

自动驾驶基础——惯性测量单元(IMU)

本文介绍了IMU在自动驾驶技术中的重要作用，严格来讲，单纯的IMU只提供相对定位信息，即自体从某时刻开始相对于某个起始位置的运动轨迹和姿态。

评价自动驾驶汽车的技术指标很多，目前最受关注的主要是安全性、成本和运营范围（也就是SAE自动驾驶分级L1- L5的等级划分中的ODD,设计运行域Operational Design Domain）。这三个指标是相互关联的，例如，运营范围越小，应用场景越简单，成本越低，同时安全性越高，反之亦然。因此竞争焦点在于，谁能在更大的运营范围内提供更安全和更低成本的解决方案，或提供支持这种方案的核心器件。

从目前的情况看，园区或室内的自动驾驶技术已经日趋成熟，而开放道路，尤其是城市环境下的全自动驾驶技术仍然处于研发和测试阶段。这里面固然有感知层面的问题，目前的传感器对开放道路上的行人、动物等目标的检测能力仍然有待提高，但另一个容易被忽视的问题是定位的难度。在一个不大的固定区域内，定位问题可以通过基础设施改造和SLAM技术解决；在室内，UWB定位可以达到厘米级精度。然而，如果要设计一个可以在更大范围内自动驾驶的汽车，高精定位就成为一个挑战。

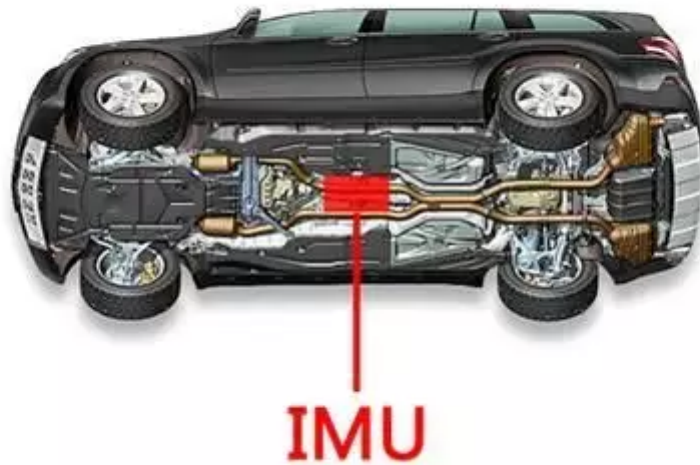
对于一辆自动驾驶汽车来说，高精定位有两层含义：

- 得到自车与周围环境之间的相对位置，即相对定位；
- 得到自车的精确经纬度，即绝对定位。

看到这里，很多人的第一反应是，人自己开车的时候，从来不知道自己的经纬度，为什么自动驾驶汽车一定要做绝对定位呢？其本质原因还是在于环境感知能力的差异。人类可以仅凭双眼（和一些记忆、知识）就能精确地得出周围的可行驶区域、道路边界、车道线、障碍物、交通规则等关键信息，并据此控制汽车安全地行驶。然而目前人类所设计的传感器和后处理算法还无法达到同样的性能。

因此，自动驾驶汽车对于周边环境的理解需要高精地图、联合感知等技术的辅助。高精地图可以把由测绘车提前采录好的、用经纬度描述的道路信息告诉车辆，而所有的车辆也可以把实时感知得到的、用经纬度描述的动态障碍物的信息广播给周围的车辆，这两个技术叠加在一块，就可以大大提高自动驾驶汽车的安全性，从而拓展它们的运营范围。之所以使用经纬度来描述这些信息，是因为不同的车辆，包括采集高精地图的测绘车在内，必须使用同一个观测坐标系才能共享观测的信息，而目前世界上最通用的观测坐标系就是由经纬度定义的坐标系，对绝对定位的需求就来自这里。

众所周知，GPS可以为车辆提供精度为米级的绝对定位，差分GPS或RTK GPS可以为车辆提供精度为厘米级的绝对定位，然而并非所有的路段在所有时间都可以得到良好的GPS信号。因此，在自动驾驶领域，RTKGPS的输出一般都要与IMU，汽车自身的传感器（如轮速计、方向盘转角传感器等）进行融合。其中，IMU的全称是Inertial Measurement Unit，即惯性测量单元，通常由陀螺仪、加速剂和算法处理单元组成，通过对加速度和旋转角度的测量得出自体的运动轨迹。我们把传统的IMU和与车身、GPS等信息融合的算法组合在一起的系统称为广义的、针对自动驾驶的IMU。



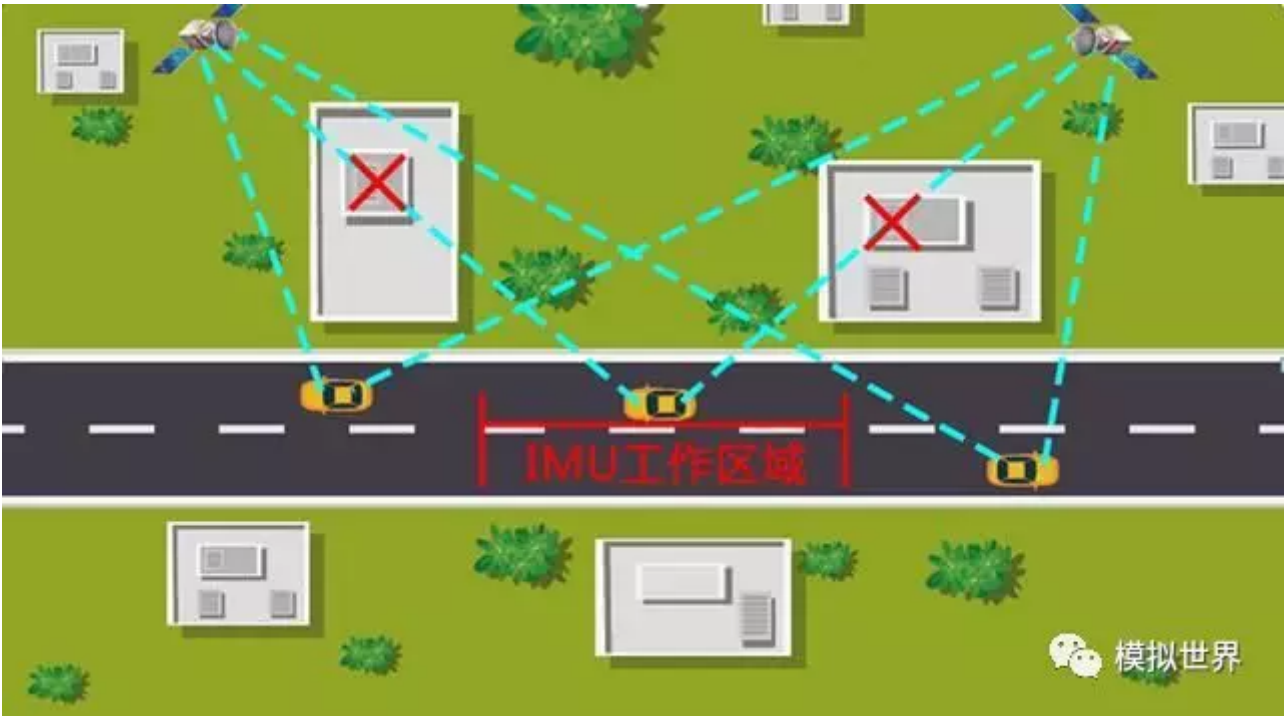
模拟世界

精确测量方向在一系列领域中起着关键作用，包括：航空航天、机器人、导航和人体运动分析和机器交互。虽然多种技术能够测量方位，但基于惯性的感知系统的优点是完全独立，因此测量实体既不受运动限制，也不受任何特定环境或位置的限制。惯性测量单元(IMU)由陀螺仪和加速度计组成，能够跟踪旋转和平移运动。为了进行三维测量，需要由三个相互正交的敏感轴组成的三轴传感器。这也被称为自由度(DoF)，三轴陀螺仪和三轴加速度计集成的IMU称为6DOF IMU。而MARG (磁性，角速度和加速度)传感器是一种混合IMU，它包含三轴磁强计，也被称为九轴IMU（或者9DOF IMU）。6DOF普通IMU就只能测量相对于重力方向的姿态，这对于许多应用来说都是足够的。MARG系统(9DOF IMU)也被称为AHRS(姿态和航向参考系统)，能够提供相对于重力方向和地球磁场的方向的完整测量。方位估计算法是任何IMU或MAG系统的基本组成部分。需要将单独的传感器数据融合到一个单一的、最优的方位估计中。

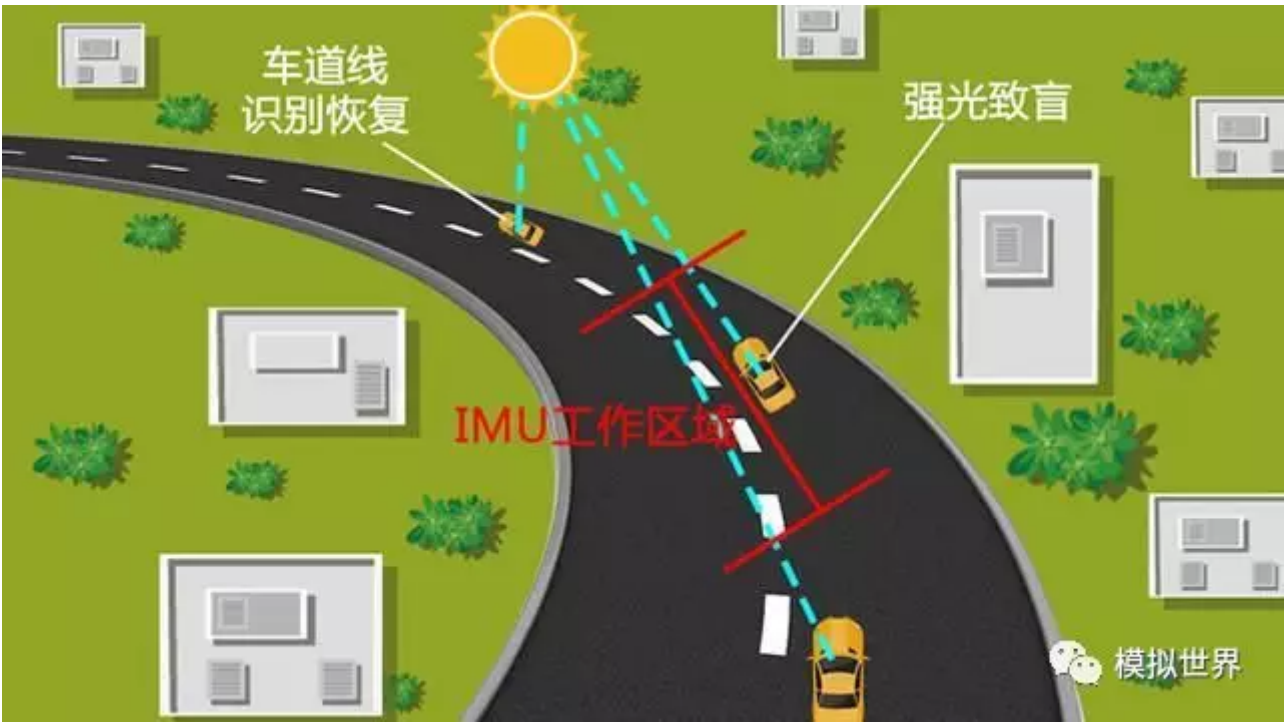
前文介绍了IMU在自动驾驶技术中的重要作用，严格来讲，单纯的IMU只提供相对定位信息，即自体从某时刻开始相对于某个起始位置的运动轨迹和姿态。然而，将IMU的相对定位与RTK GPS的绝对定位进行融合后，就产生了两个无可替代的优点：

（1）IMU可以验证RTK GPS结果的自治性，并对无法自治的绝对定位数据进行滤波和修正；一个简单的例子是，如果RTKGPS输出汽车的绝对位置在短时间内发生了很大的变化，这意味着汽车有很大的加速度，而此时IMU发现汽车并不具备这样的加速度，就表明RTK GPS的定位出了问题，应该由IMU来接管绝对定位系统；（2）IMU可以在RTKGPS信号消失之后，仍然提供持续

若干秒的亚米级定位精度，为自动驾驶汽车争取宝贵的异常处理的时间。同样的道理，IMU也可以在相对定位失效时，对相对定位的结果进行航迹推演，在一段时间内保持相对定位的精度；例如，在车道线识别模块失效时，基于失效前感知到的道路信息和IMU对汽车航迹的推演，仍然能够让汽车继续在车道内行驶。



在上图中，自动驾驶汽车驶入高楼林立区域，失去了卫星信号，无法由GPS提供绝对定位，此时，IMU可以发挥其延续绝对定位的作用，在没有GPS信号的区域为汽车提供绝对定位信息，这些信息包括汽车的实时经纬度和海拔高度，体现了IMU在绝对定位中的作用。



在上图中，自动驾驶汽车通过车道线识别功能确保自身在道路中行驶。在遇到强烈太阳光照射的情况下，车道线识别功能失效。此时，IMU可以发挥其延续相对定位的作用，根据历史记录中的道路曲率与汽车相对于车道边界的历史位置，确保汽车在一段时间内继续行驶在车道中。形象地体现了IMU在相对定位中的作用。

目前，大家对于自动驾驶系统在部分功能单元失效情况下的行为讨论的不多，但一个基本的共识是，功能单元缓慢失效比突然失效更安全，有预警的失效比无意识的失效更安全。IMU与其它相对或绝对定位系统结合使用后，使得定位系统即便失效，也是一个缓慢的、可预警的过程。

这里举一个具体的例子来说明功能单元缓慢而有预警地失效的重要性。假如一辆自动驾驶汽车在有车道线的路上行驶，它对道路边界的判定由高精地图和车道线识别系统通过融合得到，其中高精地图必须配合高精定位才能使用（我们暂时不考虑带有道路指纹的高精地图）。这时汽车进入了高楼林立的区域，GPS失去了信号，由IMU接管绝对定位，同时提供相对于此时此地的相对定位；而车道线识别系统有1%的概率完全找不到任何车道线和道路边界。

那么，在99%的正常情况下，汽车可以切换到车道保持或ACC模式进行安全行驶，在1%的极端状况里，汽车可以根据IMU的相对和绝对定位信息，配合之前感知到的车道线信息和高精地图，安全地减速或停车，并提示人工接管驾驶，在整个过程中可以确保安全。反过来说，如果汽车没有IMU，在同样的情况下，就有1%的概率无法得到自车相对于车道线和道路边界的位置，汽车将完全成为高速奔跑的瞎子，即使急刹车也随时有发生碰撞的危险。在实际系统中，高精地图可以通过标志、道路指纹等方式提供绝对定位，车道线识别也可以基于各种不同传感器，这相当于把上述1%的碰撞概率降低若干个数量级，然而这对于高速场景下的乘用车和商用车来说还远远不够。无论这个概率有多低，都需要有一个技术来最后处理这个概率条件下的极端工况，也就是说需要最后一道安全防线。

为什么自动驾驶系统在定位领域的最后一道防线是IMU，而不是其它技术呢？主要原因有三个。

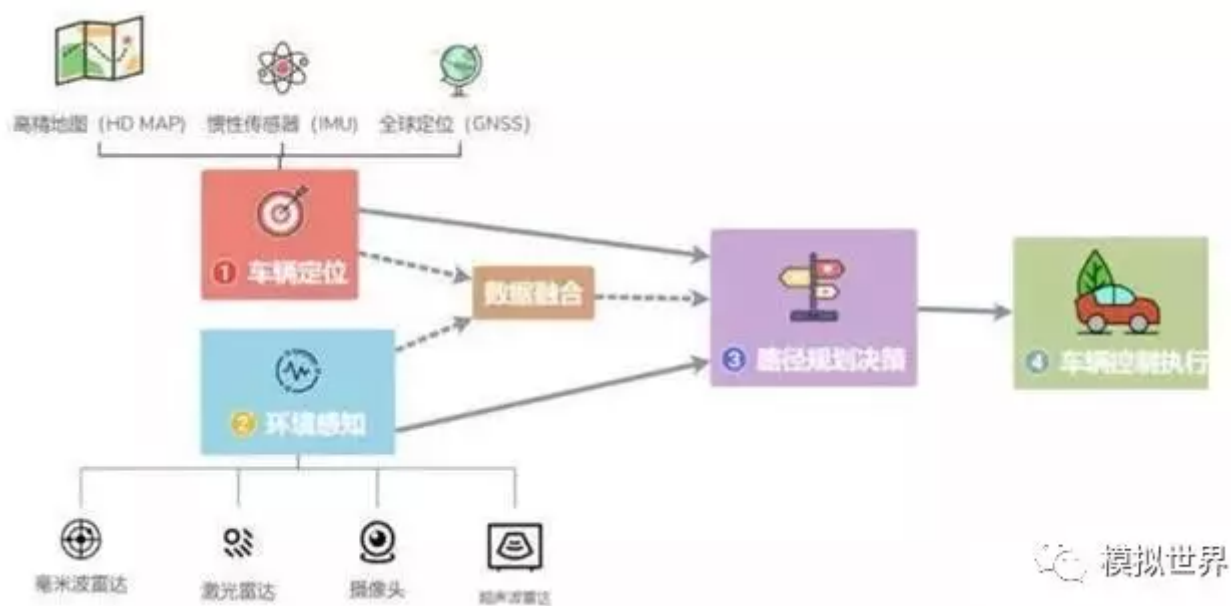
第一，IMU对相对和绝对位置的推演没有任何外部依赖，是一个类似于黑匣子的完备系统；相比而言，基于GPS的绝对定位依赖于卫星信号的覆盖效果，基于高精地图的绝对定位依赖于感知的质量和算法的性能，而感知的质量与天气有关，都有一定的不确定性。**第二**，同样是由于IMU不需要任何外部信号，它可以被安装在汽车底盘等不外露的区域，可以对抗外来的电子或机械攻击；相比而言，视觉、激光和毫米波在提供相对或绝对定位时必须接收来自汽车外部的电磁波或光波信号，这样就很容易被来自攻击者的电磁波或强光信号干扰而致盲，也容易被石子、刮蹭等意外情况损坏。**第三**，IMU对角速度和加速度的测量值之间本就具有一定的冗余性，再加上轮速计和方向盘转角等冗余信息，使其输出结果的置信度远高于其它传感器提供的绝对或相对定位结果。

当然，IMU也有其局限性，主要是价格昂贵。目前市面上主流的、能够在GPS丢失后10秒内提供车道级定位的IMU的价格在数千美元以上，且均为进口，成为除激光雷达之外，自动驾驶汽车的另一个成本瓶颈。值得欣慰的是，国内已经有初创公司致力于研发具有自主知识产权的，针对自动驾驶专用的IMU，有望将其成本降到1万元以下并保持精度不变。

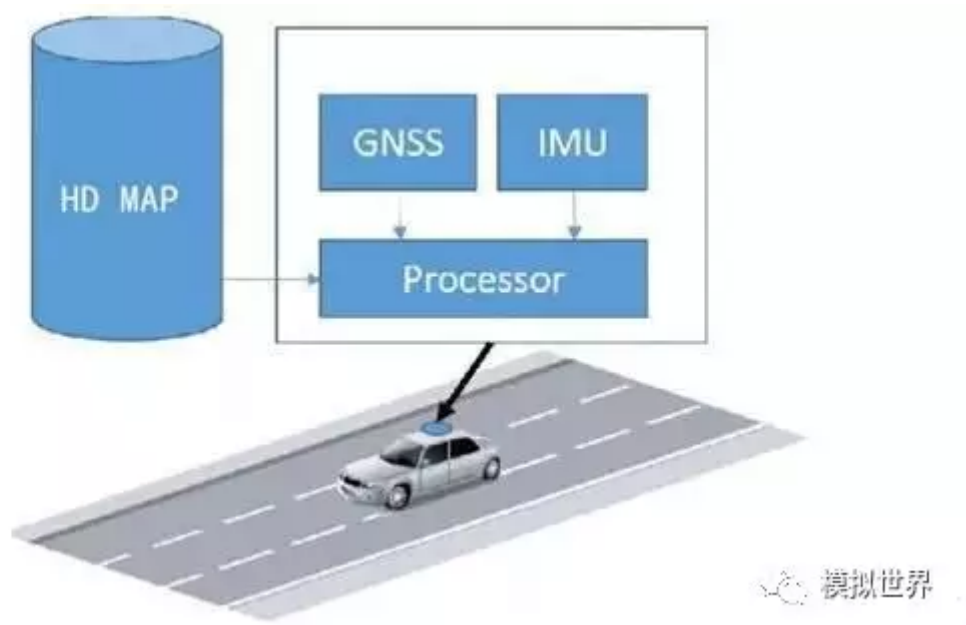
当自动驾驶时代来临，高精地图及高精定位将会成为高级别智能网联汽车的重要配置，高精度IMU也将会成长为一个百亿级的市场。

在自动驾驶纷繁复杂无法穷举的工况中，IMU以其超高的置信度、完全无需外部依赖的特性，以及强大的抗干扰能力，像一颗定海神针，为自动驾驶的定位系统提供最后一道安全保障。

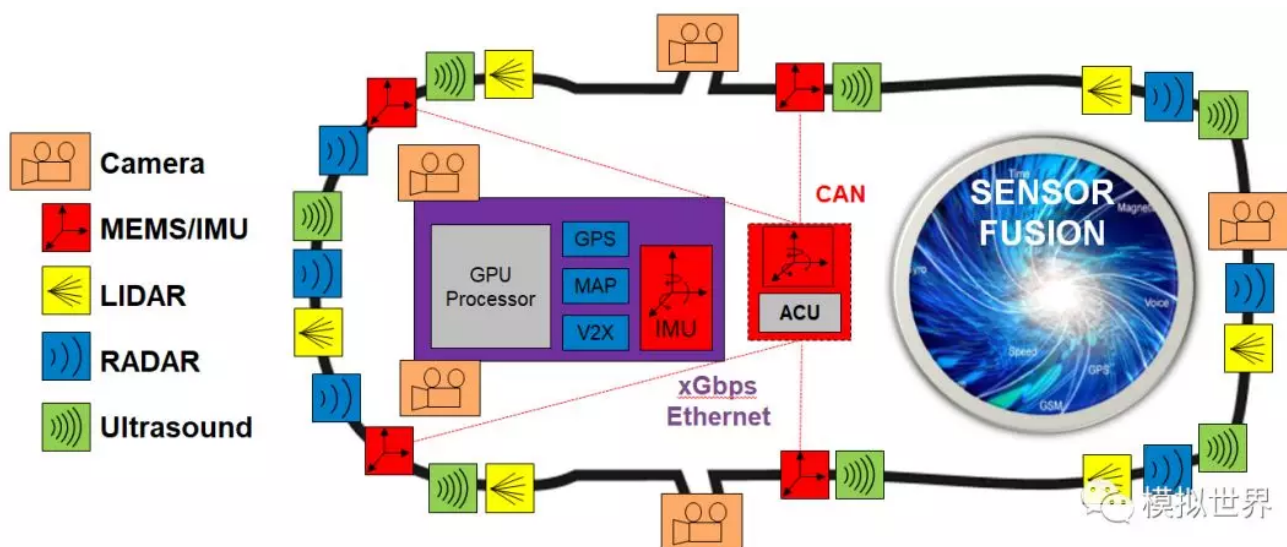
自动驾驶的核心内涵包括定位、感知、决策、执行四个部分，其中定位是决策和执行的前提。定位系统主要作用是确定车辆所处的绝对位置；感知层的主要作用是收集和解析出周围环境的信息；决策层基于对当前位置和周围环境的理解，做出实时的安全有效的执行计划；执行层则是按照决策层的计划进行。



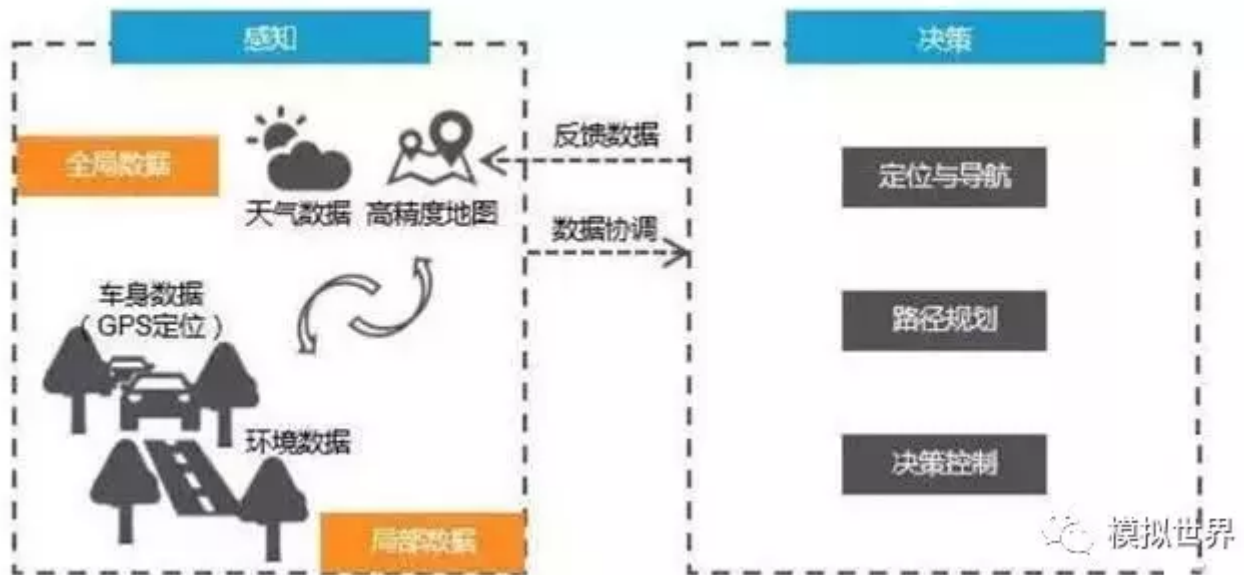
定位系统主要是以高精地图为依托，通过惯性传感器（IMU）和全球定位系统（GNSS），来精确定位车辆所处绝对位置。其中，高精地图可以为车辆环境感知提供辅助，提供超视距路况信息，并帮助车辆进行规划决策。惯导系统是一种不依赖于外部信息、也不向外部辐射能量的自主式导航系统；而全球定位系统是通过卫星定位，在地球表面或近地空间的任何地点，提供三维坐标和速度的定位系统。二者的结合就可以取长补短，共同构成自动驾驶定位导航系统。



感知层主要功能是对环境信息和车内信息进行采集与处理，例如车辆的速度，方向，运动姿态和交通状况等，并向决策层输出信息。这一环节涉及到道路边界检测、车辆检测、行人检测等多种技术，所用到的传感器一般有激光雷达、摄像头、毫米波雷达、超声波雷达等。由于各个传感器在设计的时候有各自的局限性，单个传感器满足不了各种工况下的精确感知，想要车辆在各种环境下平稳运行，就需要运用到多传感器融合技术，该技术也是环境感知这一大类技术的关键所在。



决策层的作用在于接收来自车体自身感知器件以及来自车联网的网络虚拟空间信号，通过整合车载或云端处理结果，替代人类进行决策判断，输出车辆控制信号。例如在车道保持、车道偏离预警、车距保持，障碍物警告中，需要预测本车与其他车辆、车道、行人等在未来一段时间内的状态，并做出下一步动作决策。这项技术相当于自动汽车的“驾驶脑”，以算法为核心，并通过半导体等硬件技术对高速运算提供支持。



执行层主要是在系统做出决策后，替代人类对车辆进行控制，反馈到底层模块执行任务。车辆的各个操控系统都需要能够通过总线与决策系统相链接，并能够按照决策系统发出的总线指令精确地控制加速程度，制动程度以及转向幅度等驾驶动作。

前面已经对自动驾驶的环境感知，实时定位有过介绍，同时也介绍了SLAM定位和用GPS RTK定位。‘RTK+高性能惯性导航+里程计’将会组成一套较为完备的高精度定位系统，当然如果高精度地图能提供地图反馈的功能，甚至基于高精度地图可以判断楼宇桥梁位置，并对卫星信号的遮挡及多路径效应做出提前预判，就能够大幅提高RTK定位精度。