驶系统是一个复杂的系统。为了实现从 A 地到 B 地的驾驶过程,在无人车的实际使用中,需要无人驾驶系统完成感知、决策、控制 3 大任务。第 1 章的"自动驾驶技术与行业发展现状"一节对这 3 大任务进行了简要描述,本章就对这 3 大任务的 3 个主要系统模块进行详细介绍,这 3 个模块分别是环境感知系统、定位导航系统和路径规划系统,如图 3.1 所示。第 4 章介绍自动驾驶汽车的运动控制系统。

实现自动驾驶的首要条件,是通过"看"与"听"来感知汽车周围的环境情况。感知系统依赖来自于传感器的大量数据,进而实现对车辆运动、环境,以及驾驶员状态行为的感知与监测。自动驾驶感知系统用到了各种各样的传感器,包括摄像头、毫米波雷达、激光雷达、超声波雷达、红外夜视,以及用于定位和导航的 GNSS(全球导航卫星系统)和 IMU(惯性测量单元)。还有一类技术虽然不是主动式的探测元件,但是属于协同式的全局数据辅助,可以扩展智能车的环境感知能力,在感知系统中同样扮演着不可或缺的角色。这些技术包括高精地图、V2X 车联网等。每种类型的感知技术都有自己的优势和弊端,它们互相进行充分的信息融合,最终形成全面可靠的感知数据供决策与控制系统使用。

自动驾驶决策系统是人工智能大展身手的舞台。和人类驾驶员一样,机器在做驾驶决策时需要回答几个问题:我在哪里?周边环境如何?接下来会发生什么?我该做什么?决策系统要做的事情具体来说分为两



■图 3.1 自动驾驶系统技术架构

步,第一步是认知理解,根据感知系统收集的信息,对车辆自身进行精确定位和对车辆周围 环境进行准确理解。第二步是决策规划,主要是对接下来可能发生情况的准确预测,对下一 步行动的准确判断和规划,并选择合理的路径达到目标。通过这两步,无人车就能自主产生 安全、合理的驾驶行为,指导运动控制系统对车辆进行控制。行为决策系统是狭义的决策系统,其根据感知层的输出信息合理决策当前车辆的行为,并根据不同的行为确定轨迹规划的 约束条件,指导轨迹规划模块规划出合适的路径、车速等信息,并发送给控制层。

自动驾驶系统最终要借助对车辆的控制达到自动驾驶的目的。控制系统是自动驾驶系统的双手,负责将决策和规划落实为切实的行为。随着人们对技术要求的不断提高,真正的自动驾驶必须要将决策控制系统与车辆底层控制系统深度集成,通过线控技术完成执行机构的电控化,达到电子制动、电子驱动和电子转向,并控制车辆响应,保证控制精度,对目标车速、路径等进行跟踪。

本章主要介绍感知系统中常用的感知技术及其原理、定位系统、高精地图以及 V2X 技术的相关知识,同时介绍规划决策系统的相关技术与算法。

3.2 环境感知传感器技术

感知、决策、控制是自动驾驶的3个环节,感知环节采集周围环境的基本信息,也是自动驾驶的基础。自动驾驶汽车通过传感器来感知环境,所用到的传感器主要包括摄像头、毫米波雷达和激光雷达。表3.1列出现有的多种传感器在远距离测量能力、分辨率、温度适应性等诸多无人驾驶关键特性上的性能表现。对比可见,不同传感器各有优劣,很难在使用单传感器的情况下实现对无人驾驶功能性与安全性的全面覆盖,说明在感知系统中采用多传感

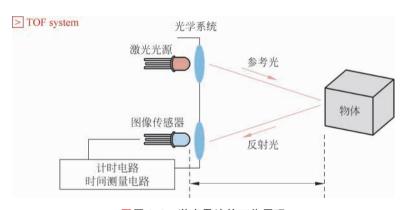
器融合技术是必要的。本节分别介绍几种常见环境感知传感器,并给出一个环境感知的实例供读者参考。

	激光雷达	毫米波雷达	摄像头	GNSS/IMU
远距离测量能力	优	优	优	优
分辨率	良	优	优	优
低误报率	良	优	一般	优
温度适应性	优	优	优	优
不良天气适应性	较差	优	较差	优
灰尘/潮湿适应性	较差	优	较差	较差
低成本硬件	较差	优	优	良
低成本信号处理	较差	优	较差	良

表 3.1 环境感知系统采用的传感器的优缺点对比

3.2.1 激光雷达

激光雷达又称光学雷达(Light Detection And Ranging, LiDAR),是一种先进的光学遥感技术,它首先向目标发射一束激光,然后根据接收反射激光的时间间隔确定目标物体的实际距离,如图 3.2 所示。同时结合这束激光的发射角度,利用简单的三角函数原理推导出目标的位置信息。由于激光具有能量密度高、方向性好的特点,大多数激光雷达的探测距离达到 100m 以上。与传统雷达使用不可见的无线电波不同,激光雷达的探测介质是激光射线,使用的波长集中在 600~1000nm 之间,远低于传统雷达的波长。因为雷达具有波长越短探测精度越高的特点,故激光雷达可以用于测量物体距离和表面形状,其测量精度可达厘米级。



■图 3.2 激光雷达的工作原理

LiDAR 系统一般分为 3 个组成部件,分别是激光发射器、扫描与光学部件、感光部件。激光发射器发射波长在 $600\sim1000$ nm 的激光用于探测环境和物体。扫描与光学元件,主要用于收集发射点与反射点之间的距离,以及反射时间和水平角度。感光部件用于检测反射回来光线的强度。通过这 3 个部件的工作,激光雷达实现对目标的探测,检测的每一个点均包含点的位置信息(空间坐标 x,y,z)及返回光线的强度信息。光线强度除了与发射光强

度和光线大气通过率有关外,主要与被测物体的表面光反射率直接相关,因此通过检测光强度也可以对被测物体的表面反射率有大概判断。

在无人驾驶汽车行驶过程中,LiDAR 系统并不是静止不动的,而是随着车辆移动以相对于汽车的稳定角速度转动,同时不断向周围发射激光并探测周围的物体,记录下反射点信息,以便得到无人驾驶汽车四周全方位的环境信息。LiDAR 在收集反射点距离的过程中也同时记录实时时间数据和水平角度。结合每个激光发射器已知的位置和姿态,可以计算得到所有反射点的坐标。LiDAR 每旋转一周,收集到的所有反射点坐标的集合就构成了点云。

无人驾驶汽车的定位除了接收 GNSS 系统发射回来的数据外,还依赖激光雷达生成的点云与数据库中的高精地图做比较,以得出汽车所在的精确位置,这个精度往往可以达到厘米级别。高精地图并非是指人们日常生活中所用到的数字地图的高精度版本,而是用大量点云拼接而成的大范围道路环境信息。高精地图的绘制同样依赖 LiDAR 的应用,数据采集过程主要使用专门搭载高性能 LiDAR 的数据采集车反复行驶于同一路段,收集这一路段的点云数据。后期通过人工进行修饰与更改,剔除一些错误的不应保留的信息,例如移动中的行人与车辆,或其他与道路环境无关的物体所反射的点云数据,再经过多次对齐与加工修饰,最终拼接成完整的高精地图。

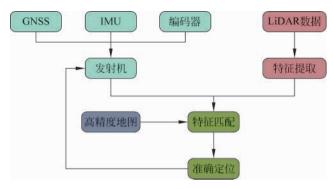
利用 LiDAR 可以帮助无人车精准定位。利用以下简化的概率模型:已知 t_0 时刻的 GNSS 信息, t_0 时刻的点云信息,以及 t_1 时刻无人车可能位于的 3 个位置 P_1 、 P_2 、 P_3 (为了简化问题,假设无人车会在这 3 个位置中的某一个),求 t_1 时刻车在这 3 点的概率。根据贝叶斯法则,无人车的位置的概率公式为:

$$P(X_t) \approx P(Z_t \mid X_t) \cdot \overline{P(X_t)}$$

右侧第一项 $P(Z_i|X_i)$ 表示给定当前位置,观测到点云信息的概率分布。其计算方式一般分为局部估计和全局估计两种。局部估计较简单的做法就是通过当前时刻点云和上一时刻点云的匹配,借助几何推导估计无人车在当前位置的可能性。全局估计就是利用当前时刻的点云和高精地图做匹配,可以得到当前车在地图上的位置。实际情况是两种方法往往结合使用。 $\overline{P(X_i)}$ 代表对当前位置的预测的概率分布,这里可以使用 GNSS 给出的位置坐标作为预测。通过计算 P_1 、 P_2 、 P_3 3 个点的后验概率,可以估计出无人车在哪一个位置的可能性最高。通过对两个概率分布相乘,可以很大程度上提高无人车定位的精度。

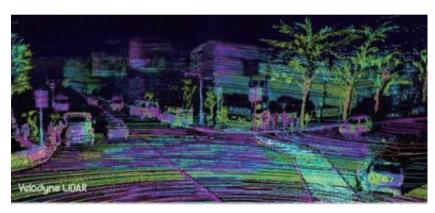
激光雷达还可以联合 GNSS/IMU 与高精地图等手段进行加强定位,一方面通过 GNSS 得到初始位置信息,再通过 IMU 和车辆的 Encoder(编码器)配合得到车辆的初始位置;另一方面,将激光雷达的 3D点云数据,包括几何信息和语义信息进行特征提取,并结合车辆初始位置进行空间变化,获取基于全局坐标系下的矢量特征。最后,将初始位置信息,激光雷达提取的特征跟高精地图的特征信息进行匹配,从而获取一个准确的定位,如图 3.3 所示。

在障碍物检测方面,机器视觉中一个较难解决的问题是判断物体距离。基于单一摄像头抓取的二维图像无法得到准确的位置信息,而基于多摄像头合成的方法又需要实时处理很大的计算量,难以满足无人车实时性的要求。此外,光学摄像头在光线不好的条件下(黑夜或昏暗的隧道内)性能很差,抓取的图像难以使用。而LiDAR生成的点云可以在很大程度上避免摄像头的上述问题。借助LiDAR本身的特性可以很好地探测反射障碍物的远



■图 3.3 激光雷达定位示意图

近、大小,甚至表面形状,有利于障碍物检测准确性的提高,而且在算法方面比起机器视觉算法来也比较简单,更适合无人车的需求。图 3.4 所示为激光雷达生成的点云图。



■图 3.4 激光雷达生成的点云图

不过,LiDAR 也不是一种完美的技术手段,它同样存在很多不足,面临更多挑战。其中有些问题对于 LiDAR 在无人车产业化上的应用可能是致命的。首先,LiDAR 的使用会受天气影响。空气中的水珠以及其他悬浮物都会对 LiDAR 的精度造成影响。实验表明,随着雨量的增大,LiDAR 的最远探测距离会线性下降。其次,激光雷达在使用过程中时刻都在产生海量的点云数据,即使是 16 线的 LiDAR 每秒钟要处理的数据点也达到了 30 万个,64 线的型号每秒产生的点数甚至超过 200 万个。LiDAR 给出的原始数据只是反射物体的距离信息,需要对所有的点进行几何变换,且在后期处理中也要进行大量的坐标系转换等工作,这些对计算硬件(CPU、GPU、FPGA等)提出了很高的要求。最后,LiDAR 系统的造价还十分昂贵,较便宜的 16 线 LiDAR 售价也接近一万美元,这无疑将大大推高无人驾驶汽车的成本,不利于无人驾驶技术产业化。

3.2.2 摄像头

车载摄像头的工作原理,首先是采集图像,将图像转换为二维数据;然后,对采集的图像进行模式识别,通过图像匹配算法识别行驶过程中的车辆、行人、交通标志等;最后,依据目标物体的运动模式或使用双目定位技术,以估算目标物体与本车的相对距离和相对速度。

相比其他传感器,尽管无人车上配置的摄像头采集的数据量远大于 LiDAR 产生的数据量,但可以获得最接近人眼获取的周围环境信息。同时,现今摄像头技术比较成熟,在无人车上使用成本很低。但是,摄像头作为感知工具同样存在缺点。首先,基于视觉的感知技术受光线、天气影响较大,在恶劣天气和类似于隧道内的昏暗环境中其性能难以得到保障;其次,物体识别基于机器学习资料库,需要的训练样本很大,训练周期长,也难以识别非标准障碍物;此外,由于广角摄像头的边缘畸变,得到的距离准确度较低。

表 3.2 列出了当前摄像头在自动驾驶领域的应用。在无人车上使用的摄像头主要有单目、双目(立体)和环视摄像头 3 种类型。单目摄像头一般安装在前挡风玻璃上方,用于探测车辆前方环境,识别道路、车辆、行人等。先通过图像匹配进行目标识别,再通过目标物体在图像中的大小估算目标距离。这要求对目标物体进行准确识别,然后建立并不断维护一个庞大的样本特征数据库,保证这个数据库包含待识别目标物体的全部特征数据(例如三维尺寸等)。如果缺乏待识别目标物体的特征数据,就无法估算目标物体的距离。因此,单目视觉方案的技术难点主要在于模型用到的机器学习算法的智能程度或者模式识别的精度。

自动驾驶辅助功能	使用摄像头	具体功能简介
车道偏离预警 LDW	前视	当前视摄像头检测到车辆即将偏离车道线时,会发出警报
前向碰撞预警 FCW	前视	当摄像头检测到与前车距离过近,可能发生追尾时,会发出
		警报
交通标志识别 TSR	前视、侧视	识别前方道路两侧的交通标志
车道保持辅助 LKA	前视	当前视摄像头检测到车辆即将偏离车道线时,会向控制中
年担保行拥切 LKA		心发出信息,然后由控制中心发出指令,及时纠正行驶方向
行人碰撞预警 PCW	前视	前摄像头会标记前方道路行人,并在可能发生碰撞时及时
	月月十九	发出警报
盲点监测 BSD	侧视	利用侧视摄像头,将后视镜盲区内的景象显示在驾驶舱内
全景泊车 SVP	前视、侧视、后视	利用车辆四周摄像头获取的影像,通过图像拼接技术,输出
		车辆周边的全景图
泊车辅助 PA	后视	泊车时将车尾的影像显示在驾驶舱内,预测并标记倒车轨
		迹,辅助驾驶员泊车
驾驶员注意力监测	内置	安装在车内,用于检测驾驶员是否疲劳、闭眼等

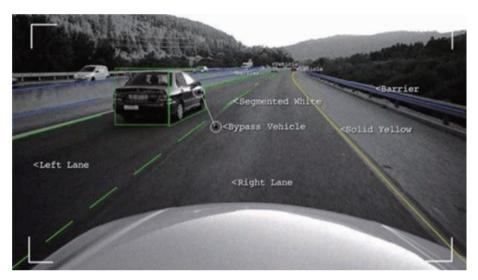
表 3.2 摄像头在自动驾驶领域的应用

双目摄像头是通过对两幅图像视差的计算,直接对前方景物(图像所涉及的范围)进行距离测量,因此无须判断前方出现的物体是什么类型的障碍物,不用像单目摄像头那样建立并维护庞大的样本特征数据库。依靠两个平行布置的摄像头产生的视差,找到同一物体所有的点,依赖精确的三角测距,就能够算出摄像头与前方障碍物的距离,实现更高的识别精度和更远的探测范围。使用这种方案,需要两个摄像头有较高的同步率和采样率,因此技术难点在于双目标定以及双目定位。相比单目,双目的解决方案没有识别率的限制,无须先识别再测量;直接利用视差计算距离精度更高;无须维护样本数据库。双目摄像头的测距精度依赖两个摄像头的安装距离,对安装精度和设备刚性也有较高的要求。在实际的使用过程中,在大部分常见障碍物测距上没有明显的优势。优势在于测距算法不依赖于检测算法,对障碍物类型不依赖。缺点在于处理规则性物体时容易出现错误。因为检测原理上的差

异,双目视觉方案在距离测算上相比单目以及其他感知技术对硬件及计算量的要求都上了一个新台阶,这也是双目视觉方案在应用时的一个难关。

环视摄像头一般至少包含 4 个摄像头,分别安装在汽车的前后左右侧,实现 360°环境感知,难点在干畸变还原与图像之间的对接。

图 3.5 所示为单目摄像头采集图像示意。



■图 3.5 单目摄像头采集图像

根据不同自动驾驶功能的需要,摄像头的安装位置也有所不同,主要分前视、环视、后视、侧视以及内置。实现全部自动驾驶功能至少应安装6个以上的摄像头。前视摄像头一般采取55°左右的镜头得到较远的有效距离,有单目和双目两种解决方案。双目摄像头需要装在两个位置,成本比单目贵一倍左右。环视使用的是广角摄像头,通常在车辆四周装备4个摄像头进行图像拼接形成全景视图,通过辅助算法实现道路感知。后视采用广角或者鱼眼摄像头,主要为倒车后视使用。侧视一般使用两个广角摄像头,完成盲点检测等工作,也可以代替后视镜,侧视功能在某些自动驾驶方案中也可由超声波雷达代替。内置摄像头也使用广角摄像头,安装在汽车内后视镜处,实现驾驶过程中对驾驶员进行监控,及时对驾驶员状况发出提醒。前视摄像头可以实现车道线偏离预警、车辆识别、行人识别、交通标志识别等自动驾驶方案中主动安全的核心功能,未来将成为自动紧急制动(AEB)、自适应巡航(ACC)等主动控制功能的信号人口。这种摄像头安全等级较高,应用范围较广,是目前开发的热点。

车载摄像头需要具备的首要特性是高速采集图像,特别是在高速行驶场合,自动驾驶系统必须能够记录关键驾驶状况,评估这种状况并实时启动相应的措施。在 140km/h 的车速下,汽车每秒要移动 40m 距离,为避免两次图像信息获取间隔期间自动驾驶汽车驶过的距离过长,要求车载摄像头具有不低于 30f/s 的帧率。在汽车制造商的规格中,甚至提出了60f/s 乃至 120f/s 的指标要求。在功能上,车载摄像头需要在复杂的运动路况环境下保证采集到稳定的数据。要求如下。

(1) 高动态范围: 在较暗环境以及明暗差异较大时仍能实现识别,要求摄像头具有高

动态的特性。

- (2) 中低像素: 为了降低对图像处理器的性能要求,摄像头的像素并不需要非常高。目前 30 万~120 万的像素就可以满足要求。
- (3) 角度要求: 对于环视和后视,一般采用 135°以上的广角镜头,前置摄像头对视距要求更大,一般采用 55°范围。

同时,相比工业级与消费机摄像头,车载类型在安全级别上要求更高,尤其是对前置摄像头安全等级要求更高。主要体现在以下几方面。

- (1) 温度要求: 车载摄像头要求能在-40~80℃的环境下工作。
- (2) 防磁抗震: 汽车启动时会产生极高的电磁脉冲,车载摄像头必须具备极高的防磁抗震性能。
 - (3) 较长的使用寿命: 车载摄像头的寿命要求至少满足 8~10 年的稳定工作。

3.2.3 毫米波雷达

毫米波就是电磁波,雷达通过发射无线电信号并接收反射信号来测定车辆与物体间的距离,其频率通常介于10~300GHz之间。与厘米波导引头相比,毫米波导引头体积小、质量轻、空间分辨率高;与红外、激光、电视等光学导引头相比,毫米波导引头穿透雾、烟、灰尘的能力强;另外,毫米波导引头的抗干扰性能也优于其他微波导引头。图 3.6 为毫米波雷达工作示意图。

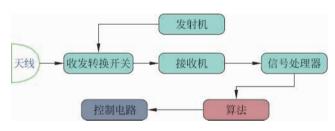


■图 3.6 毫米波雷达示意图

毫米波工作频率为 30~300GHz,波长为 1~10mm,介于厘米波与光波之间,因此毫米 波兼有微波制导和光电制导的优点。雷达测量的是反射信号的频率转变,进而推测其速度 变化。毫米波雷达可以检测 30~100m 远的物体,高性能毫米波雷达可以探测更远的物体。同时,毫米波雷达不受天气的影响,即使是最恶劣的天气和光照条件下也能正常工作,穿透 烟雾的能力很强。毫米波雷达具有全天候、全天时的工作特性,且探测距离远、探测精度高,被广泛应用于车载距离探测,如自适应巡航、碰撞预警、盲区探测、自动紧急制动等。

毫米波雷达的测距和测速原理都是基于多普勒效应,其采集的原始数据基于极坐标系(距离+角度)。其工作时,振荡器会产生一个频率随时间逐渐增加的信号,这个信号遇到障碍物之后,会反射回来,其时延为2倍的距离除以光速。返回的波形和发出的波形之间有频率差,这个频率差是呈线性关系的:物体越远,返回的波收到得越晚,那么它跟入射波的频率差值就越大。将这两个频率做一个减法,就可以得到二者频率的差拍频率,通过判断差拍频率的高低就可以判断障碍物的距离。

在自动驾驶汽车领域,车载毫米波雷达通过天线发射毫米波,接收目标反射信号,经后台处理后快速准确地获取汽车车身周围的物理环境信息(如汽车与其他物体之间的相对距离、相对速度、角度、运动方向等),然后根据所探知的物体信息进行目标追踪和识别分类,进而结合车身动态信息和其他传感器接收的信息进行数据融合,通过中央处理单元(ECU)进行智能处理,经合理决策后,及时对汽车运动执行控制,从而实现自动驾驶。图 3.7 为毫米波雷达工作原理图。



■图 3.7 毫米波雷达工作原理

相比激光雷达,毫米波雷达精度低、可视范围角度偏小,一般需要多个雷达组合使用。毫米波雷达传输的是不可见的电磁波,因此它无法检测上过漆的木头或是塑料,行人的反射波也较弱。同时,毫米波雷达对金属表面非常敏感,一个弯曲的金属表面会被误认为是一个面积很大的表面。因此,马路上的一个小小的易拉罐甚至也可能被毫米波雷达判断为很大的路障。此外,毫米波雷达在隧道里的效果同样不佳。

毫米波雷达的可用频段有 24GHz、60GHz、77GHz 和 79GHz,主流使用 24GHz 和 77GHz 频段,分别用于中短距离和中长距离探测。相比于 24GHz 频段,77GHz 毫米波雷达物体探测分辨率可以提高 $2\sim4$ 倍,测速和测距精度提高 $3\sim5$ 倍,能检测行人和自行车,且设备体积更小,更方便在无人驾驶汽车上部署。因此频段发展趋势是逐渐由 24GHz 向 77GHz 过渡的。

1997年,欧洲电信标准学会确认 76~77GHz 作为防撞雷达专用频道。早在 2005年,原信息产业部发布要求,将 77GHz 频段划分给车辆测距雷达。2012年,工信部又将 24GHz 划分给短距车载雷达。2015年,日内瓦世界无线电通信大会将 77.5~78.0GHz 频段划分给无线电定位业务,以支持短距高分辨率车载雷达的发展,从而使 76~81GHz 都可用于车载雷达,为全球车载毫米波雷达的频率统一指明了方向。最终,车载毫米波雷达将会统一于77GHz 频段(76~81GHz),该频段带宽更大,功率水平更高,探测距离更远。

毫米波雷达的主要问题是存在互相干扰的可能。频率不同的电磁波在传输过程中相互独立,但是频率相近的电磁波却会互相叠加,使信号劣化。调频连续波雷达本身不能免疫干扰。随着道路上装载毫米波雷达的车辆增加,相似频段的雷达信号也随之增加,雷达之间的干扰不可避免。干扰信号可以通过直线传播直接干扰,也可以经过物体反射从而间接干扰。

这样的结果是大大降低了信号的信噪比,甚至会导致雷达"致盲"。

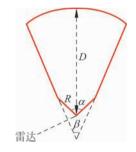
3.2.4 超声波雷达

超声波雷达,是通过发射并接收 40kHz 的超声波,根据时间差算出障碍物距离。其测距精度是 1~3cm。常见的超声波雷达有两种:第一种是安装在汽车前后保险杠上的,用于测量汽车前后障碍物的驻车雷达或倒车雷达,称为超声波驻车辅助传感器(Ultrasonic Parking Assistant, UPA);第二种是安装在汽车侧面,用于测量侧方障碍物距离的超声波雷达,称为自动泊车辅助传感器(Automatic Parking Assistant, APA)。

采用超声波雷达测距时,超声波发射器先向外面某一个方向发射出超声波信号,在发射超声波的同时开始计时,超声波通过空气进行传播,传播途中遇到障碍物就会立刻反射回来,超声波接收器在接收到反射波时立即停止计时。计时器通过记录时间,就可以测算出从发射点到障碍物之间的距离。在空气中超声波的传播速度一般为340m/s,计时器通过记录

时间 t,就可以测算出从发射点到障碍物之间的距离长度 s,即:s=340t/2。

超声波雷达的工作原理可用图 3.8 的数学模型来表示,其中 α 为超声波雷达的探测角,一般 UPA 的探测角为 120° 左右,APA 的探测角较小,为 80° 左右; β 为超声波雷达检测宽度范围的影响元素之一,该角度一般较小。一般 UPA 的 β 为 20° 左右,APA 的 β 较为特殊,为 0° ;R 也是超声波雷达检测宽度范围的影响元素之一,UPA 和 APA 的 R 值差别不大,都在 0.6 m 左右;D 是超声波雷达的最大量程。 UPA 的最大量程为 2.5 m,APA 的最大量程至少是 5 m,目前已有超过 7 m 的 APA 雷达投入应用。



■图 3.8 超声波雷达 数学模型

超声波雷达具有诸多优点。超声波能量消耗较为缓慢,防水、防尘性能好,传播距离较远,穿透性强,测距方法简单,成本低,且不受光线条件的影响。尤其是在短距离测量中,超声波雷达测距有着非常大的优势。但是,超声波是一种机械波,使得超声波雷达有着根源性的局限性。

(1) 对温度敏感。超声波雷达的波速受温度影响,近似关系为:

$$C = C_0 + 0.607 \times T$$

其中, C_0 为零度时的波速,为 332m/s,T 为温度(单位: \mathbb{C})。波速受温度影响,因此测量的精度也与温度直接相关。传播速度较慢时,若汽车行驶速度较快,使用超声波测距无法跟上汽车车距的实时变化,误差较大。

(2) 超声波散射角大,方向性较差,无法精确描述障碍物位置。在测量较远距离的目标时,其回波信号较弱。

超声波雷达在自动驾驶汽车上主要用于泊车系统、辅助刹车等。通常一套倒车雷达需要安装 4 个 UPA 传感器,而自动泊车系统是在倒车雷达的基础上再加 4 个 UPA 传感器和 4 个 APA 传感器。UPA 超声波传感器的探测距离一般在 15~250cm 之间,主要用于测量汽车前后方向的障碍物。APA 超声波传感器的探测距离一般在 30~500cm 之间,探测范围更远,因此相比于 UPA 成本更高,功率也更大。APA 传感器与倒车雷达工作频率不同,

不形成干扰。

超声波雷达的基础应用是倒车辅助。在这个过程中,超声波传感器通常需要同控制器和显示器结合使用,从而以声音或者更直观的显示方式告知驾驶员周围障碍物的情况,解除驾驶员泊车、倒车和启动车辆时前后左右探视引起的困扰,并帮助驾驶员扫除视野死角和视线模糊的缺陷,提高驾驶安全性。除障碍物检测外,超声波雷达还有许多应用场景,例如泊车位检测、高速横向辅助等。泊车位检测是自动泊车系统的第一步,主要依赖安装在车辆侧方的 APA 传感器。在汽车缓缓驶过停车位时,如图 3.9 所示,汽车侧方的 APA 传感器会得到一个探测距离与时间的关系,然后可以计算得到停车位的近似长度。当检测的停车位长度大于汽车泊入所需的最短长度时则认为当前空间有车位。超声波雷达还可应用于高速横向辅助,特斯拉 Model S 车型是一个很好的例子。特斯拉 Model S 在行驶过程中,如果左后方有车辆渐渐驶近,在离本车距离较近时,Model S 在确保右侧有足够空间的情况下,会自主向右微调,降低与左侧车辆的碰撞风险。目前大部分车型搭载的超声波雷达都是倒车雷达 UPA,而随着自动驾驶技术的不断推进,基于超声波的自动泊车功能逐渐进入大众视野,APA 的市场也会逐渐打开。



■图 3.9 自动泊车示意图

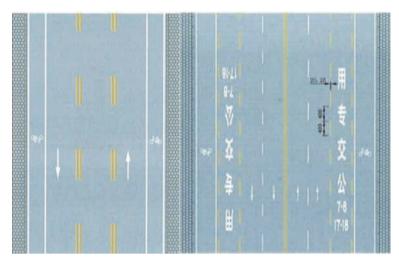
3.2.5 环境感知实例——车道线检测

车道线是用来管制和引导交通的一种标线,由标划于路面上的线条、箭头、文字、标记和轮廓标示等组成。根据《道路交通标志和标线》(GB 5768—1999)国家标准规定,我国的道路交通标线分为指示标线、禁止标线和警告标线。图 3.10 为实际道路车道线示意图。

车道线检测是智能车辆辅助驾驶系统中必不可少的环节,快速准确地检测车道线在协助自动驾驶路径规划和偏移预警等方面尤为重要。目前较为常见的车道线检测方案主要是基于摄像头及传统计算机视觉的检测,同时随着自动驾驶技术的逐步发展,基于激光雷达等高精设备的车道线检测算法也被提出。

1. 基于摄像头及机器视觉的车道线检测

传统计算机视觉的车道线检测主要依赖于高度定义化的手工特征提取和启发式的方法。国内外广泛使用的检测方法主要分为基于道路特征和道路模型两种方法。基于道路特

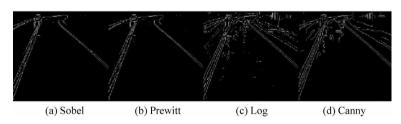


■图 3.10 实际道路车道线示意

征的检测方法主要利用车道线与道路之间的物理结构差异对图像进行后续的分割和处理,突出道路特征,实现车道线检测;基于道路模型的检测方法主要利用不同的道路图像模型(直线、抛物线、复合型),对模型中的参数进行估计与确定,最终与车道线进行拟合。

基于道路特征的检测方法根据提取特征的不同,可以进一步分为基于颜色特征、纹理特征和多特征融合的检测方法。这里介绍基于颜色特征的检测方法。

颜色特征提取又分为基于灰度和基于色彩特征的提取方法。基于灰度特征的检测方法主要通过提取图像的灰度特征来检测道路边界和道路标志。可以通过直接采集灰度图进行处理,也可以通过图像转换将原始图像转为灰度图。在车道图像中,路面与车道线交汇处的灰度值变化较剧烈,可以利用边缘增强算子突出图像的局部边缘,定义像素的边缘强度,通过设置阈值的方法提取边缘点。常用的算子有微分算子、拉普拉斯算子和 Canny 算子,如图 3.11 所示。



■图 3.11 不同算子的提取效果对比

这种基于特征提取进行车道线检测的方法结构简单,应用广泛。缺点是当光照强烈、有 大量异物遮挡、道路结构复杂、车道线较为模糊时,检测效果会受到较大影响。

基于彩色特征的检测方法主要通过提取图像的彩色特征来检测道路边界和道路标志,主要涉及颜色空间的选择和分割策略选取两方面。颜色空间是由一组数值用来描述图像信息的抽象模型,通常为三四个数字,常用的颜色空间主要有 RGB 空间、HSI 空间和 CIE L*a*b*空间等。在不同的颜色空间中,车道线和道路有着各自的特性,通过分析彩色信息的空间分布,可以利用分割策略对车道线进行检测。通常用于车道线检测的分割策略为阈值

分割和色彩聚类两种方法。

由于色彩信息对于图像或图像区域的大小、方向等特征变化不敏感,所以对于局部特征,利用彩色信息不能有效地进行捕捉。所以仅利用彩色特征的方法往往会将大量不必要的图像检测出来。

基于道路模型的检测方法中,道路的几何模型大体分为两种:直线和曲线。直线模型 计算简单,是最常用的道路模型,而曲线模型由于较为复杂,所以根据不同的情况有多种多 样的模型,不同模型的计算复杂度也存在差异。本节主要介绍直线模型和双曲线模型在车 道线检测中的实现。

直线模型主要建立在车道线为直线模型的基础上,直线模型的数学表达式如下:

$$u = k \times (v - h) + b$$

其中 u,v 分别代表道路图像的横、纵坐标,k 代表斜率,b 为截距,h 代表道路消失线在图中的纵坐标。得到了道路消失线的水平位置后,只要得到 k 和 b 就可以确定车道线在图像中的位置。在车辆行驶速度不高,并且道路弯曲曲率不大的情况下,可以有较好的识别效果。

直线模型虽然实时性较好,但对曲线道路的识别精度较差; 抛物线模型在车道直线与曲线连接处连续性不好,标识线容易偏离; 样条曲线模型过于复杂,计算量大、实时性不高。

针对一些车道线检测算法识别率不高、弯道检测不准确的问题,基于双曲线模型的车道 线检测算法首先运用 Canny 算子对道路边缘进行检测;采用 Hough 变换提取道路边界点, 并使用扩展的 Kalman 滤波进行预测跟踪来减小道路扫描范围;最后通过左右车道边界参数与双曲线模型参数进行匹配,用最小二乘法来求解模型参数,完成车道边界重建。

2. 基于激光雷达的车道线检测

基于传统视觉的方法存在诸多缺陷:对光照敏感、依赖于完整并且较为统一的车道线标志、有效采样点不足以及车道线被水覆盖时视觉系统会失效等。近年来,越来越多的研究者将目光投向了用激光雷达进行车道线检测。激光雷达的有效距离比传统视觉方法高,有效采样点多,并且可以穿透水面,具有突出的性能优势。本节主要介绍几种基于激光雷达的车道线检测方法。

(1)基于反射强度信息的方法。该方法主要基于激光雷达反射强度信息形成的灰度图,或者根据强度信息与高程信息配合,过滤出无效信息,然后对车道线进行拟合。

表 3.3 显示不同物体对于激光的反射强度,根据反射强度值进行车道线检测的算法可在车载激光雷达获取的道路周围环境点云数据中轻松区分出道路与车道线。回波强度值没有单位,值在 0~255 之间,数字越大反射率越高。

介质	回波强度值	可能的地物分类
特性涂层	12~30	车道标线
沥青、混凝土	5~8	道路、房屋
植被、金属	$45 \sim 150$	灌木丛、车辆

表 3.3 不同物体的回波强度

(2) 基于 SLAM 与高精地图结合的方法。SLAM 是 Simultaneous Localization and Mapping 的缩写,意为"即时定位与地图构建"。它是指运动物体根据传感器的信息,一边计算自身位置,一边构建环境地图的过程。由于传感器种类和安装方式的不同,SLAM 的实

现方式和难度会有很大差异。按传感器来分,SLAM 主要分为激光、视觉两大类。

利用激光雷达的点云进行车道线、交通标志、路标的初步定位,然后对比高精地图进行 回归,可以实时进行车道线的检测,并且可以对车辆进行定位。

3.3 定位系统

车辆定位是让无人驾驶汽车获取自身确切位置的技术,在自动驾驶技术中定位担负着相当重要的职责。车辆自身定位信息获取的方式多样,涉及多种传感器类型与相关技术,本节将从卫星定位、差分定位、惯性导航定位及多传感器融合定位几个方面进行介绍。

3.3.1 卫星定位技术

在任何驾驶条件下,自动驾驶车辆均依赖于两种信息:汽车位置和汽车行驶的速度,收集这些信息需要整合多种复杂技术,其中 GNSS(Global Navigation Satellite System,全球导航卫星系统)起到主要作用。当自动驾驶汽车拥有高精度位置信息之后,可以跟高精地图进行匹配,从而提供良好的导航功能。GNSS 系统也能为车载传感器的时间同步或者导航提供最基础的时空信息。

1. 卫星导航定位系统介绍

卫星导航定位系统是星基无线电导航系统,以人造地球卫星作为导航台,为全球海陆空的各类军民载体提供全天候的、高精度的位置、速度和时间信息,因而又被称作天基定位、导航和授时(PNT)系统。卫星导航定位系统中除了全球卫星导航系统外,还有星基增强系统以及地基增强系统。

1) 全球卫星导航系统

目前世界上著名的卫星导航系统有美国的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、俄罗斯的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)、中国的北斗卫星导航系统(Beidou Navigation Satellite System, BDS)以及欧盟伽利略(Galileo)系统。下面分别简要介绍。

(1) GPS.

GPS 是为了满足军事部门对高精度导航和定位的要求而由美国国防部建立的,能向陆海空 3 大领域提供实时、全天候和全球性的导航服务,并且能够满足情报收集、核爆监测和应急通信等军事要求。

GPS 提供具有全球覆盖、全天时、全天候、连续性等优点的三维导航和定位能力,作为 先进的测量、定位、导航和授时手段,除了在军事上起着举足轻重的作用外,在国家安全、经 济建设和民生发展的各个方面都扮演着重要的角色。

GPS由3部分构成,即空间卫星部分、地面监控部分和用户接收部分。空间卫星部分又称为空间段,21颗GPS工作卫星和3颗在轨备用卫星构成完整的21+3形式的GPS卫星工作星座。这种星座构型能满足在地球上任何地点任何时刻均能观测到至少4颗几何关系较好的卫星来用于定位。地面控制部分又称为地面段,由分布在全球的一个主控站、3个注入站和若干个监测站组成。用户接收部分又称为用户段,接收来自作为基础设施的空间

段和地面段提供的导航、定位和授时服务,这些服务已广泛应用于各个领域。

(2) GLONASS.

GLONASS是苏联建设的导航系统,同样能够为海陆空的民用和军用提供全球范围内的实时、全天候三维连续导航、定位和授时服务。GLONASS也由空间段、地面段、用户段 3 大部分组成,但与 GPS 相比,各部分的具体技术有较大的差异。空间段由 24 颗 GLONASS卫星组成,其中 21 颗为正常工作卫星,3 颗为备份卫星。如果 GLONASS星座完整,则可以满足在地球上任何地点任何时刻都能收到来自至少 4 颗卫星的信号,从而获取可靠的导航定位信息。地面监控部分包括系统控制中心和跟踪控制站网,这些跟踪控制站网分散在俄罗斯所有领土上。用户端能接收卫星发射的导航信号,进而获取需要的位置、速度和时间信息。

(3) BDS.

北斗卫星导航系统是中国正在实施的自主研发、独立运行的全球卫星导航系统,于 2012年12月27日启动区域性导航定位与授时正式服务。由16颗导航卫星组成的北斗二号系统已向我国乃至大部分亚太地区提供服务。截至2018年底,北斗三号基本系统星座部署完成。2018年12月27日开始,北斗开始提供全球范围内的定位与授时服务。

除了与上述导航系统提供的导航、定位、授时功能等相同的服务外,北斗卫星导航系统还具有一项特殊的功能,那就是短报文通信。从北斗系统的组成结构来看,同样分为空间段、地面段和用户段。空间星座部分由 5 颗地球静止轨道(Geostationary Orbit,GEO)卫星和 30 颗非地球静止轨道(Nongeostationary Orbit,NON-GEO)卫星组成,后者包括中圆地球轨道(MEO)卫星和倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星。GEO+NON-GEO+MEO+IGSO 的星座构型是北斗卫星导航系统的完整布局,最大的优点是同样保证了在地球上任意地点任意时刻均能接收来自 4 颗以上导航卫星发射的信号,观测条件良好的地区甚至可以接收到 10 余颗卫星的信号。地面段包括监测站、上行注入站、主控站。用户段组成及功能同前两者基本相同。

(4) Galileo.

Galileo 卫星系统也是一个正在建设中的全球卫星导航系统,欧洲人的目的是摆脱对美国全球定位系统的依赖,打破其垄断。该系统的基本服务免费,但使用高精度定位服务需要付费。Galileo 系统也分为空间段、地面段、用户段 3 大部分。空间段是由分布在 3 个轨道上的 30 颗 MEO 卫星构成,其中 27 颗为工作星,3 颗为备份星。地面段由两个地面操控站、29 个伽利略传感器达到站以及 5 个 S 波段上行站和 10 个 C 波段上行站组成,传感器达到站及上行站均分布于全球。用户段则提供独立于其他卫星导航系统的 5 种基本服务。

除了以上4个全球卫星导航系统外,还有一些其他已完成或正在建设的区域性卫星导航系统,如日本的QZSS、印度的IRNSS等。

2) 星基增强系统

随着全球卫星导航系统应用的不断推广和深入,现有卫星导航系统在定位精度、可用性、完好性等方面还是无法满足一些高端用户的要求。为此,各种卫星导航增强系统(Satellite-Based Augmentation System, SBAS)应运而生。美国的"广域差分增强系统(Wide Area Augmentation System, WAAS)"、俄罗斯的"差分校正与监视系统(SDCM)"、日本的"多功能卫星增强系统(Multi-Functional Satellite Augmentation System, MSAS)"、

欧洲的"导航重叠服务(European Geostationary Navigation Overlay Service, EGONS)"和印度的"GPS 辅助增强导航系统(GAGAN)"这 5 个典型区域性广域差分增强系统也被纳入到 GNSS 中。

SBAS 也主要由空间段、地面段和用户端 3 部分构成。它们作为区域性广域差分增强服务,可以使得单点的卫星定位更稳定、定位精度更高,从而实现 $1\sim3m$ 、1m 甚至优于 1m 的定位服务。

3) 地基增强系统

地基增强系统(Ground-Based Augmentation Systems, GBAS)是卫星导航系统建设中的一项重要内容,可以大大提高系统服务性能。GBAS综合使用了各种不同效果的导航增强技术,主要包括精度增强技术、完好性增强技术、连续性和可用性增强技术,最终实现增强卫星导航服务性能的目的。

我国的地基增强系统主要是北斗地基增强系统,是国家所有的重要信息基础设施,用于提供北斗卫星导航系统增强定位精度和完好性服务。系统由框架网基准站和加强密度网基准站、通信网络、数据处理系统、运营平台、数据播发系统和用户终端组成,具备在全国范围内为用户提供广域实时米级、分米级、厘米级和后处理毫米级定位精度的能力,具有作用范围广、精度高、野外单机作业等优点。

2. 卫星导航定位系统工作原理

GNSS 定位主要解决两个问题:一是观测瞬间卫星的空间位置,二是测量站点卫星之间的距离。空间位置即 GNSS 卫星在某坐标系中的坐标,为此首先要建立适当的坐标系来表征卫星的参考位置,而坐标又往往与时间联系在一起,因此,定位是基于坐标系统和时间系统来进行的。

1) 坐标系统和时间系统

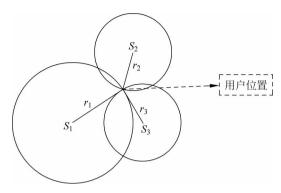
卫星导航系统中,坐标系描述与研究卫星在其轨道上的运动、表达地面观测站的位置和处理 GPS 观测数据。根据应用场合的不同,选用的坐标系也不相同。坐标系统大概分为以下几类:地理坐标系、惯性坐标系、地球坐标系、地心坐标系和参心坐标系。常用的坐标系统有:WGS-84 坐标系、Parametry Zemli 1990 坐标系(PZ-90)、1954 年北京坐标系(P54)、1980 年国家大地坐标系(C80)、2000 国家大地坐标系(CGCS2000)。

时间系统在卫星导航中是最重要、最基本的物理量之一。首先,卫星发送的所有信号都是由高精度的原子钟控制的。其次,大多数卫星导航系统实际上都是通过精确测定信号传播时间来实现距离测量的。时间系统可分为世界时、力学时、原子时、儒略日、卫星导航时间系统等。其中 GPS 系统采用了一个独立的时间系统作为导航定位计算的依据,称为 GPS时间系统(GPST)。GPS时间属于原子时系统,其秒长与原子时秒长相同。

2) 定位原理

GNSS 定位系统利用基本三角定位原理, GNSS 接收装置通过测量无线电信号的传输时间来测量距离。由每颗卫星的所在位置, 和测量得到的每颗卫星与接收装置的距离, 便可以算出接收器所在位置的三维坐标值。使用者至少需收到 3 颗卫星的信号才可确定自身的位置。实际使用中 GNSS 接收装置都是利用 4 个以上的卫星信号来确定使用者所在位置及高度。

分别以3个卫星的位置为圆心,3个卫星距地面某点距离为半径作球面,则球面交点即为地面用户位置,如图3.12所示。



■图 3.12 三角定位原理示意

从上面 GNSS 进行定位的基本原理,可以看出 GNSS 定位方法的实质,即测量学中的空间后方交会。由于 GNSS 采用单程测距,且难以保证卫星时钟与用户接收机时钟的严格同步,观测站和卫星之间的距离均受两种时钟不同步的影响。卫星钟差可用导航电文中所给的有关钟差参数进行修正,而接收机的钟差大多难以精准地确定。所以通常采用的优化做法是把它作为一个未知参数,与观测站的坐标一并求解,即在1个观测站上一般需求解4个未知参数(3个点位坐标分量和1个钟差参数),因此至少需要4个同步伪距观测值,即需要同时观测4颗卫星。

基于定位原理的理论基础,可将定位方法进行分类。例如在 GPS 定位中,依据用户站的运动状态,可以分为静态定位和动态定位。静态定位是指待定点的位置固定不动,将 GPS 接收机安置于其上进行大量的重复观测。动态定位是指待定点处于运动状态,测定待定点在各观测时刻(或称为"观测历元")运动中的点位坐标,以及运动载体的状态参数,如速度、时间和方位等。而按照定位的模式划分,则可分为绝对定位和相对定位。绝对定位又称单点定位,即只采用一台 GPS 接收机进行定位,它所确定的是接收机天线在 WGS84 坐标系统中的绝对位置。相对定位是指两台 GPS 接收机安置于两个固定不变的待定点上,或一个点固定于已知点上,另一个为流动待定点。同步观测一定时间后,可以确定两个点之间的相对位置,获得高精度的点位坐标。

3) 误差分析

卫星导航系统的误差从来源上可以分为4类:与信号传播有关的误差,与卫星有关的误差,与接收机有关的误差以及地球潮汐、负荷潮等造成的其他误差。误差分类如表3.4 所示。

误差来源		对测距的影响/m
与信号传播有关的误差	电离层延迟	
	对流层延迟	1.5~15.0
	多径效应	
	星历误差	
与卫星有关的误差	时钟误差	1.5~15.0
	相对论效应	

表 3.4 误差分类

误差来源		对测距的影响/m
	时钟误差	
与接收机有关的误差	位置误差	1.5~5.0
	天线相位中心变化	
其他误差	地球潮汐	1
共祀庆左	负荷潮	

3.3.2 差分定位系统

减少甚至消除上一节所提到的误差是提高定位精度的措施之一,而差分 GNSS (Differential GNSS,DGNSS)可有效地利用已知位置的基准站或流动站将公共误差估算出来,通过相关的补偿算法完成精确定位,消除公共误差,从而提高定位精度。

差分 GNSS 的基本原理是在一定地域范围内设置一台或多台接收机,将一台已知精密坐标的接收机作为差分基准站,基准站连续接收 GNSS 信号,与基准站已知的位置、距离数据进行比较,从而计算出差分校正量,基准站就会将此差分校正量发送至范围内的流动站,从而减少甚至消除 GNSS 中用户站由于卫星时钟、卫星星历、电离层延迟与对流层延迟所引起的误差,提高定位精度。

流动站与差分基准站的距离可以直接影响差分 GNSS 系统的效果,当流动站与差分基准站距离越近,同一卫星信号到这两个站点的传播途径就越短,两站点之间测量误差的相关性就越强,从而差分 GNSS 系统性能会越好。

根据差分校正的目标参量的不同,差分 GNSS 主要分为位置差分、伪距差分和载波相位差分。下面将简要介绍位置差分、伪距差分和载波相位差分系统。

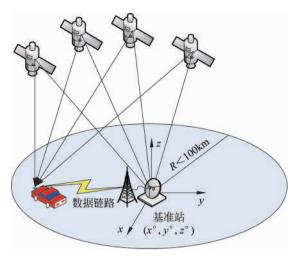
1. 位置差分

位置差分系统如图 3.13 所示,由在已知坐标点的基准站上安装的 GNSS 接收机实时观测 4 颗或 4 颗以上的卫星后,进行三维定位,得出当前基准站的坐标测量值。实际上 GNSS 接收机接收的消息解算出来的坐标,由于存在着轨道误差、时钟误差、SA 影响、大气影响、多径效应等误差影响,与基准站的已知坐标是不相同的。然后将坐标测量值与基准站实际坐标值的差值作为差分校正量,基准站利用数据链将所得的差分校正量发送给流动站,流动站用接收到的差分校正量在自身 GNSS 接收机接收到的测量值的基础上进行坐标修改。位置差分是最简单的差分方法,其传输的差分改正数少,计算简单,并且任何一种 GNSS 接收机均可改装和组成这种差分系统。但是由于基准站与流动站必须观测同一组卫星,因此位置差分法的应用范围受到距离上的限制,适用于流动站与基准站间距离不超过 100km 的短距离范围内。

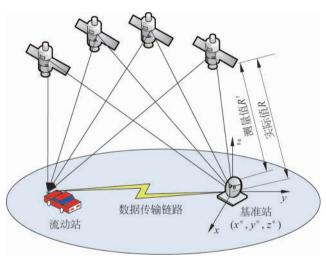
2. 伪距差分

伪距差分是目前应用最广的一种定位技术,几乎所有的商用差分 GNSS 接收机均采用这种技术,如图 3.14 所示。

伪距差分技术是在一定范围的定位区域内,设置一个或多个安装 GNSS 接收机的已知



■图 3.13 位置差分示意



■图 3.14 伪距差分示意

点作为基准站,连续跟踪观测所有在信号接收范围内的 GNSS 卫星伪距,通过在基准站上利用已知坐标求观测站至卫星的几何距离,并将其与观测所得的伪距比较,然后利用一个 α - β 滤波器将此差值滤波并求出其伪距修正值,并将所有卫星的伪距修正值传输给流动站,流动站利用此误差来改正 GNSS 卫星传输来的测量伪距。最后,用户利用修正后的伪距进行定位。伪距差分的基准站与流动站的测量误差与距离存在很强的相关性,故在一定区域范围内,流动站与基准站的距离越小,其使用 GNSS 伪距差分得到的定位精度就会越高。

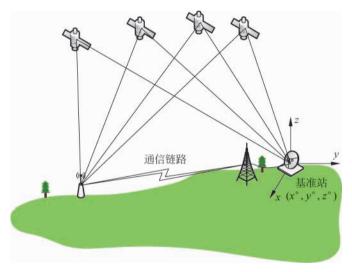
3. 载波相位差分

GNSS 位置差分技术与伪距差分技术都能满足基本定位导航等的精度需求,但是在车联网和自动驾驶领域还远远不能满足需求,从而促使发展出更加精准的 GNSS 差分技术,即载波相位差分技术,也称为实时动态差分技术(Real Time Kinematic,RTK)。RTK 是一种利用接收机实时观测卫星信号载波相位的技术,将数据通信技术与卫星定位技术相结合,

采用实时解算和数据处理的方式,能够实现实时地为流动站提供在指定坐标系中的三维坐标,在极短的时间内实现厘米级高精度的定位。

载波差分技术是建立在实时处理两个观测站的载波相位基础上的。与其他差分技术不同的是,载波差分技术中基准站不直接传输关于 GNSS 测量的差分校正量,而是发送 GNSS 的测量原始值。流动站收到基准站的数据后,与自身观测卫星的数据组成相位差分观测值,利用组合后的测量值求出基线向量,完成相对定位,进而推算出测量点的坐标。实现载波相位差分的方法包括修正法和差分法。前者与伪距差分类似,基准站将载波相位修正量发送给流动站,以改正其载波相位观测值,然后得到自身的坐标,是准 RTK 技术。后者将基准站观测的载波相位测量值发送给流动站,让其自身求出差分修正量,从而实现三维定位,是真正的 RTK 技术。

上述 RTK 定位技术是一种基于 GNSS 高精度载波相位观测值的实时动态差分定位技术,也可用于快速静态定位。采用 RTK 进行定位工作时,除须配备基准站接收机和流动站接收机外,还需要数据通信设备;基准站须将自己所获得的载波相位观测值及基准站坐标,通过数据通信链实时播发给在其周围工作的动态用户。流动站数据处理模块使用动态差分定位的方式确定出流动站相对应基准站的位置,然后根据基准站的坐标求得自己的瞬时绝对位置。常规 RTK 野外作业示意如图 3.15 所示。



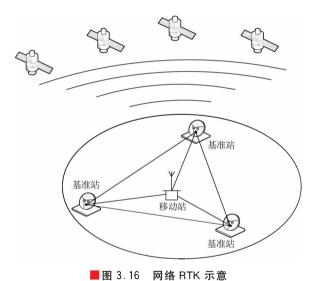
■图 3.15 RTK 作业示意

传统的 RTK 定位技术虽然可以满足很多应用的要求,但流动站与基准站的距离不能太长,当距离大于 50km 时,现有 RTK 单历元解一般只能达到分米级的定位精度。因此,传统 RTK 并不能满足自动驾驶系统对车辆、车道及障碍物的厘米级定位需求,使得网络 RTK 技术得到快速发展。

网络RTK是指在某一区域内由若干个固定的、连续运行的GNSS基准站形成一个基准站网络,对区域内全方位覆盖,并以这些基准站中的一个或多个为基准,为该地区内的GNSS用户实时高精度定位提供GNSS误差改正信息。网络RTK也称多基准站RTK,是近年来基于传统RTK技术和差分GNSS技术等发展起来的一种实时动态定位新技术。网络RTK技术与传统RTK技术相比,扩大了覆盖范围,降低了作业成本,提高了定位精度,

减少了用户定位的初始化时间。

网络 RTK 主要由固定的基准站网、负责数据处理的控制中心、数据播发中心、数据通信链路和用户 5 大部分组成。其中一个基准站网可以包括若干个基准站,每个基准站上配备双频全波长 GNSS 接收机、数据通信设备和气象仪器等。基准站的精确坐标一般可采用长时间 GNSS 静态相对定位等方法确定。基准站 GNSS 接收机按一定采样率进行连续观测,通过数据通信链实时将观测数据传送给数据处理中心,数据处理中心首先对各个站的数据进行预处理和质量分析,然后对整个基准站网数据进行统一解算,实时估计出网内的各种系统误差的改正项(电离层、对流层和轨道误差),建立误差模型。网络 RTK 系统根据通信方式不同,分为单向数据通信和双向数据通信。在单向数据通信中,数据处理中心直接通过数据播发设备把误差参数广播出去,用户收到这些误差改正参数后,根据自己的位置和相应的误差改正模型计算出误差改正数,然后进行高精度定位。在双向数据通信中,数据处理中心实时侦听流动站的服务请求和接收流动站发送过来的近似坐标,根据流动站的近似坐标和误差模型,求出流动站处的误差后,直接播发改正数或者虚拟观测值给用户。基准站与数据处理中心间的双向数据通信可采用数字数据 DDN 或无线通信等方法进行。流动站和数据处理中心间的双向数据通信可通过 V2X 等车联网通信技术进行。网络 RTK 系统如图 3.16 所示。

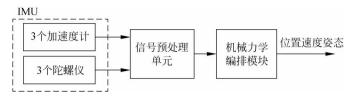


3.3.3 惯性导航定位

惯性是所有质量体本身的基本属性,所以建立在牛顿定律基础上的惯性导航系统 (Inertial Navigation System, INS) (简称惯导系统) 不与外界发生任何光电联系,仅靠系统 本身就能对车辆进行连续的三维定位和三维定向。卫星导航作为定位方式有更新频率低的问题,只有 10Hz 左右,无法满足自动驾驶汽车的要求。因此,必须借助其他传感器和定位手段来共同增强定位的精度,惯性导航系统是其中最重要的部分。

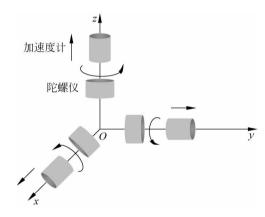
惯性导航系统是一种不依赖于外部信息、也不向外部辐射能量的自主式导航系统。其主要由3个模块组成:惯性测量单元(Inertial Measurement Unit,IMU)、信号预处理单元

和机械力学编排模块,如图 3.17 所示。



■图 3.17 惯性导航系统模块示意

一个 IMU 包括 3 个相互正交的单轴的加速度计(Accelerometer)和 3 个相互正交的单轴的陀螺仪(Gyroscopes),IMU 结构如图 3.18 所示。信号预处理部分对 IMU 输出信号进行信号调理、误差补偿,并检查输出量范围等,以使惯性传感器正常工作。



■图 3.18 IMU 结构示意

1. 惯性导航系统原理

惯性导航系统以陀螺仪和加速度计为敏感元件,应用航迹推算法提供位置、速度和姿态等信息。汽车行驶数据的采集由以陀螺仪和加速度计组成的惯性测量单元来完成。

惯性导航系统原理基于牛顿第一运动定律,此定律说明了在没有受到外力的作用下,物体总是保持原有的运动状态。牛顿第二定律在 INS 中也有着重要的作用,简单来说,牛顿第二定律说明了加速度的大小与作用力成正比,方向与作用力的方向相同,数学表达式为:

$$F = ma$$

惯导系统利用载体先前的位置、惯性传感器测量的加速度和角速度来确定其当前位置。 给定初始条件,加速度经过一次积分得到速度,经过二次积分得到位移。相反,速度和加速 度也可以通过对位移的微分而估算得到,即:

$$v = \int a \, dt$$

$$s = \int v \, dt = \iint a \, dt \, dt$$

$$v = \frac{ds}{dt}, \quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 s}{dt^2}$$

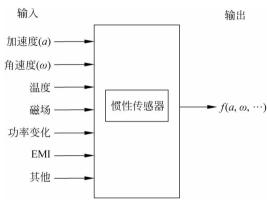
角速度经过处理后可以得出车辆的俯仰、偏航、滚转等姿态信息,利用姿态信息可以把

导航参数从载体坐标系变换到当地水平坐标系中。

综上,惯性导航系统可以说是一个由惯性传感器和积分器组成的积分系统。该系统通过加速度计测量车辆在惯性参考系中的加速度,通过陀螺仪测量载体旋转运动,可以进行惯性坐标系到导航坐标系的转换,将角速度相对时间进行积分,结合车辆的初始运动状态(速度、位置),就能推算出车辆的位置和姿态信息。

2. 惯性导航系统误差

本节提到,惯性导航系统不与外界发生任何光电联系,仅靠系统本身就能对车辆进行连续的三维定位和定向。其通过在内部所感知到的情况来推断外面的情况,使得惯性导航被称为"黑盒导航",如图 3.19 所示。惯性导航系统中既有电子设备,又有机械结构,在外部冲击、振动等力学环境中存在很多误差源。误差又分为随机误差与固定误差,下面将分别简要介绍。



■图 3.19 惯性传感器输入输出模型

1) 随机误差

(1) 传感器白噪声。

传感器白噪声通常与电子噪声合在一起,可能是来自于电源、半导体设备内部噪声或数字化过程中的量化误差。

(2) 变温误差。

传感器偏差的变温误差通常看上去类似时变的加性噪声源,是由外部环境温度变化或内部热分布变化引起的。

(3) 传感器随机游动噪声。

在惯性传感器中,对随机游动噪声有具体要求,但大多数都针对其输出的积分,而不是输出本身。例如,来自速率陀螺仪的"角度随机游动"等同于角速度输出的白噪声。类似地,加速度计输出的白噪声积分等同于"速度随机游动"。随机游动噪声随着时间线性增大,其功率谱密度以 $1/f^2$ 下降(即 20dB/十倍频程)。

(4) 谐波噪声。

由于热量传输延迟,所以温度控制方法(包括室内采暖通风与空调系统)经常引入循环误差,这些都可在传感器输出中引入谐波噪声,谐波周期取决于设备的尺寸大小。同样,主载体的悬挂和结构共振也引入了谐波加速度,它会对传感器中的加速度敏感误差源产生

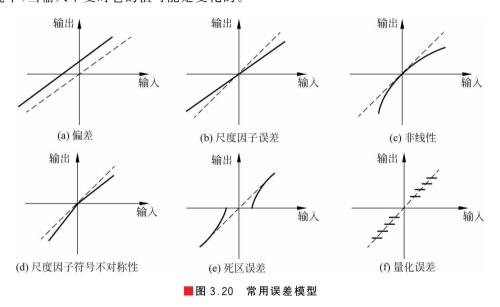
影响。

(5) 1/f 噪声。

这种噪声的功率谱密度以 1/f 减小,其中 f 为频率。多数电子设备中都存在这种噪声。该噪声通常模型化为白噪声和随机游动噪声的某种组合。

2) 固定误差

与上面的随机误差不同,固定误差是可重复的传感器输出误差。图 3.20 给出了一些更为常用的传感器误差模型,包括: (a)偏差,即输入为零时传感器的任何非零的输出; (b)尺度因子误差,常常来自于制造偏差; (c)非线性,不同程度地存在于多种传感器中; (d)尺度因子符号不对称性,常常来自于不匹配的推挽式的放大器; (e)死区误差,通常由机械静摩擦力或死锁引起; (f)量化误差,这在所有数字系统中是固有的,由于它可能存在于标准化环境中,当输入不变时它的值可能是变化的。



3.3.4 多传感器融合定位技术

1. 多传感器融合介绍

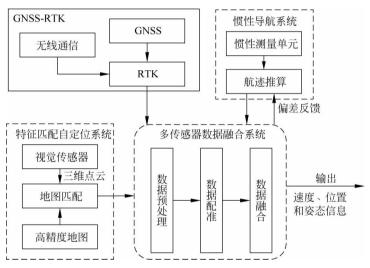
GNSS 是一个应用广泛、适用范围广、定位精度高的系统,但是当它应用于无人车辆时,其更新频率过低的缺点便相对突出,仅有 10Hz 左右的更新频率不足以满足无人驾驶系统对实时定位的要求。由于误差累积的原因,INS 惯性导航系统的准确度随时间和行驶距离的增加而降低,因此也无法完整保证定位的准确性;不过,它的更新频率较高,可以达到 200Hz 以上,满足自动驾驶系统的需求。通过适当的方法将 GNSS 与 INS 的数据进行融合,我们可以为车辆定位提供既准确又足够实时的位置信息。

多传感器信息融合是 20 世纪 80 年代出现的一门新兴学科,它是将不同传感器对某一目标或环境特征描述的信息,综合成统一的特征表达信息及其处理的过程。多传感器信息融合实际上是对人脑综合处理复杂问题的一种功能模拟。与人脑综合处理信息的过程一样,协调利用多个传感器资源实现多传感器信息融合,通过对各种传感器及其观测信息的合

理支配与使用,将各种传感器在空间和时间上的互补与冗余信息依据某种优化准则加以组合,产生对观测环境或对象的一致性解释和描述。多传感器信息融合的目标是利用各种传感器分离观测信息,对数据进行多级别、多方位和多层次的处理,产生新的有意义的信息。这种信息是最佳协同作用的结果,是任何单一传感器无法获得的,它的最终目的是利用多个传感器共同或联合操作的优势,来提高整个传感器系统的有效性。

2. 多传感器融合原理

多传感器融合的数据主要包括 GNSS-RTK、惯性导航系统和特征匹配自定位系统的输入数据。对这些数据进行预处理、数据配准和数据融合等处理后,输出车辆自身的速度、位置和姿态信息,如图 3.21 所示。



■图 3.21 多传感器数据融合示意

数据预处理可以考虑为传感器初始化及校准,传感器初始化即相对于系统坐标独立地校准每一个传感器。一旦完成了传感器初始化,就可以利用共同的目标来开始相对的数据配准过程。所谓数据配准,就是把来自一个或多个传感器的观测或点迹与已知或已经确认的事件归并到一起,保证每个事件集合所包含的观测来自同一个实体的概率较大。具体地说,就是要把每批目标的点迹与数据库中各自的航迹配对。空间内存在较多目标,若将其配错将产生错误。在传感器配准过程中,收集足够的数据点来计算系统偏差,计算得到的系统偏差用以对调整后得到的传感器数据作进一步的处理。

传感器的配准是指多传感器数据"无误差"转换时所需要的处理过程,一般主要包括时间配准和空间配准两个方面。所谓时间配准,就是将关于同一目标的各传感器不同步的测量信息同步到同一时刻。由于各传感器(系统)对目标的测量是相互独立进行的,且采样周期往往不同,所以它们向数据处理中心报告的时刻往往是不同的。另外,由于通信网络的延迟不同,各传感器(系统)和融合处理中心之间传送信息所需的时间也各不相同,因此,各传感器发送数据有可能存在时间差,所以融合处理前须将不同步的信息配准到相同的时刻。所谓空间配准,又称为传感器配准,就是借助于多传感器对空间共同目标的测量,对传感器的偏差进行估计和补偿。对于同一系统内采用不同坐标系的各传感器的测量,定位时必须

将它们转换成同一坐标系中的数据。对于多个不同子系统,各子系统采用的坐标系是不同的,所以在融合处理各子系统的信息前,也应将它们转换到同一测量坐标系中,而处理后还须将结果转换成各子系统坐标系的数据后,再传送给各个子系统。

数据融合需要借助融合算法,融合算法可分为随机类和人工智能类两大类。随机类多传感器数据融合方法主要有贝叶斯推理、D-S证据理论,以及包括最大似然估计、综合平均法、贝叶斯估计、D-S法、最优估计、卡尔曼滤波、鲁棒估计等在内的估计理论;人工智能类多传感器数据融合方法主要有基于神经网络的多传感器数据融合、基于模糊聚类的数据融合以及专家系统等。其中,随机类多传感器数据融合算法属于经典融合算法,又可分为估计和统计两类方法;人工智能类多传感器数据融合方法也称为现代融合法,可以用信息论和人工智能来划分。本节简要介绍几种经典融合算法。

(1) 综合平均法。该方法是把来自多个传感器的众多数据进行综合平均。它适用于用同样的传感器检测同一个目标的情况。如果对一个检测目标进行了 k 次检测,其平均值为:

$$\overline{S} = \sum_{i=1}^{k} W_i S_i / \sum_{i=1}^{k} W_i$$

其中 W_i 为分配给第i次检测的权值。

- (2) 贝叶斯估计法。贝叶斯推理技术主要用来进行决策层融合,贝叶斯估计法通过先验信息和样本信息合成为后验分布,对检测目标做出推断。
- (3) D-S 法。D-S 法是目前信息融合技术中比较常用的一种方法,该方法通常用来对检测目标的大小、位置以及存在与否进行推断。采用概率区间和不确定区间决定多证据下假设的似然函数来进行推理。提取的特征参数构成了该理论中的证据,利用这些证据构造相应的基本概率分布函数,对于所有的命题赋予一个信任度。基本概率分布函数及其相应的分辨框合称为一个证据体。因此,每个传感器就相当于一个证据体。多个传感器信息融合,实质上就是在同一分辨框下,利用 Dempster 合并规则将各个证据体合并成一个新的证据体。产生新证据体的过程就是 D-S 法信息融合。
- (4) 卡尔曼滤波方法。卡尔曼滤波方法在控制领域得到广泛应用后,也逐渐成为多传感器信息融合系统的主要技术手段之一。卡尔曼滤波器可以从一组有限的、包含噪声的、通过对物体位置的观察序列预测出物体的位置坐标及速度。卡尔曼滤波器具有很强的鲁棒性,即使对物体的观测有误差,根据对物体的历史状态与当前对位置的观测,仍可以较准确地推算出物体当前的位置。卡尔曼滤波器运行时主要分两个阶段:预测阶段基于上一个时间点的位置信息去预测当前的位置信息;更新阶段通过对当前物体位置的观测去纠正位置预测,从而更新物体的位置信息。

通过卡尔曼滤波器,可以方便地将惯性传感器与 GNSS 数据进行融合。首先,依据上一次的位置估算使用惯性传感器对当前位置进行实时预测。在得到新的 GNSS 数据之前,只能通过积分惯性传感器的数据预测当前位置。惯性传感器的定位误差随着时间增加,所以当接收到新的 GNSS 信号时,由于 GNSS 数据比较精确,可以使用 GNSS 数据对当前的位置预测进行更新。通过不断地执行这两个步骤,系统可以取两者所长,对无人车进行准确的实时定位。假设惯性传感器的频率是 1kHz,而 GNSS 的频率是 10Hz,那么每两次 GNSS 更新之间会使用 100 个惯性传感器数据点进行位置预测。

3.4 高精地图技术概述

高精地图作为自动驾驶技术发展成熟的重要支撑,在横向和纵向精确定位、障碍物检测与避撞、转向与引导等方面发挥着重要的作用,是自动驾驶的核心技术之一。精准的地图对无人车的定位、导航与控制,以及自动驾驶的安全至关重要。

3.4.1 高精地图综述

人们日常使用的用于车载导航、查询地理位置信息的地图都属于传统电子地图,其主要服务对象是驾驶员,如谷歌地图、百度地图、高德地图等都可以算作传统电子地图。尽管电子地图的出现还不到一百年,但对传统地图的研究和开发已经历经了数千年的历史,并发展出制图学这门学科。在制图学的基础上,电子地图的出现极大地提高了地图的检索效率,并且结合计算机技术可以自动给出两地之间的路径规划方案,明显提升交通运输效率。

传统电子地图是对路网的一种抽象,所有的传统地图都将路网抽象成有向图的形式。图的顶点代表路口,边代表路口与路口的连接。路名、地标及道路骨架信息都可以被抽象成存储于这些有向图的顶点或边中的属性。这种抽象的地图表征形式能很好地适应人类驾驶员的需求,其原因就在于人类生来具有很强的视觉识别及逻辑分析能力。在驾驶的过程中,人类驾驶员一般都能有效地判别如下信息:识别路面及路面车道线,确定自己在路面的大致位置,寻找并辨认路标等。参照这些辨识出来的信息,结合当前 GNSS 提供的车辆在电子地图中的位置,驾驶员便可以大致知道自己在路网中的所在位置,并规划下一步的驾驶行为。正是基于驾驶员的这些能力,传统的电子地图被极大地精简,例如弯曲的道路可以精简为几条线段,只要轮廓大致符合实际路网结构,驾驶员就能结合当前信息确定自己的位置。

与传统地图不同,高精电子地图的主要应用对象是无人驾驶汽车,或者说是机器驾驶员。与人类驾驶员不同,机器驾驶员缺乏人类与生俱来的视觉识别和逻辑分析的能力。例如,人类可以很轻松地利用视觉和 GNSS 定位自身,鉴别障碍物、行人、交通信号与标志,但这些识别对于当前的机器人来说是非常困难的任务。借助高精地图能够扩展车辆的静态环境感知能力,为车辆提供其他传感器提供不了的全局视野,包括传感器监测范围外的道路、交通和设施信息。高精地图面向无人驾驶环境采集生成地图数据,根据无人驾驶需求建立道路环境模型,在精确定位、基于车道模型的碰撞避让、障碍物检测与避让、转向与引导方面都可以发挥重要作用,是当前无人车技术中必不可少的一个组成部分。

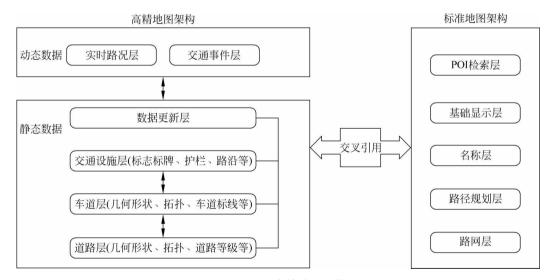
图 3,22 为高精地图示意图。

高精地图包含了大量与行车相关的辅助信息。这些辅助信息可以分成两大类,一类是道路数据,例如道路车道线的位置、类型、宽度、坡度和曲率等车道信息,另一类是行车道路周围相关的固定对象信息,例如交通标志、交通信号灯等信息,车道限高、下水道口、固定障碍物等其他道路细节,还包括高架物体、防护栏、树木、道路边缘类型等信息。所有上述信息都有地理编码,因此导航系统可以准确定位地形、物体和道路轮廓,从而引导车辆行驶。其中最重要的是对路网精确的三维表征(厘米级精度),例如路面的几何结构、车道标线的位置、周围道路环境的点云模型等。有了这些高精度三维数据,无人驾驶汽车就可以通过比对



■图 3.22 高精地图

车载 GNSS、IMU、LiDAR 或摄像头的数据精确定位当前自身的位置。此外,高精地图还包含丰富的语义信息,例如交通信号灯的位置及类型,道路标示线的类型,可以通行的路面范围等。通过对高精地图模型的提取,可将车辆周边的道路、交通、基础设施等对象及对象之间的相对关系提取出来。这些能极大地提高无人驾驶汽车识别周围环境的能力。可以将高精地图数据与传感器数据进行比对,假如传感器检测出了某个高精地图中没有的物体,则这些物体很可能是障碍物或行人与车辆,这能更好地帮无人车提高发现并识别障碍物的速度和精度。高精地图架构定义如图 3.23 所示。



■图 3.23 高精地图架构

相比服务于传统 GNSS 导航系统的传统地图,高精地图最显著的特点是其表征路面特征的精准性。一般情况下,传统地图只需要做到米级精度即可实现功能,但高精地图的应用场景特性决定了其至少要达到厘米级精度才能保证自动驾驶汽车行驶的安全性。目前商用 GNSS 精度仅有 5m 左右,而高精地图与传感器协同工作,可将车辆的定位精确到厘米级。

此外,高精地图相比传统地图还需要具备更高的实时性,以确保自动驾驶汽车行驶安全。因为道路无时无刻不在发生变化,小到车道线的磨损,大到路面整体施工整修,都需要及时反映在高精地图上。要做到高实时性的高精地图存在很大难度,但随着越来越多的自动驾驶汽车行驶在路网,一旦其中的一辆或几辆检测到了路网的改变,就可以上传数据以同步给其他自动驾驶汽车,使得其他自动驾驶汽车变得更加聪明和安全。

3.4.2 高精地图在自动驾驶中的应用

传统的导航电子地图,主要给驾驶员使用,而高精地图主要给自动驾驶汽车使用。高精 地图尤其在自动驾驶的感知、定位、规划、决策、控制等过程中发挥重要作用。因此,高精地 图是自动驾驶的基础。

相比传统导航电子地图,高精地图具有更高的计算精度、更多的数据层级、更动态的实时性等特点,以满足自动驾驶汽车在行驶过程中地图精确计算匹配、实时路径规划导航、辅助环境感知、驾驶决策辅助、智能控制辅助的需要。

1. 地图精确计算匹配

由于存在各种定位误差,电子地图坐标上的移动车辆与周围地物并不能完全保持正确 的位置关系。利用高精地图精确计算匹配则可以将车辆位置精准地定位在车道上,从而提 高车辆定位的精度。

传统地图的匹配依赖于 GNSS 定位,定位准确性取决于 GNSS 的精度、信号强弱以及定位传感器的误差。高精地图在地图匹配上更多地依靠其先验信息。高精地图相对于传统地图有着更多维度的数据,例如道路形状、坡度、曲率、航向、横坡角等。通过更高维数的数据结合高效率的匹配算法,高精地图能够实现更高尺度的定位与匹配。

2. 实时路径规划导航

对于提前规划好的最优路径,因为交通信息的实时更新,最优路径也可能随时发生变化。此时高精地图在云计算的辅助下,能有效地为自动驾驶汽车提供最新的路况,帮助自动驾驶汽车重新制定最优路径。

高精地图的规划能力下沉到了道路和车道级别。传统的导航地图的路径规划功能往往基于最短路径算法,结合路况为驾驶员给出最快捷、最短的路径。但高精地图的路径规划是为机器服务的。机器无法完成联想、解读等步骤,所以给出的路径规划必须是机器能够理解的。在这种意义上,传统的特征地图难以胜任,而高精矢量地图能够完成这一任务。矢量地图是在特征地图的基础上进一步抽象、处理和标注,抽出路网信息、道路属性信息、道路几何信息以及标识物等抽象信息的地图。它的数据量要小于特征地图,并能够通过路网信息完成点到点的精确路径规划。

3. 辅助环境感知

高精地图可对传感器无法探测的部分进行补充,进行实时状况的监测及外部信息的反馈。传感器作为自动驾驶的眼睛,有其局限所在,如易受恶劣天气的影响,此时可以使用高精地图来获取当前位置的精准交通状况。

高精地图辅助环境感知的原理为:

(1) 通过对高精地图模型的提取,可以将车辆位置周边的道路、交通、基础设施等对象

及对象之间的关系提取出来,这可以提高车辆对周围环境的鉴别能力。

(2) 一般的地图会过滤掉车辆、行人等活动障碍物,如果无人驾驶车在行驶过程中发现 了当前高精地图中没有的物体,这些物体大概率是车辆、行人和障碍物。

高精地图可以看作是自动驾驶的传感器,相比传统硬件传感器(雷达、激光雷达或摄像头),在检测静态物体方面,高精地图具有的优势包括:所有方向都可以实现无限广的范围;不受环境、障碍或者其他干扰的影响;可以"检测"所有的静态及半静态的物体;不占用过多的处理能力;已存有检测到的物体的逻辑,包括复杂的关系。

4. 驾驶决策辅助

高精地图除了具备传统电子地图的路网地图数据外,还将大量的道路行车信息存储为结构化数据,这些信息可以分为两类:第一类是道路数据,例如车道线的位置、类型、宽度、坡度和曲率等车道信息;第二类是车道周边的固定对象信息,例如交通标志、交通信号灯等信息,车道限高、下水道口、障碍物及其他道路细节,还包括高架物体、防护栏、树木、道路边缘类型、路边地标等基础设施信息。在自动驾驶汽车的行驶过程中,这些信息将被有效计算,对车道并线、障碍物避让、车辆调速、行车转向的决策起到重要辅助作用。

5. 智能控制辅助

高精地图作为所有行车信息的载体,提供了对所处环境进行精准预判、提前选择合适的行驶策略等功能。通过这种减少传感器计算压力和性能计算瓶颈的方式,使传感控制系统更多关注突发情况,达到自动驾驶过程中智能控制辅助的作用。同时在提升车辆安全性基础上,有效降低了车载传感器和控制系统的成本。

例如在高速公路下匝道时,一般会通过摄像机来探测车道线的变化,以保证车辆在车道 内行驶。在车道弯曲度比较大时,摄像机反馈的结果不是很理想,这就需要利用地图的先验 数据,根据车辆的姿态来拟合计算车道线的数据。

3.4.3 高精地图的制作

1. 高精地图生产流程

高精地图数据生产包括外业采集、云端自动化处理、数据编辑与质量控制、数据编译与引擎等步骤,如图 3.24 所示。外业采集,通过搭载 GNSS、IMU、LiDAR、摄像头等传感器的专业采集车队,外业实地采集车道线、路沿护栏、交通标牌等信息。通过点云融合、点云识别和图像识别等 AI 技术,在云端实现自动化处理,如图 3.25 所示。利用高精地图编辑工具、生产管理系统,进行地图编辑。基于 ISO19157/19158, IATF16949 等质量标准,构建全流程数据质量保障体系。

高精地图需要获取的地物主要包括车道线、道路交通设施(人行横道、转向标志、交通设施等)、车道拓扑网络数据以及其他地物等。根据数据采集方式的不同,高精地图生产方式有所差异。基于移动测绘车采集的数据,前期需要进行点云数据的分区、去噪、拼接等预处理,进而进行矢量化、几何调整、增加属性和拓扑结构建立等加工处理;无人机航测高精地图生产,基于校正、拼接等预处理得到的高精度正射影像图,采用自动与人工相结合的方式进行数据矢量化加工处理;1:500地形图测绘基于外业采集的数据进行内业地图编绘,通过格式转换、地物分类等进行加工处理。三种高精地图生产过程均需要通过多级质检保证



■图 3.24 高精地图生产流程



■图 3.25 云端自动化处理示意

最终成果数据的可靠性。移动测绘车生产方式目前正在形成一种"专业采集+众包维护"的 地图动态更新方式,无人机航测数据更新则需要重新进行航测,1:500 地形图测绘采用部 分补测的方式实现数据更新。

2. 高精地图采集平台

高精地图的采集需要专用的采集车携带激光雷达、摄像机、GNSS、IMU等设备进行。激光雷达用来采集点云数据,摄像头采集道路实景图像,GNSS与IMU用来定位。下面介绍采集车用到的主要设备。

惯性测量单元(IMU):一般使用 6 轴运动处理组件,包含了 3 轴加速度传感器和 3 轴陀螺仪。加速度传感器是力传感器,用来检查上下左右前后哪几个面各受了多少力(包括重力),然后计算每个自由度上的加速度。陀螺仪是角速度检测仪,检测每个自由度上的角加速度。

轮测距器(Wheel Odometer):可以通过轮测距器推算出无人车的位置。汽车的前轮通常安装了轮测距器,分别会记录左轮与右轮的总转数。通过分析每个时间段里左右轮的转数,我们可以推算出车辆向前走了多远,向左或向右转了多少角度等。行驶条件的差异,导致随着时间推进,测量偏差会越来越大。

GNSS:确定4颗或更多卫星的位置,并计算出它与每颗卫星之间的距离,然后用这些信息通过三维空间的三边测量法进行定位。要使用距离信息进行定位,接收机还必须知道卫星的确切位置。GNSS接收机储存有星历,其作用是告诉接收机每颗卫星在各个时刻的位置。GNSS误差不会累积,但测量精度有限。

激光雷达(LiDAR):采集点云信息,进行周围环境的感知与建模。激光雷达采集到的信息是构成高精地图的主要部分。

3. 高精地图的质量要求

高精地图的数据质量主要分为数据完整性、数据可用性、位置准确度、专题准确度、时间准确度、逻辑一致性等6个方面目标,如图3,26所示。



■图 3.26 高精地图质量控制

高精地图的质量标准可分为属性标准和几何标准两个方面,具体而言,属性标准包括属性要素、FPR标准、FNR标准,如图 3.27所示。其中属性要素有车道类型等车道信息,路沿、护栏等道路信息,限速、限行等交通信息;几何标准包括绝对精度和相对精度,高精地图的绝对精度在1m左右,不超过2m,相对精度在20cm左右,不超过30cm。

• 属性标准

属性要素	FPR 标准	FNR 标准
车道线几何	0.50%	0.50%
路沿	0.50%	0.50%
护栏	0.50%	0.50%
车道类型	0.30%	0.30%
车道通行状态	0.10%	0.10%
车道收费情况	0.10%	0.10%
车道线类型	0.20%	0.20%
车道线颜色	0.20%	0.20%
车道线粗细	0.10%	0.10%
限速	1 %	1 %
Junction	0.50%	0.50%

• 几何标准

绝对精度	相对精度
± 1 m, 2σ	±20cm,3σ

FNR(遗漏率) & FPR(冗余率)

评估原则:以实地情况为准,作业情况符合实地则为正确,反之则为错误

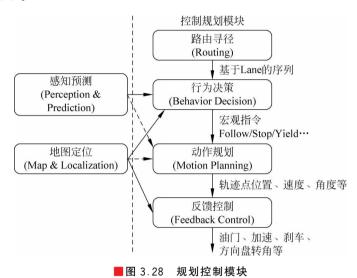
- ≥ 实地存在成果中不存在为遗漏
- ≥ 实地不存在成果中存在为冗余
- 成果与实地均存在,但与实地不匹配情况的错误,同时计为冗余和遗漏
- ≥ 当实地情况与作业要求不一致时,以实地为准
- ∞ 当实地情况在作业范围外而未删除时,计入冗余处理评估公式:

FNR(遗漏率)=遗漏量/真值 FPR(冗余率)=冗余量/真值

■图 3.27 高精地图质量标准

3.5 规划与决策系统概述

自动驾驶汽车作为一个复杂的软硬件结合系统,其安全可靠运行需要车载硬件、传感器集成、感知、预测以及控制规划等多个模块紧密协同配合工作。其中最关键的部分是感知预测和控制规划的紧密配合。规划控制广义上可以分为路由寻径(Routing)、行为决策(Behavior Decision)、动作规划(Motion Planning)以及反馈控制(Feedback Control)几个部分,如图 3.28 所示。



3.5.1 路径规划

路由寻径、行为决策、动作规划三个部分又可统称为路径规划,路径规划部分承接上层感知预测结果,从功能上可分为全局路径规划和局部路径规划。

1. 路由寻径

全局路径规划对应的是路由寻径部分,其作用可以简单理解为实现自动驾驶汽车软件系统内部的导航功能,即在宏观层面上指导自动驾驶汽车软件系统的规划控制模块按照什么样的道路行驶,从而实现从起始点到目的地点。值得注意的是,这里的路由寻径虽然在一定程度上类似传统的导航,但其细节上紧密依赖于专门为自动驾驶汽车导航绘制的高精地图,所以和传统的导航有本质不同。它根据已知电子地图和起点终点信息,采用路径搜索算法搜索出一条最优化的(时间最短、路径长度最短等)全局期望路径。这种规划可以是行驶前离线进行,也可以在行驶中不停地重新规划。全局规划的作用在于产生一条全局路径指引车辆的前进方向,避免车辆盲目地探索环境。在规划全局路径时,不同的环境下常常会选择不同的择优标准。在平面环境中,通常以路径长度最短或时间最短为最优标准。在越野环境的全局路径规划中,经常以"安全性"为最优标准,该标准同时考虑路径可行宽度和路面不平度来充分保证车辆的运行安全。作为整体无人车控制规划系统的最上游模块,路由寻

径模块的输出严格依赖无人车高精地图(HD-Map)的绘制。在高精地图定义绘制的路网(Road Graph)的道路(Lane)划分的基础上,以及在一定的最优策略定义下,路由寻径模块需要解决的问题是计算出一个从起点到终点的最佳道路行驶序列。路由寻径问题可以利用常见的 A*算法或者 Dijkstra 算法来进行实现。

2. 行为决策

路由寻径模块产生的路径信息,直接被中游的行为决策模块所使用。行为决策模块接收路由寻径的结果,同时也接收感知预测和地图信息。综合这些输入信息,行为决策模块在宏观上决定了自动驾驶汽车如何行驶。这些行为层面的决策包括在道路上的正常跟车、在遇到交通灯和行人时的等待和避让,以及在路口和其他车辆的交互通过等。行为决策模块根据具体实现形式不同,在宏观上定义的输出指令集合也多种多样。实现行为决策模块的方法相对较多,而且不用遵循非常严格的规则。实际上,在自动驾驶汽车系统设计中,行为决策模块有时被设计成独立的逻辑模块,有时其功能在某种程度上和下游的动作规划模块融合到了一起实现。正是因为行为决策和动作规划需要紧密协调配合,在设计实现两个模块时的一个重要的基本准则是,行为决策模块的输出逻辑需要和下游的动作规划模块的逻辑配合一致。

行为决策层面汇集了所有重要的车辆周边信息,不仅包括了自动驾驶汽车本身的当前位置、速度、朝向以及所处车道,还收集了自动驾驶汽车一定距离以内所有重要的感知相关的障碍物信息。行为决策层需要解决的问题,就是在知晓这些信息的基础上,如何决定自动驾驶汽车的行驶策略。这些信息具体包括以下几点。

- (1) 所有的路由寻径结果: 例如自动驾驶汽车为了到达目的地,需要进入的车道是什么(target lane)。
- (2) 自动驾驶汽车的当前自身状态:车的位置、速度、朝向、当前主车所在的车道、按照路由寻径结果需要进入的下一个车道等。
- (3)自动驾驶汽车的历史信息:在上一个行为决策周期,自动驾驶汽车所做出的决策 是跟车、停车、转弯还是换道等其他行为。
- (4)自动驾驶汽车周边的障碍物信息:自动驾驶汽车周边一定距离范围内的所有障碍物信息。例如周边的车辆所在的车道,邻近的路口有哪些车辆,它们的速度、位置如何,以及在一个较短的时间内它们的行驶意图和预测的行驶轨迹,周边是否有自行车骑行者或者行人,以及他们的位置、速度、轨迹等。
 - (5) 自动驾驶汽车周边的交通标识信息。
 - (6) 当地的交通规则: 例如道路限速,是否可以红灯右拐等。

自动驾驶汽车的行为决策模块,就是要在上述所有信息的基础上,做出如何行驶的决策。自动驾驶汽车的行为决策模块是一个信息汇聚的地方。由于需要考虑如此多种不同类型的信息及受到非常本地化的交规限制,行为决策问题往往很难用一个单纯的数学模型来解决。

3. 动作规划

局部路径规划对应的是图 3.28 中的动作规划模块,以车辆所在局部坐标系为准,将全局期望路径根据车辆定位信息转化到车辆坐标中表示,以此作为局部参考路径,为局部路径

规划提供导向信息。局部期望路径是自动驾驶车辆未来一段时间内期望的行驶路线,因此要求路径的每一点都可以表示车辆状态的信息。局部期望路径可以理解为自动驾驶车辆未来行驶状态的集合,每个路径点的坐标和切向方向就是车辆的位置和航向,路径点的曲率半径就是车辆转弯半径。车辆在实际行驶中,位置、航向和转弯半径是连续变化的,那么生成的路径也要满足位置、切向方向和曲率的连续变化。局部路径规划的作用是基于一定的环境地图寻找一条满足车辆运动学约束和舒适性指标的无碰撞路径。规划出来的局部路径必须具备对全局路径的跟踪能力与避障能力,如基于路径生成与路径选择的局部路径规划方法,路径生成中完成了对全局路径的跟踪,路径选择完成了障碍分析。

3.5.2 路径规划算法介绍

常用的路径规划算法可分为基于采样的路径规划算法以及基于地图的路径搜索算法两大类,每类路径规划算法又都包含一系列算法。基于采样的路径规划算法很早便开始用于车辆路径规划,比较常见的基于采样的路径规划算法有概率图算法(Probabilistic Road Map,PRM)和快速随机扩展树算法(Rapidly-exploring Random Tree,RRT)。概率图算法使用局部规划算法建立随机状态之间的连接关系,从而抽象出概率图,对于确定的起始状态和目标状态,它只需要快速地搜索概率图便可获得路径。快速随机扩展树算法由 LaValle和 Kuffner 提出,它最初专用于解决运动学约束的路径规划问题。

基于地图的路径搜索算法通常采用单元分解法或者道路图法建立环境模型,它通过搜索环境信息的环境地图获得最终路径。在这类搜索方法中,比较有代表性的有深度优先算法(Depth-First Search,DFS)、广度优先搜索算法(Breadth-First Search,BFS)、迭代加深搜索算法(Iterative-Deepening Search,IDS)、等代价搜索算法(Uniform-Cost Search, UCS)和启发式搜索算法(Heuristic Search,HS)等。深度优先搜索算法、广度优先搜索算法、迭代加深搜索算法和等代价搜索算法使用了回溯技术实施搜索,它从起始状态出发沿着树的深度遍历树的节点,尽可能深地搜索树的分支,直至要么到达目标状态,要么到达一个搜索终止点。如果发现了目标状态,它退出搜索并返回解路径;如果到达的是一个搜索终止点,那么它将回溯到路径上含有未搜索过的节点的临近节点,并沿着这个分支继续搜索下去。因此,这类算法比较适合于解决环境中节点数目较少情况下的路径搜索问题,当节点数目比较多时,算法搜索速度慢、效率低。而启发式搜索算法在决定节点扩展顺序的估价函数中引入了启发值,即当前节点状态到目标状态之间的估计消耗,从而引导搜索朝向目标状态的方向,避免了盲目搜索,有助于提高算法的搜索效率,因而启发式搜索算法越来越广泛地应用于路径规划。

3.6 V2X 技术概述

车用无线通信技术(Vehicle to Everything, V2X)是将车辆与一切事物相连接的新一代信息通信技术,其中 V 代表车辆,X 代表任何与车交互信息的对象,当前 X 主要包含车、人、交通路侧基础设施和网络。 V2X 概述交互的信息模式包括:车与车之间(Vehicle to Vehicle, V2V)、车与路之间(Vehicle to Road, V2R)、车与路侧基础设施(如红绿灯、交通摄像

头、路侧单元等)之间(Vehicle to Infrastructure, V2I)、车与人之间(Vehicle to Pedestrian, V2P)的交互,如图 3.29 所示。



■图 3.29 V2X

详细来说,V2X是一种网状网络,网络中的节点(汽车、智能交通灯等)可以发射、捕获并转发信号。利用 V2X,车辆可以获取周围环境的未知参数及附近车辆的运行状态,这些状态包括速度、位置、行驶方向、刹车等基本的安全信息。然后车载端主动安全算法将处理所获取的信息,并按照优先级对信息进行分类,对可能发生的危险情景进行预警,紧急情况下可以利用车辆执行端对车辆进行控制从而规避风险。V2X 技术开启了对四周威胁的360°智能感知,这一技术能够在各种危险情况下提醒驾驶者,从而大大减少汽车碰撞事故的发生并缓解交通拥堵。

相比传统雷达, V2X 通信传感系统有以下几点优势。

(1) 覆盖面更广。

300~500m 的通信范围相比十几米的雷达探测范围要远得多,不仅是前方障碍物、身旁和身后的建筑物、车辆都会互相连接,大大拓展了驾驶员的视野范围,驾驶员能获得的信息更多更立体。例如,在前车刹车初期就能有效甄别,并进行提示,如果距离过近,系统会再次提示,对预判和规避危险也有足够的反应时间,避免出现跟车追尾的情况。

(2) 有效避免盲区。

由于所有物体都接入互联网,每个物体都会有单独的信号显示,因此即便是视野受阻,通过实时发送的信号可以显示视野范围内看不到的物体状态,也就降低了盲区出现的概率,也就充分避免了因盲区而导致的潜在伤害。

(3) 对于隐私信息的安全保护性更好。

3.6.1 V2X 分系统概述

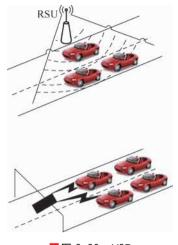
V2V 是指通过车载终端进行车辆间的通信。车载终端可以实时获取周围车辆的车速、位置、行车情况等信息,车辆间也可以构成一个互动的平台,实时交换文字、图片和视频等信息。将 V2V 技术应用于交通安全领域,能够提高交通的安全系数,作用是减少交通事故,降低直接和非直接的经济损失,以及减少地面交通网络的拥塞。

V2R(Vehicle to Road)是指车与路之间的通信。车-路通信主要面向非安全性应用,以

ETC 系统为代表。例如,车辆经过特定的 ETC 车道,在不需停车和收费人员采取任何操作的情况下,能自动完成收费过程。除此之外,如图 3.30 所示基于车-路通信的专用短程通信应用还可以用于电子地图的下载和交通调度等。

V2I(Vehicle to Infrastructure)是指车载设备与路侧基础设施(如红绿灯、交通摄像头、路侧单元等)进行通信,路侧基础设施也可以获取附近区域车辆的信息并发布各种实时信息。V2I通信主要应用于实时信息服务、车辆监控管理等。

V2P(Vehicle to Pedestrian)是指弱势交通群体(如行人、骑行者等)使用用户设备(如手机、笔记本计算机等)与车载设备进行通信,包括广泛的道路使用者。V2P通信主要应用于信息服务、避免或减少交通事故等。行人检测系



■图 3.30 V2R

统可以在车辆、基础设施或与行人本身一起实现,以向驾驶员、行人或两者提供警告。当车 内警报系统变得越来越普遍(例如,盲点警告、前向碰撞警告)时,在车内警告路上有行人存 在也是切实可行的。而对于路上的行人来说,最简单和最明显的行人警告系统则是手持设 备,例如手机、智能手表等。

现有的一些警告方式有:允许盲人或视力低下的行人的智能电话自动呼叫的应用程序;当信号交叉口的人行横道内的行人在公交车的预定路径中时,利用车内设施警告公交车驾驶员;行人在红灯时横穿马路被警告,以及试图转弯的司机被警告在人行横道上有行人等。

3.6.2 V2X 典型应用

借助于人、车、路、云平台之间的全方位连接和高效信息交互, V2X 技术目前正从信息服务类应用向交通安全和效率类应用发展, 并将逐步向支持实现自动驾驶的协同服务类应用演进。V2X 典型的应用场景举例如下。

1. 信息服务典型应用场景

信息服务是提高车主驾车体验的重要应用场景,是 V2X 应用场景的重要组成部分。典型的信息服务应用场景包括紧急呼叫业务等。紧急呼叫业务是指当车辆出现紧急情况时(如安全气囊引爆或侧翻等),车辆能自动或手动通过网络发起紧急救助,并对外提供基础的数据信息,包括车辆类型、交通事故时间地点等。服务提供方可以是政府紧急救助中心、运营商紧急救助中心或第三方紧急救助中心等。该场景需要车辆具备 V2X 通信的能力,能与网络建立通信联系。

2. 交通安全典型应用场景

交通安全是 V2X 最重要的应用场景之一,对于避免交通事故、降低事故带来的生命财产损失有十分重要的意义。典型的交通安全应用场景包括交叉路口碰撞预警等。

交叉路口碰撞预警是指,在交叉路口,车辆探测到与侧向行驶的车辆有碰撞风险时,通

过预警声音或影像提醒驾驶员以避免碰撞。该场景下车辆需要具备广播和接收 V2X 消息的能力。

3. 交通效率典型应用场景

提高交通效率是 V2X 的重要应用场景,同时也是智慧交通的重要组成部分,对于缓解城市交通拥堵、节能减排具有十分重要的意义。典型的交通效率应用场景包括车速引导等。车速引导是指路边单元(RSU)收集交通灯、信号灯的配时信息,并将信号灯当前所处状态及当前状态剩余时间等信息广播给周围车辆。车辆收到该信息后,结合当前车速、位置等信息,计算出建议行驶速度,并向车主进行提示,以提高车辆不停车通过交叉口的可能性。该场景需要 RSU 具备收集交通信号灯信息并向车辆广播 V2X 消息的能力,周边车辆具备收发 V2X 消息的能力。

4. 自动驾驶典型应用场景

与现有的摄像头视频识别、毫米波雷达和激光雷达类似,V2X 是获得其他车辆、行人运动状态(车速、刹车、变道)的另一种信息交互手段,并且不容易受到天气、障碍物以及距离等因素的影响。同时,V2X 也有助于为自动驾驶的产业化发展构建一个共享分时租赁、车路人云协同的综合服务体系。目前,典型的自动驾驶应用场景包括车辆编队行驶、远程遥控驾驶等。车辆编队行驶是指头车为有人驾驶车辆或自主式自动驾驶车辆,后车通过 V2X 通信与头车保持实时信息交互,在一定的速度下实现一定车间距的多车稳定跟车,具备车道保持与跟踪、协作式自适应巡航、协作式紧急制动、协作式换道提醒、出入编队等多种应用功能。远程遥控驾驶是指驾驶员通过驾驶操控台远程操作车辆行驶。搭载在车辆上的摄像头、雷达等,通过 5G 网络将多路感知信息实时传达到远程驾驶操控台;驾驶员对于车辆方向盘、油门和刹车的操控信号,通过 5G 网络,低时延、高可靠、实时传达到车辆上,轻松准确地对车辆进行前进、加速、刹车、转弯、后退等驾驶操作。

近年来,我国在汽车制造、通信与信息以及道路基础设施建设等方面均取得了长足的进步。汽车产业整体规模保持世界领先,自主品牌市场份额逐步提高,核心技术不断取得突破。信息通信领域涌现一批世界级领军企业,通信设备制造商已进入世界第一阵营,在国际 V2X、5G 等新一代通信标准的制定中也发挥了越来越重要的作用。在国家基础设施建设方面,宽带网络和高速公路网快速发展,规模位居世界首位,北斗卫星导航系统可面向全国提供高精度时空服务。我国具备推动 V2X 产业发展的基础环境,能够进一步推动 V2X 技术产业化发展和应用的推广。

参考文献

- [1] 刘博聪,刘少山, James Peng. 【无人驾驶技术系列】光学雷达(LiDAR)在无人驾驶技术中的应用 [EB/OL]. http://www.vccoo.com/v/427451, 2016-09-16.
- [2] 李倩. 主流的无人驾驶传感平台以雷达和车载摄像头为主,并呈现多传感器融合发展的趋势 [EB/OL]. http://m. elecfans. com/article/694479. html, 2018-06-13.
- [3] 英博看车. 智能汽车: 从 ADAS 到无人驾驶——元器件篇[EB/OL]. http://info.carec.hc360.com/2016/06/201425600872.shtml, 2016-06-20.
- [4] 曹悦恒,张少杰. 汽车产业国际竞争力对比研究[J]. 当代经济研究, 2017(11): 90-96.

- [5] 涂林峰, 盾和弹之间的那点事(二十)——制导篇; 毫米波雷达制导[J], 兵器知识, 2019(1),
- [6] 刁宁辉. 扇形波束旋转扫描散射计数据地理定位方法研究[D]. 国家海洋环境预报研究中心, 2012.
- [7] 刘国荣. 基于图像的车道线检测与跟踪算法研究[D]. 湖南大学.
- [8] 程鹏飞,秘金钟,王华. 国内部分 IGS 站点汶川地震前后的时变特征[J]. 全球定位系统,2008,33(5).
- [9] 杨海波. 列车组合定位系统数据的仿真方法研究[D]. 北京交通大学, 2011.
- [10] 张杰. GPS 导航系统 L2C 信号的跟踪算法及其实现研究[D]. 南京邮电大学, 2014.
- [11] 李东亚. GNSS 系统中镜像抑制混频器的设计[D]. 西安邮电大学,2018.
- [12] 汤先鹏, 高性能导航收发信机射频电路若干关键技术研究[D]. 国防科学技术大学,2016.
- [13] 夏敬潮. 融合泛在无线信号与 GNSS 的室内外定位方法研究[D]. 2015.
- [14] 丁俊杰,胡昌华.连续运行基准站系统 CORS 综述[D]. 黄河规划设计,2008(04).
- [15] 王卫国. 数据融合方法及其应用技术的研究[D]. 河北理工大学,2005.
- [16] 李鹏. 卡尔曼滤波在信息融合理论中的应用[D]. 西安电子科技大学,2008.
- [17] 王鹏. 船舶综合导航多源信息融合技术研究[D]. 江苏科技大学, 2014.
- [18] 黄贤源. 基于现代时间序列分析的动态数据处理方法研究[D]. 解放军信息工程大学, 2008.
- [19] 晏黎明,况太君,熊超. GPS RTK 作业几种模式探讨[J]. 人民长江,2009,40(22):37-39.
- [20] 王会清,韩艳玲. 基于多传感器与数据融合技术的研究[J]. 计算机与现代化, 2002(9): 64-67.
- [21] 黎天人. 无线传感器网络中分层簇类数据融合算法的研究[D]. 湖南大学,2009.
- [22] 王会清, 韩艳玲. 基于多传感器与数据融合技术的研究[J]. 计算机与现代化, 2002(9): 64-67.
- [23] 杨永平,刘迪,邓标. 网络 RTK 技术在电力线路测量中的应用[J]. 云南电力技术,2012,40(3):57-58.
- [24] 张杰. 基于 Web 的传感器网络网关的研究与实现[D]. 重庆大学,2007.
- [25] 尚魏, 多源日志安全信息的融合技术研究[D], 哈尔滨工程大学, 2010.
- [26] 杨伟伟. 基于可编程阵列的仿生自修复无线传感网络节点研制[D]. 南京航空航天大学. 2009.
- [27] 刘登第,傅惠民,殷刚. 一种新的数据融合方法[J]. 中国安全科学学报,1998(6): 1-4.
- [28] 丁凯. 信息融合技术在舰船组合导航系统中的应用研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2006.
- [29] 穆加艳. 雷达数据与 AIS 数据融合的应用研究[D]. 南京理工大学, 2011.
- [30] 樊之旭. GPS 差分协议分析[J]. 河南科技: 上半月, 2011(6): 52-53.
- [31] 于润东,余冰雁,李新洲. C-V2X 标准化进展与测试验证[J]. 信息通信技术与政策,2018, No. 289(07): 68-72.
- [32] 陈宗娟,孙二鑫,李丹丹. 高精地图现状分析与实现方案研究[J]. 电脑知识与技术,2018(2):270-272.
- [33] 王涛, 陈艳丽, 贾双成. 简述高精地图的特点[J]. 软件, 2018, 39(09): 191-195.
- [34] 刘华, 乔成磊, 张亚萍. 车联网对汽车行业的影响[J]. 上海汽车, 2016(1): 31-37.
- [35] 林玮平. 自动驾驶及关键技术 V2X 研究. 广东通信技术, 2018(11): 44-48.
- [36] 赵军辉,彭巍,史家康.应用于智能运输系统的专用短程通信[J].运输经理世界,2011(9):94-95.
- [37] 刘富强,孙斌,王新红. 基于 DSRC 的车载通信平台设计[J]. 今日电子,2009(9):51-53.
- [38] 蒋键. 智能车辆越野环境路径规划[D]. 北京理工大学,2016.