مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان۱۳۹۸، صفحه ۳۵-۲۳

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

دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۰۵ ویرایش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۸ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۳۱

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 اویلر- 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 جمع آوری 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

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.5.2]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.23]

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.

۱- مقدمه

توسعه‌ی ربات‌های متحرک چرخ‌دار کشاورزی[1]، 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 قیود غیرهولونومیکی هستند. این قیود 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]، قیود 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[2] یک سیستم رباتیکی است که به‌منظور برداشت، کوبیدن، جدا کردن و تمیز کردن دانه‌ها با حداقل دانه‌های صدمه دیده و حداقل تلفات، به‌کار 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 قیود غیرهولونومیکی می‌باشد و از یک تراکتور به همراه یک تریلر تشکیل می‌شود. تحلیل و کنترل این‌گونه 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 به‌کار گرفته شده است که یکی از روش‌های مهم در زمینه‌ی حفظ آرایش‌بندی ربات‌های متحرک، کنترل آرایش‌بندی رهبر -پیرو[3] [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 همه جهته[4] روی محور ارائه شده است که پارامترهای طراحی کنترل، بهینه شده‌اند. در مرجع [۱۷]، از ترکیب تکنیک کنترلی خطی‌سازی فیدبک با تابع پتانسیل به‌منظور 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 خطی‌ساز 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

[1] Agricultural robots
[2] Combine Harvester
[3] Leader-Follower
[4] Omni-directional

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.5.2]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.23]

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 درنظر 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]، نوآوری های این مقاله به صورت زیر بیان می‌شوند:

۱. برای اولین بار، یک مدل دینامیکی مرتبه دوم به شکل اویلر-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 . بر خلاف 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[1]، که برای کنترل بازوها در مرجع [۱۹] ارائه شده است، طراحی می‌شود که بر خلاف 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 جداگانه ای بهره می‌گیرد، روش پیشنهادی در این مقاله با تلفیق معادلات سینماتیکی و دینامیکی و ارائه یک مدل اویلر-لاگرانژ مرتبه دوم، یک کنترل‌کننده واحد با ساختاری ساده‌تر را ارائه می‌کند که برای پیاده سازی‌های عملی ارجحیت بیشتری دارد.

۳. جهت تخمین نامعینی‌های پارامتری از یک شبکه عصبی تابع پایه شعاعی [۲۰] استفاده می‌شودکه 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 نامعینی های ساختار نیافته نظیر اغتشاشات، توسط کنترل مقاوم تطبیقی جبران می‌شود.

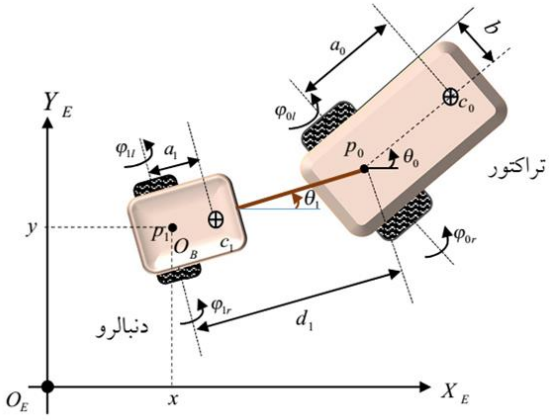
ساختار مقاله بدین صورت است که ابتدا در بخش ۲، پیکربندی ربات تراکتور- تریلر توصیف می‌شود. پس از آن در این بخش، معادلات حرکت سینماتیک و دینامیک این ربات استخراج می‌شود. در بخش ۳، جهت کنترل هماهنگ ربات تراکتور- تریلر و ماشین کمباین مدل آرایش‌بندی بیان می‌شود. در بخش ۴، به بیان شبکه عصبی تابع پایه شعاعی پرداخته می‌شود. در بخش ۵، از کنترل‌کننده‌ی 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.

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_{1r} و φ_{1l} 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 شکل های ۱ و ۲، ربات تراکتور- تریلر درنظر گرفته شده در این مقاله به صورت $d_1 = d \neq 0$ و $d_0 = 0$ می‌باشد که این نوع سیستم را روی محور[2] می‌گویند. معادله‌ی دینامیکی حاکم بر سیستم به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۲]:

$$M_1(\eta)\ddot{\eta}(t)+C_1(\eta,\dot{\eta})\dot{\eta}(t)+D_1\dot{\eta}(t)+\tau_{d1} = B_1(\eta)\tau_a(t)+A^T(\eta)\lambda \quad (۱)$$



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

با توجه به معادله‌ی (۱)، بردار مختصات تعمیم یافته‌ی ربات[3]، $\eta = [x, y, \theta_1, \theta_0]^T$ می‌باشد. $v = [\upsilon(t), \omega(t)]^T$ بردار سرعت‌های 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

[1] Passivity-based control

[2] On-axle hitching

[3] Generalized Coordinates

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.5.2]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.23]

بیانگر جهت‌گیری ربات کشنده و دنبالرو هستند. $M_1(\eta)\in\Re^{4\times4}$ ماتریس اینرسی متقارن مثبت معین جبری است و $C_1(\eta,\dot\eta)\in\Re^{4\times4}$ یک ماتریس کوریولیس را نشان می‌دهد. $D_1\in\Re^4$ ماتریس میرایی و ضرایب اصطکاک ویسکوز، $\tau_{d1}\in\Re^{4\times1}$ بردار کران‌دار از اغتشاشات خارجی و دینامیک‌های مدل نشده، $B_1(\eta)\in\Re^{4\times2}$ ماتریس انتقال ورودی و $\tau_a\in\Re^{2\times1}$ 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 $\lambda\in\Re^{4\times1}$ نشان داده می‌شوند. مطابق با [۱۸]، ماتریس‌های معرفی شده به صورت زیر بیان می‌شوند:

(۲)

$$M_1(\eta)=\begin{bmatrix} m & 0 & -A\sin\theta_1 & -a_0m_0\sin\theta_0\\ 0 & m & A\cos\theta_1 & a_0m_0\cos\theta_0\\ -A\sin\theta_1 & A\cos\theta_1 & I_{\theta_1} & a_0dm_0\cos(\theta_0-\theta_1)\\ -a_0m_0\sin\theta_0 & a_0m_0\cos\theta_0 & a_0dm_0\cos(\theta_0-\theta_1) & I_{\theta_0}\end{bmatrix}$$

$$B_1=\frac{1}{r}\begin{bmatrix}\cos\theta_0 & \sin\theta_0 & d\sin(\theta_0-\theta_1) & b\\ \cos\theta_0 & \sin\theta_0 & d\sin(\theta_0-\theta_1) & -b\end{bmatrix}^T \quad (۳)$$

$$D_1=diag\left[d_{m1},d_{m2},d_{m3},d_{m4}\right],\quad C_1(\eta,\dot\eta)\dot\eta=\left[C_{jk}\right]_{4\times1} \quad (۴)$$

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

$$\begin{aligned}&A=a_1m_1+d\,m_0\ ,\ m=m_0+m_1\\ &I_{\theta_1}=m_1a_1^{\,2}+m_0d^2+I_1\ ,\ I_{\theta_0}=m_0a_0^{\,2}+I_0\\ &C_{11}=-a_0m_0\cos\theta_0\dot\theta_0^{\,2}-A\cos\theta_1\dot\theta_1^{\,2}\\ &C_{21}=-a_0m_0\sin\theta_0\dot\theta_0^{\,2}-A\sin\theta_1\dot\theta_1^{\,2}\\ &C_{31}=-a_0\,d\,m_0\,\dot\theta_0^{\,2}\sin(\theta_0-\theta_1)\\ &C_{41}=a_0\,d\,m_0\,\dot\theta_1^{\,2}\sin(\theta_0-\theta_1)\end{aligned} \quad (۵)$$

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 درنظر 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، $A(\eta)\in\mathrm{R}^{m\times n}$ 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 می‌شود. لازم به ذکر است که d فاصله‌ی مرکز هندسی ربات تا مرکز هندسی دنبالرو یا فاصله‌ی بین چرخ‌های ربات تا چرخ‌های دنبالرو است.

$$\underbrace{\begin{bmatrix}\sin(\theta_0) & -\cos(\theta_0) & -d\cos(\theta_0-\theta_1) & 0\\ \sin(\theta_1) & -\cos(\theta_1) & 0 & 0\end{bmatrix}}_{A(\eta)}\begin{bmatrix}\dot x\\ \dot y\\ \dot\theta_1\\ \dot\theta_0\end{bmatrix}=0 \quad (۶)$$

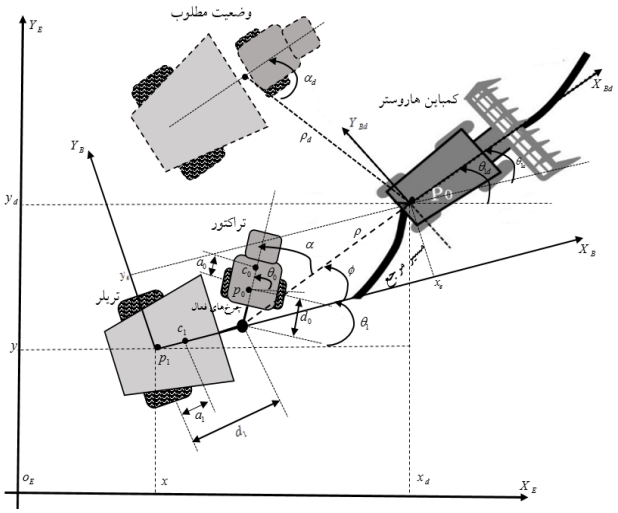
از طرفی معادله‌ی سینماتیک ربات به صورت زیر بیان می‌شود [۲۲]:

$$\dot\eta=S(\eta)v \quad (۷)$$

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

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

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

$$\dot\eta=\begin{bmatrix}\dot x\\ \dot y\\ \dot\theta_1\\ \dot\theta_0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos(\theta_1) & 0\\ \sin(\theta_1) & 0\\ \frac{1}{d}\tan(\theta_0-\theta_1) & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\upsilon\\ \omega\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos(\theta_1)\\ \sin(\theta_1)\\ \frac{1}{d}\tan(\theta_0-\theta_1)\\ 0\end{bmatrix}\upsilon+\begin{bmatrix}0\\0\\0\\1\end{bmatrix}\omega \quad (۸)$$

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

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.5.2]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.23]

$$M_2(\eta)\dot{v}(t)+C_2(\eta,v)v(t)+D_2(\eta)v(t)+\tau_{d2}(t,\eta)=B_2(\eta)\tau_a \quad (۹)$$

که هر یک از ماتریس های رابطه‌ی (۹)، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} &M_2(\eta)=S^T(\eta)\,M_1(\eta)\,S(\eta)\,,\ B_2(\eta)=S^T(\eta)B_1(\eta)\\ &C_2(\eta,v)=S^T(\eta)M_1(\eta)\dot{S}(\eta)+S^T(\eta)C_1(\eta,\dot{\eta})S(\eta)\\ &D_2(\eta)=S^T(\eta)D_1\,S(\eta)\,,\ \tau_{d2}=S^T(\eta)\tau_{d1} \end{aligned} \quad (۱۰)$$

۳- آرایش کنترلی

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

$$\lim_{t\to\infty}\left|\rho(t)-\rho_d(t)\right|\le\varepsilon_\rho\,,\ \lim_{t\to\infty}\left|\alpha(t)-\alpha_d(t)\right|\le\varepsilon_\alpha \quad (۱۱)$$

که در آن ε_ρ و ε_α ثابت‌های مثبت کوچک دلخواه هستند و $\rho(t)$ و $\alpha(t)$ فاصله و سمت‌گیری 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 می‌دهند.

فرض ۱: بردار مختصات تعمیم یافته‌ی $\eta(t)$ و بردار سرعت $v(t)$ قابل اندازه‌گیری 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 $\tau_{d2}(t)$ کراندار است طوری که $\sup\left\|\tau_{d2}(t)\right\|<B_{d\tau}$ است و $B_{d\tau}$ یک ثابت مثبت است.

فرض ٤: بردار آرایش مطلوب $q_d(t)=[\rho_d(t),\alpha_d(t)]^T$ طوری انتخاب می‌شود که $q_d(t)$ و $\dot{q}_d(t)$ و $\ddot{q}_d(t)$ همگی سیگنال‌های کراندار باشند به طوری که $\sup\left\|q_d(t)\right\|<B_{dp}$ و $\sup\left\|\dot{q}_d(t)\right\|<B_{dv}$ و $\sup\left\|\ddot{q}_d(t)\right\|<B_{da}$، B_{dp}، B_{dv} و B_{da} همگی ثابت‌های مثبت کراندار هستند [۲۳].

در این بخش، برای سهولت در طراحی کنترل‌کننده در بخش بعدی، یک مدل مرتبه دوم با فرم اویلر-لاگرانژ به دست می‌آید که تمام خواص ساختاری مدل دینامیکی (۹) را حفظ می‌کند. 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:

$$\eta_e(t)=\begin{bmatrix}x_e(t)\\ y_e(t)\\ \theta_{1e}(t)\\ \theta_{0e}(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 & 0\\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_d-x\\ y_d-y\\ \theta_{1d}-\theta_1\\ \theta_{0d}-\theta_0\end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

که در آن x_d و y_d موقعیت، θ_{1d} سمت‌گیری و θ_{0d} زاویه فرمان ماشین کمباین را نشان می‌دهند. باتوجه به رابطه‌ی (۸) و مشتق‌گیری از رابطه‌ی (۱۲)، معادله‌ی خطای دینامیکی در دستگاه مختصات بدنه به صورت زیر می‌باشد:

$$\dot{\eta}_e(t)=\begin{bmatrix}\dot{x}_e(t)\\ \dot{y}_e(t)\\ \dot{\theta}_{1e}(t)\\ \dot{\theta}_{0e}(t)\end{bmatrix}= \quad (۱۳)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix}-1+(y_e/d)\tan(\theta_0-\theta_1) & 0\\ -(x_e/d)\tan(\theta_0-\theta_1) & 0\\ -(1/d)\tan(\theta_0-\theta_1) & 0\\ 0 & -1\end{bmatrix}}_{J}\underbrace{\begin{bmatrix}\upsilon\\ \omega\end{bmatrix}}_{v}+\underbrace{\begin{bmatrix}\cos\theta_{1e} & 0\\ \sin\theta_{1e} & 0\\ (1/d)\tan(\theta_{0d}-\theta_{1d}) & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}}_{S}\underbrace{\begin{bmatrix}\upsilon_d\\ \omega_d\end{bmatrix}}_{v_d}$$

سپس، فاصله و سمت‌گیری نسبی دو وسیله نقلیه نسبت به هم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q(t)= \quad (۱۴)$$

$$\begin{bmatrix}\rho(t)\\ \alpha(t)\end{bmatrix}=\underbrace{\begin{bmatrix}\rho(t)\\ \phi(t)-(\theta_0-\theta_1)\end{bmatrix}}_{h(\eta_e(t))}=\begin{bmatrix}\sqrt{(x_e(t)-d_1)^2+y_e^2(t)}\\ a\tan 2(y_e(t),x_e(t)-d_1)-(\theta_0-\theta_1)\end{bmatrix}$$

که در آن $\operatorname{atan}2(y,x)$ به معنی $\arctan(y/x)$ و در محدوده‌ی $[-\pi,\pi]$ است. با مشتق‌گیری از رابطه‌ی (۱۴) رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{q}(t)= \quad (۱۵)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix}-\cos\phi-\sin\phi\tan(\theta_0-\theta_1) & 0\\ (\sin\phi-\cos\phi\tan(\theta_0-\theta_1))/\rho & -1\end{bmatrix}}_{R(\eta)}v+\underbrace{\begin{bmatrix}\upsilon_d\cos(\theta_{1e}-\phi)\\ \upsilon_d\sin(\theta_{1e}-\phi)/\rho\end{bmatrix}}_{\delta}$$

تذکر ۱: $\det(R)=\cos(\phi)+\sin(\phi)\tan(\theta_0-\theta_1)$ در معادله‌ی (۱۵)، در صورتی که $\tan(\phi)\tan(\theta_0-\theta_1)\neq-1$ باشد، غیرصفر است. یک شرط لازم برای اجتناب از تکین شدن $\left|\phi(t)-(\theta_0-\theta_1)\right|<\pi/2$ می باشد که براساس آن، شرط $\left|\phi_d(t)-(\theta_0-\theta_1)\right|<\pi/2$ باید برقرار گردد.

حال، با مشتق‌گیری از رابطه‌ی (۱۵)، به معادله‌ی $\ddot{q}=\dot{R}v+R\dot{v}+\dot{\delta}$ خواهیم رسید که با توجه به این معادله، رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{v}=R^{-1}\ddot{q}-R^{-1}\dot{R}v-R^{-1}\dot{\delta} \quad (۱۶)$$

طبق معادله‌ی (۱۵)، معادله‌ی $v=R^{-1}\dot{q}-R^{-1}\delta$ برقرار است. با جایگذاری این معادله و (۱۶) در رابطه‌ی (۹)، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} &M_2R^{-1}\ddot{q}-M_2R^{-1}\dot{R}(R^{-1}\dot{q}-R^{-1}\delta)-M_2R^{-1}\dot{\delta}\\ &+C_2(\eta,R^{-1}\dot{q})R^{-1}\dot{q}-C_2(\eta,R^{-1}\dot{q})R^{-1}\delta\\ &-C_2(\eta,R^{-1}\delta)R^{-1}\dot{q}+C_2(\eta,R^{-1}\delta)R^{-1}\delta\\ &+D_2R^{-1}\dot{q}-D_2R^{-1}\delta+\tau_{2d}(t,\eta)=B_2\tau_a(t) \end{aligned} \quad (۱۷)$$

بنابراین، با ضرب دو طرف معادله بالا در R^{-T} مدل مرتبه دوم زیر به فرم اویلر-لاگرانژ بر حسب فاصله و سمت‌گیری نسبی دو وسیله نقلیه به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} &M(\eta)\ddot{q}+C(\eta,\dot{q})\dot{q}+D(\eta)\dot{q}+N(\eta_e,v_d,\dot{v}_d)\\ &+\tau_d(t,\eta)=B(\eta)\tau_a=\bar{\tau}_a \end{aligned} \quad (۱۸)$$

که ماتریس‌های رابطه‌ی (۱۸) به صورت زیر تعریف می‌شوند:

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.5.2]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.23]

$$M = R^{-T} M_2 R^{-1},\ D = R^{-T} D_2 R^{-1},\ B = R^{-T} B_2$$
$$C = R^{-T}(C_2 - M_2 R^{-1}\dot{R})R^{-1},\ \tau_d = R^{-T}\tau_{2d}$$
$$N(\eta_e, v_d, \dot{v}_d) = -M(\eta)\dot{\delta} + R^{-T}C_2(\eta, R^{-1}\delta)R^{-1}\delta - D(\eta)\delta - C(\eta,\delta) - R^{-T}C_2(\eta, R^{-1}\delta)R^{-1} \quad (۱۹)$$

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 $\lambda_m \|x\|^2 \le x^T M(\eta) x \le \lambda_M \|x\|^2 \quad \forall x \in \Re^2, 0 < \lambda_m \le \lambda_M < \infty$ است. که $\lambda_m := \min_{\forall \eta \in \Re^4} \lambda_{\min}(M(\eta)),\ \lambda_M := \max_{\forall \eta \in \Re^4} \lambda_{\max}(M(\eta))$ می‌باشد.

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

1) $x^T(\dot{M}(\eta) - 2C(\eta,v))\,x = 0,\ \forall x, v \in \Re^2, \eta \in \Re^4$
2) $\dot{M}(\eta) = C(\eta,v) + C^T(\eta,v),\ \forall v \in \Re^2, \forall \eta \in \Re^4$
3) $C(\eta, x_1)\,x_2 = C(\eta, x_2)\,x_1,\ \forall x_1, x_2 \in \Re^2,\ \eta \in \Re^4$
4) $C(\eta, x_1 + x_2)\,y = C(\eta, x_1)\,y + C(\eta, x_2)\,y,\ \forall x_1, x_2, y \in \Re^2$
5) $C(\eta, x_1 + x_2)\,y = C(\eta, x_1)\,y + C(\eta, x_2)\,y,\ \forall x_1, x_2, y \in \Re^2$

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 به‌طوری که [۱۸]:

$$\lambda_d \|x\|^2 \le x^T D(\eta) x \le \lambda_D \|x\|^2,\quad \forall x \in \Re^2,\quad 0 < \lambda_d \le \lambda_D < \infty$$
$$\lambda_d := \min_{\forall \eta \in \Re^4} \lambda_{\min}(D(\eta)),\quad \lambda_D := \max_{\forall \eta \in \Re^4} \lambda_{\max}(D(\eta))$$

٤- شبکه عصبی تابع پایه شعاعی

در این مقاله، برای تخمین نامعینی‌های پارامتری از شبکه عصبی تابع پایه شعاعی[1] استفاده می‌شود. تابع پیوسته داده شده $f(x): U \to \Re^{n_0}$ که $U \in \Re^{n_i}$ یک مجموعه‌ی فشرده است، را درنظر بگیرید. آنگاه توسط شبکه عصبی تابع پایه‌ی شعاعی می‌توان تابع غیرخطی نامعین را به صورت ترکیب خطی از وزن‌ها به شکل زیر نوشت [۲۰]:

$$f_m(x) = \sum_{k=1}^{\ell} w_{mk}\sigma(x) + e_{wm},\ m = 1,2,...,p$$
$$\sigma_k(x) = \exp(-\|x - \mu_k\|^2 / \lambda_k^{\,2}),\ k = 1,2,...,L \quad (۲۰)$$

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-اُمین تابع پایه‌ی شعاعی (تابع گوسی) است که $\mu_k = [\mu_{k1}, \mu_{k2}, ..., \mu_{kq}]$ و λ_k به ترتیب بردار مرکزی و انحراف معیار هستند. سپس، توابع غیرخطی می‌توانند به صورت ماتریسی زیر بیان شوند:

$$f(x) = W\sigma(x) + e_w \quad (۲۱)$$

که $\sigma(x) = [\sigma_1(x), ..., \sigma_\ell(x)]^T$، $f(x) = [f_1(x), ..., f_p(x)]^T$، $e_w = [e_{w1}, e_{w2}, ..., e_{wp}]^T$ کراندار است که $\|e_w\| \le B_w$ به صورت 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 می شود:

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1L} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{p1} & w_{p2} & \cdots & w_{pL} \end{bmatrix}_{p \times L} \quad (۲۲)$$

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 درنظر گرفته می‌شود:

$$\hat{f}(x) = \hat{W}\sigma(x) \quad (۲۳)$$

که $\hat{W}$ معرف ماتریس وزن تخمین زده شده می باشد.

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

۵- طراحی کنترل‌کننده

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

$$e(t) = q(t) - q_d(t),\ \dot{e}(t) = \dot{q}(t) - \dot{q}_d(t) \quad (۲۴)$$

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

$$r(t) = \dot{q}(t) - \dot{q}_r(t) = \dot{q}(t) - (\dot{q}_d(t) - \Lambda e(t)) = \dot{e}(t) + \Lambda e(t) \quad (۲۵)$$

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

$$\dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda e \quad (۲۶)$$

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

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

[1] Radial Basis Function Neural Networks

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.5.2]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.23]

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

و نهایتاً به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

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

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

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

که در آن وزن‌های شبکه عصبی تابع پایه شعاعی ایده‌آل و بردار خطای تقریب شبکه به صورت $\|W\|_F\le W_M$ و $\|e_w\|\le B_W$ 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 کنترل‌کننده‌ی مقاوم تطبیقی نوع اشباع برای تضمین پایداری سیستم در حضور اغتشاش و خطای تقریب شبکه عصبی استفاده می‌شود. باید توجه شود که $\|e_w-\tau(t)\|\le\theta$. درنهایت، قانون کنترل به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\tau_a=B^{-1}(\eta)\bar{\tau}_a=-B_2^{-1}R^TK_pr-B_2^{-1}R^T\hat{W}\sigma(x)$$
$$-\hat{\theta}^2B_2^{-1}R^Tr/\left(\hat{\theta}\|r\|+\varepsilon_t(t)\right) \qquad (۲۹)$$

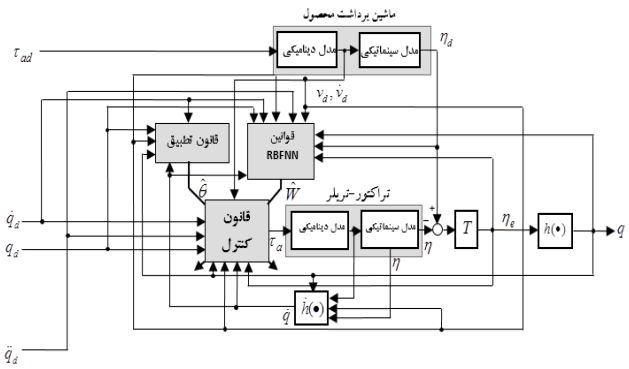
در (۲۹)، K_p ماتریس بهره‌ی قطری مثبت معین است. همچنین، قوانین به‌روزرسانی وزن‌های شبکه عصبی و تخمین پارامتر باند بالا به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

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

که Γ_w و γ_θ بهره‌های تطبیق را نشان می‌دهند، δ_w و σ 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:

$$M(\eta)\dot{r}=-C(\eta,\dot{q})r-Dr-K_pr+\underbrace{\left(W-\hat{W}\right)}_{\tilde{W}}\sigma(x)$$
$$-\frac{\hat{\theta}^2r}{\hat{\theta}\|r\|+\varepsilon_t}+e_w-\tau_d(t) \qquad (۳۱)$$

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.



شکل ۳: دیاگرام بلوکی سیستم کنترل پیشنهادی

٦- 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 درنظر 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، کنترل کننده 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 $x\in\Re^n$ نامساوی ریلی ریتز به صورت برقرار است [۲۵]:

$$\lambda_{\min}\{M\}\|x\|^2\le x^TMx\le\lambda_{\max}\{M\}\|x\|^2 \qquad (۳۲)$$

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

$$x^TMy\le\frac{1}{2k^2}\lambda_{\max}\{M\}\|x\|^2+\frac{k^2}{2}\lambda_{\max}\{M\}\|y\|^2 \qquad (۳۳)$$

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

$$V(t)=0.5r^TM(\eta)r+0.5tr\left\{\tilde{W}^T\Gamma_W^{-1}\tilde{W}\right\}+0.5\tilde{\theta}^2/\gamma_\theta \qquad (۳۴)$$

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

$$\lambda_x\|x\|^2\le V(t)\le\lambda_X\|x\|^2$$
$$\lambda_x=0.5\min\{\lambda_m,\lambda_{\min}(\Gamma_W^{-1}),\gamma_\theta^{-1}\}$$
$$\lambda_X=0.5\max\{\lambda_M,\lambda_{\max}(\Gamma_W^{-1}),\gamma_\theta^{-1}\} \qquad (۳۵)$$
$$x:=[r^T,\tilde{w}_{11},...,\tilde{w}_{2L},\tilde{\theta}]^T$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.5.2]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.23]

در ادامه، با مشتق‌گیری از رابطه (۳۴) و استفاده از خاصیت ۲، رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\dot{V} = r^T M(\eta)\dot{r} + \frac{1}{2} r^T \dot{M}(\eta) r - tr\left\{\tilde{W}^T \Gamma_W^{-1} \dot{\hat{W}}\right\} - \frac{1}{\gamma_\theta}\tilde{\theta}\dot{\hat{\theta}} \quad (۳۶)$$

$$\dot{V} = -r^T (K_p + D) r + r^T \tilde{W}\sigma(x) - \frac{\hat{\theta}^2 r^T r}{\hat{\theta}\|r\| + \varepsilon_t} + r^T (e_w - \tau_d(t)) - tr\{\tilde{W}^T \Gamma_W^{-1} \dot{\hat{W}}\} - \frac{1}{\gamma_\theta}\tilde{\theta}\dot{\hat{\theta}} \quad (۳۷)$$

پس از آن، با جایگذاری $\|e_w - \tau(t)\| \le \theta$ در رابطه (۳۷)، همچنین با توجه به لم ۱، با توجه به این که K_p و D هر دو ماتریس‌های مثبت معین هستند، رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\dot{V} \le -\lambda_{\min}(K_p + D)\|r\|^2 + r^T \tilde{W}\sigma(x) - \frac{\hat{\theta}^2 r^T r}{\hat{\theta}\|r\| + \varepsilon_t} + \|r\|\theta - tr\{\tilde{W}^T \Gamma_W^{-1} \dot{\hat{W}}\} - \frac{1}{\gamma_\theta}\tilde{\theta}\dot{\hat{\theta}} \quad (۳۸)$$

سپس، با جایگذاری رابطه‌ی (۳۰) در رابطه‌ی (۳۸)، رابطه‌ی زیر برقرار می‌شود:

$$\dot{V} \le -\lambda_{\min}(K_p + D)\|r\|^2 + r^T \tilde{W}\sigma(x) - \frac{\hat{\theta}^2 r^T r}{\hat{\theta}\|r\| + \varepsilon_t} + \|r\|\theta - tr\{\tilde{W}^T r\sigma^T(x)\} + tr\left\{\tilde{W}^T \delta_w \hat{W}\right\} - \|r\|\tilde{\theta} + \sigma\tilde{\theta}\hat{\theta} \quad (۳۹)$$

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

$$\dot{V} \le -\lambda_{\min}(K_p + D)\|r\|^2 - \frac{\hat{\theta}^2 r^T r}{\hat{\theta}\|r\| + \varepsilon_t} + \|r\|\theta + tr\left\{\tilde{W}^T \delta_w \hat{W}\right\} - \underbrace{\|r\|(\theta - \hat{\theta})}_{\|r\|\tilde{\theta}} + \sigma\tilde{\theta}\hat{\theta} \quad (۴۰)$$

پس از ساده‌سازی و باتوجه به این که $\varepsilon_t \|r\|\hat{\theta} / (\hat{\theta}\|r\| + \varepsilon_t) \le \varepsilon_t$ است، رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\dot{V} \le -\lambda_{\min}(K_p + D)\|r\|^2 + \varepsilon_t + tr\left\{\tilde{W}^T \delta_w \hat{W}\right\} + \sigma\tilde{\theta}\hat{\theta} \quad (۴۱)$$

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

$$tr\left\{X^T Y\right\} \le \frac{1}{2k^2}\|X\|_F^2 + \frac{k^2}{2}\|Y\|_F^2 \quad (۴۲)$$

نهایتاً، با درنظر گرفتن لم ۲، رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{V} \le -\lambda_{\min}(K_p + D)\|r\|^2 + \varepsilon_t - \delta_W\left(1 - \frac{1}{2k^2}\right)\|\tilde{W}\|_F^2 + \delta_W \frac{k^2}{2}\|W\|_F^2 - \sigma_\theta\left(1 - \frac{1}{2k^2}\right)\|\tilde{\theta}\|^2 + \sigma_\theta \frac{k^2}{2}|\theta|^2 \quad (۴۳)$$

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

$$\dot{V}(t) \le -c_m \|x(t)\|^2 + \Gamma \le -c_m V(t)/\lambda_X + \Gamma \quad (۴۴)$$

که براساس رابطه‌ی (۴۴)، $c_m = \min\{c_1, c_2, c_3\}$ و همچنین $x(t) = \left[r^T, \tilde{w}_{11}, ..., \tilde{w}_{2L}, \tilde{\theta}\right]^T$ می‌باشد و پارامترها به صورت تعریف می‌شوند:

$$c_1 = \lambda_{\min}(K_P + D) > 0$$
$$c_2 = \delta_W(1 - 0.5/k^2) > 0$$
$$c_3 = \sigma_\theta(1 - 0.5/k^2) > 0$$

که $k > \sqrt{2}/2$. از طرفی $\Gamma = 0.5\delta_W k^2 \|W\|_F^2 + 0.5\sigma_\theta k^2 |\theta|^2 + \varepsilon_t$ 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 می‌دهند. بنابراین، چون $\Gamma \ne 0$ است، پایداری مجانبی بدست نمی‌آید. بلکه یک 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)، $0 \le V(t) \le e^{-c_m t/\lambda_X} V(0) + (\Gamma\lambda_X / c_m)(1 - e^{-c_m t/\lambda_X})$ نتیجه می‌شود، که اکیداً منفی بودن $\dot{V}(t)$ در خارج از مجموعه فشرده $\Omega_x = \left\{x(t) \mid 0 \le \|x(t)\| \le \sqrt{\Gamma\lambda_X / c_m}\right\}$ را تضمین می‌کند. بنابراین، $V(t)$ در خارج ازمجموعه Ω_x اکیداً نزولی است که نشان می‌دهد $\|x(t)\|$ به طور یکنواخت نهایتاً کران‌دار می‌باشد. در نتیجه، خطاهای ردیابی به طور یکنواخت نهایتاً کران‌دار بوده و به طور نمایی به توپ کوچکی شامل مبدأ همگرا می‌گردند که اندازه آن با تغییر پارامترهای کنترلی قابل تنظیم است. از طرفی، تخمین پارامترهای شبکه عصبی و باند بالای نامعینی‌های غیرپارامتری نیز کران‌دار هستند. این عبارت اثبات پایداری را به اتمام می‌رساند. □

۸- نتایج شبیه سازی

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

فاصله‌ی بین مرکز جرم تا مرکز هندسی تراکتور $a_0 = 0.15m$، فاصله‌ی بین مرکز جرم تا مرکز هندسی تریلر $a_1 = 0.05m$، فاصله‌ی مرکز هندسی تراکتور تا نقطه اتصال $d_0 = 0m$، فاصله‌ی مرکز هندسی تریلر تا نقطه‌ی اتصال $d_1 = 1.5m$، فاصله‌ی 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 می‌گردد. بردار فاصله و زاویه نسبی مطلوب برای ربات تراکتور-تریلر

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.5.2]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.23]

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

از کنترل‌کننده‌ی پس‌گام[1] جهت مقایسه با عملکرد کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی در این مقاله استفاده می‌شود. روش پس‌گام یک روش سیستماتیک برای طراحی کنترل‌کننده های غیرخطی برای سیستم‌های دارای فیدبک اکید است که از تئوری‌های لیاپانوف استفاده می کند [۲۶]. مشابه با روند طراحی در [۲۶]، متغیرهای خطا را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$\begin{aligned} z_1 &= q-q_d \\ z_2 &= \nu-\nu_d \end{aligned} \qquad (۴۵)$$

مطابق با [۲۶] و با توجه به (۱۵)، کنترل‌کننده مجازی برای زیر سیستم سینماتیکی به صورت زیر درنظر گرفته می‌شود:

$$\nu_d=R^{-1}(\dot{q}_d(t)-K_1 z_1(t)-\delta) \qquad (۴۶)$$

که K_1 یک ثابت مثبت می‌باشد. سپس، قانون کنترل اصلی به صورت زیر انتخاب می‌شود:

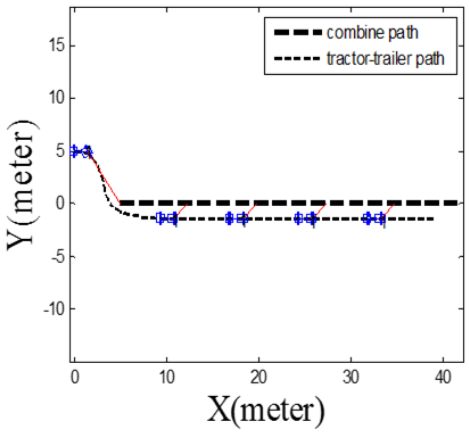
$$\begin{aligned} \bar{\tau}_a &= -R^T z_1-K_2 z_2+\hat{W}\sigma(x) \\ &\quad -\hat{\theta}^2 z_2/\left(\hat{\theta}\|z_2\|+\varepsilon_t\right) \end{aligned} \qquad (۴۷)$$

که $K_2\in\Re^{2\times2}$ ماتریس بهره‌ی قطری مثبت معین است و $\hat{W}\in\Re^{2\times9}$ و $\hat{\theta}\in\Re^3$ با قوانین تطبیق زیر به روزرسانی می‌شوند:

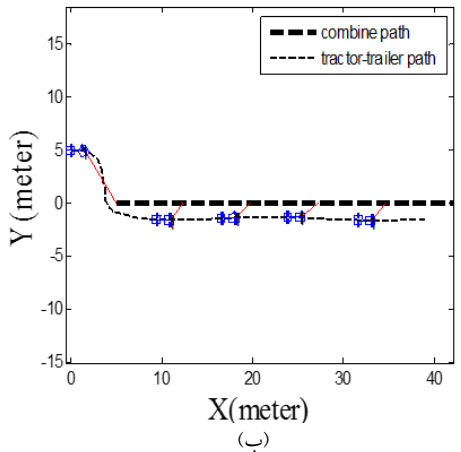
$$\begin{cases} \dot{\hat{W}}=\Gamma_w z_2\sigma^T(x)-\Gamma_w\delta_W\hat{W} \\ \dot{\hat{\theta}}=\gamma_\theta\|z_2\|-\gamma_\theta\sigma\hat{\theta} \end{cases} \qquad (۴۸)$$

که Γ_w و γ_θ بهره‌های تطبیق را نشان می‌دهند، δ_W و σ پارامترهای طراحی مثبت کوچک هستند.

پس از آن، باید بهره‌های کنترل‌کننده‌های مقاوم تطبیقی و عصبی هر دو کنترل‌کننده منصفانه تنظیم شوند. برای شبکه‌ی عصبی با تابع پایه‌ی شعاعی در این مقاله، تعداد ۹ گره در لایه مخفی به منظور تخمین پارامترهای نامعین سیستم درنظر گرفته شده است. بهترین پارامترهای تخمینگر شبکه عصبی در کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی و پس‌گام به صورت $\mu_k=[-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4]^T$ و $\lambda_k=10[1,1,1,1,1,1,1,1,1]^T$ است. در واقع، پارامترهای شبکه عصبی بر اساس سعی و خطا برای بدست آوردن بهترین عملکرد کنترل‌کننده‌ها انتخاب شده‌اند. در شبیه سازی، ابتدا این پارامترها (نظیر بهره و تعداد سلول های لایه پنهان) کوچک انتخاب می‌شوند. سپس، تدریجاً مقادیر پارامترها افزایش داده می‌شود تا عملکرد کنترل‌کننده بهبود یابد. نتایج نشان می‌دهند که افزایش بیش از حد مقادیر پارامترها ممکن است سبب اُفتِ عملکرد و ناپایداری کنترل‌کننده گردد. پارامترهای کنترل‌کننده‌ی مقاوم تطبیقی عصبی در رابطه‌ی (۳۰) به صورت $\Gamma_w=3I_{2\times2}$، $\delta_w=0.05$، $\gamma_\theta=7$ و $\sigma=0.1$ و بهره‌ی کنترل‌کننده با توجه به رابطه (۲۹)، به صورت $K_p=20I_{2\times2}$ درنظر گرفته شده است. پارامترهای کنترل‌کننده‌ی پس‌گام مقاوم تطبیقی عصبی رابطه‌ی (۴۸)، به صورت $\Gamma_w=0.1$، $\delta_w=0.01$، $\gamma_\theta=0.5$، $\sigma=0.05$ و بهره‌ی کنترل‌کننده با توجه به رابطه‌ی (۴۷)، به صورت $K_2=2I_{2\times2}$ درنظر گرفته شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی دو کنترل‌کننده، شکل‌های ۴ تا ۸ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ردیابی ماشین جمع آوری محصول توسط تراکتور-تریلر، ورودی‌های کنترلی، خطاهای ردیابی، تخمین پارامترهای نامعین، تخمین وزن‌های شبکه عصبی تابع پایه شعاعی و به روز رسانی هر لحظه‌ی آن‌ها توسط قوانین تطبیق جهت افزایش دقت ردیابی است.



(الف)

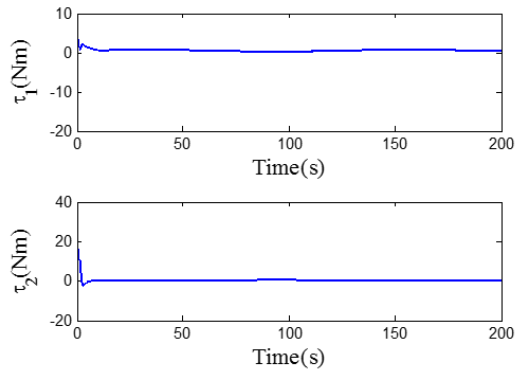


(ب)

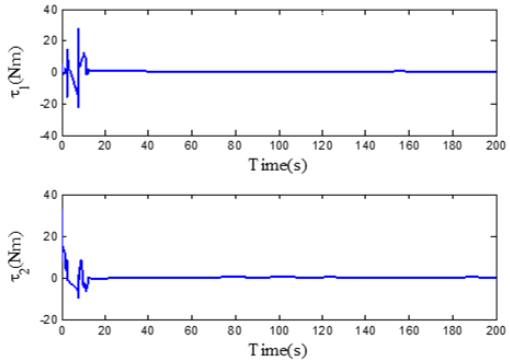
شکل۴: ردیابی مسیر خطی توسط ربات تراکتور-تریلر (الف) کنترل‌کننده پیشنهادی و (ب) کنترل‌کننده پس‌گام

[1] Backstepping Controller

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.5.2]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.23]

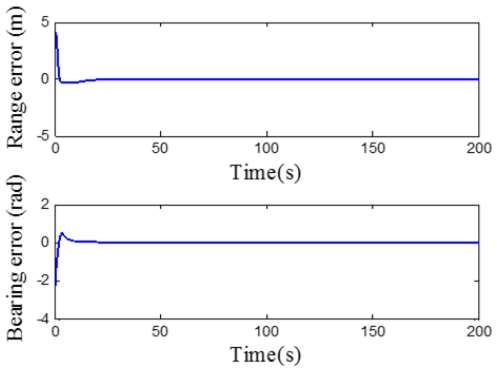


(الف)

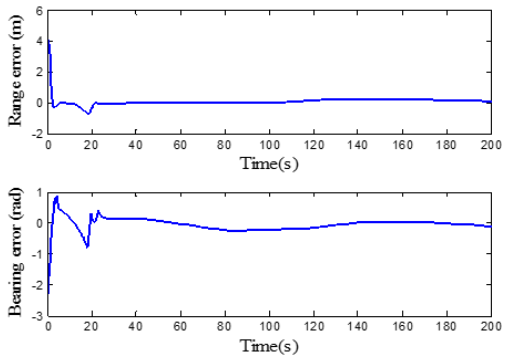


(ب)

شکل ۵: سیگنال کنترلی برای (الف) کنترل‌کننده پیشنهادی، و (ب) کنترل‌کننده پس‌گام

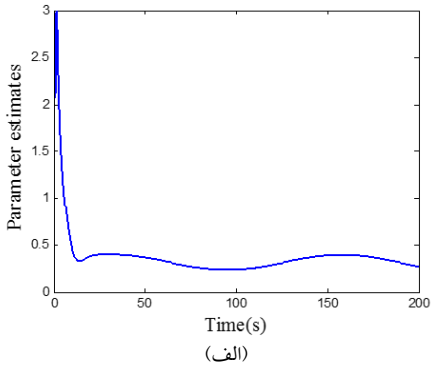


(الف)

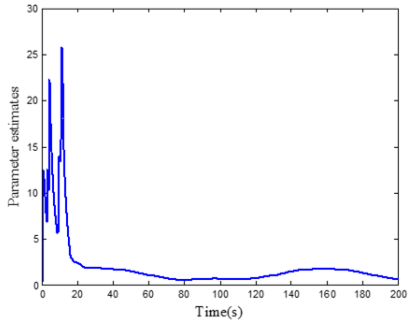


(ب)

شکل ۶: خطاهای ردیابی برای (الف) کنترل‌کننده پیشنهادی، و (ب) کنترل‌کننده پس‌گام

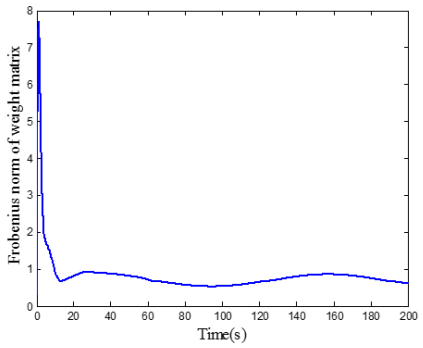


(الف)

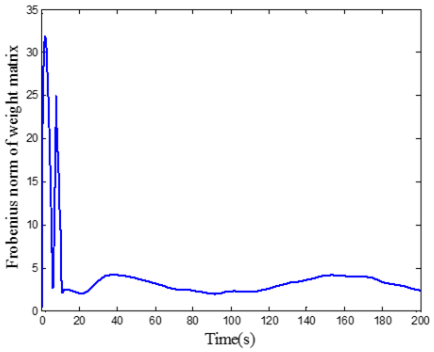


(ب)

شکل ۷: تخمین پارامترهای نامعین (الف) کنترل‌کننده پیشنهادی، و (ب) کنترل‌کننده پس‌گام



(الف)



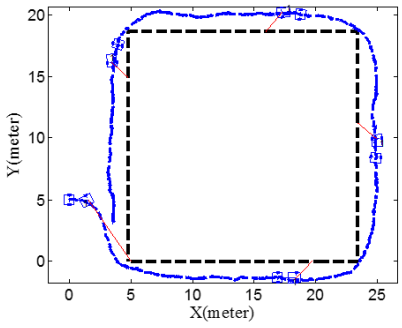
(ب)

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

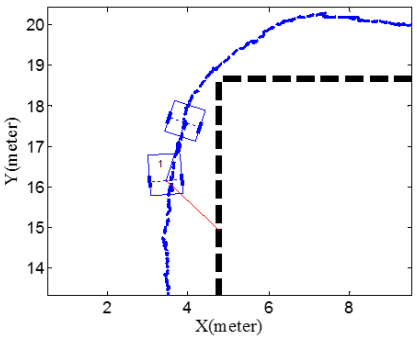
با توجه به نتایج شبیه‌سازی، براساس شکل‌های ۴-الف و ۴-ب ردیابی هر دو مسیر مرجع خطی توسط ربات پیرو در حضور اغتشاشات به خوبی

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.5.2]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.23]

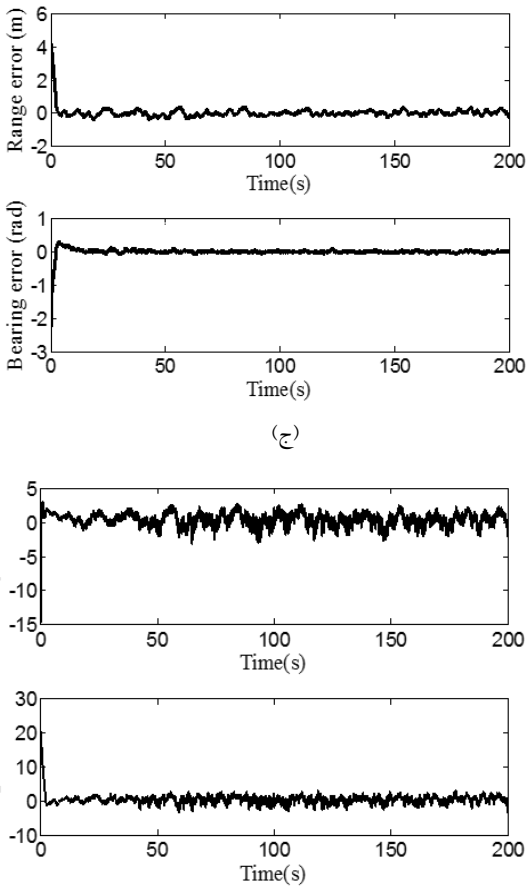
انجام شده و فاصله و زاویه‌ی مطلوب از ربات رهبر حفظ شده است. ولی ردیابی مسیر توسط کنترل پیشنهادی دقت بالاتری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل۵-الف هموار بودن سیگنال کنترلی برای کنترل‌کننده پیشنهادی حتی در حضور اغتشاشات حفظ شده است. در حالی که سیگنال های کنترلی کنترل‌کننده پس‌گام در شکل۵-ب قبل از بیست ثانیه اندکی خشن‌تر است. با بررسی خطای ردیابی در شکل ۶-الف، پاسخ حالت گذرا و حالت ماندگار برای کنترل‌کننده پیشنهادی عملکرد خوبی نشان می‌دهد و نهایتاً خطای ردیابی به مقدار خیلی کوچکی نزدیک صفر همگرا شده است و مقاومت کنترل‌کننده در برابر نامعینی‌ها تضمین می‌شود. براساس شکل ۷-الف و شکل ۸-الف، تخمین پارامترهای نامعین و وزن‌های شبکه عصبی با وجود اثرات نامطلوب نامعینی‌ها به خوبی انجام گرفته است و درنهایت، این تخمین‌ها به صورت یکنواخت کران‌دار می‌باشند. در مقایسه، کنترل‌کننده‌ی پس‌گام عملکرد ضعیف‌تری نسبت به کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی داشته است. برای دست یابی به چنین دقتی در کنترل‌کننده پس‌گام، بهره های کنترلی بزرگ‌تر و سیگنال‌های کنترلی خشن‌تری در شبیه‌سازی‌ها بدست می‌آید. برای ارزیابی بهتر کنترل‌کننده پیشنهادی، نویز اندازه‌گیری 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 سیگنال‌های سرعت افزوده شده است. نتایج شبیه‌سازی برای یک مسیر پیچیده‌تر مربعی در شکل ۹ به تصویر کشیده شده است. همان طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، کنترل‌کننده پیشنهادی با عملکرد نسبتاً مطلوبی ردیابی ماشین جمع آوری محصول توسط تراکتور-تریلر را در حضور نامعینی‌های پارامتری، اغتشاش و نویز اندازه‌گیری محقق می‌کند.



(الف)



(ب)



(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- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک کنترل‌کننده‌ی 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 شبکه‌ی عصبی تابع پایه‌ی شعاعی برای تخمین دینامیک نامعین و مقادیر نامعینی‌های پارامتری سیستم به کار گرفته شد. به علاوه، با توجه به اینکه شبکه عصبی قادر به تخمین اغتشاش‌های خارجی و نامعینی‌های غیرپارامتری دیگر نیست، و همچنین متضمن خطای تقریب می‌باشد، یک کنترل‌کننده‌ی مقاوم تطبیقی نوع اشباع در طراحی کنترل‌کننده استفاده شد که مقاومت کنترل‌کننده را تضمین کرده است. اثبات پایداری مبتنی بر تئوری لیاپانوف تضمین کرد که خطاهای ردیابی بطور یکنواخت نهایتاً کران‌دار هستند و به ناحیه کوچکی حول مبدأ همگرا می‌شوند. باید توجه شود که اغلب کنترل‌کننده‌های ارائه شده در مقالات قبلی

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.5.2]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.23]

کنترل‌کننده‌های 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، پاسخ گذرای 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 شبیه سازی نشان داده است. در کارهای آتی، حذف حسگر سرعت در تراکتور-تریلر به کمک طراحی یک رؤیتگر 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", 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.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.5.2]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.23]

[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.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.5.2]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.23]