

进阶课程②⑥ | Apollo规划技术详解——Understand More on the MP Difficulty

知
识
点

敲黑板，本文需要学习的知识点有

Path Speed Iterative 目标函数

约束 优化求解方法

路径规划 二次规划

EM是一个在已知部分相关变量的情况下，估计未知变量的迭代技术，EM的算法流程如下：

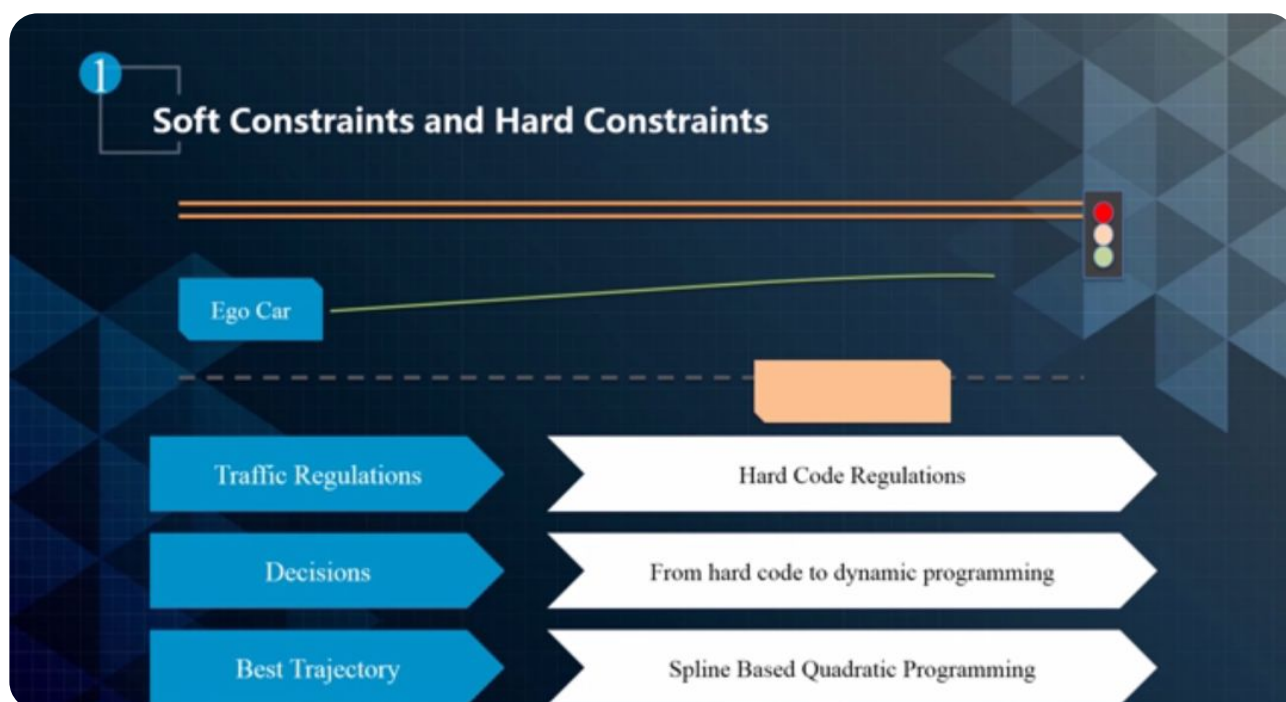
1. 初始化分布参数；
2. 重复直到收敛。

重复直到收敛的步骤如下：

1. E步骤：根据隐含数据的假设值，给出当前的参数的极大似然估计；
2. M步骤：重新给出未知变量的期望估计，应用于缺失值。

以下，ENJOY

本节主要介绍 Apollo 中的 EM planner。在前面的课程中，我们提到优化问题的三个方面：**目标函数、约束条件和求解方法**。那么在实际过程中无人车怎样去抽象约束呢？先看一个简单的例子，如下图所示。

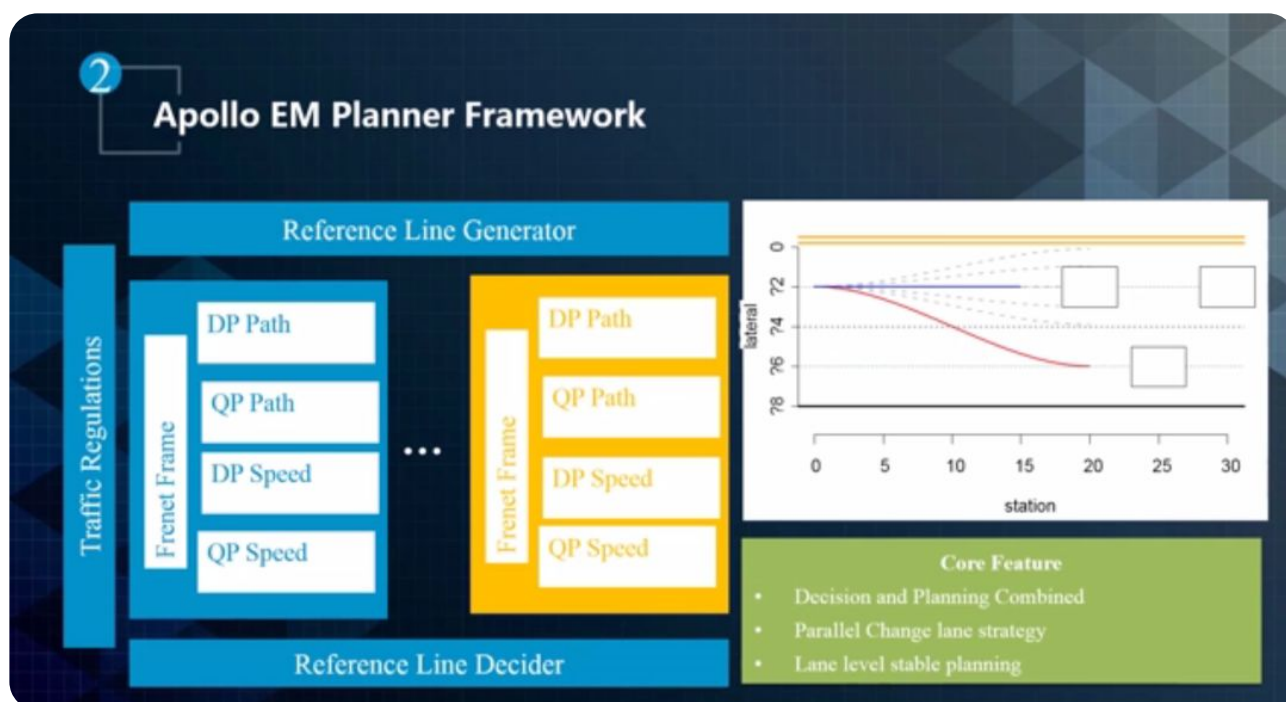


▲ 硬性限制和软性限制

在这个场景中，有三类约束，第一个叫做 **Traffic Regulation**，第二个是 **Decisions**，第三个是 **Best Trajectory**。这些限制又分为硬限制和软限制，例如交通规则属于硬性限制。

Apollo EM 规划框架

在 Apollo 中，我们设计了一个 EM 规划框架来处理不同的场景，如下图所示，展示处理一个换道场景。在蓝线和红线交点处发现前方有车辆行驶缓慢，可能要进行换道处理。如果只是简单的看到旁边没有车就换道，可能会导致危险发生。在 Apollo EM 规划框架中，我们会对换道和继续在本车道行驶分别规划出一条轨迹，只有换道之后的 Trajectory 要比本车道的 Trajectory 好的情况下才换道。在 Apollo 的 EM planner 中，决定哪个道比较好的模块叫做 **Reference Line Decider**，中间的并行模块是通过 Path Speed Iterative 的方式并行实现的。



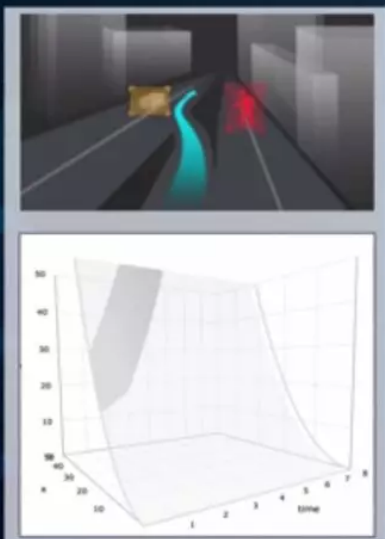
▲ Apollo EM 规划框架

优化决策问题

优化决策问题本身是一个 3D optimization 问题，其中包含了三个维度，需要生成 SLT。三维空间的优化相对比较复杂，常用的方法有两种：一种就是**离散化的方式去处理**。另一种方法是**Expectation Maximization (期望最大化)**。其基本思想是降维处理，先在一个维度上进行优化，然后在优化的基础上再对其它维度进行优化，并持续迭代以获得局部最优解。

3

3D optimization problem



SL Coordinates

Iterative Path Speed Solving

Path SL Projection(E step)

Path SL Optimization(M step)

Speed ST Optimization(E step)

Speed ST Optimization (M step)

▲ 3D optimization 问题

对于无人车，Apollo 上的 EM planner 对 Path-Speed 进行迭代优化。首先，生成一条 Optimal Path，在最优路径的基础上生成 Optimal Speed Profile。在下一个迭代周期，在优化后的 Speed 的基础上，进一步优化 Path，依次类推。它分了四步走，其中分为两步 E step 和 M step。这种算法的缺点是不一定能收敛到全局最优解。

4

Optimization Key Step

Objective

- Linear combination of key features

Constraints

- Traffic regulations, collision conditions, dynamic requirements

Optimization solver

- Optimal trajectory

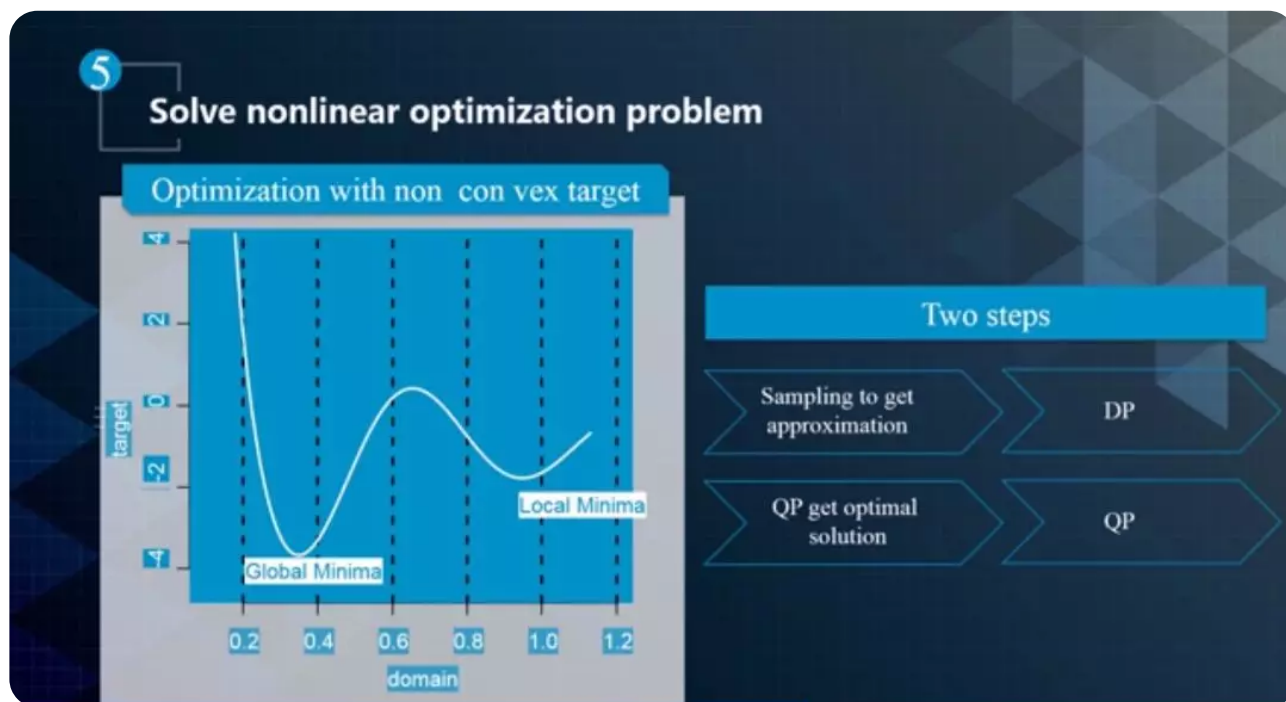


▲ 优化问题的关键步骤

优化问题的关键步骤包括：**Objective Functional**、**Constraint**、**Solver**。**目标函数**是一些关键特征的线性组合。**约束**主要包括交通灯、碰撞以及动态需求等。**优化求解方法**的目的是找到最佳路

径，包括前面讲的动态规划+二次规划的启发式方法。

非线性优化问题



▲非线性优化问题的步骤

对于非线性优化问题，通常都是分两步走，一是**动态规划**，先找一个粗略解。然后再是**二次规划**，从粗略解出发，找出一个最优解。以路径规划为例，假设前方有一个障碍物，首先做出从左边还是右边的避让决策，然后通过 QP 生成一条平滑的曲线去避让障碍物。对于速度而言，先通过动态规划的方式给出一个粗略的解，然后再通过二次规划的方式给出一个更平滑的解。

6

Planning DP



道路点采样

主车速度和位置
路况信息基于撒点网络
选取cost 最低的路径

路径生成

平滑曲线连接
路径曲率连续且可导

最优化路径

DP最优化Cost

Cost 考虑：

- 与路径中心线偏差
- 路径曲率，曲率连续性
- 与障碍物保持合理距离
- 路径曲率符合车辆物理特性

▲ 路径规划优化

具体来讲，在决策规划里如何动态规划 Path 呢？先确定主车的位置，然后往前排撒若干点，基于撒点网络得到一个代价最低的路径，这时候的路径不够平滑。

7

Planning 2.0 Path QP



问题抽象

- 根据当前驾驶信息和道路状况建立平滑的自然坐标系 (SL)

模型建立

- 确定合理优化目标函数与约束条件

优化求解

- 利用二次优化求解带约束的二次规划问题

$$L(s) = \arg \min_{l(s)} w_0 \int l''(s)^2 ds + w_1 \int l'''(s)^2 ds + w_2 \int (l(s) - l_{ref})^2 ds + other$$

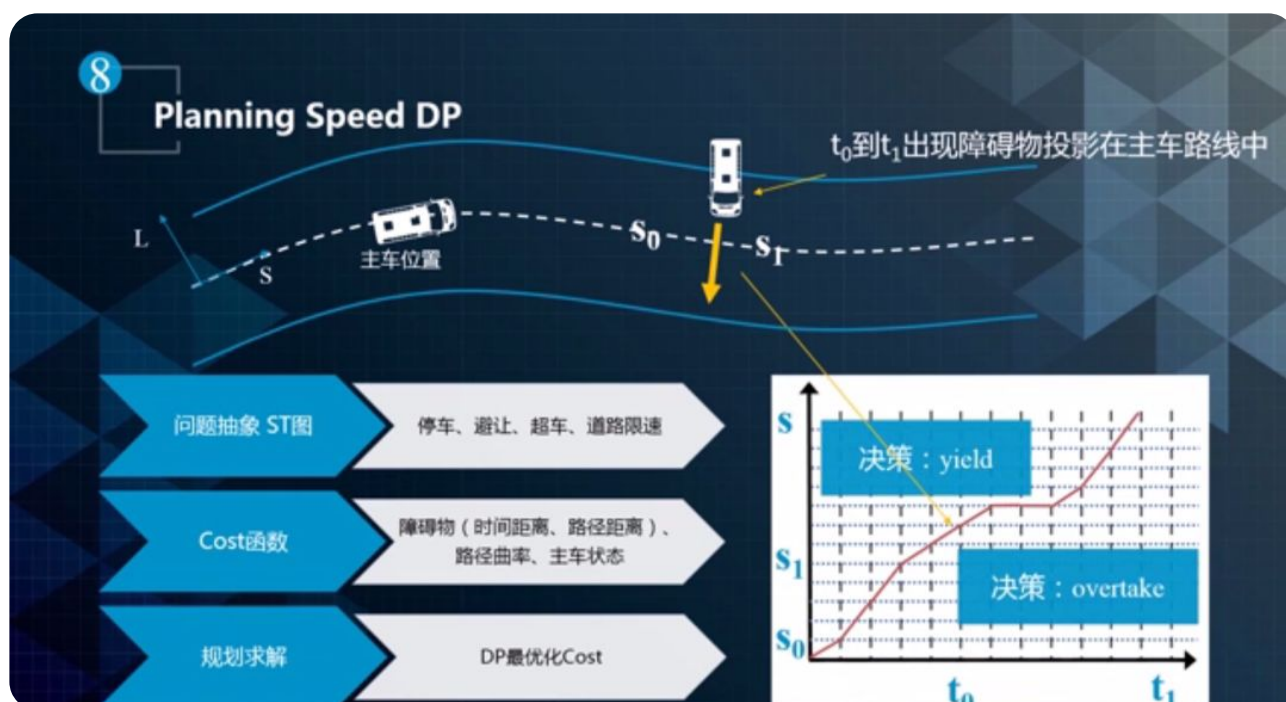
曲率和曲率连续性 贴近中心线

$$a_i \leq l(s_i) \leq b_i, i = 0, 1, 2, \dots \quad \text{避免碰撞}$$

▲ 利用二次规划方法，生成一条平滑的轨迹

然后利用二次规划方法，按照**问题抽象**、**模型建立**和**优化求解**的步骤生成一条平滑的轨迹。

对于速度的优化，同样是类似的，如下图所示。



▲速度规划优化

规划问题如何解决逆行

对于逆行的处理，首先根据当前 Speed Profile 去估计当前逆行障碍物的位置，然后再修正 Path，根据修正之后的 Path 再来处理 Speed，例如需要减速。减速之后，估计需要重新改变路径，依此类推，直到得到理想的规划轨迹。

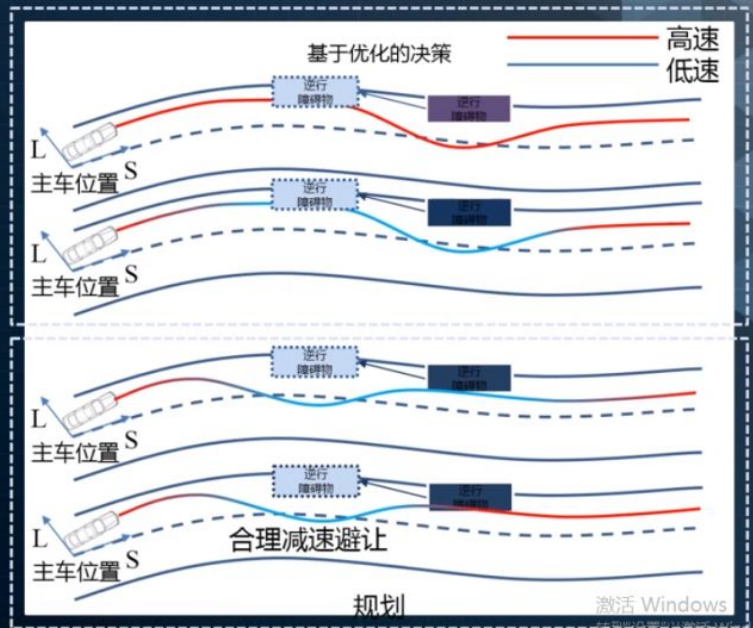
10

规划问题如何解决逆行

EM过程

路径
速度
路径
速度

理想结果



▲规划问题如何解决逆行

目前，百度 Apollo 无人车项目的规划模块进展如下图所示，支持在**城市**和**高速**等环境下的多种驾驶场景处理，包括**直行、转向、路口、停车等**。

13

百度Apollo 无人车规划模块进展

复杂城市道路的路径规划

- 直行，转向，路口，停车，避让障碍物，跟车超车
- 主动换道与被动换道
- 城市与高速场景
- 适配不同场景，L4（配合高精地图的无人驾驶），L3（低成本辅助驾驶），金龙城市调度巴士，货运卡车等
- 处理时间延迟<100ms

Apollo 中国速度

- 突破一百家合作厂商
- 2000+ 开发者参与

▲百度Apollo无人车规划模块进展



强化学习和数据驱动方法



决策问题通常用 POMDP 加上一些机器学习的技术来解决。在前面我们已经介绍过，解决好规划问题，需要把两个方面做好，一个是数据闭环（Data Driven），另一个是基于规则的方法。数据驱动是在基于规则的闭环里面的小闭环。Rule Based 的方法可以对遇到的新案例，很快给出解决方案。

在基于规则的方法的基础上，对问题形成一定的认识，通过把问题抽象成更加通用的问题，定义目标函数来进一步优化问题。**数据驱动的方法**就是通过大量的案例统计分析，得到模型，使得遇到类似问题的时候，不需要过多的考虑，直接套用数据驱动模型获得结果，**Data Driven 的方法**其实就是基于经验的方法，只不过这些经验是模型通过大量的样本数据学习得到的。

