



Design and Implementation of Terminal Sliding Mode Controller for Tracking a Wheeled Mobile Robot

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ramezanzadeh E.¹ *MSC*,
Rahmani Z.*¹ *PhD*,
Hassanghasemi M.² *PhD*

How to cite this article

Ramezanzadeh E, Rahmani Z, Hassanghasemi M. Design and Implementation of Terminal Sliding Mode Controller for Tracking a Wheeled Mobile Robot. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(12):2887-2894.

¹Control Department, Faculty of Electrical & Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

²Mechanical Department, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

*Correspondence

Address: Control Department, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Phone: +98 (11) 32339214
Fax: +98 (11) 32339214
zrahmani@gmail.com

Article History

Received: August 24, 2018

Accepted: May 26, 2019

ePublished: December 21, 2019

ABSTRACT

In this paper, a trajectory tracking control of a nonholonomic wheeled mobile robot is proposed based on terminal sliding mode control, and the proposed method has been implemented on a wheeled mobile robot. A wheeled mobile robot is a nonlinear nonholonomic system, and it has three extended coordinates and a nonholonomic constraint. First, the equation of wheeled mobile robot for the extended chained form is derived by transformation of the nonholonomic system equation to the extended chained form. Then a finite time terminal sliding mode approach for trajectory tracking control of the wheeled mobile robot is presented. Afterward, with a graphical simulation environment which is applicable in the Matlab software, graphical simulations of wheeled mobile robot's movement are done. The result of the graphical simulation in comparing with sliding mode control show the performance of the proposed method. Finally, the practical results of implementation of the controller for trajectory tracking of the wheeled mobile robot is shown, and the results show good tracking performance of the proposed method.

Keywords Nonholonomic Systems; Wheeled Mobile Robot; Sliding Mode Control; Terminal Sliding; Mode Control; Graphical Simulation

CITATION LINKS

[1] Nonholonomic motion planning: steering using sinusoids [2] Fuzzy motion control for wheeled mobile robots in real-time [3] Fast terminal sliding mode tracking of non-holonomic systems with exponential decay rate [4] Modelling and control of non-holonomic wheeled mobile robots [5] Sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots [6] Adaptive sliding mode tracking control of mobile robot in dynamic environment using artificial potential fields [7] Robust path following control for wheeled robots via sliding mode techniques. Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems [8] Mobile robot path tracking using a robust PID controller [9] Real-time implementation of continuous model based sliding mode control technique for trajectory tracking control of mobile robot [10] Control of two-wheeled welding mobile robot using adaptive controller [11] Neural network-based adaptive sliding mode control method for tracking of a nonholonomic wheeled mobile robot with unknown wheel slips, model uncertainties, and unknown bounded external disturbances [12] Optimization of interval type-2 fuzzy logic controllers for a perturbed autonomous wheeled mobile robot using genetic algorithms [13] Adaptive neural sliding mode control of nonholonomic wheeled mobile robots with model uncertainty [14] Design and implementation of an adaptive sliding-mode dynamic controller for wheeled mobile robots [15] Adaptive neural network PID sliding mode dynamic control of nonholonomic mobile robot [16] Adaptive sliding mode control of dynamic system using RBF neural network [17] Asymptotic stability and feedback stabilization. Differential Geometric Control Theory [18] Explicit design of time-varying stabilizing control laws for a class of controllable systems without drift [19] Velocity and torque feedback control of a non-holonomic cart [20] Self-balancing two wheel mobile robot using sliding mode control [21] Finite-time tracking controller design for nonholonomic systems with extended chained form [22] Finite-time tracking control of chained-form nonholonomic systems with external disturbances based on recursive terminal sliding mode method [23] An intelligent terminal sliding mode control method for nonholonomic systems in extended chained form [24] Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems [25] Derivative and integral terminal sliding mode control for a class of MIMO nonlinear systems [26] Sliding-mode tracking control of nonholonomic wheeled mobile robots in polar coordinates

طراحی و پیاده‌سازی کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال برای دنبال‌یابی یک ربات سیار چرخ‌دار

الهام رمضانزاده MSc

گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

زهرا رحمانی PhD

گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

محمد حسن قاسمی PhD

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

در این مقاله دنبال‌یابی مسیمرجع براساس کنترل مد لغزشی ترمینال برای یک ربات سیار چرخ‌دار پیشنهاد شده است و روش پیشنهادی روی یک ربات سیار به صورت عملی پیاده‌سازی شده است. ربات محرک چرخ‌دار یک سیستم غیرهولونومیک غیرخطی که دارای دو ورودی برای کنترل است و دارای سه متغیر حالت و یک قید غیرهولونومیک است. برای کنترل این سیستم در این مقاله ابتدا با تبدیل معادلات سیستم غیرهولونومیک به فرم زنجیره‌ای، معادلات ربات سیار چرخ‌دار برای معادلات زنجیره‌ای تعمیم‌یافته استخراج می‌شود. سپس روش کنترل مد لغزشی ترمینال زمان محدود برای کنترل دنبال‌یابی مسیمرجع این سیستم ارائه می‌شود. پس از آن با استفاده از یک محیط شبیه‌سازی گرافیکی در نرم‌افزار متلب قابل اجرا است. روش پیشنهادی برای ربات سیار چرخ‌دار مورد استفاده در آزمایشگاه شبیه‌سازی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در محیط گرافیکی کارایی روش پیشنهادی را در مقایسه با روش کنترل مد لغزشی کلاسیک به خوبی نشان می‌دهد. در پایان نتایج عملی پیاده‌سازی کنترل‌کننده برای دنبال‌یابی مسیمرجع ارائه‌شده روی ربات سیار نشان داده شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی به خوبی عملکرد مناسب روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: سیستم‌های غیرهولونومیک، ربات سیارچرخ‌دار، کنترل مد لغزشی، کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال، شبیه‌ساز گرافیکی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۰۵

* نویسنده مسئول: zrahmani@gmail.com

۱- مقدمه

در برخی سیستم‌های مکانیکی و رباتیک انواع خاصی از شرایط اضافی وجود دارد که حرکت‌ها را مقید و محدود می‌کند که به طور کلی قید نامیده می‌شوند. قیود غیرانتگرال‌پذیر، قیود غیرهولونومیکی نامیده می‌شود. غیرهولونومیک بودن بر حرکت ربات‌ها محدودیت ایجاد می‌کند و کنترل ربات سخت خواهد شد. در این شرایط، معمولاً ربات قادر نخواهد بود روی هر مسیری حرکت کند [1, 2]. به عنوان مثال ربات‌های سیار چرخ‌دار، شناورهای سطح آب و ربات‌های فضایی نمونه‌هایی از سیستم‌های غیرهولونومیک هستند. این‌گونه سیستم‌ها حول هیچ یک از نقاط تعادل خود به صورت خطی رفتار نمی‌کنند و قابل پایدارسازی به کمک فیدبک حالت مشتق‌پذیر پیوسته و مستقل از زمان نیستند. مسئله پایدارسازی و دنبال‌یابی مسیمرجع در این‌گونه سیستم‌ها توجه بسیاری از محققان را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است [3, 4].

همان‌گونه که عنوان گردید، ربات‌های سیار چرخ‌دار یک نمونه از سیستم‌های غیرهولونومیک هستند که حرکت این ربات‌ها توسط عملگرهایی حاصل می‌شود که گشتاور اعمالی بر چرخ و جهت حرکت محور چرخ‌ها را مشخص می‌کند [4]. ربات‌های سیار چرخ‌دار برای حرکت روی سطح، دارای سه درجه آزادی می‌باشند در حالی که تنها دو ورودی قابل کنترل دارند [5, 6]. یکی از مشکلات در کنترل

ربات‌های سیار غیرهولونومیک، عدم قطعیت در مدل‌سازی این سیستم است. عدم قطعیت در ربات به علت ویژگی‌های ذاتی ربات سیار چرخ‌دار از جمله دینامیک واقعی ربات، اینرسی و محدودیت قدرت عملگرها و خطای تعیین موقعیت ربات است و به همین جهت معادلات این سیستم را نمی‌توان به صورت مدل ساده‌شده ریاضی توصیف کرد [5].

بسیاری از کنترل‌کننده‌ها به طراحی کنترل‌کننده پایدارساز حلقه بسته برای ربات‌های سیار غیرهولونومیک اختصاص دارد. در این حالت باید موقعیت ربات در هر لحظه دقیقاً مشخص باشد، اما این فرض از نظر متخصصان رباتیک بسیار غیرواقعی است، زیرا این احتمال وجود دارد که یک ربات سیار در حرکت خود دچار رانش شود. در نتیجه مکان دقیق آنها توسط ناوبری کور به تنهایی ممکن نیست [7]. برای کنترل ربات سیار با دو مسأله مواجه هستیم که شامل دنبال‌یابی مسیر از پیش تعیین‌شده و پایدارسازی حول موقعیت مطلوب است. در سال‌های اخیر مسأله هدایت ربات سیار چرخ‌دار با قیود غیرهولونومیک توجه زیادی را در حوزه رباتیک به خود جلب کرده است [8-23]. پژوهش‌های اولیه روی ربات‌های سیار در دهه ۱۹۶۰ میلادی انجام گرفت و در دهه ۱۹۹۰ میلادی این پژوهش‌ها گسترده‌تر شد [8]. برای مسأله دنبال‌یابی در این سیستم، روش‌های مختلفی مطرح گردید که از آن جمله می‌توان کنترل‌کننده متناسب-مشتق‌گیر-انتگرال‌گیر [8]، کنترل مد لغزشی [5, 6, 9]، کنترل تطبیقی [10]، کنترل عصبی [2, 11]، کنترل فازی [2, 12] و کنترل‌کننده‌های ترکیبی [13-16] اشاره نمود. به علاوه محققان بر مبنای قضیه براکت [15] نشان داده‌اند که سیستم‌هایی که دارای سه درجه آزادی و دو ورودی هستند، به صورت حلقه باز قابل کنترل هستند. اما قابل پایدارسازی با قانون کنترل فیدبک حالت، مشتق‌پذیر پیوسته و نیز مستقل از زمان نخواهد بود. برای حل این مشکل تحقیقات بسیاری انجام گرفته است، از جمله می‌توان به طراحی فیدبک متغیر با زمان [16] و طراحی فیدبک حالت پیوسته غیرخطی [17] اشاره کرد.

یکی از روش‌های مؤثر در کنترل ربات سیار چرخ‌دار، کنترل مد لغزشی است. کنترل مد لغزشی یک تکنیک مقاوم مؤثر است که تاکنون به طور مؤثری برای کنترل سیستم‌های خطی و غیرخطی استفاده شده است. این روش به خاطر ویژگی‌های مناسب آن از جمله سادگی طراحی، قوام مناسب، کاهش مرتبه و پیاده‌سازی راحت، به طور گسترده‌ای در سیستم‌های دارای نامعینی استفاده شده است. کنترل مد لغزشی و ترکیبیات آن به عنوان روشی برای کنترل مقاوم سیستم‌ها در نظر گرفته می‌شود [3, 5, 6, 9, 20-23]. در مرجع [5] یک روش کنترل مقاوم برای پایدارسازی مجانبی ربات سیار غیرهولونومیک ارائه شده است و نشان داده شده است که کنترل‌کننده مد لغزشی طراحی شده نسبت به اغتشاشات خارجی محدود، مقاوم است. در مرجع [9] یک قانون کنترل مد لغزشی برای پایدارسازی و دنبال‌یابی مسیمرجع در سیستم‌های غیرهولونومیک که به صورت فرم زنجیره‌ای درآمدی است، مطرح گردید. برای همگرایی زمان محدود، روش کنترل مد لغزشی ترمینال برای این سیستم ارائه گردید. در مرجع [20] از کنترل مد لغزشی جهت پایدارسازی سیستم ربات سیار چرخ‌دار استفاده گردید. در مرجع [21] یک کنترل‌کننده دنبال‌یابی زمان محدود برای سیستم‌های غیرهولونومیکی به فرم زنجیره‌ای گسترش‌یافته ارائه شده است. در روش مطرح‌شده در این مرجع، از تکنیک سوئیچینگ رله‌ای و کنترل مد لغزشی ترمینال با همگرایی زمان محدود برای طراحی کنترل‌کننده استفاده شده است. در مرجع [22] یک روش کنترل مد لغزشی ترمینال بازگشتی برای دنبال‌یابی سیستم‌های غیرهولونومیکی که به فرم زنجیره‌ای تبدیل

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos(\theta) \\ \dot{y} &= v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} &= \omega \\ m\dot{v} &= F \\ I\dot{\omega} &= N \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، (x, y) بیانگر موقعیت ربات در مختصات کارتزین و θ بیانگر جهت حرکت ربات نسبت به محور x ها، m بیانگر جرم ربات، I بیانگر اینرسی ربات، v و ω به ترتیب بیانگر سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای ربات، F بیانگر نیروی کششی و N گشتاور فرمان می‌باشند.

۲-۱- مدل سینماتیکی

ابتدا تبدیل مختصاتی به صورت رابطه (۲) در نظر بگیریم [23]:

$$\begin{aligned} x_1 &= \theta \\ x_2 &= x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \\ x_3 &= x \sin(\theta) - y \cos(\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

با در نظر گرفتن تبدیل مختصات به صورت (۲) و با تعریف ورودی‌های کنترلی جدید به صورت (۳)، فرم زنجیره‌ای تبدیل‌یافته سینماتیک ربات سیار به صورت (۴) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} u_1 &= \omega \\ u_2 &= v - x_3 \omega \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= u_1 \\ \dot{x}_2 &= u_2 \\ \dot{x}_3 &= x_2 u_2 \end{aligned} \quad (4)$$

که $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ بردار حالت و u_1 و u_2 دو ورودی کنترلی هستند.

معادلات سینماتیک ربات سیار فرم ساده‌ای دارد و از مرتبه سوم و بدون دریفت می‌باشد و ویژگی‌های اصلی سیستم‌های غیرهولونومیک را نشان می‌دهد. این سیستم حول هیچ یک از نقاط تعادل خود به صورت خطی قابل کنترل نیست. اگرچه در پژوهش‌های مختلف به صورت وسیعی به کنترل سینماتیکی ربات‌های سیار پرداخته شده است، اما این سیستم قادر نیست هر دو سینماتیک و دینامیک سیستم را در نظر بگیرد، در حالی که برای بیشتر کاربردهای عملی، بهتر است مدل کامل دینامیک و سینماتیک برای سیستم‌های عملی در نظر گرفته شود.

۲-۲- مدل دینامیکی

ورودی‌های کنترلی برای سیستم (۱) به صورت (۵) تعریف می‌گردد.

$$\begin{aligned} v_1 &= \dot{\omega} = \frac{N}{I} \\ v_2 &= \dot{v} - \frac{N}{I} x_3 - \omega^2 x_2 \end{aligned} \quad (5)$$

با اعمال تغییرمختصات مطابق با رابطه (۲) برای حالات سیستم و تغییرمتغیر مطابق با (۵)، دینامیک ربات سیار که به صورت (۱) تعریف شده بود را می‌توان به صورت (۶) تبدیل نمود.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= v_1 \\ \dot{x}_2 &= v_2 \\ \dot{x}_3 &= x_2 v_2 \end{aligned} \quad (6)$$

با این تغییر مختصات، معادلات (۶) در برگیرنده سینماتیک و دینامیک ربات سیار چرخ‌دار است. ورودی‌های این سیستم، شامل دو ورودی که عبارت از نیروی کششی و گشتاور فرمان چرخ‌های ربات است.

۲-۳- بیان مسأله

مسئله مورد نظر در این مقاله، ارائه راهکاری است که ربات سیار چرخ‌دار مورد آزمایش بتواند مسیره‌ای داده شده را بدون خطا دنبال کند. برای نیل به این هدف، ابتدا معادلات (۶) به مختصات قطبی برده می‌شود و به فرم ساده‌تر زنجیره‌ای درمی‌آید. سپس با طراحی

شده است، پیشنهاد شده است. در مرجع [23] براساس روش کنترل مد لغزشی ترمینال سریع که در مراجع [24, 25] ارائه شده است، دنبال‌یابی زمان محدود در سیستم‌های غیرهولونومیک به فرم زنجیره‌ای مطرح گردیده است.

در این مقاله با الهام از کارهای قبلی، دنبال‌یابی مسیر مرجع برای یک ربات سیار چرخ‌دار مطرح می‌گردد و روش ارائه‌شده بر یک ربات سیار چرخ‌دار پیاده‌سازی می‌گردد. در این راستا، ابتدا با ترکیب معادلات سینماتیکی و دینامیکی ربات سیار چرخ‌دار به فرم معادلات زنجیره‌ای استخراج می‌گردد. سپس روش کنترل مد لغزشی ترمینال برای کنترل دنبال‌یابی مسیر مرجع برای مدل حاصل‌شده، ارائه می‌گردد. پس از آن با استفاده از یک محیط شبیه‌سازی گرافیکی روش مطرح‌شده برای ربات سیار چرخ‌دار شبیه‌سازی می‌گردد. در پایان روش مطرح‌شده به طور عملی برای دنبال‌یابی مسیر مرجع ربات سیار پیاده‌سازی می‌گردد. قابل ذکر است که در هر مرحله از شبیه‌سازی یا پیاده‌سازی روش کنترل مد لغزشی ترمینال با روش کنترل مد لغزشی مرسوم مقایسه می‌گردد. بنابراین نوآوری‌های این مقاله عبارتند از:

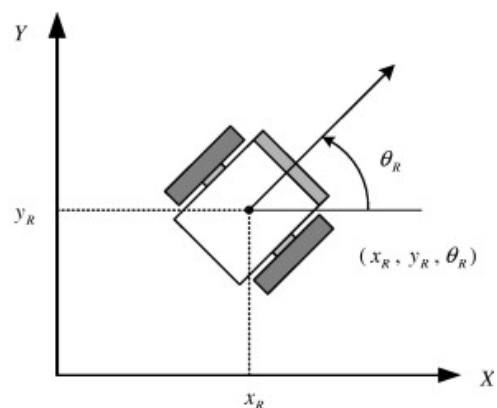
- طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال برای ربات سیار چرخ‌دار
- شبیه‌سازی گرافیکی حرکت ربات سیار چرخ‌دار بر اساس روش کنترل مد لغزشی ترمینال و کنترل مد لغزشی مرسوم
- پیاده‌سازی عملی هر دو کنترل‌کننده

شبیه‌سازی گرافیکی دارای این مزیت است که پارامترهای قابل تنظیم در ربات مورد آزمایش بسیار زیاد است و با استفاده از محیط گرافیکی به راحتی پارامترهای ربات تنظیم می‌گردد و دیگر نیازی به استفاده از روش آزمون و خطا که در آزمایش عملی بسیار وقت‌گیر است، نخواهد بود.

ساختار این مقاله در ادامه به این شرح است که بخش دوم شامل ترکیب مدل سینماتیکی و دینامیکی ربات سیار چرخ‌دار ارائه شده است و کلیت مسأله بیان می‌گردد. روش طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال برای ربات در بخش سوم آورده شده است. بخش چهارم این مقاله شامل نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر ربات مورد آزمایش است. در نهایت نیز نتیجه‌گیری از پژوهش انجام‌شده ارائه می‌گردد.

۲- مدل ربات سیار دوچرخ و بیان مسئله

با فرض اینکه لغزش چرخ‌ها هنگام حرکت ربات سیار قابل صرف نظر باشد، مدل دینامیکی ربات سیار چرخ‌دار شکل ۱ به صورت (۱) قابل بیان خواهد بود [23].



شکل ۱) شماتیک ربات سیار در مختصات کارتزین [23]

با جاگذاری رابطه (۱۴) در (۱۲) می‌توان مشاهده کرد که با این قانون کنترلی، خطای x_{1e} به صفر همگرا می‌شود و صفر می‌ماند. حال زیرسیستم (۱۳) را در نظر می‌گیریم. در این سیستم به منظور طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال، ابتدا سیستم را در حالت کلی در نظر می‌گیریم و برای این منظور، معادلات (۱۵)، در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} y_1 &\triangleq x_{ne} \\ y_2 &\triangleq x_{(n-1)e} \\ &\dots \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} y_{n-1} &\triangleq x_{2e} \\ y_n &\triangleq u_2 - u_{2d} \end{aligned}$$

بنابراین معادلات حالت سیستم به صورت (۱۶) قابل بیان است.

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= u_{1d} y_2 \\ \dot{y}_2 &= u_{1d} y_3 \\ &\dots \end{aligned} \quad (16)$$

قانون کنترل v_2 به گونه‌ای صورت می‌گیرد تا y_i ($i = 1, \dots, n$) به صورت مجانبی به صفر همگرا شود. سطوح لغزشی مناسب برای (۱۶) مطابق با روش کنترل مد لغزشی ترمینال سریع به صورت (۱۷) در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} s_0 &= y_1 \\ s_1 &= \dot{s}_0 + \beta_1 s_0^{p_1} \\ &\dots \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} s_{n-1} &= \dot{s}_{n-2} + \beta_{n-1} s_{n-2}^{p_{n-1}} \\ s_0 &= s_0(y_1) \\ s_1 &= s_1(t, y_1, y_2) \\ s_2 &= s_2(t, y_1, y_2, y_3) \\ &\dots \end{aligned} \quad (18)$$

که β_i ($i = 1, \dots, n-1$) ثابت‌های مثبت معین هستند. با مشتق‌گیری از سطح لغزش s_{n-1} و با استفاده از (۱۸) خواهیم داشت:

$$\dot{s}_{n-1} = \frac{\partial s_{n-1}}{\partial t} + \sum_{i=1}^{n-2} \frac{\partial s_{n-1}}{\partial y_i} u_{1d} y_{i+1} + \frac{\partial s_{n-1}}{\partial y_{n-1}} y_n + \frac{\partial s_{n-1}}{\partial y_n} v_2 \quad (19)$$

با توجه به رابطه‌های (۱۷) و (۱۸) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial s_{n-1}}{\partial y_n} = u_{1d}^{n-1}(t) \quad (20)$$

بنابراین (۱۹) را می‌توان به صورت (۲۱) بازنویسی کرد:

$$\dot{s}_{n-1} = \frac{\partial s_{n-1}}{\partial t} + \sum_{i=1}^{n-2} \frac{\partial s_{n-1}}{\partial y_i} u_{1d} y_{i+1} + \frac{\partial s_{n-1}}{\partial y_{n-1}} y_n + u_{1d}^{n-1} v_2 \quad (21)$$

حال به صورت (۲۲) در نظر گرفته می‌شود. با برقراری رابطه (۲۳) سطح لغزش به صورت نمایی به صفر همگرا خواهد شد.

$$\begin{aligned} v_2 &= \frac{-1}{u_{1d}^{n-1}} \left(\frac{\partial s_{n-1}}{\partial t} + \sum_{i=1}^{n-2} \frac{\partial s_{n-1}}{\partial y_i} u_{1d} y_{i+1} + \frac{\partial s_{n-1}}{\partial y_{n-1}} y_n + k s_{n-1}^{p_n} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

با جایگذاری (۲۲) در (۲۱) خواهیم داشت:

$$\dot{s}_{n-1} = -k s_{n-1}^{p_n} \quad (23)$$

با برقراری (۲۳) سطح لغزش به صورت نمایی به صفر همگرا خواهد شد.

کنترل‌کننده مناسب برای فرم زنجیره‌ای پایدارسازی و دنبال‌یابی مسیر مرجع حاصل می‌گردد.

۳- طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال

روش ارائه‌شده برای طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال با الهام از مرجع [21] در این قسمت، ارائه گردیده است. برای این منظور، ابتدا روش طراحی برای یک سیستم دارای ۳ حالت ارائه می‌گردد. فرض کنید که مسیر دلخواه $x_d = (x_{1d}, \dots, x_{3d})^T$ به صورت (۷) باشد.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1d} &= u_{1d} \\ \dot{x}_{2d} &= u_{2d} \\ \dot{x}_{3d} &= x_{2d} u_{1d} \end{aligned} \quad (7)$$

که u_{2d} و u_{1d} دو ورودی کنترل مرجع هستند.

مسائل دنبال‌یابی به صورت (۷) با فرم زنجیره‌ای (۴) را می‌توان برای سیستم‌های مکانیکی، از جمله ربات‌های سیار چرخ‌دار به‌کار برد. از همین‌رو سیستم (۴) با دو ورودی کنترل به صورت (۸) در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{u}_1 &= v_1 \\ \dot{u}_2 &= v_2 \end{aligned} \quad (8)$$

در رابطه (۸)، v_1 و v_2 ورودی‌های کنترل مدل دینامیکی هستند. بنابراین هدف از کنترل، طراحی یک کنترل‌کننده به گونه‌ای است که با دو ورودی کنترل، $x(t)$ ، v_1 و v_2 مسیر مطلوب $x_d(t)$ را با توجه به سیستم (۷) دنبال می‌کند. معادلات تبدیل‌یافته فرم زنجیره‌ای ربات سیار و مدل مرجع آن به صورت (۹) و (۱۰) قابل بیان است:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= u_1 \\ \dot{x}_2 &= u_2 \\ \dot{x}_3 &= x_2 u_1 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{u}_1 &= v_1 \\ \dot{u}_2 &= v_2 \\ \dot{x}_{1d} &= u_{1d} \\ \dot{x}_{2d} &= u_{2d} \\ \dot{x}_{3d} &= x_{2d} u_{1d} \\ \dot{u}_1 &= v_1 \\ \dot{u}_2 &= v_2 \end{aligned} \quad (10)$$

حال خطای دنبال‌یابی برای (۹) و (۱۰) به صورت $x_{ie} = x_i - x_{id}$ ($i = 1, \dots, 3$) تعریف می‌گردد و بنابراین معادلات خطای سیستم به صورت (۱۱) درمی‌آید.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1e} &= u_1 - u_{1d} \\ \dot{x}_{2e} &= u_2 - u_{2d} \\ \dot{x}_{3e} &= x_{2e} u_{1d} + x_2 (u_1 - u_{1d}) \\ \dot{u}_1 &= v_1 \\ \dot{u}_2 &= v_2 \end{aligned} \quad (11)$$

هدف طراحی این است که در زمان محدود خطای دنبال‌یابی به صفر همگرا شود. معادلات (۱۱) به دو زیرمعادله مستقل به صورت (۱۲) و (۱۳) قابل تفکیک است.

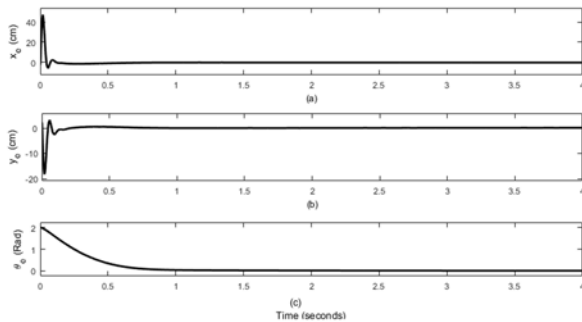
$$\begin{aligned} \dot{x}_{1e} &= u_1 - u_{1d} \\ \dot{u}_1 &= v_1 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{3e} &= x_{2e} u_{1d} + x_2 (u_1 - u_{1d}) \\ \dot{x}_{2e} &= u_2 - u_{2d} \\ \dot{u}_2 &= v_2 \end{aligned} \quad (13)$$

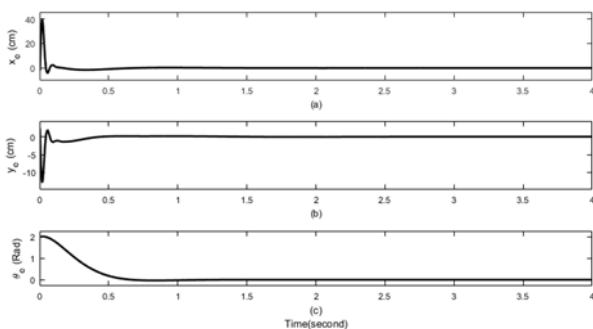
با استفاده از روش کنترل مد لغزشی ترمینال برای دنبال‌یابی، ابتدا زیرسیستم (۱۲) را در نظر می‌گیریم. قانون کنترلی v_1 را برای معادله سیستم مرتبه اول فوق به صورت (۱۴) در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} v_1 &= \dot{u}_{1d} - \beta \frac{q_0}{p_0} (u_1 - u_{1d}) (x_{1e})^{p_0 - 1} - \\ & k_0 (u_1 - u_{1d} + \beta x_{1e}^{p_0})^{\frac{m}{n}} \end{aligned} \quad (14)$$

درصد نسبت به خطای ماکزیمم بیان شده است. همان‌طور که در این دو جدول مشخص شده است، خطای حاصل از روش کنترل مد لغزشی ترمینال کمتر از خطای روش کنترل مد لغزشی است.



نمودار (۱) خطای موقعیت و جهت برای ربات سیار چرخ‌دار با کنترل‌کننده مد لغزشی کلاسیک



نمودار (۲) خطای موقعیت و جهت برای ربات سیار چرخ‌دار با کنترل‌کننده کنترل مد لغزشی ترمینال

جدول (۱) قدر مطلق خطای حاصل از روش کنترل مد لغزشی و کنترل ترمینال

پارامتر	IAE	کنترل مد لغزشی	کنترل ترمینال
x	۶۰/۷۸۶	۵۲/۶۶۷	
y	۲۰/۱۳۲	۱۵/۴۵۵	
θ	۲/۵۶۷	۲/۱۱۲	

جدول (۲) درصد خطای نهایی حاصل از روش کنترل مد لغزشی و کنترل ترمینال

پارامتر	روش	کنترل مد لغزشی (%)	کنترل ترمینال (%)
x		۵e-۶	۳e-۷
y		.	.
θ		.	.

۴-۲- شبیه‌سازی گرافیکی

در این قسمت، عملکرد دو کنترل‌کننده در محیط شبیه‌ساز به صورت گرافیکی شبیه‌سازی می‌گردد. برای پیاده‌سازی در این قسمت هم مسیر مستقیم و هم مسیر حرکت دایره‌ای برای ربات در نظر گرفته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی برای حرکت مستقیم ربات در شکل ۲ برای روش کنترل مد لغزشی و در شکل ۳ برای روش کنترل مد لغزشی ترمینال آورده شده است.

نتایج شبیه‌سازی حرکت ربات سیار حول مسیر مرجع دایره‌ای به شعاع ۱ متر و مرکز (۰،۰) در حالت کنترل مد لغزشی و مد لغزشی ترمینال به ترتیب در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است.

بر اساس رابطه (۲۳) می‌توانیم نتیجه بگیریم که \dot{s}_{n-1} و s_{n-1} به صورت نمایی به صفر همگرا می‌شوند. بنابراین بر مبنای ساختار بازگشتی (۱۷) هرگاه سطوح لغزش به صفر همگرا باشد، می‌توان معادلات (۲۴) که شکل دیگری از (۱۷) است، به معادلات (۲۵) تبدیل نمود.

$$s_{i+1} = \dot{s}_i + \beta_{i+1} s_{i+1}^{p_{i+1}} \quad (24)$$

$$i = 1, \dots, n-2$$

$$\dot{s}_i + \beta_{i+1} s_{i+1}^{p_{i+1}} = 0 \quad (25)$$

نشان داده شده است که $s_i(t)$ در معادله (۲۵) به صفر همگرا می‌شود. بنابراین s_0 هم به صفر همگرا خواهند شد. به این ترتیب $v_2 = 0$ و $y_1 = \dots = y_n = 0$ خواهد بود و بنابراین در زمان محدود $u_2 = u_{2d}$ و $x_{2e} = \dots = x_{ne} = 0$ است (جزئیات اثبات در مرجع [21] آورده شده است).

۴-۳- شبیه‌سازی

در این قسمت، روش ارائه‌شده در قسمت قبل ابتدا در محیط متلب به کمک سیمولینک و شبیه‌سازی گرافیکی، شبیه‌سازی می‌گردد تا پارامترهای لازم برای پیاده‌سازی عملی روی ربات مورد آزمایش فراهم گردد و سپس روش روی ربات پیاده‌سازی می‌گردد و مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در هر مرحله نتایج شبیه‌سازی روش کنترل مد لغزشی مرسوم هم آورده می‌شود.

برای همین منظور، کنترل مد لغزشی مرسوم مطابق با مرجع [26] برای سیستم (۱) در نظر گرفته شده است. در این مرجع، سطح لغزش و قانون کنترل به صورت (۲۶) در نظر گرفته شده است:

$$s_e = \dot{x}_e + k_1 x_e$$

$$v = -k_2 s_e \quad (26)$$

در این مرجع نشان داده شده است که سطح لغزش به سمت صفر همگرا می‌گردد و سیستم پایدار است.

۴-۱- شبیه‌سازی در محیط سیمولینک

در این قسمت، نتایج شبیه‌سازی کنترل مد لغزشی و کنترل مد لغزشی ترمینال در محیط شبیه‌ساز متلب برای حرکت ربات سمت نقطه ثابت مشخصی آورده می‌شود. در تمام شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، پارامترهای کنترل‌کننده مد لغزشی کلاسیک به صورت زیر انتخاب شده است:

$$k_1 = 4, k_2 = 10 \quad (27)$$

پارامترهای کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال به صورت زیر انتخاب شده است:

$$(\beta, \beta_1, \beta_2, k_0, k, p_0, q_0, p_1, q_1, p_2, q_2, p_3, q_3, m, n) =$$

$$(5, 1, 97.13, 10, 61, 17, 7, 213, 175, 137, 39, 269, 111, 9, 11)$$

در قدم اول کنترل موقعیت و جهت ربات سیار در حرکت از مبدأ سمت هدف نقطه‌ای (۱، ۱) ابتدا با استفاده از دو روش مطرح شده است. خطای موقعیت و جهت در دنبال‌یابی مسیر مرجع نقطه‌ای برای هر روش کنترل مد لغزشی و کنترل ترمینال در نمودارهای ۱ و ۲ به ترتیب نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت همگرایی در روش کنترل مد لغزشی ترمینال از روش کنترل مد لغزشی در زمان کمتری صورت گرفته است. در جدول ۱ مقایسه خطای قدرمطلق (IAE = $\sum_{i=1}^{\infty} |e_i|$) برای هر کدام از متغیرهای حالت سیستم آورده شده است و در جدول ۲ خطای نهایی هر کدام از متغیرهای حالت بر حسب

۳-۴- پیاده‌سازی عملی

نمایی از ربات سیار مورد آزمایش در شکل ۶ و مشخصات آن در جدول ۳ آمده است.

برای تعیین موقعیت در این ربات از سنسور انکودر استفاده شده است که با شمارش پالس‌های انکودر، تعیین موقعیت ربات صورت می‌گیرد. البته روش تعیین موقعیت به این شکل، امکان جمع‌شدن خطا در طول زمان و بروز خطا را باعث می‌گردد و بنابراین برآوردی تقریبی از تغییر موقعیت در طول زمان داریم.

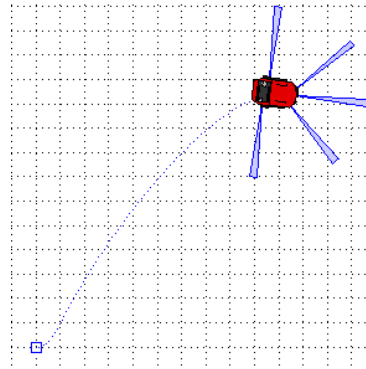


شکل ۶) ربات سیار دو چرخ

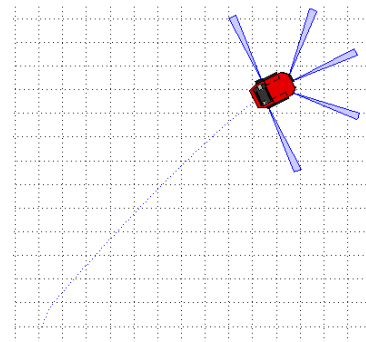
جدول ۳) پارامترهای ربات سیار

واحد	مقدار	پارامتر
سانتی‌متر	۶۰	طول
سانتی‌متر	۵۰	عرض
سانتی‌متر	۳۲	ارتفاع
کیلوگرم	۳۰	وزن
سانتی‌متر	۴۳/۶	فاصله بین دو چرخ
اینچ	۴	شعاع چرخ‌ها

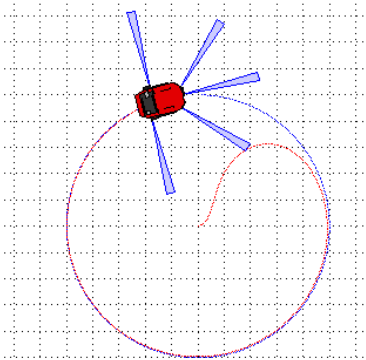
در شکل ۷، بلوک دیاگرام ساده‌شده دنبالیابی مسیر مرجع در ربات سیار نمایش داده شده است. در این بلوک دیاگرام، q متغیرهای حالت سیستم می‌باشند که شامل (x, y, θ) است. ربات سیار سرعت‌های مطلوب را برای دنبالیابی مدل مرجع دریافت کرده و با کمک محاسبات ایدومتری به‌کاررفته، آن را به سرعت خطی هر یک از چرخ‌ها تبدیل می‌کند و درنهایت ربات به حرکت درآمده و با استفاده از انکودر چرخ‌ها (سنسور در بلوک دیاگرام ۷) ایدومتری موقعیت جدید ربات محاسبه می‌شود و این حلقه کنترلی تا وقتی که ربات به مسیر مرجع مطلوب همگرا شود ادامه می‌یابد. در گام نخست به ربات سیار فرمان داده شد تا از موقعیت اولیه خود به سمت نقطه $(-1, 0)$ متر حرکت کند. نمودارهای ۳ و ۴ خطای جهت حرکت ربات یا همان زاویه ربات را به ترتیب برای کنترل ربات با مد لغزشی و مد لغزشی ترمینال نشان می‌دهد. در نمودارهای ۵ و ۶ نمودار تلاش کنترلی به ترتیب برای کنترل ربات با مد لغزشی کلاسیک و مد لغزشی ترمینال آمده است. با جمع‌آوری اطلاعات موقعیت به دست آمده از ربات سیار طی حرکت از مبدأ به سمت دایره‌ای با شعاع واحد، نمودار حرکت ربات سیار واقعی در محیط آزمایشگاه رسم شده است. نحوه دنبالیابی مسیر مرجع دایره‌ای توسط ربات سیار با اعمال کنترل‌کننده مد لغزشی و مد لغزشی ترمینال به ترتیب در نمودارهای ۷ و ۸ آورده شده است.



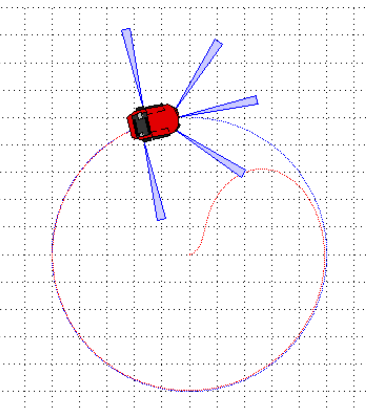
شکل ۲) شبیه‌سازی گرافیکی حرکت ربات سیار برای حرکت از مبدأ به سمت نقطه (۱،۱) با کنترل‌کننده کنترل مد لغزشی



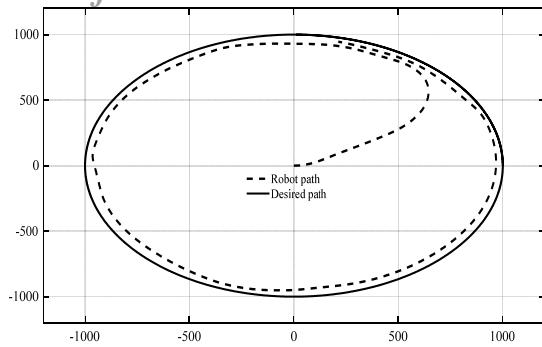
شکل ۳) شبیه‌سازی گرافیکی ربات سیار چرخ‌دار با کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال برای حرکت به سمت نقطه (۱،۱)



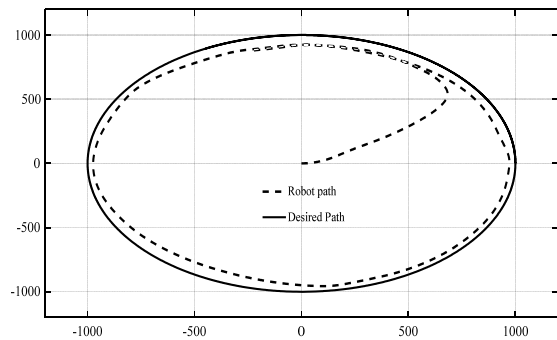
شکل ۴) شبیه‌سازی گرافیکی ربات سیار چرخ‌دار با کنترل‌کننده کنترل مد لغزشی برای دنبالیابی مسیر دایره‌ای



شکل ۵) شبیه‌سازی گرافیکی ربات سیار چرخ‌دار با کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال برای دنبالیابی مسیر دایره‌ای



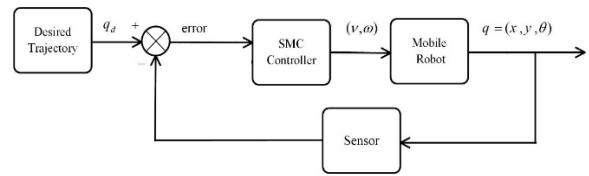
نمودار ۷) دنبال‌یابی ربات سیار چرخ‌دار با کنترل‌کننده مد لغزشی در مسیر دایره‌ای



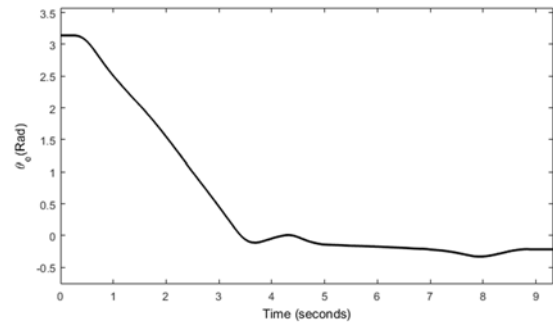
نمودار ۸) دنبال‌یابی ربات سیار چرخ‌دار با کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال در مسیر دایره‌ای

۵- نتیجه‌گیری

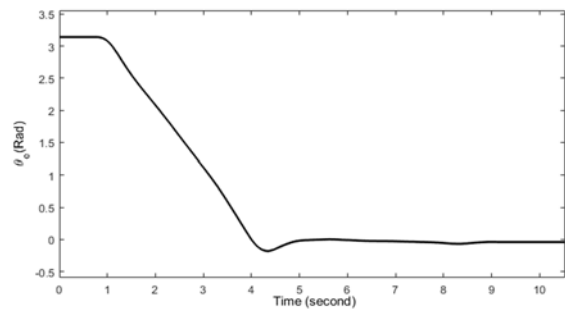
در این پژوهش کنترل‌کننده‌ای بر اساس روش کنترل مد لغزشی ترمینال برای ربات سیار چرخ‌دار غیرهولونومیک طراحی گردید. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مطلوب طراحی کنترل‌کننده را نشان داد. نتایج عملی نشان داد که کنترل‌کننده ارائه‌شده در عمل توانستند به خوبی دنبال‌یابی مسیر مرجع نمونه را انجام دهند. در هر مرحله، نتایج شبیه‌سازی کنترل مد لغزشی مرسوم هم ارائه گردید. با توجه به نتایج پیاده‌سازی عملی مشاهده می‌شود که همان‌طور که انتظار می‌رود کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال در دنبال‌یابی نقطه هدف مطلوب عملکرد بهتر و خطای دنبال‌یابی کمتری دارد در حالی که خطای دنبال‌یابی کنترل‌کننده مد لغزشی کلاسیک بیشتر بوده و زمان همگرایی طولانی‌تری دارد. باید توجه داشت که روش محاسبه موقعیت ربات از روی ورودی‌های سرعت بر اساس شمارش پالس‌های انکودر و تحلیل با کمک ایدومتری می‌باشد که خود این روش حساس به جمع‌شدن خطای محاسبه موقعیت در طول زمان می‌باشد. همچنین لغزش در ربات سیار می‌تواند باعث ایجاد خطا گردد که این عامل در راه‌اندازی‌های مختلف ربات سیار با یک کنترل‌کننده هم ممکن است ایجاد تفاوت کند، اما آنچه در مجموع اهمیت دارد، عملکرد پایدار و مناسب هر کدام از کنترل‌کننده‌ها در دنبال‌یابی مسیر مرجع می‌باشد که در هر دو طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی کلاسیک و مد لغزشی ترمینال مشاهده گردید. بنابراین هر دو کنترل‌کننده برای ربات سیار به خاطر عملکرد مناسب و در عین حال ساختار ساده و پارامترهای قابل تنظیم، در دنبال‌یابی مسیر مرجع زمانی مختلف می‌توانند مورد استفاده قرار گیرد. برای اهداف نقطه‌ای که ربات به سمت نقطه خاصی هدایت می‌شود، استفاده از کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال می‌تواند عملکرد بهتری از ربات را به نمایش بگذارد.



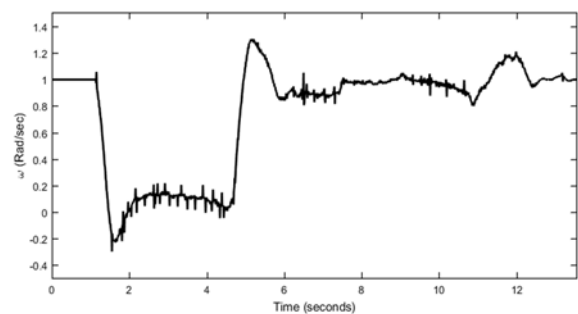
شکل ۷) بلوک دیاگرام ربات سیار



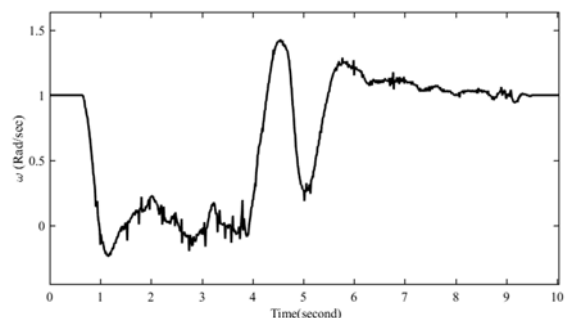
نمودار ۳) خطای زاویه ربات سیار چرخ‌دار با کنترل مد لغزشی



نمودار ۴) خطای زاویه ربات سیار چرخ‌دار با کنترل مد لغزشی ترمینال



نمودار ۵) تلاش کنترلی ربات سیار چرخ‌دار با کنترل مد لغزشی



نمودار ۶) تلاش کنترلی ربات سیار چرخ‌دار با کنترل مد لغزشی ترمینال

network-based adaptive sliding mode control method for tracking of a nonholonomic wheeled mobile robot with unknown wheel slips, model uncertainties, and unknown bounded external disturbances. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2018;15(2):103-23.

12- Martínez R, Castillo O, Aguilar LT. Optimization of interval type-2 fuzzy logic controllers for a perturbed autonomous wheeled mobile robot using genetic algorithms. *Information Sciences*. 2009;179(13):2158-74.

13- Park BS, Yoo SJ, Park JB, Choi UH. Adaptive neural sliding mode control of nonholonomic wheeled mobile robots with model uncertainty. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2009;17(1):207-14.

14- Chen CY, Li THS, Yeh YC, Chang CC. Design and implementation of an adaptive sliding-mode dynamic controller for wheeled mobile robots. *Mechatronics*. 2009;19(2):156-66.

15- Li Y, Wang Z, Zhu L. Adaptive neural network PID sliding mode dynamic control of nonholonomic mobile robot. *The 2010 IEEE International Conference on Information and Automation*; 2010 June 20-23; Harbin, China. IEEE; 2010.

16- Fei J, Ding H. Adaptive sliding mode control of dynamic system using RBF neural network. *Nonlinear Dynamics*. 2012;70(2):1563-73.

17- Brockett RW. Asymptotic stability and feedback stabilization. *Differential Geometric Control Theory*. 1983;27(1):181-91.

18- Pomet JB. Explicit design of time-varying stabilizing control laws for a class of controllable systems without drift. *Systems & Control Letters*. 1992;18(2):147-58.

19- Samson C. Velocity and torque feedback control of a nonholonomic cart. *Advanced Robot Control*. France: Springer; 1998. p. 125-51.

20- Mattapallil JJ, Aswin RB. Self-balancing two wheel mobile robot using sliding mode control. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. 2017;6(4):3116-24.

21- Wu Y, Wang B, Zong GD. Finite-time tracking controller design for nonholonomic systems with extended chained form. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2005;52(11):798-802.

22- Mobayen S. Finite-time tracking control of chained-form nonholonomic systems with external disturbances based on recursive terminal sliding mode method. *Nonlinear Dynamics*. 2015;80(1-2):669-83.

23- Ghasemi H, Rezaie B, Rahmani Z. An intelligent terminal sliding mode control method for nonholonomic systems in extended chained form. *3rd National and First International Conference in Applied Research on Electrical, Mechanical and Mechatronics Engineering*; 2016 Feb 17-18; Malek Ashtar University, Tehran, Iran.

24- Yu X, Zhihong M. Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 2002;49(2):261-4.

25- Chiu CS. Derivative and integral terminal sliding mode control for a class of MIMO nonlinear systems. *Automatica*. 2012;48(2):316-26.

26- Chwa D. Sliding-mode tracking control of nonholonomic wheeled mobile robots in polar coordinates. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2004;12(4):637-44.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مقاله مراتب قدرانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره BNUT/۳۷۰۲۴۴/۹۷ اعلام می‌دارند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان مقاله متعهد می‌گردند که مقاله فوق تحت داوری در هیچ مجله‌ای نمی‌باشد و حاصل تحقیقات نویسندگان است.

تعارض منافع: نویسندگان بدین وسیله اظهار می‌دارند که در این مقاله، هیچ‌گونه تعارض منافی ندارند.

سهم نویسندگان: الهام رمضانزاده (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪); زهرا رحمانی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی تحلیلگر (۴۵٪); محمد حسن قاسمی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۵٪)

منابع مالی: منابع مالی این پژوهش جهت انجام آزمایش عملی تحت گرنت شماره BNUT/370244/98 توسط دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل تأمین گردیده است.

منابع

- 1- Murray RM, Sastry SS. Nonholonomic motion planning: steering using sinusoids. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1993;38(5):700-16.
- 2- Falsafi M, Alipour K, Tarvirdizadeh B. Fuzzy motion control for wheeled mobile robots in real-time. *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering*. 2019;8(2):133-144.
- 3- Mobayen S. Fast terminal sliding mode tracking of non-holonomic systems with exponential decay rate. *IET Control Theory & Applications*. 2015;9(8):1294-301.
- 4- Andrea-Novel B, Bastin BG, Campion G. Modelling and control of non-holonomic wheeled mobile robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*; 1991 Apr 9-11; Sacramento, CA, USA. IEEE; 2002.
- 5- Yang JM, Kim JH. Sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1999;15(3):578-87.
- 6- Nikranjbar A, Haidari M, Atai AA. Adaptive sliding mode tracking control of mobile robot in dynamic environment using artificial potential fields. *Journal of Computer & Robotics*. 2018;11(1):1-14.
- 7- Aguilar LE, Hamel T, Soueres P. Robust path following control for wheeled robots via sliding mode techniques. *Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems. Innovative Robotics for Real-World Applications. IROS '97*; 1997 Sep 1-11; Grenoble, France. IEEE; 2002.
- 8- Normey-Rico JE, Alcalá I, Ortega JG, Camacho EF. Mobile robot path tracking using a robust PID controller. *Control Engineering Practice*. 2001;9(11):1209-14.
- 9- Dumlu A, Yildırım MR. Real-time implementation of continuous model based sliding mode control technique for trajectory tracking control of mobile robot. *BALKAN Journal of Electrical & Computer Engineering*. 2018;6(4):211-6.
- 10- Bui TH, Nguyen TT. Control of two-wheeled welding mobile robot using adaptive controller. *ASEAN Engineering Journal Part A*. 2014;4(2):42-52.
- 11- Nguyen T, Nguyentien K, Do T, Pham T. Neural