

کنترل هماهنگ یک تراکتور- تریلر و ماشین برداشت محصول کمباین با استفاده از کنترل مقاوم تطبیقی عصبی

پریسا مهرمحمدی^۱، خوشنام شجاعی^۲

^۱ کارشناس ارشد برق، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران،

parisa_mehrmohammadi@sel.iaun.ac.ir

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، shojaei@pel.iaun.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۳۱

ویرایش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۸

دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۰۵

چکیده: در این مقاله، مسئله‌ی کنترل هماهنگ یک سیستم تراکتور- تریلر و یک ماشین برداشت محصول کمباین به کمک روش رهبر- پیرو در حضور عدم قطعیت‌های مدل با هدف ردیابی مسیر زمانی مرجع برای اولین بار مورد توجه قرار می‌گیرد. ابتدا، یک مدل دینامیکی مرتبه دوم رهبر- پیرو به صورت اوپلر- لاگرانژ توسعه می‌یابد که تمام خواص ساختاری مدل دینامیکی را حفظ می‌کند. سپس، کنترل ربات تراکتور- تریلر به نحوی انجام می‌گیرد که فاصله و جهت نسبی مطلوب با ماشین جمع‌آوری محصول، حفظ شود. برای این منظور، طراحی کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی به روش مقاوم تطبیقی عصبی انجام می‌گیرد. در این طرح کنترلی، نامعینی‌های پارامتری مانند جرم، ممان اینرسی و پارامترهای فیزیکی دیگر توسط شبکه‌ی عصبی تابع پایه شعاعی تخمین زده می‌شوند و سپس نامعینی‌های غیرپارامتری از قبیل دینامیک‌های مدل نشده سیستم، اصطکاک و لغزش چرخ‌ها توسط جمله کنترلی مقاوم تطبیقی جبران می‌گردند. به علاوه، نشان داده می‌شود که کنترل‌کننده خطاهای ردیابی را وادار می‌کند که به توپ کوچکی اطراف مبدأ در حضور نامعینی‌ها میل کنند. پایداری کنترل‌کننده پیشنهادی به صورت تحلیلی و بر اساس تئوری لیاپانوف اثبات می‌شود. نهایتاً، طرح کنترلی پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و اعتبار آن نشان داده خواهد شد و با کنترل‌کننده‌ی پس‌گام مقایسه می‌شود.

کلمات کلیدی: تراکتور- تریلر، روش کنترل رهبر- پیرو، شبکه عصبی تابع پایه شعاعی، کنترل‌کننده پس‌گام، کنترل مقاوم تطبیقی عصبی، ماشین برداشت محصول کمباین.

Coordinated Control of a Tractor-Trailer and a Combine Harvester by Neural Adaptive Robust Control

Parisa Mehrmohammadi, Khoshnam Shojaei

Abstract: In this paper, the coordinated control problem of a tractor-trailer and a combine harvester is taken into account in the presence of model uncertainties by using the leader-following approach to track a reference trajectory for the first time. At first, a second-order leader-follower dynamic model is developed in Euler-Lagrange form which preserves all structural properties of the dynamic model. Then, the tractor-trailer is controlled to maintain a separation distance and a relative bearing angle with respect to the combine harvester. For this purpose, the controller is designed by using an adaptive robust neural network technique. In this control scheme, the parametric uncertainties such as masses, the moments of inertia and other physical parameters are estimated by a radial basis function neural network (RBFNN) and, then, nonparametric uncertainties such as unmodeled dynamics, friction and the slippage of wheels are compensated by

the adaptive robust control term. Moreover, it will be shown that the controller makes the tracking errors converge to a small bound around the origin in the presence of uncertainties. The stability of the proposed controller is demonstrated by an analysis based on Lyapunov theory. Finally, the proposed control scheme is simulated by MATLAB software and its validity will be shown and it is compared with the backstepping controller.

Keywords: Backstepping controller, combine harvester, leader-follower control, neural adaptive robust control, radial basis function neural network, tractor-trailer.

می‌شود. تحلیل و کنترل این گونه ربات‌ها از مسائل چالش‌برانگیز در رباتیک است. مدل‌سازی و کنترل یک سیستم تراکتور- تریلر تحریک ناقص در مرجع [۱۱]، ارائه شده است. در [۱۲]، از یک قانون کنترل فیدبک جهت حرکت رو به عقب ربات متحرک چرخ‌دار به همراه تعدادی تریلر استفاده شده است. در [۱۳]، از یک کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین برای تعقیب مسیر یک تراکتور- تریلر استفاده شده است. کنترل مکان و جهت‌گیری نسبی مجموعه‌ای از ربات‌ها و هدایت گروهی آن‌ها در قالب یک واحد هماهنگ و منظم، کنترل آرایش‌بندی ربات‌ها نامیده می‌شود. روش‌های گوناگونی برای کنترل شکل آرایش‌بندی ربات‌های هوشمند به کار گرفته شده است که یکی از روش‌های مهم در زمینه‌ی حفظ آرایش‌بندی ربات‌های متحرک، کنترل آرایش‌بندی رهبر- پیرو^۳ [۱۴]، می‌باشد. در آرایش با پیکربندی رهبر- پیرو، یک یا چند ربات به عنوان رهبر که مسئول هدایت آرایش‌بندی هستند، انتخاب می‌شوند و منحنی مطلوبی را دنبال می‌نمایند. ربات‌های پیرو به گونه‌ای کنترل می‌شوند که فاصله و زاویه‌ی نسبی مطلوب نسبت به ربات رهبر حفظ شود. مزیت روش پیروی از رهبر، درک و پیاده‌سازی راحت آن است. در [۱۵]، کنترل آرایش‌بندی شبکه عصبی گروهی از ربات‌های تراکتور- تریلر ارائه شده که از روش رهبر- پیرو برای آرایش‌بندی استفاده می‌شود. در [۱۶]، کنترل آرایش‌بندی سیستم تراکتور- تریلر همه‌جهته^۴ روی محور ارائه شده است که پارامترهای طراحی کنترل، بهینه شده‌اند. در مرجع [۱۷]، از ترکیب تکنیک کنترلی خطی‌سازی فیدبک با تابع پتانسیل به منظور آرایش‌بندی رهبر- پیرو ربات‌ها در حضور موانع محیطی استفاده شده است. با استفاده از کنترل مقاوم می‌توان نامعینی‌های غیرپارامتری سیستم را جبران کرد. عیبی که این کنترل‌کننده دارد این است که همیشه برای بدترین حالت طراحی می‌شود و باعث می‌شود که در سیگنال‌های کنترلی پدیده‌ی نوسانات ناخواسته ایجاد شود که دینامیک‌های مدل نشده در فرکانس بالا را تحریک می‌کند. جهت رفع این عیب از کنترل‌کننده‌ی مقاوم تطبیقی استفاده می‌شود تا بتوان باند بالای نامعینی‌ها را تخمین زد. در مرجع [۱۸]، یک کنترل‌کننده‌ی خطی‌سازی فیدبک به کار گرفته شده است که از تکنیک تطبیقی مقاوم برای تخمین باند بالای نامعینی‌ها استفاده کرده است. متأسفانه، مقالات قابل توجهی برای کنترل

۱- مقدمه

توسعه‌ی ربات‌های متحرک چرخ‌دار کشاورزی^۱، همچنین استفاده و کنترل ربات‌های همکار در این زمینه سبب کاهش حجم کار اپراتورها، افزایش بهره‌وری نیروی کار، سرعت در انجام کارها و کاهش هزینه‌ی تولیدی و مزایایی از این قبیل شده است. به همین سبب، علاقه به تحقیقات در زمینه‌ی ربات‌های متحرک چرخ‌دار کشاورزی جهت تولید بیشتر و حذف بیش‌تر نیروهای انسانی، افزایش یافته است [۱]-[۴]. یکی از مهم‌ترین کاربردهای این ربات‌ها در زمینه‌ی کشاورزی، عملیات برداشت محصول می‌باشد. ربات‌های متحرک چرخ‌دار به دلیل ساختار و استفاده از چرخ‌های استاندارد در آن‌ها، مقید به قيود غیرهولونومیکی هستند. این قيود به دلیل عدم لغزش جانبی و غلتش خالص چرخ‌ها در حرکت رو به جلو ایجاد می‌شوند. این قیدها مسأله مدل‌سازی ربات‌ها را پیچیده‌تر می‌کنند. همچنین، طبق مرجع [۵]، قيود غیرهولونومیک سبب افزایش پیچیدگی طراحی کنترل این ربات‌ها می‌شود. در مرجع [۶]، خلاصه‌ای از روش‌های کنترلی در سیستم‌های غیرهولونومیک بیان شده است. ربات شبه‌خودرو برداشت محصول کمباین^۲ یک سیستم رباتیکی است که به منظور برداشت، کوبیدن، جدا کردن و تمیز کردن دانه‌ها با حداقل دانه‌های صدمه دیده و حداقل تلفات، به کار برده می‌شود. اولین ماشین برداشت محصول کمباین بدون سرنشین در سال ۱۹۸۳ ساخته شد و توجه بسیاری را به خود جلب کرد. در مرجع [۷]، مدل سینماتیکی ماشین کمباین نشان داده شده است که بر مبنای این مدل، یک کنترل‌کننده‌ی غیرخطی مبتنی بر GPS ارائه شده است. در مرجع [۸]، یک روش مبتنی بر دید جهت خودکار کردن عملیات تخلیه پیشنهاد شده است. در [۹]، با استفاده از چندین سنسور از جمله GNSS، موقعیت بازوی تخلیه کمباین تعیین شده است. در مرجع [۱۰]، از یک کنترل‌کننده‌ی فازی جهت غربال خودکار محصول برداشت شده توسط کمباین استفاده می‌شود. ربات متحرک چرخ‌دار به همراه دنبالرو یک سیستم رباتیکی تحریک ناقص غیرخطی است که مقید به قيود غیرهولونومیکی می‌باشد و از یک تراکتور به همراه یک تریلر تشکیل

³ Leader-Follower

⁴ Omni-directional

¹ Agricultural robots

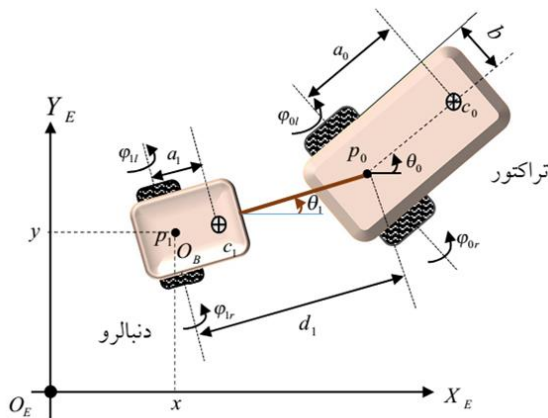
² Combine Harvester

۲- پیکربندی و مدل ربات تراکتور-تریلر

تراکتور-تریلر یک ربات دو چرخ دیفرانسیلی به همراه یک دنبالرو است. چرخ‌های ربات کشنده با شعاع r دارای عملگرهای مجزا می‌باشند. همچنین، برای حفظ پایداری حرکت این ربات کشنده، یک چرخ کروی نیز استفاده شده است. با توجه به شکل ۱، اتصال ربات کشنده و دنبالرو از طریق پین غیرفعال p_0 صورت گرفته است. مرکز جرم ربات کشنده با C_0 و دنبالرو با C_1 نشان داده شده است. جابه‌جایی زاویه‌ای چرخ‌های سمت راست و چپ ربات کشنده به ترتیب با φ_{0r} و φ_{0l} مشخص می‌شوند. φ_{1l} و φ_{1r} به ترتیب بیانگر جابه‌جایی چرخ‌های سمت راست و چپ دنبالرو هستند. فاصله‌ی بین مرکز جرم تا مرکز هندسی ربات کشنده و دنبالرو به ترتیب با a_0 و a_1 نشان داده می‌شوند. به علاوه، d نشان دهنده‌ی فاصله‌ی میان نقاط p_0 و p_1 است [۲۲].

با توجه به شکل‌های ۱ و ۲، ربات تراکتور-تریلر در نظر گرفته شده در این مقاله به صورت $d_1 = d \neq 0$ و $d_0 = 0$ می‌باشد که این نوع سیستم را روی محور^۲ می‌گویند. معادله‌ی دینامیکی حاکم بر سیستم به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۲]:

$$M_1(\eta)\ddot{\eta}(t) + C_1(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta}(t) + D_1\dot{\eta}(t) + \tau_{d1} = B_1(\eta)\tau_a(t) + A^T(\eta)\lambda \quad (1)$$



شکل ۱: ربات متحرک چرخ‌دار به همراه یک دنبالرو و پارامترهای سیستم

با توجه به معادله‌ی (۱)، بردار مختصات تعمیم یافته‌ی ربات^۳، ورودی شامل سرعت خطی رو به جلو و سرعت زاویه‌ای است. موقعیت ربات به همراه تریلر با $[x, y]^T$ نشان داده می‌شود و θ_0 و θ_1 به ترتیب

هماهنگ تراکتور-تریلرهای خودگردان با ماشین جمع آوری محصول منتشر نشده است. به همین منظور، کنترل ردیابی هماهنگ یک تراکتور تریلر با ماشین برداشت محصول کمباین با در نظر گرفتن نامعینی‌های پارامتری و غیرپارامتری با روش رهبر-پیرو در این مقاله برای اولین بار مورد توجه قرار می‌گیرد. با توجه به مرور کارهای پیشین [۱]-[۱۸]، نوآوری‌های این مقاله به صورت زیر بیان می‌شوند:

۱. برای اولین بار، یک مدل دینامیکی مرتبه دوم به شکل اوایلر-لاگرانژ با به کارگیری یک تبدیل مختصات بر حسب فاصله و زاویه نسبی تراکتور-تریلر نسبت به ماشین جمع آوری محصول توسعه می‌یابد که تمام خواص ساختاری مدل دینامیکی تراکتور-تریلر را به ارث می‌برد.

۲. برخلاف اغلب کارهای قبلی که از مدل دینامیکی سیستم صرف نظر می‌کنند و برای دوری از معکوس ماتریس اینرسی در طراحی دینامیک معکوس و خطی‌سازی فیدبک در [۱۸]، یک کنترل‌کننده مبتنی بر روش انفعال^۱، که برای کنترل بازوها در مرجع [۱۹] ارائه شده است، طراحی می‌شود که برخلاف روش پس‌گام نیز ساختار بسیار ساده‌ای دارد. در مقایسه با کنترل‌کننده مرجع [۱۵] که از ساختار کنترل سطح دینامیکی، یک شبکه عصبی چند لایه و طراحی کنترل‌کننده‌های سینماتیکی و دینامیکی جداگانه‌ای بهره می‌گیرد، روش پیشنهادی در این مقاله با تلفیق معادلات سینماتیکی و دینامیکی و ارائه یک مدل اوایلر-لاگرانژ مرتبه دوم، یک کنترل‌کننده واحد با ساختاری ساده‌تر را ارائه می‌کند که برای پیاده‌سازی‌های عملی ارجحیت بیشتری دارد.

۳. جهت تخمین نامعینی‌های پارامتری از یک شبکه عصبی تابع پایه شعاعی [۲۰] استفاده می‌شود که عدم قطعیت‌های ساختار یافته موجود در دینامیک سیستم را حتی بدون داشتن اطلاعات کافی از شکل تابعی آنها، به طور مؤثری تقریب می‌زند و خطای تقریب شبکه نیز به همراه نامعینی‌های ساختار نیافته نظیر اغتشاشات، توسط کنترل مقاوم تطبیقی جبران می‌شود.

ساختار مقاله بدین صورت است که ابتدا در بخش ۲، پیکربندی ربات تراکتور-تریلر توصیف می‌شود. پس از آن در این بخش، معادلات حرکت سینماتیکی و دینامیک این ربات استخراج می‌شود. در بخش ۳، جهت کنترل هماهنگ ربات تراکتور-تریلر و ماشین کمباین مدل آرایش‌بندی بیان می‌شود. در بخش ۴، به بیان شبکه عصبی تابع پایه شعاعی پرداخته می‌شود. در بخش ۵، از کنترل‌کننده مبتنی بر انفعال جهت کنترل هماهنگ این دو ربات استفاده می‌گردد. سپس، جهت تخمین نامعینی‌های سیستم که شامل نامعینی‌های پارامتری و غیرپارامتری است، طراحی کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی به روش مقاوم تطبیقی عصبی صورت می‌گیرد. پس از آن در بخش ۶، پایداری سیستم توسط تئوری لیاپانوف بررسی می‌گردد. در بخش ۷، نتایج تجربی شبیه‌سازی این کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی با کنترل‌کننده‌ی پس‌گام مقایسه می‌شود. در نهایت، در بخش ۸، از این مقاله نتیجه‌گیری می‌شود.

² On-axle hitching

³ Generalized Coordinates

¹ Passivity-based control

می‌شود. لازم به ذکر است که d فاصله‌ی مرکز هندسی ربات تا مرکز هندسی دنبالرو یا فاصله‌ی بین چرخ‌های ربات تا چرخ‌های دنبالرو است.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \sin(\theta_0) & -\cos(\theta_0) & -d \cos(\theta_0 - \theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & -\cos(\theta_1) & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{A(\eta)} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_0 \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

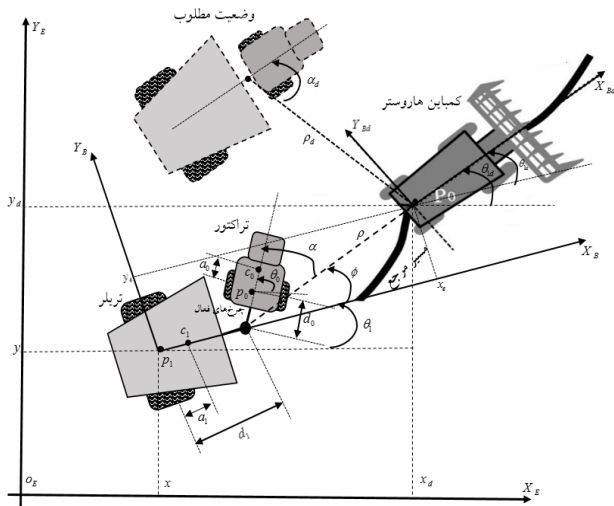
از طرفی معادله‌ی سینماتیک ربات به صورت زیر بیان می‌شود [۲۲]:

$$\dot{\eta} = S(\eta)v \quad (7)$$

با توجه به رابطه‌ی (۷)، ماتریس با رتبه‌ی کامل

$$S(\eta) = [s_1(\eta) \quad s_2(\eta)]^T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & \frac{1}{d} \tan(\theta_0 - \theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$$

که ماتریس سینماتیک نام دارد، از میدان‌های برداری هموار و مستقل خطی تشکیل شده است و در آن $k=1,2$ و $s_k(\eta) \in R^4$ است. $s_k(\eta)$ ها در فضای پوچی ماتریس $A(\eta)$ به صورت $A(\eta)S(\eta) = 0$ می‌باشند. به علاوه، سرعت‌ها به صورت ترکیب خطی از بردارهایی که فضای پوچی ماتریس $S(\eta)$ را پوشش می‌دهند، بیان می‌شوند. بنابراین، رابطه‌ی (۷) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:



شکل ۲: کنترل هماهنگ تراکتور-تریلر و یک ماشین برداشت محصول کمباین

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & 0 \\ \frac{1}{d} \tan(\theta_0 - \theta_1) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) \\ \frac{1}{d} \tan(\theta_0 - \theta_1) \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega \quad (8)$$

حال با مشتق‌گیری از رابطه‌ی (۷)، رابطه‌ی $\ddot{\eta} = \dot{S}(\eta)v + S(\eta)\dot{v}$ حاصل می‌آید و با جایگذاری این معادله در رابطه‌ی (۱) و نهایتاً با ضرب نتیجه‌ی حاصله در $S^T(\eta)$ معادله‌ی دینامیکی زیر حاصل می‌شود:

بیانگر جهت‌گیری ربات کشنده و دنبالرو هستند. $M_1(\eta) \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ ماتریس اینرسی متقارن مثبت معین جبری است و $C_1(\eta, \dot{\eta}) \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ یک ماتریس کوریولیس را نشان می‌دهد. $D_1 \in \mathbb{R}^4$ ماتریس میرایی و ضرایب اصطکاک ویسکوز، $\tau_{d1} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ بردار کران‌دار از اغتشاشات خارجی و دینامیک‌های مدل نشده، $B_1(\eta) \in \mathbb{R}^{4 \times 2}$ ماتریس انتقال ورودی و $\tau_a \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ بردار گشتاورهای ورودی است که به وسیله‌ی عملگرها تولید می‌شوند. همچنین با توجه به معادله‌ی (۱)، بردار ضرایب لاگرانژ بیانگر نیرویی‌هایی است که از طریق قیود غیرهولونومیکی به سیستم وارد می‌شوند و با $\lambda \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ نشان داده می‌شوند. مطابق با [۱۸]، ماتریس‌های معرفی شده به صورت زیر بیان می‌شوند:

(۲)

$$M_1(\eta) = \begin{bmatrix} m & 0 & -A \sin \theta_1 & -a_0 m_0 \sin \theta_0 \\ 0 & m & A \cos \theta_1 & a_0 m_0 \cos \theta_0 \\ -A \sin \theta_1 & A \cos \theta_1 & I_{\theta_1} & a_0 d m_0 \cos(\theta_0 - \theta_1) \\ -a_0 m_0 \sin \theta_0 & a_0 m_0 \cos \theta_0 & a_0 d m_0 \cos(\theta_0 - \theta_1) & I_{\theta_0} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 & d \sin(\theta_0 - \theta_1) & b \\ \cos \theta_0 & \sin \theta_0 & d \sin(\theta_0 - \theta_1) & -b \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$D_1 = \text{diag}[d_{m1}, d_{m2}, d_{m3}, d_{m4}], \quad (4)$$

$$C_1(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta} = [C_{jk}]_{4 \times 4}$$

که پارامترهایی که در رابطه‌های بالا به کار گرفته شده است، به صورت زیر توصیف می‌شوند:

$$\begin{aligned} A &= a_1 m_1 + d m_0, \quad m = m_0 + m_1 \\ I_{\theta_1} &= m_1 a_1^2 + m_0 d^2 + I_1, \quad I_{\theta_0} = m_0 a_0^2 + I_0 \\ C_{11} &= -a_0 m_0 \cos \theta_0 \dot{\theta}_0^2 - A \cos \theta_1 \dot{\theta}_1^2 \\ C_{21} &= -a_0 m_0 \sin \theta_0 \dot{\theta}_0^2 - A \sin \theta_1 \dot{\theta}_1^2 \\ C_{31} &= -a_0 d m_0 \dot{\theta}_0^2 \sin(\theta_0 - \theta_1) \\ C_{41} &= a_0 d m_0 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_0 - \theta_1) \end{aligned} \quad (5)$$

که m_0 و m_1 به ترتیب معرف جرم‌های ربات متحرک چرخ‌دار و دنبالرو، I_0 و I_1 به ترتیب معرف ممان اینرسی‌های جرمی ربات چرخ‌دار و دنبالرو حول محور عمود بر صفحه‌ی حرکت، a_0 و a_1 به ترتیب معرف فاصله‌ی میان مرکز جرم و نقطه‌ی میانی چرخ‌های ربات چرخ‌دار و دنبالرو است [۱۸]. برای حرکت ربات تراکتور-تریلر، باید در نظر داشت که حرکت ربات به صورت صفحه‌ای انجام می‌شود. همچنین، چرخ‌های ربات قادر به حرکت از پهلو نمی‌باشند و به علاوه، چرخ‌های ربات در جهت رو به جلو غلتش خالص می‌کنند و قادر به حرکت رو به عقب نیستند. بر این اساس، $A(\eta) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ یک ماتریس قیدی با رتبه‌ی کامل است که در این مقاله، با $n=4$ درجه آزادی و $m=2$ قید به صورت یک ماتریس (2×4) ، قابل تعریف است. بنابراین، قید غیرهولونومیکی حرکت ربات تراکتور-تریلر به صورت زیر بیان

که در آن x_d و y_d موقعیت، θ_{1d} سمت گیری و θ_{0d} زاویه فرمان ماشین کمباین را نشان می دهند. با توجه به رابطه (۸) و مشتق گیری از رابطه (۱۲)، معادله خطای دینامیکی در دستگاه مختصات بدنه به صورت زیر می باشد:

$$\dot{\eta}_e(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_e(t) \\ \dot{y}_e(t) \\ \dot{\theta}_{1e}(t) \\ \dot{\theta}_{0e}(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -1 + (y_e/d) \tan(\theta_0 - \theta_1) & 0 \\ -(x_e/d) \tan(\theta_0 - \theta_1) & 0 \\ -(1/d) \tan(\theta_0 - \theta_1) & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}}_v \underbrace{\begin{bmatrix} \cos \theta_e & 0 \\ \sin \theta_e & 0 \\ (1/d) \tan(\theta_{0d} - \theta_{1d}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_s \begin{bmatrix} v_d \\ \omega_d \\ v_s \end{bmatrix} \quad (13)$$

سپس، فاصله و سمت گیری نسبی دو وسیله نقلیه نسبت به هم به صورت زیر تعریف می شود:

$$q(t) = \begin{bmatrix} \rho(t) \\ \alpha(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho(t) \\ \phi(t) - (\theta_0 - \theta_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_e(t) - d_1)^2 + y_e^2(t)} \\ a \tan 2(y_e(t), x_e(t) - d_1) - (\theta_0 - \theta_1) \end{bmatrix} \quad (14)$$

که در آن $\text{atan} 2(y, x)$ به معنی $\arctan(y/x)$ در محدوده $(-\pi, \pi)$ است. با مشتق گیری از رابطه (۱۴) رابطه زیر حاصل می شود:

$$\dot{q}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} -\cos \phi - \sin \phi \tan(\theta_0 - \theta_1) & 0 \\ (\sin \phi - \cos \phi \tan(\theta_0 - \theta_1)) / \rho & -1 \end{bmatrix}}_{R(\eta)} v + \underbrace{\begin{bmatrix} v_d \cos(\theta_{1e} - \phi) \\ v_d \sin(\theta_{1e} - \phi) / \rho \end{bmatrix}}_{\delta} \quad (15)$$

تذکره ۱: $\det(R) = \cos(\phi) + \sin(\phi) \tan(\theta_0 - \theta_1)$ در معادله (۱۵)، در صورتی که $\tan(\phi) \tan(\theta_0 - \theta_1) \neq -1$ باشد، غیر صفر است. یک شرط لازم برای اجتناب از تکین شدن $|\phi(t) - (\theta_0 - \theta_1)| < \pi/2$ می باشد که بر اساس آن، شرط $|\phi_d(t) - (\theta_0 - \theta_1)| < \pi/2$ باید برقرار گردد.

حال، با مشتق گیری از رابطه (۱۵)، به معادله (۱۵)، خواهیم رسید که با توجه به این معادله، رابطه زیر حاصل می شود:

$$\dot{v} = R^{-1} \dot{q} - R^{-1} \dot{R} v - R^{-1} \delta \quad (16)$$

طبق معادله (۱۵)، معادله (۱۶) در رابطه (۹)، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} M_2 R^{-1} \ddot{q} - M_2 R^{-1} \dot{R} (R^{-1} \dot{q} - R^{-1} \delta) - M_2 R^{-1} \dot{\delta} \\ + C_2(\eta, R^{-1} \dot{q}) R^{-1} \dot{q} - C_2(\eta, R^{-1} \dot{q}) R^{-1} \delta \\ - C_2(\eta, R^{-1} \delta) R^{-1} \dot{q} + C_2(\eta, R^{-1} \delta) R^{-1} \delta \\ + D_2 R^{-1} \dot{q} - D_2 R^{-1} \delta + \tau_{2d}(t, \eta) = B_2 \tau_a(t) \end{aligned} \quad (17)$$

بنابراین، با ضرب دو طرف معادله بالا در R^{-T} مدل مرتبه دوم زیر به فرم اوپلر-لاگرانژ بر حسب فاصله و سمت گیری نسبی دو وسیله نقلیه به دست می آید:

$$M(\eta) \ddot{q} + C(\eta, \dot{q}) \dot{q} + D(\eta) \dot{q} + N(\eta_e, v_d, \dot{v}_d) + \tau_d(t, \eta) = B(\eta) \tau_a = \bar{\tau}_a \quad (18)$$

که ماتریس های رابطه (۱۸) به صورت زیر تعریف می شوند:

$$M_2(\eta) \dot{v}(t) + C_2(\eta, v) v(t) + D_2(\eta) v(t) + \tau_{d2}(t, \eta) = B_2(\eta) \tau_a \quad (9)$$

که هر یک از ماتریس های رابطه (۹)، به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{aligned} M_2(\eta) &= S^T(\eta) M_1(\eta) S(\eta), \quad B_2(\eta) = S^T(\eta) B_1(\eta) \\ C_2(\eta, v) &= S^T(\eta) M_1(\eta) \dot{S}(\eta) + S^T(\eta) C_1(\eta, \dot{\eta}) S(\eta) \quad (10) \\ D_2(\eta) &= S^T(\eta) D_1 S(\eta), \quad \tau_{d2} = S^T(\eta) \tau_{d1} \end{aligned}$$

۳- آرایش کنترلی

در این مقاله، هدف کنترلی آن است که با استفاده از یک کنترل کننده مبتنی شبکه عصبی-تطبیقی-مقاوم، ربات تراکتور-تریلر جهت بارگیری محصول در حضور نامعینی های مدل، ماشین جمع آوری محصول کمباین (ربات رهبر) را به صورت مجانبی دنبال کند تا خطاهای ردیابی به ناحیه کوچکی شامل مبدا همگرا شوند به نحوی که

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\rho(t) - \rho_d(t)| \leq \epsilon_\rho, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} |\alpha(t) - \alpha_d(t)| \leq \epsilon_\alpha \quad (11)$$

که در آن ϵ_ρ و ϵ_α ثابت های مثبت کوچک دلخواه هستند و $\alpha(t)$ و فاصله و سمت گیری نسبی ربات پیرو نسبت به رهبر است. همچنین، $\rho_d(t)$ و $\alpha_d(t)$ فاصله و جهت مطلوب ربات پیرو نسبت به ربات رهبر را نشان می دهند.

فرض ۱: بردار مختصات تعمیم یافته $\eta(t)$ و بردار سرعت $v(t)$ قابل اندازه گیری هستند.

فرض ۲: مقادیر حالت، سرعت و شتاب ماشین برداشت محصول کمباین، یعنی $\eta_d(t)$ ، $v_d(t)$ و $\dot{v}_d(t)$ ، برای تراکتور-تریلر از طریق یک ارتباط مخابراتی قابل دسترس هستند.

فرض ۳: بردار اغتشاش $\tau_{d2}(t)$ کران دار است طوری که $\sup \| \tau_{d2}(t) \| < B_{d\tau}$ است و $B_{d\tau}$ یک ثابت مثبت است.

فرض ۴: بردار آرایش مطلوب $q_d(t) = [\rho_d(t), \alpha_d(t)]^T$ طوری انتخاب می شود که $q_d(t)$ و $\dot{q}_d(t)$ و $\ddot{q}_d(t)$ همگی سیگنال های کران دار باشند به طوری که $\sup \| q_d(t) \| < B_{dp}$ و $\sup \| \dot{q}_d(t) \| < B_{dv}$ و $\sup \| \ddot{q}_d(t) \| < B_{da}$ و B_{dp} ، B_{dv} و B_{da} همگی ثابت های مثبت کراندار هستند [۲۳].

در این بخش، برای سهولت در طراحی کنترل کننده در بخش بعدی، یک مدل مرتبه دوم با فرم اوپلر-لاگرانژ به دست می آید که تمام خواص ساختاری مدل دینامیکی (۹) را حفظ می کند. مطابق با شکل ۲ و مشابه با مرجع [۱۵]، خطای وضعیت بین تراکتور-تریلر و ماشین جمع آوری محصول از دستگاه مختصات متصل به زمین $\{O_E, X_E, Y_E\}$ به دستگاه مختصات متصل به بدنه $\{O_B, X_B, Y_B\}$ با تبدیل مختصات زیر انتقال می یابد:

$$\eta_e(t) = \begin{bmatrix} x_e(t) \\ y_e(t) \\ \theta_{1e}(t) \\ \theta_{0e}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \\ \theta_{1d} - \theta_1 \\ \theta_{0d} - \theta_0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$f(x) = W\sigma(x) + e_w \quad (21)$$

که $\sigma(x) = [\sigma_1(x), \dots, \sigma_l(x)]^T$ ، $f(x) = [f_1(x), \dots, f_p(x)]^T$ که $e_w = [e_{w1}, e_{w2}, \dots, e_{wp}]^T$ به صورت $\|e_w\| \leq B_w$ کراندار است که B_w یک ثابت مثبت است. W ماتریس وزن‌های شبکه عصبی است که این وزن‌ها باید مقادیر مناسبی به خود بگیرند تا بتوانند تابع غیرخطی را با خطای کمی تقریب بزنند. این ماتریس به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1L} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{p1} & w_{p2} & \dots & w_{pL} \end{bmatrix}_{p \times L} \quad (22)$$

از آنجایی که تعیین ماتریس وزنی کار پیچیده‌ای است، معمولاً این ماتریس را توسط یک قانون تطبیق تخمین می‌زنند. این قانون تطبیق اغلب در یک تحلیل لیاپانوفی طراحی می‌شود. بنابراین، تقریب تابع غیرخطی نامعین به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\hat{f}(x) = \hat{W}\sigma(x) \quad (23)$$

که \hat{W} معرف ماتریس وزن تخمین زده شده می‌باشد.

فرض ۵: وزن‌های مطلوب شبکه عصبی $\|W\|_F \leq W_M$ کراندار هستند، که W_M ثابت مثبت است [۲۴] و $\|\bullet\|_F$ اندازه فرینبوس یک ماتریس را نشان می‌دهد.

۵- طراحی کنترل کننده

در این بخش، یک کنترل کننده برای هماهنگ کردن تراکتور-ترپلر با ماشین برداشت محصول در یک فاصله و زاویه نسبی مشخص پیشنهاد می‌شود. برای شروع طراحی کنترل کننده، متغیر خطای ردیابی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e(t) = q(t) - q_d(t), \dot{e}(t) = \dot{q}(t) - \dot{q}_d(t) \quad (24)$$

با تعریف متغیر زیر، مسأله ردیابی مرتبه دوم به مسأله پایدارسازی مرتبه یک تبدیل می‌شود [۱۹]:

$$r(t) = \dot{q}(t) - \dot{q}_r(t) = \dot{q}(t) - (\dot{q}_d(t) - \Lambda e(t)) = \dot{e}(t) + \Lambda e(t) \quad (25)$$

بنابراین، طبق رابطه (۲۵)، می‌توان نتیجه گرفت که اگر $r(t) \rightarrow 0$ ، آنگاه $e(t)$ و $\dot{e}(t)$ به سمت صفر میل می‌کنند. همچنین، در این رابطه، Λ یک ماتریس بهره‌ی مثبت معین در نظر گرفته می‌شود و به صورت زیر معرفی می‌گردد:

$$\dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda e \quad (26)$$

سپس، با جایگذاری رابطه‌های (۲۴) و (۲۵) در (۱۸)، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$M(\eta)(\dot{r} + \dot{q}_d - \Lambda \dot{e}) + C(\eta, \dot{q})(r + \dot{q}_d - \Lambda e)$$

$$M = R^{-T} M_2 R^{-1}, D = R^{-T} D_2 R^{-1}, B = R^{-T} B_2 \quad (19)$$

$$C = R^{-T} (C_2 - M_2 R^{-1} \dot{R}) R^{-1}, \tau_d = R^{-T} \tau_{2d}$$

$$N(\eta_e, v_d, \dot{v}_d) = -M(\eta)\delta + R^{-T} C_2(\eta, R^{-1}\delta) R^{-1} - D(\eta)\delta - C(\eta, \delta) - R^{-T} C_2(\eta, R^{-1}\delta) R^{-1}$$

که $N(\eta_e, v_d, \dot{v}_d)$ نامعینی‌های پارامتری و $\tau_d(t, \eta)$ نامعینی‌های غیرپارامتری است که شامل اغتشاش متغیر با زمان می‌باشد. همچنین، مدل دینامیکی (۱۸) با توجه به خواص ساختاری مدل (۹) دارای خواص زیر است [۱۸]:

خاصیت ۱: $M(\eta)$ ماتریس متقارن مثبت معین و

$$\lambda_m \|x\|^2 \leq x^T M(\eta) x \leq \lambda_M \|x\|^2 \quad \forall x \in \mathbb{R}^2, 0 < \lambda_m \leq \lambda_M < \infty$$

$$\lambda_m := \min_{\forall \eta \in \mathbb{R}^4} \lambda_{\min}(M(\eta)), \lambda_M := \max_{\forall \eta \in \mathbb{R}^4} \lambda_{\max}(M(\eta))$$

می‌باشد.

خاصیت ۲: ماتریس کوریولیس، خواص زیر را برآورده می‌سازد [۱۸]:

$$1) x^T (\dot{M}(\eta) - 2C(\eta, v)) x = 0, \forall x, v \in \mathbb{R}^2, \eta \in \mathbb{R}^4$$

$$2) \dot{M}(\eta) = C(\eta, v) + C^T(\eta, v), \forall v \in \mathbb{R}^2, \forall \eta \in \mathbb{R}^4$$

$$3) C(\eta, x_1) x_2 = C(\eta, x_2) x_1, \forall x_1, x_2 \in \mathbb{R}^2, \eta \in \mathbb{R}^4$$

$$4) C(\eta, x_1 + x_2) y = C(\eta, x_1) y + C(\eta, x_2) y, \forall x_1, x_2, y \in \mathbb{R}^2$$

$$5) C(\eta, x_1 + x_2) y = C(\eta, x_1) y + C(\eta, x_2) y, \forall x_1, x_2, y \in \mathbb{R}^2$$

که λ_C یک ثابت مثبت نامشخص است.

خاصیت ۳: $D(\eta)$ یک ماتریس مثبت معین و متقارن است که از بالا

و پایین کراندار است به طوری که [۱۸]:

$$\lambda_d \|x\|^2 \leq x^T D(\eta) x \leq \lambda_D \|x\|^2, \quad \forall x \in \mathbb{R}^2, 0 < \lambda_d \leq \lambda_D < \infty$$

$$\lambda_d := \min_{\forall \eta \in \mathbb{R}^4} \lambda_{\min}(D(\eta)), \quad \lambda_D := \max_{\forall \eta \in \mathbb{R}^4} \lambda_{\max}(D(\eta))$$

۴- شبکه عصبی تابع پایه شعاعی

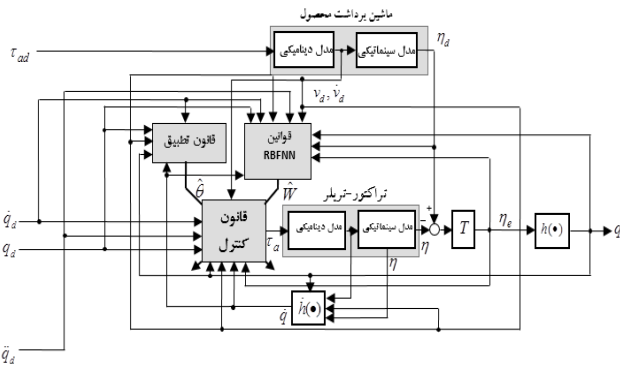
در این مقاله، برای تخمین نامعینی‌های پارامتری از شبکه عصبی تابع پایه شعاعی^۱ استفاده می‌شود. تابع پیوسته داده شده $f(x): U \rightarrow \mathbb{R}^n$ که $U \in \mathbb{R}^n$ یک مجموعه‌ی فشرده است، را در نظر بگیرید. آنگاه توسط شبکه عصبی تابع پایه‌ی شعاعی می‌توان تابع غیرخطی نامعین را به صورت ترکیب خطی از وزن‌ها به شکل زیر نوشت [۲۰]:

$$f_m(x) = \sum_{k=1}^l w_{mk} \sigma_k(x) + e_{wm}, m = 1, 2, \dots, p \quad (20)$$

$$\sigma_k(x) = \exp(-\|x - \mu_k\|^2 / \lambda_k^2), k = 1, 2, \dots, L$$

که e_{wm} نشان دهنده‌ی خطای تقریب شبکه‌ی عصبی است، p و L به ترتیب تعداد گره‌های خروجی و گره‌های پنهان را نشان می‌دهند. $\sigma_k(x)$ ، $k=1, \dots, L$ -مین تابع پایه‌ی شعاعی (تابع گوسی) است که $\mu_k = [\mu_{k1}, \mu_{k2}, \dots, \mu_{kn}]$ به ترتیب بردار مرکزی و انحراف معیار هستند. سپس، توابع غیرخطی می‌توانند به صورت ماتریسی زیر بیان شوند:

¹ Radial Basis Function Neural Networks



شکل ۳: دیاگرام بلوکی سیستم کنترل پیشنهادی

$$\begin{aligned}
 &+D(\eta)(r+\dot{q}_d-\Lambda e)+N(e,v_d,\dot{v}_d)+\tau_d(\eta,t) \\
 &=M(\eta)\dot{r}+M(\eta)(\ddot{q}_d-\Lambda\dot{e})+C(\eta,\dot{q})r \\
 &+C(\eta,\dot{q})(\dot{q}_d-\Lambda e)+D(\eta)r+D(\eta)(\dot{q}_d-\Lambda e) \\
 &+N(e,v_d,\dot{v}_d)+\tau_d(\eta,t)=B(\eta)\tau_a=\bar{\tau}_a
 \end{aligned}$$

و نهایتاً به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned}
 M(\eta)\dot{r} &= -C(\eta,\dot{q})r + \bar{\tau}_a - D(\eta)r \\
 &\underbrace{-M(\eta)\ddot{q}_d - C(\eta,\dot{q})\dot{q}_d - D(\eta)\dot{q}_d - N(e,v_d,\dot{v}_d) - \tau_d(\eta,t)}_{\xi(\eta,\eta_d,v_d,\dot{v}_d,\dot{q},\dot{q}_d,\ddot{q}_d)}
 \end{aligned} \tag{۲۷}$$

با توجه به خاصیت تقریب شبکه‌های عصبی، نامعینی‌های پارامتری در تابع مجهول ξ به سهولت تخمین زده می‌شوند. برای این منظور، می‌توان نوشت:

$$\xi(\eta,\eta_d,v_d,\dot{v}_d,\dot{q},\dot{q}_d,\ddot{q}_d) = W\sigma(x) + e_w \tag{۲۸}$$

که در آن وزن‌های شبکه عصبی تابع پایه شعاعی ایده‌آل و بردار خطای تقریب شبکه به صورت $\|e_w\| \leq B_w$ و $\|W\|_F \leq W_M$ کران‌دار هستند. با استفاده از شبکه عصبی تنها می‌توان نامعینی‌های پارامتری را تخمین زد. در حالیکه وجود نامعینی‌های غیرپارامتری که شامل اغتشاش متغیر با زمان نیز است، می‌تواند برای کنترل‌کننده و در نتیجه پایداری سیستم، مشکل ایجاد کند. بنابراین، در این مقاله از کنترل‌کننده مقاوم تطبیقی نوع اشباع برای تضمین پایداری سیستم در حضور اغتشاش خطای تقریب شبکه عصبی استفاده می‌شود. باید توجه شود که $\|e_w - \tau(t)\| \leq \theta$. در نهایت، قانون کنترل به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\begin{aligned}
 \tau_a = B^{-1}(\eta)\bar{\tau}_a &= -B_2^{-1}R^TK_p r - B_2^{-1}R^T\hat{W}\sigma(x) \\
 &- \hat{\theta}^2 B_2^{-1}R^T r / (\hat{\theta}\|r\| + \varepsilon_r(t))
 \end{aligned} \tag{۲۹}$$

در (۲۹)، K_p ماتریس بهره‌ی قطری مثبت معین است. همچنین، قوانین به‌روزرسانی وزن‌های شبکه عصبی و تخمین پارامتر باند بالا به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{\hat{W}} = \Gamma_w(\dot{e}(t) + \Lambda e(t))\sigma^T(x) - \Gamma_w\delta_w\hat{W}, \\ \dot{\hat{\theta}} = \gamma_\theta\|\dot{e}(t) + \Lambda e(t)\| - \gamma_\theta\sigma\hat{\theta} \end{cases} \tag{۳۰}$$

که Γ_w و γ_θ بهره‌های تطبیق را نشان می‌دهند، δ_w و پارامترهای طراحی مثبت کوچک هستند. جملات $\Gamma_w\delta_w\hat{W}$ و $\gamma_\theta\sigma\hat{\theta}$ ، بیانگر اصلاح سیگما ثابت هستند. با جایگذاری (۲۹) در (۲۷)، دینامیک خطای حلقه بسته‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}
 M(\eta)\dot{r} &= -C(\eta,\dot{q})r - Dr - K_p r + \underbrace{(W - \hat{W})}_{\tilde{W}}\sigma(x) \\
 &- \frac{\hat{\theta}^2 r}{\hat{\theta}\|r\| + \varepsilon_r} + e_w - \tau_d(t)
 \end{aligned} \tag{۳۱}$$

لازم به ذکر است که \tilde{W} ، ماتریس خطای تخمین وزن‌های شبکه عصبی است که به صورت $\tilde{W} = W - \hat{W}$ تعریف می‌شود. شکل ۳ دیاگرام بلوکی سیستم کنترل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۶- تحلیل پایداری

در این بخش، پایداری سیستم حلقه بسته مورد نظر به کمک تئوری پایداری لیاپانوف با بیان قضیه زیر به صورت تحلیل مورد بررسی قرار می‌گیرد:

قضیه ۱: مدل سینماتیکی و دینامیکی ربات تراکتور- تریلر را در نظر بگیرید. با توجه به یک مسیر زمانی مطلوب کران‌دار که توسط ماشین جمع آوری محصول تولید می‌شود، تحت خواص ۱ تا ۳، و فرض‌های ۱ تا ۵، کنترل‌کننده مقاوم تطبیقی عصبی (۲۹) و (۳۰) تضمین می‌کند که همه‌ی سیگنال‌ها در سیستم حلقه بسته کران‌دارند و خطاهای ردیابی بطور یکنواخت نهایتاً کران‌دارند و به توپ کوچکی شامل مبدأ همگرا می‌شوند.

اثبات: ابتدا، برای اثبات پایداری لم‌های زیر معرفی می‌شوند:

لم ۱: چنانچه M ماتریس مثبت معین باشد، به ازای $x \in \mathfrak{R}^n$ نامساوی ریلی ریتز به صورت برقرار است [۲۵]:

$$\lambda_{\min}\{M\}\|x\|^2 \leq x^T M x \leq \lambda_{\max}\{M\}\|x\|^2 \tag{۳۲}$$

لم ۲: چنانچه a, b, p, q اعداد حقیقی و مثبت باشند به نحوی که مجموع معکوس‌های p و q برابر یک باشد، آنگاه نامساوی یانگ به صورت $ab \leq a^p/p + b^q/q$ است. از طرفی، می‌توان اثبات کرد که به ازای $x, y \in \mathfrak{R}^n$ و اسکالر k نامساوی زیر برقرار است [۲۵]:

$$x^T M y \leq \frac{1}{2k^2} \lambda_{\max}\{M\}\|x\|^2 + \frac{k^2}{2} \lambda_{\max}\{M\}\|y\|^2 \tag{۳۳}$$

سپس، تابع لیاپانوف سیستم به صورت زیر انتخاب می‌شود [۲۳]:

$$V(t) = 0.5r^T M(\eta)r + 0.5tr\{\tilde{W}^T \Gamma_w^{-1} \tilde{W}\} + 0.5\hat{\theta}^2 / \gamma_\theta \tag{۳۴}$$

که در آن $\tilde{W} = W - \hat{W}$ و $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ تابع لیاپانوف به صورت زیر کراندار می‌گردد:

$$\begin{aligned}
 \lambda_x \|x\|^2 &\leq V(t) \leq \lambda_X \|x\|^2 \\
 \lambda_x &= 0.5 \min\{\lambda_m, \lambda_{\min}(\Gamma_w^{-1}), \gamma_\theta^{-1}\} \\
 \lambda_X &= 0.5 \max\{\lambda_M, \lambda_{\max}(\Gamma_w^{-1}), \gamma_\theta^{-1}\} \\
 x &:= [r^T, \tilde{w}_{11}, \dots, \tilde{w}_{2L}, \tilde{\theta}]^T
 \end{aligned} \tag{۳۵}$$

در ادامه، با مشتق گیری از رابطه (۳۴) و استفاده از خاصیت ۲، رابطه ی زیر بدست می آید:

$$\dot{V} = r^T M(\eta) \dot{r} + \frac{1}{2} r^T \dot{M}(\eta) r - tr \left\{ \tilde{W}^T \Gamma_w^{-1} \dot{\tilde{W}} \right\} - \frac{1}{\gamma_\theta} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} \quad (36)$$

$$\dot{V} = -r^T (K_p + D) r + r^T \tilde{W} \sigma(x) - \frac{\hat{\theta}^2 r^T r}{\hat{\theta} \|r\| + \varepsilon_i} + r^T (e_w - \tau_d(t)) - tr \{ \tilde{W}^T \Gamma_w^{-1} \dot{\tilde{W}} \} - \frac{1}{\gamma_\theta} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} \quad (37)$$

پس از آن، با جایگذاری $\|e_w - \tau(t)\| \leq \theta$ در رابطه (۳۷)، همچنین با توجه به لم ۱، با توجه به این که D و K_p هر دو ماتریس های مثبت معین هستند، رابطه ی زیر به دست می آید:

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(K_p + D) \|r\|^2 + r^T \tilde{W} \sigma(x) - \frac{\hat{\theta}^2 r^T r}{\hat{\theta} \|r\| + \varepsilon_i} + \|r\| \theta - tr \{ \tilde{W}^T \Gamma_w^{-1} \dot{\tilde{W}} \} - \frac{1}{\gamma_\theta} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} \quad (38)$$

سپس، با جایگذاری رابطه ی (۳۰) در رابطه ی (۳۸)، رابطه ی زیر برقرار می شود:

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(K_p + D) \|r\|^2 + r^T \tilde{W} \sigma(x) - \frac{\hat{\theta}^2 r^T r}{\hat{\theta} \|r\| + \varepsilon_i} + \|r\| \theta - tr \{ \tilde{W}^T r \sigma^T(x) \} + tr \{ \tilde{W}^T \delta_w \hat{W} \} - \|r\| \tilde{\theta} + \sigma \tilde{\theta} \hat{\theta} \quad (39)$$

آنگاه، رابطه (۳۹) به صورت زیر ساده سازی می شود:

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(K_p + D) \|r\|^2 - \frac{\hat{\theta}^2 r^T r}{\hat{\theta} \|r\| + \varepsilon_i} + \|r\| \theta + tr \{ \tilde{W}^T \delta_w \hat{W} \} - \|r\| \tilde{\theta} + \sigma \tilde{\theta} \hat{\theta} \quad (40)$$

پس از ساده سازی و با توجه به این که $\varepsilon_i \|r\| \hat{\theta} / (\hat{\theta} \|r\| + \varepsilon_i) \leq \varepsilon_i$ است، رابطه ی زیر به دست می آید:

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(K_p + D) \|r\|^2 + \varepsilon_i + tr \{ \tilde{W}^T \delta_w \hat{W} \} + \sigma \tilde{\theta} \hat{\theta} \quad (41)$$

می توان ثابت کرد که با توجه به تعریف نرم فروبنیوس به صورت $\|X\|_F = \sqrt{tr(X^T X)}$ برای هر $X, Y \in \mathfrak{R}^n$ نامساوی زیر همواره برقرار می شود [۲۵]:

$$tr \{ X^T Y \} \leq \frac{1}{2k^2} \|X\|_F^2 + \frac{k^2}{2} \|Y\|_F^2 \quad (42)$$

نهایتاً، با در نظر گرفتن لم ۲، رابطه ی زیر حاصل می شود:

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(K_p + D) \|r\|^2 + \varepsilon_i - \delta_w \left(1 - \frac{1}{2k^2}\right) \|\tilde{W}\|_F^2 + \delta_w \frac{k^2}{2} \|W\|_F^2 - \sigma_\theta \left(1 - \frac{1}{2k^2}\right) \|\tilde{\theta}\|^2 + \sigma_\theta \frac{k^2}{2} |\theta|^2 \quad (43)$$

سپس، نامساوی به دست آمده در (۴۳) به صورت زیر می تواند بازنویسی شود:

$$\dot{V}(t) \leq -c_m \|x(t)\|^2 + \Gamma \leq -c_m V(t) / \lambda_X + \Gamma \quad (44)$$

که براساس رابطه ی (۴۴)، $c_m = \min\{c_1, c_2, c_3\}$ و همچنین

$x(t) = [r^T, \tilde{W}_{11}, \dots, \tilde{W}_{2L}, \tilde{\theta}]^T$ می باشد و پارامترها به صورت تعریف می شوند:

$$\begin{aligned} c_1 &= \lambda_{\min}(K_p + D) > 0 \\ c_2 &= \delta_w (1 - 0.5/k^2) > 0 \\ c_3 &= \sigma_\theta (1 - 0.5/k^2) > 0 \end{aligned}$$

که $k > \sqrt{2}/2$. از طرفی $\Gamma = 0.5\delta_w k^2 \|W\|_F^2 + 0.5\sigma_\theta k^2 |\theta|^2 + \varepsilon_i$ همواره مقداری مثبت است. با توجه به اینکه هدف منفی شدن مشتق تابع لیاپانوف است، c_1, c_2 و c_3 مقادیری مثبت هستند، که $c_m = \min\{c_1, c_2, c_3\}$ حداقل مقدار این پارامترها را نشان می دهند.

بنابراین، چون $\Gamma \neq 0$ است، پایداری مجانبی بدست نمی آید. بلکه بک باند نهایی خطا وجود دارد که مادامی که خطاها در خارج از آن قرار داشته باشند، مشتق تابع لیاپانوف منفی است. با حل نامساوی (۴۴)، $0 \leq V(t) \leq e^{-c_m t / \lambda_X} V(0) + (\Gamma \lambda_X / c_m) (1 - e^{-c_m t / \lambda_X})$ می شود، که اکیداً منفی بودن $\dot{V}(t)$ در خارج از مجموعه فشرده $\Omega_x = \{x(t) | 0 \leq \|x(t)\| \leq \sqrt{\Gamma \lambda_X / c_m}\}$ را تضمین می کند.

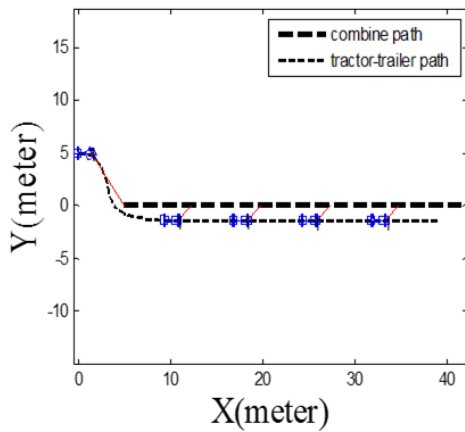
بنابراین، $V(t)$ در خارج از مجموعه Ω_x اکیداً نزولی است که نشان می دهد $\|x(t)\|$ به طور یکنواخت نهایتاً کران دار می باشد. در نتیجه، خطاهای ردیابی به طور یکنواخت نهایتاً کران دار بوده و به طور نمایی به توپ کوچکی شامل مبدأ همگرا می گردند که اندازه آن با تغییر پارامترهای کنترلی قابل تنظیم است. از طرفی، تخمین پارامترهای شبکه عصبی و باند بالای نامعینی های غیرپارامتری نیز کران دار هستند. این عبارت اثبات پایداری را به اتمام می رساند. □

۸- نتایج شبیه سازی

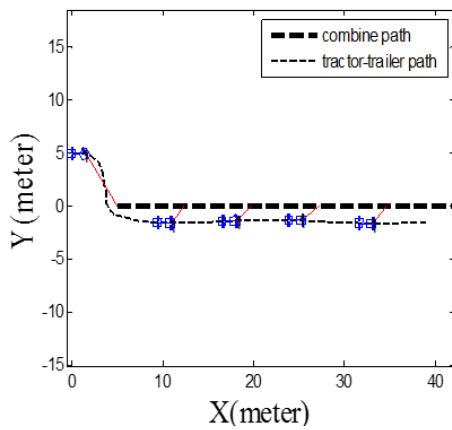
در این بخش، نتایج شبیه سازی کنترل کننده پیشنهادی توسط نرم افزار متلب و با استفاده از پارامترهای ربات در دنیای واقعی به منظور ارزیابی عملکرد کنترل کننده طراحی شده، ارائه می شود. با توجه به این که کنترل ربات رهبر کمباین حلقه باز است، برای شبیه سازی جهت تولید مسیر زمانی مرجع می توان از مدل هر وسیله نقلیه دیگری نظیر ربات شبه اتوموبیل استفاده کرد. ابتدا، لازم است به معرفی پارامترهای فیزیکی ربات بپردازیم:

فاصله ی بین مرکز جرم تا مرکز هندسی تراکتور $a_0 = 0.15m$ ، فاصله ی بین مرکز جرم تا مرکز هندسی تریلر $a_1 = 0.05m$ ، فاصله ی مرکز هندسی تراکتور تا نقطه اتصال $d_0 = 0m$ ، فاصله ی مرکز هندسی تریلر تا نقطه ی اتصال $d_1 = 1.5m$ ، فاصله ی هر چرخ تا محور تقارن ربات $b = 0.4m$ ، شعاع هر چرخ $r = 0.15m$ ، جرم تراکتور $m_0 = 15kg$ ، و جرم تریلر $m_1 = 15kg$ انتخاب می گردد. بردار فاصله و زاویه نسبی مطلوب برای ربات تراکتور-تریلر

سازی، ابتدا این پارامترها (نظیر بهره و تعداد سلول های لایه پنهان) کوچک انتخاب می شوند. سپس، تدریجاً مقادیر پارامترها افزایش داده می شود تا عملکرد کنترل کننده بهبود یابد. نتایج نشان می دهند که افزایش بیش از حد مقادیر پارامترها ممکن است سبب افت عملکرد و ناپایداری کنترل کننده گردد. پارامترهای کنترل کننده ی مقاوم تطبیقی عصبی در رابطه ی (۳۰) به صورت $\Gamma_w = 3I_{2 \times 2}$ ، $\delta_w = 0.05$ ، $\gamma_\theta = 7$ و $\sigma = 0.1$ و بهره ی کنترل کننده با توجه به رابطه (۲۹)، به صورت $K_p = 20I_{2 \times 2}$ در نظر گرفته شده است. پارامترهای کنترل کننده ی پس گام مقاوم تطبیقی عصبی رابطه ی (۴۸)، به صورت $\Gamma_w = 0.1$ ، $\delta_w = 0.01$ ، $\gamma_\theta = 0.5$ ، $\sigma = 0.05$ و بهره ی کنترل کننده با توجه به رابطه ی (۴۷)، به صورت $K_2 = 2I_{2 \times 2}$ در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج شبیه سازی دو کنترل کننده، شکل های ۴ تا ۸ به ترتیب نشان دهنده ی ردیابی ماشین جمع آوری محصول توسط تراکتور-تریلر، ورودی های کنترلی، خطاهای ردیابی، تخمین پارامترهای نامعین، تخمین وزن های شبکه عصبی تابع پایه شعاعی و به روز رسانی هر لحظه ی آنها توسط قوانین تطبیق جهت افزایش دقت ردیابی است.



(الف)



(ب)

شکل ۴. ردیابی مسیر خطی توسط ربات تراکتور-تریلر (الف) کنترل کننده پیشنهادی و (ب) کنترل کننده پس گام

اولیه ی تراکتور-تریلر $q_d = [2, 45\pi/180]^T$ در نظر گرفته می شود. همچنین، پیکربندی ماشین جمع آوری محصول $x(0) = [0, 5, 0, \pi/6]^T$ بردار حالت اولیه می شود. تعیین این پارامترهای فیزیکی در عمل کاری پیچیده و سختی است. بنابراین، ربات تراکتور-تریلر دارای عدم قطعیت در پارامتر می باشد. همچنین، اغتشاشات دینامیکی وارد شده به سیستم به صورت $\tau_d = [\sin(0.05t), \sin(0.05t)]^T$ است. بردار اصطکاک شامل اصطکاک های ویسکوز به صورت $0.2v$ و اصطکاک کولمب به صورت $0.5[\text{sign}(v), \text{sign}(\omega)]^T$ می باشد.

از کنترل کننده ی پس گام^۱ جهت مقایسه با عملکرد کنترل کننده ی پیشنهادی در این مقاله استفاده می شود. روش پس گام یک روش سیستماتیک برای طراحی کنترلی کننده های غیرخطی برای سیستم های دارای فیدبک اکید است که از تئوری های لیاپانوف استفاده می کند [۲۶]. مشابه با روند طراحی در [۲۶]، متغیرهای خطا را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$z_1 = q - q_d \tag{45}$$

$$z_2 = v - v_d$$

مطابق با [۲۶] و با توجه به (۱۵)، کنترل کننده مجازی برای زیر سیستم سینماتیکی به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$v_d = R^{-1}(\dot{q}_d(t) - K_1 z_1(t) - \delta) \tag{46}$$

که K_1 یک ثابت مثبت می باشد. سپس، قانون کنترل اصلی به صورت زیر انتخاب می شود:

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_a = & -R^T z_1 - K_2 z_2 + \hat{W} \sigma(x) \\ & - \hat{\theta}^2 z_2 / (\hat{\theta} \|z_2\| + \epsilon_i) \end{aligned} \tag{47}$$

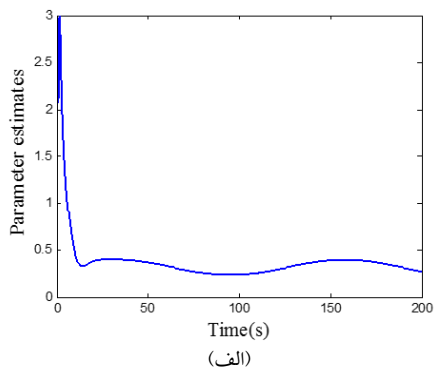
که $K_2 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ ماتریس بهره ی قطری مثبت معین است و $\hat{\theta} \in \mathbb{R}^3$ و $\hat{W} \in \mathbb{R}^{2 \times 9}$ با قوانین تطبیق زیر به روز رسانی می شوند:

$$\begin{cases} \dot{\hat{W}} = \Gamma_w z_2 \sigma^T(x) - \Gamma_w \delta_w \hat{W} \\ \dot{\hat{\theta}} = \gamma_\theta \|z_2\| - \gamma_\theta \sigma \hat{\theta} \end{cases} \tag{48}$$

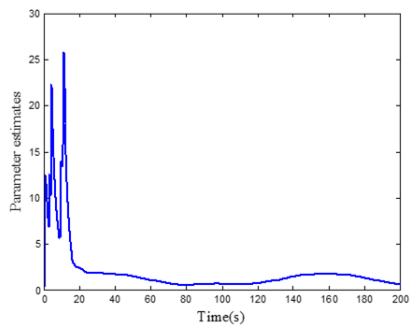
که Γ_w و γ_θ بهره های تطبیق را نشان می دهند، δ_w و σ پارامترهای طراحی مثبت کوچک هستند.

پس از آن، باید بهره های کنترل کننده های مقاوم تطبیقی و عصبی هر دو کنترل کننده منصفانه تنظیم شوند. برای شبکه ی عصبی با تابع پایه ی شعاعی در این مقاله، تعداد ۹ گره در لایه مخفی به منظور تخمین پارامترهای نامعین سیستم در نظر گرفته شده است. بهترین پارامترهای تخمینگر شبکه عصبی در کنترل کننده ی پیشنهادی و پس گام به صورت $\lambda_k = 10[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]^T$ و $\mu_k = [-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4]^T$ است. در واقع، پارامترهای شبکه عصبی بر اساس سعی و خطا برای بدست آوردن بهترین عملکرد کنترل کننده ها انتخاب شده اند. در شبیه

¹ Backstepping Controller

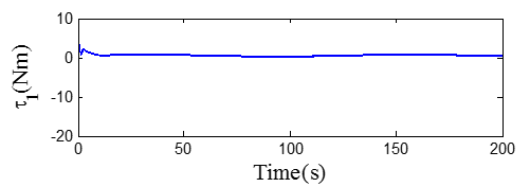


(الف)

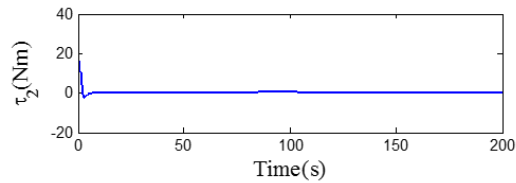


(ب)

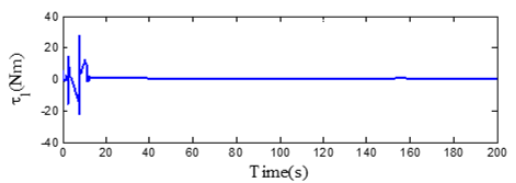
شکل ۷: تخمین پارامترهای نامعین (الف) کنترل کننده پیشنهادی، و (ب) کنترل کننده پس گام



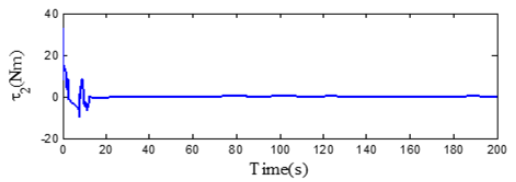
(الف)



(ب)

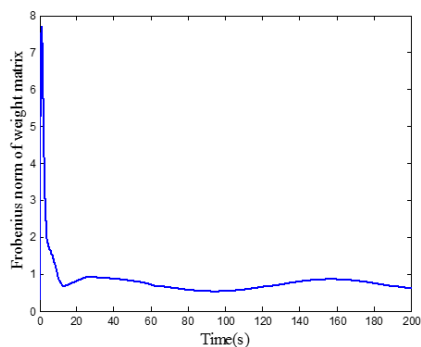


(ب)

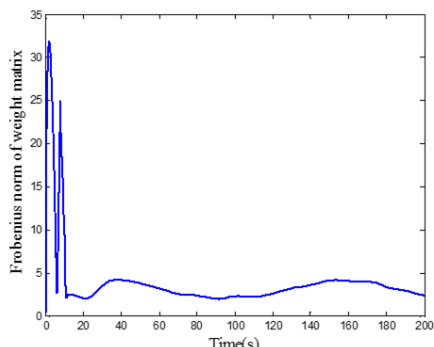


(ب)

شکل ۵: سیگنال کنترلی برای (الف) کنترل کننده پیشنهادی، و (ب) کنترل کننده پس گام



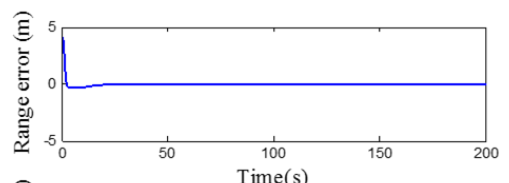
(الف)



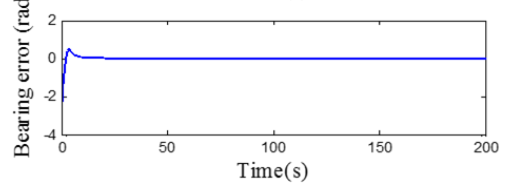
(ب)

شکل ۸- نرم فروبنیوس تخمین وزنهای شبکه عصبی (الف) کنترل کننده پیشنهادی، و (ب) کنترل کننده پس گام

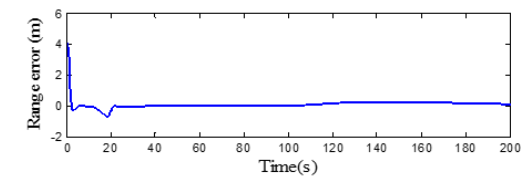
با توجه به نتایج شبیه سازی، براساس شکل های ۴-الف و ۴-ب ردیابی هر دو مسیر مرجع خطی توسط ربات پیرو در حضور اغتشاشات به خوبی



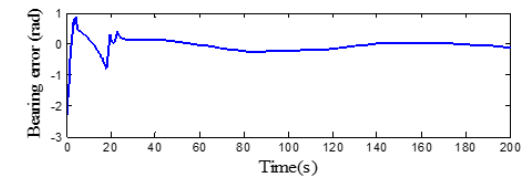
(الف)



(ب)

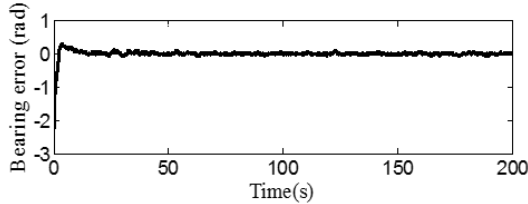
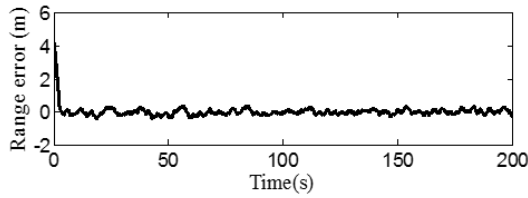


(ب)

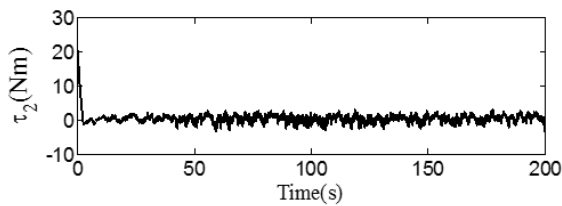
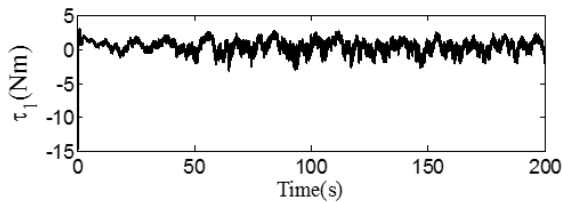


(ب)

شکل ۶: خطاهای ردیابی برای (الف) کنترل کننده پیشنهادی، و (ب) کنترل کننده پس گام



(ج)



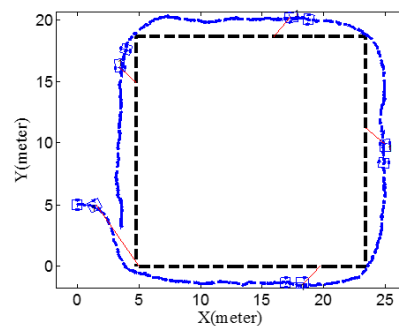
(د)

شکل ۹- نتایج شبیه سازی برای ردیابی ماشین جمع آوری محصول در یک مسیر مربعی در حضور نویز حسگرها: (الف) مسیر حرکت تراکتور-تریلر و ماشین جمع آوری محصول، (ب) بزرگنمایی بخشی از مسیر، (ج) خطاهای ردیابی فاصله و زاویه، و (د) سیگنال های گشتاور تولیدی

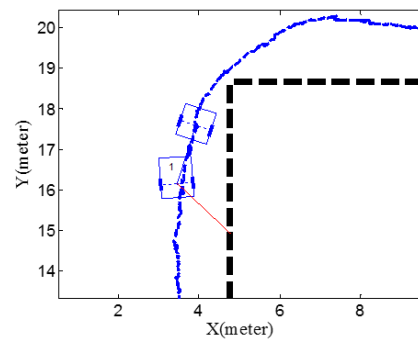
۸- نتیجه گیری

در این مقاله، یک کنترل کننده عصبی-تطبیقی-مقاوم به منظور کنترل ردیابی یک ماشین جمع آوری محصول توسط یک تراکتور-تریلر با حفظ فاصله و زاویه نسبی مطلوب بر اساس یک مدل مرتبه دوم به فرم اویلر-لاگرانژ طراحی شد. از آنجایی که نمایش مبتنی بر مدل پارامتری سیستم مرتبه دوم بدست آمده اندکی پیچیده و زمان بر است، یک شبکه عصبی تابع پایه شجاعی برای تخمین دینامیک نامعین و مقادیر نامعینی های پارامتری سیستم به کار گرفته شد. به علاوه، با توجه به اینکه شبکه عصبی قادر به تخمین اغتشاش های خارجی و نامعینی های غیرپارامتری دیگر نیست، و همچنین متضمن خطای تقریب می باشد، یک کنترل کننده مقاوم تطبیقی نوع اشباع در طراحی کنترل کننده استفاده شد که مقاومت کنترل کننده را تضمین کرده است. اثبات پایداری مبتنی بر تئوری لیاپانوف تضمین کرد که خطاهای ردیابی بطور یکنواخت نهایتاً کران دار هستند و به ناحیه کوچکی حول مبدأ همگرا می شوند. باید توجه شود که اغلب کنترل کننده های ارائه شده در مقالات قبلی

انجام شده و فاصله و زاویه ی مطلوب از ربات رهبر حفظ شده است. ولی ردیابی مسیر توسط کنترل پیشنهادی دقت بالاتری را نشان می دهد. با توجه به شکل ۵-الف هموار بودن سیگنال کنترلی برای کنترل کننده پیشنهادی حتی در حضور اغتشاشات حفظ شده است. در حالی که سیگنال های کنترلی کنترل کننده پس گام در شکل ۵-ب قبل از بیست ثانیه اندکی خشن تر است. با بررسی خطای ردیابی در شکل ۶-الف، پاسخ حالت گذرا و حالت ماندگار برای کنترل کننده پیشنهادی عملکرد خوبی نشان می دهد و نهایتاً خطای ردیابی به مقدار خیلی کوچکی نزدیک صفر همگرا شده است و مقاومت کنترل کننده در برابر نامعینی ها تضمین می شود. براساس شکل ۷-الف و شکل ۸-الف، تخمین پارامترهای نامعین و وزن های شبکه عصبی با وجود اثرات نامطلوب نامعینی ها به خوبی انجام گرفته است و در نهایت، این تخمین ها به صورت یکنواخت کران دار می باشند. در مقایسه، کنترل کننده ی پس گام عملکرد ضعیف تری نسبت به کنترل کننده ی پیشنهادی داشته است. برای دست یابی به چنین دقتی در کنترل کننده پس گام، بهره های کنترلی بزرگ تر و سیگنال های کنترلی خشن تری در شبیه سازی ها بدست می آید. برای ارزیابی بهتر کنترل کننده پیشنهادی، نویز اندازه گیری با توزیع احتمالی گاوسی با متوسط صفر و انحراف از معیار ۰/۰۰۵ به حالت های تراکتور-تریلر و انحراف از معیار ۰/۰۵ به سیگنال های سرعت افزوده شده است. نتایج شبیه سازی برای یک مسیر پیچیده تر مربعی در شکل ۹ به تصویر کشیده شده است. همان طور که در این شکل ملاحظه می شود، کنترل کننده پیشنهادی با عملکرد نسبتاً مطلوبی ردیابی ماشین جمع آوری محصول توسط تراکتور-تریلر را در حضور نامعینی های پارامتری، اغتشاش و نویز اندازه گیری محقق می کند.



(الف)



(ب)

- Biosystems Engineering, vol. 106, pp. 103-111, 2010.
- [11] Asghar Khanpoor, Ali Keymasi Khalaji, S. Ali. Moosavian, "Modeling and control of an underactuated tractor-trailer wheeled mobile robot", *Robotica*, vol. 35, no. 12, pp. 2297-2318, 2017.
- [12] Jin Cheng, Bin Wang, Yong Zhang, and Zhonghua Wang, "Backward Orientation Tracking Control of Mobile Robot with N Trailers", *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol.15, pp. 867-874, April 2017.
- [13] Tong Wu, John Y. Hung, "Path following for a tractor-trailer system using model predictive control", *SoutheastCon*, Charlotte, NC, USA, pp. 1-5, 2017.
- [14] B. Park, S.J. Yoo, "Adaptive leader-follower formation control of mobile robots with unknown skidding and slipping effects", *International Journal of Control Automation and Systems*, vol. 13, pp. 587-594, 2015.
- [15] K. Shojaei, "Neural network formation control of a team of tractor-trailer systems", *Robotica*, vol. 36, no.1, pp. 39-56, 2018.
- [16] N. Lashkari, M. Biglarbegian, and S. X. Yang, "Optimal design of formation tracking control for a tractor-trailer robotic system with omnidirectional wheels", in *Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 1826-1831, IEEE, 2016.
- [17] Dong, J. Liu, S. Peng, K. "Formation control of multi-robot based on I/O feedback linearization and potential function," *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-6, 2014.
- [18] A. K. Khalaji, S. A. A. Moosavian, "Robust Adaptive Controller for a Tractor-Trailer Mobile Robot," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, pp. 943-953, 2013.
- [19] Jean-Jacques E. Slotine, Weiping Li, "On the Adaptive Control of Robot Manipulators", *International of Robotics Research*, vol. 6, no. 3, pp. 49-59, 1987.
- [20] F. Lewis, D. Dawson, C. Abdallah, "Robot manipulator control: theory and practice", New York: 2nd Edition, Automation and Control Engineering, 2003.
- [21] Linhuan Zhang, Tofael Ahamed, Yan Zhang, Pengbo Gao and Tomohiro Takigawa, "Vision-Based Leader Vehicle Trajectory Tracking for Multiple Agricultural Vehicles", *Sensors (Basel)*, vol.16, 2016.
- [22] S. A. A. Moosavian, M. R. Bidgoli, A. K. Khalaji, "Tracking Control of wheeled mobile robot towing two trailer", in *Proc RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, Tehran, pp. 767-772, 2013.
- کنترل کننده‌های سینماتیکی و دینامیکی جداگانه‌ای را (معمولاً به کمک روش کنترل پس‌گام) طراحی می‌کنند. این روش‌ها پیچیدگی نسبتاً زیادی دارند و به دلیل ساختار دو حلقه‌ای تو در تو، پاسخ‌گذاری طولانی را از خود نشان می‌دهند. در مقابل، در این مقاله تنها یک قانون کنترل واحد برای جبران همزمان سینماتیک و دینامیک ربات طراحی شده است که ساختاری نسبتاً ساده‌تر دارد و عملکرد ردیابی بهتری را در نتایج شبیه‌سازی نشان داده است. در کارهای آتی، حذف حسگر سرعت در تراکتور-تریلر به کمک طراحی یک رُویتگر سرعت مورد توجه قرار خواهد گرفت.

مراجع

- [1] Mousazadeh H. "A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles", *Journal of Terramechanics*, vol. 50, pp 211-232, 2013.
- [2] Gollakota A, Srinivas M, "Agribot—a multipurpose agricultural robot", In: *IEEE India conference (INDICON)*, pp 1-4, 2011.
- [3] Jun W et al, "Design and co-simulation for tomato harvesting robots", In: *31st Chinese control conference (CCC)*, pp 5105-5108, 2012.
- [4] Qingchun F et al, "Study on strawberry robotic harvesting system", In: *IEEE international conference on computer science and automation engineering (CSAE)*, vol. 1, pp 320-324, 2012
- [5] A. Keymasi Khalaji and S. A. A. Moosavian, "Design and implementation of a fuzzy sliding mode control law for a wheeled robot towing a trailer", *Modares Mechanical Engineering*, vol. 14, no.4, pp.81-88, 2014. (InPersian)
- [6] I. Kolmanovsky and N.H. McClamroch, "Developments in nonholonomic control problems", *IEEE Control Systems*, vol. 15, no. 6, pp. 20-36, 1995.
- [7] L. Cordesses, C. Cariou, M. Berduct, "Combine Harvester Control Using Real Time Kinematic GPS", *Precision Agriculture*, vol. 2, pp. 147-161, 2000.
- [8] Kurita H, Iida M, Suguri M, Masuda R, Cho W, "Efficient searching for grain storage container by combine robot", *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, vol.7, no. 3, pp. 109-114, 2014.
- [9] Wonjae Cho, Hiroki Kurita, Michihisa Iida, Masahiko Suguri, Ryohei Masuda, "Autonomous positioning of the unloading auger of a combine harvester by a laser sensor and GNSS", *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, vol. 8, pp. 178-186, 2015.
- [10] Geert Craessaerts, Josse de Baerdemaeker, Bart Missotten, Wouter Saeys, "Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester",

- [23] K. Shojaei, "Leader-follower formation control of underactuated autonomous marine surface vehicles with limited torque," *Ocean Engineering*, vol. 105, pp. 196-205, 2015.
- [24] G. Campion, G. Bastin and B. D'Andrea Novel, "Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots", *IEEE Transactions on Robotics Automation*, vol. 12, no. 1, pp. 47-62, 1996.
- [25] Khalil, H., *Nonlinear Systems*, Englewood Cliffs, Third Edition, Prentice Hall, 2002.
- [26] Z. G. Hou, A-M. Zou, L. Cheng, M. Tan, "Adaptive control of an electrically driven nonholonomic mobile robot via backstepping and fuzzy approach," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 17, pp. 803-815, 2009.