

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于反步法的四轮车体跟踪控制半实物仿真研究

李文宇, 崔冀宁, 段峰

引用本文:

李文宇, 崔冀宁, 段峰. 基于反步法的四轮车体跟踪控制半实物仿真研究[J]. *控制与决策*, 2021, 36(1): 90–96.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0471>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 基于反演算法的严格反馈非线性系统固定时间跟踪控制

Fixed-time tracking control for strict-feedback nonlinear systems based on backstepping algorithm

*控制与决策*. 2021, 36(1): 173–179 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0658>

#### 基于神经动态优化的非线性系统近似最优跟踪控制

Approximate optimal tracking control for nonlinear systems based on neurodynamic optimization

*控制与决策*. 2021, 36(1): 97–104 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0056>

#### 脉冲控制下多智能体系统的保性能双向编队控制

Guaranteed cost bipartite formation problem of multi-agent systems with impulse control

*控制与决策*. 2021, 36(1): 180–186 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0854>

#### 一类非线性大系统分散自适应预设性能有限时间跟踪控制

Decentralized adaptive prescribed performance finite-time tracking control for a class of large-scale nonlinear systems

*控制与决策*. 2020, 35(12): 3045–3052 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0623>

#### 凸优化与A\*算法结合的路径避障算法

Convex optimization and A-star algorithm combined path planning and obstacle avoidance algorithm

*控制与决策*. 2020, 35(12): 2907–2914 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0351>

# 基于反步法的四轮车体跟踪控制半实物仿真研究

李文宇<sup>1</sup>, 崔冀宁<sup>2</sup>, 段峰<sup>1†</sup>

(1. 南开大学 人工智能学院, 天津 300350; 2. 太原卫星发射中心, 山西 忻州 036300)

**摘要:** 人机共驾是非自动驾驶迈向全自动驾驶的中间过渡技术, 其半实物仿真能显著减少实车的实验消耗. 针对不具备四轮车体模型的仿真平台以及传统坐标系转换方法的局限, 基于两轮差速移动车体模型和四轮车体模型的位姿状态误差, 利用一种非线性反步控制方法, 实现对四轮车体模型运动轨迹的有效实时跟踪. 通过方向盘和踏板在虚拟现实环境下进行人机共驾模拟, 为开发更逼真的人机共驾及模拟辅助驾驶系统提供了参考. 以车体前进方向速度和导向轮角度作为系统输入, 通过考察两轮差速移动车体和四轮车体的位姿状态误差, 分别在数值仿真和半实物仿真实验条件下, 对比并验证了所提出方法的有效性, 行驶方向上 10 km 的平均累积误差为 4.56 m.

**关键词:** 人机共驾; 半实物仿真; 非线性控制; 轨迹跟踪

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0471

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 李文宇, 崔冀宁, 段峰. 基于反步法的四轮车体跟踪控制半实物仿真研究 [J]. 控制与决策, 2021, 36(1): 90-96.

## Tracking control for four-wheel vehicle semi-physical simulation based on back-stepping method

LI Wen-yu<sup>1</sup>, CUI Ji-ning<sup>2</sup>, DUAN Feng<sup>1†</sup>

(1. College of Artificial Intelligence, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Taiyuan Satellite Launch Center, Xinzhou 036300, China)

**Abstract:** Human-vehicle collaborative driving (HVCD) is a transitional technology of non-autonomous/autonomous driving. The semi-physical simulation can significantly reduce the experiment consumption of real vehicles. However, most simulation platforms are lacking four-wheel vehicle models and certain limitations in conventional coordinate system transformation methods. To fill the gap, this paper uses a nonlinear back-stepping control method based on the pose errors between the two-wheel differential mobile vehicle model and the four-wheel vehicle model, which achieves efficient and real-time tracking for the four-wheel vehicle motion trajectory. Physical steering wheel and pedals are applied for HVCD simulation under virtual reality environment, which provides reference for the development of the more realistic system. Vehicle forwarding velocity and guide wheel angle are utilized as the system input. Experiments are processed to compare and verify the method validity under both numerical and semi-physical simulation environments. Through the investigation of the pose errors between the two-wheel differential mobile vehicle and the four-wheel vehicle, the average accumulate error in heading direction is 4.56 m in 10 km.

**Keywords:** human-vehicle collaborative driving; semi-physical simulation; nonlinear control; trajectory tracking

## 0 引言

人机共驾作为非自动驾驶迈向全自动驾驶的中间过渡技术<sup>[1-2]</sup>, 在全自动驾驶技术尚不成熟, 且信赖程度和交通规范尚不完善的情况下, 对改善当前交通运行状态、提高交通效率和减少驾驶员负担具有重要意义<sup>[3-4]</sup>. 与传统辅助驾驶不同的是, 人机共驾要求

人体驾驶员和智能驾驶系统共同参与到驾驶过程中, 驾驶员和智能驾驶系统对车体拥有相同的控制权限.

人机共驾以及其他辅助驾驶和自动驾驶研究均需进行大量的实验, 为了减少实车实验的消耗并保证驾驶员的人身安全, 半实物仿真研究为交互驾驶模拟提供了更为先进的测试手段. 如何在半实物仿真情

收稿日期: 2019-04-15; 修回日期: 2019-06-24.

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项项目(2017YFE0129700); 国家自然科学基金面上项目(61673224); 天津市自然科学基金杰出青年基金项目(18JJCJC46100).

责任编辑: 易建强.

†通讯作者. E-mail: duanf@nankai.edu.cn.

况下获得更加逼真且稳定的驾驶沉浸感是人机共驾需要考虑的基本问题之一<sup>[5]</sup>。

人机共驾半实物仿真中的实物是指人机交互所用的驾驶模拟系统为实物系统,而驾驶的道路环境为仿真环境。对于车体的驾驶模拟已逐渐成为现实<sup>[6-7]</sup>,包括单纯使用视觉渲染技术和实体方向盘及踏板的无动感模拟<sup>[8]</sup>,以及基于液压机械臂支撑驾驶室的动感模拟系统<sup>[9]</sup>。而在场景仿真中,一般通过软件生成场景模型和在控制中引入扰动来模拟真实场景的驾驶环境。同济大学驾驶模拟器<sup>[9]</sup>使用多自由度支撑室来模拟车体驾驶过程中各方向上的力的变化,是较为先进的全方位驾驶模拟系统。此外,模拟驾驶系统也被运用到辅助驾驶系统的开发上,通过调节系统参数并通过大量被试者的实际实验来优化类似自动巡航系统的辅助驾驶参数<sup>[10]</sup>。然而,目前大多数仿真平台仍然存在以下两方面问题:

1) 在人机共驾半实物仿真过程中,系统模拟车体运动除与底层机械系统的行为保持一致外,视觉渲染也需给出随车体运动产生的不同视角视觉效果。为了获得更加真实的路况,基于真实道路进行的数据捕获生成的数据库也被建立起来,但由于捕获角度以及信息不完整,难以从各个角度对真实场景进行复原。到目前为止,大部分的模拟驾驶研究仍基于软件生成场景进行<sup>[11]</sup>。

2) 除了考虑半实物仿真系统的场景生成外,车体的控制与仿真环境驾驶员视角的渲染也需要同时进行,在仅对车体进行离散时间的位姿设定的条件下,期望达到连续的视角渲染效果的计算耗费较高。在较为复杂的场景模式或者真实场景下,仿真平台的负载能力也是一个巨大的瓶颈<sup>[12-13]</sup>。此外,多数仿真软件基于两轮差速移动机器人模型模拟运动实体,并未给出四轮车体的仿真模型,从而限制了相关研究的发展<sup>[14-17]</sup>。

为了解决上述问题,与解析方法不同,本文直接对最终期望的实时运动姿态进行跟踪,通过使两轮差速移动车体的实时姿态控制来模拟四轮车体的运动行为,采用基于非线性的反步控制<sup>[18]</sup>方法,使两轮差速移动车体跟踪四轮车体的运动轨迹,实时优化补偿两者位姿误差,从而达到运动行为模拟的目的,并在半实物仿真平台上进行了验证。

## 1 人机共驾系统与问题描述

### 1.1 人机共驾半实物仿真系统

人机共驾要求人体和智能驾驶系统同时参与到驾驶过程中。为了模拟真实驾驶的控制输入,在本文所设计的人机共驾半实物仿真系统中,人体通过实物人机交互模块实现模拟驾驶作为系统输入,虚拟现实环境部分则负责仿真车体的运动控制和场景渲染,系统的整体结构如图1所示。

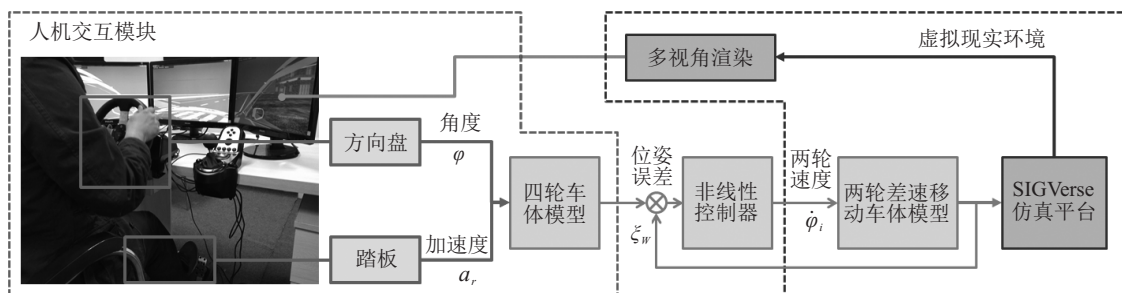


图1 系统整体结构

1) 人机交互模块。人体驾驶员通过实物方向盘和踏板进行控制输入,产生方向盘角度和踏板加速度信号,进而将控制信号输入到四轮车体模型中。另外,多视角屏幕显示为驾驶员提供场景的渲染,向驾驶员提供路况信息并提升驾驶沉浸感。

2) 虚拟现实环境。基于SIGVerse<sup>[19]</sup>仿真平台,本文通过所采用的非线性反步控制方法,将输出的两轮差速移动车体参数作为该部分的系统输入,经过仿真平台底层的转换后,产生最终控制车体的信号来控制仿真车体运动。另外提供多视角的场景渲染功能,包括对车体和道路场景等进行渲染,为实物环境中的驾

驶员提供视觉信息<sup>[20]</sup>。

整个系统环节最终构成了以人机交互和虚拟现实为基础的人机共驾半实物仿真系统,通过非线性反步控制器实现了对期望四轮车体模型运动的轨迹跟踪,从而转换为两轮差速移动车体的运动,为不具备四轮车体模型的仿真系统提供了模拟四轮车体行为的方法。

### 1.2 问题描述

首先,在人机共驾等辅助驾驶的研究中,与自动驾驶不同的是,人体作为重要的决策主体,不可或缺。如果采用真实车体进行实验,则需要耗费较大的

成本,并且无法保证人体驾驶员的安全性.仿真实验恰好能够解决以上问题,然而,由于人机共驾和辅助驾驶仍需人体驾驶员通过主动操作赋予系统输入,良好的人机交互系统必不可少.因此,本文提出了基于实体方向盘和踏板的人机交互与虚拟仿真驾驶环境相结合的半实物仿真来解决该问题.

其次,四轮车体由于需要考虑的车体模型较为复杂,尤其是对于当前逐步流行起来的四轮驱动系统,需要考虑的运动学约束模拟起来较为复杂.而对于两轮差速移动车体模型,其车体系统结构简单,并且相关研究已经比较成熟,大部分传统仿真平台都支持两轮差速移动车体的运动模型和控制.采用两轮差动车体模型对四轮车体进行模拟能够解决这一问题,并为传统仿真平台提供了扩展到四轮模型的有效手段.

对于采用两轮差速移动车体模型模拟四轮车体运动,由于车体结构的不同,如果直接使用质心重合或者几何中心重合的坐标系转换方法,则存在无解和有限制条件的解的情况,无法直接对两种不同的车体模型进行转换.然而从问题本身出发,人们期望通过一定的方法使得基于两轮差速移动车体模型的仿真车体的位姿与四轮车体模型保持一致,这样,就可以通过减小两种模型之间的位姿误差的控制方法来解决该问题,从而将该问题转换为实时轨迹跟踪问题来分析和解决.

本文针对以上提出的问题,基于SIGVerse仿真平台在所设计的复杂道路场景下,对半实物人机共驾中的车体控制模拟进行分析,讨论了模型间直接转换存在的问题,采用一种基于非线性反步控制的方法,以期通过两轮差动模型模拟四轮系统的运转.在保证车体系统稳定性的同时,使驾驶员仍体验到操控四轮车体的真实视角和驾驶沉浸感.

## 2 车体运动学分析

为了使得两轮差速移动平台的运动学行为与四轮系统相吻合,使得被试者的驾驶体验更加真实,首先对两种车体结构的运动学模型进行分析,讨论模型分析下的解析方法实现模型间直接转换的可行性.如果解析方法可行,则其能够直接快速转换两种车体的运动学模型,达到直接实现模型转换的目的.在四轮模型系统中,后轮被视为主动轮组,并且认为车体的质心与几何中心相重合.下面在分析两种车体运动学模型的基础上,对坐标中心重合与质心重合两种情况进行分析和讨论.

### 2.1 四轮车体运动学模型

如图2所示,建立如下的车体坐标系和参考坐标系. $O_{R_4}$ 为车体坐标系 $\{R_4\}$ 的中心,并与车体两后轮的中心点重合.参考坐标系 $\{W\}$ 在车体坐标系 $\{R_4\}$ 之外,车体中心在参考坐标系 $\{W\}$ 下的位姿可表示为 $\xi_W = (x, y, \theta)^T$ ,车体坐标系在参考坐标系下的坐标为 $(x_{R_4}, y_{R_4}, \theta_{R_4})^T$ .

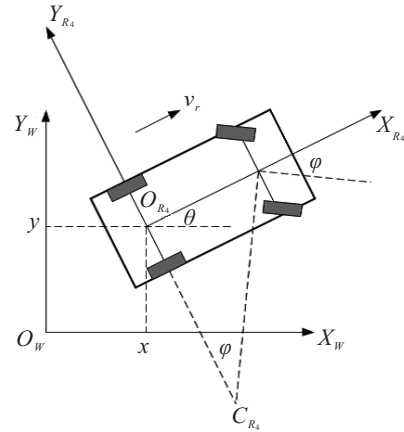


图2 四轮车体在参考坐标系下的运动学模型

定义从参考坐标系到车体坐标系的旋转矩阵为 $R(\theta)$ ,表示如下:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

从车体坐标系到参考坐标系的转移矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ \theta_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{R_4} \\ y_{R_4} \\ \theta_{R_4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

考虑四轮车体仅有两后轮进行驱动的条件下,在车体坐标系 $\{R_4\}$ 中,当后轮的线速度达到 $v_r$ ,并且前轮的转向角度为 $\varphi$ 时,车体的瞬时状态 $\dot{\xi}_W$ 在参考坐标系下为

$$\dot{\xi}_W = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ 0 \\ v_r L^{-1} \tan \varphi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 $L$ 表示前轮中心到后轮中心的距离.根据实际车辆参数,前轮的转动角度范围一般为 $-30^\circ \sim 30^\circ$ ,这使得车体的旋转中心 $C_{R_4}$ 位于车体的外侧.

### 2.2 两轮差速移动车体模型

如图3所示, $O_{R_2}$ 被定义为车体在其坐标系下的中心,车体的位姿在参考坐标系 $\{W\}$ 下可以表示为 $\xi_W = (x, y, \theta)^T$ .这里选择了与四轮车体模型相同的

表示形式,使其从世界坐标系到两轮车体参考系的旋转矩阵与式(1)一致.

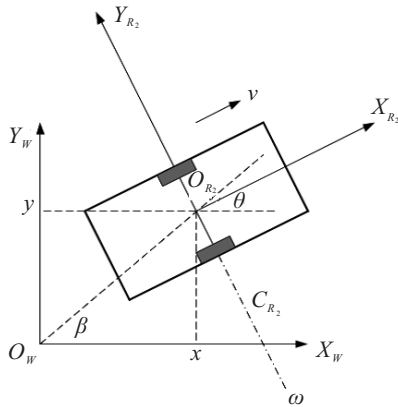


图3 两轮差速移动车体在参考坐标系下的运动学模型

两轮差速移动车体的线速度可以表示为

$$v = \dot{x}_R = \frac{r}{2}(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2). \quad (4)$$

其中:  $r$  表示车轮半径,  $\dot{\phi}_i$  表示每一个轮子的旋转速度. 由此,两轮差速移动车体的角速度可以表示如下:

$$\omega = \dot{\theta} = \frac{r}{2l}(\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2), \quad (5)$$

其中  $2l$  (2倍是为了简化计算) 表示两轮之间的距离. 车体的瞬时状态可以表示为

$$\dot{\xi}_W = R(\theta)^{-1} \dot{\xi}_{R2} = R(\theta)^{-1} \frac{r}{2} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 \\ 0 \\ l^{-1}(\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

因此,两轮差速移动车体的运动学模型为

$$\dot{\xi}_W = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 \\ 0 \\ l^{-1}(\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

在参考坐标系下,模型可以表示为

$$\dot{\xi}_W = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (8)$$

### 3 基于非线性反步法的跟踪控制

在虚拟现实仿真条件下,考虑在离散时间片下进行模拟车体控制以及场景渲染,期望在可以接受的瞬时时间间隔  $\Delta t$  内,两种模型下车体的位姿误差尽量小. 然后基于反步法构建非线性控制器,控制两轮差速移动车体逼近四轮车体的运动行为,并对系统的稳定性进行验证.

#### 3.1 共同质心模型下的位姿误差分析

在共同质心模型下,两轮差速移动车体的运动学模型与式(8)所表述的状态相同. 四轮车体运动学模型中的质心在参考坐标系下可以表示为

$$V_{CM}^W = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ s\dot{\theta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中  $\dot{\theta} = v_r L^{-1} \tan \varphi$  表示质心的角速度. 考虑两轮差速移动车体和四轮车体之间的位姿误差  $P_e = [x_e, y_e, \theta_e]^T$ , 其在瞬时时间片  $\Delta t$  下可表示为

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \Delta t \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \Delta t \begin{bmatrix} v_r \cos \theta - s\dot{\theta} \sin \theta \\ v_r \sin \theta + s\dot{\theta} \cos \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其微分的结果可表示为

$$\dot{P}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega - v + v_r \cos \theta_e \\ -x_e \omega + v_r \sin \theta_e \\ \dot{\theta} - \omega \end{bmatrix}. \quad (11)$$

#### 3.2 非线性控制器设计及稳定性分析

基于反步法可以构建李雅普诺夫函数

$$V_1 = \frac{k_1}{2}(x_e^2 + y_e^2) + \frac{1 - \cos \theta_e}{k_2}, \quad (12)$$

系统输入为期望四轮车体模型下车体行驶的位姿,输出为两轮差速移动车体模型的位姿,所设计的非线性控制器希望能够尽量减小两者之间的误差,然后通过两轮差分转化为两轮差速移动模型控制车体的输入. 其中:  $k_1 > 0$ ,  $k_2 > 0$ , 当且仅当  $x_e = 0$ ,  $y_e = 0$  以及  $\theta_e = 0$  时,  $V_1 = 0$ , 否则  $V_1 > 0$ .  $V_1$  的微分可表示为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = k_1(x_e \dot{x}_e + y_e \dot{y}_e) + \frac{\dot{\theta}_e \sin \theta_e}{k_2} = \\ -k_1 x_e (v - v_r \cos \theta_e) - \\ \frac{\sin \theta_e}{k_2} (\omega - \dot{\theta} - k_1 k_2 y_e v_r). \end{aligned} \quad (13)$$

由此设计控制器如下:

$$\begin{aligned} v = k_1 x_e + v_r \cos \theta_e, \\ \omega = \dot{\theta} + k_1 k_2 y_e v_r + k_3 \sin \theta_e. \end{aligned} \quad (14)$$

其中:  $v_r > 0$ ,  $k_1 > 0$ ,  $k_2 > 0$ ,  $k_3 > 0$ . 将式(14)代入(13),可得

$$\dot{V}_1 = -k_1^2 x_e^2 - \frac{k_3 \sin^2 \theta_e}{k_2} \leq 0. \quad (15)$$

由此可以满足李雅普诺夫稳定性判别条件,使得系统稳定或渐近稳定. 令  $k_x = k_1$ ,  $k_y = k_1 k_2$  以及  $k_\theta = k_3$ , 最终得到控制器的形式如下:

$$\begin{aligned} v = k_x x_e + v_r \cos \theta_e, \\ \omega = \dot{\theta} + k_y y_e v_r + k_\theta \sin \theta_e, \end{aligned} \quad (16)$$

其中参数  $k_x$ 、 $k_y$  以及  $k_\theta$  可通过最优化方法获得或者自适应得到. 车体在参考坐标系下的位姿可以通过式(8)获得,最终的控制量和两轮速度可由式(4)和(5)

反解得到,即

$$\begin{aligned}\dot{\phi}_1 &= \frac{2v + \omega l}{2r}, \\ \dot{\phi}_2 &= \frac{2v - \omega l}{2r}.\end{aligned}\quad (17)$$

## 4 实验与结果分析

为了测试系统的实时跟踪能力和整体运行效果,在实验中,首先进行数值仿真,然后在半实物系统上进行实际实验.在半实物实验过程中,人体通过实物模拟方向盘和踏板参与到人机共驾过程中,从而测试人体独立驾驶车体时的误差情况.

### 4.1 数值仿真实验

#### 4.1.1 一般条件输入

为了验证本文所采用方法的有效性,首先考察车体在正常街区行驶一般条件下的性能.正弦信号输入能够近似模拟车体在行驶过程中的速度和转角变化,因此,这里采用正弦信号作为输入对系统输出进行观察.控制器的输入量包括四轮车体的期望线速度  $v_r$  和角度  $\varphi$ ,控制器的增益参数通过最优化方法获得.在数值仿真实验中,控制器的参数设置为  $k_x = 0.798$ ,  $k_y = 0.001$ ,  $k_\theta = 0.653$ ,系统输入以相位偏移的正弦量形式给出,即

$$\begin{aligned}v_r &= 8.5 + 5.5 \sin(0.2\pi t), \\ \varphi &= \frac{\pi}{6} \sin\left(\frac{\pi}{2} + 0.2\pi t\right),\end{aligned}\quad (18)$$

其中  $t$  的步长为  $0.01\text{s}$ .由实验结果可看出,系统输出最大累积误差相对较小,  $X$  和  $Y$  的最大累积误差仅为平均值的 3 倍左右,角度值  $\theta$  仅为 2 倍,这在轨迹跟踪中是极其重要的影响因素.

#### 4.1.2 极限条件输入

为了进一步测试系统,考虑车体在较高的极限速度条件下的性能,极限条件输入实验同时提高了系统输入的角频率.虽然车体运行过程中的转动输入保持不变,但由于线速度的加快,其影响也会相对加强.输入信号设置为

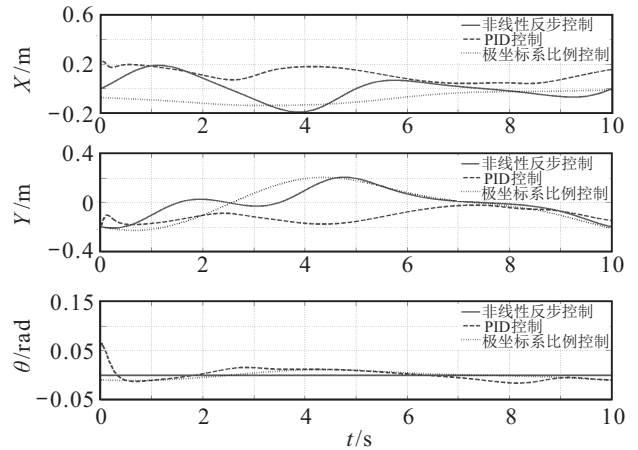
$$\begin{aligned}v_r &= 15 + 15 \sin(0.5\pi t), \\ \varphi &= \frac{\pi}{6} \sin\left(\frac{\pi}{2} + 0.5\pi t\right),\end{aligned}\quad (19)$$

其中  $t$  的步长仍为  $0.01\text{s}$ .在此输入条件下,允许车体在  $10\text{s}$  内从静止加速到  $30\text{m/s}$ ,这已经超出了一般车体的配置.

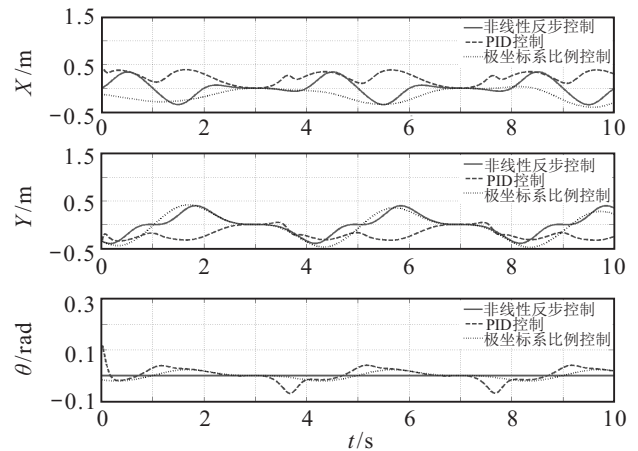
累积误差在此条件下的增量是一般条件下的 2.5 倍,这与角频率的增量相同.另外,在极限条件下的最大累积误差也有所增长,但仍能够满足真实车体的行驶要求.

### 4.1.3 相关控制算法对比

为了进一步验证本文所采用的算法,分别与极坐标系下的比例控制以及 PID 控制算法进行比较.这两种算法都是较为传统的控制算法,但实现方法简单,计算量小,能够满足实车人机共驾系统的要求.图 4(a)为在一般条件输入下的不同控制算法的位姿误差对比.可以看出,本文所使用的非线性反步控制算法在位姿角度偏差方面优势明显,在位置误差方面与其他两种算法相比相差不大.



(a) 一般条件



(b) 极限条件

图 4 不同条件输入下不同控制算法的位姿误差

图 4(b)为在极限条件下的位姿误差,与一般条件下相比,在位姿角度偏差方面优势明显,在位置误差方面与其他两种算法相比相差不大.

## 4.2 半实物仿真实验

在半实物仿真实验中,本文基于 SIGVerse 仿真平台构建了虚拟车体和道路场景.多视角渲染虚拟场景为人机共驾提供了更加真实的驾驶体验.实物仿真方向盘和踏板(Logitech® g27)被用于作为人机交互接口,其方向盘转动范围可达  $900^\circ$ ,满足真实车体的控制要求.仿真环境的场景参考美国密歇根大学的实体自动驾驶汽车测试中心 Mcity 构建<sup>[21]</sup>.

表1中列出了根据仿真车体参数重新优化的控制器参数. 在实验中,要求被试者通过方向盘和踏板控制车体从起始点驶向指定目标点,期望的四轮车体状态量 $v_r$ 和 $\varphi$ 通过方向盘和踏板获得. 通过本文提出的运动学转换方法,可以获得控制两轮差速移动车体的运行状态量 $v$ 和 $\omega$ ,从而获得在每一个仿真采样间隔下的期望状态和实际状态量 $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 和 $\Delta\theta$ . 车体行驶过程中的状态变化如图5所示.

表1 半实物实验参数

项目	符号	数值
$x_e$ 增益	$k_x$	0.902
$y_e$ 增益	$k_y$	0.0062
$\theta_e$ 增益	$k_\theta$	0.743
仿真步长/s	$\Delta t$	0.1
车轮半径/m	$r$	0.5
<sup>2</sup> 轮间距的一半/m	$l$	1.0
<sup>4</sup> 前后轮间距/m	$L$	2.0
<sup>4</sup> 坐标系偏距/m	$s$	1.0

注:上标2表示两轮车体参数,4表示四轮车体参数.

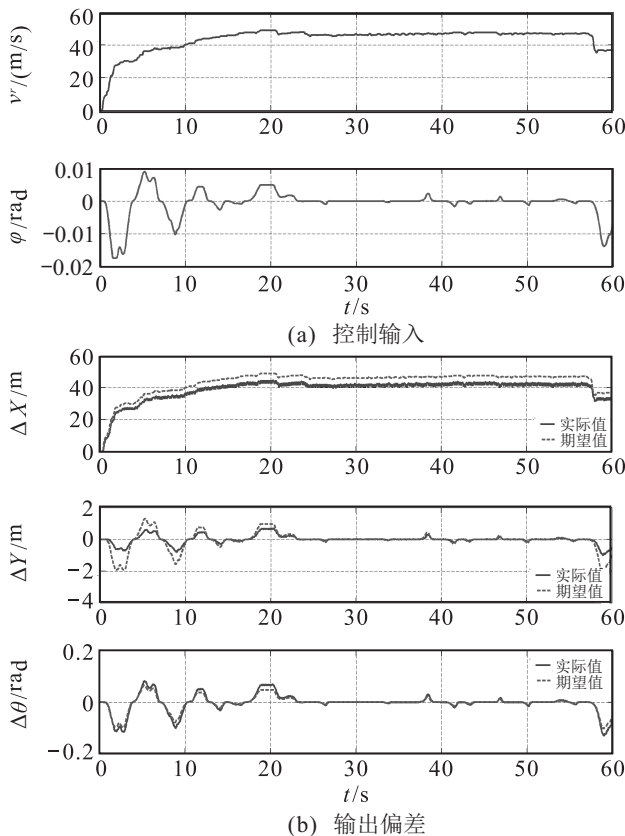


图5 半实物实验输入输出实例,其中 $\Delta$ 量为在车体坐标系下获得

图5中的纹波是由定位系统的误差所引起的,速度越快越严重. 实际状态与期望状态之间的其余误差可能由系统响应延迟和信号传输延迟所引起.

在重复实验中,进行30次实验来检验所采用的

方法的性能. 统计结果如表2所示. 实验结果表明,本文所提出的方法的性能稳定.  $X$ 方向上的累积误差较大是因为车体运动主要在 $X$ 方向上进行. 由于方向盘的角度范围只有 $-30^\circ \sim 30^\circ$ ,且不存在紧急转弯的状况,经过不断修正, $Y$ 方向和 $\theta$ 角度上的累积误差都很小.

表2 重复实验统计结果

项目	平均累积偏差	最大累积偏差
$\Delta X$ /m	$4.36 \pm 0.166$	$16.8 \pm 0.403$
$\Delta Y$ /m	$0.152 \pm 0.0127$	$1.48 \pm 0.0886$
$\Delta\theta/10^{-3}\text{rad}$	$3.87 \pm 0.503$	$4.91 \pm 0.504$

最大累积误差值主要出现在大的拐角处,从误差比例的角度来看, $\Delta\theta$ 的标准差最大,这可能是由于在参数最优化过程中同时考虑三者的权重所造成的,对此的具体分析将在今后的工作中进一步研究.

### 5 结论

人机共驾是非自动驾驶迈向全自动驾驶的过渡阶段技术,在半实物仿真测试中,为了增加人体驾驶体验,并解决部分仿真系统不具备四轮车运动模型和传统坐标系转换方法的局限,本文采用了一种基于非线性反步控制的轨迹跟踪方法. 通过将四轮车体的运动学模型转换到两轮差速移动车体模型下,实现在两轮差速移动模型下的半实物仿真. 两轮差速移动模型在机器人控制和人机交互相关领域已经得到广泛研究,其控制方法较为成熟,采用两轮差速移动模型对四轮模型进行模拟能够满足人机共驾对于驾驶沉浸感和车体控制的要求,在考虑系统的扩展功能方面也具有重要意义.

本文在给出了控制器模型的同时对其稳定性也进行了分析,数值仿真实验结果对比验证了所采用方法的可行性,针对车体行驶的一般条件和极限条件都进行了测试. 在半实物实验中,借鉴密歇根大学实体交通场景对于道路的设计模式,通过真实人体被试者参与到人机交互过程中. 在预定路径的多次重复实验条件下,验证了所采用方法的有效性,模型间转换误差能够满足人机共驾的需要.

### 参考文献(References)

[1] 李克强,戴一凡,李升波,等. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 1-14.  
(Li K Q, Dai Y F, Li S B, et al. State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8(1):

- 1-14.)
- [2] 严利鑫, 吴超仲, 贺宜, 等. 人机共驾智能车驾驶模式决策属性析取研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(1): 120-127.  
(Yan L X, Wu C Z, He Y, et al. Research on impact factors extraction for driving mode of intelligent vehicle[J]. China Journal of Highway Transport, 2018, 31(1): 120-127.)
- [3] Maroto J, Delso E, Félez J, et al. Real-time traffic simulation with a microscopic model[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(4): 513-526.
- [4] Li L, Wen D, Zheng N N, et al. Cognitive cars: A new frontier for ADAS Research[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(1): 395-407.
- [5] Wang J, Wang Q, Song C, et al. Coordinated control of differential drive assisted steering system with vehicle stability enhancement system[C]. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Baden-Baden: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2011: 1148-1155.
- [6] Li Y, He J, Jiang Y, et al. Semi-physical simulation of AUV homing and docking processes[J]. Robot, 2017, 39(1): 119-128.
- [7] Xiao S, Zhang L. Simulating driving feel for virtual driving simulator based on semi-physical simulation[C]. The 34th Chinese Control Conference (CCC). Hangzhou: IEEE Computer Society, 2015: 8882-8887.
- [8] Hoesch A, Poeschl S. The relationship between visual attention and simulator sickness: A driving simulation study[C]. The 25th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces. Reutlingen: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018: 575-576.
- [9] Wang X, Chen M, Zhu M, et al. Development of a kinematic-based forward collision warning algorithm using an advanced driving simulator[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(9): 2583-2591.
- [10] Chretien B, Nouvelière L, Oufroukh N A, et al. A vehicle simulator for an efficient electronic and electrical architecture design[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(4): 1967-1982.
- [11] Kemeny A. From driving simulation to virtual reality[C]. Proceedings of the 2014 Virtual Reality International Conference on Association for Computing Machinery. Laval: Association for Computing Machinery, 2014: 1-6.
- [12] Goli S A, Far B H, Fapojuwo A O. An accurate multi-sensor multi-target localization method for cooperating vehicles[J]. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2016, 446: 197-217.
- [13] Guo H, Cao Z, Zhang J, et al. Routing multiple cars in large scale networks: Minimizing road network breakdown probability[C]. The 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Qingdao: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014: 2180-2187.
- [14] Tideman M, Van N M. A simulation suite for developing connected vehicle systems[C]. 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Gold Coast: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2013: 713-718.
- [15] Pell A, Meingast A, Schauer O. Comparison study of software tools for online traffic simulation supporting real-time traffic management of road networks[C]. World Congress on Intelligent Transport Systems. Tokyo: Intelligent Transportation Society of America, 2013: 1-6.
- [16] Sklar E. Software review: NetLogo, a multi-agent simulation environment[J]. Journal of Artificial Life, 2007, 13(3): 303-311.
- [17] Michel O. Cyberbotics Ltd. WebotsTM: Professional mobile robot simulation[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2004, 1(1): 39-42.
- [18] Mohd Basri M A, Husain A R, Danapalasingam K A. Backstepping controller with intelligent parameters selection for stabilization of quadrotor helicopter[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2014, 7(2): 66-74.
- [19] Inamura T, Shibata T, Sena H, et al. Simulator platform that enables social interaction simulation — SIGVerse: SocioIntelliGenesis simulator[C]. 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration. Sendai: IEEE Computer Society, 2010: 212-217.
- [20] Berbtsen K, Palacios R C, Herranz E. Virtual reality and its uses — A systematic literature review[C]. Proceedings of the 4th International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality. Salamanca: Association for Computing Machinery, 2016: 435-439.
- [21] University of Michigan Office of Research. Mobility transformation center[EB/OL]. (2017-04-12)[2018 11-08]. <https://mcity.umich.edu/>.

## 作者简介

李文宇(1991—), 男, 博士, 从事人机共驾的研究, E-mail: liwenyu09@mail.nankai.edu.cn;

崔冀宁(1984—), 男, 工程师, 硕士, 从事车体动力学建模、仿真等研究, E-mail: bedroom\_s@163.com;

段峰(1978—), 男, 教授, 博士, 从事机器人技术、机电假手等研究, E-mail: duanf@nankai.edu.cn.

(责任编辑: 孙艺红)