

کنترل بهینه مقاوم دینامیک عرضی وسایل نقلیه خودران با رویکرد برنامه‌ریزی پویای تطبیقی

محمد رضا ساطوری، ابوالحسن رزمی‌نیا و سیدآرش مرعشیان

کوچک، در کنار اغتشاش‌های خارجی مانند نیروی باد، بر پایداری وسیله نقلیه تأثیر منفی می‌گذارد.

یکی از روش‌های متداول و پرکاربرد که در کنترل وسایل نقلیه خودران استفاده می‌شود، کنترل فرمان اتوماتیک^۱ است. در [۳] از یک کنترل‌کننده PID تودرتو^۲ برای مسأله نگهداری خط^۳ استفاده شده است. ایراد عمده این روش دشواری تنظیم پارامترها و همچنین خارج شدن از کالیبراسیون طراحی شده است. در [۴] از یک کنترل‌کننده PD ترکیب شده با یک جبران ساز پیش‌فاز مرتبه دوم برای کنترل فرمان استفاده شده که به علت استفاده از سیستم تشخیص نگاه به پایین^۴ چندان عملیاتی نخواهد بود. در [۵] مسأله پایدارسازی دینامیک و تعقیب نرخ زاویه یاو دلخواه با استفاده از ترمزگیری دیفرانسیلی^۵ و کنترل فرمان جلو فعال^۶ انجام شده است. برخلاف مقالات مشابه سیستم‌های خودران، کنترل‌کننده در این مقاله با راننده تعامل داشته و به این علت که از مسیر مورد نظر اطلاعات کمی دارد از تکنیک کنترل پیش‌بین نیز استفاده شده است. برخلاف مقالات مذکور که اثبات پایداری داشتند، در [۶] و [۷] از کنترل‌کننده‌های فازی استفاده شده که به علت نداشتن اثبات پایداری قابل اطمینان نیستند.

در مقاله حاضر برخلاف [۸] که کنترل دینامیک طولی را بررسی کرده است ما کنترل دینامیک عرضی را مورد مطالعه قرار داده‌ایم. برای کنترل دینامیک عرضی نیز روش‌های مختلفی مانند H_∞ [۹]، تنظیم‌کننده مربعی خطی [۱۰]، کنترل مود لغزشی [۱۱] تا [۱۳] و کنترل پیش‌بین [۱۴] گزارش شده است. در بعضی مقالات مانند [۱۵] و [۱۶] نیز محققین از روش‌های مبتنی بر یادگیری تقویتی^۷ برای کنترل عرضی دینامیک خودرو استفاده کرده‌اند. با وجود این ما در این مقاله، برای اولین بار از ادغام روش برنامه‌ریزی پویای تطبیقی^۸ (ADP) و کنترل پس‌گام برای طراحی کنترل‌کننده استفاده کرده‌ایم. این روش این امکان را به دست می‌دهد که بدون خطی‌سازی کلی دینامیک سیستم، با استفاده از دینامیک غیر خطی خودرو کنترل‌کننده طراحی شود که در نتیجه خطاهای ناشی از خطی‌سازی دینامیک را حذف می‌کند. همچنین به علت قانون برخط به دست آمده با روش برنامه‌ریزی پویای تطبیقی، امکان مدیریت تغییر پارامترهای خودرو در طول زمان نیز وجود دارد. به علاوه با استفاده از نظریه کنترل بهینه و بازی‌های مجموع-صفر با کمترین تلاش کنترلی، همگرایی حالت‌ها به نقطه تعادل در بدترین حالت اغتشاش به دست می‌آید. برنامه‌ریزی پویای تطبیقی ادغام شده با بازی مجموع-صفر به

چکیده: در این مقاله کنترل دینامیک عرضی خودرو با سرعت طولی ثابت، با استفاده از برنامه‌ریزی پویای تطبیقی، کنترل پس‌گام و نظریه بازی‌های مجموع-صفر بررسی شده است. دینامیک به صورت غیر خطی در نظر گرفته شده و گشتاور فرمان به جای زاویه فرمان به عنوان ورودی قرار گرفته است. در روش ارائه شده ابتدا دینامیک عرضی خودرو به همراه دینامیک نگهداری خط ادغام شده و تشکیل یک زیرسیستم می‌دهند که ورودی آن زاویه فرمان است و انحنای جاده به عنوان اغتشاش در نظر گرفته شده است. با استفاده از برنامه‌ریزی پویای تطبیقی، شبکه‌های عصبی و نظریه بازی‌های مجموع-صفر برای این زیرسیستم، قانون کنترل بهینه استخراج شده و سپس نتیجه به زیرسیستم دوم که همان دینامیک زاویه فرمان خودرو است اعمال می‌گردد که در آن قانون کنترل با استفاده از روش کنترل پس‌گام استخراج می‌شود. در پایان به منظور مشاهده کارایی الگوریتم ارائه شده، روش مذکور بر روی یک مدل، شبیه‌سازی می‌شود.

کلیدواژه: بازی مجموع-صفر، برنامه‌ریزی پویای تطبیقی، کنترل بهینه، کنترل پیش‌گام، کنترل عرضی خودرو.

۱- مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی و هوشمند شدن وسایل مختلف، هوشمند کردن وسایل نقلیه نیز مورد توجه محققان و شرکت‌های بزرگ قرار گرفته است [۱]. این شرکت‌ها سالیانه مبالغ قابل توجهی را صرف تحقیق در مورد وسایل نقلیه خودران می‌کنند. از جمله مزایای وسایل خودران می‌توان به امنیت بالای سرنشینان، مصرف بهینه سوخت، کاهش تصادفات و کاهش آلودگی هوا اشاره کرد [۲]. برای خودران ساختن وسایل نقلیه باید برای هر دو حرکت طولی و عرضی وسیله، کنترل‌کننده طراحی نمود. با این که دو دینامیک طولی و عرضی خودرو با یکدیگر ترویج شده‌اند ولی در بیشتر مقالات با توجه به چند فرض ساده‌کننده معقول، این دو دینامیک از هم جدا در نظر گرفته شده و برای هر کدام از دینامیک‌های طولی و عرضی به طور مستقل کنترل‌کننده طراحی شده است. این جداسازی دینامیک‌های طولی و عرضی در واقع یک فرض ساده‌انگارانه است که در حضور نایقینی‌های ناشی از تغییر پارامترهای خودرو، می‌تواند مسأله را از وضعیت واقعی بسیار دور کند و همچنین فرض‌های زاویه فرمان و زاویه لغزش

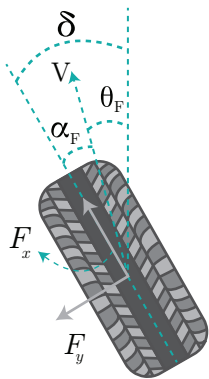
این مقاله در تاریخ ۵ آذر ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۲۹ تیر ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد.

محمد رضا ساطوری، آزمایشگاه سیستم‌های دینامیکی و کنترل، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران، (email: mrsatouri@gmail.com).

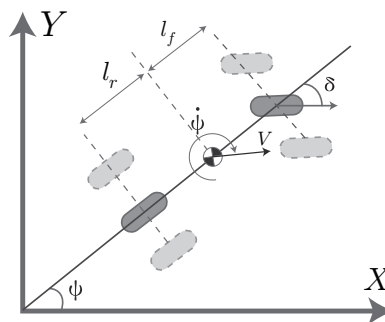
ابوالحسن رزمی‌نیا (نویسنده مسئول)، آزمایشگاه سیستم‌های دینامیکی و کنترل، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران، (email: razminia@pgu.ac.ir).

سیدآرش مرعشیان، آزمایشگاه سیستم‌های دینامیکی و کنترل، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران، (email: marashian.arash@gmail.com).

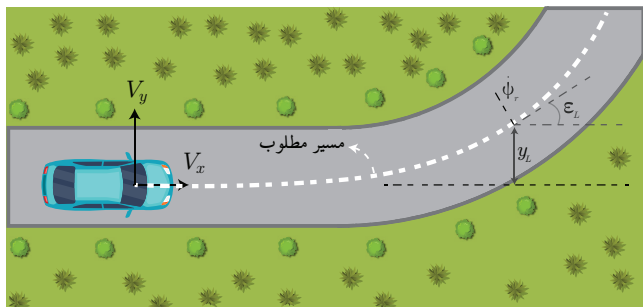
1. Automatic Steering Control
2. Nested PID
3. Lane Keeping
4. Look-Down Sensing System
5. Differential Braking
6. Active Front Steering
7. Reinforcement Learning
8. Adaptive Dynamic Programming



شکل ۲: زاویه لغزش تایر جلو.



شکل ۱: ساختار کلی خودرو.



شکل ۳: حالت نگهداری خط.

در این مقاله فرض شده که سرعت طولی ثابت است. با استفاده از این فرض در [۱۷] نشان داده شده که نیروهای عرضی وارد بر تایرهای جلو و عقب با زاویه لغزش نسبت مستقیم خواهند داشت به طوری که عبارت زیر برقرار است

$$F_f = \nu C_f (\delta - \theta_f) \tag{۵}$$

$$F_r = -\nu C_r \theta_r$$

که در آن C_f و C_r اعدادی ثابت متناسب با خصوصیات فیزیکی تایر هستند. همچنین در خودروهای خودران امکان کنترل مستقیم زاویه فرمان δ وجود ندارد و این پارامتر به نوبه خود با استفاده از گشتاور فرمان و رابطه زیر توصیف می‌شود

$$J_s R_s \ddot{\delta} + B_u R_s \dot{\delta} = T_c - T_s \tag{۶}$$

که J_s ، B_u و R_s به ترتیب نسبت کاهش، ممان اینرسی و ضریب تضعیف سیستم فرمان خودرو هستند. همچنین T_c ورودی کنترلی و T_s گشتاور خودترازشونده^۲ است که با رابطه زیر به دست می‌آید [۱۹]

$$T_s = \frac{\nu C_f \eta_t}{R_s} \left(\delta - \frac{v_y}{v_x} - \frac{l_f \dot{\psi}}{v_x} \right) \tag{۷}$$

که در آن η_t میزان عرضی از تایر است که با سطح جاده در تماس است. دینامیک تعقیب برای حالت نگهداری خط به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۰]

$$\begin{cases} \dot{y}_L = v_x \left(\frac{v_y}{v_x} + T_p \dot{\psi} + \psi_L \right) \\ \dot{\psi}_L = \dot{\psi} - v_x \rho \end{cases} \tag{۸}$$

جایی که ρ انحناى جاده است. در شکل ۳ پارامترهای دینامیک تعقیب به صورت شماتیک تعریف شده‌اند. هدف از تعریف دینامیک (۸) کنترل

دلیل انعطاف‌پذیری در ساختار این امکان را به دست می‌دهد که بتوان برای جاده‌های با انحنای پیچیده نیز قانون کنترلی طراحی کرد. ساختار مقاله به صورت زیر است: در بخش ۲ مدل خودرو و صورت مسأله بیان شده است. در بخش ۳ با استفاده از برنامه‌ریزی پویای تطبیقی و روش کنترل پس‌گام یک قانون کنترل طراحی می‌شود. در بخش ۴ نیز الگوریتم ارائه‌شده بر روی یک مدل پیاده‌سازی می‌شود تا کارایی الگوریتم نشان داده شود. نهایتاً در بخش ۵ نتیجه‌گیری کلی و نکاتی برای کارهای آتی ارائه شده است.

۲- مدل خودرو و بیان مسأله

از آنجایی که ارائه مدل دقیق ریاضی از سیستم خودرو پیچیده می‌باشد، فرضیات ساده‌کننده‌ای برای سیستم مذکور در نظر گرفته شده و از دینامیک‌های رول، پیچ و یاب خودرو صرف نظر گشته است. هدف اصلی طراحی کنترل‌کننده، کنترل حرکات طولی و عرضی خودروست که در این بخش به مدل‌سازی خطی تک‌محور^۱ خودرو پرداخته شده است. ساختار کلی خودرو به همراه متغیرهای مورد مطالعه در شکل ۱ آمده است. با استفاده از قانون دوم نیوتن در راستای محور عرضی می‌توان نوشت

$$m a_y = F_f + F_r \tag{۱}$$

که در آن a_y شتاب عرضی خودرو و F_f و F_r نیز به ترتیب نیروهای عرضی وارد بر چرخ‌های جلو و عقب خودرو هستند. شتاب عرضی از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۷]

$$a_y = \dot{v}_y + v_x \dot{\psi} \tag{۲}$$

جایی که سرعت طولی و عرضی خودرو و زاویه یاب خودرو به ترتیب با v_x ، v_y و ψ نشان داده شده است. دینامیک زاویه یاب خودرو نیز عبارتست از [۱۸]

$$I_z \ddot{\psi} = F_f l_f - F_r l_r \tag{۳}$$

که I_z ممان اینرسی خودرو حول محور سمتی و l_f و l_r نیز فاصله محور تایرهای جلو و عقب از مرکز جرم خودرو هستند. در شکل ۲، δ زاویه فرمان و θ_f زاویه بین بردار سرعت و جهت سرعت طولی تایر جلو است. θ_r نیز به طریق مشابه برای تایر عقب تعریف می‌شود. این زوایا با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آیند [۱۷]

$$\theta_f = \tan^{-1} \frac{v_y + l_f \dot{\psi}}{v_x}$$

$$\theta_r = \tan^{-1} \frac{v_y - l_r \dot{\psi}}{v_x} \tag{۴}$$

که γ ضریب تضعیف، α یک اسکالر مثبت و Q ماتریس نیمه‌معین مثبت است که با بزرگ کردن درایه‌های قطری آن می‌توان فرایند همگرایی به نقطه تعادل را تسریع بخشید. با توجه به رابطه بالا، تابع هزینه بدین صورت تعریف خواهد شد

$$V = \int_t^{\infty} (x^T Qx + \alpha^T \|\delta\|^r - \gamma^T \|\rho\|^r) d\tau \quad (۱۳)$$

ورودی کنترلی قصد کمینه‌سازی J و اغتشاش قصد بیشینه‌سازی آن را دارد. در نتیجه می‌توان این مسئله کنترل بهینه مقاوم را به صورت یک بازی مجموع- صفر ترجمه کرده و با استفاده از کنترل کمینه- بیشینه^۱ به حل آن پرداخت. بدین منظور، ابتدا همیلتونین را تشکیل می‌دهیم

$$\mathcal{H} = x^T Qx + \alpha^T \|\delta\|^r - \gamma^T \|\rho\|^r + (\nabla V)^T \dot{x} \quad (۱۴)$$

برای این که بازی مجموع- صفر ذکر شده دارای نقطه تعادل یکتا باشد، فرض می‌کنیم که بهره L_r [۲۱] سیستم (۱۰)، کمتر یا مساوی γ است [۲۲]. مقدار تابع هزینه در نقطه تعادل برابر خواهد بود با

$$V^* = \min_{\delta} \max_{\rho} \int_t^{\infty} (x^T Qx + \alpha^T \|\delta\|^r - \gamma^T \|\rho\|^r) d\tau \quad (۱۵)$$

به دلیل کران‌دار نبودن ورودی، با اعمال شرایط ایستا^۲ [۲۳] به همیلتونین مقدار بهینه ورودی و بدترین حالتی که اغتشاش به دینامیک اعمال خواهد کرد به صورت زیر به دست می‌آید

$$\begin{cases} \delta^* = -\frac{1}{\gamma} \alpha^{-r} G^T \nabla V \\ \rho^* = \frac{1}{\gamma} \gamma^{-r} H^T \nabla V \end{cases} \quad (۱۶)$$

۱-۳ طراحی قانون کنترل برای زیرسیستم اول با استفاده از برنامه‌ریزی پویای تطبیقی

برای داشتن مقادیر بهینه در (۱۶) باید مقدار گرادیان تابع هزینه در دست باشد اما به دلیل LQ نبودن ساختار مسئله، فرم کلی تابع هزینه قابل حدس نیست و نیز با توجه به نوع تعریف (۱۳)، محاسبه آن با پیچیدگی زیادی همراه خواهد بود. برای حل این مشکل از روش برنامه‌ریزی پویای تطبیقی استفاده می‌شود. برای این منظور، ابتدا تابع هزینه و مقادیر بهینه با استفاده از شبکه‌های عصبی به صورت زیر تخمین زده می‌شوند

$$\begin{cases} V = w_v^T \phi_v(x) + \varepsilon_v(x) \\ \delta = w_a^T \phi_a(x) + \varepsilon_a(x) \\ \rho = w_w^T \phi_w(x) + \varepsilon_w(x) \end{cases} \quad (۱۷)$$

که w ، ϕ و ε ها به ترتیب، وزن‌های ایده‌آل، توابع فعال‌ساز و خطاهای تخمین شبکه‌های عصبی هستند. از آنجایی که وزن‌های ایده‌آل در (۱۵) نامعلوم هستند از شبکه‌های عصبی نقاد- عملگر^۳ برای تخمین وزن‌های ایده‌آل استفاده می‌شود

$$\begin{cases} \hat{V} = \hat{w}_v^T \phi_v(x) \\ \hat{\delta} = \hat{w}_a^T \phi_a(x) \\ \hat{\rho} = \hat{w}_w^T \phi_w(x) \end{cases} \quad (۱۸)$$

1. Min-Max Control
2. Stationary Condition
3. Actor-Critic

فاصله عرضی خودرو (y_L) و جهت‌گیری مناسب در راستای مسیر مطلوب بوده است. حال با استفاده از معادلات مطرح شده می‌توان مسئله تعقیب مسیر دلخواه را با خودروی با سرعت طولی ثابت و با ورودی کنترلی گشتاور فرمان به صورت زیر بیان کرد

$$\begin{cases} \dot{v}_y = \frac{\gamma C_f}{m} (\delta - \tan^{-1} \frac{v_y + l_f \dot{\psi}}{v_x}) - v_x \dot{\psi} - \gamma \frac{C_r}{m} \tan^{-1} \frac{v_y - l_r \dot{\psi}}{v_x} \\ \ddot{\psi} = \frac{\gamma C_f l_f}{I_z} (\delta - \tan^{-1} \frac{v_y + l_f \dot{\psi}}{v_x}) + \frac{\gamma C_r l_r}{I_z} \tan^{-1} \frac{v_y - l_r \dot{\psi}}{v_x} \\ \delta = \frac{T_c - T_s - B_u R_s \dot{\delta}}{J_s R_s} \\ \dot{y}_L = v_x (\frac{v_y}{v_x} + T_p \dot{\psi} + \varepsilon_L) \\ \dot{\varepsilon}_L = \dot{\psi} - v_x \rho \end{cases} \quad (۹)$$

در ادامه، انحنای جاده به عنوان اغتشاش در نظر گرفته شده و سعی می‌شود با استفاده از کنترل کمینه- بیشینه قانونی برای پایدارسازی بهینه دینامیک عرضی خودرو ارائه گردد.

۳- طراحی کنترل کننده

برای حل مسئله بیان شده در بخش پیشین، از روش طراحی پس‌گام استفاده می‌کنیم. ابتدا آن را به دو زیرسیستم تقسیم کرده و برای زیرسیستم اول با استفاده از برنامه‌ریزی پویای تطبیقی یک کنترل کننده حالت طراحی می‌کنیم. سپس این کنترل کننده را به زیرسیستم دوم اعمال کرده تا قانون کنترلی برای سیستم کلی حاصل شود. بدین منظور زیرسیستم اول به صورت زیر نوشته می‌شود

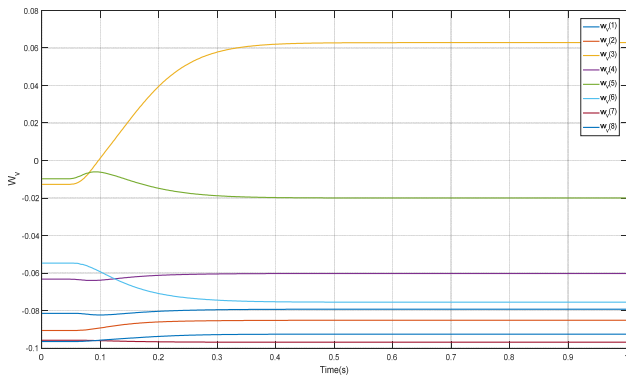
$$\dot{x} = f(x) + \delta g + \rho h \quad (۱۰)$$

که در رابطه بالا $x = [v_y \ \dot{\psi} \ y_L \ \varepsilon_L]^T$ و $f = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4]^T$

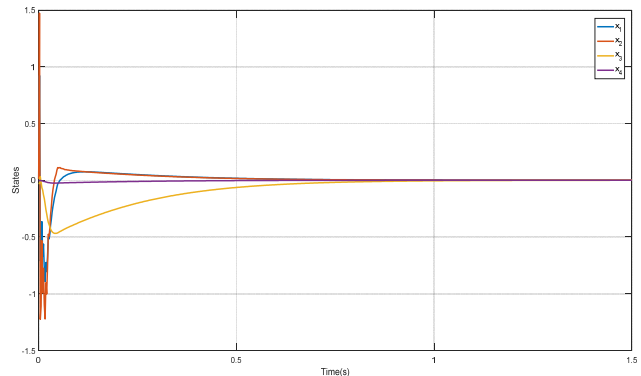
$$\begin{cases} f_1 = \frac{\gamma C_f}{m} \tan^{-1} \frac{v_y + l_f \dot{\psi}}{v_x} - v_x \dot{\psi} - \gamma \frac{C_r}{m} \tan^{-1} \frac{v_y - l_r \dot{\psi}}{v_x} \\ f_2 = \frac{\gamma C_f l_f}{I_z} \tan^{-1} \frac{v_y + l_f \dot{\psi}}{v_x} + \frac{\gamma C_r l_r}{I_z} \tan^{-1} \frac{v_y - l_r \dot{\psi}}{v_x} \\ f_3 = v_y + T_p v_x \dot{\psi} + v_x \varepsilon_L \\ f_4 = \dot{\psi} \end{cases} \quad (۱۱)$$

و $g = [\gamma C_f / m \ \gamma C_f l_f / I_z \ 0 \ 0]^T$ و $h = [0 \ 0 \ 0 \ -v_x]^T$ حال برای پایدارسازی سیستم با کمترین تلاش کنترلی و در حضور اغتشاش، شاخص عملکردی به صورت زیر بیان می‌شود

$$J = \int_t^{\infty} (x^T Qx + \alpha^T \|\delta\|^r - \gamma^T \|\rho\|^r) dt \quad (۱۲)$$



شکل ۶: همگرایی شبکه عصبی نقاد، مربوط به تابع هزینه بهینه.



شکل ۴: همگرایی حالت‌ها.

۲-۳ طراحی قانون کنترل برای زیرسیستم دوم با روش پس‌گام

پس از همگرایی وزن‌های شبکه عصبی در مرحله قبل به مقادیر ایده‌آل، قانون کنترل بهینه برای زاویه فرمان خودرو δ^* حاصل می‌شود. حال این قانون کنترل به زیرسیستم دوم که همان دینامیک زاویه فرمان خودرو است اعمال می‌گردد تا گشتاور فرمانی که موجب تولید این زاویه می‌شود محاسبه گردد. بدین منظور از روش کنترل پس‌گام استفاده می‌شود

$$T_c = J_s R_s (\delta^* - k_1(\delta - \delta^*)) + B_u R_s \dot{\delta} + T_s - k_r(k_1 + 1)(\delta - \delta^*) \quad (23)$$

که k_1 و k_r ضرایب ثابت مربوط به روش پس‌گام هستند. حال با استفاده از این قانون کنترل، دینامیک عرضی خودرو در عین کمینه‌کردن شاخص هزینه، پایدار شده و عملیات نگهداری خط نیز به وقوع می‌پیوندد.

۴- شبیه‌سازی

در این بخش برای نشان دادن کارایی و سرعت الگوریتم ارائه‌شده، روش مذکور بر روی خودرویی در دو جاده بدون انحنای با انحنای ثابت پیاده می‌شود. مشخصات خودرو به صورت زیر می‌باشد

$$C_f = 170280, C_r = 195930, I_f = 1.5, I_r = 1.14, v_x = 12, T_p = 2$$

پارامترهای تابع هزینه نیز به قرار زیر تعریف می‌شوند

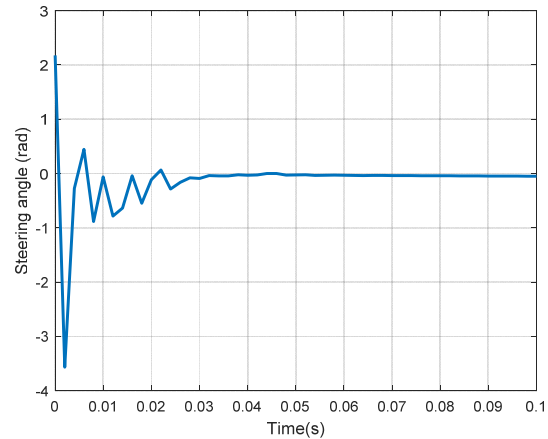
$$Q = \text{diag}(10, 20, 30, 40), \alpha = 20, \gamma = 0.6$$

در حالت اول ابتدا فرض می‌کنیم که انحنای جاده $\rho = 0$ است. با تعریف $x = [v_y, \psi, y_L, \varepsilon_L]^T$ ، توابع فعال‌ساز را با توجه به ساختار تابع هزینه و زاویه فرمان به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$\varphi_v = [x_1^2, x_2^2, x_3^2, x_1 x_2, x_1 x_3, x_2 x_3, x_1 x_4, x_2 x_4, x_3 x_4]^T$$

$$\varphi_a = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_1^2, x_2^2, x_3^2, x_1 x_2]^T$$

بعد از همگرایی الگوریتم، حالت‌های سیستم به صورت شکل ۴ پایدار می‌شوند. قانون کنترلی نیز در شکل ۵ نشان داده شده که به سرعت میزان انحراف را صفر کرده است. با توجه به شکل ۶ وزن‌های شبکه عصبی نقاد که وظیفه تخمین‌زدن مقدار بهینه تابع هزینه را داشتند در کمتر از ۳ ثانیه همگرا شده‌اند. همانند وزن‌های شبکه عصبی نقاد، وزن‌های شبکه عصبی عملگر که قانونکنترل بهینه را تخمین می‌زند، نیز در کمتر از ۳ ثانیه همگرا شده‌اند (شکل ۷).



شکل ۵: قانون کنترلی بهینه.

با جایگذاری تخمین‌های مقادیر بهینه در همیلتونین داریم

$$\hat{w}_v^T \nabla \varphi_v \dot{x} + x^T Q x + \alpha^T \|\delta\|^2 - \gamma^T \|\rho\|^2 = e_v \quad (19)$$

اگر مقادیر بهینه واقعی را در همیلتونین جایگذاری کرده بودیم حاصل صفر می‌شد اما چون تخمین‌های مقادیر بهینه در همیلتونین قرار گرفته‌اند حاصل غیر صفر و برابر خطای e_v شده است. حال با استفاده از روش گرادینان نزولی نرمال‌شده [۲۴]، \hat{w}_v را به صورت زیر به روز رسانی کرده تا خطای e_v به صفر میل کند

$$\dot{\hat{w}}_v = -\beta_v \frac{\eta_v}{(\eta_v \eta_v^T + 1)^r} e_v \quad (20)$$

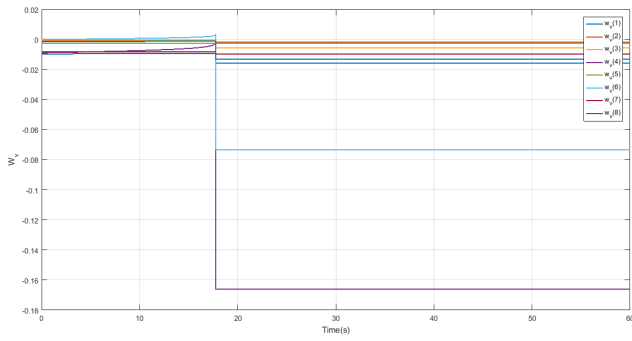
که در آن $\eta_v = \nabla \varphi_v \dot{x}$. حال اگر β ها را نرخ یادگیری در نظر بگیریم با استفاده از (۱۶) و (۱۸) قوانین به روز رسانی برای وزن‌های دیگر نیز به صورت زیر به دست می‌آیند

$$\begin{cases} \dot{\hat{w}}_a = -\beta_a \varphi_a e_a \\ \dot{\hat{w}}_w = -\beta_w \varphi_w e_w \end{cases} \quad (21)$$

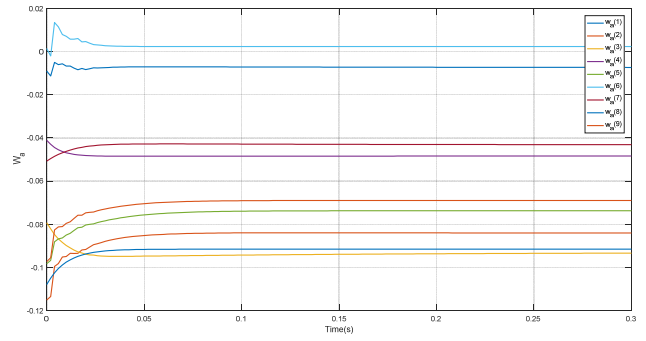
جایی که

$$\begin{cases} \dot{\hat{w}}_a^T \varphi_a + \frac{1}{\gamma} \alpha^{-1} \nabla V^T G = e_a \\ \dot{\hat{w}}_w^T \varphi_w - \frac{1}{\gamma} \gamma^{-1} \nabla V^T H = e_w \end{cases} \quad (22)$$

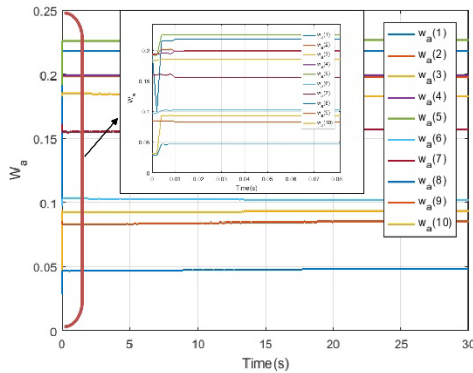
در [۲۲] نشان داده شده که تحت این قوانین به روز رسانی، وزن‌های شبکه عصبی به مقادیر ایده‌آل همگرا خواهند شد.



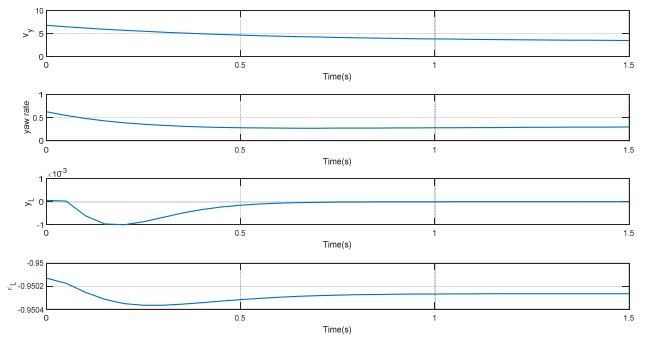
شکل ۱۰: همگرایی وزن‌های شبکه عصبی مربوط به تابع هزینه بهینه.



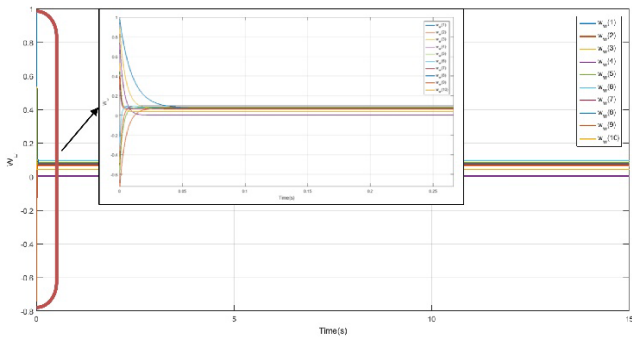
شکل ۷: همگرایی شبکه عصبی عملگر مربوط به زاویه فرمان بهینه.



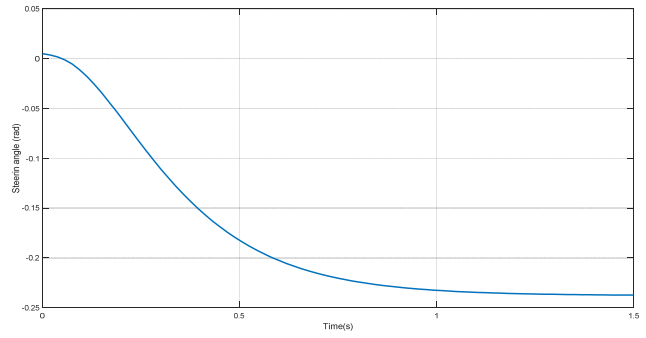
شکل ۱۱: همگرایی شبکه عصبی مربوط به زاویه فرمان.



شکل ۸: همگرایی حالت‌های سیستم.



شکل ۱۲: همگرایی شبکه عصبی مربوط به اغتشاش.



شکل ۹: زاویه فرمان.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار با ادغام روش‌های برنامه‌ریزی پویای تطبیقی، کنترل پس‌گام و کنترل کمینه- بیشینه، قانونی برای کنترل دینامیک عرضی وسایل نقلیه خودران ارائه شد. به علت استفاده از دینامیک غیر خطی خودرو، خطاهای ناشی از خطی‌سازی دینامیک از بین رفته است و با استفاده از کنترل بهینه علاوه بر پایداری سیستم، با کمترین تلاش کنترلی، حالت‌ها به نقطه تعادل همگرا شده‌اند. در مسایل واقعی، همواره کران بالایی برای زاویه فرمان وجود داشته و نرخ تغییر زاویه فرمان نیز نمی‌تواند از حد مشخصی فراتر رود. این دو مورد می‌تواند به عنوان کارهای پژوهشی آینده مد نظر قرار گیرد.

مراجع

[1] K. Jo, J. Kim, D. Kim, C. Jang, and M. Sunwoo, "Development of autonomous car-part i: distributed system architecture and development process," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 61, no. 12, pp. 7131-7140, Dec. 2014.

[2] K. Bimbrav, "Autonomous cars: past, present and future a review of the developments in the last century, the present scenario and the expected future of autonomous vehicle technology," in *Proc.*

در حالت بعد انحنای جاده $\rho = 0.03$ فرض می‌شود. در این حالت توابع فعال‌ساز را بازتعریف می‌کنیم

$$\varphi_v = [x_1^T, x_r^T, x_f^T, x_s^T, x_1 x_r, x_1 x_f, x_1 x_s, x_r x_f, x_r x_s]^T$$

$$\varphi_a = [x_1, x_r, x_f, x_s, x_1^2, x_r^2, x_f^2, x_s^2, x_1 x_r, x_1^2 x_r, x_r^2 x_1]^T$$

و تعریف می‌کنیم $\varphi_o = \varphi_a$. مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده در این حالت نیز متغیرهای حالت سیستم را به نقاط تعادل می‌رساند (شکل ۸). زاویه فرمان نیز در این حالت به صورت شکل ۹ خواهد شد. شبکه عصبی نقاد فرایند یادگیری خود را به صورت شکل ۱۰ انجام داده است و همچنین همگرایی وزن‌های شبکه‌های عصبی عملگر که وظیفه تخمین ورودی کنترلی بهینه و بدترین حالت اغتشاش را دارند در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده‌اند. همان گونه که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، بدترین حالت اغتشاش، تابعی از حالت‌ها شده در حالی که اغتشاش برابر یک عدد ثابت در نظر گرفته شده است. چون این اغتشاش که همان انحنای جاده می‌باشد نامعلوم است، به همین خاطر کنترل‌کننده کمینه- بیشینه، بدترین حالت اغتشاشی که تابع هزینه (۱۲) را بیشینه می‌کند در نظر گرفته و برای آن حالت کنترل‌کننده طراحی می‌کند. در نتیجه قانون کنترلی به دست آمده بسیار محافظه کارانه است.

- [17] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, Springer, 2005.
- [18] S. Mammar and D. Koeing, "Vehicle handling improvement by active steering," *Vehicle System Dynamics: International J. of Vehicle Mechanics and Mobility*, vol. 38, no. 3, pp. 211-242, Aug. 2002.
- [19] H. Pacejka, *Tyre and Vehicle Dynamics*, Butterworth-Heinemann, 2012.
- [20] Z. Chu, Y. Sun, C. Wu, and N. Sepehri, "Active disturbance rejection control applied to automated steering for lane keeping in autonomous vehicles," *Control Engineering Practice*, vol. 74, pp. 13-21, May 2018.
- [21] A. J. van der Schaft, "L2-gain analysis of nonlinear systems and nonlinear state feedback H_∞ control," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 37, no. 6, pp. 770-784, Jun. 1992.
- [22] Q. Wei, R. Song, and P. Yan, "Data-driven zero-sum neuro-optimal control for a class of continuous-time unknown nonlinear systems with disturbance using ADP," *IEEE Trans. on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 444-458, Feb. 2016.
- [23] F. L. Lewis, D. Vrabie, and V. L. Syrmos, *Optimal Control*, John Wiley & Sons, 2012.
- [24] D. P. Mandic, A. I. Hanna, and M. Razaz, "A normalized gradient descent algorithm for nonlinear adaptive filters using a gradient adaptive step size," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 8, no. 11, pp. 295-297, Nov. 2001.
- [3] R. Marino and S. Scalzi, "Nested PID steering control for lane keeping in autonomous vehicles," *Control Engineering Practice*, vol. 19, no. 12, pp. 1459-1467, Dec. 2011.
- [4] J. Guldner, H. Tan, and S. Patwardhan, "Analysis of automatic steering control for highway vehicles with look-down lateral reference systems," *Vehicle System Dynamics*, vol. 26, no. 4, pp. 243-269, Jul. 1996.
- [5] S. D. Cairano, H. E. Tseng, D. Bernardini, and A. Bemporad, "Vehicle yaw stability control by coordinated active front steering and differential braking in the tire sideslip angles domain," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 4, pp. 1236-1248, Jul. 2013.
- [6] S. Wu, H. Chiang, J. Perng, C. Chen, B. Wu, and T. Lee, "The heterogeneous systems integration design and implementation for lane keeping on a vehicle," *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 246-263, Jun. 2008.
- [7] S. Chaib, M. S. Netto, and S. Mammar, " H_∞ adaptive, PID and fuzzy control: a comparison of controllers for vehicle lane keeping," in *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp.*, pp. 139-144, Parma, Italy, 14-17, Jun. 2004.
- [8] S. Li, F. Gao, D. Cao, and K. Li, "Multiple-model switching control of vehicle longitudinal dynamics for platoon-level automation," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4480-4492, Jun. 2016.
- [9] C. Latrach, M. Kchaou, A. E. Hajjaji, and A. Rahbi, "Robust H_∞ fuzzy networked control for vehicle lateral dynamics," in *Proc. of IEEE Annual Conf. on Intelligent Transportation Systems*, pp. 905-910, The Hague, Netherlands, 6-9 Oct. 2013.
- [10] R. Wang, Y. Sun, M. Lin, and H. Zhang, "Research on bus roll stability control based on LQR," in *Proc. of Int. Conf. on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City*, pp. 622-625, H along Bay, Vietnam, 19-20 Dec. 2015.
- [11] G. Tagne, R. Talj, and A. Charara, "Higher-order sliding mode control for lateral dynamics of autonomous vehicles, with experimental validation," in *Proc. of IEEE Intelligent Vehicles Symp.*, pp. 678-683, Gold Coast, Australia, 23-26 Jun. 2013.
- [12] C. Hatipoglu, U. Ozguner, and K. Redmill, "Automated lane change controller design," *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 13-22, Mar. 2003.
- [13] J. Jiang and A. Astolfi, "A lateral control assistant for the dynamic model of vehicles subject to state constraints," in *Proc. of IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 244-249, Melbourne, Australia, 12-15 Dec. 2017.
- [14] P. Falcone, F. Borrelli, J. Asgari, H. Tseng, and D. Hrovat, "Predictive active steering control for autonomous vehicle systems," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 566-580, May 2007.
- [15] S. Y. Oh, J. H. Lee, and D. H. Choi, "A new reinforcement learning vehicle control architecture for vision-based road following," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 3, pp. 997-1005, May 2000.
- [16] S. S. Shwartz, S. Shammah, and A. Shashua, Safe, Multi-Agent, Reinforcement Learning for Autonomous Driving, arXiv: 1610.03295, 2016.

محمدرضا ساپوری در سال ۱۳۹۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه خلیج فارس بوشهر با گرایش مخابرات و در سال ۱۳۹۷ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه تهران با گرایش کنترل دریافت نمود. از سال ۱۳۹۷ نامبرده به عنوان دستیار تحقیقاتی در آزمایشگاه سیستم‌های دینامیکی و کنترل (DSC) در دانشگاه خلیج فارس مشغول به کار است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: کنترل بهینه، نظریه بازی‌ها، یادگیری تقویتی و کاربردهای آن و بهینه‌سازی.

ابوالحسن رزمی‌نیا مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در مهندسی برق-کنترل به ترتیب از دانشگاه شیراز (سال ۱۳۸۳) و دانشگاه صنعتی شاهرود (سال ۱۳۸۵) دریافت نمود و پس از آن در سال ۱۳۹۰ موفق به اخذ مدرک دکتری خود از دانشگاه تربیت مدرس در سال ۱۳۹۰ گردید. ایشان از همان سال تاکنون عضو هیأت علمی دانشگاه خلیج فارس بوده و مسؤول آزمایشگاه تحقیقاتی سیستم‌های دینامیکی و کنترل (DSC) می‌باشد. زمینه‌های اصلی پژوهشی وی عبارتند از: کنترل بهینه، شناسایی سیستم، کاربرد تئوری کنترل در پزشکی و خودروهای خودران.

سیدآرش مرعشیان تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی برق در سال ۱۳۹۸ از دانشگاه خلیج فارس بوشهر به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشجوی کارشناسی ارشد کنترل همین دانشگاه است. نامبرده از سال ۱۳۹۵ عضو آزمایشگاه تحقیقاتی DSC می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: کنترل بهینه سیستم‌های دینامیکی، کنترل سیستم‌های غیرخطی و شناسایی سیستم می‌باشد.