

汽车驾驶模拟器在环动力学模型解算与仿真^{*}

曹萌萌

(开封大学 信息工程学院 开封 475001)

摘要: 为了使汽车驾驶模拟器得到更加准确的运动状态参数,首先建立了车辆的7自由度在环动力学模型和计算模型,得到以轮胎滚动角速度和驱动轮转向角为输入,且以横纵向和横摆角度为输出的二阶非线性常微分方程组,然后对二阶非线性常微分方程进行降阶处理,最后通过设定固定步长,并依次解算出车辆的运动状态参数。通过仿真实验表明,利用提出的解算方法得到的结果具有较高的精度,位移最大误差仅为0.003 7 m,速度最大误差仅为0.02 m/s,横摆角速度和横摆角度的最大误差分别仅为0.005 7 rad/s和0.004 7 rad,运算耗时较扩展卡尔曼滤波估计方法相比降低了43.2%,能够大幅提升模拟驾驶的逼真度。

关键词: 汽车驾驶模拟器;在环动力学模型;解算;降阶处理;固定步长

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Solution and simulation of loop dynamics model of vehicle driving simulator

Cao Mengmeng

(School of Information Engineering, Kaifeng University, Kaifeng 475001, China)

Abstract: In order to get more accurate motion state parameters of vehicle driving simulator, the 7-DOF loop dynamic model and calculation model of vehicle are established firstly, and the second-order nonlinear ordinary differential equations with tire rolling angular velocity and steering angle of driving wheel as inputs and transverse longitudinal and yaw angle as outputs are obtained. Then, the second-order nonlinear ordinary differential equations are reduced. Finally, the fixed step length is set, and the parameters of vehicle motion state are calculated in turn. The simulation results show that the proposed method has higher accuracy, the maximum displacement error is only 0.003 7 m, the maximum speed error is only 0.02 m/s, the maximum yaw rate and yaw angle error are only 0.005 7 rad/s and 0.004 7 rad respectively, and the computation time is reduced by 43.2% compared with the extended Kalman filter, which can greatly improve the fidelity of simulation driving.

Keywords: automobile driving simulator; loop dynamic model; solution; reduced order processing; fixed step size

0 引言

汽车驾驶模拟器是集人、车、路于一体的闭环系统,能够模拟出接近真实的驾驶场景,常被用在汽车开发设计、驾校学员训练或者游戏中^[1-3]。车辆在环动力学模型是人-车-路闭环模型中的重要组成部分,通过解算可以得到车辆的运动状态参数,但车辆的动力学模型具有高阶非线性的特点,如何精确实时的解算出车辆动力学模型对在环系统的建立至关重要^[4-5]。目前,车辆在环动力学模型的解算方法主要采用专业车辆仿真软件提供的解算器,如 Carsim、Matlab 和 Adams,它们是汽车工业建模和计算的标准工具,仿真软件提供了车辆动力学解算模块的接口,给模型输

入信号,然后利用解算器来计算出车辆运动参数,并用软件处理模块输出结果,但是这种方法计算过程不完全可见,调试困难^[6-7]。文献[8]通过建立多模型的车辆行驶状态方程,并采用马尔科夫链实现切换,再利用无迹卡尔曼滤波对运动状态进行估计,虽然能够较好地跟踪车辆运动状态,但需要在路侧安装激光雷达来实现,成本较高,且不易实现;文献[9]建立了车辆三自由度动力学模型,通过设计扩展卡尔曼滤波器来估计车辆的运动状态参数,该方法采用较少自由度模型作为车辆闭环系统,得到的简化车辆动力学模型不能准确地反映车辆运动状态,导致解算精度较低。为此,本文提出建立了车辆7自由度动力学模型,并给出二阶非线性常微分方程组,并以轮胎的横纵向和横摆角度作为

收稿日期:2021-03-15

^{*} 基金项目:国家自然科学基金项目(61702185)、河南省高等学校重点科研项目计划(19B520014)资助

方程组的输入,来求解车辆在环动力学模型的实时运动状态参数,并在 MATLAB 中进行了仿真对比实验,验证了得到的结果具有较高的精度和较少的运算耗时。

1 建立车辆动力学模型

汽车驾驶模拟器主要由驾驶员、操作装置、控制单元、视觉感知仿真单元和多自由度平台组成^[10],汽车驾驶模拟器构成如图 1 所示。

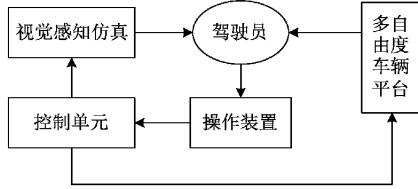


图 1 汽车驾驶模拟器构成

驾驶员通过视觉感知仿真单元的屏幕获取路况信息,然后对车辆进行加减速和转弯等操作,控制单元根据驾驶员的操作输入解算得到车辆的运动状态参数,并通过多自由度平台反馈给驾驶员。随后视觉感知仿真单元再根据车辆的位移和状态变化情况对屏幕进行实时更新并展示给驾驶员,从而形成逼真的驾驶感受。其中,车辆在环动力学模型是反映多自由度平台的关键,为了得到车辆更加精确的运动状态参数,并提高汽车驾驶模拟器更加逼真的效果,本文建立了 7 自由度的车辆动力学模型。

1.1 车辆 7 自由度动力学模型

本文建立的车辆 7 自由度动力学模型包括纵向、横向、横摆运动和 4 个车轮绕轴方向的转动。在建模时忽略悬架的垂直运动,并将车辆整体质量作为研究对象;同时,不考虑俯仰和垂向运动、轮胎回正力矩和车辆侧倾的影响;考虑滚动阻力、风阻、车辆横纵向运动以及绕车辆惯性轴的转动;简化转向系统,仅用前轮转向角和轮胎滚动角速度作为输入,且认为左右两侧车轮转向对称^[11-12]。车辆 7 自由度动力学模型如图 2 所示。

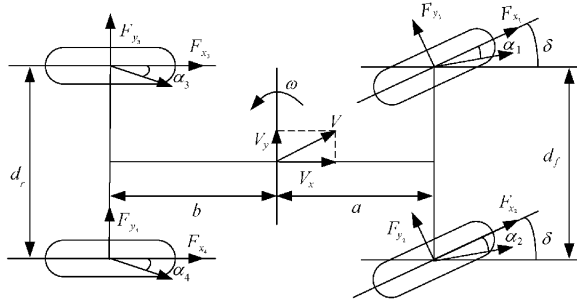


图 2 车辆动力学模型

图 2 中 a 和 b 分别为车辆重心到前后轴的距离; d_f 和 d_r 分别为车辆前后轮距; δ 代表驱动轮转向角, ω 代表车辆的横摆角速度, V 代表车辆速度; V_x 和 V_y 分别为在车体坐标系中的纵向速度和侧向速度; F_{x1} 、 F_{x2} 、 F_{x3} 和 F_{x4} 分别

为对应各车轮的纵向力; F_{y1} 、 F_{y2} 、 F_{y3} 和 F_{y4} 分别为对应各车轮的侧向力; α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 分别为对应各车轮的侧偏角。

由力和力矩平衡可得如下动力学方程:

$$m \cdot (\dot{V}_x + V_y \cdot \omega) = (F_{x1} + F_{x2}) \cdot \cos\delta + F_{x3} + F_{x4} - (F_{y1} + F_{y2}) \cdot \sin\delta - F_f - F_w \cdot \cos\beta \quad (1)$$

$$m \cdot (\dot{V}_y + V_x \cdot \omega) = (F_{x1} + F_{x2}) \cdot \sin\delta + (F_{y1} + F_{y2}) \cdot \cos\delta + F_{y3} + F_{y4} - F_w \cdot \sin\beta \quad (2)$$

$$I_x \cdot \dot{\omega} = a \cdot [(F_{y1} + F_{y2}) \cdot \cos\delta + (F_{x1} + F_{x2}) \cdot \sin\delta] - b \cdot (F_{y3} + F_{y4}) + \frac{d_f}{2} \cdot [(F_{x2} - F_{x1}) \cdot \cos\delta + (F_{y2} - F_{y1}) \cdot \sin\delta] + \frac{d_r}{2} \cdot (F_{x4} - F_{x3}) \quad (3)$$

式中: m 代表整车质量, I_x 代表车辆的转动惯量, β 代表横摆角度, F_f 代表滚动阻力, F_w 代表空气阻力, F_f 和 F_w 可以分别由下面的公式求出^[13-14]:

$$F_f = m \cdot g \cdot f_0 (1 + V_x^2 / 19\,440) \quad (4)$$

$$F_w = A \cdot C_D \cdot \rho \cdot V^2 / 2 \quad (5)$$

式中: f_0 代表轮胎滚动阻力系数, A 代表车辆的迎风面积, C_D 代表空阻系数, ρ 代表空气密度, g 代表重力加速度。

1.2 车辆动力学计算模型

本文采用 Dugoff 轮胎模型,当侧偏角 α_i 变化较小时,车轮纵向力 F_x 和侧向力 F_y 可简化如下:

$$F_x = K_s \cdot S_i = K_s \cdot \frac{V - r_0 \omega_x}{V} \quad (6)$$

$$F_y = K_a \cdot \alpha_i \quad (7)$$

式中: K_s 代表轮胎的纵向滑移刚度系数, S_i 代表对应的滑移率, K_a 代表轮胎的横向侧偏刚度系数, r_0 代表轮胎半径, ω_x 代表轮胎滚动加速度^[15-16]。

由图 2 中的几何关系可以得到:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha_2 = \beta + \frac{a\omega}{u} - \delta \\ \alpha_3 = \alpha_4 = \beta - \frac{b\omega}{u} \end{cases} \quad (8)$$

对式(1)~(8)整理得到:

$$\begin{aligned} m(\ddot{X} - \dot{Y}\dot{\beta}) &= 2K_s \frac{\sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2} - r_0 \omega_x (1 + \cos\delta)}{\sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2}} - \\ & (k_1 + k_2)(\beta + \frac{a\dot{\beta}}{\dot{X}} - \delta) \sin\delta - mgf_0 (1 + \dot{X}^2 / 19\,440) - \\ & A \cdot C_D \cdot \rho \cdot (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) \cos\beta / 2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} m(\ddot{Y} + \dot{X}\dot{\beta}) &= 2K_s \frac{\sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2} - r_0 \omega_x \sin\delta}{\sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2}} + \\ & (k_1 + k_2)(\beta + \frac{a\dot{\beta}}{\dot{X}} - \delta) \cos\delta + (k_3 + k_4)(\beta - \frac{b\dot{\beta}}{\dot{X}}) - \\ & A \cdot C_D \cdot \rho \cdot (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) \sin\beta / 2 \end{aligned} \quad (10)$$

$$I_z \cdot \ddot{\beta} = a[(k_1 + k_2)(\beta + \frac{a\dot{\beta}}{\dot{X}} - \delta)\cos\delta + 2K_s \frac{\sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2} - r_0\omega_x}{\sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2}}\sin\delta] - b(k_3 + k_4)(\beta - \frac{b\dot{\beta}}{\dot{X}}) + \frac{d_f}{2}(k_2 - k_1)(\beta + \frac{a\dot{\beta}}{\dot{X}} - \delta)\sin\delta \quad (11)$$

式(9)~(11)是以轮胎滚动角速度 ω_x 和驱动轮转向角 δ 为输入,纵向位移 X 、横向位移 Y 和横摆角度 β 为输出的二阶非线性常微分方程组,可以清晰地描述出车辆纵向、横向和横摆的运动状态。

2 动力学模型的解算方法

在汽车驾驶模拟器中,轮胎滚动角速度 ω_x 和驱动轮转向角 δ 是通过驾驶员的操作来完成进行输入的,为了获取车辆的运动状态参数,需要对式(9)~(11)进行解算,解算过程如图3所示。

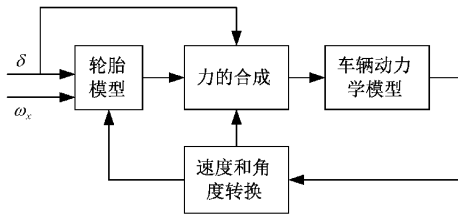


图3 车辆动力学模型解算过程

由于式(9)~(11)为二阶非线性常微分方程组,对于方程组中每一个方程首先进行降阶处理,然后变化得到一阶非线性常微分方程,最后再设定步长,依次解算每一个方程。

令 $X = x_1, \dot{X} = x_2, Y = x_3, \dot{Y} = x_4, \beta = x_5$ 和 $\dot{\beta} = x_6$ 则式(9)~(11)可分别写成:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ m(\dot{x}_2 - x_4x_6) = 2K_s \frac{\sqrt{x_2^2 + x_4^2} - r_0\omega_x}{\sqrt{x_2^2 + x_4^2}}(1 + \cos\delta) - (k_1 + k_2)\left(x_5 + \frac{ax_6}{x_2} - \delta\right)\sin\delta - mgf_0(1 + x_{22}/19440) - A \cdot C_D \cdot \rho \cdot (x_2^2 + x_4^2)\cos x_5/2 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = x_4 \\ m(\dot{x}_4 + x_2x_6) = 2K_s \frac{\sqrt{x_2^2 + x_4^2} - r_0\omega_x}{\sqrt{x_2^2 + x_4^2}}\sin\delta + (k_1 + k_2)\left(x_5 + \frac{ax_6}{x_2} - \delta\right)\cos\delta + (k_3 + k_4)\left(x_5 - \frac{bx_6}{x_2}\right) - A \cdot C_D \cdot \rho \cdot (x_2^2 + x_4^2)\sin x_5/2 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_5 = x_6 \\ I_z \cdot \dot{x}_6 = a[(k_1 + k_2)\left(x_5 + \frac{ax_6}{x_2} - \delta\right)\cos\delta + 2K_s \frac{\sqrt{x_2^2 + x_4^2} - r_0\omega_x}{\sqrt{x_2^2 + x_4^2}}\sin\delta] - b(k_3 + k_4)\left(x_5 - \frac{bx_6}{x_2}\right) + \frac{d_f}{2}(k_2 - k_1)\left(x_5 + \frac{ax_6}{x_2} - \delta\right)\sin\delta \end{cases} \quad (14)$$

通过变换得到的方程组(12)~(14)是形如 $\dot{x}_i = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ 的一阶微分方程组。其中, $i=0, 1, 2, \dots, 6$,给定各参数在 $t=0$ 的 x_{i_0} 值,令:

$$\begin{cases} s_1 = f(x_i, M), M = \{x_j/j \neq i, j \in [1, 6]\} \\ s_2 = f\left(x_i + \frac{t}{2}, N\right), N = \{x_j + \frac{t}{2}k_1/j \neq i, j \in [1, 6]\} \\ s_3 = f\left(x_i + \frac{t}{2}, S\right), S = \{x_j + \frac{t}{2}k_2/j \neq i, j \in [1, 6]\} \\ s_4 = f(x_i + t, P), P = \{x_j + tk_3/j \neq i, j \in [1, 6]\} \\ x_{i+1} = x_i + \frac{t}{6}(s_1 + 2s_2 + 2s_3 + s_4) \end{cases} \quad (15)$$

式中: t 为选定的计算步长。利用求出的 $i+1$ 步值作为 $i+2$ 步的初值,往后依次进行代入计算,最后得到方程组的解,即车辆的运动状态参数。

3 实验结果与分析

为了验证本文建立的在环动力学模型和解算方法的准确性,在车辆模型的基础上,通过给定前轮转向角和车轮滚动角速度的输入参数,利用本文的解算方法求解,并与文献[9]中的扩展卡尔曼滤波估计方法进行对比。实验条件:处理器为AMD 7502P 2.5 GHz,内存8 G,固态硬盘4 320 G,在操作系统Windows10下运行MATLAB进行仿真。

3.1 实验参数设置和解算结果

假设车辆在理想的水平路面上进行变速度行驶,并用前轮转向角和车轮滚动角速度作为输入进行实验。设置车辆的初始状态为: $V_x=0.08$ m/s, $X=0$ m, $V_y=0.23$ m/s, $Y=0$ m, $\beta=0.262$ rad, $\omega=0.01$ rad/s,输入前轮转向角和车轮滚动角阶跃信号,令 $\omega_x=18$ rad/s, $\delta=0.015$ rad,取时间步长 $t=0.05$ s,采用本文方法解算出的车辆运动状态参数如表1所示。

从表1的数据可以看出,在固定步长 $t=0.05$ s的情况下,利用本文建立的车辆7自由度动力学模型和解算方法可以得到车辆的横纵向位移和速度以及横摆角度和角速度。

3.2 仿真对比实验

为了验证本文提出方法解算得到结果的准确性和优越性,采用文献[9]中扩展卡尔曼滤波估计方法和本文提出的方法对车辆运动状态参数进行求解,并从解算精度和运算

表 1 解算出的车辆运动状态参数

时间/s	纵向位移/m	纵向速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	横向位移/m	横向速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	横摆角度/rad	横摆角速度/($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
0	0	0.850 0	0	0.230 0	0.262 0	0.001 0
0.05	0.042 5	1.123 4	0.012 6	0.273 4	0.262 6	0.001 3
0.10	0.098 7	1.167 1	0.027 3	0.317 1	0.263 3	0.001 7
0.15	0.157 0	1.211 1	0.044 3	0.361 1	0.264 3	0.002 3
0.20	0.217 6	1.255 6	0.063 5	0.405 6	0.265 7	0.003 4
0.25	0.280 4	1.301 0	0.084 9	0.451 0	0.267 7	0.005 0
0.30	0.345 4	1.347 7	0.108 6	0.497 7	0.270 8	0.007 5
0.35	0.412 8	1.396 4	0.134 7	0.546 4	0.275 5	0.011 5
0.40	0.482 6	1.448 1	0.163 3	0.598 1	0.282 7	0.017 9
0.45	0.555 0	1.504 8	0.194 6	0.654 8	0.294 0	0.027 9
0.50	0.630 3	1.569 1	0.228 9	0.719 1	0.311 5	0.043 6
0.55	0.708 7	1.645 5	0.266 7	0.795 5	0.339 1	0.068 4
0.60	0.791 0	1.740 9	0.308 7	0.890 9	0.382 3	0.107 4
0.65	0.878 0	1.866 1	0.356 3	1.016 1	0.450 2	0.169 0
0.70	0.971 3	2.038 5	0.411 1	1.188 5	0.557 2	0.266 0
0.75	1.073 3	2.284 9	0.476 3	1.434 9	0.725 5	0.418 8
0.80	1.187 5	2.648 0	0.556 6	1.798 0	0.990 5	0.659 7

耗时两个维度进行评价。

1) 解算精度对比

在 MATLAB 中建立车辆动力学模型, 然后给定相同的初始状态参数、车轮滚动速度信号和前轮转向角信号,

得到车辆纵向位移和速度、横向位移和速度、横摆角度和速度的运动状态变化仿真结果如图 4~6 所示。同时, 为了区分两种算法的解算值偏离真实值的情况, 也给出了对应的误差曲线。

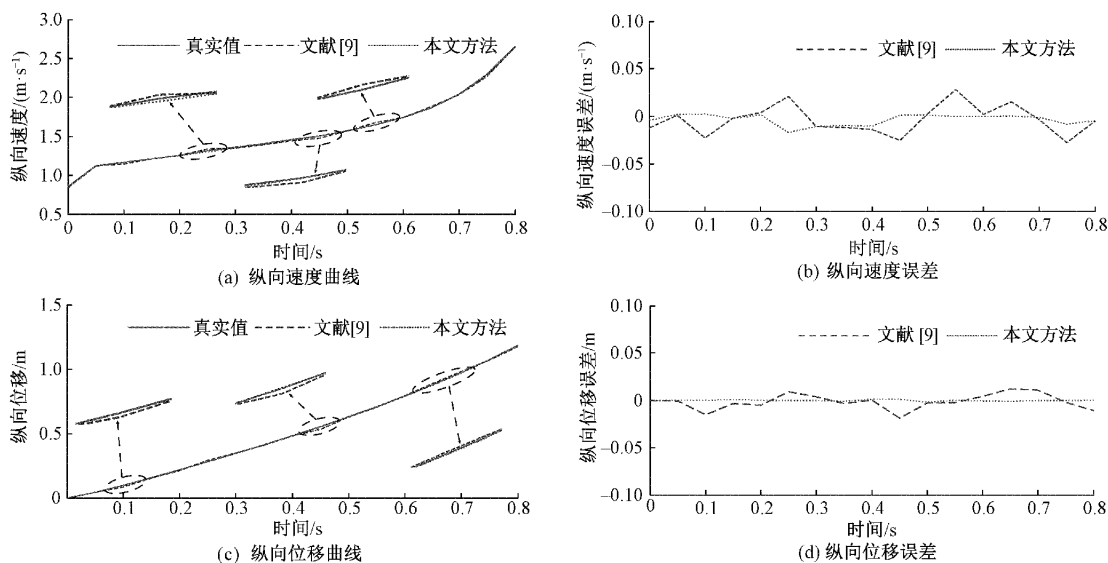


图 4 纵向运动状态变化曲线

从图 4 的仿真结果看出, 采用文献[9]中的扩展卡尔曼滤波方法估计出的车辆纵向速度和纵向位移较真实值均有较大的偏差, 平均误差分别达到了 $0.012\ 3\ \text{m/s}$ 和 $0.006\ 1\ \text{m}$, 最大误差分别达到了 $0.029\ 3\ \text{m/s}$ 和 $0.019\ \text{m}$; 而采用本文的解算方法得到的车辆纵向速度和纵向位移较真实值更为接近, 平均误差分别仅为 $0.004\ 5\ \text{m/s}$ 和

$0.000\ 6\ \text{m}$, 最大误差分别仅为 $0.017\ \text{m/s}$ 和 $0.002\ 1\ \text{m}$ 。

从图 5 的仿真结果看出, 采用文献[9]中的扩展卡尔曼滤波方法估计出的车辆横向速度和横向位移较真实值的偏差也较大, 平均误差分别达到了 $0.009\ 9\ \text{m/s}$ 和 $0.003\ 5\ \text{m}$, 最大误差分别达到了 $0.033\ \text{m/s}$ 和 $0.011\ 6\ \text{m}$; 而采用本文的解算方法得到的车辆横向速度和横向位移较真实值

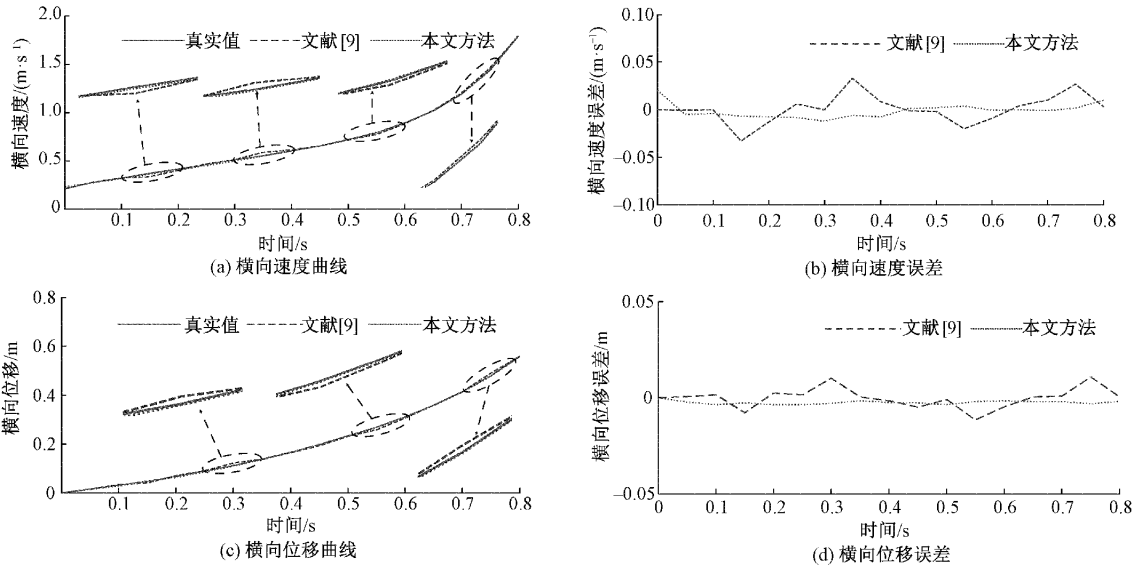


图5 横向运动状态变化曲线

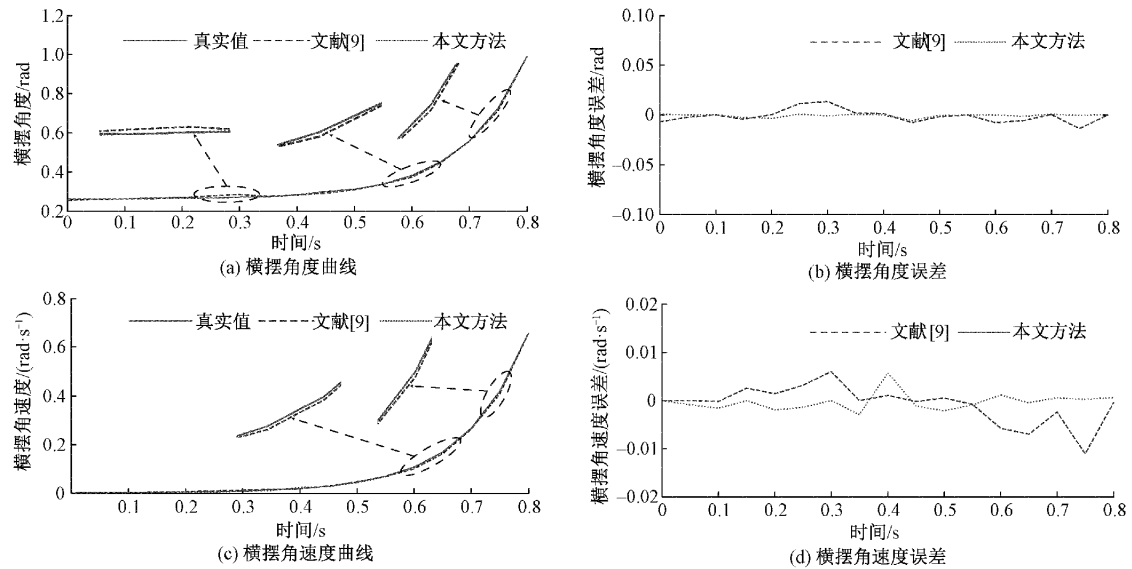


图6 横摆角运动状态变化曲线

更为接近,平均误差分别仅为 0.0057 m/s 和 0.0025 m ,最大误差分别仅为 0.02 m/s 和 0.0037 m 。

从图6的仿真结果看出,采用文献[9]中的扩展卡尔曼滤波方法估计出的车辆横摆角速度和横摆角度较真实值的偏差也较大,平均误差分别达到了 0.0025 rad/s 和 0.0047 rad ,最大误差分别达到了 0.0111 rad/s 和 0.0138 rad ;而采用本文的解算方法得到的车辆横摆角速度和横摆角度较真实值更为接近,平均误差分别仅为 0.0013 rad/s 和 0.0011 rad ,最大误差分别仅为 0.0057 rad/s 和 0.0047 rad 。

2) 解算耗时对比

运行耗时也是评价解算效果的重要指标,在高效的运行场景下需要更快的运算效率,以便在汽车驾驶模拟器系统中做出更快的反应,两种方法在每个解算步长下消耗的

运算时长如表2所示。

从表2中的数据可看出,虽然文献[9]中的扩展卡尔曼滤波估计仅建立了3自由度模型,但由于增加了卡尔曼滤波器的运算过程,从而消耗了更多的计算资源,平均每次解算耗时达到了 0.0215 ms ,而采用本文方法具有更高的解算效率,平均每次解算耗时仅为 0.0144 ms ,降低了 43.2% 。

通过上述实验结果综合分析可知,采用本文方法解算得到车辆的纵向速度、纵向位移、横向速度、横向位移、横摆角速度、横摆角度的值更接近真实值,明显优于文献[9]的方法,具有较高的解算精度和使用较少的运算耗时,从而能够给汽车模拟驾驶器提供更加逼真的效果。

表2 解算耗时对比

ms

时间/s	文献[9]	本文方法
0.05	0.021	0.011
0.10	0.024	0.012
0.15	0.023	0.013
0.20	0.020	0.010
0.25	0.021	0.011
0.30	0.023	0.012
0.35	0.019	0.009
0.40	0.021	0.011
0.45	0.024	0.012
0.50	0.021	0.013
0.55	0.019	0.009
0.60	0.020	0.011
0.65	0.019	0.012
0.70	0.022	0.013
0.75	0.024	0.012
0.80	0.023	0.011

4 结 论

为了使汽车驾驶模拟器具有更加逼真的驾驶效果,本文建立车辆7自由度动力学模型和计算模型,通过给定前轮转向角和车轮滚动角速度输入参数,即可解算出车辆的运动状态参数。最后通过仿真对比实验验证了建立模型和解算方法的准确性,得到的纵向速度和纵向位移最大误差分别仅为0.017 m/s和0.002 1 m,横向速度和横向位移的最大误差分别仅为0.02 m/s和0.003 7 m,横摆角速度和横摆角度的最大误差分别仅为0.005 7 rad/s和0.004 7 rad,平均每次解算耗时仅为0.014 4 ms,较扩展卡尔曼滤波估计方法相比降低了43.2%,虽然采用本文方法得到的结果与实际结果还有一定的误差,可以通过缩小解算步长来进行降低,但同时会耗费更多的计算资源,可针对具体的应用场景选择合适的解算步长,以便达到各项指标的平衡。

参考文献

- [1] 王晓雷,闫双建,曹玲芝,等.基于多传感器零速修正的行人导航系统研究[J].电子测量与仪器学报,2019,33(4):58-64.
- [2] 孙贵斌,卓文得,李英,等.基于MIL的整车控制器模型开发及功能验证[J].电子机械工程,2019,35(6):57-60.
- [3] 安玉,焦朋朋,白紫秀.考虑多因素的驾驶行为安全

评价与风险等级预测[J].系统仿真学报,2021,33(1):118-126.

- [4] KHOSHNOUD F, QUADRELLI M B, ESAT I I, et al. Quantum cooperative robotics and autonomy [J]. Instrumentation, 2019, 6(3):93-111.
- [5] 蒋龙威,赵广兴,赵明波,等.一种飞行模拟器虚拟座舱系统的设计与实现方法[J].电子测量技术,2017,40(10):92-98.
- [6] 赵蕾蕾,李翀,季林红,等.基于虚拟现实的自动驾驶模式中晕动受试者的脑电特征[J].清华大学学报(自然科学版),2020,60(12):993-998.
- [7] 晏江华,刘全周,高帅,等.汽车电动尾门硬件在环测试技术研究[J].国外电子测量技术,2020,39(6):81-85.
- [8] 崔雅博,王晓婷.基于IMM-UKF的协同式车辆运动状态跟踪算法[J].沈阳工业大学学报,2020,42(3):318-323.
- [9] 赵强,范思远,唐政林.基于迭代扩展卡尔曼滤波的车辆运动状态估计[J].森林工程,2021,37(1):66-72,79.
- [10] 魏国强,朱元武,朱锐,等.一种轮式装甲车模拟器转向机构力感模型[J].火力与指挥控制,2021,46(1):129-135,141.
- [11] 杨亚联,王磊,杨果,等.人在环路模拟驾驶仿真实验系统研发[J].重庆大学学报(自然科学版),2015,38(4):38-44.
- [12] 宋晓妍,王群淞,刘晶郁,等.汽车驾驶模拟器控制系统的设计与实现[J].计算机测量与控制,2020,28(2):82-87.
- [13] 魏法,李洁,高海阔.一种基于虚拟现实技术的飞机驾驶培训系统[J].现代制造技术与装备,2020,56(11):123-124.
- [14] 袁瑞晨,孙涛.基于虚拟驾驶的仿真平台设计[J].工业控制计算机,2019,32(6):57-57,60.
- [15] 石岗,李希胜,白艳茹,等.基于车辆状态的航向估计量测方程研究[J].仪器仪表学报,2018,39(10):176-183.
- [16] 柴瑞强,孙涛,田敏杰.智能车辆轨迹跟踪控制器设计[J].软件导刊,2020,19(4):169-173.

作者简介

曹萌萌,讲师,硕士,主要研究方向为计算机应用与人工智能。

E-mail:caomm81@126.com