



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114291117 B

(45) 授权公告日 2023.05.09

(21) 申请号 202210090317.3

(22) 申请日 2022.01.25

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 114291117 A

(43) 申请公布日 2022.04.08

(73) 专利权人 中山大学  
地址 510275 广东省广州市海珠区新港西  
路135号  
专利权人 中广核工程有限公司

(72) 发明人 熊会元 刘德亮 谭晓军 刘羽  
潘跃龙 张学岭

(74) 专利代理机构 广州粤高专利商标代理有限  
公司 44102  
专利代理师 禹小明

(51) Int. Cl.

B60W 60/00 (2020.01)

B60W 40/00 (2006.01)

B60W 40/10 (2012.01)

(56) 对比文件

CN 111121777 A, 2020.05.08

CN 111547066 A, 2020.08.18

CN 111806427 A, 2020.10.23

CN 113064344 A, 2021.07.02

CN 113419420 A, 2021.09.21

CN 210011734 U, 2020.02.04

审查员 廖秀丽

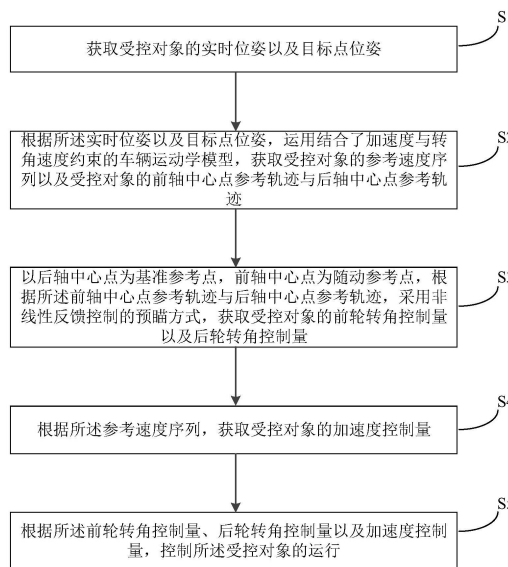
权利要求书3页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

一种四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法

(57) 摘要

本发明针对现有技术的局限性,提出了一种四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法,通过以前后轴中心点为参考点,将规划轨迹解耦为的两条曲率近似连续参考轨迹,以车辆中心点为控制点,将横向误差和横摆角误差的控制解耦为以前后轴中心点为控制点的双点跟踪误差控制,可以充分利用四轮转向车辆的自由度,实现了无需切换转向模式即可使四轮转向车辆具有同相转向、异相转向和不等角度转向的能力,具有更大的前后轮转角控制域和较高的跟踪精度。



1. 一种四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1,获取受控对象的实时位姿以及目标点位姿;

S2,根据所述实时位姿以及目标点位姿,运用结合了加速度与转角速度约束的车辆运动学模型,获取受控对象的参考速度序列以及受控对象的前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹;

S3,以后轴中心点为基准参考点,前轴中心点为随动参考点,根据所述前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹,采用非线性反馈控制的预瞄方式,获取受控对象的前轮转角控制量以及后轮转角控制量;

S4,根据所述参考速度序列,获取受控对象的加速度控制量;

S5,根据所述前轮转角控制量、后轮转角控制量以及加速度控制量,控制所述受控对象的运行;

所述步骤S2中,包括以下过程:

S21,根据所述实时位姿以及目标点位姿,运用结合了加速度与转角速度约束的车辆运动学模型,获取受控对象的参考速度序列以及受控对象的几何中心点参考位姿序列;

S22,运用预设的位姿变换关系,将所述几何中心点参考位姿序列转换为受控对象的前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹;

所述车辆运动学模型按以下公式表示:

$$x(k+1) = x(k) + v_m \cos(\varphi + \beta)\Delta t$$

$$y(k+1) = y(k) + v_m \sin(\varphi + \beta)\Delta t$$

$$\varphi(k+1) = \varphi(k) + \frac{v_m \cos(\beta(\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)))}{L} \Delta t$$

$$\delta_f(k+1) = \delta_f(k) + \Delta \delta_f \Delta t$$

$$\delta_r(k+1) = \delta_r(k) + \Delta \delta_r \Delta t$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{\tan \delta_r + \tan \delta_f}{2}\right)$$

其中, $x$ 、 $y$ 表示位置坐标; $\varphi$ 表示车辆航向角; $\beta$ 表示车辆几何中心速度 $v_m$ 与车身的夹角; $k$ 表示第 $k$ 个时刻; $\Delta t$ 表示时间间隔; $\delta_f$ 表示前轮转角控制量; $\Delta \delta_f$ 表示前轮转角控制量变化值; $\delta_r$ 表示后轮转角控制量; $\Delta \delta_r$ 表示后轮转角控制量变化值;

所述位姿变换关系按以下公式表示:

$$\begin{cases} x_f = x + \frac{L \cos(\varphi)}{2} \\ y_f = y + \frac{L \sin(\varphi)}{2} \\ x_r = x - \frac{L \cos(\varphi)}{2} \\ y_r = y - \frac{L \sin(\varphi)}{2} \end{cases}$$

其中, $x_f$ 与 $y_f$ 表示前轴中心点的位置坐标; $x_r$ 与 $y_r$ 表示后轴中心点的位置坐标; $L$ 表示受控对象的轴距。

2. 根据权利要求1所述的四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法,其特征在于,所述加速

度与转角速度约束按以下公式表示：

$$|\Delta v| \leq \Delta v_{\max};$$

$$|\Delta \delta_f| \leq \Delta \delta_{\max};$$

$$|\Delta \delta_r| \leq \Delta \delta_{\max};$$

其中， $\Delta v$ 表示速度变化值； $\Delta v_{\max}$ 表示预设的速度最大变化值； $\Delta \delta_{\max}$ 表示预设的转角控制量最大变化值。

3. 根据权利要求1所述的四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法，其特征在于，在所述步骤S3中，包括以下过程：

S31，计算前轴中心点到前轴中心点参考轨迹最近点 $F_{ref}$ 的距离 $e_f$ 以及后轴中心点到所述后轴中心点参考轨迹上最近点 $B_{ref}$ 的距离 $e_r$ ；

S32，从所述前轴中心点参考轨迹在点 $F_{ref}$ 的切线上设置前轮预瞄点 $P_f$ ，根据预设的后轮预瞄系数 $k_f$ ，沿所述前轴中心点参考轨迹在点 $F_{ref}$ 的切线方向上预瞄距离 $d_f$ ，获得所述前轮预瞄点 $P_f$ 的位置坐标；

S33，从所述后轴中心点参考轨迹在点 $B_{ref}$ 的切线上设置后轮预瞄点 $P_r$ ，根据预设的后轮预瞄系数 $k_r$ ，沿所述后轴中心点参考轨迹在点 $B_{ref}$ 的切线方向上预瞄距离 $d_r$ ，获得所述后轮预瞄点 $P_r$ 的位置坐标；

S34，根据所述距离 $e_f$ 、距离 $e_r$ 、前轮预瞄点 $P_f$ 的位置坐标以及后轮预瞄点 $P_r$ 的位置坐标，获得受控对象的前轮转角控制量以及后轮转角控制量。

4. 根据权利要求1所述的四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法，其特征在于，所述步骤S4中通过PID控制器获取受控对象的加速度控制量。

5. 一种四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制系统，其特征在于，包括位姿获取模块(1)、序列轨迹获取模块(2)、转角控制量获取模块(3)、加速度控制量获取模块(4)以及运行控制模块(5)；所述位姿获取模块(1)连接所述序列轨迹获取模块(2)，所述序列轨迹获取模块(2)分别连接所述转角控制量获取模块(3)以及加速度控制量获取模块(4)，所述运行控制模块(5)分别连接所述转角控制量获取模块(3)以及加速度控制量获取模块(4)；其中：

所述位姿获取模块(1)用于获取受控对象的实时位姿以及目标点位姿；

所述序列轨迹获取模块(2)用于根据所述实时位姿以及目标点位姿，运用结合了加速度与转角速度约束的车辆运动学模型，获取受控对象的参考速度序列以及受控对象的前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹；

所述转角控制量获取模块(3)用于以后轴中心点为基准参考点，前轴中心点为随动参考点，根据所述前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹，采用非线性反馈控制的预瞄方式，获取受控对象的前轮转角控制量以及后轮转角控制量；

所述加速度控制量获取模块(4)用于根据所述参考速度序列，获取受控对象的加速度控制量；

所述运行控制模块(5)用于根据所述前轮转角控制量、后轮转角控制量以及加速度控制量，控制所述受控对象的运行；

所述序列轨迹获取模块(2)中，包括以下过程：

S21，根据所述实时位姿以及目标点位姿，运用结合了加速度与转角速度约束的车辆运动学模型，获取受控对象的参考速度序列以及受控对象的几何中心点参考位姿序列；

S22, 运用预设的位姿变换关系, 将所述几何中心点参考位姿序列转换为受控对象的前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹;

所述车辆运动学模型按以下公式表示:

$$x(k+1) = x(k) + v_m \cos(\varphi + \beta) \Delta t$$

$$y(k+1) = y(k) + v_m \sin(\varphi + \beta) \Delta t$$

$$\varphi(k+1) = \varphi(k) + \frac{v_m \cos(\beta(\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)))}{L} \Delta t$$

$$\delta_f(k+1) = \delta_f(k) + \Delta \delta_f \Delta t$$

$$\delta_r(k+1) = \delta_r(k) + \Delta \delta_r \Delta t$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{\tan \delta_r + \tan \delta_f}{2}\right)$$

其中,  $x$ 、 $y$  表示位置坐标;  $\varphi$  表示车辆航向角;  $\beta$  表示车辆几何中心速度  $v_m$  与车身的夹角;  $k$  表示第  $k$  个时刻;  $\Delta t$  表示时间间隔;  $\delta_f$  表示前轮转角控制量;  $\Delta \delta_f$  表示前轮转角控制量变化值;  $\delta_r$  表示后轮转角控制量;  $\Delta \delta_r$  表示后轮转角控制量变化值;

所述位姿变换关系按以下公式表示:

$$\begin{cases} x_f = x + \frac{L \cos(\varphi)}{2} \\ y_f = y + \frac{L \sin(\varphi)}{2} \\ x_r = x - \frac{L \cos(\varphi)}{2} \\ y_r = y - \frac{L \sin(\varphi)}{2} \end{cases}$$

其中,  $x_f$  与  $y_f$  表示前轴中心点的位置坐标;  $x_r$  与  $y_r$  表示后轴中心点的位置坐标;  $L$  表示受控对象的轴距。

6. 一种存储介质, 其上储存有计算机程序, 其特征在于: 所述计算机程序被处理器执行时实现如权利要求1至4任一项所述的四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法的步骤。

7. 一种四轮转向无人车辆, 包括作为受控对象的本体, 其特征在于: 还包括存储介质、处理器以及储存在所述存储介质中并可被所述处理器执行的计算机程序, 所述计算机程序被处理器执行时实现如权利要求1至4任一项所述的四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法的步骤。

## 一种四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及自动驾驶技术领域,具体地,涉及针对四轮转向车辆的控制技术;更具体的,涉及一种四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法。

### 背景技术

[0002] 自动驾驶汽车的关键问题之一是路径跟踪,即通过控制车辆的横向运动和横摆运动跟踪预定的路径。四轮转向(4WS)车辆因前后轮均可转向而具有响应速度快、轨迹跟踪精度高、灵活性强的特点,常用于复杂环境中的机动,四轮转向车辆的无人化成为趋势。无人驾驶中路径跟踪的控制方法主要分为两类,一类是基于几何学的控制方法,以纯跟踪和stanley算法为代表,常用于低速场景,解释性好,运算速度快;另一类是基于模型的控制方法,以滑膜控制,模型预测控制,线性二次型调节器为代表,模型以动力学模型为主,常用于高速车辆的稳定性控制。然而,针对低速行驶的四轮转向车辆无人驾驶的轨迹跟踪问题,当前轨迹跟踪方法存在着如下问题:

[0003] 1) 过度约束前后轮转向,灵活性差;当前方案多是针对于前轮转向车辆进行建模与控制,对于四轮转向车辆的针对性几何关系分析较少,常规的轨迹跟踪方案无法简单的适用于四轮转向车辆,现有的公开的针对四轮转向车辆的几何学方案,多为约束前后轮转角的关系进行过度约束,但这种方法极大限制了低速情况下四轮转向车辆的灵活性。

[0004] 2) 存在大量不确定的可变环境参数和难以获得的动力学参数;利用动力学模型处理,虽可以提高高速情况下的稳定性,但存在大量不确定的可变环境参数及车辆本身参数,难以进行有效推广。

[0005] 3) 计算量大,实时性差;对于采用了动力学模型及最优控制的方案,计算量会比较大,将导致控制实时性差,在车载计算机计算能力未有明显提升的条件下,将很容易导致事故的发生。如公开日为2021.04.30的中国发明专利:一种移动机器人的路径跟踪方法所示:该方案就试图通过将车体中的4个轮子简化为分别位于轴线中点的前后两个虚拟轮子,前轮的为虚拟转向轮,后轮的是虚拟从动轮,以此减少计算量,但该方案仍有一定的局限性。

[0006] 因此,目前公开的跟踪控制方法无法满足四轮转向车辆低速无人驾驶的轨迹跟踪精度与高灵活性的需求,仍有一定的不足。

### 发明内容

[0007] 针对现有技术的局限,本发明提出一种四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法,本发明采用的技术方案是:

[0008] 一种四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法,包括以下步骤:

[0009] S1,获取受控对象的实时位姿以及目标点位姿;

[0010] S2,根据所述实时位姿以及目标点位姿,运用结合了加速度与转角速度约束的车辆运动学模型,获取受控对象的参考速度序列以及受控对象的前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹;

[0011] S3,以后轴中心点为基准参考点,前轴中心点为随动参考点,根据所述前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹,采用非线性反馈控制的预瞄方式,获取受控对象的前轮转角控制量以及后轮转角控制量;

[0012] S4,根据所述参考速度序列,获取受控对象的加速度控制量;

[0013] S5,根据所述前轮转角控制量、后轮转角控制量以及加速度控制量,控制所述受控对象的运行。

[0014] 相较于现有技术,本发明通过以前后轴中心点为参考点,将规划轨迹解耦为的两条曲率近似连续参考轨迹,以车辆中心点为控制点,将横向误差和横摆角误差的控制解耦为以前后轴中心点为控制点的双点跟踪误差控制,可以充分利用四轮转向车辆的自由度,实现了无需切换转向模式即可使四轮转向车辆具有同相转向、异相转向和不等角度转向的能力,具有更大的前后轮转角控制域和较高的跟踪精度。

[0015] 作为一种优选方案,所述步骤S2中,包括以下过程:

[0016] S21,根据所述实时位姿以及目标点位姿,运用结合了加速度与转角速度约束的车辆运动学模型,获取受控对象的参考速度序列以及受控对象的几何中心点参考位姿序列;

[0017] S22,运用预设的位姿变换关系,将所述几何中心点参考位姿序列转换为受控对象的前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹。

[0018] 进一步的,所述车辆运动学模型按以下公式表示:

$$[0019] \quad x(k+1) = x(k) + v_m \cos(\varphi + \beta) \Delta t$$

$$[0020] \quad y(k+1) = y(k) + v_m \sin(\varphi + \beta) \Delta t$$

$$[0021] \quad \varphi(k+1) = \varphi(k) + \frac{v_m \cos(\beta(\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)))}{L} \Delta t$$

$$[0022] \quad \delta_f(k+1) = \delta_f(k) + \Delta \delta_f \Delta t$$

$$[0023] \quad \delta_r(k+1) = \delta_r(k) + \Delta \delta_r \Delta t$$

$$[0024] \quad \beta = \arctan\left(\frac{\tan \delta_r + \tan \delta_f}{2}\right)$$

[0025] 其中,x、y表示位置坐标; $\varphi$ 表示车辆航向角; $\beta$ 表示车辆几何中心速度 $v_m$ 与车身的夹角;k表示第k个时刻; $\Delta t$ 表示时间间隔; $\delta_f$ 表示前轮转角控制量; $\Delta \delta_f$ 表示前轮转角控制量变化值; $\delta_r$ 表示后轮转角控制量; $\Delta \delta_r$ 表示后轮转角控制量变化值。

[0026] 更进一步的,所述加速度与转角速度约束按以下公式表示:

$$[0027] \quad |\Delta v| \leq \Delta v_{\max}$$

$$[0028] \quad |\Delta \delta_f| \leq \Delta \delta_{\max}$$

$$[0029] \quad |\Delta \delta_r| \leq \Delta \delta_{\max}$$

[0030] 其中, $\Delta v$ 表示速度变化值; $\Delta v_{\max}$ 表示预设的速度最大变化值; $\Delta \delta_{\max}$ 表示预设的转角控制量最大变化值。

[0031] 更进一步的,所述位姿变换关系按以下公式表示:

$$[0032] \quad \begin{cases} x_f = x + \frac{L \cos(\varphi)}{2} \\ y_f = y + \frac{L \sin(\varphi)}{2} \\ x_r = x - \frac{L \cos(\varphi)}{2} \\ y_r = y - \frac{L \sin(\varphi)}{2} \end{cases};$$

[0033] 其中,  $x_f$  与  $y_f$  表示前轴中心点的位置坐标;  $x_r$  与  $y_r$  表示后轴中心点的位置坐标。

[0034] 作为一种优选方案, 在所述步骤S3中, 包括以下过程:

[0035] S31, 计算前轴中心点到前轴中心点参考轨迹最近点  $F_{ref}$  的距离  $e_f$  以及后轴中心点到所述后轴中心点参考轨迹上最近点  $B_{ref}$  的距离  $e_r$ ;

[0036] S32, 从所述前轴中心点参考轨迹在点  $F_{ref}$  的切线上设置前轮预瞄点  $P_f$ , 根据预设的后轮预瞄系数  $k_f$ , 沿所述前轴中心点参考轨迹在点  $F_{ref}$  的切线方向上预瞄距离  $d_f$ , 获得所述前轮预瞄点  $P_f$  的位置坐标;

[0037] S33, 从所述后轴中心点参考轨迹在点  $B_{ref}$  的切线上设置后轮预瞄点  $P_r$ , 根据预设的后轮预瞄系数  $k_r$ , 沿所述后轴中心点参考轨迹在点  $B_{ref}$  的切线方向上预瞄距离  $d_r$ , 获得所述后轮预瞄点  $P_r$  的位置坐标;

[0038] S34, 根据所述距离  $e_f$ 、距离  $e_r$ 、前轮预瞄点  $P_f$  的位置坐标以及后轮预瞄点  $P_r$  的位置坐标, 获得受控对象的前轮转角控制量以及后轮转角控制量。

[0039] 作为一种优选方案, 所述步骤S4中通过PID控制器获取受控对象的加速度控制量。

[0040] 本发明还提供以下内容:

[0041] 一种四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制系统, 包括位姿获取模块、序列轨迹获取模块、转角控制量获取模块、加速度控制量获取模块以及运行控制模块; 所述位姿获取模块连接所述序列轨迹获取模块, 所述序列轨迹获取模块分别连接所述转角控制量获取模块以及加速度控制量获取模块, 所述运行控制模块分别连接所述转角控制量获取模块以及加速度控制量获取模块; 其中:

[0042] 所述位姿获取模块用于获取受控对象的实时位姿以及目标点位姿;

[0043] 所述序列轨迹获取模块用于根据所述实时位姿以及目标点位姿, 运用结合了加速度与转角速度约束的车辆运动学模型, 获取受控对象的参考速度序列以及受控对象的前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹;

[0044] 所述转角控制量获取模块用于以后轴中心点为基准参考点, 前轴中心点为随动参考点, 根据所述前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹, 采用非线性反馈控制的预瞄方式, 获取受控对象的前轮转角控制量以及后轮转角控制量;

[0045] 所述加速度控制量获取模块用于根据所述参考速度序列, 获取受控对象的加速度控制量;

[0046] 所述运行控制模块用于根据所述前轮转角控制量、后轮转角控制量以及加速度控制量, 控制所述受控对象的运行。

[0047] 一种存储介质, 其上储存有计算机程序, 所述计算机程序被处理器执行时实现前述的四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法的步骤。

[0048] 一种四轮转向无人车辆, 包括作为受控对象的本体, 还包括存储介质、处理器以及储存在所述存储介质中并可被所述处理器执行的计算机程序, 所述计算机程序被处理器执

行时实现前述四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法的步骤。

### 附图说明

- [0049] 图1为本发明提供的四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法的步骤示意图；
- [0050] 图2为本发明实施例1中的前后轴中心点参考轨迹示意图；
- [0051] 图3为本发明实施例1中的相关变量示意图；
- [0052] 图4为本发明实施例1中实车验证的横向误差结果；
- [0053] 图5为本发明实施例1中实车验证的前后轮转角结果；
- [0054] 图6为本发明提供的四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制系统示意图。

### 具体实施方式

- [0055] 附图仅用于示例性说明，不能理解为对本专利的限制；
- [0056] 应当明确，所描述的实施例仅仅是本申请实施例一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本申请实施例中的实施例，本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其它实施例，都属于本申请实施例保护的范围。
- [0057] 在本申请实施例使用的术语是仅仅出于描述特定实施例的目的，而非旨在限制本申请实施例。在本申请实施例和所附权利要求书中所使用的单数形式的“一种”、“所述”和“该”也旨在包括多数形式，除非上下文清楚地表示其他含义。还应当理解，本文中使用的术语“和/或”是指并包含一个或多个相关联的列出项目的任何或所有可能组合。
- [0058] 下面的描述涉及附图时，除非另有表示，不同附图中的相同数字表示相同或相似的要素。以下示例性实施例中所描述的实施方式并不代表与本申请相一致的所有实施方式。相反，它们仅是如所附权利要求书中所详述的、本申请的一些方面相一致的装置和方法的例子。在本申请的描述中，需要理解的是，术语“第一”、“第二”、“第三”等仅用于区别类似的对象，而不必用于描述特定的顺序或先后次序，也不能理解为指示或暗示相对重要性。对于本领域的普通技术人员而言，可以根据具体情况理解上述术语在本申请中的具体含义。
- [0059] 此外，在本申请的描述中，除非另有说明，“多个”是指两个或两个以上。“和/或”，描述关联对象的关联关系，表示可以存在三种关系，例如，A和/或B，可以表示：单独存在A，同时存在A和B，单独存在B这三种情况。字符“/”一般表示前后关联对象是一种“或”的关系。以下结合附图和实施例对本发明做进一步的阐述。
- [0060] 为了解决现有技术的局限性，本实施例提供了一种技术方案，下面结合附图和实施例对本发明的技术方案做进一步的说明。
- [0061] 实施例1
- [0062] 请参考图1，一种四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法，包括以下步骤：
- [0063] S1，获取受控对象的实时位姿以及目标点位姿；
- [0064] S2，根据所述实时位姿以及目标点位姿，运用结合了加速度与转角速度约束的车辆运动学模型，获取受控对象的参考速度序列以及受控对象的前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹；
- [0065] S3，以后轴中心点为基准参考点，前轴中心点为随动参考点，根据所述前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹，采用非线性反馈控制的预瞄方式，获取受控对象的前轮



转角控制量以及后轮转角控制量；

[0066] S4,根据所述参考速度序列,获取受控对象的加速度控制量；

[0067] S5,根据所述前轮转角控制量、后轮转角控制量以及加速度控制量,控制所述受控对象的运行。

[0068] 相较于现有技术,本发明通过以前后轴中心点为参考点,将规划轨迹解耦为的两条曲率近似连续参考轨迹,以车辆中心点为控制点,将横向误差和横摆角误差的控制解耦为以前后轴中心点为控制点的双点跟踪误差控制,可以充分利用四轮转向车辆的自由度,实现了无需切换转向模式即可使四轮转向车辆具有同相转向、异相转向和不等角度转向的能力,具有更大的前后轮转角控制域和较高的跟踪精度。

[0069] 因此,本实施例所提供的方案,也可以视为提出了一种四轮转向无人车辆双点跟踪算法,能够根据车辆前后轮误差,进行前后轮转向控制,具有更大的前后轮转角控制域,无需加入额外的判断进行模式切换,即可实现前后轮等角度转向,不等角度转向,蟹行转向等转向模式。

[0070] 具体的,在作为受控对象的四轮转向车辆或者四轮转向机器人启动后,在所述步骤S1中,会先通过定位初始化,记录受控对象的GNSS数据、IMU数据,确定受控对象在一个笛卡尔全局坐标系下的坐标及航向角,获得其实时位姿(也可以称为实际位姿);同时,通过高精地图初始化,确定目标点位姿。

[0071] 受控对象在执行当前时刻的所述前轮转角控制量、后轮转角控制量以及加速度控制量后,可以将下一个时刻的状态量进行一个反馈,进入下一个循环中执行上述步骤。

[0072] 所述步骤S3、S4可以同时进行,两个步骤之间不存在绝对的先后顺序。

[0073] 作为一种优选实施例,所述步骤S2中,包括以下过程:

[0074] S21,根据所述实时位姿以及目标点位姿,运用结合了加速度与转角速度约束的车辆运动学模型,获取受控对象的参考速度序列以及受控对象的几何中心点参考位姿序列;

[0075] S22,运用预设的位姿变换关系,将所述几何中心点参考位姿序列转换为受控对象的前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹。

[0076] 具体的,请参阅图2,在所述步骤S2中,将首先得到曲率连续的、关于受控对象的几何中心点参考位姿序列,再转变为受控对象的前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹(在本实施例中,位姿序列也可以称为轨迹或路径)。

[0077] 进一步的,所述车辆运动学模型按以下公式表示:

$$[0078] \quad x(k+1) = x(k) + v_m \cos(\varphi + \beta) \Delta t$$

$$[0079] \quad y(k+1) = y(k) + v_m \sin(\varphi + \beta) \Delta t$$

$$[0080] \quad \varphi(k+1) = \varphi(k) + \frac{v_m \cos(\beta(\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)))}{L} \Delta t$$

$$[0081] \quad \delta_f(k+1) = \delta_f(k) + \Delta \delta_f \Delta t$$

$$[0082] \quad \delta_r(k+1) = \delta_r(k) + \Delta \delta_r \Delta t$$

$$[0083] \quad \beta = \arctan\left(\frac{\tan \delta_r + \tan \delta_f}{2}\right)$$

[0084] 其中,x、y表示位置坐标; $\varphi$ 表示车辆航向角; $\beta$ 表示车辆几何中心速度 $v_m$ 与车身的

夹角;  $k$ 表示第 $k$ 个时刻;  $\Delta t$ 表示时间间隔;  $\delta_f$ 表示前轮转角控制量;  $\Delta \delta_f$ 表示前轮转角控制量变化值;  $\delta_r$ 表示后轮转角控制量;  $\Delta \delta_r$ 表示后轮转角控制量变化值。

[0085] 更进一步的,首所述加速度与转角速度约束按以下公式表示:

$$[0086] \quad |\Delta v| \leq \Delta v_{\max}$$

$$[0087] \quad |\Delta \delta_f| \leq \Delta \delta_{\max}$$

$$[0088] \quad |\Delta \delta_r| \leq \Delta \delta_{\max}$$

[0089] 其中,  $\Delta v$ 表示速度变化值;  $\Delta v_{\max}$ 表示预设的速度最大变化值;  $\Delta \delta_{\max}$ 表示预设的转角控制量最大变化值。

[0090] 更进一步的,所述位姿变换关系按以下公式表示:

$$[0091] \quad \begin{cases} x_f = x + \frac{L \cos(\varphi)}{2} \\ y_f = y + \frac{L \sin(\varphi)}{2} \\ x_r = x - \frac{L \cos(\varphi)}{2} \\ y_r = y - \frac{L \sin(\varphi)}{2} \end{cases};$$

[0092] 其中,  $x_f$ 与 $y_f$ 表示前轴中心点的位置坐标;  $x_r$ 与 $y_r$ 表示后轴中心点的位置坐标。

[0093] 作为一种优选实施例,请参阅图3,在所述步骤S3中,包括以下过程:

[0094] S31,计算前轴中心点到前轴中心点参考轨迹最近点 $F_{ref}$ 的距离 $e_f$ 以及后轴中心点到所述后轴中心点参考轨迹上最近点 $B_{ref}$ 的距离 $e_r$ ;

[0095] S32,从所述前轴中心点参考轨迹在点 $F_{ref}$ 的切线上设置前轮预瞄点 $P_f$ ,根据预设的后轮预瞄系数 $k_f$ ,沿所述前轴中心点参考轨迹在点 $F_{ref}$ 的切线方向上预瞄距离 $d_f$ ,获得所述前轮预瞄点 $P_f$ 的位置坐标 $P_f(x_{fd}, y_{fd})$ ;

[0096] S33,从所述后轴中心点参考轨迹在点 $B_{ref}$ 的切线上设置后轮预瞄点 $P_r$ ,根据预设的后轮预瞄系数 $k_r$ ,沿所述后轴中心点参考轨迹在点 $B_{ref}$ 的切线方向上预瞄距离 $d_r$ ,获得所述后轮预瞄点 $P_r$ 的位置坐标 $P_r(x_{rd}, y_{rd})$ ;

[0097] S34,根据所述距离 $e_f$ 、距离 $e_r$ 、前轮预瞄点 $P_f$ 的位置坐标以及后轮预瞄点 $P_r$ 的位置坐标,获得受控对象的前轮转角控制量以及后轮转角控制量。

[0098] 具体的,受控对象在时刻 $k$ 的前轮转角控制量以及后轮转角控制量如下所示:

$$[0099] \quad \begin{cases} \delta_r(k) = \delta_{re}(k) + \delta_{rd}(k) \\ \delta_f(k) = \delta_{fe}(k) + \delta_{fd}(k) \end{cases};$$

[0100] 其中,  $\delta_{fe}$ 、 $\delta_{re}$ 分别为前后轴中心点参考轨迹切线方向与前后轴中心点到前后轮预瞄点连线方向的夹角,  $\delta_{fd}$ 、 $\delta_{rd}$ 分别为前后轴中心点参考轨迹切线方向与车身方向的夹角,由几何关系和正弦定理得:

$$[0101] \quad \begin{cases} \delta_{re}(k) = \arctan \frac{e_r(k)}{d_r(k)} \\ \delta_{fe}(k) = \sin^{-1} \left( \frac{e_f(k)}{d_f(k)} \sin \delta_{fo}(k) \right) \end{cases};$$

[0102] 可转换为:

$$[0103] \quad \begin{cases} \delta_{rt}(k) = \arctan \frac{y_{rd}-y_r}{x_{rd}-x_r} \\ \delta_{ft}(k) = \arctan \frac{y_{fd}-y_f}{x_{fd}-x_f} \end{cases}$$

[0104] 因此,在所述步骤S3中涉及到的控制器原理可以认为是关于前后中心点轮误差的两个比例控制器:

$$[0105] \quad \begin{cases} \dot{e}_r(k) = -k_r e_r(k) \\ \dot{e}_f(k) = -k_f e_f(k) \end{cases}^{\circ}$$

[0106] 换言之,本实施例为了解决四轮转向车辆无人驾驶轨迹跟踪过程中前后轮转向的过度约束的问题,提出一种规划轨迹解耦生成为以前后轴中心点为参考点的两条曲率近似连续参考轨迹,且前后轴中心轨迹点一一对应;将以车辆中心点为控制点的横向误差和横摆角误差的控制解耦为以前后轴中心点为控制点的双点跟踪误差的控制,即后轮转向控制后轴中心点与后轮参考轨迹最近点的距离,前轮转向控制前轴中心点与对应前轮参考点的距离。

[0107] 而为了避免使用难以获得的动力学参数,解决计算量大的问题,提高计算的实时性;本实施例采用基于运动学与几何学的方法,以后轮中心为基准参考点,前轮中心为随动参考点,分别计算前后轮中心点与前轮参考轨迹和后轮参考轨迹最近点的误差,采用与速度成正比的预瞄方式,分别得到前后轮的预瞄点,并计算出所需转向角度。

[0108] 作为一种优选实施例,所述步骤S4中通过PID控制器获取受控对象的加速度控制量。

[0109] 本实施例所提供的四轮转向无人车辆双点跟踪算法与现有4WS车辆纯跟踪算法的实验比较验证结果可参阅图4以及图5,可见,四轮转向车辆双点跟踪算法的轨迹跟踪精度更高;车辆开始行驶时,以近似蟹行的方式并入轨迹,说明双点跟踪算法能够根据车辆前后轮误差,进行前后轮转向控制,具有更大的前后轮转角控制域,无需加入额外的判断进行模式切换,即可实现前后轮等角度转向,不等角度转向,蟹行转向等转向模式。

[0110] 实施例2

[0111] 一种四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制系统,请参阅图6,包括位姿获取模块1、序列轨迹获取模块2、转角控制量获取模块3、加速度控制量获取模块4以及运行控制模块5;所述位姿获取模块1连接所述序列轨迹获取模块2,所述序列轨迹获取模块2分别连接所述转角控制量获取模块3以及加速度控制量获取模块4,所述运行控制模块5分别连接所述转角控制量获取模块3以及加速度控制量获取模块4;其中:

[0112] 所述位姿获取模块1用于获取受控对象的实时位姿以及目标点位姿;

[0113] 所述序列轨迹获取模块2用于根据所述实时位姿以及目标点位姿,运用结合了加速度与转角速度约束的车辆运动学模型,获取受控对象的参考速度序列以及受控对象的前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹;

[0114] 所述转角控制量获取模块3用于以后轴中心点为基准参考点,前轴中心点为随动参考点,根据所述前轴中心点参考轨迹与后轴中心点参考轨迹,采用非线性反馈控制的预瞄方式,获取受控对象的前轮转角控制量以及后轮转角控制量;

[0115] 所述加速度控制量获取模块4用于根据所述参考速度序列,获取受控对象的加速度控制量;

[0116] 所述运行控制模块5用于根据所述前轮转角控制量、后轮转角控制量以及加速度控制量,控制所述受控对象的运行。

[0117] 实施例3

[0118] 一种存储介质,其上储存有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现实施例1中的四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法的步骤。

[0119] 实施例4

[0120] 一种四轮转向无人车辆,包括作为受控对象的本体,还包括存储介质、处理器以及储存在所述存储介质中并可被所述处理器执行的计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现实施例1中的四轮转向无人车辆轨迹跟踪控制方法的步骤。

[0121] 显然,本发明的上述实施例仅仅是为清楚地说明本发明所作的举例,而并非是对本发明的实施方式的限定。对于所属领域的普通技术人员来说,在上述说明的基础上还可以做出其它不同形式的变化或变动。这里无需也无法对所有的实施方式予以穷举。凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明权利要求的保护范围之内。

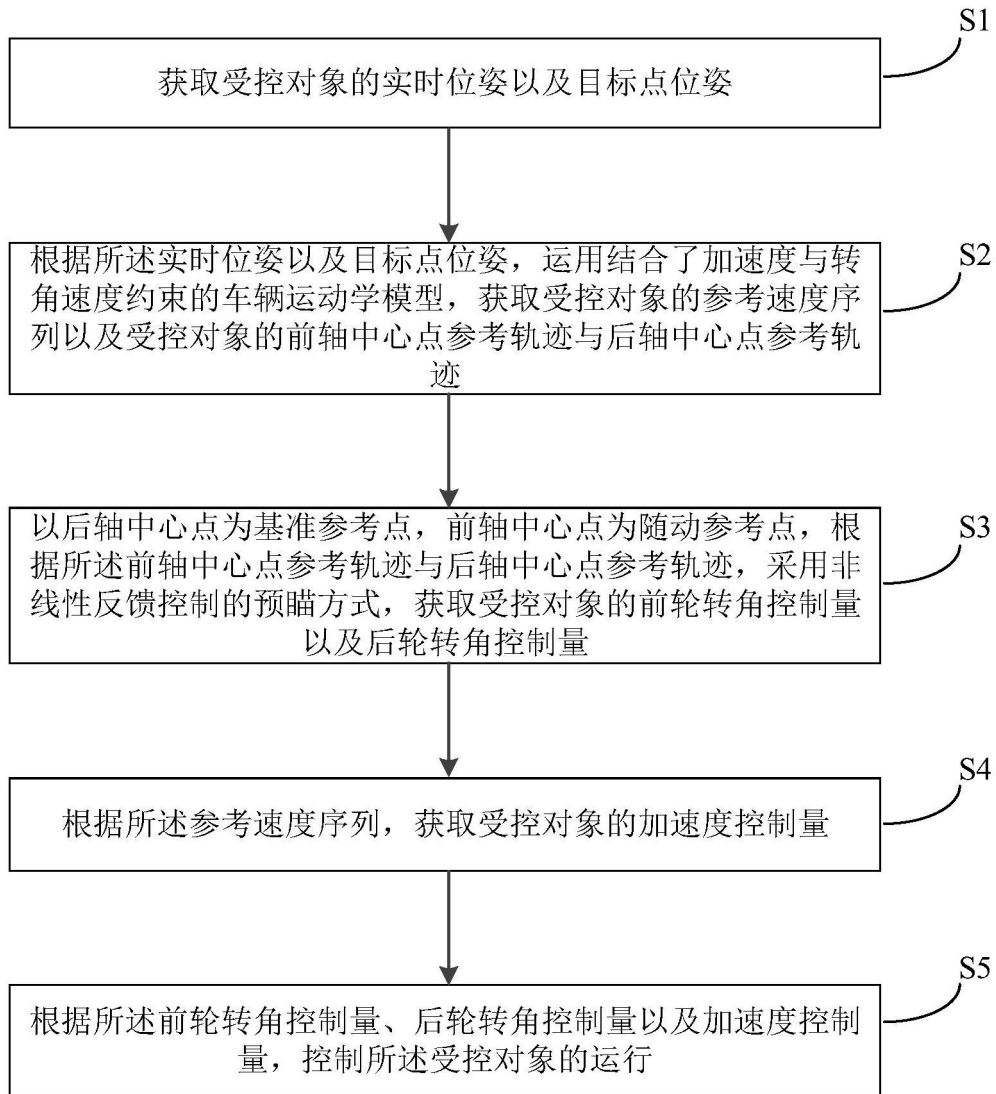
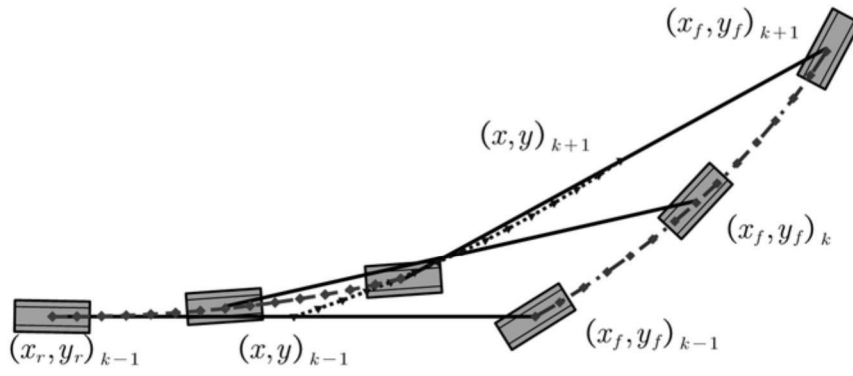


图1



..... 几何中心 -.- 前轴中心 - - - 后轴中心

图2

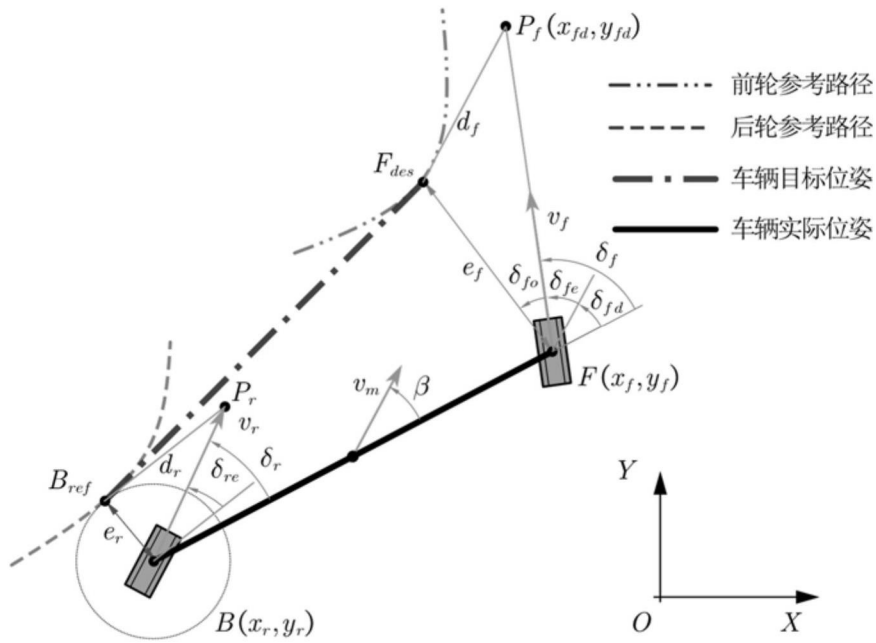


图3

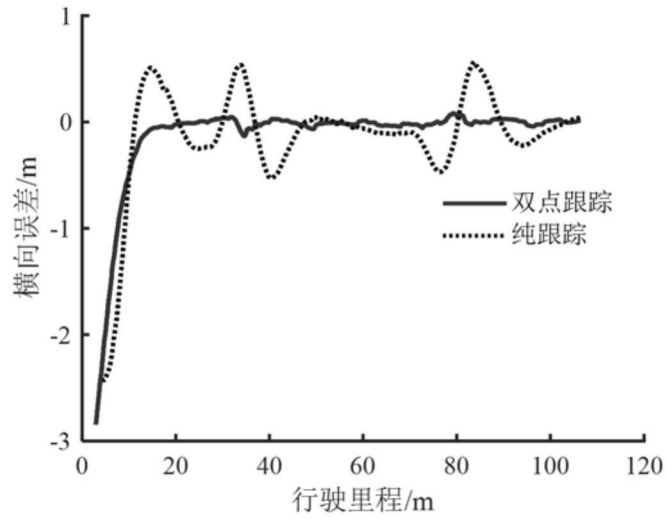


图4

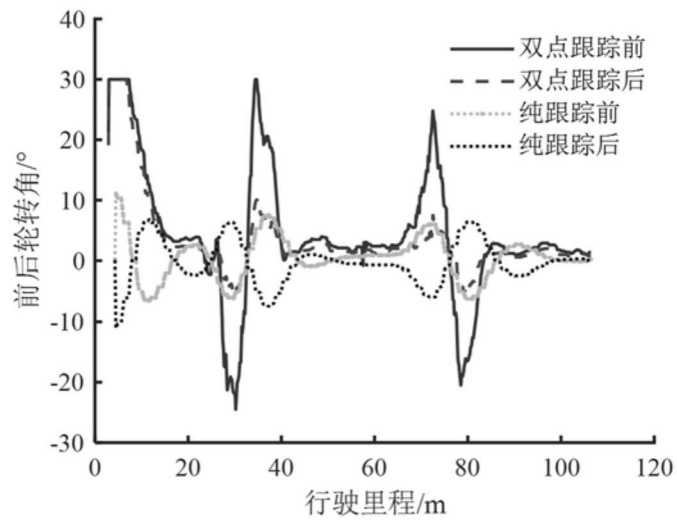


图5

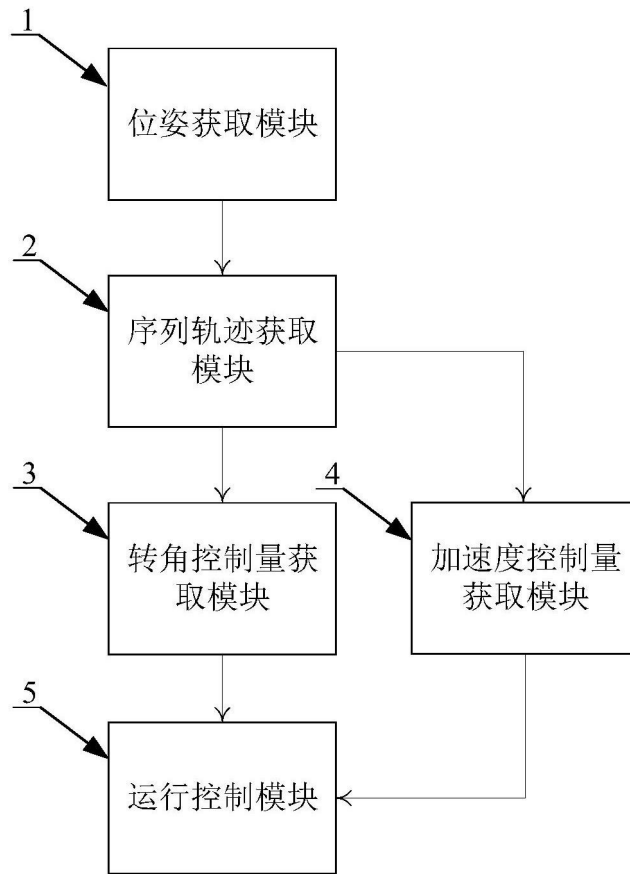


图6