



CS7355

自动驾驶前沿技术

2025年2月20日

第一讲：自动驾驶简介



蔡盼盼 副教授

上海交通大学人工智能学院

研究领域：机器人决策、机器人学习、自动驾驶

邮箱：Cai_panpan@sjtu.edu.cn





蔡盼盼

上海交通大学
上海创智学院

教育背景

2007 - 2011	浙江大学	学士
2011 - 2016	新加坡南洋理工大学	博士

工作经历

2017 - 2020	新加坡国立大学	博士后
2021 - 2022	新加坡国立大学	高级博士后
2022.8 至今	上海交通大学	副教授、博导
2024.9 至今	上海创智学院	全时导师

2022 上海市领军人才（海外）

2023 海外优青

编委 (Associate Editor)

IEEE Transactions on Robotics (**T-RO 2024-2027**) (**中国大陆在职仅7人**)

IEEE International Conference on Robotics and Automation (**ICRA 2023**)

会议组织 (Main Organizer)

首届中国具身智能大会 (CEAI 2024) **组织委员会主席 (1/2)**

RSS Workshop on Integrating Planning and Learning (**2021 RSS融合规划与学习研讨会**)

- 嘉宾: Leslie Kaelbling (麻省理工)、Dieter Fox (华盛顿大学)、Nicholas Roy (麻省理工)、Chelsea Finn (斯坦福) 等, 与 Danny Driess (PaLM-E第一作者) 共同主办。

程序委员会成员 (PC Member)

Robotics: Science & Systems (**RSS 2020**)

Conference on Robot Learning (**CoRL 2019**)

International Conference on Automated Planning and Scheduling (**ICAPS 2022**)

自动驾驶如何达到人类级别决策能力？

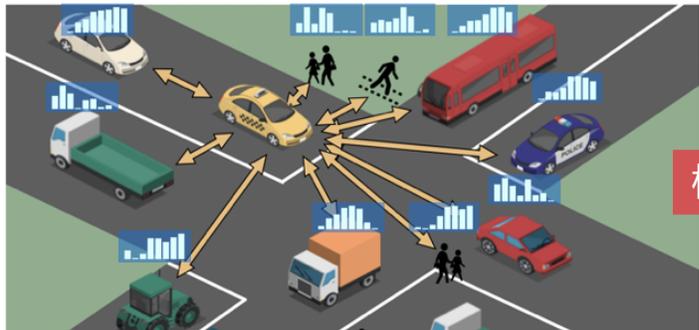
- 与大规模场景交互
- 长远决策
- 实时响应



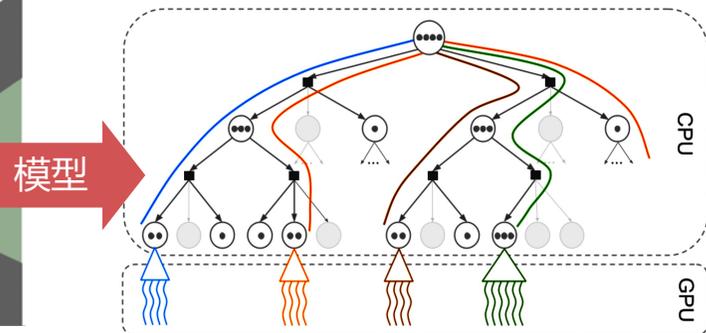
What I have Done ...

基础算法

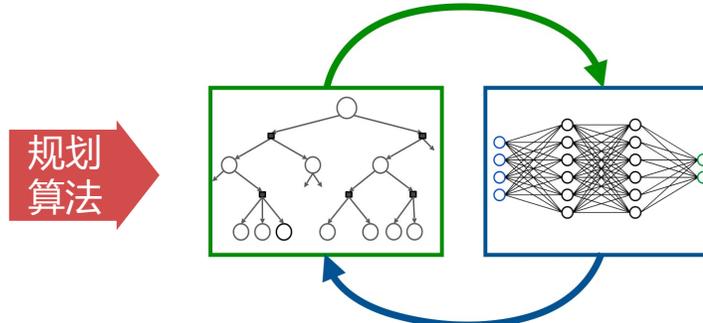
人类行为不确定性建模



不确定性下的决策规划

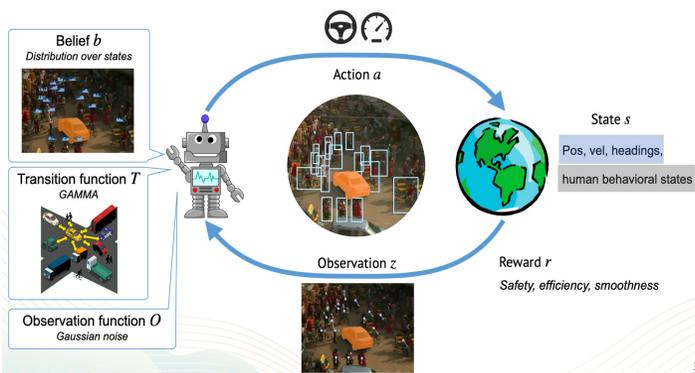


融合规划与学习



自动驾驶

Urban-Driving POMDP



Driving in a Crowd



Driving in Africa!



什么是自动驾驶

ChatGPT 4o :

自动驾驶 (Autonomous Driving) 指的是车辆在**无人工干预**或仅需**最低限度人工干预**的情况下, 能够自主**感知环境、决策规划、控制执行**, 完成安全行驶的技术。自动驾驶技术可分为L1-L5五个等级。

以下是否为自动驾驶功能？

- ① 刹车辅助系统（ABS）-- 防止车辆在紧急刹车时车轮抱死
- ① 定速巡航 -- 保持设定速度行驶
- ① 自动交通标志提醒 -- 提醒驾驶员相关限速或道路信息
- ① 自动紧急制动 -- 前方碰撞风险时，主动刹车
- ① 车道保持辅助 -- 调整方向盘保持车辆在车道中心线
- ① 自适应巡航 -- 根据前车距离自动调整速度，保持跟车距离
- ① 自动泊车 -- 自主检测停车位，完成泊车操作
- ① 交通拥堵巡航 -- 在低速拥堵路况下自动跟车行驶
- ① 高速自动巡航 -- 在高速路上自动变道、超车、上下匝道
- ① 无人配送小车 -- 自主进行短距离配送（含非道路场景）
- ① 机器人出租车（Robotaxi） -- 完全无人驾驶的自动出租车

自动驾驶分级

	L0	L1	L2	L3	L4	L5
	完全人类驾驶	辅助驾驶	部分自动驾驶	有条件的自动驾驶	高度自动驾驶	完全自动驾驶
驾驶员	 <p>必须完成所有驾驶操作。</p>	 <p>必须完成所有驾驶操作，但在某些情况下能够获得辅助。</p>	 <p>车辆可以承担一些基本的驾驶任务，但驾驶员必须随时准备接管车辆。</p>	 <p>当功能请求时，驾驶员必须接管车辆。</p>	 <p>当系统无法继续运行时，驾驶员需要在接到通知后接管车辆。</p>	 <p>无需驾驶员，方向盘可有可无。坐在L5级别的自动驾驶汽车中，每个人都是乘客。</p>
车辆	<p>仅能对驾驶员的指令做出响应，但可以提供有关环境的警报。</p>	<p>可以提供诸如紧急情况下自动制动或车道偏离修正等基本辅助功能。</p> 	<p>在某些特定情况下，能够自动转向、加速和制动。</p> 	<p>在某些特定情况下，可完全自动转向、加速和制动。</p> 	<p>可在大多情况下承担全部驾驶任务，而无需驾驶员干预。</p> 	<p>能够在所有情况下承担全部驾驶任务，无需驾驶员干预。</p> 

数据来源：美国汽车工程师协会(SAE)；美国国家公路交通安全管理局(NHTSA)。

版权所有© 2018英特尔公司。保留所有权利，英特尔和英特尔标识是英特尔公司在美国和其他国家(地区)的商标。



以下功能的自动驾驶分级？

- ① 刹车辅助系统（ABS）？
- ① 定速巡航？
- ① 自动交通标志提醒？
- ① 自动紧急制动？
- ① 车道保持辅助？
- ① 自适应巡航？
- ① 自动泊车？
- ① 交通拥堵巡航？
- ① 高速自动巡航？
- ① 无人配送小车？
- ① 机器人出租车（Robotaxi）？



数据来源：美国汽车工程师协会(SAE)；美国国家公路交通安全管理局(NHTSA)。
版权所有© 2018英特尔公司。保留所有权利。英特尔和英特尔标识是英特尔公司在美国和其他国家（地区）的商标。



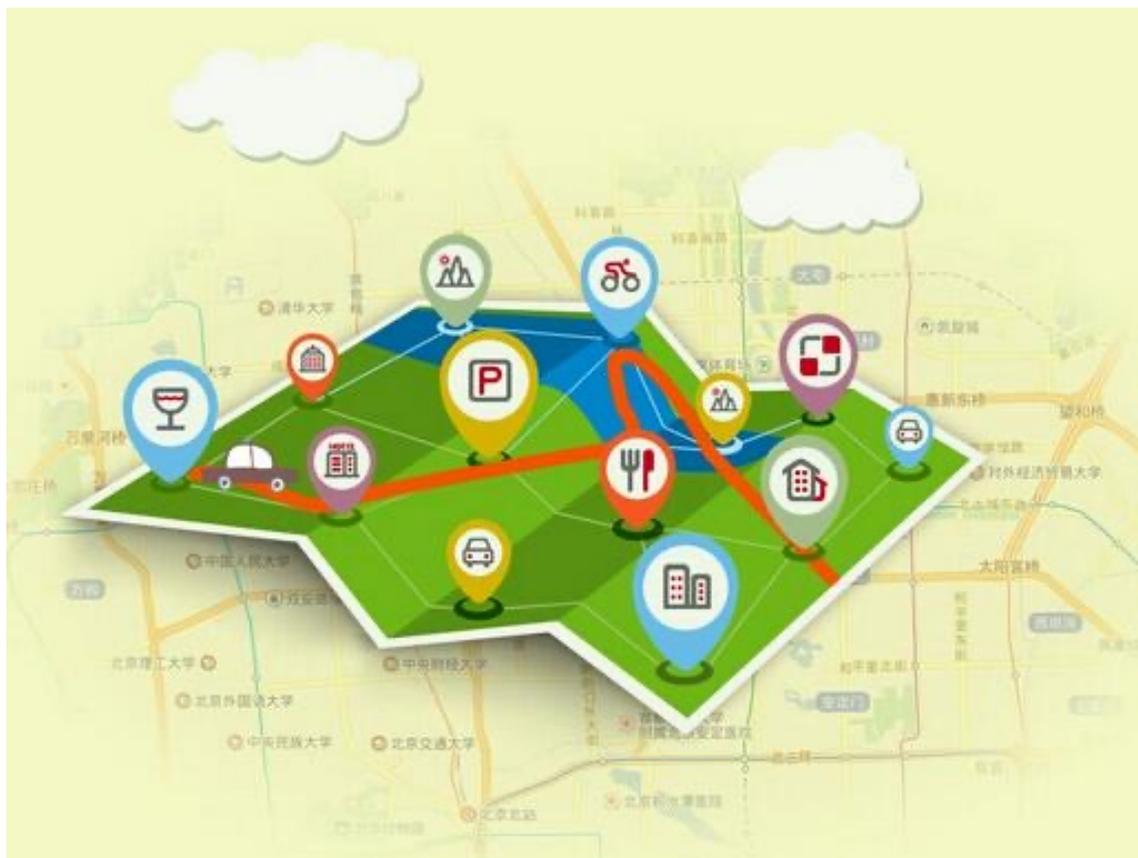
主要术语与定义

以下术语来自我国《汽车驾驶自动化分级》标准（GB/T 40429-2021）

④ 策略性功能（Strategic functions）

驾驶车辆所需的高层次决策，包括：

- 行程规划
- 目的地选择
- 路径选择
- ...



主要术语与定义

以下术语来自我国《汽车驾驶自动化分级》标准（GB/T 40429-2021）

④ 动态驾驶任务 dynamic driving task（DDT）

驾驶车辆所需的（实时）感知、决策和执行等行为，包括：

- 操作功能（Operational functions）：
 - 车辆横向运动控制
 - 车辆纵向运动控制
 - 车辆照明及信号装置控制
- 战术功能（Tactical functions）：
 - 目标和事件探测与响应（OEDR）
 - 驾驶行为决策
 - ...

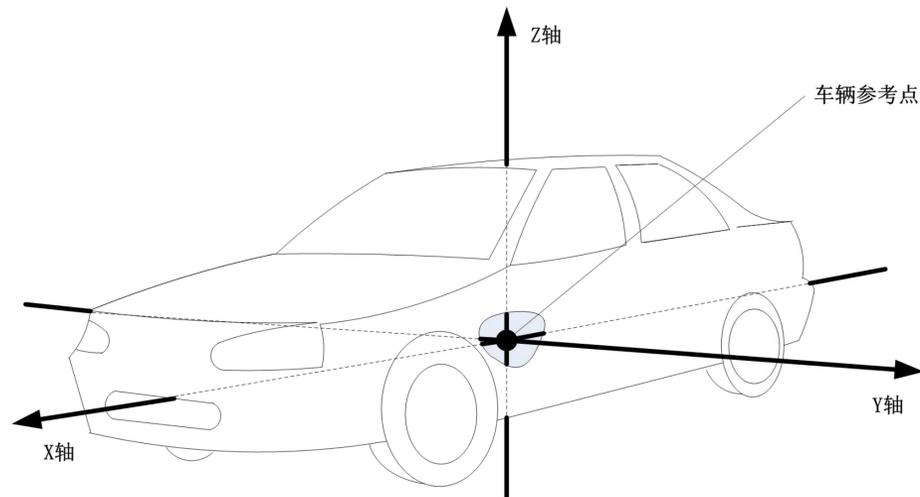
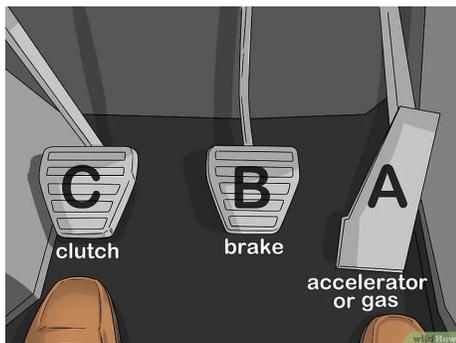


主要术语与定义

以下术语来自我国《汽车驾驶自动化分级》标准（GB/T 40429-2021）

① 车辆纵向运动控制 longitudinal control

沿着 X 轴实时、持续的车辆运动控制

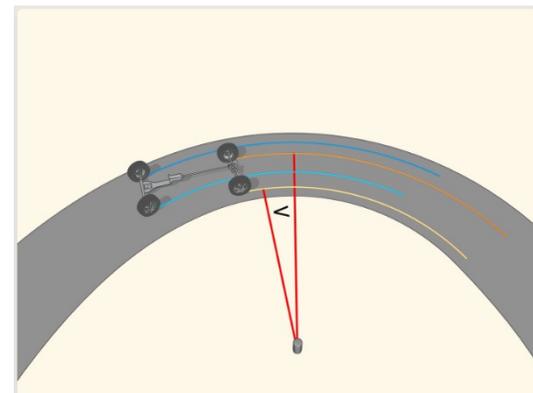
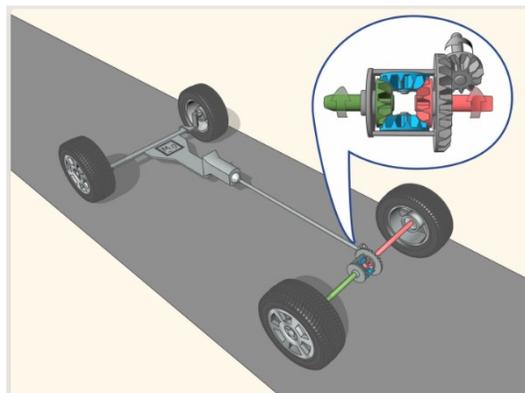


② 车辆横向运动控制 lateral control

沿着 Y 轴实时、持续的车辆运动控制



转向轨迹？



主要术语与定义

以下术语来自我国《汽车驾驶自动化分级》标准（GB/T 40429-2021）

④ 目标和事件探测与响应 object and event detection and response (OEDR)

对目标和事件进行探测，并进行适当的响应

- **车辆**

- 邻车、前车、后车、切入/切出车辆，汇入/汇出车辆、逆行车、校车、应急车等

- **弱势交通参与者（VRU）**

- 行人、轮椅、自行车、摩托车等

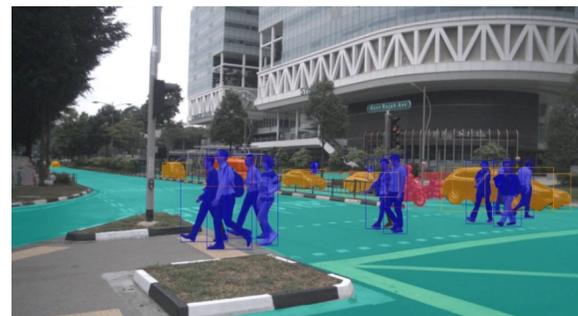
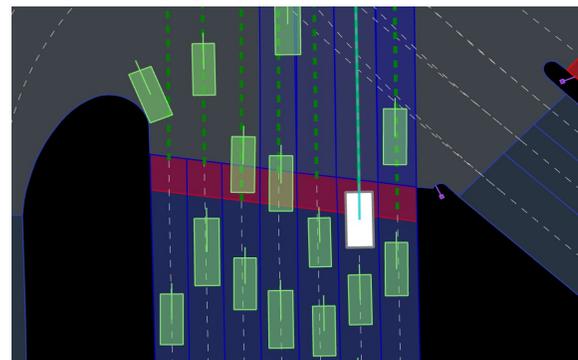
- **交通管制装置和基础设施**

- 交通信号灯、交通标志、人行横道和车道标记等

- **静态障碍物**

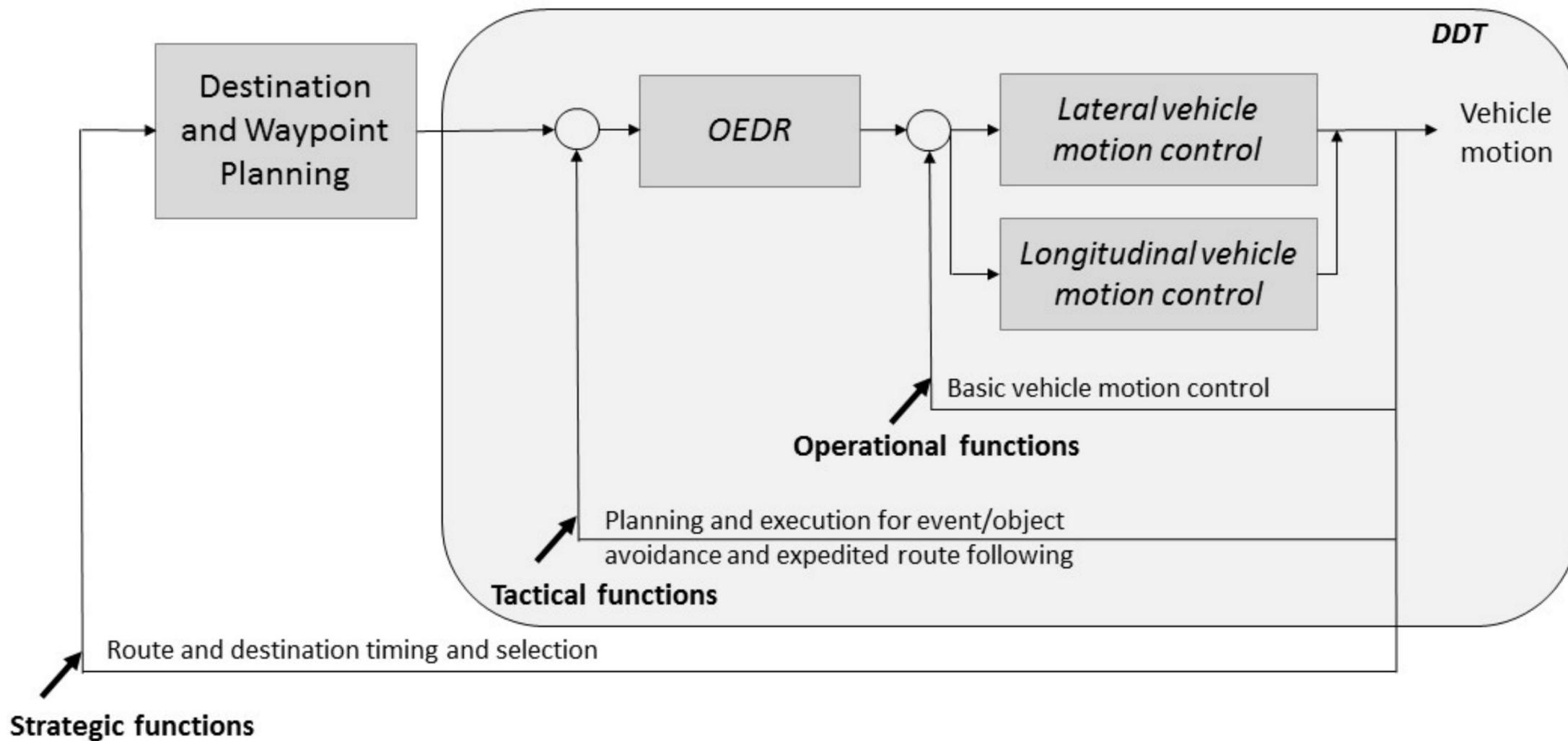
- 乱停放的车辆、警示牌、路锥、施工区域等

- **动物**



主要术语与定义

以下术语来自我国《汽车驾驶自动化分级》标准（GB/T 40429-2021）



图片来自《SAE-J3016》标准

主要术语与定义

以下术语来自我国《汽车驾驶自动化分级》标准（GB/T 40429-2021）

④ 设计运行条件 operational design condition (ODC)

设计运行时确定的驾驶自动化功能可以正常工作的条件，包括**设计运行范围**、**驾驶员状态**以及其他必要条件

④ 最小风险状态 minimal risk condition (MRC)

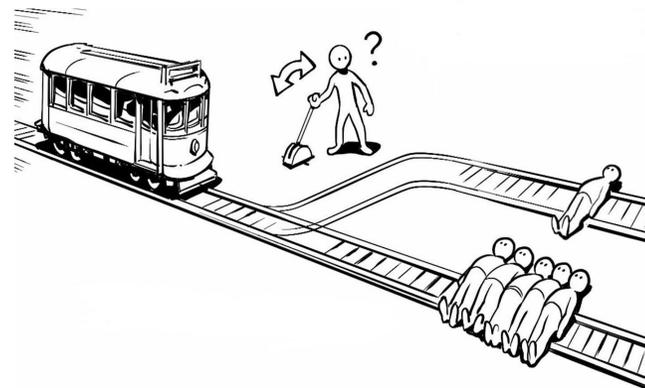
当车辆无法完成预定的行程时，由用户或系统执行并最终使车辆**事故风险达到可接受的状态**

④ 动态驾驶任务接管 dynamic driving task fallback

当发生驾驶**自动化系统失效**、车辆**其他系统失效**或即将**不满足设计运行条件**时：

- 由用户执行动态驾驶任务
- 由用户使车辆达到最小风险状态
- 由驾驶自动化系统使车辆达到最小风险状态

电车难题？



驾驶自动化等级划分要素

④ 基于如下 5 个要素对驾驶自动化等级进行划分：

- 系统是否**持续**执行动态驾驶任务中的车辆横向**或**纵向运动控制
- 系统是否**同时**持续执行动态驾驶任务中的车辆横向**和**纵向运动控制
- 系统是否**持续**执行动态驾驶任务中的**目标和事件探测与响应**
- 系统是否执行**动态驾驶任务接管**
- 系统是否存在**设计运行条件限制**



SAE J3016™ 自动驾驶等级

SAE
LEVEL 0

SAE
LEVEL 1

SAE
LEVEL 2

SAE
LEVEL 3

SAE
LEVEL 4

SAE
LEVEL 5

驾驶员
坐在驾驶座上
需要做些什么？

无论何时使用驾驶辅助功能,您必须处于驾驶状态
即使双脚离开踏板,也没有控制方向盘

您必须时刻观察各种情况
您需要主动制动、加速或者转向,确保安全

当使用自动驾驶功能,您无需驾驶汽车
您仅仅是坐在“驾驶座”上

当功能请求时,
您必须驾驶汽车

这些自动驾驶功能
不需要您接管驾驶

具有哪些
功能特征？

仅提供警告
以及瞬时辅助

能够制动、
加速 **或** 转向,
辅助驾驶

能够制动、
加速 **和** 转向,
辅助驾驶

以下是自动驾驶功能

可以在有限制的条件下
驾驶车辆,
除非满足所有条件,
否则不会运行

可以在
任何条件下
驾驶车辆

答案：以下是否为自动驾驶功能？

- | | |
|-------------------------|-------|
| ④ 刹车辅助系统 (ABS) ? | 否 |
| ④ 定速巡航 ? | 否 |
| ④ 自动交通标志提醒 ? | L0 |
| ④ 自动紧急制动 ? | L0 |
| ④ 车道保持辅助 ? | L1 |
| ④ 自适应巡航 ? | L1 |
| ④ 自动泊车 ? | L2 |
| ④ 交通拥堵巡航 ? | L2/L3 |
| ④ 高速自动巡航 ? | L3 |
| ④ 无人配送小车 ? | L4 |
| ④ 机器人出租车 (Robotaxi) ? | L4 |

国际/国内分级名称

	国际标准	国内标准（正式）	国内标准（非正式）
L0	无自动化	应急辅助	-
L1	辅助驾驶	部分驾驶辅助	DA-驾驶辅助
L2	部分自动驾驶	组合驾驶辅助	DA-驾驶辅助
L3	有条件自动驾驶	有条件自动驾驶	PA-部分自动驾驶
L4	高度自动驾驶	高度自动驾驶	HA-高度自动驾驶
L5	完全自动驾驶	完全自动驾驶	Fa-完全自动驾驶

- 国际分级由美国国家公路交通安全管理局（NHTSA）和国际自动化工程师学会（SAE International）制定
- 国内分级（正式）来自我国《汽车驾驶自动化分级》标准（GB/T 40429-2021）
- 国内分级（非正式）来自《中国制造2025》

L0：应急辅助

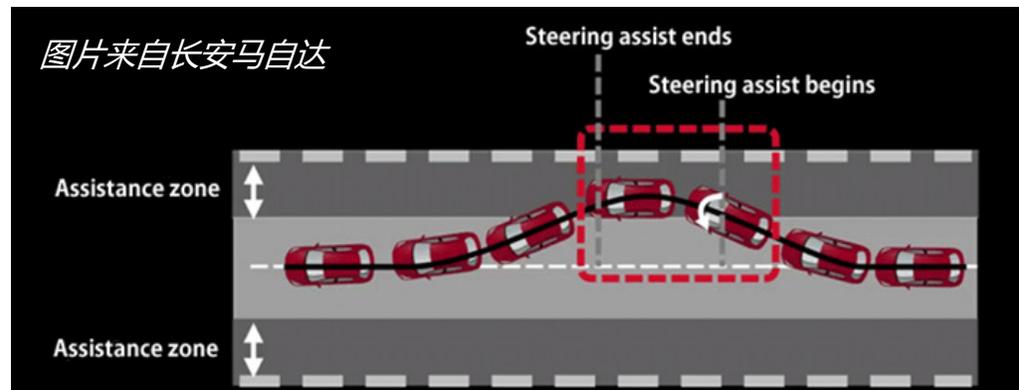
④ **定义**：驾驶自动化系统**不能持续执行**车辆横向或纵向运动控制，但具备**持续执行部分目标和事件探测与响应**的能力

- 车辆可以对驾驶员发出警报
- 车辆可以对驾驶员指令做出响应
- 车辆可以对紧急情况做出响应

L0：应急辅助

范例：

- 车道偏离预警
- 前向碰撞预警
- 车道偏离抑制
- 自动紧急制动系统（AEB）



资料来源：智车科技，国联证券研究所



资料来源：智车科技，国联证券研究所

L1：部分驾驶辅助

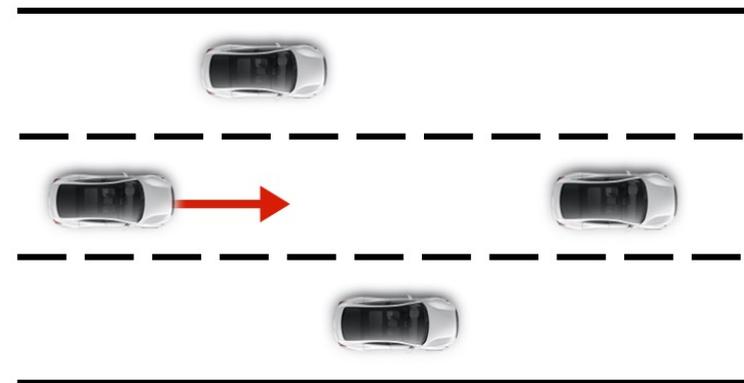
④ **定义**：驾驶自动化系统在其**设计运行条件内持续地**执行**车辆横向或纵向运动控制**，且具备**相应**的部分**目标和事件探测与响应能力**

- 车辆对方向盘和加减速中的一**项**操作提供自动化
- 人类驾驶员负责其余的驾驶动作
- 驾驶员必须**随时**准备接管车辆

L1：部分驾驶辅助

🚗 范例：自适应巡航 Adaptive Cruise Control (ACC)

- 控制**车辆速度** (v, a)
- 未检测到前方有车辆时，保持**设定速度** (v_0)
- 检测到前方有车辆时，调整车速以保持**设定跟车距离** (s_0)
- 用户踩油门并松开时停止自动控制
-

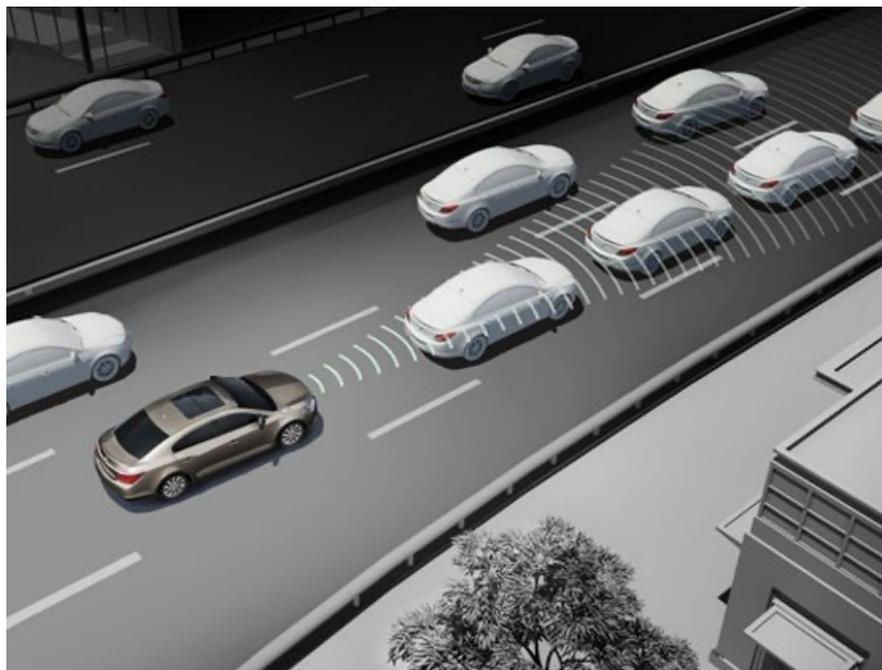


难度？

L1硬件

范例：自适应巡航（ACC）传感器

- 超声波雷达（中距、范围约160m）

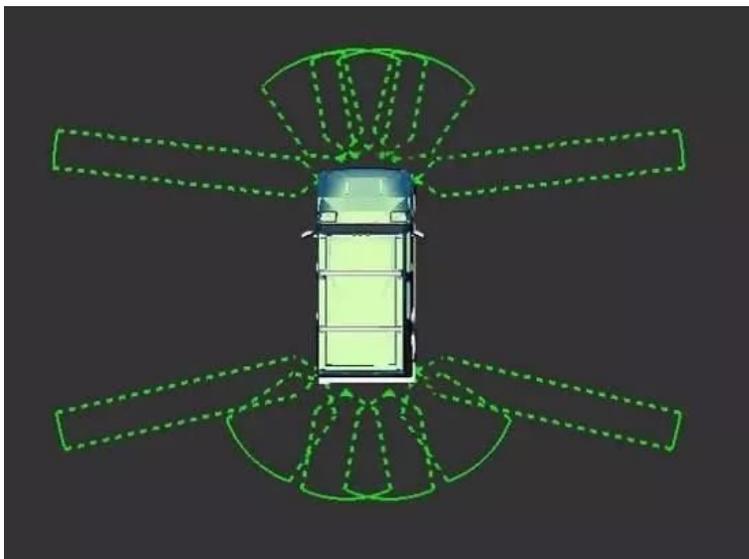


图片来自大众

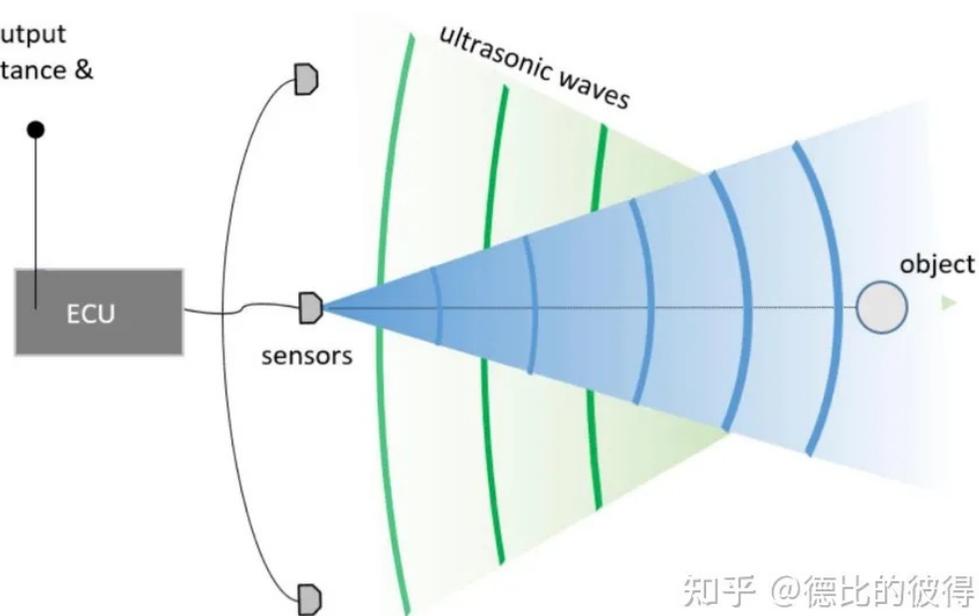
自动驾驶传感器I

④ 超声波雷达 (Radar)

- ✓ 成本低 (数十元)
- ✓ 能量消耗小，在介质中传播的距离比较远，穿透性强
- 数据少、精度低，精度受物体材质、环境温度影响较大



CAN input/output
including distance &
object data



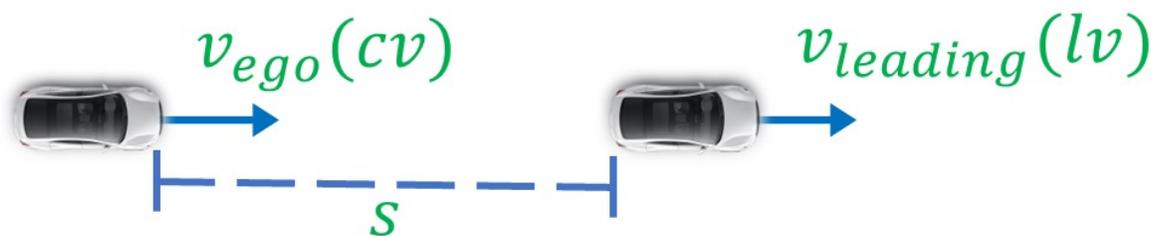
知乎 @德比的彼得



L1软件

控制：自适应巡航（ACC）中的加速度控制

Intelligent Driver Model (IDM)



```
1 def idm_acc(cv, lv, s, des_v, min_s, th, a, b, delta):
2
3     s_star = min_s + cv * th + (cv * (cv - lv)) / (2 * (a * b)**0.5)
4     acc = a * (1 - (cv / des_v)**delta - (s_star / s)**2)
5
6     return acc
```

$$\frac{dv_{\alpha}}{dt} = a \left[1 - \left(\frac{v_{\alpha}}{v_0} \right)^{\delta} - \left(\frac{s^*(v_{\alpha}, \Delta v_{\alpha})}{s_{\alpha}} \right)^2 \right]$$

L2：组合驾驶辅助

④ **定义**：驾驶自动化系统在其**设计运行条件内持续**地执行**车辆横向和纵向运动控制**，且具备**相应**的部分**目标和事件探测与响应的能力**

- 车辆对方向盘和加减速中的**多项**操作提供自动化
- 人类驾驶员负责其余的驾驶动作
- 驾驶员必须随时准备接管车辆

④ **(先前) L1定义**：

- 车辆对方向盘和加减速中的**一项**操作提供自动化
- 人类驾驶员负责其余的驾驶动作
- 驾驶员必须随时准备接管车辆



L2：组合驾驶辅助

④ 范例：车道保持辅助（LKAS）+ 自适应巡航（ACC）

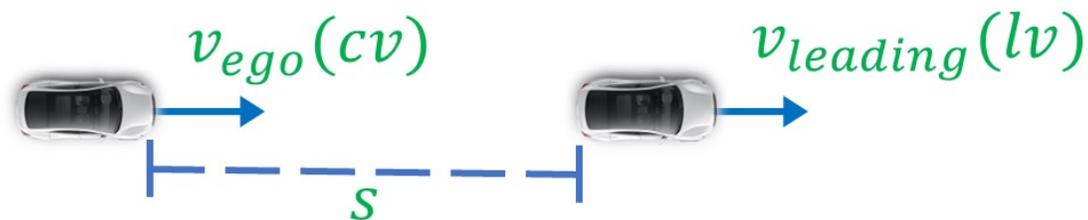
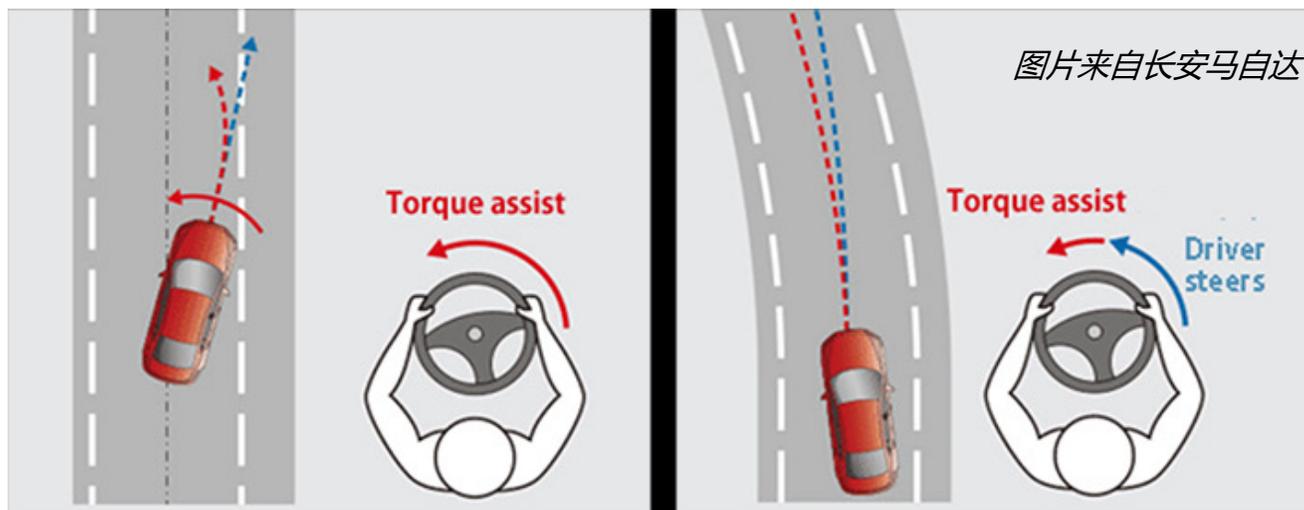
④ 设计运行条件：

- 直/弯道-车道内行驶

④ 动态驾驶任务：

- 横向控制：LKAS跟踪车道中心线
- 纵向控制：ACC保持车距

难度？



L2硬件

🚗 范例：车道保持辅助（LKAS）传感器

- 摄像头

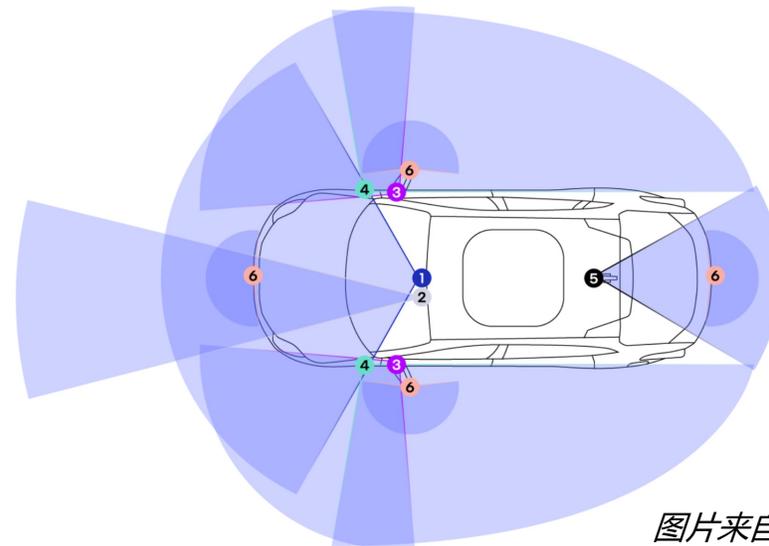


图片来自汽车之家

自动驾驶传感器II

摄像头 (Camera)

- ✓ 技术成熟，价格便宜 (150-500元)
- ✓ 图像信息包含丰富的色彩、纹理、轮廓、亮度信息
- 容易受天气、光照、遮挡等干扰

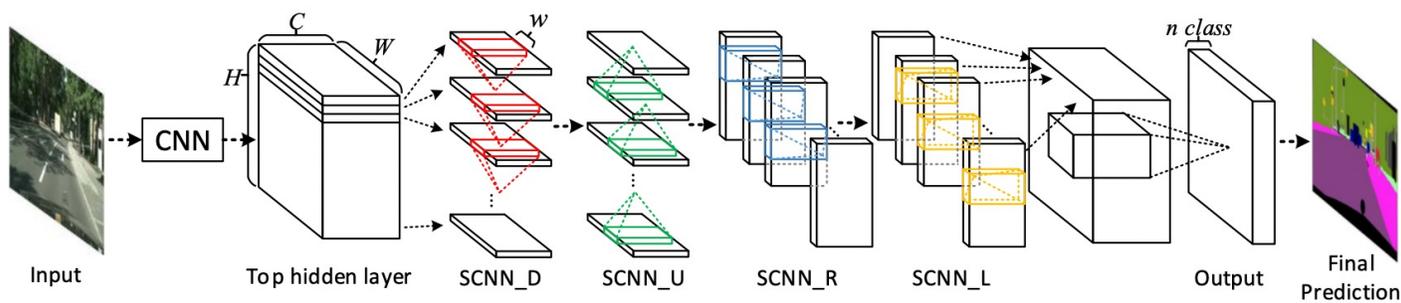
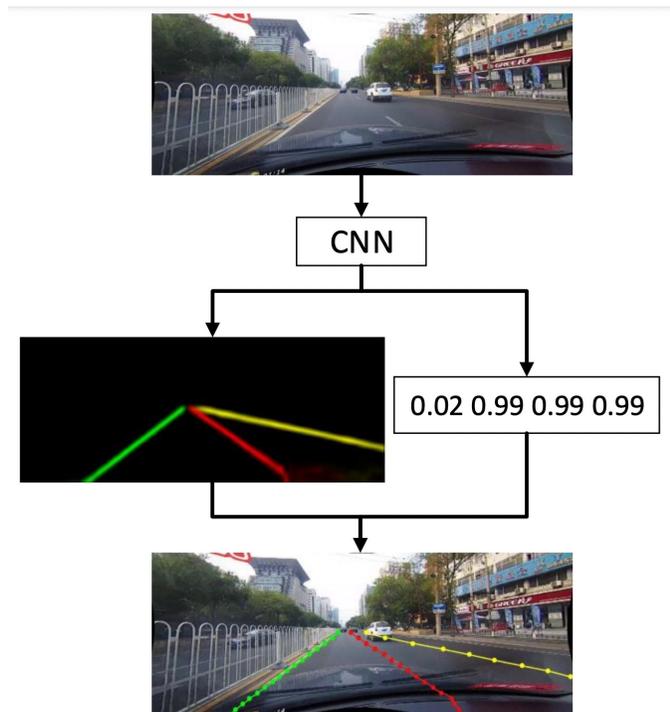


图片来自mobileye



L2软件

感知：车道保持辅助（LKAS）中的车道线检测



蓝 - 左道左线
绿 - 当前道左线
红 - 当前道右线
黄 - 右道右线



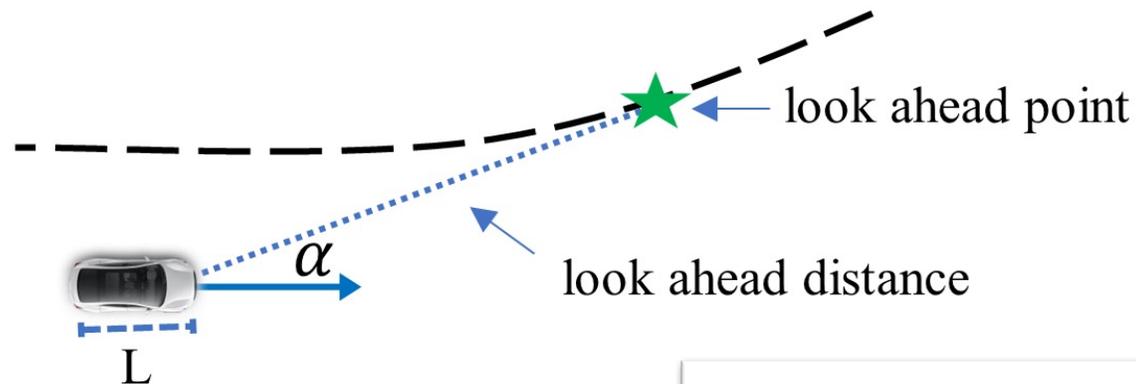
Spatial Convolutional Neural Network (SCNN)

L2软件

控制：车道保持辅助（LKAS）中的方向盘控制

纯追踪算法

Pure-Pursuit Algorithm



```
1 import numpy as np
2
3 def calculate_steering_angle(current_position, current_heading, lookahead_point):
4
5     dx = lookahead_point[0] - current_position[0]
6     dy = lookahead_point[1] - current_position[1]
7
8     angle_to_target = np.arctan2(dy, dx)
9     steering_angle = angle_to_target - current_heading
10
11     steering_angle = np.arctan2(np.sin(steering_angle), np.cos(steering_angle))
12
13     return steering_angle
```

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{2L \sin \alpha}{l_d} \right)$$

L2进展：先进驾驶辅助系统（ADAS）

🌐 国际：特斯拉Autopilot（2021，L2+）

Video Guides Home / Vehicle

Autopilot | Meet Your Model 3



L2+

自适应巡航

车道保持

自动紧急刹车

自动变道

自动泊车

...

L3：有条件自动驾驶

④ **定义**：驾驶自动化系统在其**设计运行条件内持续地**执行**全部动态驾驶任务**

- 由车辆**自动检测环境**，并完成**绝大部分**驾驶操作
- **发出接管请求**时，人类驾驶员必须接管车辆

④ **(先前) L2定义**：

- 车辆对方向盘和加减速中的**多项**操作提供自动化
- 人类驾驶员负责其余的驾驶动作
- 驾驶员必须**随时**准备接管车辆



L3：有条件自动驾驶

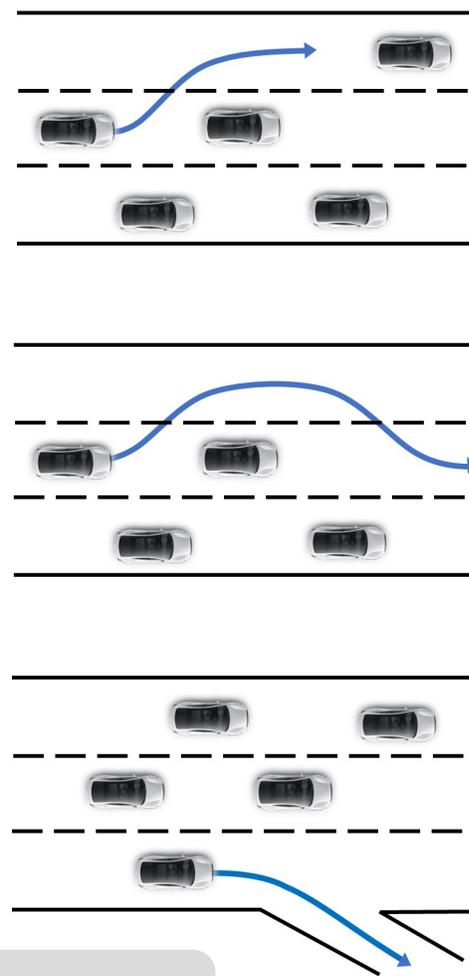
④ 范例：高速路自动驾驶 High Way Pilot (HWP)

④ 设计运行条件：

- 高速、高架路

④ 动态驾驶任务：

- 车道追踪、自适应巡航
- **自主变道** (决策+执行)
- **自主超车** (决策+执行)
- **自主上下匝道** (决策+执行)
-

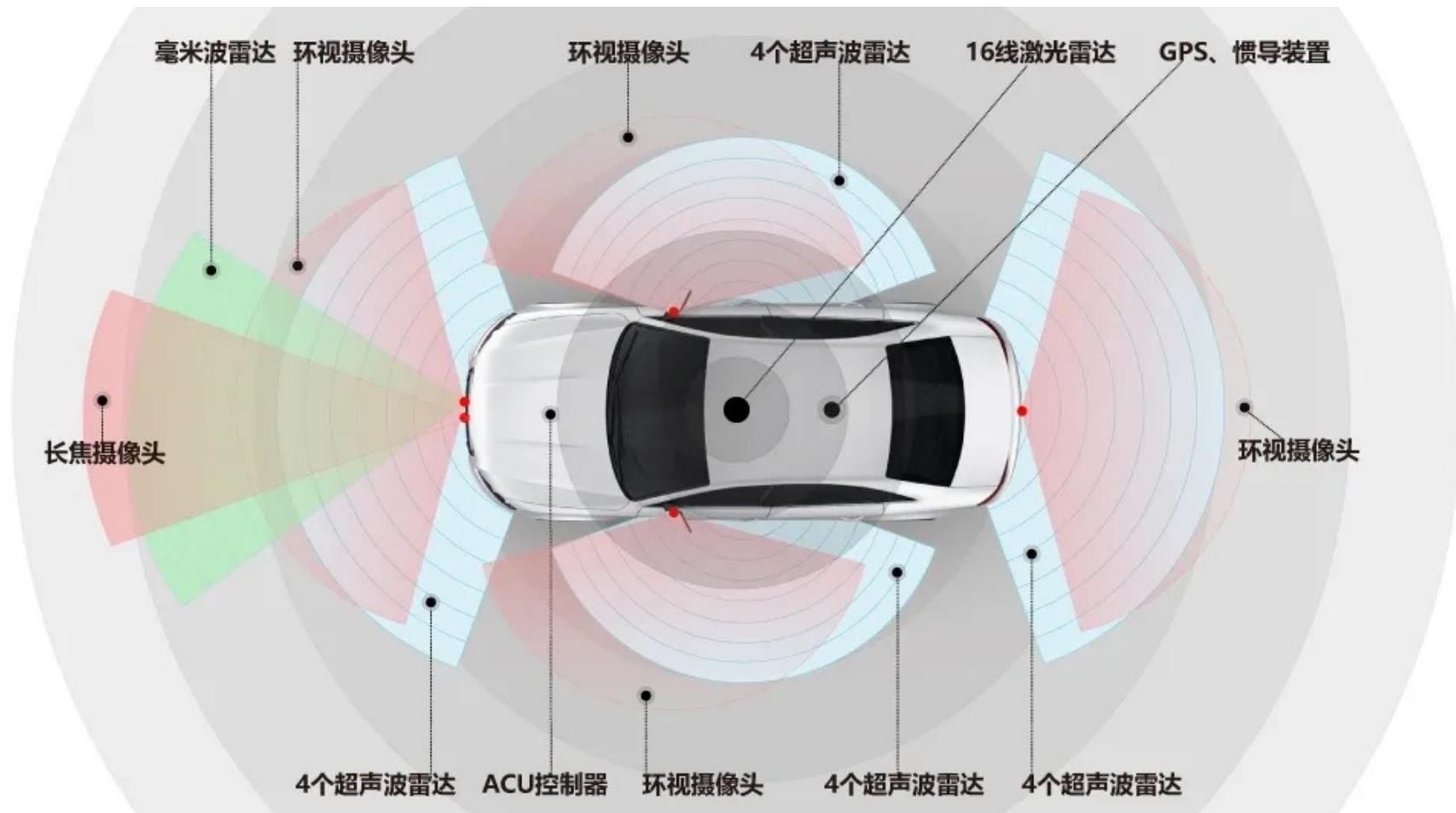


难度？

L3硬件

④ 传感器：

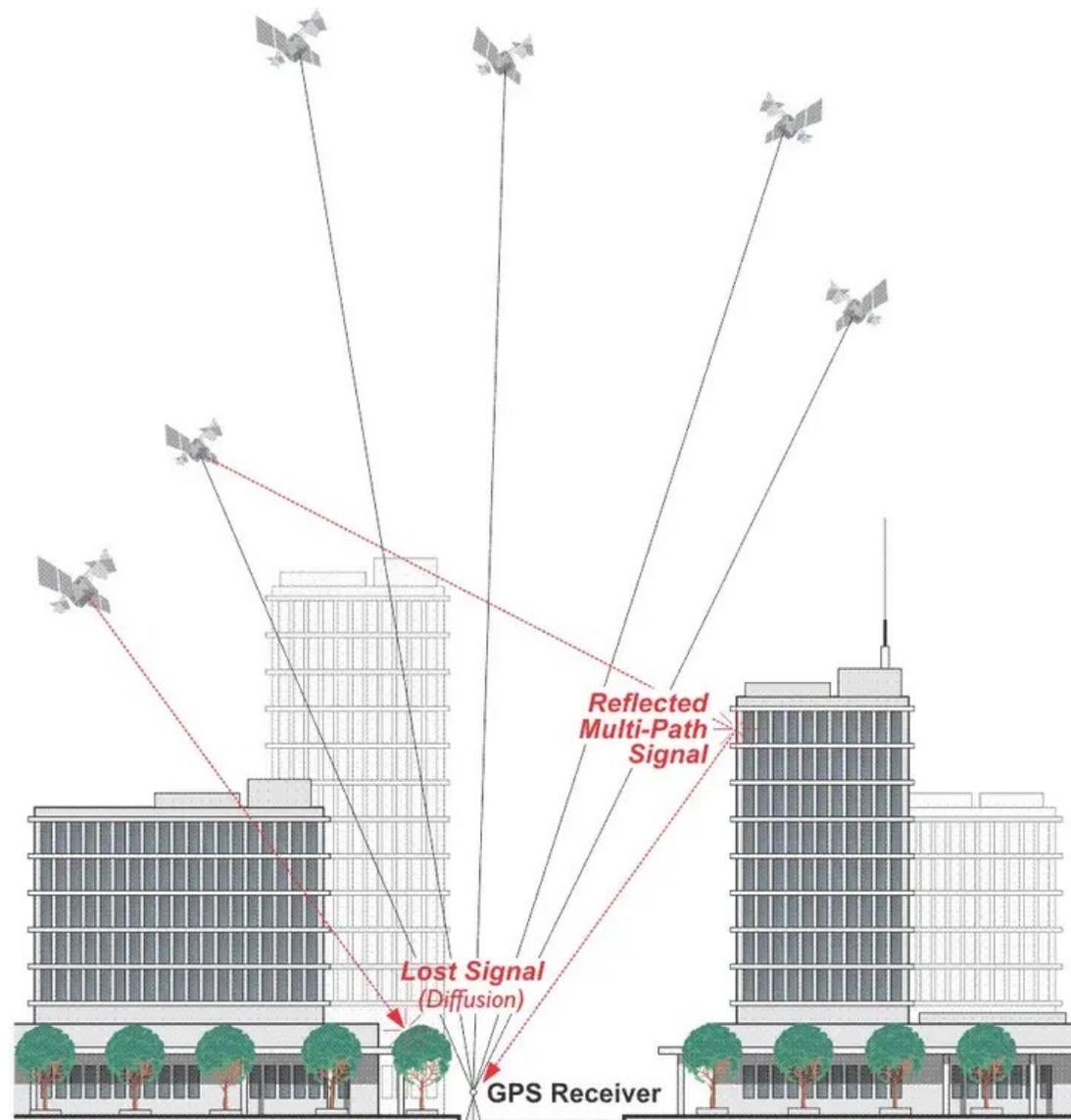
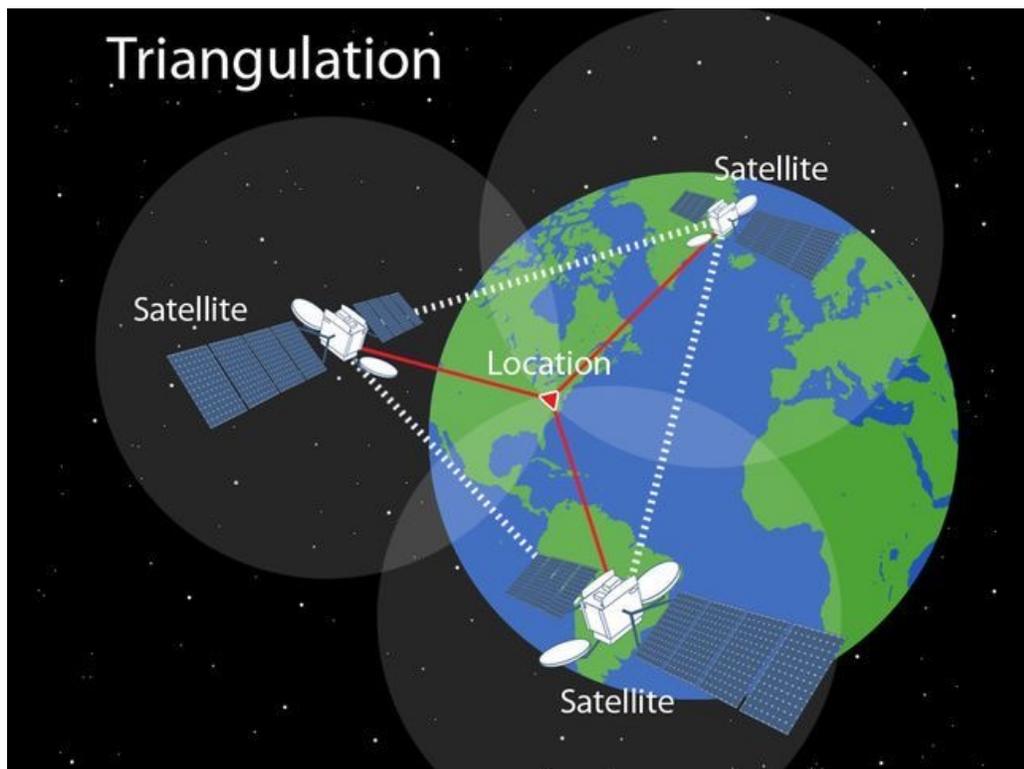
- 超声波雷达
- 长焦摄像头
- 环视摄像头
- GPS定位仪
- 毫米波雷达 (可选)
- 激光雷达 (可选)
- 高精度地图 (可选)



自动驾驶传感器III

GPS定位仪 (Global Positioning System)

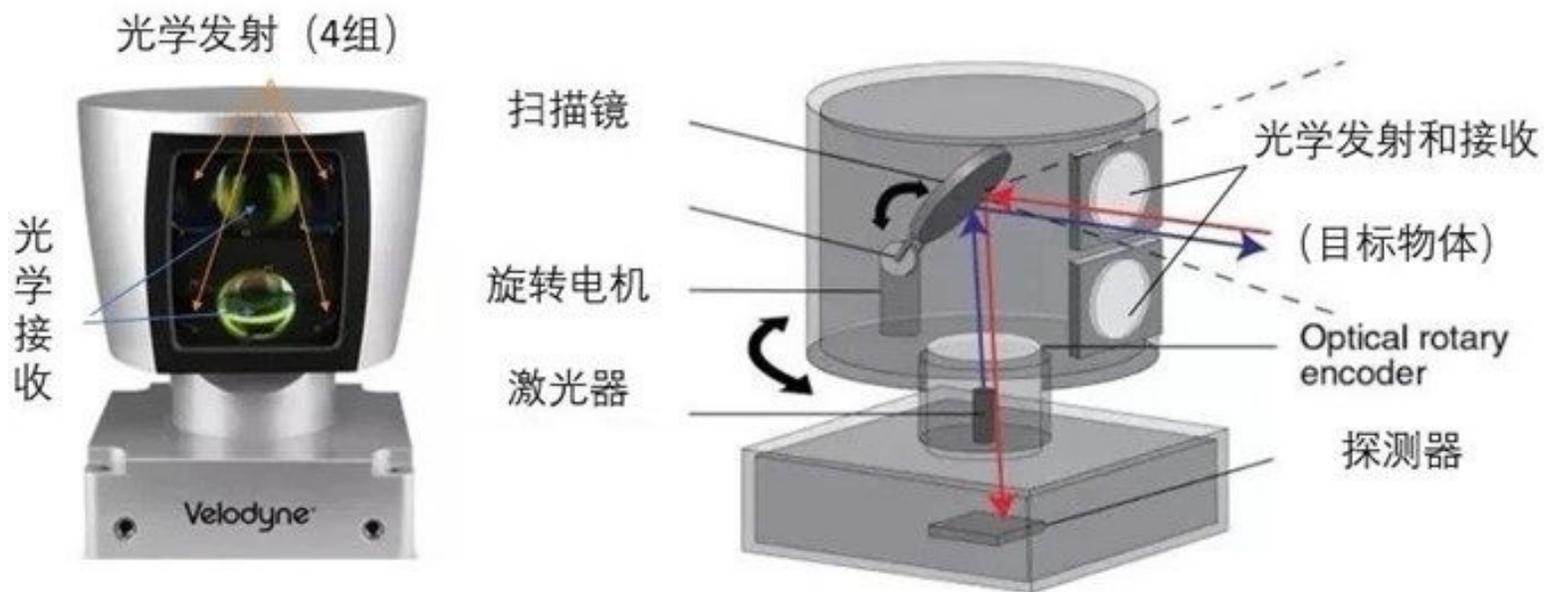
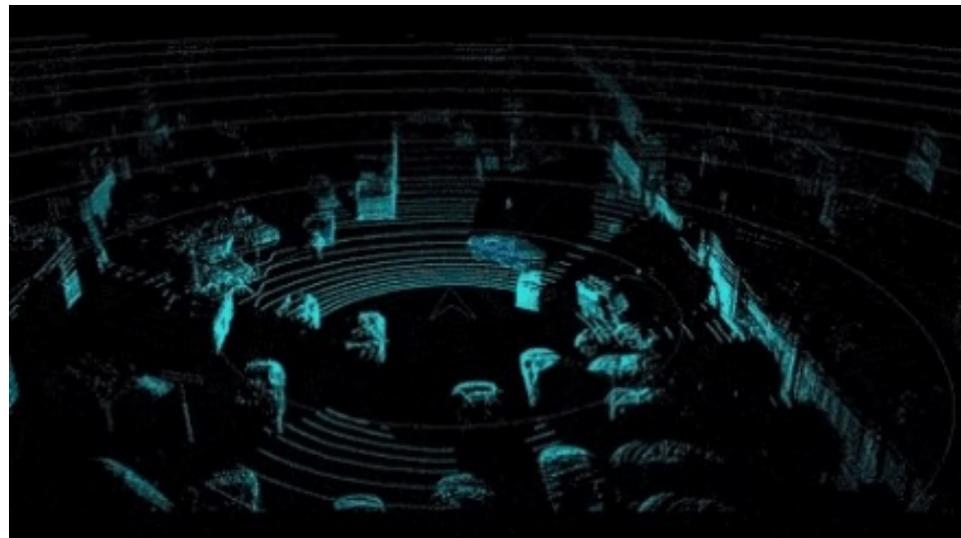
- ✓ 全局定位 (自动导航必需)
- 精度不高、受环境影响大



自动驾驶传感器IV

① 激光雷达 (Lidar)

- ✓ 比可见光具有更强的穿透恶劣天气的能力
- ✓ 数据更直接、感知精度更高、识别正确率更高
- 功耗高、成本高 (6000-7000元)
- 信号互相干扰



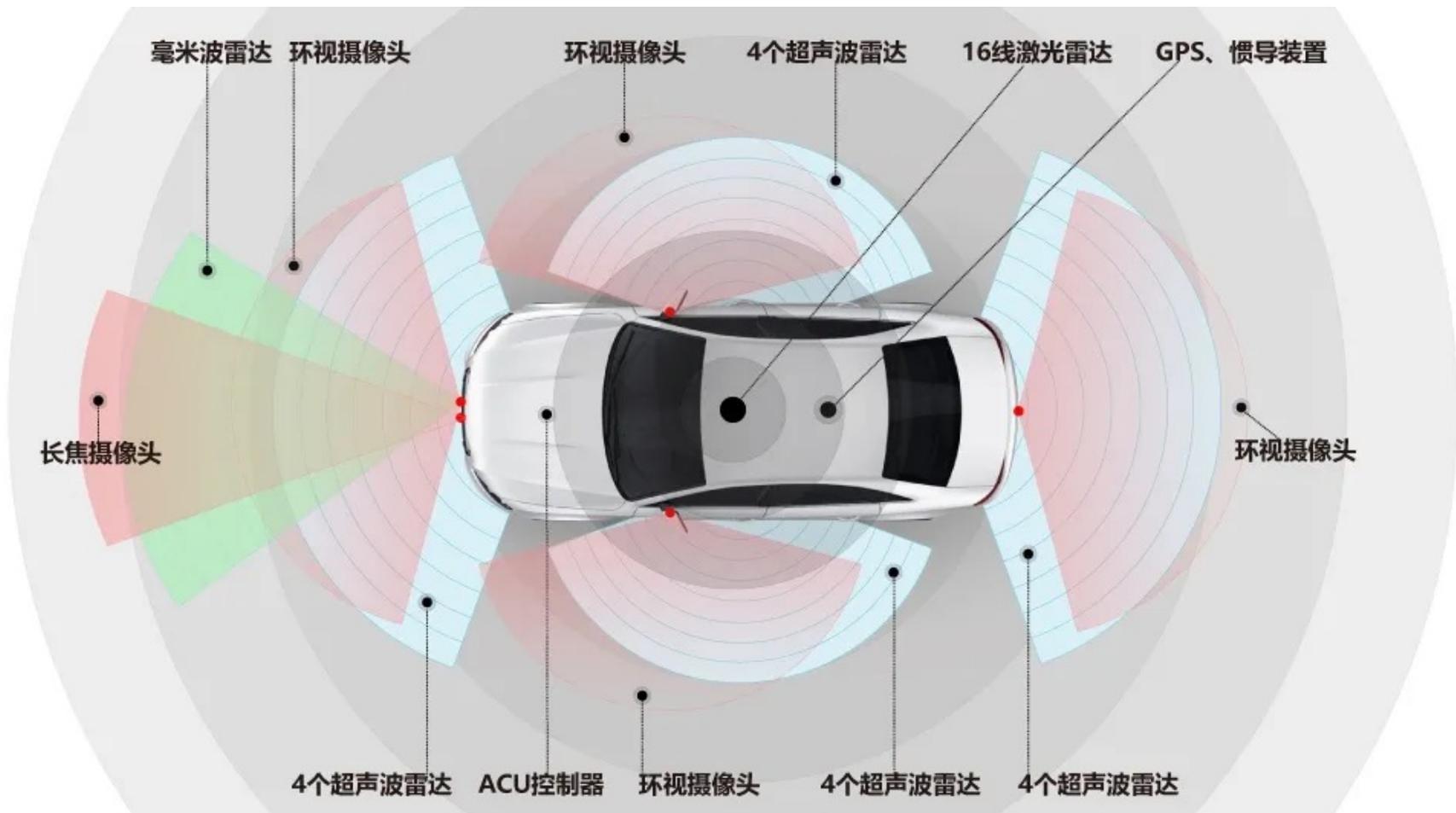
L3软件

感知

- 动态障碍物检测
- 交通灯识别
- 交通标志识别
- 车道线识别
- ...

✓ 实时接受的信息量远大于人类

○ 认知和决策能力远小于人类



动态障碍物检测与追踪



交通灯识别



交通标志识别



计算机视觉 (Computer Vision)

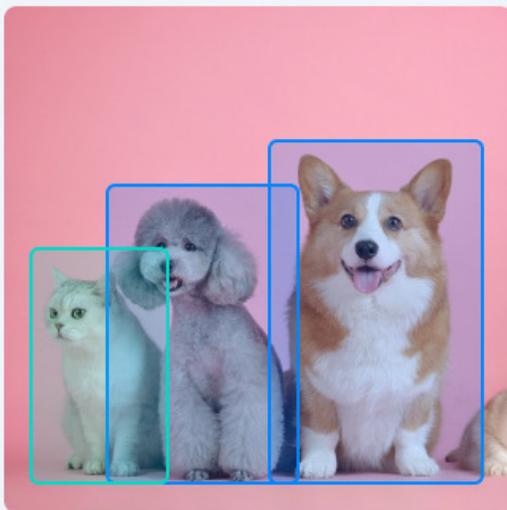
图像分类



Cat

这张图是猫

目标检测



Cat

Dog

图中xx位置有一只
xx大小的猫

语义分割



Cat

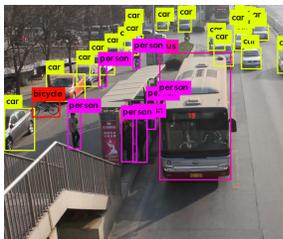
Dog

图中xx区域有一只
xx形状的猫

L3软件—感知

解法：深度学习

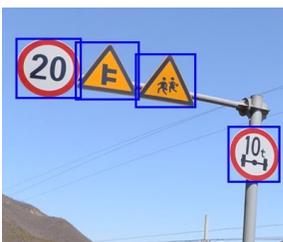
行人、车辆
检测



交通灯
检测



交通标志
识别



车道线
识别



图像分类
“是猫”

目标检测
“xx位置有只
xx大小的猫”

语义分割
“xx区域有只
xx形状的猫”

✓

✓

✓

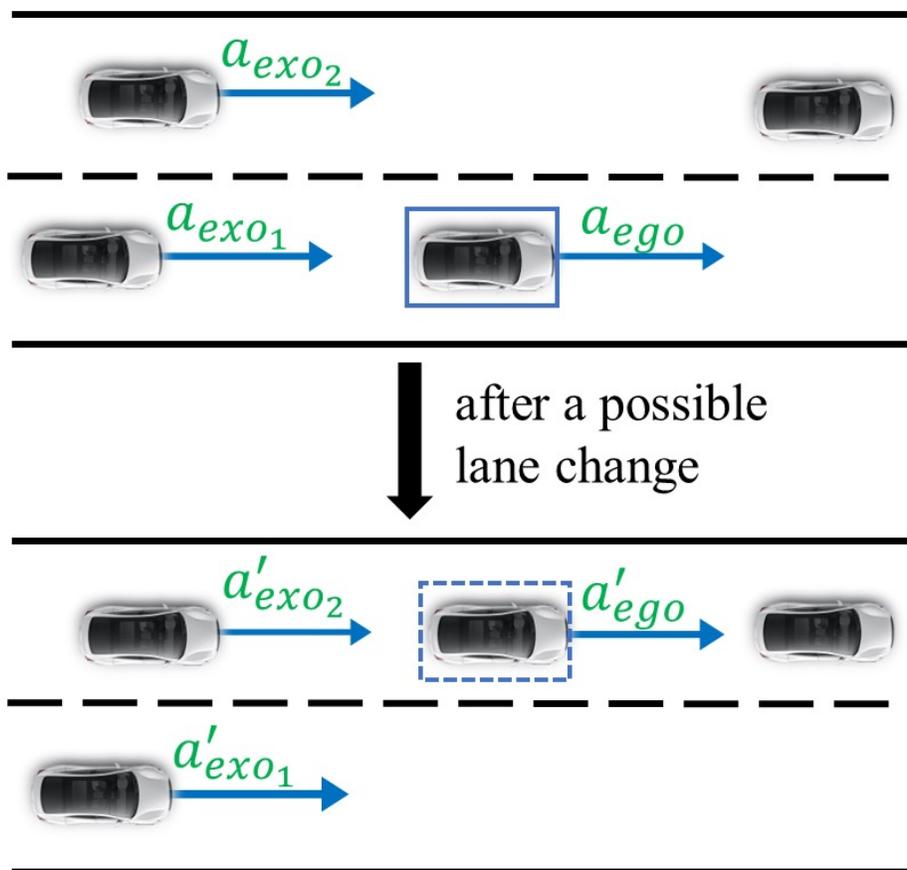
✓

✓

L3软件—决策

④ 自主换道

Minimizing Overall Braking Induced by Lane Changes (MOBIL)



```
1 def mobil_decision(current_state, lead_state, following_state, threshold_incentive,
2                   threshold_politeness, p):
3     # Calculate current acceleration
4     a_current = current_state['acceleration']
5
6     # Predict future states
7     future_current = predict_state(current_state)
8     future_lead = predict_state(lead_state)
9     future_following = predict_state(following_state)
10
11    # Calculate new accelerations after hypothetical lane change
12    a_new = predict_acceleration(future_current)
13    a_lead_new = predict_acceleration(future_lead)
14    a_follow_new = predict_acceleration(future_following)
15
16    # Calculate incentive criterion
17    delta_a = a_new - a_current
18    incentive = delta_a > threshold_incentive
19
20    # Calculate politeness criterion
21    delta_a_follow = a_follow_new - following_state['acceleration']
22    delta_a_lead = a_lead_new - lead_state['acceleration']
23    politeness = p * (delta_a_follow + delta_a_lead) > -threshold_politeness
24
25    # Decide on lane change
26    if incentive and politeness:
27        # Generate lane change trajectory
28        trajectory = interpolate_trajectory(future_current, future_lead, future_following)
29        return True, trajectory
30    else:
31        return False, None
```

L3进展

🌐 国际：宝马（BMW）高速自动驾驶系统（德国上市，2023）



L3进展

国内：L3级自动驾驶测试牌照（针对研发）

2024年01月03日 09:18 | 来源：证券日报

Tr 小字号

原标题：L3级自动驾驶测试牌照发放意味着什么

近日，国内首批有条件自动驾驶（L3级）高速公路道路测试牌照正式发放，包括宝马、奔驰、阿维塔、深蓝，奔驰、极狐、宝马、智己、赛力斯等多家车企获得测试牌照，并相继在北京、上海、重庆和深圳开启测试。

L3进展

国内：L3级智能网联汽车试点名单（针对量产车）



首页 > 工业和信息化部 > 机关司局 > 装备工业一司 > 工作动态

四部门有序开展智能网联汽车准入和上路通行试点

发布时间: 2024-06-04 15:25 来源: 装备工业一司

按照《关于开展智能网联汽车准入和上路通行试点工作的通知》（工信部联通装〔2023〕217号），工业和信息化部、公安部、住房和城乡建设部、交通运输部（以下统称“四部门”）组织专家对首次集中申报的方案进行了审核，确定了9个进入试点的联合体（基本信息见附件）。

下一步，四部门将按照试点总体要求和工作目标有序推进试点实施，并基于试点实证积累管理经验，加快健全完善智能网联汽车生产准入和道路交通安全管理体系，推动我国智能网联汽车产业高质量发展。

附件：进入智能网联汽车准入和上路通行试点联合体基本信息.docx

进入智能网联汽车准入和上路通行试点联合体基本信息

序号	汽车生产企业	使用主体	车辆运行所在城市	产品类别
1	重庆长安汽车股份有限公司	重庆长安车联科技有限公司	重庆市	乘用车
2	比亚迪汽车工业有限公司	深圳市东潮出行科技有限公司	广东省深圳市	乘用车
3	广汽乘用车有限公司	广州祺宸科技有限公司	广东省广州市	乘用车
4	上海汽车集团股份有限公司	上海赛可出行科技服务有限公司	上海市	乘用车
5	北汽蓝谷麦格纳汽车有限公司	北京出行汽车服务有限公司	北京市	乘用车
6	中国第一汽车集团有限公司	一汽出行科技有限公司	北京市	乘用车
7	上汽红岩汽车有限公司	上海友道智途科技有限公司	海南省儋州市	货车
8	宇通客车股份有限公司	郑州市公共交通集团有限公司	河南省郑州市	客车
9	蔚来汽车科技（安徽）有限公司	上海蔚来汽车有限公司	上海市	乘用车

L3进展

国内：上海累计开放测试道路1003条，总里程超过2000公里



L4：高度自动驾驶

④ **定义**： 驾驶自动化系统在其**设计运行条件内持续地**执行**全部动态驾驶任务和执行动态驾驶任务接管**。

- 在限定区域内，由车辆完成**所有**驾驶操作
- 人类驾驶员**无需**保持注意力集中
- **系统无法继续运行时**，人类驾驶员必须接管车辆

④ **(先前) L3定义**：

- 由车辆自动检测环境，并完成**绝大部分**驾驶操作
- **功能请求**时，人类驾驶员必须接管车辆



L4范例：机器人出租车 (robotaxi)

① 设计运行条件：

- 指定城市区域内 (通常需要**高精度地图**)

② 动态驾驶任务：

- 对城市道路中**所有可能**的目标与事件进行检测与响应

③ 策略级别规划：

- 调度规划、行程规划、目的地和路径的选择

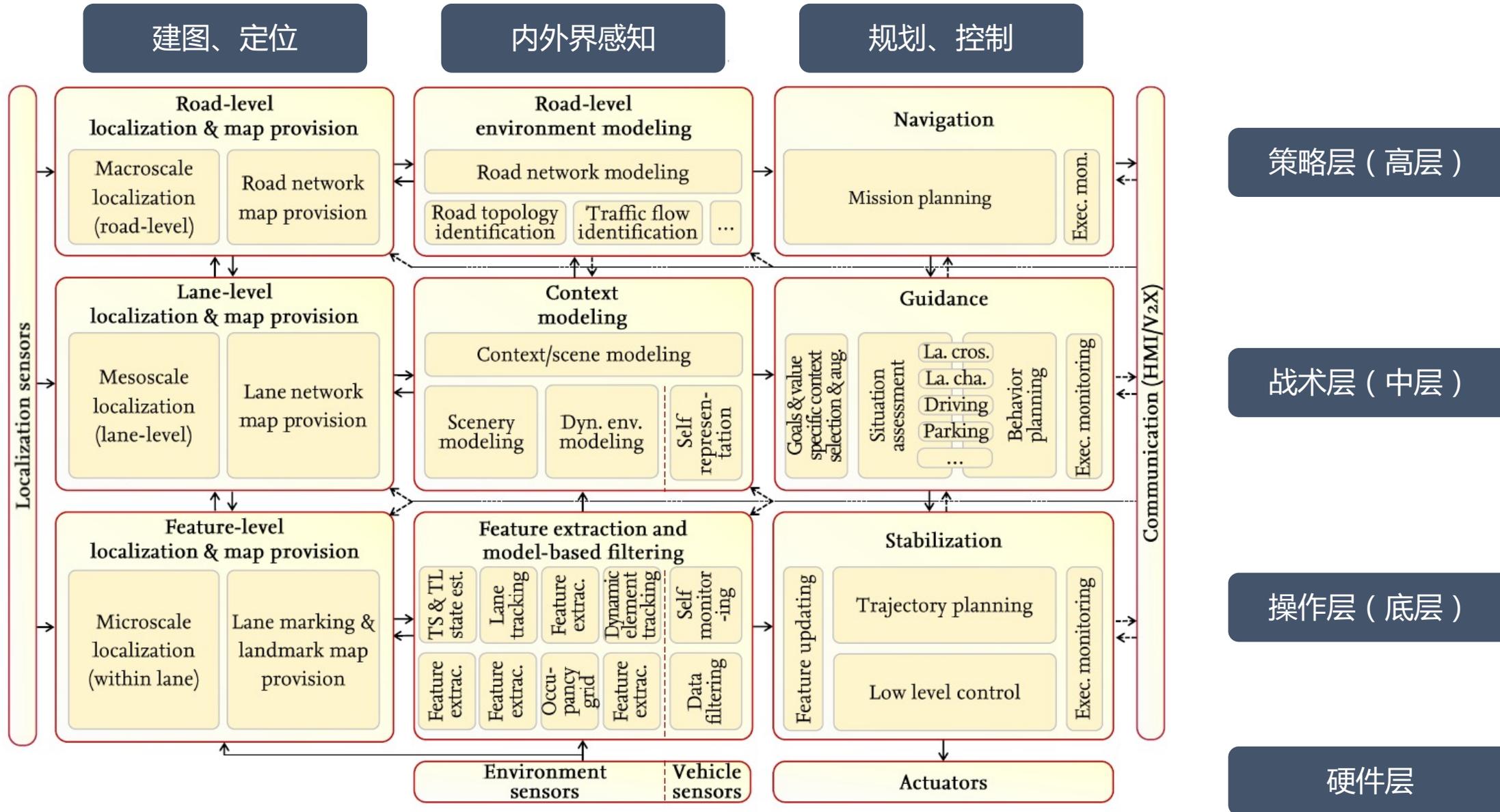
④ 动态驾驶任务接管：

- 发生异常时，**自主**达到最小风险状态



难度？

L4软件：复杂的自动驾驶系统（ADS）



L4软件：复杂的自动驾驶系统（ADS）



边缘场景 (Corner Cases)

① 极端光照与天气条件：



② 复杂交通行为：





边缘场景 (Corner Cases)

① 非常规交通参与者：

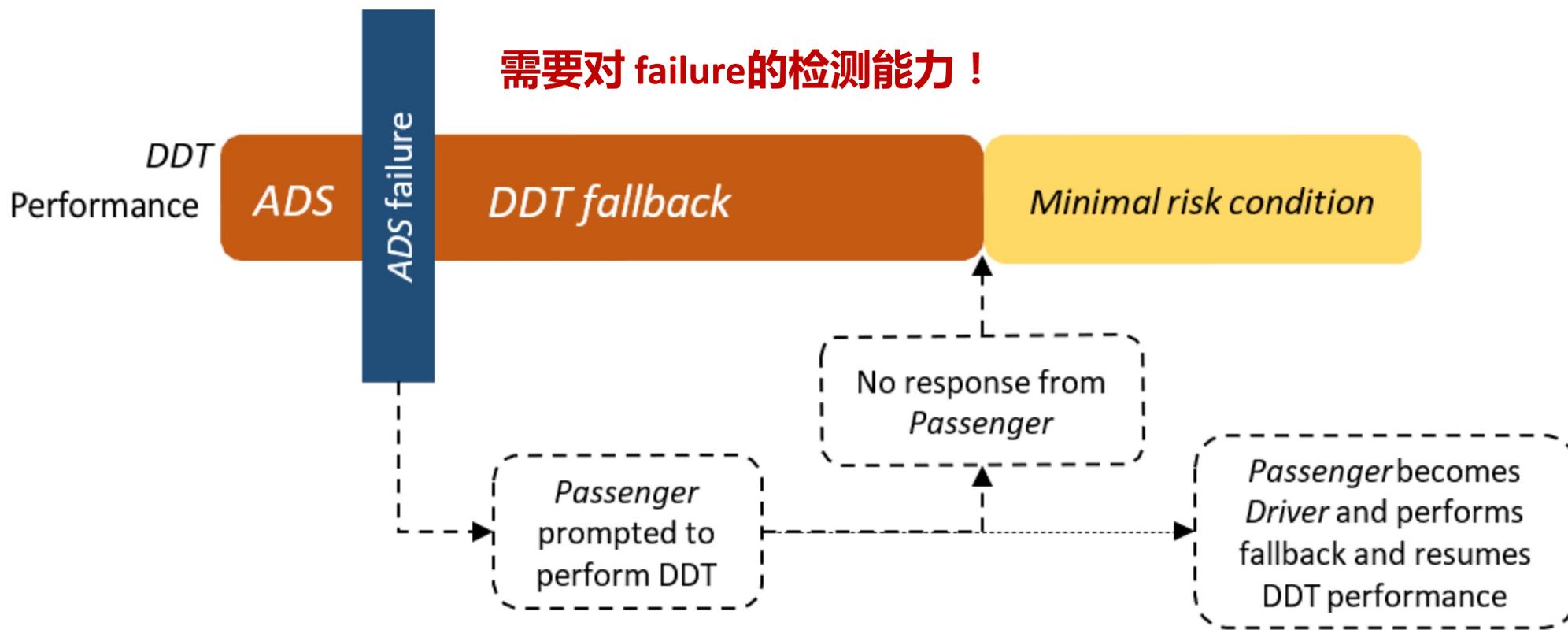


② 难以避免的感知模块失误：



L4动态任务接管

④ 自动驾驶系统（ADS）无法处理动态驾驶任务（DDT）时调用



NOTE: Dashed lines represent optional conditions.

高清地图 (HD Map)

④ **定义**：用于高级别辅助驾驶与自动驾驶的专用地图

- **精细**：必须包含**车道级别**信息、必须达到**10-20 cm**精度
- **丰富**：包含导航地图上不存在的细节，如详细的**道路3D几何**、**道路设施细节**等
- **新鲜**：必须**及时更新**，以反应最新的道路结构

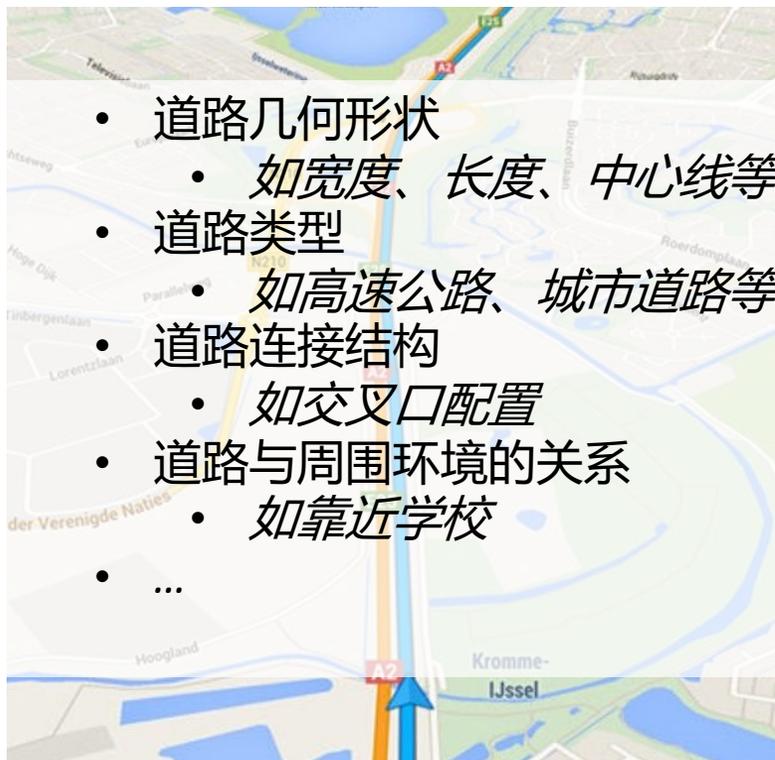
④ **用途**：

- **感知冗余**：应对实时感知失效
- **超视距感知**：提前应对急弯、信号灯变化等
- **精准定位**：GPS信号丢失时仍保持定位

高清地图 (HD Map)

内容：

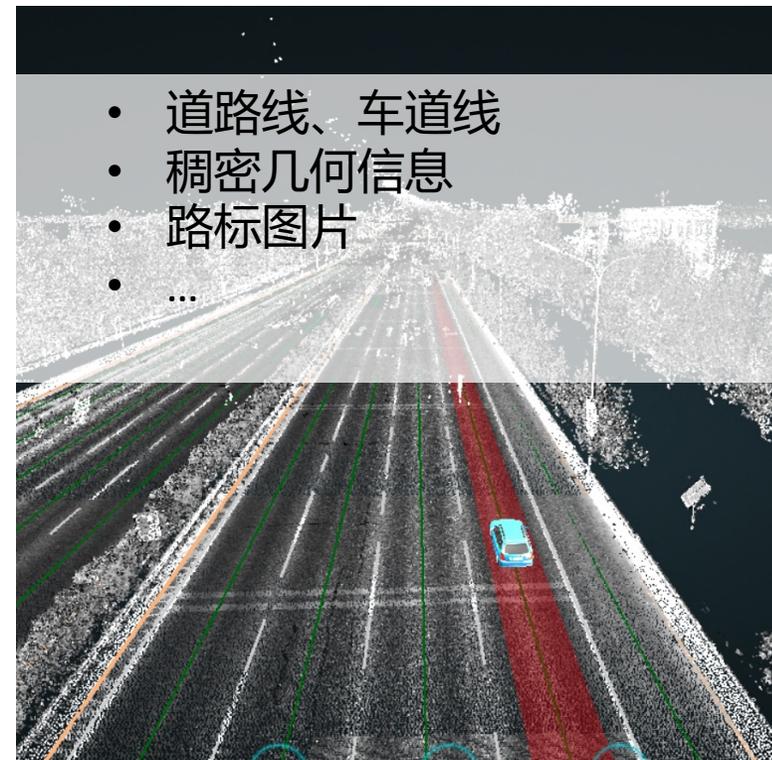
第一层：道路图



第二层：车道图



第三层：底层特征



L4环境理解

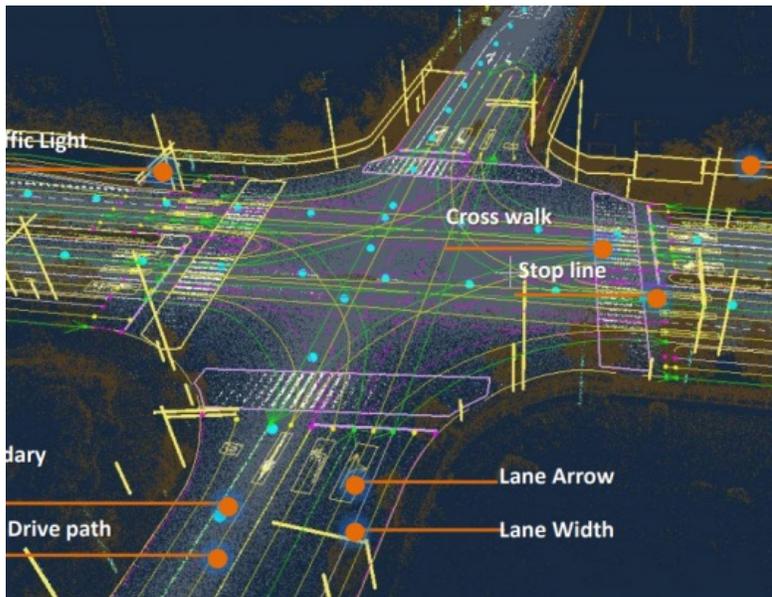
离线HD Map

+

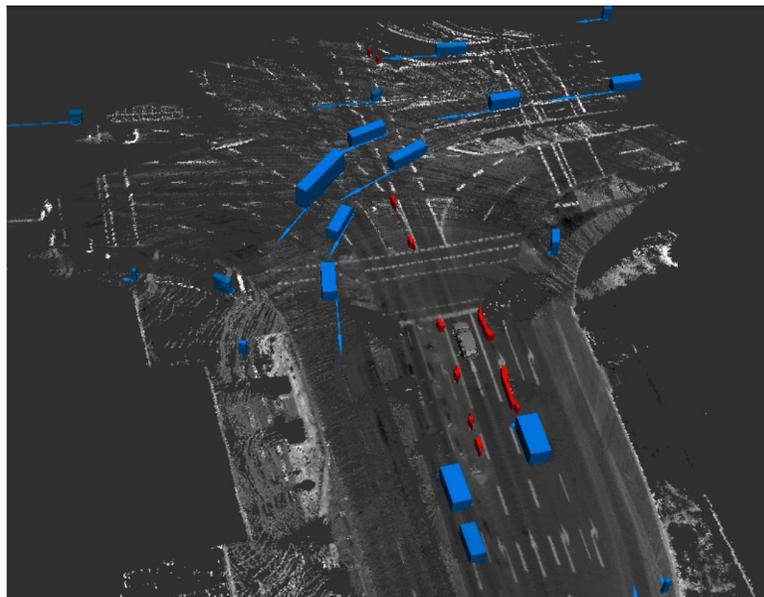
实时几何与目标信息

=

实时自动驾驶场景



HD Map厂商制作并发布



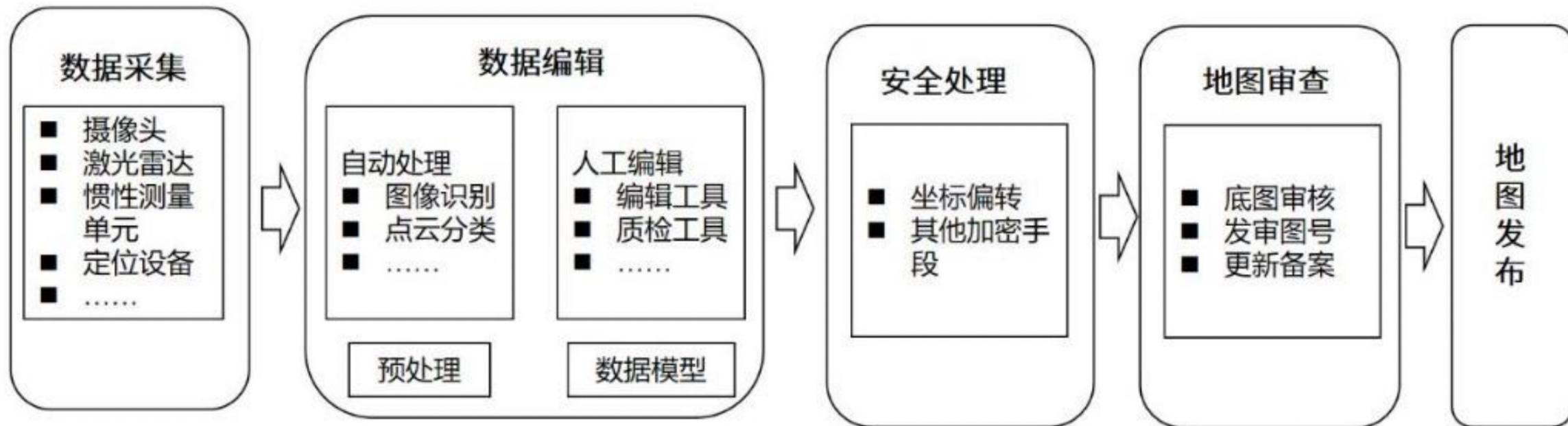
传感器检测 ->
感知模块识别、跟踪、滤波



自动驾驶汽车
眼中的世界

高清地图 (HD Map)

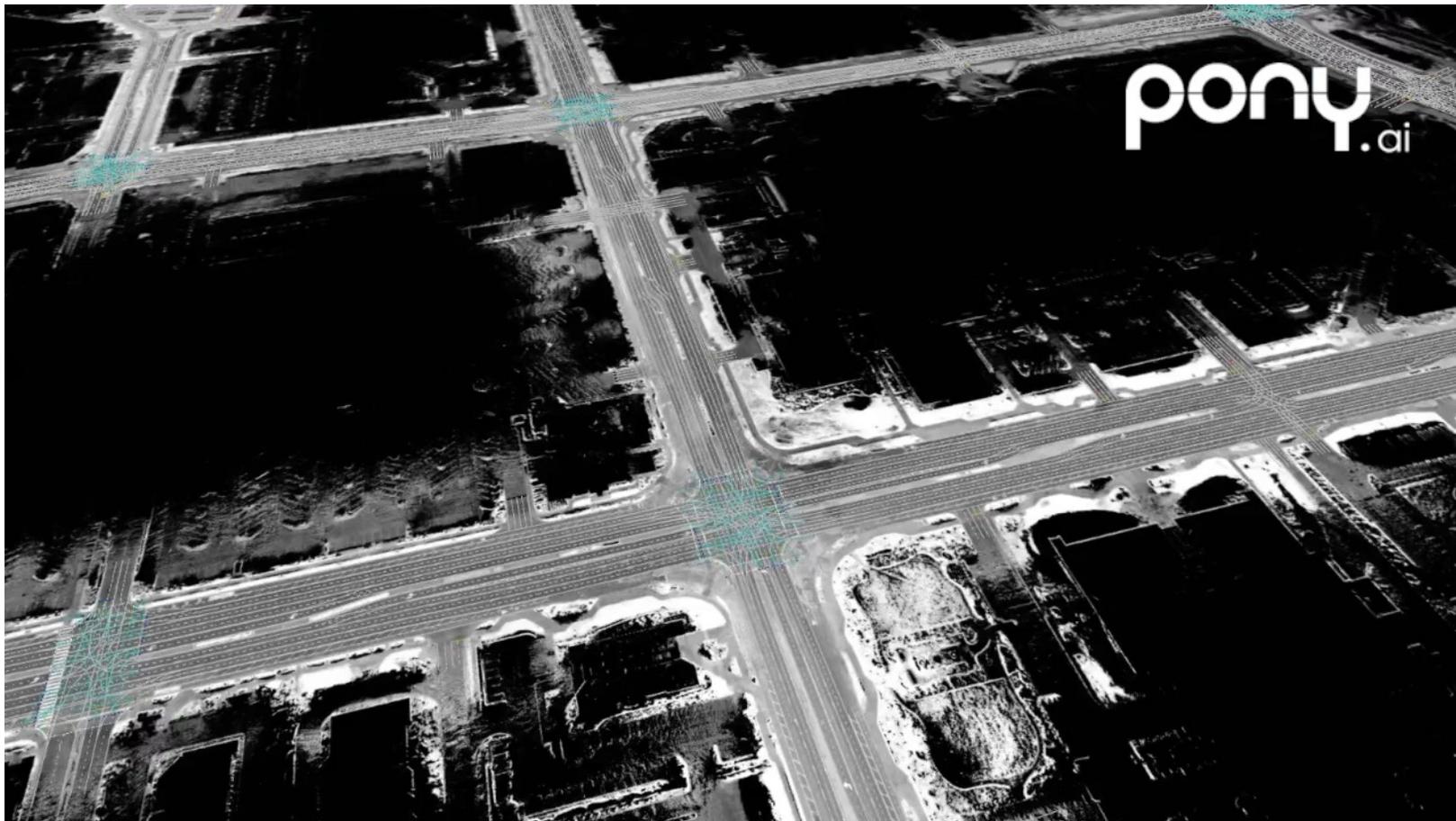
制图流程：



图片来自《中国高清地图市场研究报告2022》

高清地图 (HD Map)

📍 范例：



百度 Apollo (萝卜快跑)、Waymo、Cruise、小马智行 (Pony.ai) ...

高清地图 (HD Map)

国内进展：

图片来自《中国高清地图市场研究报告2022》



无图驾驶

实时感知地图



导航地图



Tesla (FSD V12)、华为、小鹏、理想 ...

L4进展

🌐 国际：Waymo One



视频来自Waymo

L4进展

国内：百度Robotaxi（萝卜快跑）



视频来自百度

L4：高度自动驾驶

全球进展：主要Robotaxi企业规模

企业	开始研发时间	国家	主要测试地区	累计实际路测里程	总车队规模
Waymo	2009	美国	亚利桑拿州凤凰城、加州旧金山	大于 2200 万英里	大于 700
Cruise	2013	美国	加州旧金山	不详	约 300
Aurora	2017	美国	宾州匹兹堡、德州达拉斯、加州旧金山	约 460 万英里	不详
百度 Apollo	2013	中国	北京、广州、重庆、深圳、武汉等	大于 4300 万英里	大于 1000
		美国	加州旧金山、洛杉矶等		
文远知行	2017	中国	广州、北京、深圳、上海等	大于 900 万英里	大于 500
		美国	加州圣何塞		
小马智行	2016	中国	北京、广州、上海、深圳等	大于 900 万英里	大于 400
		美国	加州旧金山、费利蒙、尔湾		

图片来自《高级别自动驾驶应用》白皮书（2023）

L4进展

国内：中国Robotaxi市场规模预测

图片来自《高级别自动驾驶应用》白皮书（2023）

要素 \ 时间	自动驾驶乘用车数量	自动驾驶汽车总销售额	自动驾驶出行服务订单	自动驾驶占乘客总里程
2030 年	800 万辆	2300 亿美元	2600 亿美元	13%
2040 年	1350 万辆	3600 亿美元	9400 亿美元	66%

数据来源：McKinsey 中国汽研整理

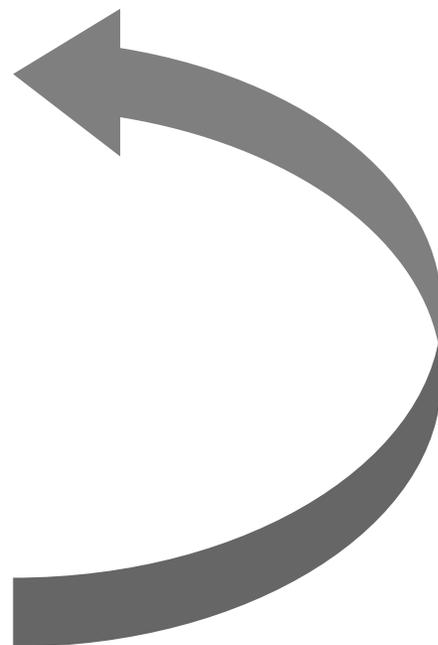
L5：完全自动驾驶

④ **定义**：驾驶自动化系统在**任何可行驶条件下持续地**执行**全部动态驾驶任务和执行动态驾驶任务接管**。

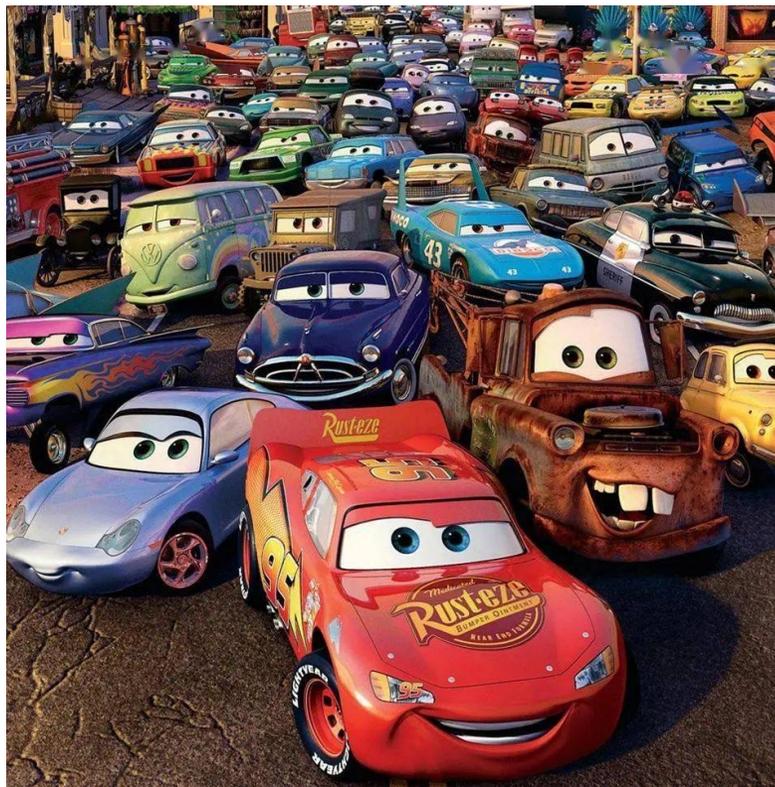
- 在**所有情况**下，由车辆完成所有驾驶操作
- **无需**人类驾驶员

④ **(先前) L4定义**：

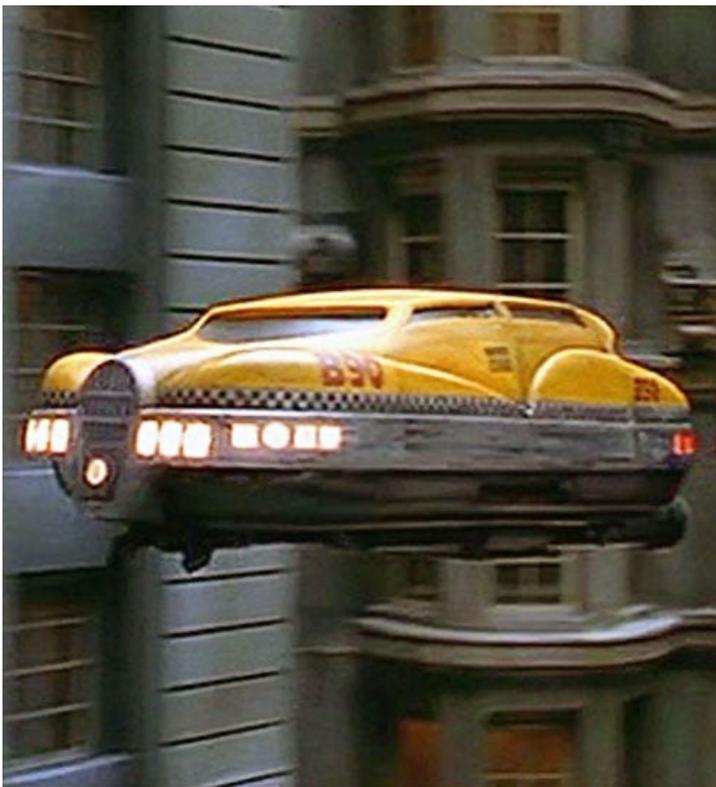
- 在**限定区域**内，由车辆完成所有驾驶操作
- 人类驾驶员**无需保持注意力集中**
- 系统无法继续运行时，**人类驾驶员**必须接管车辆



电影中的L5自动驾驶



汽车总动员



第五元素



变形金刚

L5自动驾驶概念车



百度



大众



奥迪

L5将何时到来？

④ 技术挑战

- Corner case的检测及应对
- 非结构化道路
- 复杂人类行为



④ 标准与法规挑战

- 《道路交通安全法》《公路法》《保险法》等不涉及自动驾驶方面的内容
- 《网络安全法》《测绘法》《标准化法》等存在不适应自动驾驶技术产业化的规定

④ 基础设施挑战

- 需要建设建设智能化道路、无线网络、高精度位置服务等各种基础设施

“双一流”校企合作课程 《自动驾驶前沿技术》



蔡盼盼
副教授

机器人智能
与自动驾驶



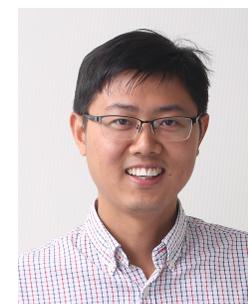
穆尧
青年科学家

端到端
自动驾驶



石建萍
副总裁

计算机视觉
与自动驾驶



刘春晓
团队负责人

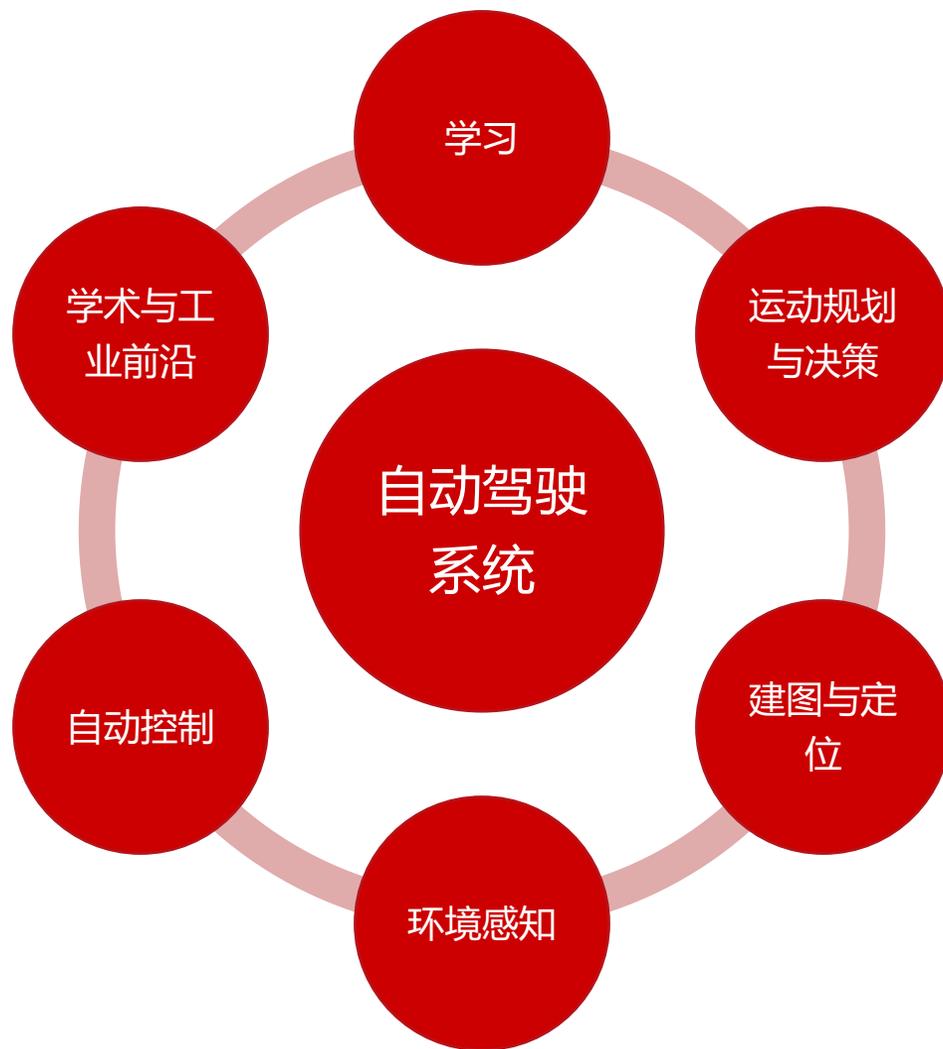
自动驾驶规
划与控制



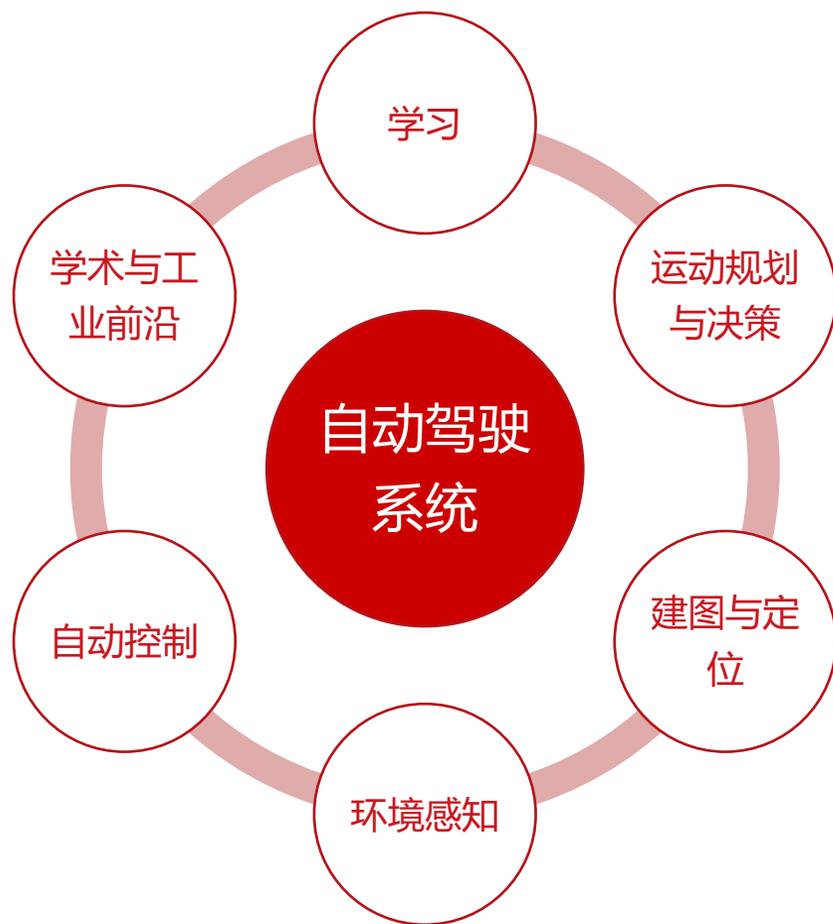
方良骥
高级研究员

自动驾驶
感知

课程内容



课程内容



第一讲：自动驾驶简介（3学时）

- 自动驾驶技术概述
- 自动驾驶技术发展历史与国内外现状
- CARLA自动驾驶模拟器入门（为项目作业准备）

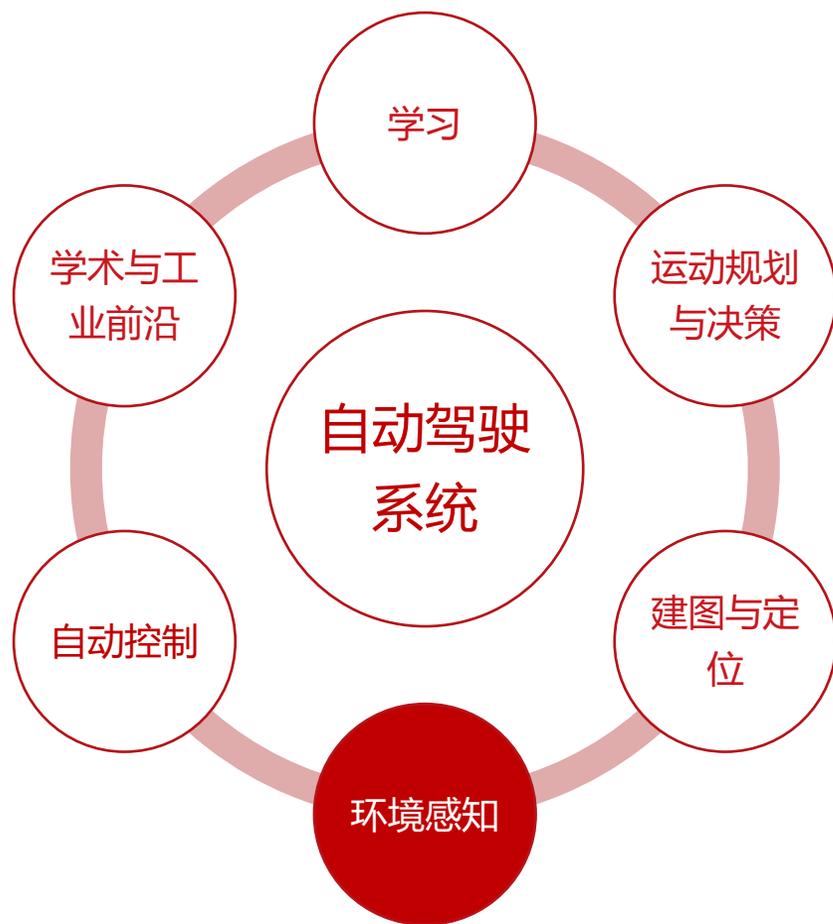
第二讲：自动驾驶汽车的系统架构（3学时、浦江）

- 自动驾驶系统概述
- 硬件与软件堆栈
- 云服务与V2X

第三讲：自动驾驶算法体系（3学时、浦江）

- 自动驾驶软件算法体系
- 端到端自动驾驶简介
- 主流车企技术框架

课程内容



第四讲：数据及视觉感知 I（3学时、浦江）

- 自动驾驶数据集综述
- 数据算法闭环体系
- 榜单与生态

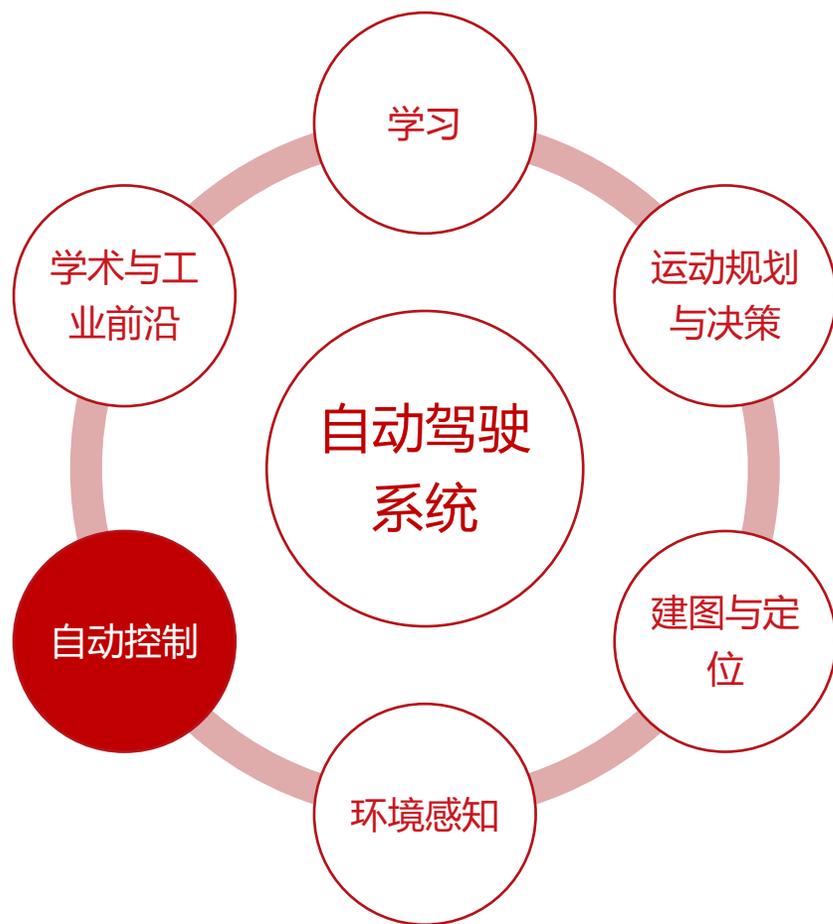
第五讲：视觉感知 II（3学时、浦江）

- 计算机视觉高级技术
- 基于深度学习的视觉感知
- 基于视觉的端到端自动驾驶方法

第六讲：多模态感知融合（3学时、浦江）

- BEV感知融合
- 激光雷达原理
- 点云数据与基于点云的感知

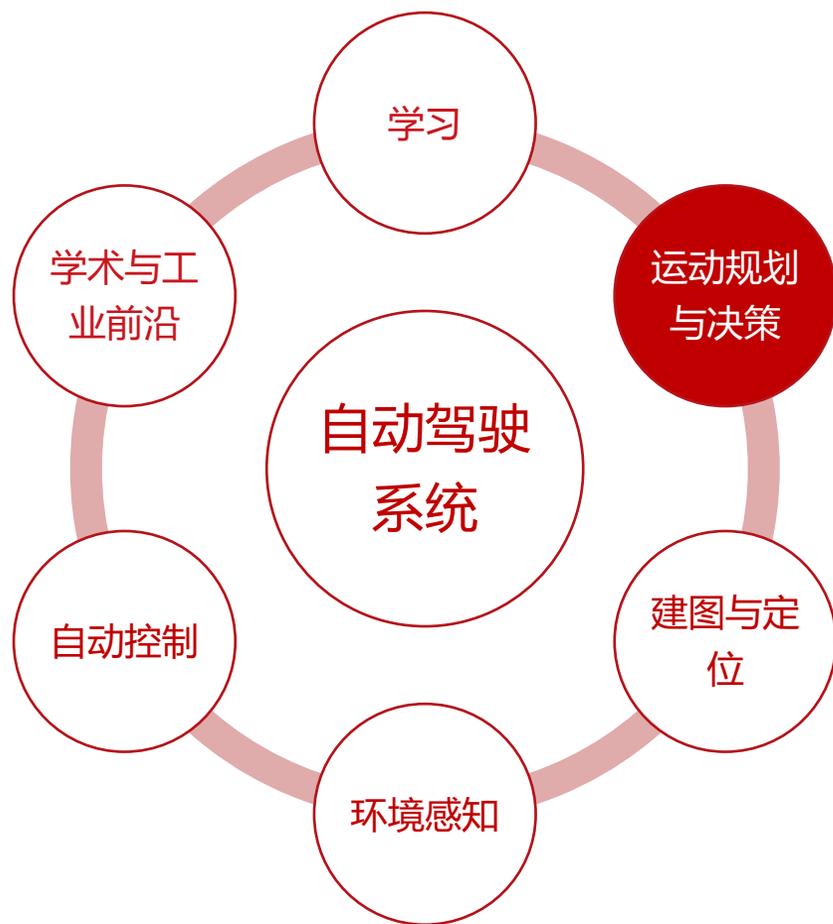
课程内容



第七讲：车辆动力学和控制（3学时）

- 车辆运动学和动力学基础
- 车辆的纵向和横向动力学
- 车辆控制算法简介
 - PID, Pure-Pursuit, MPC, ...

课程内容



⑧ 第八讲：运动规划 I (3学时)

- 运动规划问题简介
- 网格搜索算法 (A^* , D^* , ...)
- 自动驾驶网格搜索算法 (Hybrid A^*)

⑨ 第九讲：运动规划 II (3学时)

- 采样式运动规划算法简介
- 快速探索随机树 (RRT)
- 概率道路图 (PRM)

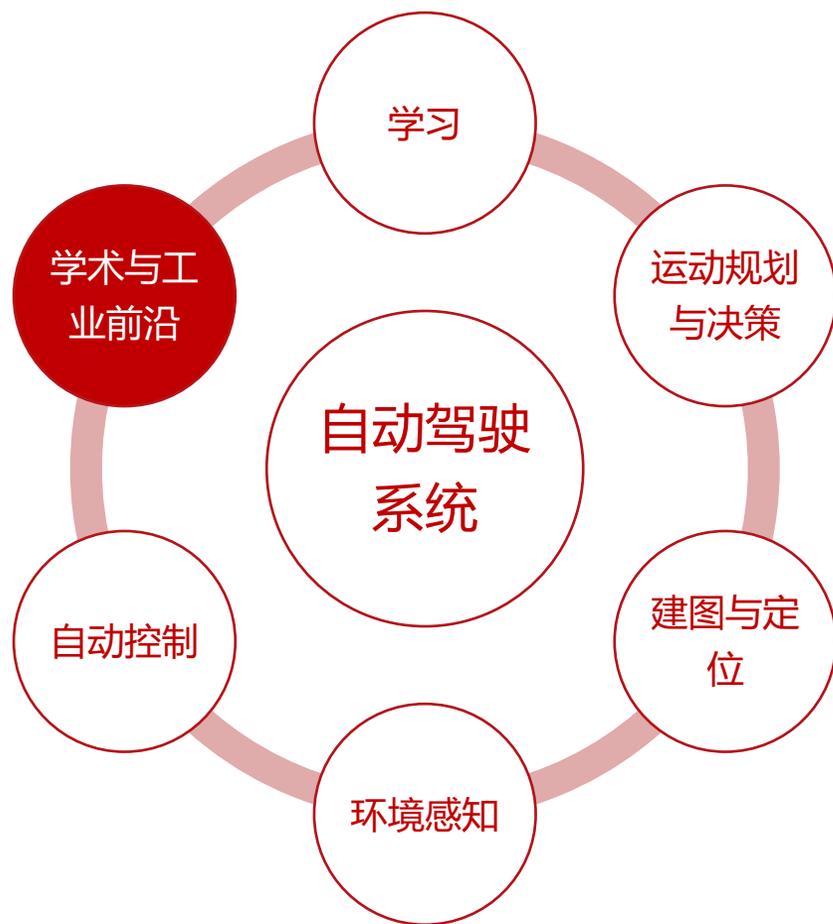
⑩ 第十讲：决策规划 I (3学时)

- 马尔科夫决策过程 (MDP) 简介
- MDP规划算法
- 自动驾驶决策中的MDP规划

⑫ 第十二讲：决策规划 II (3学时、进阶)

- 部分可观马尔科夫决策过程 (POMDP) 简介
- POMDP规划算法
- 自动驾驶决策中的POMDP规划

课程内容



第十三讲：自动驾驶工业前沿（3学时、商汤、进阶）

- 商汤专家讲座系列

第十四讲：自动驾驶学术前沿（3学时、进阶）

- 上交学术讲座系列

第十五、十六讲：学生论文报告（3+3学时、评价）

- 学生提前研读自动驾驶前沿学术论文
- 学生分组进行论文报告
- 学生讨论并互相评估

评价方式

作业项目：

在CARLA中逐步实现自动驾驶系统

基本车辆控制

目标：理解与应用车辆控制技术

任务：控制仿真车辆跟随路径

传感器集成与感知

目标：理解与应用车辆感知技术

任务：识别与理解场景中的物体

路径规划与导航

目标：理解与应用运动规划算法

任务：实现在地图上的自主导航

机器人出租车系统 (removed)

目标：理解与应用自动驾驶系统架构

任务：简易的自动驾驶出租车服务



评价方式

① 论文研读与报告

研读自动驾驶前沿学术论文

目标：了解自动驾驶前沿研究

任务：阅读并理解一篇指定论文

进行论文报告

目标：练习学术报告

任务：15分钟报告并讨论指定论文

讨论并互相评估

目标：分析、批判与创新

任务：评价他人、提出问题与建议



评分构成

④ 平时作业 70分

- 第一次（控制）20分
- 第二次（感知）20分
- 第三次（导航）30分

④ 论文报告 30分

- 研读并介绍自动驾驶学术论文

更多信息与讨论

④ 课程网站 <https://roboticsjtu.github.io/CS7355/>

- 教师信息
- 答疑地址与时间
- 课程安排与资料 (课件、参考书)

④ 微信群

- 日常事务沟通
- 协助分组

④ Canvas讨论模块

- 作业、报告、与技术/学术问题讨论
- 积极贡献的用户将获得加分



群聊: CS7355 - 25 春季



该二维码7天内(2月26日前)有效, 重新进入将更新

自动驾驶发展历史

50-70年代

移动机器人
技术



80-90年代

早期自动驾驶
项目



00-10年代

自动驾驶技术
飞速发展



10-20年代

自动驾驶技术
商业化



Waymo
Tesla
Cruise
...

百度
小马
蔚来
小鹏
商汤
...

?

无人驾驶成为
新常态



里程碑一：机器人自动导航技术

50-70年代

机器人自动
导航技术



80-90年代

早期自动驾驶
项目



00-10年代

自动驾驶技术
飞速发展



10-20年代

自动驾驶技术
商业化



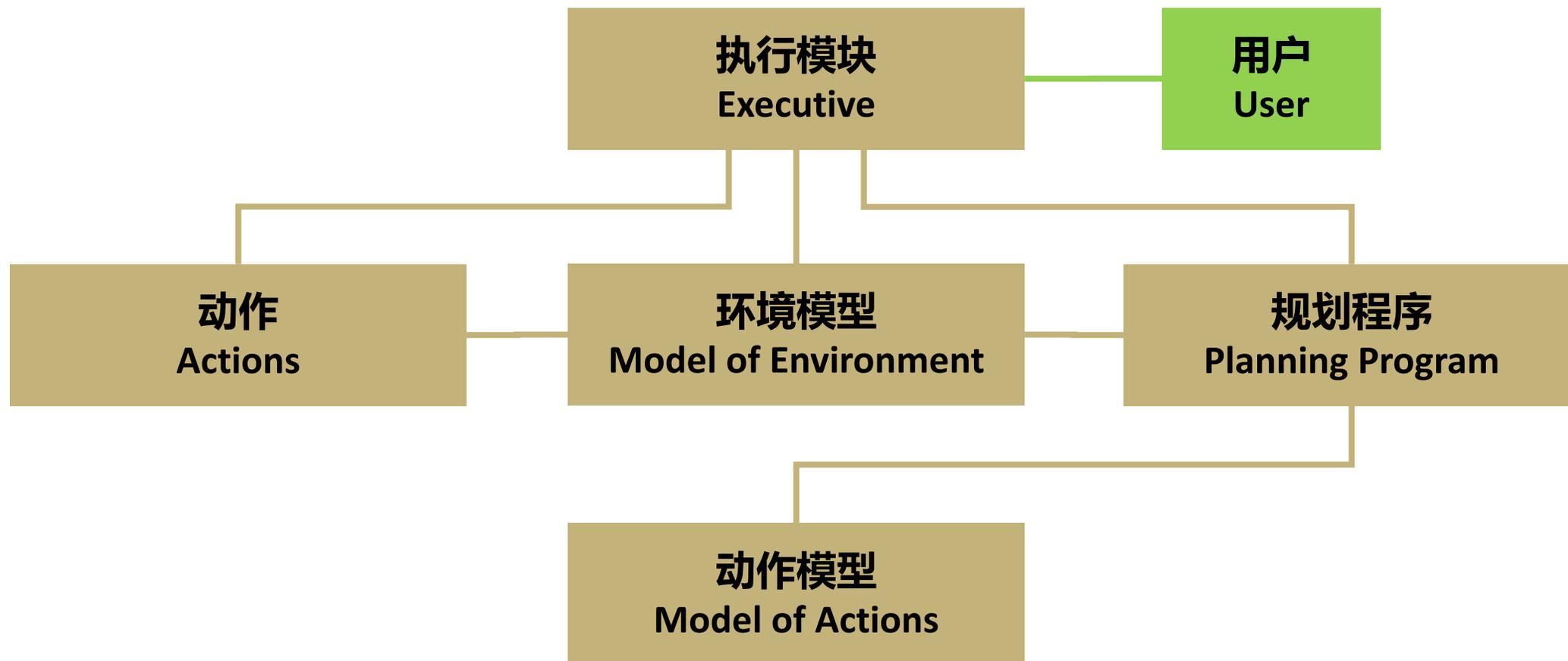
Waymo
Tesla
Cruise
...
百度
小马
蔚来
...

?

无人驾驶成为
新常态

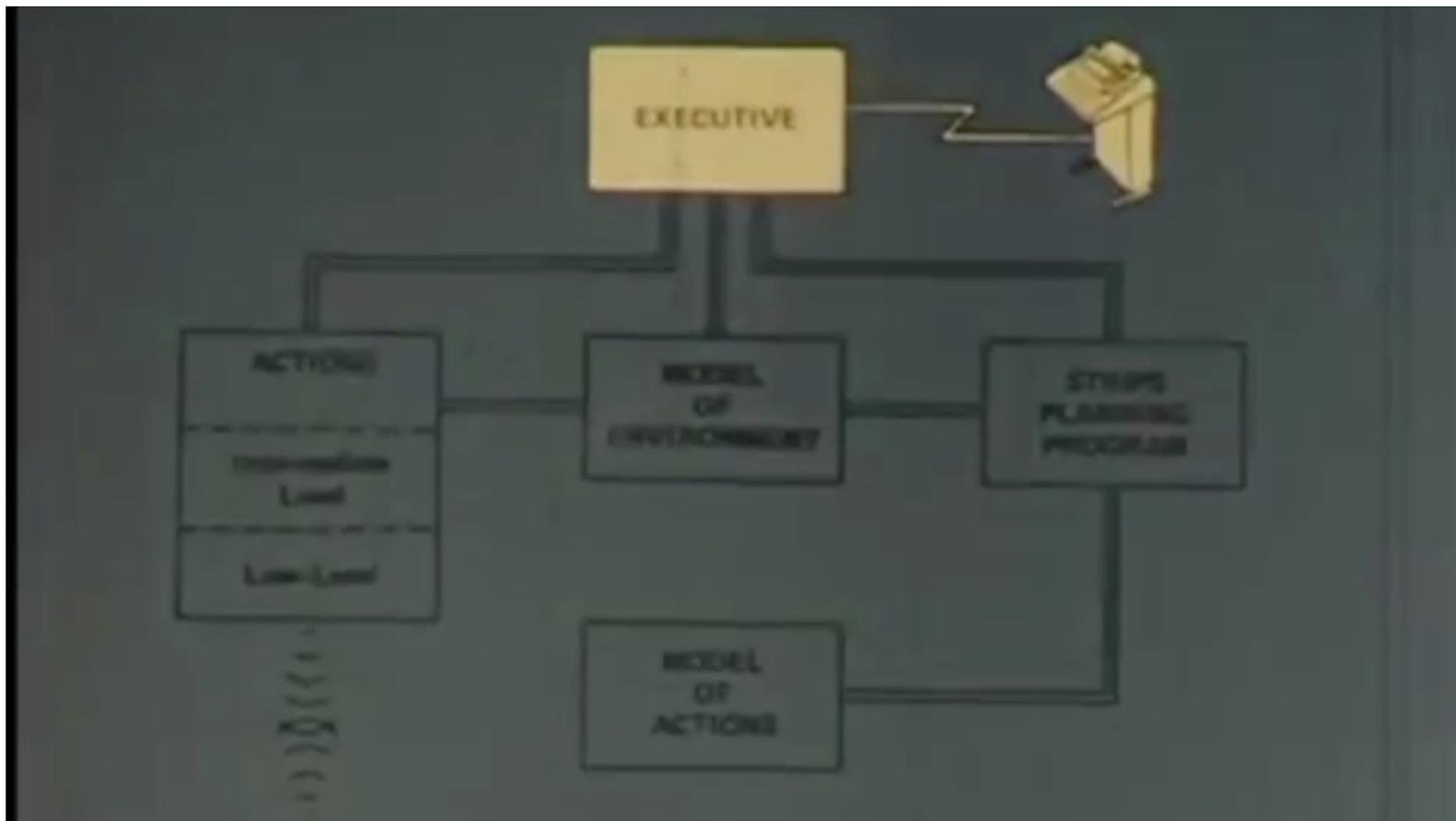


Shakey的系统架构



Shakey系统：动作执行模块

1972年，斯坦福大学人工智能中心



分层的动作程序

① 底层动作：直接控制硬件运动

- Roll（滚动轮子）、Pan（转头）、Tilt（低/抬头）

② 中层动作：简单的局部行为

- GoTo（从A到B并避障）、Push（推东西）、GoThru（穿过门）

③ 高层运动：复合的全局行为

- “去大厅取箱子回办公室” = GoTo大厅 + 接过快递 + 把箱子Push回办公室

Shakey系统：环境理解模块

① 1972年，斯坦福大学人工智能中心



里程碑一：早期自动驾驶项目

50-70年代

机器人自动
导航技术



80-90年代

**早期自动驾驶
项目**



00-10年代

自动驾驶技术
飞速发展



10-20年代

自动驾驶技术
商业化



Waymo
Tesla
Cruise
...

百度
小马
蔚来
...

?

无人驾驶成为
新常态



里程碑一：NavLab

① 1984 - 1994，卡耐基梅隆大学机器人所

① Navlab 1 (1986)

- 雪佛兰厢式货车
- 3个太阳工作站
- 视频硬件
- GPS接收器
- 一台WARP超级计算机
- 最高时速达到32千米每小时



里程碑一：NavLab

① 1984 - 1994，卡耐基梅隆大学机器人所

② Navlab 5 (1990)

- 1995年，从匹兹堡一路开车到圣地亚哥
- 全程约4590千米
- 平均时速超过96千米每小时
- 2007年进入**机器人名人堂**



里程碑一：NavLab 1



① 早期移动机器人

- 非实时系统：感知-思考-执行轮替
- 基于独立的图片输入
- 主要依赖摄像头
- 超低速行驶
- 需要专家（研究生）在现场

① 早期自动驾驶

- 实时系统：感知-思考-执行并发
- 基于视频输入
- 引入激光测距仪
- 低速->高速行驶
- 需要专家（研究生）在车上

里程碑一：NavLab 2



NavLab2 软件系统

- 传感器：摄像头阵列
- 最高时速：110km/h
- 控制模块Alvin：
 - 神经网络+模仿学习
 - 端到端方向盘控制！
 - 根据道路类型切换策略
- 路径规划模块Ranger
 - 地面建模
 - 向前仿真、轨迹优化
- 障碍物建图模块Ganesha
 - 自动追踪障碍物
 - 自动避障、自动泊车
- 路线规划模块D*
 - 动态调整A*生成的最优路线
- 远程控制模块Strip
 - 专家科远程操控汽车
- 行为决策模块DAMN
 - 从基础模块提供的行为中选择最优行为
- 总体调度Sarsages

里程碑二：自动驾驶挑战赛

50-70年代

机器人自动
导航技术



80-90年代

早期自动驾驶
项目



00-10年代

自动驾驶技术
飞速发展



10-20年代

自动驾驶技术
商业化



Waymo
Tesla
Cruise
...

百度
小马
蔚来
...

?

无人驾驶成为
新常态



DARPA Grand Challenge

2004年第一届

- 地点：沙漠
- 全长：大约200公里
- 限时：10小时
- 奖金：100万美元
- 结果：
 - 预选赛：106进25
 - 资格赛：25进15
 - 决赛：15进0



DARPA Grand Challenge

2004年第一届

- 冠军：CMU (Sandstorm)
- 车型：改装悍马
- 行驶长度：11.78公里



DARPA Grand Challenge

2005年第二届

- 地点：沙漠
- 全长：约200公里
- 奖金：200万美元



DARPA Grand Challenge

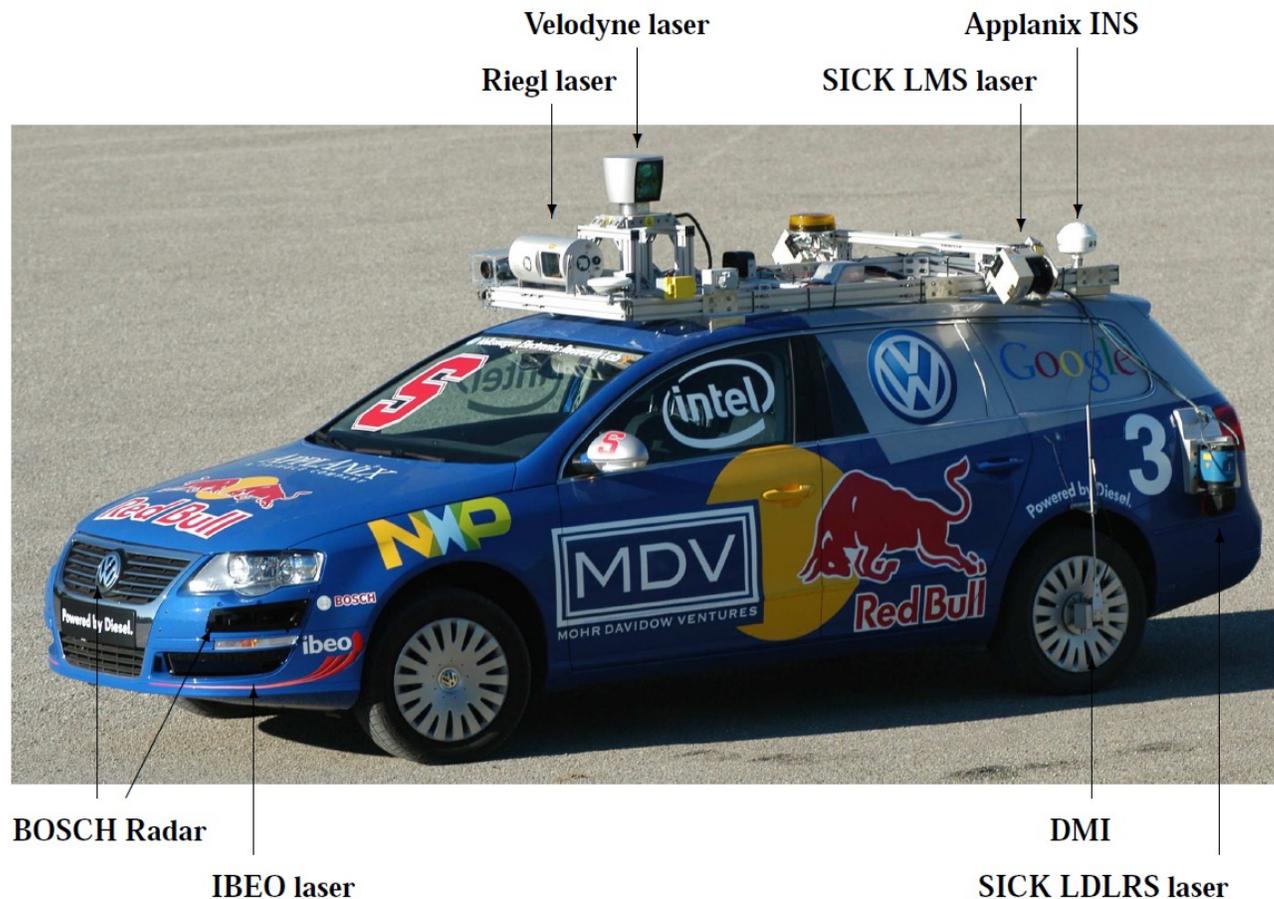
2005年第二届

- 赢家：Stanford (Stanley)
- 车型：改装大众
- 耗时：6小时54分
- 领队：



Sebastian Thrun

斯坦福大学教授
谷歌自动驾驶团队创始人



DARPA Grand Challenge

🕒 2005年第二届，赛前准备



DARPA Grand Challenge

🕒 2005年第二届，正式比赛



DARPA Grand Challenge

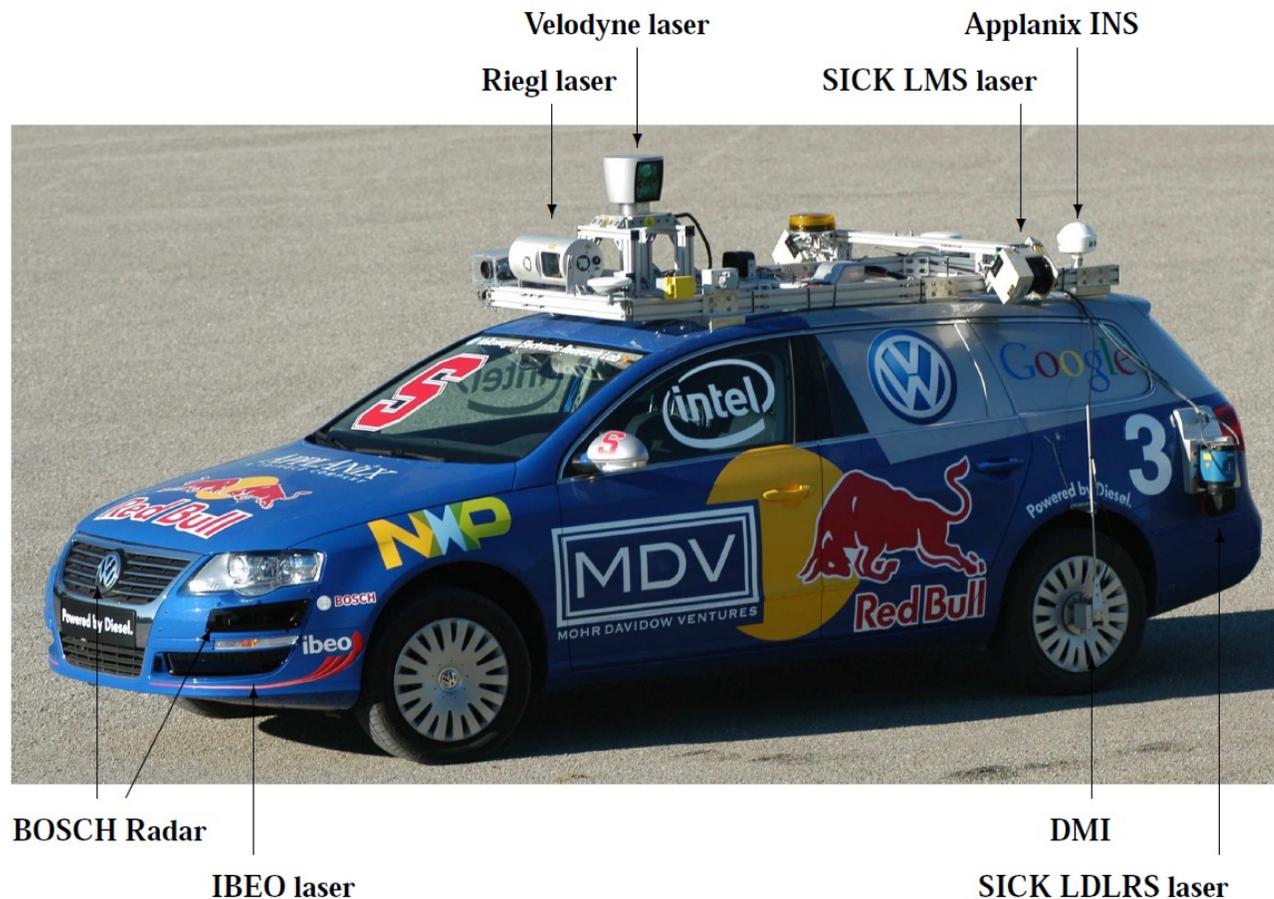
2005年第二届

- 赢家：Stanford (Stanley)
- 车型：改装大众
- 耗时：6小时54分
- 领队：



Sebastian Thrun

斯坦福大学教授
谷歌自动驾驶团队创始人



Urban Challenge

2007年

- 地点：模拟城市（有交规）
- 全长：96公里
- 限时：6小时
- 奖金：200万美元

赢家：

- CMU (Boss)
- 车型：改装雪佛兰
- 用时：4小时10分



内容回顾

自动驾驶分级

- 分级标准
- L1-L5软硬件需求
- 国内外进展

自动驾驶历史

- 早期自动驾驶
- 自动驾驶挑战赛

第二讲：自动驾驶系统架构



穆尧 青年科学家

上海人工智能实验室具身智能中心

研究领域：具身感知认知、具身运动控制、端到端具身智能自动驾驶

邮箱：yaomarkmu@gmail.com

网站：<https://yaomarkmu.github.io>

Homepage QR Code:



WeChat QR Code:

