



A Preview and Neuromuscular Driver Model Design with Torque Feedback for Simulating Intelligent Vehicles Equipped with Steer-by-Wire System

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Gholami A.¹ MSc,
Majidi M.^{*2} PhD,
Raeisdana S.³ PhD,
Tavoosi V.¹ MSc

How to cite this article

Gholami A, Majidi M, Raeisdana S, Tavoosi V. A Preview and Neuromuscular Driver Model Design with Torque Feedback for Simulating Intelligent Vehicles Equipped with Steer-by-Wire System. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(2):457-465.

ABSTRACT

The torque feedback of the vehicle's steering wheel or driver perception of the steering wheel is one of the aspects of steering quality that has been investigated extensively in recent decades. In this paper, the driver model for sensing torque feedback or haptic interaction between the vehicle equipped with a steer-by-wire system (SWB) and the driver has been designed. The driver model consists of a preview model and a neuromuscular model. The preview driver model calculates the desired angle of the steering wheel to follow the path, and the neuromuscular driver model that can perceive real-time torque feedback determines the real angle of the steering wheel according to muscular system transfer functions to follow its desired angle. Calculating of torques on the steering wheel requires estimation of the tire-road forces. Whereas directly calculating the tire-road forces is too difficult, particularly in the lateral vehicle dynamics, suitable estimator to estimate these forces designed. The simulation results using the Carsim and Simulink software indicate that the driver model performance improved 63 % when torque feedback is enabled. So the designed driver model with torque feedback has an important role in controlling and vehicle steering in conducting double lane-change maneuvers.

Keywords Neuromuscular Driver Model; Torque Feedback; Steer-by-Wire; Estimator; Haptic

¹Young Researchers & Elite Club, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

²Industrial & Mechanical Engineering Faculty, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

³Electrical, Biomedical & Mechatronics Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

*Correspondence

Address: Industrial & Mechanical Engineering Faculty, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran
Phone: +98 (28) 33665275
Fax: -
m_majidi@qiau.ac.ir

Article History

Received: May 15, 2018

Accepted: June 2, 2019

ePublished: February 01, 2020

CITATION LINKS

[1] Engineering haptic devices, A beginner's guide for engineers [2] Development of a driver lateral control model by integrating neuromuscular dynamics into the queuing network-based driver model [3] Model predictive control for vehicle stabilization at the limits of handling [4] A driver model for dynamic evaluation of the EPS assistant characteristics [5] Robust $\mathcal{H}_\infty$ filtering for vehicle sideslip angle estimation with sampled-data measurements [6] Development of estimation force feedback torque control algorithm for driver steering feel in vehicle steer by wire system: Hardware in the loop [7] Shared steering control between a driver and an automation: Stability in the presence of driver behavior uncertainty [8] Modification of vehicle handling characteristics via steer-by-wire [9] Detection of intoxicated drivers using online system identification of steering behavior [10] Designing steering feel for steer-by-wire vehicles using objective measures [11] Suspension geometry and computation [12] H-infinity filtering for a class of nonlinear discrete-time systems based on unscented transform [13] Steering feedback [14] Vehicle handling dynamics, Theory and application [15] A mathematical model of driver steering control including neuromuscular dynamics [16] Identification of intrinsic and reflex contributions to human ankle stiffness dynamics

طراحی مدل راننده پیش‌بین و عصبی-عضلانی با بازخورد گشتاور به‌منظور شبیه‌سازی خودروهای هوشمند مجهز به سیستم فرمان با سیم

امیر غلامی MSc

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

مجید مجیدی* PhD

دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

سمیه رئیس‌دانا PhD

دانشکده مهندسی برق، پزشکی و مکترونیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

وحید طاووسی MSc

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

چکیده

بازخورد گشتاور فرمان خودرو یا احساسی که راننده از فرمان دریافت می‌کند، یکی از جوانب کیفیت فرمان‌پذیری خودرو است که به‌صورت گسترده‌ای در دهه‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله به طراحی مدل راننده برای حس کردن بازخورد گشتاور یا تعامل هپتیک بین خودروی مجهز به فرمان با سیم و راننده پرداخته شده است. مدل راننده دارای دو قسمت مدل پیش‌بین و عصبی-عضلانی است. مدل راننده پیش‌بین با دریافت بازخورد فاصله جانبی خودرو از جاده، میزان زاویه غریبک فرمان مطلوب را برای تعقیب مسیر محاسبه می‌کند و مدل راننده عصبی-عضلانی که قابلیت دریافت بازخورد گشتاور در هر لحظه را دارد، زاویه غریبک فرمان واقعی خودرو را برای تعقیب مقدار مطلوب آن بر اساس توابع تبدیل سیستم عضلانی تعیین می‌نماید. محاسبه گشتاورهای وارد بر فرمان، نیازمند تخمین نیروهای وارد بر تایر از طرف جاده است. از آنجا که محاسبه نیروهای وارد بر تایر توسط جاده به‌خصوص در دینامیک جانبی خودرو به‌صورت مستقیم بسیار مشکل است، به طراحی تخمینگر مناسبی برای تخمین این نیروها پرداخته شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزارهای کارسیم و سیمولینک نشان می‌دهد که عملکرد مدل راننده با بازخورد گشتاور نسبت به مدل راننده بدون بازخورد گشتاور ۶۳٪ بهبود یافته است. بنابراین مدل راننده طراحی‌شده به‌همراه بازخورد گشتاور، نقش مهمی در کنترل و فرمان‌پذیری خودرو در انجام مانورهای تغییر لاین مجدد دارد.

کلیدواژه‌ها: مدل راننده عصبی-عضلانی، بازخورد گشتاور، فرمان با سیم، تخمینگر، هپتیک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۱۲

*نویسنده مسئول: m_majidi@qiau.ac.ir

۱- مقدمه

هپتیک (Haptic) توصیف‌کننده احساس لامسه به‌وسیله عضلات، مفاصل، تاندون‌ها، پوست و دانشی به‌دست‌آمده از عصب‌شناسی و سایکوفیزیک است [1]. کنترل مشترک بین انسان و خودرو یکی از موضوعات دانش هپتیک است که به فهم تعامل میان راننده و خودرو و رفتار راننده در شرایط متفاوت رانندگی کمک شایانی

می‌کند. راننده اطلاعات خود را از طریق سیستم‌های عصبی خود مانند سیستم بینایی و سیستم عصبی-عضلانی دریافت می‌نماید. مدل راننده می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد، ایمنی و کنترل خودرو هنگام رانندگی را به دلیل توسعه خودروهای خودگردان ایفا نماید. تکنولوژی سیستم‌های فرمان خودرو از قبیل، سیستم فرمان با سیم (Steer-By-Wire) که به‌عنوان سیستم فرمان فعال شناخته می‌شوند، در مقایسه با سیستم‌های فرمان معمولی از نوآوری و پیشرفت بیشتری برخوردارند. در سیستم فرمان با سیم، هیچ گونه ارتباط مکانیکی بین غریبک فرمان و چرخ‌ها وجود نداشته و هر گونه بازخورد نیرو در غریبک فرمان به‌وسیله سنسورها و عملگرها ایجاد می‌شود. از آنجایی که گشتاور روی غریبک فرمان که توسط راننده احساس می‌شود، اطلاعات مفیدی از جاده در اختیار او می‌گذارد، در خودروهای با سیستم فرمان با سیم به‌منظور تعامل میان راننده و فرمان خودرو باید این گشتاور محاسبه و به غریبک فرمان اعمال شود.

به‌منظور مطالعه نقش بازخورد گشتاور فرمان در کنترل و فرمان‌پذیری خودروهای با فرمان با سیم نیاز به ارایه یک مدل راننده با قابلیت دریافت بازخورد گشتاور فرمان است. در این خصوص بی و همکاران، مدل راننده‌ای را با جمع‌دینامیک سیستم‌های عصبی-عضلانی و مدل راننده بر اساس شبکه صف‌بندی (Queuing Network) توسعه دادند. آنها دینامیک سیستم‌های عصبی و عضلانی را با مدل راننده‌ای بر پایه ساختار شناختی یکپارچه کردند [2]. بیل و جردیس، مدل راننده‌ای بر مبنای سیستم عصبی و عضلانی با استفاده از کنترل مدل پیش‌بین ارایه کردند [3]. شن و همکاران تعامل دینامیکی بین راننده و سیستم فرمان برقی را مطرح کردند و همچنین مدل راننده پیش‌بینی که توانایی حس کردن بازخورد نیرو را دارد، به دلیل تعقیب جاده انتشار دادند [4].

ژانگ و همکاران فیلتر مقاوم را برای تخمین زاویه لغزش (Sideslip Angle) پیشنهاد دادند. آنها این فیلتر را با توجه به تغییرات جاده و با در نظر گرفتن ارتباط بین جاده و تایرها در شرایط اصطکاکی متفاوت گسترش دادند [5]. فهمی و همکاران، الگوریتمی را برای تخمین بازخورد نیرو در سیستم فرمان با سیم با کنترل بهینه خطی به‌کار گرفتند [6].

صالح و همکاران مدل راننده‌ای با استراتژی بینایی و تعامل بین راننده و خودرو برای حس کردن بازخورد گشتاور پیشنهاد کردند. آنها از روش شناسایی سیستم‌ها به‌صورت جعبه سیاه برای محاسبه پارامترهای مدل راننده استفاده کردند [7]. یاه و جردیس با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) و سیستم ناوبری ایستا (INS) به تخمین حالات سیستم برای بازخورد به فرمان با سیم پرداختند [8].

شیرازی و همکاران یک مدل راننده با بینایی برای رانندگی در جاده‌های با انحنا را برای کنترل خودرو در شرایط مختلف رانندگی پیشنهاد دادند. این مدل، از تعقیب بینایی راننده استفاده می‌کند که توسط آزمایش از انسان در حالت‌های مختلف رانندگی به‌دست

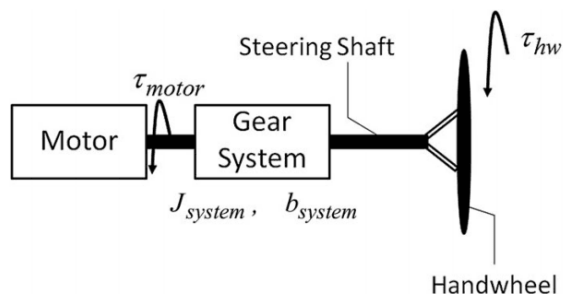
$$\tau_{F_x} = F_x \cos \sigma (R_{nom} \sin \gamma - y_p \cos \gamma) \quad (5)$$

$$\tau_{F_y} = -F_y \cos \gamma (R_{nom} \sin \sigma + x_p \cos \sigma) \quad (6)$$

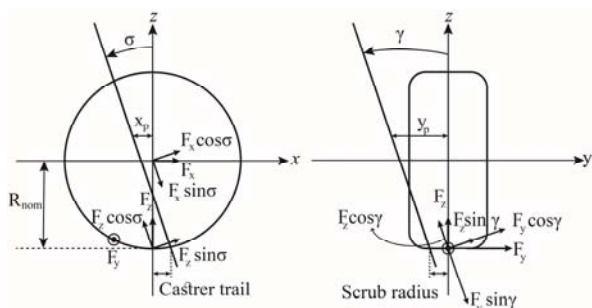
$$\tau_{F_z} = -F_z (y_p \sin \sigma \cos \gamma + x_p \cos \sigma \sin \gamma) \quad (7)$$

قابل ذکر است که مطابق شکل ۳، گشتاورهای تولیدشده از چرخ چپ و راست خودرو، متفاوت بوده و این تفاوت به دلیل آن است که چرخ سمت راست زاویه تمایل معکوس چرخ دیگر را دارد. به همین دلیل گشتاور حول محور فرمان ناشی از دو چرخ، فقط ناشی از نیروهای عرضی تایر τ_{F_y} است. این گشتاور باعث بازگشتن غربیلک فرمان در هنگام رهاکردن غربیلک در سر پیچ می‌شود. رابطه (۶) را با اضافه کردن گشتاور بازگرداننده (Self-Aligning Moment) تایر حول محور فرمان می‌توان به فرم رابطه (۸) در نظر گرفت.

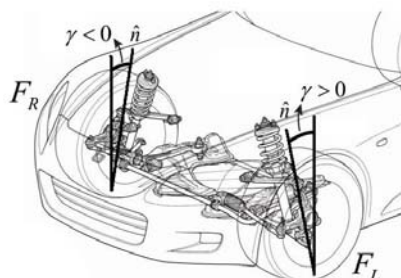
$$\tau_{F_y} = -F_y \cdot d \quad (8)$$



شکل (۱) سیستم فرمان با سیم با بازخورد گشتاور^[10]



شکل (۲) زوایای محور فرمان چرخ‌های جلو



شکل (۳) زوایای محور فرمان^[11]

در رابطه (۸)، d فاصله پنوماتیکی (Pneumatic Trail) و مکانیکی (Mechanical Trail) بین نقطه اثر نیروهای جانبی وارد بر تایر و محور فرمان است و به‌صورت رابطه (۹) نوشته می‌شود.

آمده است. مطالعات ایشان نشان داد که مدل پیشنهادی، نقش مهمی در یک رانندگی واقع‌گرایانه ایفا می‌نماید^[9].

در مقاله حاضر، به‌منظور مطالعه نقش بازخورد گشتاور در فرمان‌پذیری خودروهای با سیم، یک مدل راننده عصبی-عضلانی با قابلیت دریافت بازخورد گشتاور فرمان ارایه شده است. بدین منظور ابتدا معادلات حاکم بر سیستم فرمان به ارتباط بین گشتاور فرمان و نیروهای وارد بر تایر استخراج می‌شود. در ادامه برای تخمین نیروهای عرضی تایر در حضور اغتشاشات جاده، یک تخمینگر بهینه بر اساس فیلتر کالمن طراحی و سپس با وارد نمودن گشتاور تخمینی فرمان به مدل راننده عصبی-عضلانی، زاویه غربیلک فرمان محاسبه و به مدل کامل خودرو در نرم‌افزار کارسیم اعمال می‌شود. در انتها شبیه‌سازی مانور تغییر لاین مجدد به‌منظور بررسی عملکرد مدل راننده پیشنهادی شبیه‌سازی با مدل راننده با بازخورد گشتاور و بدون آن انجام شده است.

۲- تخمین گشتاور حول محور فرمان

بازخورد گشتاور به راننده به دلیل ایجاد تعامل مشترک بین انسان و ماشین و حذف مکانیکی در سیستم فرمان با سیم، باید به‌صورت مصنوعی ایجاد شود. این نکته حائز اهمیت است که احساس گشتاور توسط راننده در سیستم‌های فرمان با سیم باید مشابه سیستم‌های فرمان معمولی باشد. برای این منظور سیستم فرمان با سیم به یک موتور الکتریکی برای تولید گشتاورهای بازخوردی مجهز شده است. شماتیکی از سیستم بازخورد گشتاور فرمان در شکل ۱ آورده شده است. نیروهای طولی، عرضی و عمودی ایجادشده در محل تماس بین تایر و جاده باعث ایجاد گشتاور چرخشی حول محور فرمان می‌شود (شکل ۲). شکل ۲ نیروهای تولیدشده در تایر به‌واسطه جاده که سبب به‌وجود آمدن ممانی حول محور فرمان خودرو می‌شود را نمایش می‌دهد. σ و γ به‌ترتیب زاویه کستر (Caster) و زاویه تمایل محور فرمان (Kingpin Inclination) هستند. x_p و y_p به‌ترتیب فاصله طولی و عرضی محور فرمان تا مرکز چرخ و R_{nom} شعاع تایر تحت بار اسمی هستند. ممان ایجادشده حول محور فرمان را می‌توان با رابطه (۱) محاسبه نمود:

$$\tau_{kp} = (r_{F/wc} \times F) \hat{n} = \tau_{F_x} + \tau_{F_y} + \tau_{F_z} \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، $r_{F/wc}$ و $\hat{n}$ به‌ترتیب بازوی گشتاور فرمان و زاویه تمایل محور فرمان هستند که در روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند. F نیروهای وارد بر تایر از طرف جاده هستند و توسط رابطه (۴) به‌دست می‌آیند. τ_{F_x} ، τ_{F_y} ، τ_{F_z} به‌ترتیب ممان‌های ناشی از نیروهای طولی، عرضی و عمودی تایر هستند.

$$r_{F/wc} = -x_p \hat{i} + y_p \hat{j} - R_{nom} \hat{k} \quad (2)$$

$$\hat{n} = \sin \sigma \cos \gamma \hat{i} - \cos \sigma \sin \gamma \hat{j} - \cos \gamma \cos \sigma \hat{k} \quad (3)$$

$$F = F_x \hat{i} + F_y \hat{j} + F_z \hat{k} \quad (4)$$

با جایگذاری روابط (۲)، (۳) و (۴) در رابطه (۱)، گشتاورهای حول محور فرمان به‌دست خواهند آمد (رابطه ۵).

معادلات حاکم بر دینامیک مدل دو درجه آزادی خودرو با استفاده از قوانین نیوتون- اوپلر در روابط (۱۲) و (۱۳) آورده شده است.

$$m(\dot{v} + ru) = F_{yf} + F_{yr} \quad (12)$$

$$I_z \dot{r} = l_f F_{yf} + l_r F_{yr} \quad (13)$$

m جرم خودرو، v سرعت جانبی، u سرعت طولی خودرو و I_z ممان اینرسی چرخشی حول مرکز جرم آن هستند. F_{yf} و F_{yr} به ترتیب نیروی جانبی محور جلو و محور عقب هستند. r سرعت زاویه‌ای چرخش، l_f و l_r به ترتیب فاصله چرخ‌های جلو و عقب از مرکز جرم خودرو هستند. با فرض اینکه نیروهای جانبی تایلر، تابع خطی از زاویه لغزش هستند و مقدار زاویه لغزش بسیار کوچک است و با در نظر گرفتن تاخیر زمانی نیروی عرضی تایلر، معادلات فضای حالت برای طراحی تخمینگر نیروهای جانبی تایلر در حضور نویز سنسورها به فرم روابط (۱۴) و (۱۵) استخراج می‌شوند. جدول ۱، مقادیر پارامترهای خودروی مدل شده را نمایش می‌دهد.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v \\ r \\ F_{yf} \\ F_{yr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -u & 1/m & 1/m \\ 0 & 0 & l_f/I_z & -l_r/I_z \\ -C_{af}/\tau_y u & -l_f C_{af}/\tau_y u & -1/\tau_y & 0 \\ -C_{ar}/\tau_y u & -l_r C_{ar}/\tau_y u & 0 & -1/\tau_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ F_{yf} \\ F_{yr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_{af}/\tau_y \\ C_{ar}/\tau_y \end{bmatrix} \delta + \omega_k \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} a_y \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/m & 1/m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ F_{yf} \\ F_{yr} \end{bmatrix} + v_k \quad (15)$$

τ_y ثابت زمانی تاخیر در تولید نیروهای عرضی تایلر، ω_k نویز فرآیند و v_k نویز سنسور هستند. C_{af} و C_{ar} به ترتیب سختی جانبی تایلرهای جلو و عقب خودرو هستند.

جدول ۱) پارامترهای مشخصه خودرو

پارامتر	مقدار
l_f	۱/۶m
l_r	۱/۶m
m	۴۰۰۰kg
I_z	۱۰۰۰۰kg m ²
C_{af}	۴۰۰۰۰N/rad
C_{ar}	۴۰۰۰۰N/rad
x_p	۰
R_{nom}	۰/۴۲۵m
σ	۵/۲deg
γ	۷/۲deg
t_p	۰/۳m
N_g	۲۳
y_p	۰/۱m

۳- طراحی مدل راننده

مدل راننده برای هدایت خودرو نیاز به بازخوردهای متنوعی دارد. مدل راننده را می‌توان با دانشی از سیستم عصبی-عضلانی و سیستم

$$d = t_m + t_p = (R_{nom} \sin \sigma + x_p \cos \sigma) \cos \gamma + t_p \quad (9)$$

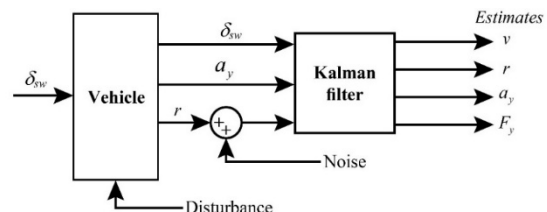
در رابطه (۹)، t_m فاصله پنوماتیکی و t_p فاصله مکانیکی تعریف می‌شوند.

برای به دست آوردن گشتاور وارد بر فرمان نیاز به تخمین نیروهای وارد بر تایلر از طرف جاده است. این موضوع به این دلیل است که محاسبه نیروهای وارد بر تایلر کاری بسیار مشکل است. از طرف دیگر، اندازه‌گیری نرخ چرخش (Yaw Rate) خودرو توسط سنسور دارای نویز است. به همین دلیل طراحی تخمینگری که در حضور نویز، توانایی تخمین حالات سیستم را داشته باشد از اهمیت فراوانی برخوردار است. در این مقاله از فیلتر کالمن برای تخمین نیروها استفاده گشته است.

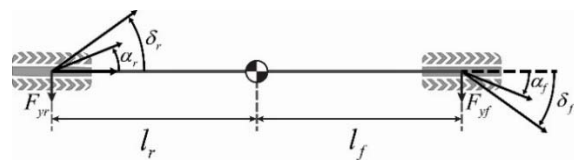
فیلتر کالمن شامل یک مرحله به روز شدن زمان و یک گام به روز شدن اندازه‌گیری است. در مرحله به روز رسانی زمان، دینامیک سیستم به روز می‌شود. این مرحله به دنبال گام به روز رسانی اندازه‌گیری است. رابطه (۱۰) مربوط به تخمینگر کالمن است. با به روز شدن گام اندازه‌گیری، اطلاعات جدیدی در مورد حالات سیستم به دست می‌آید. در حقیقت، فیلتر کالمن، فیلتری است که حداکثر مقدار ممکن اطلاعات را از اندازه‌گیری استخراج می‌کند [12].

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K[y - C\hat{x}] \quad (10)$$

A, B, C ماتریس‌های معادلات فضای حالت مدل دو درجه آزادی خودرو و K بهره فیلتر کالمن است. دیاگرام بلوکی فیلتر کالمن با در نظر گرفتن اغتشاشات محیط در شکل ۴ آورده شده است. برای طراحی تخمینگر، نیاز به مدل سازی دینامیکی خودرو است. از آنجا که مدل سازی کامل دینامیک خودرو برای طراحی تخمینگر بسیار پیچیده است، به همین دلیل از مدل دینامیکی چهار چرخ فرمان پذیر خطی خودرو با دو درجه آزادی استفاده شده است (شکل ۵).



شکل ۴) بلوک دیاگرام فیلتر کالمن

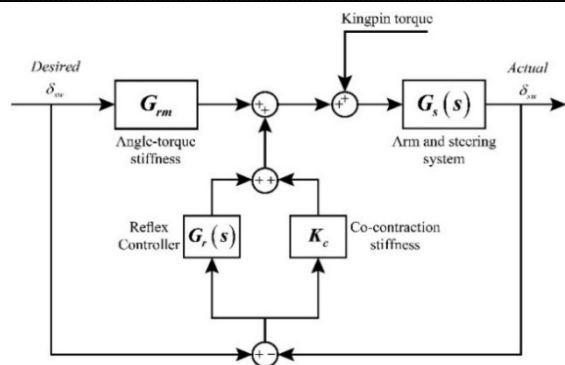


شکل ۵) مدل ۲ درجه آزادی خودرو

استراتژی فرمان گیری محور عقب δ_r به منظور کاهش شعاع چرخش و افزایش مانورپذیری خودرو به صورت برابر و مخالف با فرمان چرخ‌های جلو در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۱۱).

$$\delta_f = -\delta_r \quad (11)$$

۲-۳ مدل راننده عصبی-عضلانی



شکل ۹) بلوک دیاگرام مدل راننده عصبی-عضلانی

جدول ۲) پارامترهای مشخصه مدل راننده [2]

پارامتر	مقدار
τ_L	۰/۲s
τ_r	۰/۰۴s
ω_c	۳rad/s
G_{rm}	۰/۱Nm/rad
J_{sc}	۰/۲kg m ²
J_s	۰/۰۱kg m ²
J_{arm}	۰/۰۴kg m ²
B_{sc}	۰/۱m
B_s	۲/۸Nms/rad
B_{arm}	۰/۵۶Nms/rad
K_{sc}	۲Nms/rad
K_{arm}	۳/۸Nm/rad
K_r	۵Nm/rad
B_r	۱Nm/rad
K_c	۱۵۰Nm/rad

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت، شبیه‌سازی خودرو در حالت‌های با بازخورد گشتاور و بدون بازخورد گشتاور به راننده، در سرعت طولی ثابت ۶۵ کیلومتر بر ساعت و با استفاده از یک مانور تغییر لاین مجدد انجام شده است. به دلیل استفاده از سیستم فرمان با سیم، ضروری است به تخمین نیروها و گشتاورها پرداخته شود. زمان شبیه‌سازی ۲۰ ثانیه و مقادیر پارامترهای کنترلی و فیلتر کالمن به شرح ذیل است:

بهره تناسبی مدل راننده پیش‌بین و فاصله نقطه نگاه راننده تا مرکز جرم خودرو به ترتیب برابر ۱۴/۵ و ۲۵ متر هستند. ماتریس کواریانس Q فیلتر کالمن، به صورت یک ماتریس قطری 5×5 با مقدار 1×10^{-5} است. همچنین ماتریس کواریانس R ماتریس قطری 2×2 با مقدار 10^{-3} در نظر گرفته شده است.

تخمین نیروهای جانبی وارد بر تایر محور جلو در نمودار ۱ نشان می‌دهد که تخمین بسیار مناسبی از نیروهای جانبی به دست آورده شده است که نشان‌دهنده عملکرد بالای فیلتر طراحی شده است. گشتاور تخمینی و گشتاور واقعی وارد بر محور فرمان در هنگام مانور تغییر لاین مجدد در نمودار ۲ نشان می‌دهد که فیلتر کالمن طراحی شده، گشتاور فرمان را با خطای قابل قبول تخمین می‌زند.

مدل راننده طراحی شده، مشابه دست انسان با توانایی حس کردن نیروها و گشتاورها است. مدل راننده عصبی-عضلانی شامل مدول: G_{rm} ، سختی انقباضی: K_c ، کنترلر واکنش کششی: $G_r(s)$ و سیستم فرمان و بازو: $G_s(s)$ است. G_{rm} نشان‌دهنده بهره گشتاور ورودی راننده به زاویه غربیلک فرمان مرجع است که گشتاور فرماندهی مناسبی را با توجه به زاویه فرمان به دست آمده، مهیا می‌کند. K_c نشان‌دهنده سختی ذاتی ماهیچه دست است که از فعالیت ماهیچه یا انقباض آن سرچشمه گرفته شده است. $G_r(s)$ بازتاب کنترلی به صورت فیلتر درجه اول همراه با تاخیر زمانی است و به صورت رابطه (۱۹) بیان می‌شود [2].

$$G_r(s) = \frac{\omega_c(B_r s + K_r)}{s + \omega_c} e^{-\tau s} \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)، K_r و B_r به ترتیب ثابت سختی و میرایی است و بر مبنای درجه فعالیت عضله و بهره کنترلی به دست آمده است. ω_c فرکانس قطع (Cut-off Frequency) برای فیلتر درجه یک را نمایش می‌دهد و مقدار آن با توجه به پژوهش [15] انتخاب شده است. تاخیر زمانی τ تاخیر حرکت دست در انتقال اطلاعات به/از نوروں حرکتی به ستون فقرات است و از مقاله [16] استخراج شده است. سیستم بازو و فرمان $G_s(s)$ نیز به صورت سیستم خطی درجه دوم جرم، فنر و دمپر فرض شده است که به صورت رابطه (۲۰) بیان می‌شود.

$$G_s(s) = \frac{1}{as^2 + bs + c} \quad (20)$$

پارامترهای سیستم خطی جرم، فنر و دمپر مذکور را می‌توان به فرم روابط (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) نمایش داد.

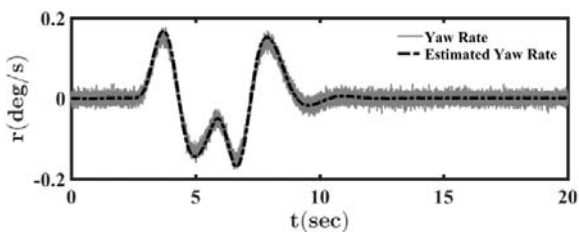
$$a = J_{sc} + J_s + J_{arm} \quad (21)$$

$$b = B_{sc} + B_s + B_{arm} \quad (22)$$

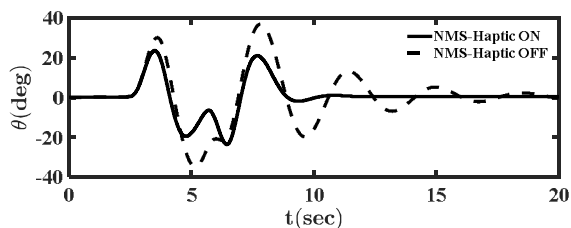
$$c = K_{sc} + K_{arm} \quad (23)$$

J_{sc} اینرسی ستون فرمان، J_s اینرسی غربیلک فرمان، B_{sc} میرایی ستون فرمان که شامل میرایی چرخ‌دهنده فرمان و اجزای اهرم‌بندی است، B_s میرایی غربیلک فرمان، K_{sc} سختی پیچشی میله و J_{arm} ، B_{arm} و K_{arm} به ترتیب اینرسی، میرایی و سختی دینامیک بازو هستند. بلوک دیاگرام مدل راننده عصبی-عضلانی در شکل ۹ نشان داده شده است. خروجی مدل راننده پیش‌بین به عنوان ورودی زاویه غربیلک فرمان مرجع برای مدل راننده عصبی-عضلانی عمل می‌کند. جدول ۲، مقادیر پارامترهای مدل راننده را نمایش می‌دهد و این مقادیر با توجه به آزمایش از افراد داوطلب حین رانندگی در یک شبیه‌ساز رانندگی به دست آمده‌اند [2].

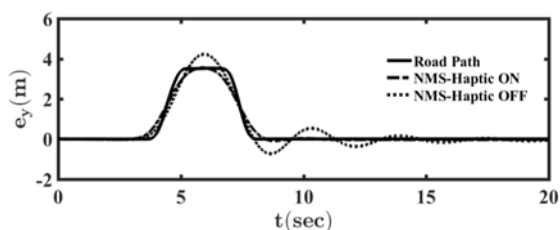
با یکپارچه‌سازی مدل راننده پیش‌بین و مدل راننده عصبی-عضلانی، مدل راننده‌ای ایجاد می‌شود که اطلاعات جاده و گشتاور فرمان به عنوان ورودی و زاویه غربیلک فرمان اعمالی به خودرو به عنوان خروجی عمل می‌کند و می‌تواند به عنوان یک مدل راننده کامل در شبیه‌سازی خودرو با سیستم فرمان با سیم به کار گرفته شود.



نمودار (۳) سرعت زاویه چرخشی خودرو و تخمین آن



نمودار (۴) زاویه فرمان مدل راننده با بازخورد گشتاور و بدون آن



نمودار (۵) جابجایی عرضی خودرو با بازخورد گشتاور و بدون آن

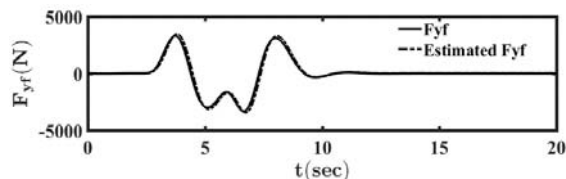
۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل راننده با بازخورد گشتاور برای یک خودرو با سیستم فرمان با سیم و دو محور فرمان‌پذیر طراحی شده است. از آنجایی که ستون فرمان خودرویی وجود ندارد، نیروهای وارد بر تایر و انتقال آن به محور چرخش فرمان در حضور نویز سنسور سرعت زاویه‌ای چرخشی، تخمین زده شده و فرمان خودرو انتقال یافته است. راننده این گشتاورهای تخمین‌زده‌شده را حس نموده و عملکردی از خود برای تعقیب مسیر جاده انجام می‌دهد. به‌منظور تخمین نیروها و گشتاورهای وارد بر محور چرخش فرمان از فیلتر کالمن در حضور نویزهای اعمالی استفاده شده است.

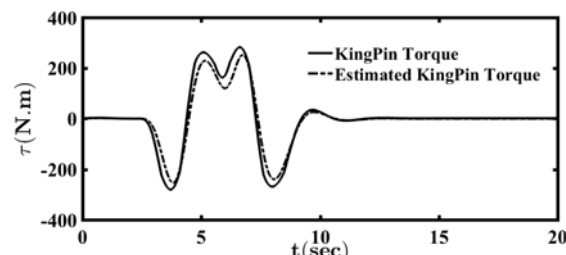
به‌منظور بررسی نقش بازخورد گشتاور در کنترل خودرو از یک مدل راننده با دو سطح مدل پیش‌بین و عصبی-عضلانی با ورودی بازخورد گشتاور فرمان استفاده شد. این موضوع به این دلیل با اهمیت است که با تغییر در اصطکاک جاده و هر موردی که باعث تغییر نیروها و گشتاورهای وارد بر تایر شود، عملکرد راننده نیز متفاوت خواهد بود. راننده طراحی‌شده در این قسمت با توجه به ورودی‌های بینایی و حس کردن گشتاورهای وارد بر غربیلک فرمان، عملکرد مناسبی از خود به‌منظور کنترل خودروی طراحی‌شده نشان داد.

سپس با شبیه‌سازی مدل راننده در نرم‌افزار سیمولینک به‌همراه مدل خودرو در نرم‌افزار کارسیم، کارایی سیستم طراحی‌شده و نحوه عملکرد مدل راننده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان

مقدار خطای جذر میانگین مربعات گشتاور محور فرمان واقعی و تخمین‌زده‌شده برابر $26/7986$ نیوتون بر متر است.



نمودار (۶) نیروهای جانبی وارد بر تایر جلو و تخمین آن



نمودار (۷) گشتاور وارد بر محور فرمان و تخمین آن

سرعت زاویه‌ای چرخشی واقعی و تخمینی خودرو نشان می‌دهد که سرعت زاویه‌ای چرخشی تخمین‌زده‌شده دارای نویز کمتری نسبت به مقادیر به‌دست‌آمده از سنسور است (نمودار ۳). تخمین حالاتی از سیستم با وجود نویز بسیار دشوار بوده و این نمودار نمایش‌دهنده عملکرد بسیار خوب فیلتر کالمن طراحی‌شده در حضور نویزهای متغیر است.

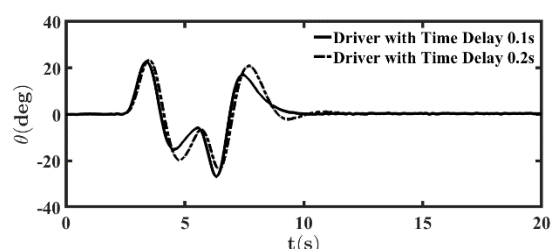
مانور تغییر لاین مجدد یکی از بهترین مانورها برای بررسی عملکرد راننده در کنترل و پایداری خودرو هست؛ به همین دلیل نمودار ۴ به میزان فرمان‌دهی راننده بر غربیلک فرمان و هدایت خودرو در مسیر جاده اشاره دارد. این نمودار در دو حالت با و بدون بازخورد گشتاور به راننده تنظیم شده است. همان‌طور که از نمودار مشخص است، در حالتی که هیچ‌گونه بازخورد گشتاوری از غربیلک فرمان به راننده منتقل نشود، راننده در میزان فرمان‌دهی خودرو برای حرکت در طول مسیر جاده بسیار مشکل خواهد داشت و سیستم زمان زیادی را برای رسیدن به پایداری صرف می‌کند که این امر بسیار خطرناک بوده و امکان تصادف یا هر اتفاق دیگری را افزایش می‌دهد. هنگامی که بازخورد گشتاور به راننده اعمال شود شرایط قبل به کلی تغییر کرده و راننده به‌خوبی خودرو را هدایت کرده و سیستم پایدار است.

جابجایی جانبی خودرو در مسیر جاده در نمودار ۵ نشان داده می‌شود. در حالتی که بازخوردی از گشتاور برای راننده وجود نداشته باشد، راننده در تعقیب مسیر جاده عملکرد خوبی نداشته و نمی‌تواند مسیر مطلوب را به‌درستی تعقیب نماید. هنگامی که بازخورد گشتاور فعال باشد، عملکرد راننده در تعقیب مسیر بهبود می‌یابد و راننده می‌تواند با کمترین خطا به تعقیب مسیر و هدایت خودرو بپردازد. این نتایج، تفاوت عملکرد راننده در دو حالت ذکرشده را به‌وضوح به نمایش می‌گذارد.

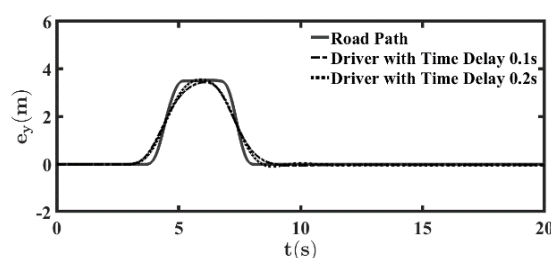
می‌دهد که هنگام اعمال بازخورد گشتاور، راننده عملکرد مطلوبی را در هنگام تعقیب مسیر خودرو نشان می‌دهد و هنگامی که بازخورد گشتاور وجود ندارد، راننده نمی‌تواند مسیر مطلوب را به‌درستی تعقیب نماید. میانگین مربعات خطا در حالتی که بازخورد گشتاوری وجود ندارد برابر با ۰/۲۸۴۸ و زمانی که بازخورد گشتاور فعال باشد برابر با ۰/۱۷۸۸ است و به این معنا است که عملکرد مدل راننده در هنگامی که بازخورد گشتاور فعال باشد ۶۳٪ بهبود یافته است.

همچنین شبیه‌سازی با تاخیر زمانی ۱/۰ ثانیه در مقایسه با تاخیر زمانی ۲/۰ ثانیه در مانور تغییر لاین مجدد انجام شده است. این موضوع در حالتی که بازخورد گشتاور برای هر دو حالت فعال است، شبیه‌سازی شده است. همان طور که در نمودار ۶ نشان داده شده است، راننده سرعت عمل بیشتری را در مقایسه با تاخیر زمانی ۲/۰ ثانیه دارد. مقدار زاویه فرمان نیز در حالت با تاخیر زمانی ۱/۰ ثانیه کمتر است.

همچنین جابجایی جانبی خودرو در مسیر جاده با تاخیرهای زمانی ۲/۰ و ۱/۰ ثانیه را نشان می‌دهد که در هر دو حالت راننده عملکرد مطلوبی دارد (نمودار ۷). راننده با تاخیر زمانی ۱/۰ ثانیه فرمان را سریع‌تر پیچانده و این موضوع باعث کم‌شدن میزان حرکت جانبی خودرو در طول مسیر جاده می‌شود.



نمودار ۶) جابجایی عرضی خودرو با تاخیر زمانی ۱/۰ و ۲/۰ ثانیه



نمودار ۷) جابجایی عرضی خودرو با تاخیر زمانی ۱/۰ و ۲/۰ ثانیه

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشد.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشد.

تعارض منافع: نویسندگان هیچ تعارض منافعی در مورد تحقیق، ترتیب نویسندگان و انتشار مقاله ندارند.

سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان گزارش نشد.

منابع مالی: نویسندگان از هیچ گونه منابع مالی برای تحقیق در موضوع مقاله استفاده نکردند.

فهرست علائم

میرایی ستون فرمان (Nmsrad^{-1})	B_{sc}
میرایی غربیک فرمان (Nmsrad^{-1})	B_s
میرایی دینامیک بازو (Nmsrad^{-1})	B_{arm}
میرایی ماهیچه (Nmsrad^{-1})	B_r
سختی جانبی تایر جلو (Nrad^{-1})	C_{af}
سختی جانبی تایر عقب (Nrad^{-1})	C_{ar}
ضریب میرایی غربیک فرمان ($\text{Nms}^2\text{rad}^{-1}$)	C_s
فاصله پنوماتیکی و مکانیکی بین نقطه اثر نیروهای جانبی وارد بر تایر و محور فرمان (m)	d
جابجایی عرضی خودرو (m)	e_y
زاویه چرخش خودرو (deg)	e_ψ
فاصله جانبی مسیر جاده در نقطه نگاه راننده (m)	e_{yd}
نیروهای وارد بر تایر از طرف جاده (N)	F
نیروی جانبی محور جلو (N)	F_{yf}
نیروی جانبی محور عقب (N)	F_{yr}
سختی گشتاور-زاویه (Nmrad^{-1})	G_{rm}
ممان اینرسی فرمان ($\text{Nms}^2\text{rad}^{-1}$)	I_s
ممان اینرسی چرخشی (Kgm^2)	I_z
اینرسی ستون فرمان (Kgm^2)	J_{sc}
اینرسی غربیک فرمان (Kgm^2)	J_s
اینرسی دینامیک بازو (Kgm^2)	J_{arm}
سختی پیچشی میله (Nmrad^{-1})	K_{sc}
سختی دینامیک بازو (Nmrad^{-1})	K_{arm}
بازتاب سختی ماهیچه (Nmrad^{-1})	K_r
سختی انقباضی ماهیچه (Nmrad^{-1})	K_c
بهره فیلتر کالمن	K
فاصله محور جلو از مرکز جرم خودرو (m)	l_f
فاصله محور عقب از مرکز جرم خودرو (m)	l_r
فاصله نقطه نگاه راننده تا مرکز جرم خودرو (m)	L
جرم خودرو (Kg)	m
نسبت فرمان	N_g
زاویه تمایل محور فرمان	$\hat{n}$
بهره تناسبی	P
شعاع تایر تحت بار اسمی (m)	R_{nom}
زاویه چرخش (deg)	r
بازوی گشتاور فرمان (m)	$r_{F/wc}$
فاصله پنوماتیکی (m)	t_p
سرعت طولی خودرو (ms^{-1})	u
سرعت جانبی خودرو (ms^{-1})	v
فاصله طولی محور فرمان (m)	x_p
فاصله عرضی محور فرمان (m)	y_p

علائم یونانی

زاویه تمایل محور فرمان (deg)	γ
زاویه تایر جلو (deg)	δ_f
زاویه تایر عقب (deg)	δ_r
انحراف جانبی خودرو از فاصله جانبی (m)	ε
زاویه کستر (deg)	σ
زاویه تایر جلو (deg)	δ_f
زاویه تایر عقب (deg)	δ_r
تاخیر زمانی راننده (s)	τ_L
ممان حول محور فرمان (Nm)	τ_{kp}

- 7- Saleh L, Chevrel P, Claveau F, Lafay JF, Mars F. Shared steering control between a driver and an automation: Stability in the presence of driver behavior uncertainty. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2013;14(2):974-983.
- 8- Yih P, Gerdes JC. Modification of vehicle handling characteristics via steer-by-wire. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2005;13(6):965-976.
- 9- Shirazi MM, Rad AB. Detection of intoxicated drivers using online system identification of steering behavior. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2014;15(4):1738-1747.
- 10- Balachandran A, Gerdes JC. Designing steering feel for steer-by-wire vehicles using objective measures. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2015;20(1):373-383.
- 11- Dixon JC. Suspension geometry and computation. Hoboken: John Wiley & Sons; 2009.
- 12- Li W, Jia Y. H-infinity filtering for a class of nonlinear discrete-time systems based on unscented transform. *Signal Processing*. 2010;90(12):3301-3307.
- 13- Cole D. Steering feedback. *ATZautotechnology*. 2008;8(11-12):52-56.
- 14- Abe M. Vehicle handling dynamics, Theory and application. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2015.
- 15- Pick AJ, Cole DJ. A mathematical model of driver steering control including neuromuscular dynamics. *Journal of Dynamic Systems. Measurement, and Control*. 2008;130(3):031004.
- 16- Kearney RE, Stein RB, Parameswaran L. Identification of intrinsic and reflex contributions to human ankle stiffness dynamics. *IEEE transactions on Biomedical Engineering*. 1997;44(6):493-504.

ممان ناشی از نیروهای طولی تایر (Nm)	τ_{F_x}
ممان ناشی از نیروهای عرضی تایر (Nm)	τ_{F_y}
ممان ناشی از نیروهای عمودی تایر (Nm)	τ_{F_z}
فرکانس قطع (rads^{-1})	ω_c

منابع

- 1- Kern TA. Engineering haptic devices, A beginner's guide for engineers. Berlin: Springer Science & Business Media; 2009.
- 2- Bi L, Wang M, Wang C, Liu Y. Development of a driver lateral control model by integrating neuromuscular dynamics into the queuing network-based driver model. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2015;16(5):2479-2486.
- 3- Beal CE, Gerdes JC. Model predictive control for vehicle stabilization at the limits of handling. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2013;21(4):1258-1269.
- 4- Shen H, Tan Y, Mao J. A driver model for dynamic evaluation of the EPS assistant characteristics. *Journal of Applied Sciences*. 2013;13(9):1455-1460.
- 5- Zhang C, Chen Q, Qiu J. Robust $\mathcal{H}_\infty$ filtering for vehicle sideslip angle estimation with sampled-data measurements. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2017;39(7):1059-1070.
- 6- Fahami SMH, Zamzuri H, Mazlan SA. Development of estimation force feedback torque control algorithm for driver steering feel in vehicle steer by wire system: Hardware in the loop. *International Journal of Vehicular Technology*. 2015;2015: Article ID 314597.