



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 116300410 B

(45) 授权公告日 2023. 08. 22

(21) 申请号 202310599705.9

(22) 申请日 2023.05.25

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 116300410 A

(43) 申请公布日 2023.06.23

(73) 专利权人 武汉理工大学
地址 430070 湖北省武汉市洪山区珞狮路
122号

(72) 发明人 聂琳真 柯隽威 尹智帅 巴元新
何志伟 孙二千 张书霖 曾俊源

(74) 专利代理机构 湖北武汉永嘉专利代理有限
公司 42102
专利代理师 许美红

(51) Int. Cl.
G05B 11/42 (2006.01)

(56) 对比文件
CN 114201915 A, 2022.03.18

CN 114047748 A, 2022.02.15

DE 10010681 A1, 2001.09.06

JP 2022039977 A, 2022.03.10

CN 113126676 A, 2021.07.16

KR 20200086443 A, 2020.07.17

CN 113076815 A, 2021.07.06

CN 102497156 A, 2012.06.13

CN 105538325 A, 2016.05.04

CN 113386781 A, 2021.09.14

CN 114228721 A, 2022.03.25

CN 114779103 A, 2022.07.22

RU 2758797 C1, 2021.11.01

US 2010249999 A1, 2010.09.30

US 5412754 A, 1995.05.02

宋佳华. 基于视觉的辅助驾驶系统车辆主动
转向控制研究. 中国优秀硕士学位论文全文数据
库 工程科技 II 辑. 2022, (第05期), C035-264.

审查员 潘岱

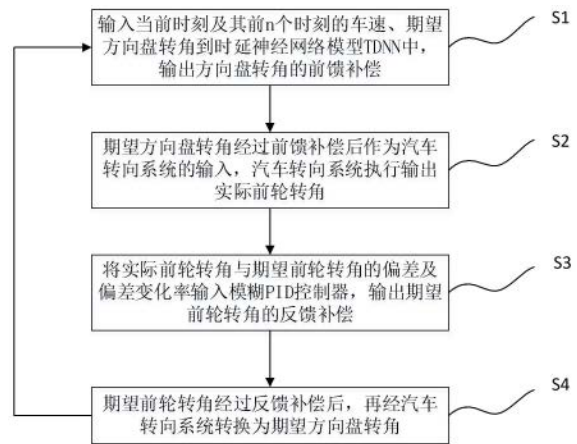
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法
及系统

(57) 摘要

本发明公开了一种数据驱动前馈加反馈补
偿的转角优化方法及系统, 其中方法包括以下步
骤: S1、输入当前时刻及其前n个时刻的车速、期
望方向盘转角到时延神经网络模型TDNN中, 输出
方向盘转角的前馈补偿; S2、将经过前馈补偿的
期望方向盘转角输入模糊PID控制器, 输出反馈
补偿方向盘转角; S3、将当前车辆的期望方向盘
转角、前馈补偿方向盘转角、反馈补偿方向盘转
角之和作为最终优化后的方向盘转角。本发明可
对方向盘转向进行优化, 提高自动驾驶路径跟踪
精度。



1. 一种数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1、输入当前时刻及其前n个时刻的车速、期望方向盘转角到时延神经网络模型TDNN中,输出方向盘转角的前馈补偿;该时延神经网络模型TDNN由多个前馈网络层组成,每层中的多帧作为输入流向下一层;该时延神经网络模型TDNN预先通过样本训练,对不同车速下期期望方向盘转角和实际方向盘转角之间的非线性关系进行拟合,估算出同一时刻当前指令中期望方向盘转角与实际方向盘转角之间的预测误差,作为期望方向盘转角的前馈补偿;

S2、期望方向盘转角经过前馈补偿后作为汽车转向系统的输入,汽车转向系统执行输出实际前轮转角;

S3、将实际前轮转角与期望前轮转角的偏差及偏差变化率输入模糊PID控制器,输出期望前轮转角的反馈补偿;具体将实际前轮转角与期望前轮转角的偏差及偏差变化率进行模糊化处理得到相应的模糊子集,根据模糊子集查找预先构建的不同特性的比例P、微分I、积分D模糊规则库,进行解模糊处理,计算得到对应PID的三个参数修正量,修正后的PID输出作为期望前轮转角的反馈补偿;

S4、期望前轮转角经过反馈补偿后,再经汽车转向系统转换为期望方向盘转角,回到步骤S1形成闭环。

2. 根据权利要求1所述的数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法,其特征在于,该时延神经网络模型TDNN包括三层隐藏层和一个全连接层,该全连接层与模型输出相连接。

3. 根据权利要求1所述的数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法,其特征在于,该时延神经网络模型TDNN使用平方损失函数作为代价函数:

$$J = \frac{1}{2n} \sum_{t=1}^n (Y_{mea}(X_t) - Y_{pre}(X_t))^2$$

式中, X_t 为第t个采样数据, $Y_{mea}(X_t)$ 为方向盘输入和输出之间的实际测量误差, $Y_{pre}(X_t)$ 为TDNN的预测误差,n为采样数。

4. 根据权利要求1所述的数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法,其特征在于,采集的样本训练数据包括:每间隔一定时间采集的车速、期望方向盘转角、实际方向盘转角。

5. 根据权利要求2所述的数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法,其特征在于,时延神经网络模型TDNN网络学习率设置为0.001。

6. 根据权利要求1所述的数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法,其特征在于,模糊子集均定义为{负大NB、负中NM、负小NS、零Z0、正小PS、正中PM、正大PB},其对应的论域定义为{-1,1}。

7. 根据权利要求6所述的数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法,其特征在于,将三角隶属度函数用于小误差区域(NM,NS,Z0,PS,PM)处;将高斯分布曲线用在误差大的区域(NB,PB)处。

8. 根据权利要求1所述的数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法,其特征在于,预先构建的不同特性的比例P、微分I、积分D模糊规则库包括以下步骤:

采用Mamdani法对模糊化的输入进行模糊推理;

根据比例、微分、积分的不同特性分别建立模糊规则库,并求出它们的隶属度。

9. 根据权利要求1所述的数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法,其特征在于,期望方向盘转角生成过程为:

上层路径跟踪控制器通过车辆路径跟踪横向控制算法生成期望的前轮转角;

基于汽车转向系统角传动比,将期望的前轮转角转换成期望方向盘转角。

10. 一种数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化系统,其特征在于,包括:

方向盘转角前馈补偿模块,用于输入当前时刻及其前n个时刻的车速、期望方向盘转角到时延神经网络模型TDNN中,输出方向盘转角的前馈补偿;该时延神经网络模型TDNN由多个前馈网络层组成,每层中的多帧作为输入流向下一层;该时延神经网络模型TDNN预先通过样本训练,对不同车速下期望方向盘转角和实际方向盘转角之间的非线性关系进行拟合,估算出同一时刻当前指令中期望方向盘转角与实际方向盘转角之间的预测误差,作为期望方向盘转角的前馈补偿;

方向盘转角反馈补偿模块,用于将实际前轮转角与期望前轮转角的偏差及偏差变化率输入模糊PID控制器,输出期望前轮转角的反馈补偿;具体将实际前轮转角与期望前轮转角的偏差及偏差变化率进行模糊化处理得到相应的模糊子集,根据模糊子集查找预先构建的不同特性的比例P、微分I、积分D模糊规则库,进行解模糊处理,计算得到对应PID的三个参数修正量,修正后的PID输出作为期望前轮转角的反馈补偿。

数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及自动驾驶技术领域,尤其涉及数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法及系统。

背景技术

[0002] 基于电气化、人工智能和5G网络的智能网联自动驾驶汽车是汽车行业重要的发展趋势之一。自动驾驶汽车的路径跟踪横向控制系统可以分为上下两层控制器,上层控制器通过一定的车辆运动控制算法计算得到期望的前轮转角以“快速”“平稳”“准确”的跟踪期望路径,下层控制器通过线控转向系统控制方向盘转动使前轮转角达到期望的角度,但在实际的转向控制中,由于转向系统内部的时滞性以及外部环境的随机性扰动,使得转向指令的输出与期望输出存在延迟和偏差,这一偏差量在实车测试中,特别是在高速低附着工况下,对自动驾驶车辆最终的路径跟踪精度产生了较大的影响,甚至会导致车辆的稳定性下降。

[0003] 因此,仍需设计解决克服实际汽车转向系统时滞特性与外界环境的不确定性干扰的下层转向控制器。

发明内容

[0004] 本发明针对现有自动驾驶路径跟踪下层转向执行系统时滞以及外部复杂环境不规则扰动带来的转向指令输出与期望输出存在偏差导致路径跟踪精度下降的问题,提供一种数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法及系统。

[0005] 本发明所采用的技术方案是:

[0006] 提供一种数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法,包括以下步骤:

[0007] S1、输入当前时刻及其前n个时刻的车速、期望方向盘转角到时延神经网络模型TDNN中,输出方向盘转角的前馈补偿;该时延神经网络模型TDNN预先通过样本训练,对不同车速下期望方向盘转角和实际方向盘转角之间的非线性关系进行拟合,估算出同一时刻当前指令中期望方向盘转角与实际方向盘转角之间的预测误差,作为期望方向盘转角的前馈补偿;

[0008] S2、期望方向盘转角经过前馈补偿后作为汽车转向系统的输入,汽车转向系统执行输出实际前轮转角;

[0009] S3、将实际前轮转角与期望前轮转角的偏差及偏差变化率输入模糊PID控制器,输出期望前轮转角的反馈补偿;具体将实际前轮转角与期望前轮转角的偏差及偏差变化率进行模糊化处理得到相应的模糊子集,根据模糊子集查找预先构建的不同特性的比例P、微分I、积分D模糊规则库,进行解模糊处理,计算得到对应PID的三个参数修正量,修正后的PID输出作为期望前轮转角的反馈补偿;

[0010] S4、期望前轮转角经过反馈补偿后,再经汽车转向系统转换为期望方向盘转角,回到步骤S1形成闭环。

[0011] 接上述技术方案,该时延神经网络模型TDNN包括三层隐藏层和一个全连接层,该全连接层与模型输出相连接。

[0012] 接上述技术方案,该时延神经网络模型TDNN使用平方损失函数作为代价函数:

$$[0013] \quad J = \frac{1}{2n} \sum_{t=1}^n (Y_{mea}(X_t) - Y_{pre}(X_t))^2$$

[0014] 式中, X_t 为第t个采样数据, $Y_{mea}(X_t)$ 为方向盘输入和输出之间的实际测量误差, $Y_{pre}(X_t)$ 为TDNN的预测误差,n为采样数。

[0015] 接上述技术方案,采集的样本训练数据包括:每间隔一定时间采集的车速、期望方向盘转角、实际方向盘转角。

[0016] 接上述技术方案,时延神经网络模型TDNN网络学习率设置为0.001。

[0017] 接上述技术方案,模糊子集均定义为{负大NB、负中NM、负小NS、零Z0、正小PS、正中PM、正大PB},其对应的论域定义为{-1,1}。

[0018] 接上述技术方案,将三角隶属度函数用于小误差区域(NM,NS,Z0,PS,PM)处;将高斯分布曲线用在误差大的区域(NB,PB)处。

[0019] 接上述技术方案,预先构建的不同特性的比例P、微分I、积分D模糊规则库包括以下步骤:

[0020] 采用Mamdani法对模糊化的输入进行模糊推理;

[0021] 根据比例、微分、积分的不同特性分别建立模糊规则库,并求出它们的隶属度。

[0022] 接上述技术方案,期望方向盘转角生成过程为:

[0023] 上层路径跟踪控制器通过车辆路径跟踪横向控制算法生成期望的前轮转角;

[0024] 基于汽车转向系统角传动比,将期望的前轮转角转换成期望方向盘转角。

[0025] 本发明还提供一种数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化系统,包括:

[0026] 方向盘转角前馈补偿模块,用于输入当前时刻及其前n个时刻的车速、期望方向盘转角到时延神经网络模型TDNN中,输出方向盘转角的前馈补偿;该时延神经网络模型TDNN预先通过样本训练,对不同车速下期望方向盘转角和实际方向盘转角之间的非线性关系进行拟合,估算出同一时刻当前指令中期望方向盘转角与实际方向盘转角之间的预测误差,作为期望方向盘转角的前馈补偿;

[0027] 方向盘转角反馈补偿模块,用于将实际前轮转角与期望前轮转角的偏差及偏差变化率输入模糊PID控制器,输出期望前轮转角的反馈补偿;具体将实际前轮转角与期望前轮转角的偏差及偏差变化率进行模糊化处理得到相应的模糊子集,根据模糊子集查找预先构建的不同特性的比例P、微分I、积分D模糊规则库,进行解模糊处理,计算得到对应PID的三个参数修正量,修正后的PID输出作为期望前轮转角的反馈补偿。

[0028] 本发明还提供了一种计算机存储介质,其内存储可被处理器执行的计算机程序,该计算机程序执行上述方案的数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法。

[0029] 本发明产生的有益效果是:本发明主要是对于转向系统的时滞特性,利用时延神经网络TDNN对不同速度下方向盘转角输入和前轮转角输出之间的非线性关系进行拟合,估算出同一时刻控制输入信号与实际测量的输入之间的差值,进而对输入量进行前馈补偿;

再通过通过自适应模糊PID控制器对外部环境干扰造成的执行误差进行反馈补偿,从而对方向盘转向进行优化,提高自动驾驶路径跟踪精度。

附图说明

[0030] 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,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作一简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图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的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0031] 图1是本发明实施例数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法的流程图;

[0032] 图2是本发明实施例转角优化闭环反馈控制逻辑框图;

[0033] 图3是本发明实施例时延神经网络模型TDNN的结构示意图;

[0034] 图4是本发明实施例模糊PID控制逻辑框图;

[0035] 图5(a)是本发明实施例偏差 e 的模糊子集的模糊值区间示意图;

[0036] 图5(b)是本发明实施例偏差变化率 ec 的模糊子集的模糊值区间示意图。

具体实施方式

[0037] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0038] 实施例1

[0039] 如图1所示,本发明实施例数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法主要包括以下步骤:

[0040] S1、输入当前时刻及其前 n 个时刻的车速、期望方向盘转角到时延神经网络模型TDNN中,输出方向盘转角的前馈补偿;该时延神经网络模型TDNN预先通过样本训练,对不同车速下期期望方向盘转角和实际方向盘转角之间的非线性关系进行拟合,估算出同一时刻当前指令中期望方向盘转角与实际方向盘转角之间的预测误差,作为期望方向盘转角的前馈补偿;

[0041] S2、期望方向盘转角经过前馈补偿后作为汽车转向系统的输入,汽车转向系统执行输出实际前轮转角;

[0042] S3、将实际前轮转角与期望前轮转角的偏差及偏差变化率输入模糊PID控制器,输出期望前轮转角的反馈补偿;具体将实际前轮转角与期望前轮转角的偏差及偏差变化率进行模糊化处理得到相应的模糊子集,根据模糊子集查找预先构建的不同特性的比例P、微分I、积分D模糊规则库,进行解模糊处理,计算得到对应PID的三个参数修正量,修正后的PID输出作为期望前轮转角的反馈补偿;

[0043] S4、期望前轮转角经过反馈补偿后,再经汽车转向系统转换为期望方向盘转角,回到步骤S1形成闭环。

[0044] 由于是一个闭环反馈控制,由图2所示,也可以是,首先模糊PID控制器输出的反馈校正量对期望前轮转角做校正,校正结果通过转向系统角传动比转换为校正后的期望方向盘转角;其次TDNN网络模型输出的前馈校正量对该期望方向盘转角做补偿,补偿后的方向

盘转角作为最终的转向系统的转角输入；最后转向系统输出执行结果，即实际前轮转角。

[0045] 本发明之所以选择TDNN模型是因为其具有时不变特性，能够使得网络的输入，即采集车速与期望方向盘转角，在通过网络进行学习训练时不需要数据拥有精确的时间定位，同时层与层之间的权值共享能使得网络的训练过程更为简洁，加快了网络参数的迭代更新。工业界常用PID控制算法弥补下位执行机构在实际环境中因干扰而产生的转角执行误差。然而传统PID无法实时调整PID参数的缺点，无法适应很多不规则的非线性、时不确定性和纯滞后的控制过程。因此采用模糊逻辑并根据一定的模糊规则对PID的参数进行实时的优化，提高系统的稳定性和灵敏性。

[0046] 本发明将TDNN与模糊PID结合，可以弥补因为TDNN做前馈补偿只能补偿系统的转向时滞带来的转角误差，而对于环境中的噪声，无法补偿的缺陷。因此在TDNN的基础上通过模糊PID做反馈校正，使得最终的转角跟踪精度更高，实时性更好，鲁棒性更强。在实车试验的时候，这两种算法的结合在复杂多变的场景的任意车速下的转弯角度能取得显著的效果。

[0047] 该实施例1通过前馈+反馈补偿的方式，可以提高车辆路径跟踪控制的实时性和稳定性以及车辆对规划轨迹的跟踪精度。

[0048] 实施例2

[0049] 该实施例主要步骤与实施例1相同，不同的是所设计的时延神经网络模型，该实施例中将时延神经网络模型设计为TDNN(时延神经网络)控制器，如图3所示，TDNN控制器由多个前馈网络层组成，每层中的多帧作为输入流向下一层，随着数据特征的不断汇聚，TDNN的上层涵盖了较长时序的特征信息，因而在处理时序输入与输出之间的关系上，能全面参考前几个时刻的输入信息，搭建出拟合度更高的非线性模型。

[0050] 为充分利用好前后时序上的数据信息，同时不引入过多冗余的信息从而导致非线性系统拟合欠精确，该实施例采用当前时刻及其前4个时刻的状态信息作为网络的输入。在网络的隐藏层设计时，单隐藏层的设计往往难以拟合出输入与输出之间复杂的非线性关系，过多的隐藏层则会导致网络出现过拟合现象。通过多次实验与对比分析，设置三层隐藏层。可分别包含10个节点、8个节点和6个节点，最后通过一个全连接层与输出相连接。同时可以设置网络的学习速率为0.001，初始输入通过实际数据对比分析确定为0.2秒前的方向盘转角指令值、方向盘转角执行值和车速，最终输出为当前指令输入与测量输出之间的方向盘转角的预测误差。

[0051] 其中激活函数使用 \tanh ：

$$[0052] \quad y = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad \# (1)$$

[0053] 使用平方损失函数作为代价函数：

$$[0054] \quad J = \frac{1}{2n} \sum_{t=1}^n (Y_{mea}(X_t) - Y_{pre}(X_t))^2 \quad \# (2)$$

[0055] 式中， X_t 为第t个采样数据， $Y_{mea}(X_t)$ 为方向盘输入和输出之间的实际测量误差， $Y_{pre}(X_t)$ 为TDNN的预测误差。

[0056] 上层控制器计算的最优转角(即期望前轮转角)经角传动比转换,得到期望方向盘转角 $u_1(t)$,其与前馈环节修正量 $u_2(t)$ (即反馈补偿方向盘转角)共同决定了转向实际接收的输入量 $u(t)$:

$$[0057] \quad u(t) = u_1(t) + u_2(t) \quad \# \quad (3)$$

[0058] 上层路径跟踪控制器计算期望方向盘转角的过程主要为:可通过一定的车辆路径跟踪横向控制算法:如纯跟踪,MPC,LQR等,计算期望的前轮转角,再基于转向系统传动比转换成期望方向盘转角。

[0059] 该实施例基于实验室的佛山仙湖园区场地和经过线控改装广汽埃安实车平台,上层控制器使用基于车辆动力学模型的LQR算法,在较长直线宽路上进行了双移线路径跟踪实验,完成实车数据采集,如以0.02s的步长采集了实验过程中的车速、命令方向盘转角和实际方向盘转角参数,作为前馈控制时延神经网络的训练数据。还可以基于具有线控转向功能的实车平台,使用路径跟踪横向控制算法,在保证安全前提下让车辆跟踪一段连续转弯道路,每隔0.02秒记录下车速、期望方向盘转角、实际方向盘转角用作时延神经网络模型的训练数据。

[0060] 为了优化自动驾驶车辆的控制性能,本发明还通过位置式模糊PID控制器对TDNN输出的前馈修正量进行了处理。位置式PID是根据当前系统的实际位置,与预期位置的偏差,进行PID控制。位置式PID对于转向系统这种不带积分部件的控制对象能达到较好的控制效果。

[0061] 传统PID控制算法因其控制参数相互独立、参数的选定比较简单、成本低、抗干扰能力强、运算迅速等优点,在实际工程应用中仍为主流。但在落地到工程运用中时,很多控制过程往往机理复杂,具有不规则的非线性、时不确定性和纯滞后等特点,特别是在环境噪声、负载扰动的影响下,PID控制器的最优参数甚至模型结构也会随工作环境和工作时间的变化而发生显著变化,当最优参数与既定参数的偏差达到相应的阈值时,就会使控制效果发生质变,严重时还会使系统失去稳定性。因而本发明使用具有参数自适应性的模糊PID控制,即在传统PID控制的基础上应用模糊集合、模糊语言和模糊逻辑来模拟人的模糊思维方法,用计算机来基本实现人类的调节思维。

[0062] 本发明实施例具有自适应性的模糊PID反馈补偿控制器设计如图4所示。模糊推理机按照设定好的模糊规则,对控制系统输出的偏差 e 和偏差变化率 ec 进行处理计算,输出对应的PID参数变化量 dk_p 、 dk_i 、 dk_d ,最终通过如下公式实现反馈控制:

$$[0063] \quad U(t) = (K_p + dk_p) * e(t) + (K_i + dk_i) * \int e(t) dt + (K_d + dk_d) * \frac{de(t)}{dt} \quad \# \quad (5)$$

[0064] 式中, K_{p1} 、 K_{i1} 、 K_{d1} 分别为比例调节系数初始常量、积分调节系数初始常量、微分调节系数初始常量, $e(t)$ 为 t 时刻的偏差值。

[0065] 为实现模糊PID控制,首先要对输入参数进行模糊化,将实际前轮转角和期望前轮转角的偏差 e 和偏差变化率 ec ,作为模糊PID控制器的输入,其对应的模糊子集均定义为{负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)},其对应的论域定义为 $\{-1, 1\}$ 。具体模糊值区间如图5(a)、图5(b)所示。偏差 e 和偏差变化率 ec 的模糊区间皆

为:NB [-1 -0.2],NM [-1 -0.7 0],NS [-1 -0.3 0.3],ZO [-0.65 0 0.65],PS [-0.3 0.3 1],PM [0 0.7 1],PB [0.2 1]。偏差 e 和偏差变化率 ec 分别有七个语言变量,排列组合有49种,每种组合根据专家经验,通过if判定语句,对应一种 dip dki dkd 的判定结果,其中所述结果通过语言变量表示。由于三角隶属度函数的形状更为尖锐,因此被用于小误差区域(NM,NS,ZO,PS,PM)处,使得系统的分辨率提高。而在误差较大的区域(NB,PB)处,则采用高斯分布曲线来兼顾系统的稳定性和灵敏性。

[0066] 采用Mamdani法对模糊化的输入进行模糊推理,为此要根据比例、微分、积分的不同特性分别建立模糊规则库,求出它们的隶属度。本实施例制定 dk_p 、 dk_i 、 dk_d 模糊规则。所对应的模糊区间皆为:NB[-3 -1.5],NM[-3 -2 -1],NS[-2 -1 0],ZO[-1 0 1],PS[0 1 2],PM[1 2 3],PB[1.5 3]。

[0067] 最后,将通过模糊规则表查出的模糊语言进行解模糊处理,从而获取能够被计算机识别并使用的精确数值。取 dk_p 、 dk_i 、 dk_d 的模糊子集为{负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)},量化目标即论域为{-3,3},结合高斯隶属度函数和三角隶属度函数来建立它们的隶属度函数。

[0068] 本实施例采用重心法,即一般加权平均法进行解模糊处理,其公式如下:

$$[0069] \quad u_0 = \frac{\sum_{i=0}^n f(x_i) * x_i}{\sum_{i=0}^n f(x_i)} \# (6)$$

[0070] 式中 u_0 为模糊控制器输出量解模糊后的量化值, x_i 为模糊控制量论域内的值, $f(x_i)$ 为 x_i 的隶属度值。将得到的修正参数 dk_p 、 dk_i 、 dk_d 分别与PID控制参数的初始常量 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 相加,便得到修正后的参数 K_p 、 K_i 、 K_d ,完成了对PID参数的实时调节。

[0071] 实施例3:

[0072] 本发明实施例数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化系统主要用于上述方法实施例,其主要包括:

[0073] 方向盘转角前馈补偿模块,用于输入当前时刻及其前 n 个时刻的车速、期望方向盘转角到时延神经网络模型TDNN中,输出方向盘转角的前馈补偿;该时延神经网络模型TDNN预先通过样本训练,对不同车速下期望方向盘转角和实际方向盘转角之间的非线性关系进行拟合,估算出同一时刻当前指令中期望方向盘转角与实际方向盘转角之间的预测误差,作为期望方向盘转角的前馈补偿;

[0074] 方向盘转角反馈补偿模块,用于将实际前轮转角与期望前轮转角的偏差及偏差变化率输入模糊PID控制器,输出期望前轮转角的反馈补偿;具体将实际前轮转角与期望前轮转角的偏差及偏差变化率进行模糊化处理得到相应的模糊子集,根据模糊子集查找预先构建的不同特性的比例P、微分I、积分D模糊规则库,进行解模糊处理,计算得到对应PID的三个参数修正量,修正后的PID输出作为期望前轮转角的反馈补偿。

[0075] 各个模块的功能主要与方法实施例对应,在此不赘述。

[0076] 实施例4

[0077] 本申请还提供一种计算机可读存储介质,如闪存、硬盘、多媒体卡、卡型存储器(例如,SD或DX存储器等)、随机访问存储器(RAM)、静态随机访问存储器(SRAM)、只读存储器

(ROM)、电可擦除可编程只读存储器 (EEPROM)、可编程只读存储器 (PROM)、磁性存储器、磁盘、光盘、服务器、App应用商城等等,其上存储有计算机程序,程序被处理器执行时实现相应功能。本实施例的计算机可读存储介质用于在被处理器执行时实现方法实施例的数据驱动前馈加反馈补偿的转角优化方法。

[0078] 综上,本发明通过时延神经网络TDNN做前馈补偿系统的转向时滞带来的转角误差,而对于环境中的噪声,其无法补偿。所以在此基础上通过模糊PID做反馈校正,使得最终的转角跟踪精度更高,实时性更好,鲁棒性更强。在实车试验的时候,这两种算法的结合在复杂多变的场景的任意车速下的转弯角度能取得显著的效果。

[0079] 应当理解的是,对本领域普通技术人员来说,可以根据上述说明加以改进或变换,而所有这些改进和变换都应属于本发明所附权利要求的保护范围。

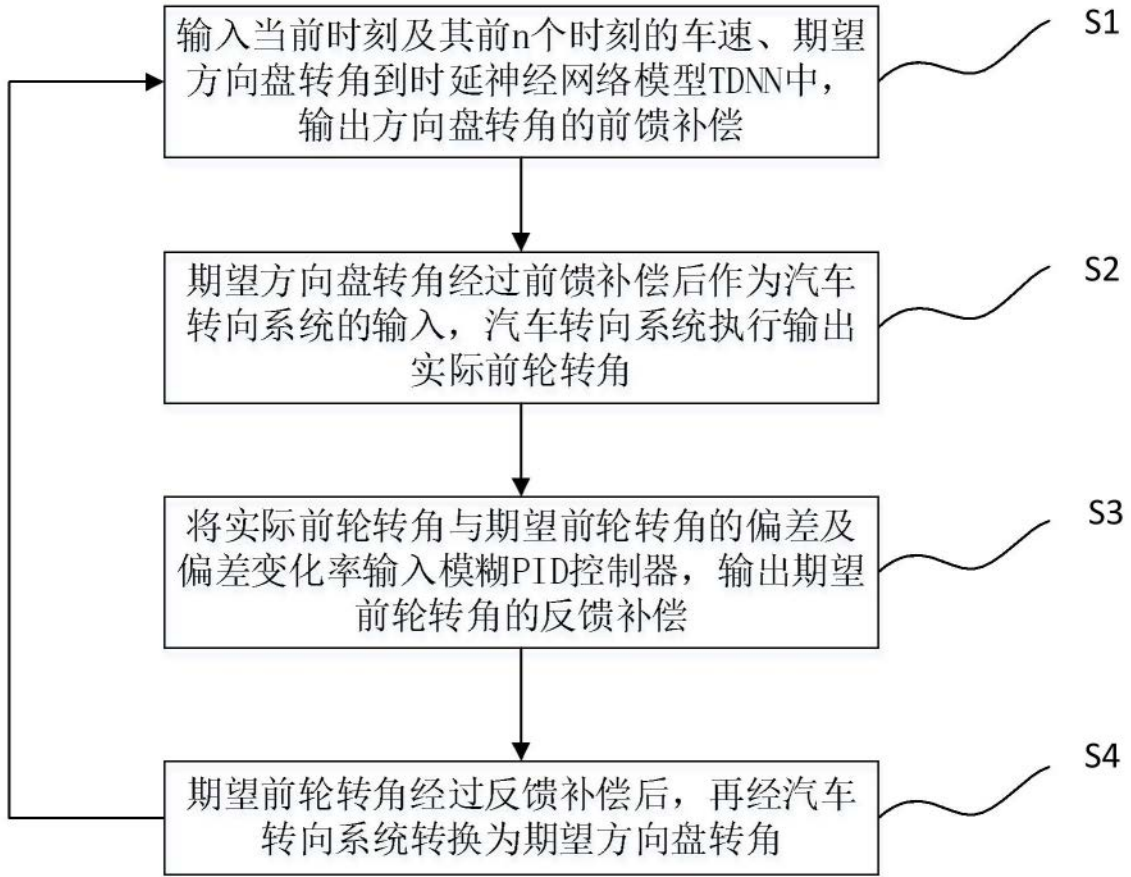


图1

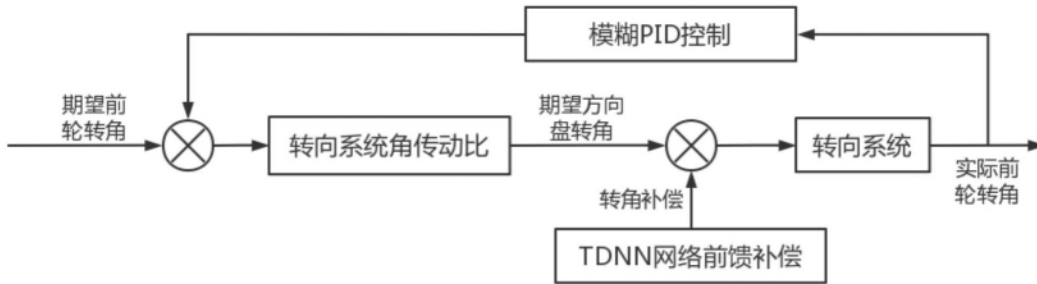


图2

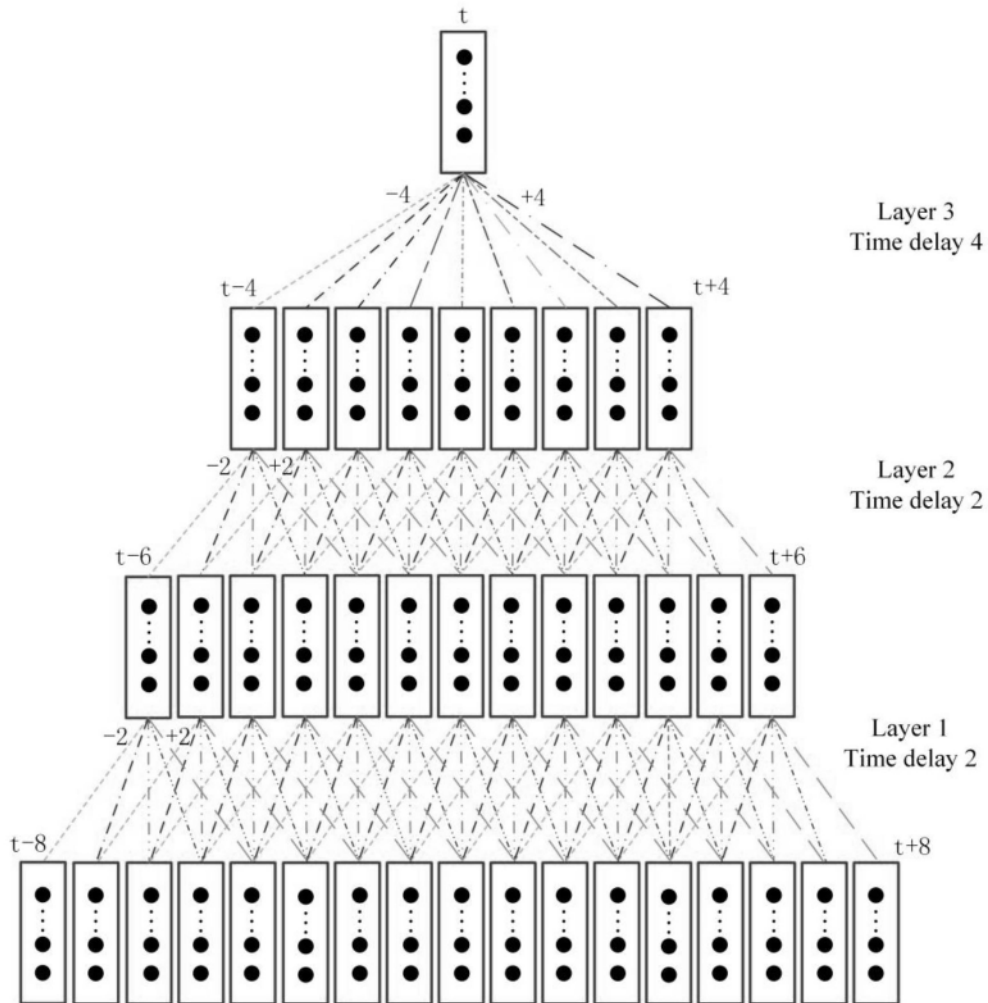


图3

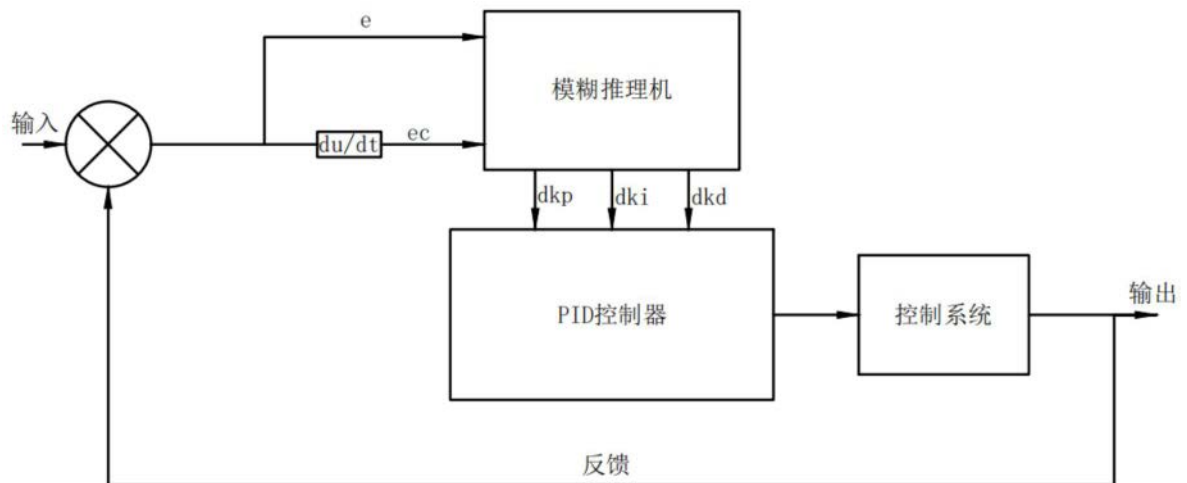


图4

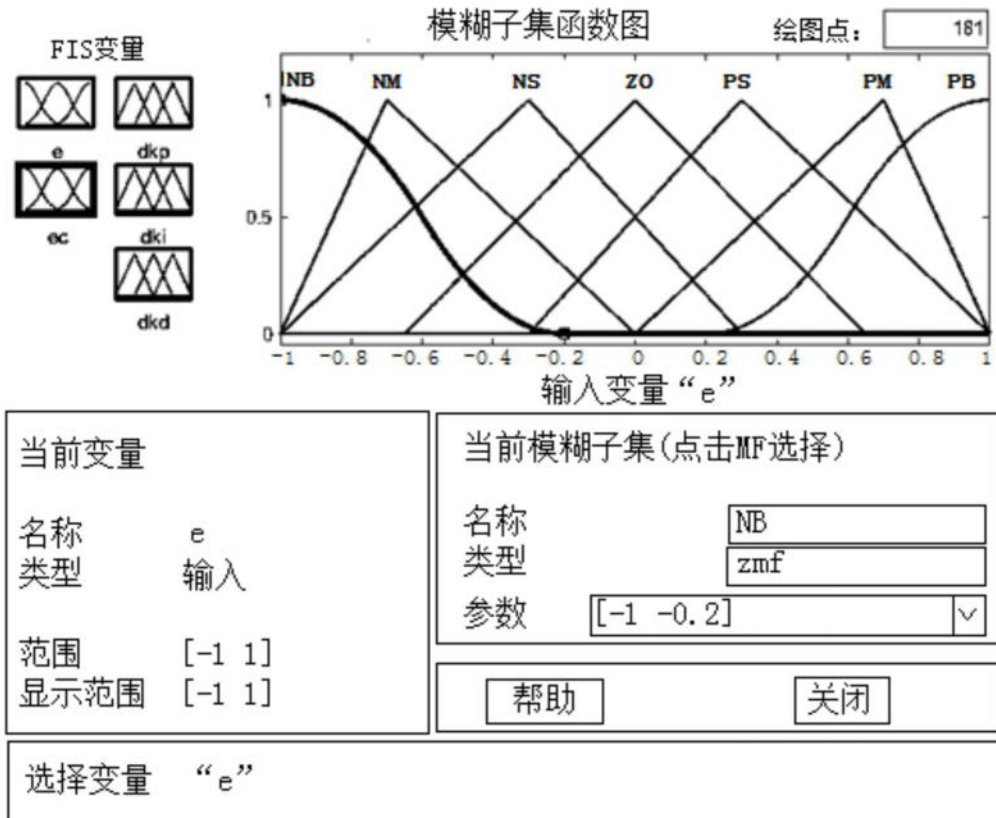


图5(a)

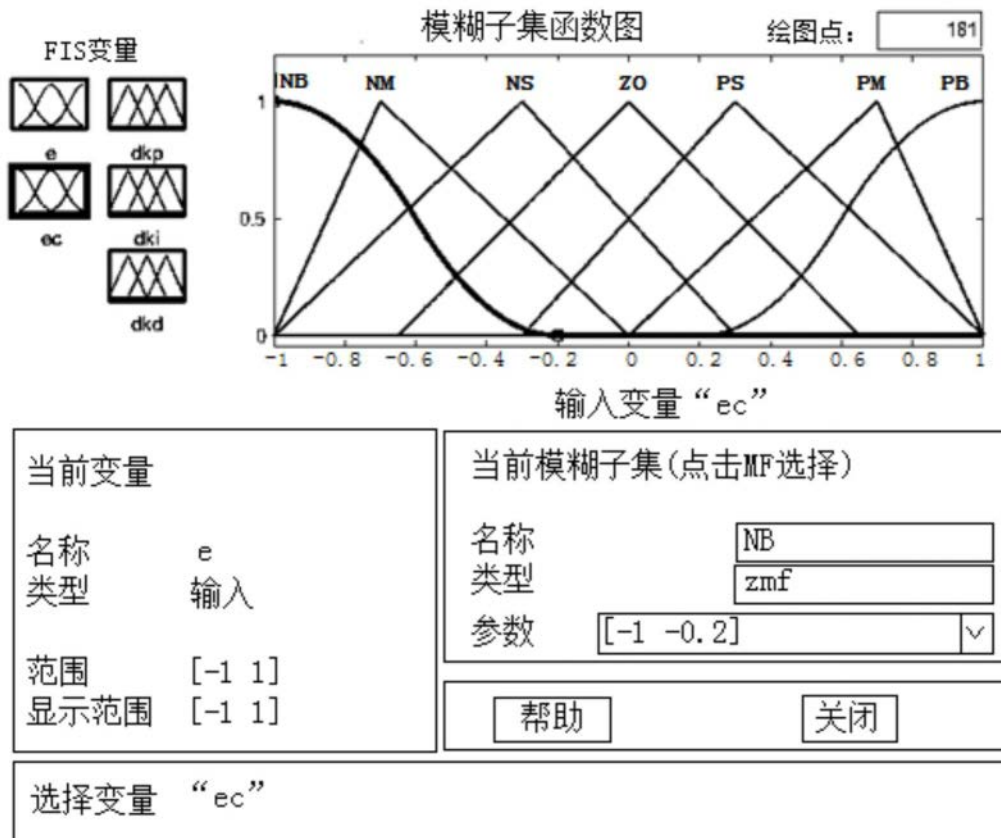


图5 (b)