

知 识 点	敲黑板，本文需要学习的知识点有	
	坐标转换	刚体
	投影	切线
	交点	自由度

当**行为层**决定要在当前环境中执行的驾驶行为时，其可以是例如巡航-车道，改变车道或右转，所选择的行为必须被转换成路径或轨迹，可由低级反馈控制器跟踪。所产生的路径或轨迹必须满足**车辆动力学**约束的，对乘客来说是舒适的，并且避免与车载传感器检测到的障碍物的碰撞。寻找这样的路径或轨迹的任务是运动规划系统的责任。

由于**规划**是**感知**和**控制**之间的纽带，当前的新规划算法开发多考虑感知的不确定性以及控制的约束。在**动态环境**数据采集过程中，路径规划的最新发展目标是正确处理数据采集过程中的不确定性。这在实时的情况下会有更好的环境感知效果，并指导规划过程。通过考虑感知阶段的不确定性来提高防止危险情况的能力。从控制的角度来看，需考虑多目标，包括车辆的运动学约束和乘客的舒适性等。

以下，ENJOY

运动规划的环境变化

运动规划根据环境的变化在算法和处理方法上有很大的不同，涉及到**模型建立**、**平滑优化**和**坐标转换**以及**障碍物投影**等。如下图所示。

1

Motion planning with environment

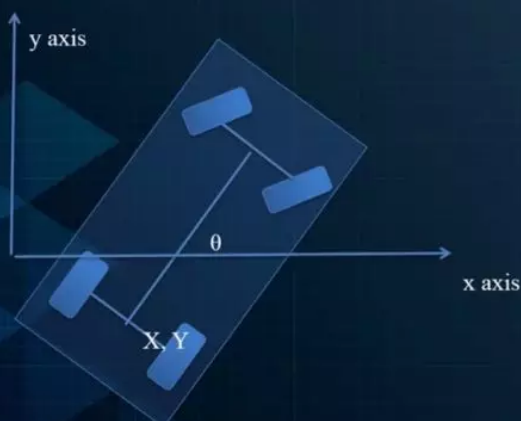
- From point-mass model to bicycle model;
- Understand the requirement from vehicle control perspective;
- Smooth driving path and speed profile; importance performance index
- Computational Geometry, more than computation geometry, evaluate bounding box.
- Smooth SL to XY Frenet Frame mapping techniques.
- Obstacle mapping

运动规划的环境变化

Vehicle Model的建立

3

Vehicle state and model



Pointmass model is not enough to describe vehicle.

- X, Y coordinate of center of rear wheels
- Theta represent the heading of ego vehicle

Vehicle Model的建立

对于汽车而言，质点模型是远远不够的，无人车是前轮转向的车，前后位置的变化是不一样的，那么怎么去描述这种不一样呢？首先从刚体角度考虑，二维平面里的刚体涉及到 XY 和 θ ，也就是以车后

轴中心作为 XY 坐标原点时车身的朝向heading。因为无人车运动模型还多了一个转向的变量，多了一个自由度，刚体模型也不够。

可以将汽车运动模型简化为**自行车模型**，将四轮抽象成两个轮子，前轮中心和后轮中心的运动方向和自行车一样。车辆在垂直方向的运动被忽略掉，用一个二维平面上的运动物体来描述车辆的运动模型。自行车运动的时候具有以下特点，旋转车头的时候，前轮和后轮都围绕一个中心点转动，并且后轮的转向半径 $(1/\kappa)$ 与方向盘转动角度 (ω) 满足以下关系，其中L为前轮中心和后轮中心的距离。

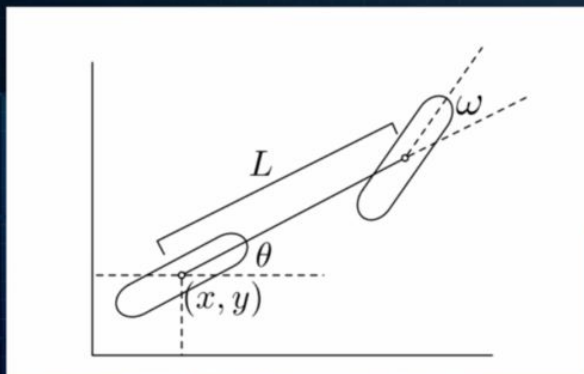
$$\kappa = (\tan(\omega))/L$$

4

Motion planning with vehicle models

Simplified Bicycle Model

ω is the turning angle of from wheel.



$$dx/ds = \cos[\theta(s)]$$

$$dy/ds = \sin[\theta(s)]$$

$$d\theta/ds = \kappa(s).$$

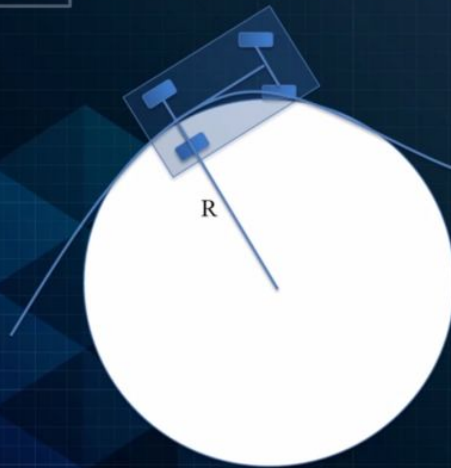
Bicycle model has the following properties:

$$\kappa = (\tan(\omega))/L$$

运动规划与车辆模型

5

Describe the motion of bicycle model



The curvature is defined as the the osculating circle radius of rear wheel center

$$\kappa = d\theta/ds = 1/R * \text{sign}(+1, -1)$$

If left turn, curvature is positive, and right turn curvature is negative

Motion shall be described with at least the following states

$$\mathbf{x} = [x \ y \ \theta \ \kappa \ v]$$

实际的自行车运动模型

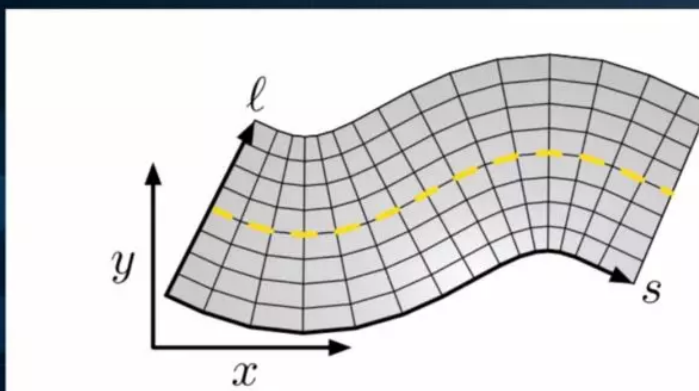
在实际的自行车运动模型中，后轴中心是沿着如上图所示的一条平滑的轨迹运行，该轨迹对应的曲率（ κ ）表示调整方向盘的度数，如果为正，表示向左转，反之则向右转。因此，自行车运动模型可以用 x , y , θ , κ 还有速度 v 来表示。那么沿着这样的轨迹运动时，如何去估计障碍物的距离呢？解决这个问题，先了解一下曲线坐标系以及与世界坐标系之间的转换关系。

曲线坐标系SL

SL坐标系也叫做frenet frame，如下所示。它以道路中心线为参考，**S表示道路中心线的方向**，**L表示与道路中心线垂直的方向**。在结构化道路上行驶的时候，SL坐标系比XY坐标系更加贴合实际需求。那么SL坐标系如何转换到XY坐标系呢？

6

SL Coordinate Frame and XY Coordinate Frame



Centerline of the road is used to construct SL frame

S: the direction along centerline
L: the direction orthogonal to the centerline

SL coordinate is preferred to XY coordinate.

SL坐标系和XY坐标系

IV

SL坐标系到XY坐标系的投影



之所以要投影到世界坐标系，是因为很多信息是全局的，例如红绿灯位置，参考的是XY世界坐标系。在给定SL坐标系时，每一个点的S坐标本身对应一个 $(x-r, y-r)$ 坐标，根据该点的横向偏移距离，可以求出给定点在世界坐标系中的XY位置，如下图所示。其中 **theta** 是参考线的方向，也就是切线方向。如果XY与S方向平行的话，轨迹的曲率还满足图中所示的关系。

7

SL Coordinate to XY Coordinate

Given Curve (s, l, x, y) , how to get a XY coordinate given (s, l) coordinate?

(X, Y)

l

(s, X_r, Y_r)

$$\begin{aligned} X &= X_r - l * \sin(\theta) \\ Y &= Y_r + l * \cos(\theta) \end{aligned}$$

Q: how about curvature, if X, Y moves parallel to the s direction

$$k = 1 / (1 + 1/k_r)$$

SL坐标系到XY坐标系的投影

V XY坐标系到SL坐标系的投影

对于一个给定的曲线，如何将XY坐标系下的点转换到SL坐标系呢？因为SL坐标系并不是唯一的，XY会在曲线上产生很多投影，**投影点**是经过XY坐标，且垂直于曲线的线段与曲线的交点，如下图所示，XY就有两个投影点。通常情况下会增加一些限制，例如投影距离不能超曲率值。需要注意的是，掉头的时候还是需要特殊处理的。

8

XY Frame to SL Frame

X, Y

A diagram illustrating the projection of a point (X, Y) onto a curve. A point labeled 'X, Y' is shown above a wavy line representing a curve. A line segment connects the point to the curve, representing the projection. A curved line also originates from the point and extends towards the right, possibly representing the curve's path or a search space.

Q: given a curve, how to extract s l coordinate from a point under xy coordinate system?

Understand the complexity:

X, Y will have multiple projections on the curve. The projection point is defined as a point on the curve that its normal line passes X, Y coordinate.

SL coordinate point is defined by the nearest point to XY among all those projections.

Is the calculation time consuming?

Yes, it needs at least a running time search to find it.

XY坐标系到SL坐标系的投影

