



کنترل مبتنی بر رواداری خطا برای سیستم فرمان با سیم خودرو

چکیده: سیستم فرمان سیمی شامل واحد کنترل الکترونیکی، موتور کمکی فرمان و سنسورهایی است که می توانند با جایگزینی قطعات مکانیکی، سر و صدا، لرزش و وزن خودرو را کاهش دهند. این نوع فرمان بدلیل دارا بودن قطعات الکترونیکی شرایط حساس تری را نسبت به فرمان مکانیکی دارند و این بدان معناست که باید این سیستم ها تحمل پذیر خطا باشند. از اجزای مهم سیستم های کنترل فرمان سیمی می توان به محرک ها، سنسورها و میکروکنترلرها اشاره کرد. از چالش های این نوع سیستم حساس بودن به عملکرد نادرست اجزای الکترونیکی (سنسورها، سیم کشی، برقراری جریان برق، و میکروکنترلرها) می باشد. هدف این مقاله، معرفی سیستم های کنترل تحمل پذیر خطا برای جبران خطاها در سیستم فرمان سیمی می باشد. از این رو ساختار کنترل تطبیقی، پیش بینی مدل، کنترل دو طرفه، فرمان کمکی دیفرانسیل، تخصیص کنترل مجدد، کنترل مقاوم و ساختار متغیر مورد استفاده قرار می گیرد. کنترل های مذکور می توانند پایداری و مقاوم بودن سیستم را نسبت به عدم قطعیت و آشفتگی ها تضمین کنند.

واژه های راهنما: فرمان با سیم، کنترل رواداری خطا، خطای محرک، خطای میکروکنترلر، خطای سنسور

حسین صیاد کشوری

دانشجوی کارشناسی ارشد

سلمان ابراهیمی نژاد

رفسنجانی*

استادیار

مسعود مسیح طهرانی

استادیار، آزمایشگاه تحقیقاتی

سیستم های دینامیکی خودرو،

دانشکده مهندسی خودرو،

دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۸

Fault tolerance-based control for vehicle steer by wire system

Hossein Sayad
Keshvari
M.Sc. Student

Salman
Ebrahimi-Nejad
Rafsanjani*
Assistant Professor

Masoud
Masih Tehrani
Assistant Professor,
Vehicle Dynamical
System Research Lab,
Faculty of Automotive
Engineering, Iran
University of Science
and Technology, Tehran

Abstract: Steer-by-wire system includes an electronic control unit, auxiliary steering motor and sensors that can reduce noise, vibration and vehicle weight by replacing mechanical parts. This type of steering has more sensitive conditions than mechanical steering due to the presence of electronic components, which means that these systems must be fault tolerant. Important components of wired steering control systems include actuators, sensors and microcontrollers. One of the challenges of this type of system is to be sensitive to the malfunction of electronic components (sensors, wiring, power supply, and microcontrollers). The purpose of this paper is to introduce fault tolerant control systems to compensate for errors in the wired steering system. Therefore, adaptive control structure, model prediction, two-way control, auxiliary differential control, re-control assignment, robust control and variable structure are used. These controls can ensure the stability and resilience of the system to uncertainty and turbulence.

Keywords: Steer by wire, Fault tolerance control, Actuator error, Microcontroller error, Sensor error

۱- مقدمه

به عدم قطعیت سیستم و خطاهای برآورد حساس است. بزرگترین عیب کنترل پیش‌بینی مدل، اینست که اگر مدل ریاضی سیستم دقیق نباشد، پیش‌بینی‌های خروجی سیستم نیز معتبر نخواهد بود و در نتیجه منجر به خطا خواهد شد. بنابر این در این مقاله ترکیب این کنترلر با کنترلر مد لغزشی [۸] و اپراتورهای دلتا [۹] معرفی می‌شود.

عدم قطعیت پارامتر خودرو می‌تواند هم در مدل و هم در اندازه‌گیری وجود داشته باشد. حضور این موارد در سیستم‌های کنترل باعث می‌شود تا اهداف کنترلی آن چنان‌که باید تحقق پیدا نکند. کنترل مقاوم تلاشی است که برای از پیش‌رو برداشتن این مشکل انجام می‌شود. اما برای کنترل طولی خودرو مناسب نمی‌باشد. هدف استفاده از **کنترل تطبیقی** در سیستم رواداری خطا اینست که کنترلر طراحی شده بدین روش، بتواند در مقابل تغییرات آرام در سیستم فرمان و همچنین خطاهای مدل‌سازی فرمان پاسخ مناسب بدهد. طراحی از دیدگاه کنترل مقاوم به کنترلی می‌انجامد که در بازه مشخصی به پایداری سیستم فرمان می‌انجامد بدون آنکه نیازی به تغییر قوانین کنترلی باشد، ولی با روش کنترل تطبیقی می‌توان قوانین کنترلی را به گونه‌ای با تغییر شرایط تطبیق داد که سیستم پایدار شود [۱۰]. قسمت‌های باقیمانده مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲، روش‌های کنترل خطا در سیستم‌های فرمان با سیم شرح داده شده است. در بخش ۳، برخی نتیجه‌گیری‌های انجام شده و شکاف‌های تحقیق برای مطالعه بیشتر مشخص می‌شود.

۲- روش های کنترل خطا در فرمان سیمی

پس از شناسایی خطا، کنترل‌کننده قابل تنظیم برای دستیابی به ثبات و عملکرد رضایت بخش با خطا سازگار می‌شود. توانایی مقابله با خطاها به کنترل‌کننده از پیش طراحی شده بستگی دارد. کنترل اولیه رواداری خطا با تغییر دادن کنترل‌کننده، شرایط کار را تغییر می‌دهد. کنترل‌کننده‌های پشتیبان فقط زمانی فعال می‌شوند که خطاها در یک کنترل‌کننده خاص رخ دهد. این روش تا حد زیادی به نوع خطا بستگی دارد که اطلاعات صحیحی راجع به نوع و محل خطاها ارائه می‌دهد تا کنترل‌کننده پشتیبان بتواند روشن شود. روش‌های کنترل خطا در فرمان سیمی در شکل ۱ نشان داده شده است.

سیستم فرمان با سیم، که به عنوان نسل بعدی سیستم فرمان شناخته می‌شود، یک سیستم فرمان الکترونیکی کنترل شده است که قطعات مکانیکی یک سیستم فرمان معمولی را با موتورهای الکتریکی و سنسورها جایگزین می‌کند. سیستم فرمان با سیم می‌تواند ایمنی خودرو را بهبود بخشد، قدرت مانور خودرو را افزایش دهد، از راندمان بالاتری برخوردار باشد و عملکرد سیستم کنترلی راننده و خودرو را بهبود بخشد. [۱]. از جمله معایب سیستم‌های فرمان با سیم این است که دارای ویژگی‌های خرابی غیر قابل پیش‌بینی هستند و ممکن است منجر به نتایج جدی از جمله آسیب به وسیله نقلیه و آسیب دیدگی سرنشین شوند. از این رو نسبت به سیستم‌های فرمان معمولی به سطح بالاتری از رواداری خطا نیاز دارند. کنترل رواداری خطا می‌تواند به طور قابل توجهی ایمنی و راحتی راننده و سرنشینان را افزایش داده و از آسیب دیدگی یا مرگ جلوگیری کند. کمبود بررسی جامع استراتژی کنترل رواداری خطا در سیستم‌های فرمان با سیم از نقطه نظر سیستم کنترل وجود دارد، زیرا عملکرد کنترل ردیابی فرمان ضروری است [۲]. با توجه به محل وقوع در سیستم، خطاها به خطاهای محرک، سنسور، میکروکنترلر و خطا در خطوط ارتباطی طبقه‌بندی می‌شوند [۳].

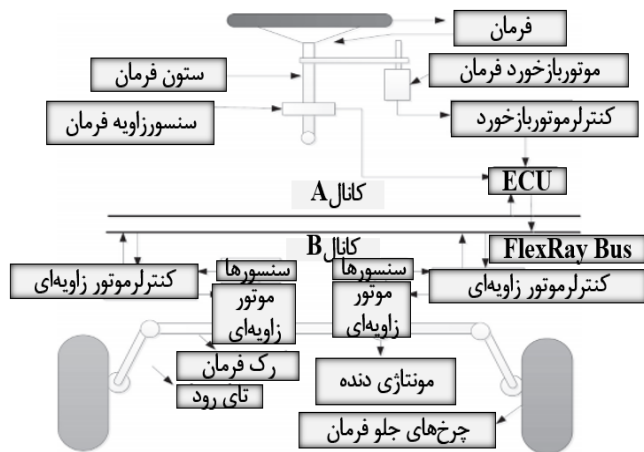
هدف این مقاله بررسی انواع مختلف سیستم کنترل رواداری خطا^۱ با خرابی محرک، خرابی سنسور، خرابی میکروکنترلر و خرابی در خطوط ارتباطی برای سیستم فرمان با سیم می‌باشد. اطلاعات حاصل از مازول شناسایی و تشخیص خطا برای جبران خسارت باید به کنترل‌کننده خطا منتقل شود. کنترل‌کننده خطا برای دستیابی به عملکرد قابل قبول فرمان، با خطا سازگار می‌شود. روش‌هایی را که برای کنترل رواداری خطا برای سیستم‌های فرمان با سیم در این مقاله استفاده می‌گردد می‌توان به روش تخصیص مجدد کنترل [۴]، روش کنترل پیش‌بینی مدل^۲ [۵]، روش کنترل تطبیقی^۳ [۶] و کنترل اچ‌اینفینیتی^۴ [۷] طبقه‌بندی کرد.

روش کنترل پیش‌بینی مدل یک روش کارآمد برای جبران نقص سیستم و دستیابی به یک عملکرد مطلوب فرمان به طور هم‌زمان است. یک مزیت مهم روش کنترل پیش‌بینی مدل توانایی کنترل محدودیت‌های سخت سیستم است. در نظر گرفتن محدودیت‌های ورودی کنترل در طراحی سیستم رواداری خطا بسیار مهم است. با این حال، روش کنترل پیش‌بینی مدل نسبت

³ Adaptive control⁴ H-infinity(H ∞)¹ Fault tolerant control system(FTCS)² Model predictive control(MPC)

۲-۱- کنترل خطای محرک با دو موتور فرمان

هی و همکاران، دو موتور فرمان سیستم‌های فرمان با سیم به مکانیزم رک و پینیون و میله تای راد متصل کرده‌اند [۱۱]. یک موتور توسط زاویه چرخ جلو و کنترل کننده موتور زاویه‌ای کنترل می‌شود و موتور دیگر توسط گشتاور فرمان و کنترل کننده موتور گشتاور کنترل می‌شود. پس از تشخیص وجود نقص در سیستم کنترل موتور زاویه‌ای، سیستم مذکور متوقف شده و سیستم کنترل موتور گشتاور نقش موتور زاویه‌ای را بازی می‌کند. الگوریتم کنترل، پارامترهای ارسالی را تنظیم می‌کند تا عملکرد اساسی فرمان را تحقق بخشد. شکل ۲ ساختار فرمان سیمی با دو موتور فرمان را نشان می‌دهد.



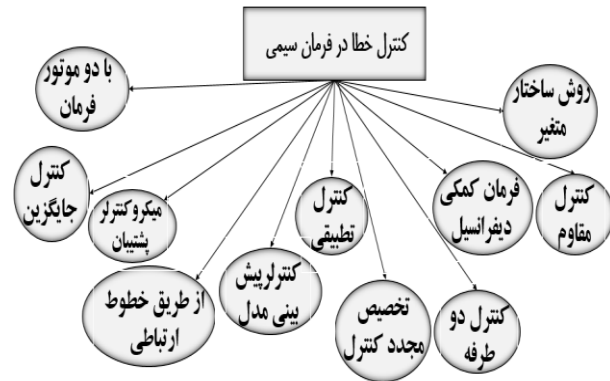
شکل ۲ فرمان سیمی با دو موتور فرمان

۲-۲- کنترل خطای سنسور با روش جایگزینی

اگر یک سنسور خراب شناسایی شود، می‌توان با قطع اطلاعات از سنسور خراب، پیکربندی مجدد خطا را انجام داد و مجموع سیگنال‌ها به میکروکنترلر منتقل می‌شود تا از عملکرد ایمن سیستم اطمینان حاصل شود [۱۲]. استراتژی پیکربندی مجدد خطای مشابه را می‌توان توسط یو و همکاران یافت [۱۳]. هنگامی که خطایی در سنسور گشتاور رخ می‌دهد، مدل کنترلی اصلاح خطا با تنظیم مجدد گشتاور موتور، گشتاور جایگزین سیستم را بازسازی می‌کند.

۲-۳- کنترل خطای میکروکنترلر با میکروکنترلر پشتیبان

برای کنترل چرخ‌های جلو دو میکروکنترلر وجود دارد. هردوی آنها فرمان کنترل خود را محاسبه کرده و نتایج محاسبه شده را



شکل ۱ کنترل خطا در فرمان سیمی

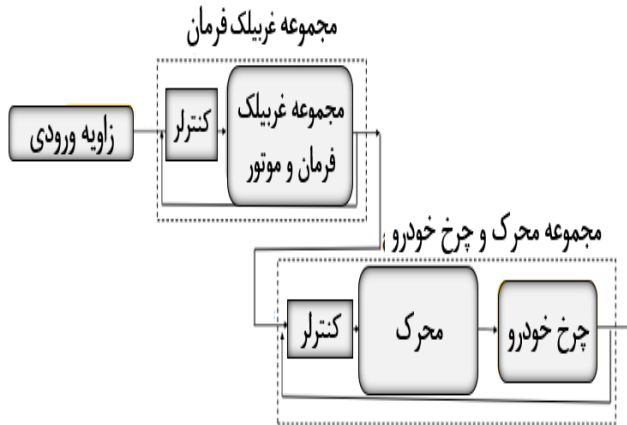
جدول ۱ مطالعات مربوط به روش‌های کنترل خطا در فرمان سیمی را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه هیچ ارتباط مکانیکی بین فرمان و چرخ‌ها برای سیستم‌های فرمان با سیم وجود ندارد، نقص در یک سنسور، محرک یا میکروکنترلر، ممکن است منجر به اثرات ناخواسته فرمان شود.

جدول ۱ مراجع کنترل خطا در فرمان سیمی

مراجع	نوع کنترلر
هانگ (۲۰۱۷) [8]	کنترل با دو موتور فرمان
وانگ (۲۰۱۵) [11]	کنترل با روش جایگزینی
یو (۲۰۱۸) [13]	کنترل با میکروکنترلر پشتیبان
هانگ (۲۰۱۷) [8]	کنترل فرمان با خطوط ارتباطی
لی (۲۰۱۱) [14]	
گائو (۲۰۱۷) [5]	کنترل پیش بینی مدل
ژانگی (۲۰۱۶) [15]	
گائو (۲۰۱۷) [5]	کنترل تطبیقی
می‌هالی (۲۰۱۵) [22]	
بییم (۲۰۱۴) [24]	تخصیص مجدد کنترل
ژانگ (۲۰۱۸) [25]	
کرلی (۲۰۱۷) [27]	فرمان کمکی دیفرانسیل
وانگ (۲۰۱۵) [29]	کنترل مقاوم
زو (۲۰۰۹) [31]	روش ساختار متغیر

وقوع خطاهای محرک و سنسور به دلیل وجود دستگاه‌های الکتریکی که ممکن است تحت چندین شرایط بحرانی احتمالی قرار داشته باشند، بیشتر رخ می‌دهد. سیستم رواداری خطا به این معنی است که هرگونه عملکرد ناقص یک یا چند قطعه سیستم منجر به عملکرد فاجعه‌بار سیستم کلی نمی‌شود و سیستم باید تا رسیدن به حالت ایمن (یعنی متوقف شدن خودرو) به کار خود ادامه دهد.

خطای مهم سیستم فرمان با سیم را در هنگام انحراف فرمان جلوی با زاویه غیر صفر در نظر می‌گیرند [۱۹]. شکل ۳ شماتیک سیمولینک فرمان سیمی را با کنترلر نشان می‌دهد.



شکل ۳ سیمولینک فرمان سیمی با کنترلر

۲-۶- کنترلر خطا با روش کنترل تطبیقی

ویژگی اصلی کنترل تطبیقی^۵ تنظیم اتوماتیک پارامترهای کنترلر برای دستیابی به عملکرد مطلوب است. فکیج و همکاران یک کنترلر کننده تطبیقی مبتنی بر مدل مرجع با فناوری نگاه به جلو را برای سیستم‌های فرمان سیمی از وسایل نقلیه خود مختار در حضور خطاهای محرک پیشنهاد می‌کند [۲۰]. کنترلر مذکور سازگار است زیرا سیگنال تخمین خطا و عدم اطمینان به یک مؤلفه در کنترل بازخورد تخمین حالت تبدیل می‌شود، در نتیجه اثرات عدم اطمینان محدود به دلیل خطا یا سیگنال‌های ورودی ناشناخته را که در خطای تخمین حالت ناظر عمل می‌کنند، لغو می‌کند.

۲-۷- کنترلر خطا با روش تخصیص مجدد کنترلر

روش تخصیص مجدد کنترلر با موفقیت برای یک کنترلر کننده رواداری خطای فعال برای سیستم‌های مجهز به سیم استفاده شده است [۲۱]. اصل روش تخصیص مجدد کنترلر برای سیستم‌های فرمان با سیم ایجاد نیروی چرخ اضافی برای جایگزینی اثر زاویه سیستم فرمان به دلیل خرابی سیستم فرمان است. بنابراین، وسیله نقلیه می‌تواند مسیر مورد نظر را دنبال کند و عملکرد ردیابی خوبی داشته باشد. پیکربندی مجدد سیستم معیوب فرمان با سیم بر اساس تکنیک‌های بهینه‌سازی محدود

از طریق شبکه ارتباطی با یکدیگر مقایسه می‌کنند. در میکروکنترلر پشتیبان یا ثانویه وقتی تفاوت در مقایسه دو دستور کنترلر بیش از مقدار ماکزیمم باشد، محاسبه خود را مجدداً انجام می‌دهد. هنگامی که خطایی در میکروکنترلر اولیه رخ دهد، میکروکنترلر ثانویه به فعال می‌گردد. ژائو و همکاران ساختار افزاری سیستم‌های فرمان با سیم را با میکروکنترلرهای سه گانه را طراحی کردند [۱۴]. در حالت عملکرد عادی، فقط یک میکروکنترلر دستورات کنترل را برای کنترل موتور فرمان و احساس فرمان صادر می‌کند. دو میکروکنترلر دیگر در حالت خواب هستند که در آن فقط می‌توان سیگنال، پردازش سیگنال و الگوریتم فرمان را اجرا کرد.

۲-۴- کنترلر خطای فرمان با روش خطوط ارتباطی

ژنگ و همکاران ساختار سیستم‌های فرمان با سیم با خطوط ارتباطی اضافی کن را پیشنهاد می‌کنند. در این معماری، محرک ها، حسگرها و میکروکنترلرها مستقیماً به سیستم دو گذرگاهی متصل می‌شوند. در طرح ژانگ و همکاران، میکروکنترلر پیام‌های صحیحی را به گذرگاه دو کانال منتقل می‌کند [۱۵] که می‌تواند از ویژگی‌های زمان واقعی وقوع خطا، قابلیت اطمینان و رواداری خطا اطمینان حاصل کند.

۲-۵- کنترلر خطا با روش پیش بینی مدل

برای توسعه بیشتر کنترلر پیش‌بینی مدل^۲، یک کنترلر رواداری خطا شامل ترکیب کنترلر مد لغزشی^۳ با کنترلر پیش‌بینی مدل به منظور بهبود مقاومت سیستم در حضور اختلالات و عدم قطعیت‌های مدل سازی توسط هوانگ پیشنهاد شده است [۱۶]. از آنجا که نویز اندازه‌گیری و خطاهای ایجاد شده ممکن است منجر به تخریب عملکرد کنترلر مذکور شود، یک کنترلر پیش‌بینی مدل مبتنی بر اپراتور دلتا با جبران خطا توسط هانگ ساخته شده است [۱۷]. به‌طور مشابه، یک دامنه اپراتور دلتا مبتنی بر مینیماکس کنترلر پیش‌بینی مدل^۴ و عملکرد کنترلر بازخورد برای جبران مؤثر خرابی محرک ارائه شده است [۱۸]. ویژگی این طرح کنترلر این است که انواع مختلف خطاهای محرک، عدم قطعیت سیستم، آشفتگی و گشت‌وگذار در پارامترهای طراحی شده از ناظر خطا در نظر گرفته می‌شود. ژانگ و همکاران با استفاده از کنترلر پیش‌بینی مدل، وضعیت

⁴ minimax MPC

⁵ Adaptive control

⁶ Control reallocation method

¹ Controller Area Network (CAN)

² Model predictive control (MPC)

³ sliding mode control (SMC)

۲-۹- کنترل خطا با روش فرمان کمکی دیفرانسیل

کرلی و یولسوی برای اولین بار پیشنهاد کردند در صورت خرابی فرمان سیمی در ترکیب با کنترل پایداری خودرو از فرمان کمکی دیفرانسیل به عنوان یک استراتژی فرمان پشتیبان استفاده شود [۲۷]. هنگامی که محرک سیستم فرمان با سیم دچار مشکل شود، فرمان کمکی دیفرانسیل از بردار گشتاور برای هدایت وسیله نقلیه برای ایمنی استفاده می‌کند. از آنجا که بردار گشتاور ممکن است منجر به درگیری بین پایداری وسیله نقلیه و عملکرد فرمان شود، یک کنترل کننده سرعت پیشنهاد می‌شود تا درجه دیگری از آزادی را به سیستم کنترل کلی وسیله اضافه کند، بنابراین درگیری بین کنترل پایداری خودرو و فرمان کمکی دیفرانسیل با کاهش سرعت خودرو کاهش می‌یابد و اجازه می‌دهد تا استراتژی فرمان پشتیبان مبتنی بر فرمان کمکی دیفرانسیل با ایمنی خودرو را هدایت کند.

این مقاله ابتدا نیاز به توجه به آن را شناسایی می‌کند و استراتژی‌های تحمل‌پذیری خطا را برای رفع تعارض بین عملکرد فرمان و پایداری خودرو توسعه می‌دهد. شکل ۴ شماتیک فرمان کمکی دیفرانسیل را نشان می‌دهد. مطالعه مشابهی را می‌توان در مقاله تاشیرو یافت [۲۸]، که در آن پایداری حرکت جانبی و عملکرد فرمان‌پذیری قابل قبول، هر دو در طراحی کنترل کننده رواداری خطا برای جبران بروز نقص در سیستم‌های فرمان با سیم در نظر گرفته شده‌اند.

۲-۱۰- کنترل خطا با روش کنترل مقاوم

وانگ و همکاران [۲۹]، در صورت خرابی کامل فرمان، مسئله کنترل زاویه‌ای بر اساس مکانیزم فرمان دیفرانسیل را بررسی کردند. از کنترل بازخورد خروجی اج‌اینفینیتی^۵ برای کنترل زاویه فرمان جلو توسط گشتاور درایو دیفرانسیل موتور استفاده می‌شود. یک کنترل کننده مقاوم در برابر خطا می‌تواند با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامتر خودرو و ایجاد اختلالات خارجی، خودرو را در شرایط مختلف رانندگی مقاوم کند، اما برای کنترل طولی قابل استفاده نیست. برای حل این مشکل، وانگ و همکاران، یک قانون کنترل تطبیقی با برآوردگر حداقل مربع بازگشتی برای کنترل سرعت طولی و سرعت زاویه‌ای را پیشنهاد کردند و گشتاور هر موتور چرخ را برای کنترل خطاهای متوسط در موتورهای فرمان و یا سیستم‌های فرمان اختصاص دادند [۳۰].

است. معیار بهینه‌سازی این است که با در نظر گرفتن پویایی واقعی خودرو تفاوت بین حرکت زاویه‌ای اصلی و گشتاورزاویه‌ای اضافی را به حداقل برساند. راه‌حل بهینه‌سازی، نیروهای چرخ اضافی را برای جبران خطاها ایجاد می‌کند [۲۲]. این روش می‌تواند انواع مختلف خرابی محرک را کنترل کند. با این حال، از آنجا که به اطلاعات مربوط به خرابی محرک در طراحی قانون کنترل نیاز ندارد، کنترل کننده نمی‌تواند عملکرد اصلی کنترل را بدست آورد. در نتیجه، در صورت خرابی محرک ممکن است سیستم کنترل ناپایدار شود. وادا و دیگران یک کنترل کننده خطی با جبران ضد باد^۱ و یک تخصیص دهنده کنترل بر اساس بهینه‌سازی آنلاین پیشنهاد می‌کنند [۲۳]. کنترل کننده خطی با جبران ضد باد می‌تواند پایداری حلقه بسته سیستم را هنگام خراب شدن محرک فرمان و تخصیص دهنده کنترل سیگنال‌های کنترل را بر اساس اطلاعات معیوب به هر محرک توزیع کند، به طوری که تخریب عملکرد به حداقل برسد. بیم یک روش وزنی تخصیص کنترل را برای مقابله با خرابی محرک سیستم‌های فرمان با سیم در توزیع گشتاور زاویه‌ای پیشنهاد می‌دهد. این روش می‌تواند پایداری چرخش خودرو را تضمین کرده و عملکرد فعال فرمان را در حضور خرابی محرک تحقق بخشد [۲۴].

۲-۸- کنترل خطا با روش کنترل دو طرفه

در یک طرح کنترل دو طرفه^۲ دو کنترل کننده طراحی شده است: یکی برای تثبیت سیستم و تشخیص خطای ردیابی استفاده می‌شود. دیگری برای ایجاد خروجی سیستم که دستورات فرمان راننده را به سرعت و به طور دقیق دنبال می‌کند. ژائو و همکاران یک کنترل کننده بازخورد برای ایجاد زاویه چرخ جلو برای دنبال کردن اهداف راننده و یک کنترل کننده بازخورد برای افزودن سیگنال زاویه چرخ جلو اصلاح شده به سیستم به منظور افزایش قابلیت اطمینان طراحی کردند [۲۵]. ساختارهای کنترلی مشابه با کنترل کننده‌های جداگانه برای سیستم‌های فرمان با سیم توسط ایتو و همکاران ارائه شده است [۲۶]. مطابق با تأثیر خطاهای سنسور و خطاهای محرک اعمال شده بر روی سیستم فرمان با سیم، هر کدام، از کنترل کننده‌های جداگانه استفاده می‌کنند. مزیت اصلی یک طرح کنترل دو طرفه این است که می‌تواند افزونگی اجزای سیستم را کاهش دهد در حالی که هنوز ایمنی را تضمین می‌کند.

⁴ Differential drive assisted steering control (DDAS)

⁵ H-infinity (H_{∞})

¹ anti-windup

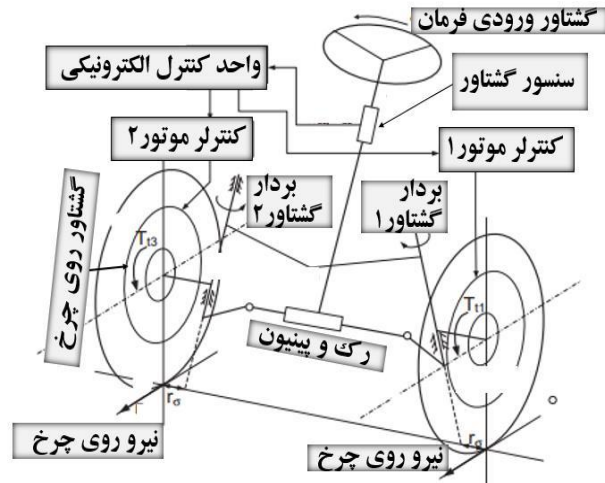
² Two-way control

³ vehicle stability control (VSC)

استراتژی کنترل رواداری خطا مبتنی بر کنترل پیش‌بینی مدل در دامنه دلتا برای دستیابی به عملکرد ردیابی خطای محرک، عدم قطعیت و اختلال سیستم می‌تواند انواع مختلف خطاهای محرک را کنترل کند. استفاده از روش کنترل دو طرفه H_{∞} با یک مازول مقاوم در برابر خطا می‌تواند ثبات سیستم را تضمین کند. کنترل پیش‌بینی حالت کشویی رواداری با هدف تثبیت و دستیابی به عملکرد قابل قبول فرمان و رواداری خطاهای محرک عملکرد خوبی را در حضور عدم قطعیت مدل و اختلال و خطاهای محرک فراهم می‌کند.

تاخیر زمانی که باعث بی‌ثباتی و عملکرد نامناسب سیستم می‌شود اغلب در سیستم‌های فرمان با سیم رخ می‌دهد. پروتکل‌های ارتباطی ممکن است باعث قطع ارتباط و تأخیر زمان ارتباط شوند. افزایش تاخیر در ارتباطات می‌تواند به ناچار قابلیت اطمینان سیستم‌های فرمان با سیم را کاهش دهد. علاوه بر این، اگر تاخیر در کنترل خطا از حداکثر زمان پاسخ قابل قبول سیستم بیشتر باشد، دیگر نمی‌توان امنیت خودرو را تضمین کرد. نتایج بسیار کمی برای بررسی کنترل خطای سیستم‌های فرمان با سیم با مشکلات تاخیر متغیر با زمان انجام شده است. علاوه بر این، فاصله بین وقوع خطا و واکنش سریع کنترل کننده رواداری خطا، در حفظ عملکرد ایمنی نقش دارد. اگر فرآیند کنترل خطا مدت زمان زیادی طول بکشد، یکپارچگی سیستم فرمان با سیم ممکن است در معرض خطر باشد.

خطاهای انسانی بیش از ۹۰ درصد تصادفات را به خود اختصاص می‌دهد. خطاهای راننده عبارتند از: وضعیت ناگهانی رخ داده که در آن راننده نمی‌تواند به سرعت واکنش نشان دهد، خواب آلودگی ناشی از مدت طولانی رانندگی، مهارت کم در رانندگی، خواب‌رفتن یا هر اقدام دیگری که ممکن است خودرو را ناپایدار کند و منجر به تصادف شود. اگر عملکرد راننده مانند ترمز گرفتن، افزایش یا کاهش شتاب و مانور فرمان به موقع انجام نشود، کنترل‌های خودرو باید فوراً واکنش نشان دهند تا اقدامات دقیقی انجام گیرد یا توقف اضطراری را انجام دهد. واحد کنترل الکترونیکی باید توانایی شناسایی نوع خطای انسانی را داشته باشد و برای کنترل خطای راننده و دستیابی به عملکرد بهینه رانندگی، باید یک برنامه کنترل رواداری خطا طراحی شود. برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم فرمان با سیم باید تحقیقات بیشتری در مورد خطاهای انسان انجام شود.



شکل ۴ فرمان کمکی دیفرانسیل

۲-۱۱- کنترل خطا با روش ساختار متغیر

کنترل ساختار متغیر^۱ با حالت لغزشی دارای بسیاری از مزایا مانند پاسخ سریع، تحقق آسان و مقاومت در برابر اختلالات خارجی است. لی و همکاران یک کنترل کننده ساختار متغیر برای سیستم‌های فرمان با سیم با مشخصه رد اختلال ناشی از باد جانبی و جبران خطای چندگانه، ناشی از یک مدل بی نظیر از سیستم فرمان با سیم طراحی کردند. این کنترل کننده رواداری خطای غیرفعال می‌تواند با تخریب قابل قبول عملکرد، پایداری سیستم فرمان با سیم را حفظ کند [۳۱].

۳- نتیجه گیری

در این مقاله، خصوصیات مختلف کنترل رواداری خطا برای سیستم‌های فرمان با سیم بررسی شده است. از آنجا که سیستم فرمان با سیم یک سیستم حیاتی در خودرو است که نیاز زیادی برای اطمینان از عملکرد ایمنی، قابلیت تحمل در برابر خطا و هزینه دارد، بسیاری از روش‌های کنترل رواداری خطا مورد مطالعه قرار گرفته است. برخی از نتایج مثبت از روش‌های فوق به دست آمده است، اگرچه هنوز برای طراحی بیشتر در این زمینه مشکلات طراحی زیادی وجود دارد. دقت مدل‌سازی فرمان سیمی تأثیر زیادی روی کاهش سرعت و زمان کنترل خطا دارد. طراحی سیستم کنترل رواداری خطا برای سیستم‌های فرمان با سیم تا حد زیادی به اطلاعات خطای ارائه شده توسط برنامه کنترلی سیستم شناسایی و جداسازی خطا متکی است. عملکرد سیستم کنترل رواداری خطای فعال بسیار وابسته به دقت سیستم شناسایی و جداسازی خطا است.

۴- مراجع

- [11] He, L., Chen, G. Y., and Zheng, H. Y., "Fault tolerant control method of dual steering actuator motors for steer-by-wire system", *International Journal of Automotive Technology*, Vol.16, No. 6, pp. 977-987, (2015).
- [12] Song, D. Y., Li, Q., Zou, F. L., and Yuan, B., "Fault-tolerant control architecture for steering-by-wire system", *2008 Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, Vol. 1, IEEE, (2008).
- [13] Xu, F.-X., Liu, X.-H., Chen, W., Zhou, C., and Cao, B.-W., "The fractional order pid method with a fault tolerant module for road feeling control of steer-by-wire system", *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 6386513, (2018).
- [14] He, L., Zong, C., Chen, S., and Wang, C., "The tri-core fault-tolerant control for electronic control unit of steer-by-wire system", No. 2011-01-1006, SAE Technical Paper, (2011).
- [15] Hu, Z., Zhang, F., and Wei, Z., "Research on fault tolerant strategy and reliability of steering-by-wire", *International Journal of Modeling and Optimization*, Vol. 6, No.2, pp. 106, (2016).
- [16] Huang, C., Naghdy, F., and Du, H., "Delta operator-based fault estimation and fault-tolerant model predictive control for steer-by-wire systems", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 26, No. 5, pp. 1810-1817, (2017).
- [17] Huang, C., Naghdy, F., and Du, H., "Delta operator-based model predictive control with fault compensation for steer-by-wire systems", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, (2018).
- [18] Huang, C., Naghdy, F., and Du, H., "Observer-based fault-tolerant controller for uncertain steer-by-wire systems using the delta operator", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 23, No. 6, pp. 2587-2598, (2018).
- [19] Bian, C. T., Yin, G. D., Zhang, N., and Xu, L. W., "Fault tolerant control for steering by wire electric vehicle on the steering deadlocking condition with nonzero angle", *Dynamics of vehicles on roads and tracks vol 1: Proceedings of the 25th international symposium on dynamics of vehicles on roads and tracks (iavsd 2017), 14-18 august 2017, Rockhampton, Queensland, Australia*. CRC Press, (2017).
- [20] Fekih, A., and Devariste, D., "A fault-tolerant steering control design for automatic path tracking in autonomous vehicles", *2013 American Control Conference*, IEEE, (2013).
- [1] Alexander, A., and Majdanovic, D., "Design and implementation of a fault-tolerant drive-by-wire system", Master of Science Thesis in Embedded Electronics System Design, Department of Computer Science and Engineering Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden (2014).
- [2] Hayama, R., Higashi, M., Kawahara, S., Nakano, S., and Kumamoto, H., "Fault-tolerant automobile steering based on diversity of steer-by-wire, braking and acceleration", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 95, No. 1, pp. 10-17, (2010).
- [3] Wang, R., and Wang, J., "Passive actuator fault-tolerant control for a class of overactuated nonlinear systems and applications to electric vehicles." *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 62, No. 3, pp. 972-985, (2012).
- [4] Wada, N., Fujii, K., and Saeki, M., "Reconfigurable fault-tolerant control of a vehicle with a steer-by-wire system", *The 2012 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, IEEE, (2012).
- [5] Gao, T., Yin, S., Qiu, J., Gao, H., and Kaynak, O., "A partial least squares aided intelligent model predictive control approach", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 48, No. 11, pp. 2013-2021, (2017).
- [6] Zhang, J., Wang, H., Zheng, J., Cao, Z., Man, Z., Yu, M., and Chen, L., "Adaptive sliding mode-based lateral stability control of steer-by-wire vehicles with experimental validations", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 69, No. 9, pp. 9589-9600, (2020).
- [7] Wang, R., Jing, H., Hu, C., Chadli, M., and Yan, F., "Robust H_∞ output-feedback yaw control for in-wheel motor driven electric vehicles with differential steering", *Neurocomputing*, Vol. 173 pp. 676-684, (2016).
- [8] Huang, C., Naghdy, F., and Du, H., "Fault tolerant sliding mode predictive control for uncertain steer-by-wire system", *IEEE transactions on cybernetics*, H., Vol. 49, No. 1, pp. 261-272, (2017).
- [9] Huang, C., Naghdy, F., and Du, H., "Delta operator-based fault estimation and fault-tolerant model predictive control for steer-by-wire systems", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 26, No. 5, pp. 1810-1817, (2017).
- [10] Sun, Z., Zheng, J., Man, Z., Fu, M., and Lu, R., "Nested adaptive super-twisting sliding mode control design for a vehicle steer-by-wire system", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 122, pp. 658-672, (2019).

- [27] Kirli, A., Okwudire, C. E., and Ulsoy, A. G., "Limitations of torque vectoring as a backup safety strategy for steer-by-wire vehicles due to vehicle stability control", *Dynamic Systems and Control Conference*, Vol. 58271, American Society of Mechanical Engineers, (2017).
- [28] Tashiro, T., "Fault tolerant control using disturbance observer by mutual compensation of steer-by-wire and in-wheel motors", *2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, IEEE, (2018).
- [29] Wang, R., Jing, H., Hu, C., Chadli, M., and Yan, F., "Robust H_∞ output-feedback yaw control for in-wheel motor driven electric vehicles with differential steering", *Neurocomputing*, Vol. 173 pp. 676-684, (2016).
- [30] Wang, R., and Wang, J., "Fault-tolerant control with active fault diagnosis for four-wheel independently driven electric ground vehicles", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 60, No. 9, pp. 4276-4287, (2011).
- [31] Zou, F., Song, D., Li, Q., and Yuan, B., "A new intelligent technology of steering-by-wire system by variable structure control with sliding mode", *2009 International Joint Conference on Artificial Intelligence*, IEEE, (2009).
- [21] Härkegård, O., "Backstepping and control allocation with applications to flight control", Diss. Linköpings universitet, (2003).
- [22] András, M., and Gáspár, P., "Reconfigurable fault-tolerant control of in-wheel electric vehicles with steering system failure", *IFAC-Papers OnLine*, Vol. 48, No. 26, pp. 49-54, (2015).
- [23] Nobutaka, W., Fujii, K., and Saeki, M., "Reconfigurable fault-tolerant controller synthesis for a steer-by-wire vehicle using independently driven wheels", *Vehicle system dynamics*, Vol. 51, No. 9, pp. 1438-1465, (2013).
- [24] Yim, S., "Fault-tolerant yaw moment control with steer—and brake-by-wire devices", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 15, No. 3 pp. 463-468, (2014).
- [25] Han, Z., and Zhao, W., "Two-way H_∞ control method with a fault-tolerant module for steer-by-wire system", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 232, No. 1, pp. 42-56, (2018).
- [26] Akira, I., and Hayakawa, Y., "Practical fault-tolerant control to protect steer-by-wire systems against sensor faults", *2015 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, IEEE, (2015).