



Apollo代码学习(二)—车辆运动学模型

原创

follow轻尘

2018-10-11 20:53:13

44832

★ 收藏 249

版权

分类专栏:

Apollo

文章标签:

运动学模型

阿克曼

单车模型

Apollo代码学习—车辆运动学模型

[前言](#)[车辆模型](#)[单车模型\(Bicycle Model\)](#)[车辆运动学模型](#)[阿克曼转向几何\(Ackerman turning geometry\)](#)[小结](#)

Apollo(阿波罗)是一个开放的、完整的、安全的自动驾驶平台，以灵活和高性能的技术架构，为全自动驾驶提供支持。

前言

要实现对车辆的控制，研究其运动学模型和动力学模型必不可少。[上文](#)对横纵向控制的构成及实现做了概述，本文将从车辆的运动学和动力学模型入手，研究如何控制车辆，以及为什么这样控制车辆。

本文的观点及图表多基于下述书籍及链接，并结合Apollo代码整理而来，由于本身并没有学过实车相关的知识，对力学的认知也不够深，如有理解偏颇或侵权之处，请指正删改。

- 【1】Rajamani R. Vehicle Dynamics and Control[M]. Springer Science, 2006.
- 【2】龚建伟, 姜岩, 徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京理工大学出版社, 2014.
- 【3】无人驾驶汽车系统入门（五）——运动学自行车模型和动力学自行车模型

提倡大家支持正版资源，本人提供文档仅限交流学习使用，侵权删：

- 【1】Rajamani R. Vehicle Dynamics and Control[M]. Springer Science, 2006. | [CSDN资源](#)
- 【2】龚建伟, 姜岩, 徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京理工大学出版社, 2014. | [CSDN资源](#)

车辆模型

车辆运动学模型与动力学模型的建立是出于车辆运动的规划与控制考虑的。自动驾驶场景下，车辆大多按照规划轨迹行驶，控制模块的作用就是控制车辆尽可能精准的按照规划轨迹行驶。这就要求规划轨迹尽可能贴近实际情况，也就是说，轨迹规划过程中应尽可能考虑车辆运动学及动力学约束，使得运动跟踪控制的性能更好。

搭建车辆模型主要是为了更好的规划和控制，因此，在分析模型时尽量以应用时所需的输入、输出对象进行建模分析。Apollo中，计算控制命令需要车辆的定位信息、底盘信息以及规划信息等，

```
1 Status xxxController::ComputeControlCommand(  
2     const localization::LocalizationEstimate *localization, //定位信息  
3     const canbus::Chassis *chassis, //底盘信息  
4     const planning::ADCTrajectory *planning_published_trajectory, //规划信息  
5     ControlCommand *cmd //控制命令)
```

其中，

定位信息(localization.proto)包含

```
1 message LocalizationEstimate {  
2     optional apollo.common.Header header = 1;  
3     optional apollo.localization  
4     optional Uncertainty uncerta
```

👍 点赞40

💬 评论25

🔗 分享

★ 收藏249

💰 打赏

🚩 举报

关注

一键三连

```

5 |
6 | // The time of pose measurement, seconds since the GPS epoch (Jan 6, 1980).
7 | optional double measurement_time = 4; // In seconds.
8 |
9 | // Future trajectory actually driven by the drivers
10 | repeated apollo.common.TrajectoryPoint trajectory_point = 5;
11 | }

```

底盘信息(chassis.proto)包含

```

1 | message Chassis {
2 |     enum DrivingMode {
3 |         COMPLETE_MANUAL = 0; // human drive
4 |         COMPLETE_AUTO_DRIVE = 1;
5 |         AUTO_STEER_ONLY = 2; // only steer
6 |         AUTO_SPEED_ONLY = 3; // include throttle and brake
7 |
8 |         // security mode when manual intervention happens, only response status
9 |         EMERGENCY_MODE = 4;
10 | }
11 |
12 | ...
13 |
14 | // Only available for Lincoln now
15 | optional ChassisGPS chassis_gps = 28;
16 |
17 | optional apollo.common.EngageAdvice engage_advice = 29;
18 | }

```

规划信息(planning.proto)包含

```

1 | message ADCTrajectoryPoint {
2 |     optional double x = 1; // in meters.
3 |     optional double y = 2; // in meters.
4 |     optional double z = 3; // height in meters.
5 |
6 |     optional double speed = 6; // speed, in meters / second
7 |     optional double acceleration_s = 7; // acceleration in s direction
8 |     optional double curvature = 8; // curvature (k = 1/r), unit: (1/meters)
9 |     // change of curvature in unit s (dk/ds)
10 |     optional double curvature_change_rate = 9;
11 |     // in seconds (relative_time = time_of_this_state - timestamp_in_header)
12 |     optional double relative_time = 10;
13 |     optional double theta = 11; // relative to absolute coordinate system
14 |     // calculated from the first point in this trajectory
15 |     optional double accumulated_s = 12;
16 |
17 |     // in meters, reference to route SL-coordinate
18 |     optional double s = 4 [deprecated = true];
19 |     // in meters, reference to route SL-coordinate
20 |     optional double l = 5 [deprecated = true];
21 | }

```

对上述元素进行精简，我们需要关注的信息主要有：

1. 时间 (t)
2. 位置 (x, y)
3. 速度 (v)
4. 加速度 (a)
5. 角速度 (ω)
6. 位移 (s)
7. 航向角 (ψ)
8. 曲率 (k)
9. 前轮转角 ($wheel$)

10. 方向盘转角 (*steer*)
11. 刹车 (*brake*)
12. 油门 (*throttle*)
13. 档位 (*gear*)

其中,

- 方向盘转角 (*steer*)
- 刹车 (*brake*)
- 油门 (*throttle*)
- 档位 (*gear*)

为主要被控量。

单车模型(Bicycle Model)

建立模型时, 应尽可能使模型简单易用, 且能真实反映车辆特性, 搭建车辆模型多基于单车模型(*Bicycle Model*), 使用单车模型需做如下假设^[1]:

1. 不考虑车辆在Z轴方向的运动, 只考虑XY水平面的运动, 如图1所示;
2. 左右侧车轮转角一致, 这样可将左右侧轮胎合并为一个轮胎, 以便于搭建单车模型, 如图2所示;
3. 车辆行驶速度变化缓慢, 忽略前后轴载荷的转移;
4. 车身及悬架系统是刚性的。

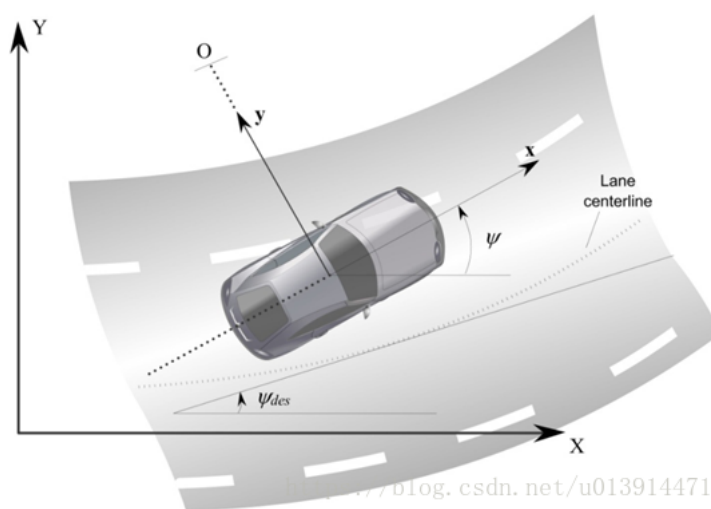


图1 车辆模型

单车模型(*Bicycle Model*)将左/右前轮合并为一个点, 位于A点; 将左/右后轮合并为一个点, 位于B点; 点C为车辆质心点。

$$\frac{\sin(\beta - \delta_r)}{\ell_r} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} + \delta_r)}{R} \quad (1.2)$$

展开公式(1.1)(1.2)可得:

$$\frac{\sin \delta_f \cos \beta - \sin \beta \cos \delta_f}{\ell_f} = \frac{\cos \delta_f}{R} \quad (1.3)$$

$$\frac{\cos \delta_r \sin \beta - \cos \beta \sin \delta_r}{\ell_r} = \frac{\cos \delta_r}{R} \quad (1.4)$$

联立公式(1.3)(1.4)可得:

$$(\tan \delta_f - \tan \delta_r) \cos \beta = \frac{\ell_f + \ell_r}{R} \Rightarrow R \quad (1.5)$$

低速环境下, 车辆行驶路径的转弯半径变化缓慢, 此时我们可以假设车辆的方向变化率等于车辆的角速度。则车辆的角速度为

$$\dot{\psi} = \frac{V}{R} \quad (1.6)$$

联立公式(1.5)(1.6)可得:

$$\dot{\psi} = \frac{V \cos \beta}{\ell_f + \ell_r} (\tan \delta_f - \tan \delta_r) \quad (1.7)$$

则在惯性坐标系XY下, 可得车辆运动学模型:

$$\begin{cases} \dot{X} = V \cos(\psi + \beta) \\ \dot{Y} = V \sin(\psi + \beta) \\ \dot{\psi} = \frac{V \cos \beta}{\ell_f + \ell_r} (\tan \delta_f - \tan \delta_r) \end{cases} \quad (1.8)$$

此模型中有三个输入: δ_f 、 δ_r 、 V 。

滑移角 β 可由公式(1.3)(1.4)求得:

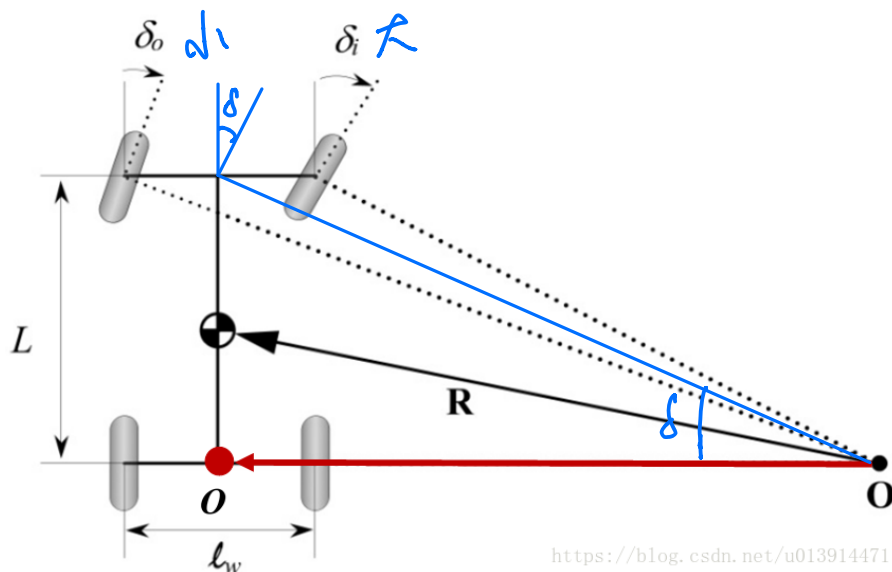
$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\ell_f \tan \delta_r + \ell_r \tan \delta_f}{\ell_f + \ell_r} \right) \quad (1.9)$$

阿克曼转向几何(Ackerman turning geometry)

阿克曼转向几何(Ackerman Turning Geometry)是一种为了解决交通工具转弯时, 内外转向轮路径指向的圆心不同的几何学。

在单车模型中, 将转向时左/右前轮偏角假设为同一角度, 虽然通常两个角度大致相等, 但实际并不是, 通常情况下, 内侧轮胎转角更大。如下图所示, δ_o 和 δ_i 分别为外侧前轮和内侧前轮偏角, 当车辆右转时, 右前轮胎为内侧轮胎, 其转角 δ_i 较左前轮胎转角 δ_o 更大。 ℓ_w 为轮距, L 为轴距, 后轮两轮胎转角始终为 0° 。

当以后轴中心为参考点时, 转向半径 R 为下图中红线。



$R = \frac{l_w}{\sin \beta}$ 当 $\beta \rightarrow 0$ 时, $\sin \beta \rightarrow 0$, 在
这里不求 R , 是 $\frac{0}{0}$

需要用③推导 R

$$R = \frac{l_w \cos \beta}{\sin \beta \cos \beta - \cos \beta \sin \beta} = \frac{l_w \cos \beta}{\cos \beta (\sin \beta - \cos \beta \tan \beta)}$$

图3 阿克曼转向几何

当滑移角 β 很小时, 且后轮偏角为0时, 公式(1.7)可表述为:

使后轮转向轴

$$\frac{\dot{\psi}}{V} \approx \frac{1}{R} = \frac{\delta}{L}$$

$$\frac{\tan \delta}{L} = \frac{1}{R}$$

(1.10)

$\beta \rightarrow 0 \Rightarrow \delta \rightarrow 0$, 前轮转角越大, 转弯越大

由于内外侧轮胎的转向半径不同, 因此有:

$$\delta_o = \frac{L}{R + \frac{l_w}{2}} \approx \tan \delta_o$$

(1.11)

$$\delta_i = \frac{L}{R - \frac{l_w}{2}}$$

(1.12)

则前轮平均转角

$$\delta = \frac{\delta_o + \delta_i}{2} \cong \frac{L}{R}$$

(1.13)

内外转角之差

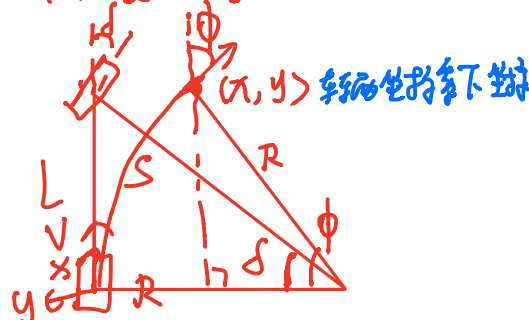
$$\Delta \delta = \delta_i - \delta_o = \frac{L}{R^2} l_w = \delta^2 \frac{l_w}{L}$$

(1.14)

因此, 两个前轮的转向角的差异 $\Delta \delta$ 与平均转向角 δ 的平方成正比。

依据阿克曼转向几何设计的车辆, 沿着弯道转弯时, 利用四连杆的相等曲柄使内侧轮的转向角比外侧轮大大约2~4度。使四个轮子路径的圆心大致上交于后轴的延长线上瞬时转向中心, 让车辆可以顺畅的转弯。

阿克曼转向模型



V, δ, t

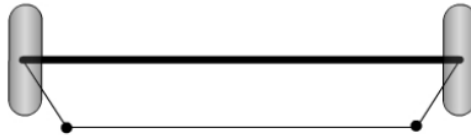
$$S = Vt \quad \tan \delta = \frac{L}{R}$$

$$\phi = \frac{S}{R} = \frac{Vt \tan \delta}{L}$$

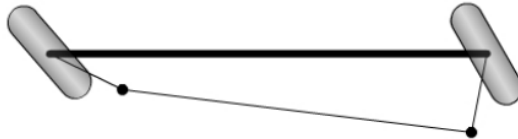
$$x = R \sin \phi$$

$$y = -(R - R \cos \phi) = R(\cos \phi - 1)$$

Trapezoidal geometry



Left turn



Right turn



<https://blog.csdn.net/u013914471>

图4 梯形拉杆装置差动转向机构

小结

以后轴中心为参考点，以单车模型为基础建立车辆的运动学模型， (X_r, Y_r) 为后轴中心坐标， ψ 为航向角， v_r 为车速， δ_f 为前轮转角，后轮转角 δ_r 恒为 0° ， w 为横摆角速度，滑移角 β 极小，假设为0。

当状态量为 $\xi = [X_r, Y_r, \psi]^T$ ，被控量为 $u = [v_r, \delta_f]^T$ 时，公式(1.8)可转换为如下形式：

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_r \\ \dot{Y}_r \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \\ \tan \delta_f / l \end{bmatrix} v_r \quad (1.15)$$

但在无人车控制过程中，一般控制对象 $u = [v_r, w]^T$ ，则式1.15可写为：

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_r \\ \dot{Y}_r \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \\ 0 \end{bmatrix} v_r + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w \quad (1.16)$$

速度 v_r 的控制主要通过刹车 (*brake*)、油门 (*throttle*)、档位 (*gear*) 等来控制，横摆角速度 w 主要通过转动方向盘 (*steer*) 来控制。

Apollo中的运动学约束(controlflags.cc)主要有：

```
1 DEFINE_int32(max_localization_miss_num, 20,
2     "Max missing number of localization before entering estop mode");
3 DEFINE_int32(max_chassis_miss_num, 20,
4     "Max missing number of chassis before entering estop mode");
5 DEFINE_int32(max_planning_miss_num, 20,
6     "Max missing number of planning before entering estop mode");
7
8 DEFINE_double(max_acceleration_when_stopped, 0.01,
9     "max acceleration can be observed when vehicle is stopped");
10 DEFINE_double(max_abs_speed_when_stopped, 0.01,
11     "max absolute speed can be observed when vehicle is stopped");
12 DEFINE_double(steer_angle_rate, 100.0,
13     "Steer angle change rate in percentage.");
```

车辆动力学模型请看下一博文：[Apollo代码学习\(二\)—车辆动力学模型](https://blog.csdn.net/u013914471/article/details/82968608)

点赞40

评论25

分享

收藏249

打赏

举报

关注

一键三连

Apollo代码学习(三)—车辆动力学模型

follow轻尘的博客 4万+

Apollo代码学习—车辆动力学模型车辆动力学模型 车辆动力学模型 动力学主要研究作用于物体的力与物体...

运动学自行车模型和动力学自行车模型

笑扬轩逸的博客 9948

欢迎使用Markdown编辑器写博客 本Markdown编辑器使用StackEdit修改而来，用它写博客，将会带来全新...

优质评论可以帮助作者获得更高权重

评论

linrifengqiu: 文章是不是存在点小错误， β 应该是车辆的滑移角，而不是轮胎的滑移角，定义应该是车身实际前进方向（速度方向）与车身朝向的夹角。轮胎的滑移角应该是轮胎的速度方向与轮胎朝向的夹角。这是我自己的理解，如误请忽略。另外发现叫滑移角是英文直译过来的，一些中文文献中也有称呼侧偏角的，轮胎侧偏角、 β 叫质心侧偏角。 2 年前 回复 ...

江湖Xiao生 回复： 汽车理论上 β 为车辆的质心侧偏角，与轮胎的侧偏角不一样的，四个轮胎的侧偏角结合车辆轮距、前后轴距有一个计算转化的公式。在0.4g侧向加速度范围以内，侧偏力等于侧偏刚度与侧偏角的乘积，可以看作是线性的关系。另外侧偏刚度与轮胎的尺寸、气压、垂直载荷都有关系。 2 月前 回复 ...

weixin_45515232 回复： 应该是汽车滑移角，刚刚一直很困惑！ 1 年前 回复 ...

weixin_43454805 回复： 你说得很对 2 年前 回复 ...

爱码士 小老犇: 666 2 月前 回复 ...

爱码士 strive_day: 文章很详细，小白的我都看的懂，学会了学会了，谢谢分享 2 月前 回复 ...

爱码士 ITKaven: 学到了，点赞支持，一起加油！ 2 月前 回复 ...

m0_46508381: 大佬，单车模型航向角和滑移角是不是弄反了~ 3 月前 回复 ...

SolidKey: 当科普学习了 5 月前 回复 ...

海里的大螃蟹: 字母上加一点，是表示求导的意思吗？还是其他的作用 2 年前 回复 ...

海里的大螃蟹 回复 linrifengqiu: 谢谢 2 年前 回复 ...

linrifengqiu 回复： 应该就只有这个意思，现代控制理论中状态空间方程（时域连续）都是如此表示 2 年前 回复 ...

Choesy: 请问1-11,1-12都应该是tan吧，那么1-13就无法直接相加啦啦。。求解= = 2 年前 回复 ...

Choesy 回复 linrifengqiu: 好的，谢谢您的耐心解答~ 2 年前 回复 ...

linrifengqiu 回复： 不用纠结这些，这些公式都是在小角度假设下推导的，或者说在 $R \gg L$ 下推导的。在这种情况下轮胎偏转角角度很小，所以tan值和角度值近似相等。或者换一种理解方式，在转向半径圆弧下理解，轮胎偏转角即对应圆心角，半径远大于弧长，或者说圆心角很小，所以可以用弦长代替弧长，从而弦长L除以半径即为圆心角。 2 年前 回复 ...

Choesy: 不错，值得学习!!! 2 年前 回复 ...

qq_39408946: 挺好的，学习了 2 年前 回复 ...

< 1 2 >

机器人学中常用的运动学模型

思我所 2271

这里的Simple car model是在无人驾驶中常用到的车辆运动学模型，油门代表对速度v的控制，方向盘转角...

无人车系统（一）：运动学模型及其线性化

昔风不起，唯有努力生存! 3842

相对无人机与机械臂来说，无人车系统的运动学模型非常简洁。尽管简洁，无人车的运动学模型也是非线性...

车辆运动学模型—bicycle model_CodelsCoding的博客

2-15

假设车辆只有前后两个轮A和B,C为车辆质心;车辆运动只考虑平面运动,不考虑Z方向的影响,如车辆颠簸等;...

车辆运动学基本建模_ChengIsland的博客

2-23

从几何学和运动学角度,对运动的车辆进行动态建模。车辆转向运动模型如下所示 和 分别为车辆后轴和前轴...

Apollo代码学习(一)—控制模块概述

点赞40 评论25 分享 收藏249 打赏 举报

关注 一键三连

https://blog.csdn.net/u013914471/article/details/82968608

8/11

Apollo学习-控制模块概述控制纵向控制横向控制仿真仿真平台及工具 概述 控制 纵向控制 横向控制 仿真 仿...

车辆运动学模型:阿克曼转向模型 xihuanzhi1854的博客 1万+
车辆简化模型 阿克曼转向原理 模型的分类解算 仅前轮转向, 后轮角度不变 这种模式适用于多数车辆, 只...

汽车运动学建模-嵌入式文档类资源 2-6
车辆碰撞事故散落物广义运动学建模 2020-01-11 车辆碰撞事故散落物广义运动学建模,许洪国,都雪静,交通...

车辆运动学模型和动力学模型_思我所 2-17
车辆运动学模型和动力学模型 点击即可打开链接:车辆运动学模型 动力学模型

百度Apollo 中纵向控制源码解析 yue597215286的博客 4661
严正声明: 本文系作者yue597215286原创, 未经允许, 严禁转载! 上篇博文中, 我们主要介绍了control...

Apollo代码学习(五)—横纵向控制 follow轻尘的博客 3万+
Apollo代码学习—横纵向控制前言纵向控制 前言 在我的第一篇博文: Apollo代码学习(一)—控制模块概述中...

汽车运动学模型_Micozzc_lyy的博客_车辆运动学模型 2-19
1. 运动学模型 在后轴处,即 (x_r, y_r) 处,速度为 $v_r = \dot{x}_r \cos(\varphi) + \dot{y}_r \sin(\varphi)$...

车辆运动学模型和动力学模型_规划-YY的博客_车辆运动学... 2-27
前面的车辆运动学自行车模型其实还隐含着重要的假设,那就是:车前轮的方向即是车辆当前的速度方向,...

携程Apollo统一配置中心的搭建和使用 (java) luhong327的博客 13万+
一.Apollo配置中心介绍 1、What is Apollo 1.1 Apollo简介 Apollo (阿波罗) 是携程框架部门研发的开源配...

四旋翼无人机的动力学模型 雨田2017的博客 2万+
1.四旋翼无人机UAV(unmanned aerial vehicles)简介 四旋翼无人机是一种能够垂直起降的非共轴的多...

汽车运动学模型_xihuanzhi1854的博客 2-2
 $V_B \cos(\beta_A) = V_C \cos(\beta_B) = V_A \cos(\delta_{\psi})$ $V_C = \dot{\psi} R_{OA} V_B = \dots$

自动驾驶中的车辆运动学模型 yangdeshun888的博客 813
简介 要控制车辆的运动, 首先要对车辆的运动简历数字化模型, 模型建立的越准确, 对车辆运动的描述越...

车辆工程 (1) ——线性二自由度汽车模型的运动方程 Mr_ZZTC的博客 7848
1. 简化与假设 忽略转向系统的影响, 以前轮转角为输入。 忽略悬架作用, 认为汽车车厢只做平行于地面的...

MPC模型预测控制 (四) -MATLAB跟踪圆 tingfenghanlei的博客 4856
参考https://github.com/Janani-Mohan %% YALMIP : Circular Trajectory Tracking using MPC clc; clear; clo...

汽车运动学模型的线性化推导过程 yezhailiaoake的博客 3275
1. 方法 假设有一非线性微分方程 $y' = f(x,u)$ $y'' = f(x,u)$ 且有静态点满足 $y'_0 = f(x_0,u_0)$ $\dot{y}_0 = f(x_...$

matlab下simulink模型在代码中修改参数 zekdot的博客 8501
最近由于机器人学作业的缘故不得不使用matlab, 仿真的时候使用了simulink模块, 而作业要求中要求修改...

C2_车辆动力学与运动学模型 weixin_40215443的博客 1545
运动学模型、动力学模型、《无人驾驶车辆模型预测控制》

机器人小车的运动模型 算法攻城狮 2431
机器人底层程序的时候, 经常用到航迹推演 (Odometry), 无论是定位导航还是普通的方向控制。航迹推...

无人驾驶汽车系统入门 (五) ——运动学自行车模型和动力学自行车... AdamShan的博客 4万+
无人驾驶汽车系统入门 (五) ——运动学自行车模型和动力学自行车模型 在简要了解了PID控制以后, 我们...

©2020 CSDN 皮肤主题: 游动-白 设计师:白松林 返回首页

关于我们 招贤纳士 广告服务 开发助手 400-660-0108 kefu@csdn.net 在线客服 工作时间 8:30-22:00

公安备案号11010502030143 京ICP备19004658号 京网文〔2020〕1039-165号 经营性网站备案信息
北京互联网违法和不良信息举报中心 网络110报警服务 中国互联网举报中心 家长监护 Chrome商店下载
©1999-2021北京创新乐知网络技术有限公司 版权与免责声明 版权申诉



follow轻尘

码龄7年

暂无认证

9

5万+

5万+

26万+



原创

周排名

总排名

访问

等级

点赞40

评论25

分享

收藏249

打赏

举报

关注

一键三连



私信

关注

搜博主文章

热门文章

Apollo代码学习(二)—车辆运动学模型

44798

Apollo代码学习(三)—车辆动力学模型

40953

Apollo代码学习(六)—模型预测控制(MPC)

37980

Apollo代码学习(五)—横纵向控制

34432

Apollo代码学习(一)—控制模块概述

27821

分类专栏



Apollo

7篇



Control

4篇



Markdown

1篇



电动汽车

1篇



Git

1篇

最新评论

Apollo代码学习(五)—横纵向控制

qq_44904066: 好的，谢谢

Apollo代码学习(三)—车辆动力学模型

abcwinner: 横向误差不太好计算，不过横向误差的导数容易计算，结合向量求导和F ...

Apollo代码学习(三)—车辆动力学模型

XUAN1236: 这个动力学模型基于的假设就是小角度，每一次计算都是假设车辆在 ...

Apollo代码学习(五)—横纵向控制

follow轻尘: 啊，apollo的代码开源的啊，都托管在github上啊。Apollo的官方网站上 ...

Apollo代码学习(五)—横纵向控制

qq_44904066: 弱弱问一句这个apollo的控制代码在哪儿找到的啊

最新文章

Ubuntu下java的安装与卸载

数字滤波算法

Git fatal: unable to auto-detect email address

2019年 3篇

2018年 9篇

目录

Apollo代码学习—车辆运动学模型

前言

点赞40

评论25

分享

收藏249

打赏

举报

关注

一键三连

单车模型(Bicycle Model)

车辆运动学模型

阿克曼转向几何(Ackerman turning geom...

小结