



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112486018 B

(45) 授权公告日 2021.08.17

(21) 申请号 202011532383.9

(22) 申请日 2020.12.23

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112486018 A

(43) 申请公布日 2021.03.12

(73) 专利权人 中国矿业大学(北京)
地址 100083 北京市海淀区学院路丁11号
机电学院逸夫楼808

(72) 发明人 刘康 张龔 郑颖

(74) 专利代理机构 北京盛询知识产权代理有限公司 11901

代理人 方亚兵

(51) Int. Cl.
G05B 13/02 (2006.01)

(56) 对比文件

- CN 109214127 A, 2019.01.15
- CN 110471428 A, 2019.11.19
- US 2018196444 A1, 2018.07.12
- CN 111610780 A, 2020.09.01
- CN 107153420 A, 2017.09.12
- WO 2014009631 A1, 2014.01.16
- CN 111929068 A, 2020.11.13

审查员 李江平

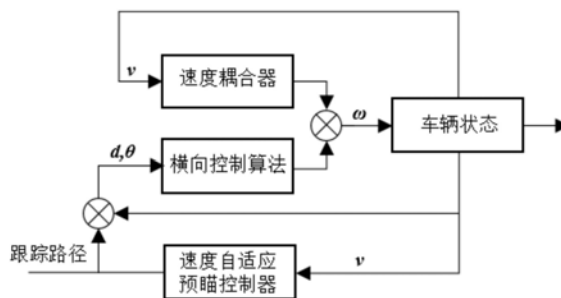
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于速度自适应预瞄的无模型无人车路径跟踪方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于速度自适应预瞄的无模型无人车路径跟踪方法,具体包括以下步骤:S1:搭建无模型的横向控制器,并输出无人车方向盘的转动量函数;S2:通过设置初始和平衡条件下的参数,对所述无人车方向盘的转动量函数中的增益参数进行整定,得到整定后的无人车方向盘的转动量函数;S3:在所述整定后的无人车方向盘转动量输出函数中引入速度耦合器函数和速度自适应预瞄距离函数,得到改进后的无人车方向盘转动量输出函数。本发明适用于大部分无人车模型,包括:二自由度动力学无人车模型、三自由度动力学无人车模型、高度复杂的超高自由度的无人车模型;使无人车在全速域应对复杂多变的跟踪路径时依然可以保持精准、稳定的跟踪效果。



1. 一种基于速度自适应预瞄的无模型无人车路径跟踪方法,其特征在于,具体包括以下步骤:

S1:搭建无模型的横向控制器,并输出无人车方向盘的转动量输出函数;

所述步骤S1具体为:

S11:搭建无模型的横向控制器;

S12:计算无人车与跟踪路径的横向偏差和角度偏差;

S13:分别计算横向偏差的增益参数和角度偏差的增益参数;

S14:分别计算横向偏差的激活函数和角度偏差的激活函数;

S15:通过所述步骤S13~S14基于所述无模型的横向控制器中的无模型的横向控制器函数 $\omega(d, \theta)$,得到无人车方向盘的转动量输出函数,其表达式为: $\omega(d, \theta) = k_1 f_d(d) + k_2 f_\theta(\theta)$,式中d为横向偏差, θ 为角度偏差, k_1 为横向偏差的增益参数, k_2 为角度偏差的增益参数, f_d 为横向偏差的激活函数, f_θ 为角度偏差的激活函数;S2:通过设置初始和平衡条件下的参数,对所述无人车方向盘的转动量输出函数中的增益参数进行整定,得到整定后的无人车方向盘的转动量输出函数;

所述步骤S2具体为:

S21:基于无人车方向盘的转动量输出函数,设置初始条件下的参数,得到初始状态下的状态方程;

S22:基于无人车方向盘的转动量输出函数,设置平衡条件下的参数,得到平衡状态下的状态方程;

S23:联立所述步骤S21~S22中的两个状态方程,得到所述无人车方向盘的转动量输出函数中的增益参数;

S24:将所述增益参数代入所述无人车方向盘的转动量输出函数中,得到整定后的无人车方向盘的转动量输出函数;

S3:在所述整定后的无人车方向盘转动量输出函数中引入速度耦合器函数和速度自适应预瞄距离函数,得到改进后的无人车方向盘转动量输出函数,并对无人车行驶路径进行跟踪;

所述步骤S3 具体为:

S31:构建速度耦合器函数,并设置标定速度;

S32:将设置完成后的速度耦合器函数引入所述整定后的无人车方向盘转动量输出函数中;

S32:构建速度自适应预瞄距离函数,并设置向前预瞄的距离;

S33:计算在可导路径下无人车与预瞄路径的横向偏差和角度偏差;

S34:计算在不可导路径下无人车与预瞄路径的横向偏差和角度偏差;

S35:基于可导路径下和不可导路径下无人车与预瞄路径的横向偏差和角度偏差,得到改进后的无人车方向盘转动量输出函数。

2. 根据权利要求1所述的基于速度自适应预瞄的无模型无人车路径跟踪方法,其特征在于:所述激活函数采用的是sigmoid函数。

3. 根据权利要求1所述的基于速度自适应预瞄的无模型无人车路径跟踪方法,其特征在于:

所述初始条件下的参数包括初始横向偏差、初始角度偏差和期望方向转角；

所述平衡条件下的参数包括平衡状态下的横向偏差和期望方向转角、平衡角度偏差；
所述平衡状态下的期望方向转角为 0° 。

4. 根据权利要求1所述的基于速度自适应预瞄的无模型无人车路径跟踪方法，其特征
在于：所述步骤S33具体为：

S331：基于所述S12中的横向偏差和所述S32中的速度自适应预瞄距离函数，得到可导
路径的预瞄点 \dot{P}_p ；

S332：根据所述可导路径的预瞄点 \dot{P}_p ，得到可导路径情况下的预瞄跟踪路径 \widehat{Line} ，其表
达式为：

$$\widehat{Line} = (\widehat{Route})'_{(\dot{P}_p)}x + P_p|y - (\widehat{Route})'_{(\dot{P}_p)}P_p|x$$

其中， $P_p|y$ 指预瞄点 \dot{P}_p 坐标值的y值， $P_p|x$ 为预瞄点 \dot{P}_p 坐标值的x值。

5. 根据权利要求4所述的基于速度自适应预瞄的无模型无人车路径跟踪方法，其特征
在于：所述可导路径的预瞄点 \dot{P}_p 和所述不可导路径的预瞄点 \dot{P}_p 的计算，需要满足：

$$\begin{cases} \min_{\dot{P}_p \in \widehat{Route}} \{ |\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v) \} \\ \overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} \odot v > 0 \end{cases}$$

其中， $\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p}$ 为无人车 \dot{O} 指向预瞄点 \dot{P}_p 的向量；d为无人车 \dot{O} 与跟踪路径 \widehat{Route} 的横向偏
差；r(v)为速度自适应预瞄距离函数；v为无人车的速度并设置向前预瞄的距离。

6. 根据权利要求5所述的基于速度自适应预瞄的无模型无人车路径跟踪方法，其特征
在于：所述步骤S34具体为：

S341：基于所述S12中的横向偏差和所述S32中的速度自适应预瞄距离函数，得到不可
导路径的预瞄点 \dot{P}_p ；

S342：根据所述不可导路径的预瞄点 \dot{P}_p ，得到不可导路径情况下的预瞄跟踪路径 \widehat{Line} ，
其表达式为：

$$\begin{aligned} \dot{P}_p \text{ and } P_{p+index} &\in \widehat{Line}, p + index \in [0, e] \\ index &= \begin{cases} -\frac{|\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v)}{|\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v)}, & |\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v) \neq 0 \\ 1, & |\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v) = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

其中，p为跟踪点与v同向的切向量。

一种基于速度自适应预瞄的无模型无人车路径跟踪方法

技术领域

[0001] 本发明涉及无人车控制技术领域,特别是涉及一种基于速度自适应预瞄的无模型无人车路径跟踪方法。

背景技术

[0002] 路径跟踪是无人车根据感知、决策、规划结果正确沿道路行驶的关键部分,对无人车的稳定、安全运行具有重要作用。路径跟踪技术的目标在于使无人车可以精确、稳定的沿着规划路径行驶,具有良好的发展和应用前景。

[0003] 路径跟踪技术主要分类两种:(1)无模型的路径跟踪方法:比例积分微分(proportion integration differentiation,PID)控制,使用PID方法控制自动驾驶车辆(Marino等,2011),不考虑车辆的物理特性,在面对高速、复杂的环境时则难以适用(陈慧岩等,2017);基于前馈—反馈控制的自动转向系统,可实现车辆极限工况下的自动驾驶(Zhao,2011);Kayacan等(2016)提出了一种基于轨迹跟踪误差的鲁棒控制方法,使控制方法在直线和曲线中保持较小的误差要求;基于鲁棒 H_{∞} 反馈控制器的路径跟踪方法考虑了轮胎偏侧刚度和外界干扰的不确定性,提高了控制方法的鲁棒性(Hu等,2015)。(2)基于模型的路径跟踪方法:基于车辆运动学模型的横向控制方法和基于车辆动力学模型的横向控制方法。

[0004] 基于车辆运动学模型的横向控制方法包括基于前轮反馈控制(front wheel feedback)的Stanley方法(Thrun等,2006)和基于后轮反馈控制(rear wheel feedback)的控制方法(Paden等,2016),均需对车辆的运动学特性或动力学特性进行准确的建模,通常需要对模型进行简化,从而通过简化模型的建模来预测车辆跟踪偏差的状态,进而做到对车辆的准确控制。

[0005] 基于车辆动力学模型的横向控制方法包括基于动力学模型的线性二次型调节器(linear quadratic regulator,LQR)的横向控制方法(Hu等,2016),该方法在面对复杂的车辆模型时难以做到准确建模,导致其期望的输出值本身便存在偏差,在速度域跨越较大时难以实现精确控制的覆盖,并且复杂的方法带来了大量参数调节的工作,效率较低。

[0006] 综上所述,寻找一种基于速度自适应预瞄的无模型无人车路径跟踪方法成为研究人员关注的问题。

发明内容

[0007] 为了解决上述技术问题,本发明提供一种基于速度自适应预瞄的无模型无人车路径跟踪方法,该方法不仅能够适用于具有高度复杂的车辆动力学特性无人车模型,还能够使得无人车在高速场景应对复杂路径(如大曲率路径,不可导路径)时,提高其在路径跟踪任务中的跟踪精度和稳定性。

[0008] 为实现上述目的,本发明提供一种基于速度自适应预瞄的无模型无人车路径跟踪方法,具体包括如下步骤:

- [0009] S1:搭建无模型的横向控制器,并输出无人车方向盘的转动量函数;
- [0010] S2:通过设置初始和平衡条件下的参数,对所述无人车方向盘的转动量函数中的增益参数进行整定,得到整定后的无人车方向盘的转动量函数;
- [0011] S3:在所述整定后的无人车方向盘转动量输出函数中引入速度耦合器函数和速度自适应预瞄距离函数,得到改进后的无人车方向盘转动量输出函数,并对无人车行驶路径进行跟踪。
- [0012] 优选地,所述步骤S1具体为:
- [0013] S11:搭建无模型的横向控制器;
- [0014] S12:计算无人车与跟踪路径的横向偏差和角度偏差;
- [0015] S13:分别计算所述横向偏差和所述角度偏差的增益参数;
- [0016] S14:分别计算所述横向偏差和所述角度偏差的的激活函数;
- [0017] S15:基于所述步骤S13~S14,得到无人车方向盘的转动量函数。
- [0018] 优选地,所述激活函数采用的是sigmoid函数。
- [0019] 优选地,所述步骤S2具体为:
- [0020] S21:基于无人车方向盘的转动量函数,设置初始条件下的参数,得到初始状态下的状态方程;
- [0021] S22:基于无人车方向盘的转动量函数,设置平衡条件下的参数,得到平衡状态下的状态方程;
- [0022] S23:联立所述步骤S21~S22中的两个状态方程,得到所述无人车方向盘的转动量函数中的增益参数;
- [0023] S24:将所述增益参数代入所述无人车方向盘的转动量函数中,得到整定后的无人车方向盘的转动量函数。
- [0024] 优选地,所述初始条件下的参数包括初始横向偏差、初始角度偏差和期望方向转角;
- [0025] 所述平衡条件下的参数包括平衡状态下的横向偏差和期望方向转角、平衡角度偏差;所述平衡状态下的期望方向转角为 0° 。
- [0026] 优选地,所述步骤3具体为:
- [0027] S31:构建速度耦合器函数,并设置标定速度;
- [0028] S32:将设置完成后的速度耦合器函数引入所述整定后的无人车方向盘转动量输出函数中;
- [0029] S32:构建速度自适应预瞄距离函数,并设置向前预瞄的距离;
- [0030] S33:通过计算在可导路径下无人车与预瞄路径的横向偏差和角度偏差;
- [0031] S34:通过计算在不可导路径下无人车与预瞄路径的横向偏差和角度偏差;
- [0032] S35:基于可导路径下和不可导路径下无人车与预瞄路径的横向偏差和角度偏差,得到改进后的无人车方向盘转动量输出函数。
- [0033] 优选地,所述步骤S33具体为:
- [0034] S331:基于所述S1中的横向偏差和所述S32中的速度自适应预瞄距离函数,得到可导路径的预瞄点 \dot{P}_p ;

[0035] S332:根据所述可导路径的预瞄点 \dot{P}_p ,得到可导路径情况下的预瞄跟踪路径 \widehat{Line} ,其表达式为:

$$[0036] \quad \widehat{Line} = (\widehat{Route})'_{(\dot{P}_p)}x + P_p|y - (\widehat{Route})'_{(\dot{P}_p)}P_p|x$$

[0037] 其中, $P_p|y$ 指预瞄点 \dot{P}_p 坐标值的y值, $P_p|x$ 为预瞄点 \dot{P}_p 坐标值的x值。

[0038] 优选地,所述可导路径的预瞄点 \dot{P}_p 和所述不可导路径的预瞄点 \dot{P}_p 的计算,需要满足:

$$[0039] \quad \begin{cases} \min_{\dot{P}_p \in \widehat{Route}} \{ |\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v) \} \\ \overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} \odot v > 0. \end{cases}$$

[0040] 优选地,所述步骤S34具体为:

[0041] S341:基于所述S1中的横向偏差和所述S32中的速度自适应预瞄距离函数,得到不可导路径的预瞄点 \dot{P}_p ;

[0042] S342:根据所述不可导路径的预瞄点 \dot{P}_p ,得到不可导路径情况下的预瞄跟踪路径 \widehat{Line} ,其表达式为:

$$[0043] \quad \dot{P}_p \text{ and } P_{p+index} \in \widehat{Line}, p + index \in [0, e]$$

$$[0044] \quad \text{其中, } index = \begin{cases} -\frac{|\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v)}{|\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v)}, & |\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v) \neq 0 \\ 1, & |\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v) = 0 \end{cases}.$$

[0045] 优选地,所述不可导路径的预瞄点 \dot{P}_p 的计算,需要满足:

$$[0046] \quad \min_{\dot{P}_p \in \widehat{Route}} \{ |\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v) \}$$

$$[0047] \quad \overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} \odot v > 0.$$

[0048] 与现有技术相比,本发明的有益效果在于:

[0049] (1) 本发明基于无模型横向控制器,用于控制无人车的方向盘转角,该无模型的横向控制器避免了对无人车进行运动学和动力学建模,只依据与跟踪路径的实时偏差反馈作为输入并输出方向盘的转动量,在应对复杂的无人车模型时可以大量简化工作;

[0050] (2) 本发明基于的无模型横向控制器,依据初始状态下期望的方向盘转动量和无人车转向时的平衡状态,设计了无人车与跟踪路径的实时偏差反馈量的增益参数,使得无人车进行路径跟踪时更为迅速和稳定;

[0051] (3) 本发明基于的速度耦合器,保证无人车在全速域进行转向时其方向盘转动量都保持在合理的论域范围内,使得无人车在任何合理速度下都能对跟踪路径进行快速稳定的跟踪;

[0052] (4) 本发明基于速度自适应预瞄控制器,使无人车在全速域进行路径跟踪时获得与速度对应的前馈量,尤其在对大曲率跟踪路径和不可导路径进行跟踪时,无人车可以消

除转向的滞后性,保持对各种路径的稳定跟踪。

[0053] 综上,本发明提出的基于速度自适应预瞄的无模型无人车路径跟踪方法,能够适用于大部分无人车模型,包括:二自由度动力学无人车模型、三自由度动力学无人车模型、高度复杂的超高自由度的无人车模型。并且使无人车在全速域应对复杂多变的跟踪路径时依然可以保持精准、稳定的跟踪效果。

附图说明

[0054] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动性的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0055] 图1为本发明实施例1方法流程示意图;

[0056] 图2为本发明实施例1无模型横向控制器的反馈量示意图;

[0057] 图3为本发明实施例1速度自适应预瞄控制器原理图。

具体实施方式

[0058] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0059] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0060] 实施例1

[0061] 参照图1所示,本发明提出的基于速度自适应预瞄的无模型无人车路径跟踪方法,可以通过无模型的横向控制器实现实时对可导路径的稳定跟踪,可在存在大偏差的情况下使车辆轨迹快速收敛至跟踪路径,为提高车辆在全速域跟踪和收敛的稳定性,设计了速度耦合器将方向盘转角控制在许可的论域范围内,以避免轮胎打滑而失效,使车辆转向更稳定、合理。在应对不可导路径时,本发明设计了速度自适应的预瞄控制器,自动调整跟踪轨迹保证车辆稳定运行,并可一定程度解决控制迟滞问题。

[0062] 具体包括如下步骤:

[0063] S1、搭建无模型的横向控制器,并依据无人车与跟踪路径的实时偏差作为反馈输入无模型的横向控制器,并输出无人车方向盘的转动量;

[0064] S11:搭建无模型的横向控制器;

[0065] S12:计算无人车 \dot{O} 与跟踪路径 \widehat{Route} 的横向偏差 d 和角度偏差

$$[0066] \begin{cases} d = \overrightarrow{OP} \\ \theta = \cos^{-1}(\cos\langle \overrightarrow{d}_L, \vec{v} \rangle) \end{cases}$$

[0067] 其中, \overrightarrow{OP} 指由无人车 \dot{O} 指向跟踪路径 \widehat{Route} 上的任意点 \dot{P} 的向量, \dot{P} 指在跟踪路径

\widehat{Route} 上的点, 即 $P \in \widehat{Route}$, d 满足 $\min_{P \in \widehat{Route}} \{(\overrightarrow{O, P})\}$, 即无人车 O 指向距离跟踪路径 \widehat{Route} 的最小向量, \vec{v} 指无人车的速度, 为 d 的法向量, 且 $\vec{d}_\perp \odot \vec{v} > 0$;

[0068] 参照图2所示, 本实施例选用XOY为地面坐标系, X vehicle 0 vehicle Y vehicle 为车辆坐标系, 车辆坐标系的横轴为车辆前轴, AB为一段可导跟踪路径, 横向偏差为前轴中心指向跟踪路径的向量, 其指向的点为跟踪点, v 为车辆的纵向速度, p 为跟踪点与 v 同向的切向量, 角度偏差 θ 为 v 与 p 的夹角。

[0069] 参照图3所示, F' 为跟踪路径AB到O vehicle的最近点, $R(v)$ 为速度自适应预瞄距离函数, 以 F' 为圆心, $R(v)$ 为半径做一段圆弧 ρ , 与AB在 v 正方向的交点即为预瞄点 F , 再以 F 为跟踪点得到横向偏差 d 和角度偏差 θ 。

[0070] S13: 计算横向偏差 d 的增益参数 k_1 和度偏差 θ 的增益参数 k_2 ;

[0071] S14: 计算横向偏差 d 的激活函数 f_d 和度偏差 θ 的激活函数 f_θ , 其表达式为:

$$[0072] \begin{cases} f_d(d) = \text{sigmoid}(d) \\ f_\theta(\theta) = \text{sigmoid}(\theta) \end{cases}$$

[0073] 在本实施例中使用sigmoid函数作为激活函数, 以保证无模型的横向控制器在小偏差的场景下保持敏感性;

[0074] 最后根据步骤S13和S14, 得到基于无模型的横向控制器函数 $\omega(d, \theta)$, 并输出方向盘的转动量 ω , 其表达式为:

$$[0075] \quad \omega(d, \theta) = k_1 f_d(d) + k_2 f_\theta(\theta)。$$

[0076] S2、依据初始条件下期望的方向盘转动量和无人车转向的平衡状态对无模型的横向控制器的增益参数进行整定;

[0077] S21: 设定初始条件下的参数和期望方向盘转角 ω_e , 得到初始状态下的方程, 其表达式为:

$$[0078] \quad k_1 f_d(d_0) + k_2 f_\theta(\theta_0) = \omega_e$$

[0079] 其中, 初始条件下的状态包括初始横向偏差 d_0 、初始角度偏差 θ_0 和期望方向盘转角 ω_e ;

[0080] S22: 设定平衡状态时的横向偏差 d_b 和平衡角度偏差 θ_b , 平衡状态指无人车在转向时方向盘转角 ω_e 为0的时刻, 得到平衡状态下的方程, 其表达式为:

$$[0081] \quad k_1 f_d(d_b) + k_2 f_\theta(\theta_b) = 0$$

[0082] S23: 根据步骤S21和步骤S22得到的方程, 解得横向偏差 d 的增益参数 k_1 和角度偏差 θ_b 的增益参数 k_2 , 并将其代入无模型的横向控制器, 得到基于无模型的横向控制器的无人车方向盘转动量输出函数:

$$[0083] \quad \omega(d, \theta) = \frac{-f_\theta(\theta_b)\omega_e}{f_\theta(\theta_0)f_d(d_b) - f_\theta(\theta_b)f_d(d_0)} f_d(d) + \frac{f_d(d_b)\omega_e}{f_\theta(\theta_0)f_d(d_b) - f_\theta(\theta_b)f_d(d_0)} f_\theta(\theta)$$

[0084] S3、将速度耦合器引入无人车方向盘转动量输出函数中, 使输出无人车方向盘的转动量能够适应不同的速度;

[0085] S31: 构建速度耦合器函数 $g(v)$, 并设置标定速度 v_m , 速度 v 大于标定速度 v_m 则允许

的方向盘转角越小,反之则越大,得到

$$[0086] \quad g(v) = \frac{v_m}{v}$$

[0087] S32:将速度耦合器函数引入方向盘转动量输出函数中,得到:

$$[0088] \quad \omega_e(d, \theta, v) = g(v) \omega(d, \theta)$$

[0089] S4、将速度自适应预瞄控制器引入方向盘转动量输出函数中,以调整无人车的跟踪路径;

[0090] S41:构建速度自适应预瞄距离函数 $r(v)$, v 为无人车的速度并设置向前预瞄的距离,得到

$$[0091] \quad r(v) = \text{sigmoid}(v)$$

[0092] 在本实施例中使用sigmoid函数作为速度自适应预瞄距离函数,使速度自适应预瞄控制器在低速和过高速论域的场景下保证速度自适应预瞄控制器的稳定性,同时保证常用速度论域中的敏感性;

[0093] S42:计算在可导路径下无人车与预瞄路径的横向偏差 d_p 和角度偏差 θ_p ;

[0094] 利用步骤S1得到的 d 和步骤S41得到的 $r(v)$ 得到预瞄点 \dot{P}_p ,使得 \dot{P}_p 满足:

$$[0095] \quad \begin{cases} \min_{\dot{P}_p \in \widehat{Route}} \{ |\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v) \} \\ \overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} \odot v > 0. \end{cases}$$

[0096] 其中, $\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p}$ 为无人车 \dot{O} 指向预瞄点 \dot{P}_p 的向量;

[0097] 并通过预瞄点 \dot{P}_p 计算预瞄跟踪路径 \widehat{Line} ,其表达式为:

$$[0098] \quad \widehat{Line} = (\widehat{Route})'_{(\dot{P}_p)} x + P_p |y - (\widehat{Route})'_{(\dot{P}_p)} P_p |x$$

[0099] 其中, $P_p |y$ 指预瞄点 \dot{P}_p 坐标值的 y 值, $P_p |x$ 为预瞄点 \dot{P}_p 坐标值的 x 值;

[0100] S43:计算在不可导路径下无人车与预瞄路径的横向偏差 d_p 和角度偏差 θ_p ,为了方便讨论,将不可导路径归纳为 $\widehat{Route} = \{P_0, P_1, \dots, P_e\}$,其中 P_n 为路径中的不可导点, $n \in [0, e]$ 。

[0101] 使用步骤S1得到的 d 和步骤S41得到的 $r(v)$ 得到预瞄点 \dot{P}_p ,使得 \dot{P}_p 满足:

$$[0102] \quad \begin{cases} \min_{\dot{P}_p \in \widehat{Route}} \{ |\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v) \} \\ \overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} \odot v > 0. \end{cases}$$

[0103] 根据预瞄点 \dot{P}_p 得到预瞄跟踪路径 \widehat{Line} ,并使 \widehat{Line} 满足以下关系式:

$$[0104] \quad \dot{P}_p \text{ and } P_{p+index} \in \widehat{Line}, p + index \in [0, e]$$

$$[0105] \quad \text{其中, } index = \begin{cases} -\frac{|\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v)}{|\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v)}, & |\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v) \neq 0 \\ 1, & |\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_p} - d| - r(v) = 0 \end{cases};$$

[0106] S44:在可导路径情况下使用预瞄跟踪路径 \widehat{Line} 的表达式,在不可导路径情况下使用步骤S43得到的预瞄跟踪路径 \widehat{Line} 的表达式,并计算无人车 \dot{O} 与预瞄路径 \widehat{Line} 的横向偏差 d_p 和角度偏差 θ_p

$$[0107] \quad \begin{cases} d_p = \overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_l} \\ \theta_p = \cos^{-1}(\cos\langle \overrightarrow{d_{p\perp}}, \vec{v} \rangle) \end{cases}$$

[0108] 其中, $\overrightarrow{\dot{O}\dot{P}_l}$ 指由无人车 \dot{O} 指向跟踪路径 \widehat{Line} 上的任意点 \dot{P}_l 的向量,满足 $\min_{P \in \widehat{Route}} \{\langle \overrightarrow{\dot{O}}, \overrightarrow{\dot{P}_l} \rangle\}$,即无人车 \dot{O} 指向距离跟踪路径 \widehat{Line} 的最小向量, $\overrightarrow{d_{p\perp}}$ 为 d_p 的法向量,且 $\overrightarrow{d_{p\perp}} \odot \vec{v} > 0$;

[0109] S45:最终得到改进的无人车方向盘转动量输出函数,其表达式为:

$$[0110] \quad \omega_e(d, \theta, v) = g(v) \omega(d_p, \theta_p)$$

[0111] 综上,本发明首先通过设置的初始和平衡条件得到整定后的无人车方向盘转动量函数,并计算得到无人车与速度自适应预瞄函数得到的预瞄路径的横向偏差和角度偏差,输入到整定后的无人车方向盘转动量函数得到方向盘转动量,并且通过速度耦合器函数控制得到的方向盘转动量的合理理论域,从而得到期望的方向盘转动量,实现对无人车行驶路径的跟踪。

[0112] 本发明提出的基于速度自适应预瞄的无模型无人车路径跟踪方法,能够适用于大部分无人车模型,包括:二自由度动力学无人车模型、三自由度动力学无人车模型、高度复杂的超高自由度的无人车模型。并且使无人车在全速域应对复杂多变的跟踪路径时依然可以保持精准、稳定的跟踪效果。

[0113] 以上所述的实施例仅是对本发明的优选方式进行描述,并非对本发明的范围进行限定,在不脱离本发明设计精神的前提下,本领域普通技术人员对本发明的技术方案做出的各种变形和改进,均应落入本发明权利要求书确定的保护范围内。

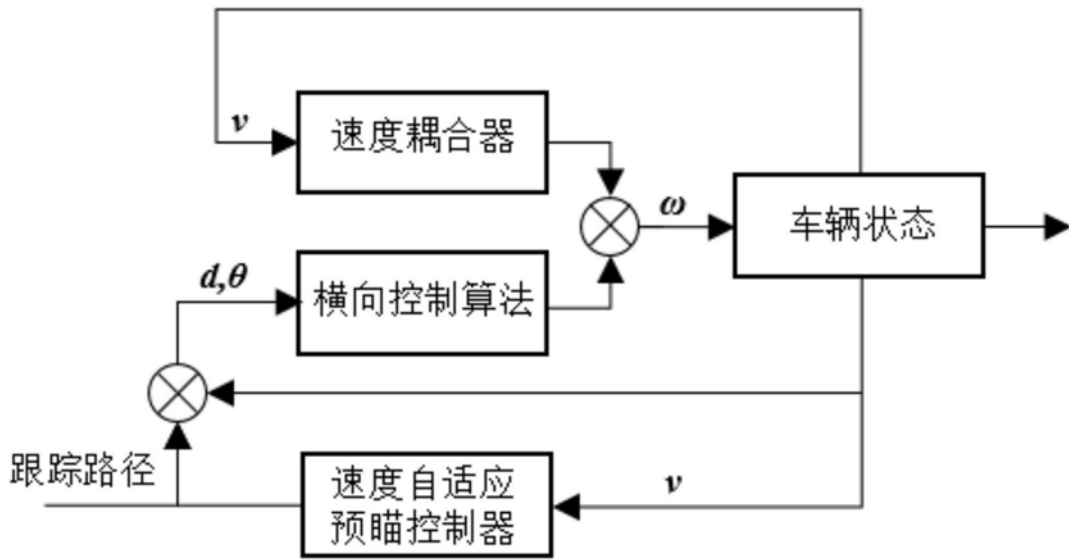


图1

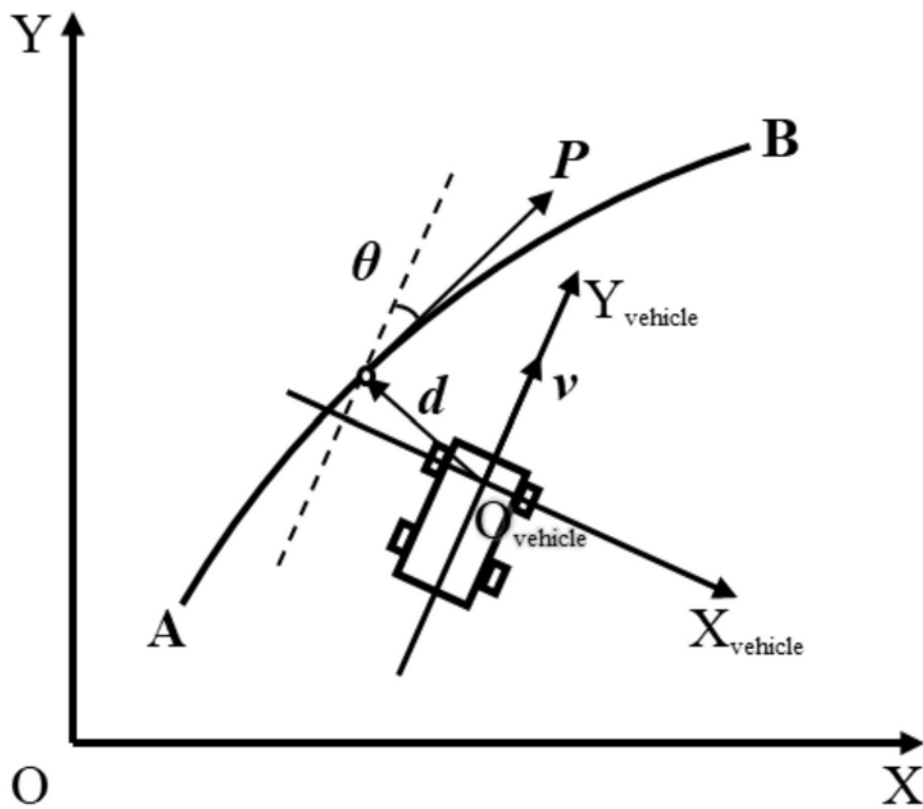


图2

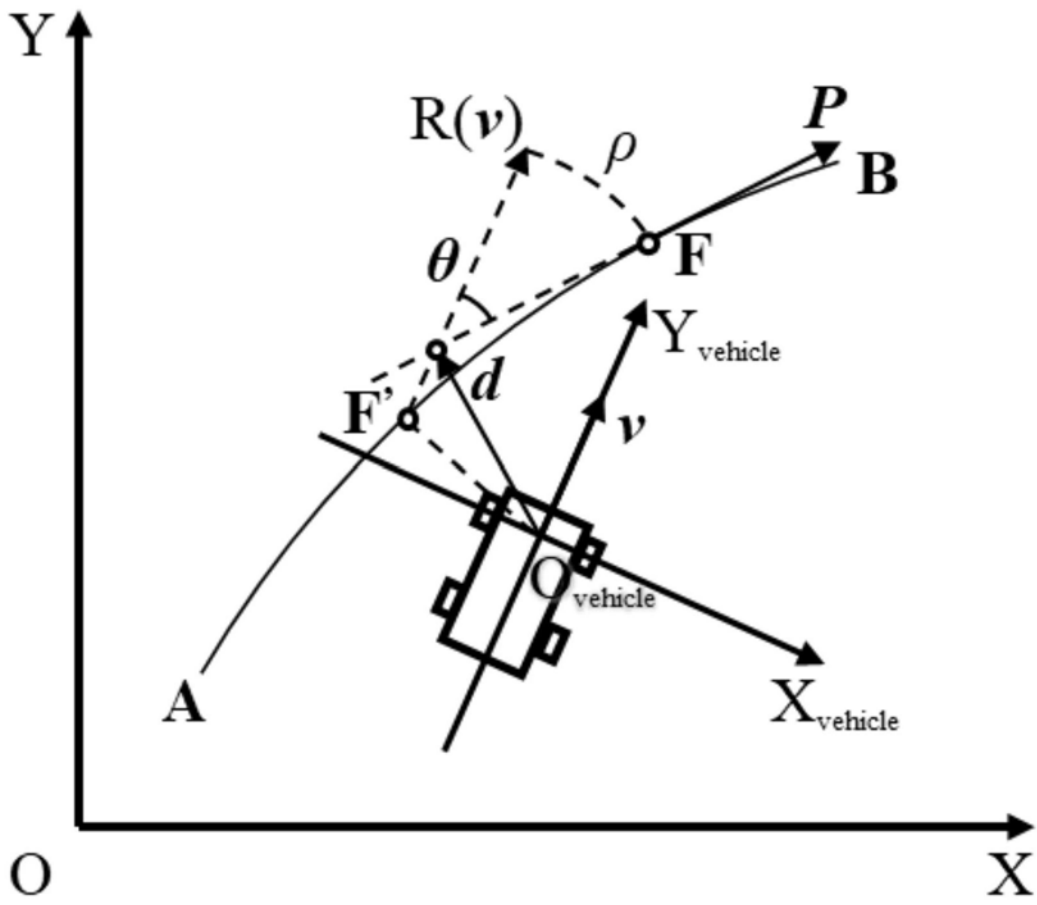


图3