



کنترل مقاوم ربات زیرآبی با جهت گیری پتانسیلی برای تعقیب مسیر در حضور موانع

فهیمة السادات طباطبایی نسب¹، سید علی اکبر موسویان^{2*}، علی کیماسی خلجی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران

* تهران، صندوق پستی 43344-19991، kntu.ac.ir، moosavian@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 آبان 1396

پذیرش: 14 بهمن 1396

ارائه در سایت: 02 اسفند 1396

کلید واژگان:

ربات زیرآبی

کنترل کننده خطی ساز فیدبک مقاوم

کنترل کننده مود لغزشی

توابع پتانسیل

چکیده

در این مقاله، یک کنترل کننده جدید بر مبنای ترکیب کنترل کننده خطی ساز فیدبک مقاوم با دینامیک خطای انتگرالی-نمایی ارائه شده است، که با استفاده از توابع پتانسیل برای کنترل ردیابی ربات زیرآبی در محیطهای پرمانع توسعه داده می شود. ربات های زیرآبی از جمله سیستم های غیرخطی، کم عملگر و دارای عدم قطعیت ها و نامعینی های دینامیکی به شمار می آیند که کنترل آن ها چالش برانگیز است. در این پژوهش با کراندار فرض کردن اغتشاشات خارجی و نامعینی ها از روش کنترلی مقاوم پیشنهادی استفاده گردیده است. در این راستا الگوریتم کنترلی خطی-ساز فیدبک بر اساس دینامیک خطای غیرخطی تعریف شده، برای ربات زیرآبی توسعه داده شده است. همچنین، به منظور اجتناب از برخورد با موانع قوانین کنترلی به دست آمده با توابع پتانسیل مجازی تلفیق گردیده است. بدین منظور، با تعریف توابع پتانسیل مجازی، نیروی دافعه ای بین ربات و موانع در تقاطع با مسیر ایجاد و موجب حرکت ایمن ربات در محیط های غنی از موانع می گردد. در نهایت، عملکرد الگوریتم کنترلی پیشنهادی با نتایج حاصل از پیاده سازی قوانین کنترلی مود لغزشی کلاسیک مقایسه شده است. نتایج حاصله نشان دهنده کارایی کنترل کننده پیشنهادی با جهت گیری پتانسیلی در مسیرهای پرمانع می باشد که از عملکرد مطلوب تری نیز در صورت مواجه شدن با موانع، برخوردار است.

Potentially Directed Robust Control of an Underwater Robot in the Presence of Obstacles

Fahimeh Sadat Tabataba'i-Nasab¹, Seyed Ali Akbar Moosavian^{1*}, Ali Keymasi Khalajji²

1- Department of Mechanical Engineering, Khajeh Nasiraldin Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

* P.O.B. 19991-43344 Tehran, Iran, moosavian@kntu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 13 November 2017

Accepted 03 February 2018

Available Online 21 February 2018

Keywords:

Underwater Robot

Robust Feedback Linearization Controller

Sliding Mode Controller

Potential Function

Abstract

In this paper, a new controller is presented based on robust feedback linearization controller in combination with integral-exponential error dynamics and potential functions for tracking control of an underwater robot in an obstacle-rich environment. Underwater robots are considered as nonlinear, underactuated systems with indefinite, uncertain dynamics. In this research, by assuming a boundary for external disturbances and uncertainties a proposed robust control method has been put to use. Along with the robust feedback linearization algorithm which has been developed based on the dynamics of the nonlinear error defined for the underwater robot, and in order to avoid the obstacles, the control laws are combined with the virtual potential functions. The considered virtual potential functions make a repulsive force between the robot and the obstacles which intersect the desired path and then they bring about a safe move of the robot in obstacle-rich environments. Finally, the performance of the proposed new control algorithm is compared with the results of the implementation of classical sliding mode control laws. The results show the effectiveness of potentially directed proposed controller through obstacle-rich paths which operate far better facing obstacles.

1- مقدمه

بحث اصلی در مطالعه ای این دسته از ربات های متحرک، وجود قیدهای متنوع در مدل سازی این سیستم ها می باشد. معادلات غیر خطی، نامعینی های ساختاری و غیر ساختاری و وابسته بودن پارامترهای مدل به شرایط محیطی، همچنین وجود اغتشاشات خارجی ناشی از جریان های اقیانوسی، دینامیک و کنترل این سیستم ها را بسیار جذاب و در عین حال پیچیده می نماید. بنابراین تحلیل دینامیکی و طراحی الگوریتم های کنترلی برای این سیستم ها مورد توجه محققان قرار گرفته است و تاکنون تلاش های تحقیقاتی زیادی در زمینه های شناسایی سیستم، مدل سازی و روش های کنترل برای بالابردن

در سال های اخیر، ربات های هوشمند زیرآبی نقش فراگیر و گسترده ای را در تحقیقات و اکتشافات زیرآبی داشته اند. این ربات ها با حذف نیروی انسانی در بسیاری از فعالیت های نظامی، تجاری و پژوهش های علمی و نقشه برداری مورد استفاده قرار می گیرند. توانایی بالای ربات های خودکار زیرآبی و همچنین برتری آن ها نسبت به انسان در انجام مأموریت های اقیانوسی به ویژه در عمق های زیاد باعث شد، این دسته از ربات ها نقش کلیدی را در صنعت زیرآب ایفا کنند، [1].

Please cite this article using:

F. Sadat Tabataba'i-Nasab, S. A. A. Moosavian, A. Keymasi Khalajji, Potentially Directed Robust Control of an Underwater Robot in the Presence of Obstacles, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 1-8, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.SJP.ir

- توسعه قوانین کنترلی مود لغزشی کلاسیک با بهره گیری از تئوری توابع پتانسیل مجازی
 - ارائه قوانین کنترلی پیشنهادی فیدبک خطی-ساز مقاوم با دینامیک خطای انتگرالی-نمایی و تلفیق آن با توابع پتانسیل مجازی
 - مقایسه عملکردی الگوریتم کنترلی مقاوم پیشنهادی با الگوریتم کنترلی مود لغزشی کلاسیک در مسیرهای پرمانع
 - تعمیم الگوریتم‌های کنترلی ارائه شده به سیستم ربات زیرآبی به عنوان یک سیستم غیرخطی کم‌عملگر
- ساختار این مقاله به این صورت است که در ابتدا مدل دینامیکی ربات زیرآبی استخراج می‌شود. سپس مسئله اجتناب از موانع بیان می‌گردد. در ادامه نیز قوانین کنترلی مود لغزشی و تلفیق آن با توابع پتانسیل مجازی با توجه به سینماتیک مسئله و سطوح لغزش در نظر گرفته شده بیان می‌شوند. قوانین کنترلی جدید پیشنهادی نیز بر مبنای دینامیک خطای انتگرالی-نمایی و ترکیب با نیروهای مجازی حاصل از توابع پتانسیل تعریف می‌گردند. اثبات پایداری الگوریتم‌های کنترلی ارائه شده با استفاده از توابع لیاپانوف صورت می‌گیرد و در نهایت نیز نتایج شبیه سازی الگوریتم‌های کنترلی مطرح شده و نتایج مقایسه‌ای ارائه می‌گردد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده کارایی قوانین کنترلی طراحی شده است.

2- توصیف سیستم و مدل‌سازی

سیستم مورد نظر ربات زیرآبی ریموس است که در شکل 1 نشان داده شده است. از آنجا که ربات زیرآبی یکی از انواع ربات‌های متحرک به‌شمار می‌آید از دو دستگاه مختصات جهت معرفی مدل سیستم استفاده می‌شود. دستگاه مختصات متحرک که معمولاً در مرکز ثقل ربات در نظر گرفته می‌شود و دستگاه مختصات ثابت که زمین فرض می‌گردد. در این مقاله حرکت ربات تنها در صفحه افقی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و از حرکات رقص⁹ و تقدیمی¹⁰ آن نیز صرف نظر شده است. از این رو برای بیان روابط سینماتیکی و سینتیکی تنها به سه مولفه مستقل از هم (x, y, ψ) نیاز است. ارتباط بین سرعت‌های خطی و زاویه‌ای ربات در دستگاه متحرک و ثابت توسط روابط سینماتیکی (1) بیان می‌شود.

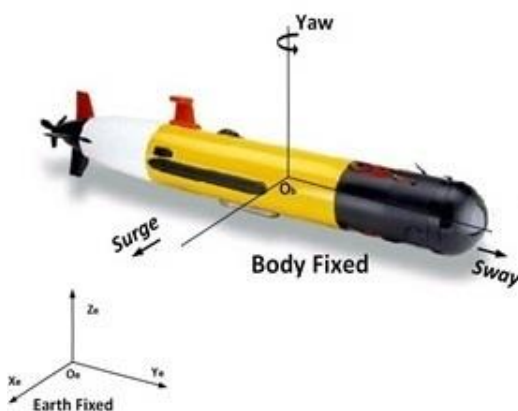


Fig. 1 Underwater robot (REMUS 100)

شکل 1 ربات زیرآبی (ریموس 100)

خودمختاری این وسایل انجام شده است. همچنین به دلیل محیطی که این وسایل مأموریت‌های خود را در آن انجام می‌دهند، به روش‌های کنترلی نیاز است که علاوه بر دقت کافی، از مقاومت خوبی در برابر اغتشاشات وارده نیز برخوردار باشند و حتی توانایی تضعیف نویز را نیز داشته باشند. در همین راستا روش‌های کنترلی مختلفی از قبیل کنترل‌کننده مود لغزشی¹ [2, 3]، کنترل‌کننده مود لغزشی مرتبه بالا² [4]، کنترل‌کننده مود لغزشی ترمینال³ [5]، کنترل‌کننده تطبیقی⁴ [6-10]، کنترل‌کننده شبکه عصبی⁵ [11, 12]، کنترل‌کننده فازی⁶ [13] و ... پیشنهاد شده است.

کنترل‌کننده مود لغزشی روشی قدرتمند و مقاوم در کنترل سیستم‌های غیرخطی به‌شمار می‌آید، که توانایی مطلوبی نیز در حفظ پایداری سیستم و روبرویی با نامعنی‌ها و اغتشاشات دارد. از ویژگی‌های قابل توجه این کنترل-کننده ساده بودن طراحی و تحلیل پایداری، مقاومت بالا و پیاده‌سازی آسان آن می‌باشد. طراحی کنترل‌کننده مود لغزشی براساس سطح لغزشی است که بتوان با قوانین کنترلی مناسب، سیستم را به آن همگرا نمود و با انتخاب مناسب ضرایب کنترلی، پایداری سیستم را تضمین کرد، [14, 15].

در این مقاله با استفاده از ایده کنترل‌کننده‌های مقاوم، کنترل‌کننده دیگری به نام کنترل‌کننده خطی-ساز فیدبک مقاوم⁷ براساس دینامیک خطای انتگرالی-نمایی پیشنهاد شده است، که علاوه بر مزیت‌های کنترل‌کننده مود لغزشی نظیر در نظر گرفتن اثر نامعنی‌ها، از دقت بالایی نیز در ردیابی مسیر برخوردار است. دینامیک خطای کنترل‌کننده پیشنهادی به صورت غیرخطی و نمایی تعریف شده است. از این رو سرعت بیشتری در همگرایی سیستم به حالت مطلوب را دارد و روشی مناسب از لحاظ مطلوب بودن زمان نشست پاسخ به شمار می‌آید.

از اهداف کنترلی مطرح در ربات‌های زیرآبی تعقیب مسیر در فضای کارترزین⁸ است، که در پژوهش‌های اخیر مورد توجه واقع شده است. تمرکز اصلی این مقاله نیز توسعه قوانین کنترلی ارائه شده برای ربات زیرآبی کم‌عملگر به منظور پیمودن مسیرهای غنی از موانع است. از این رو نیازمند ترکیب قوانین کنترلی مطرح شده با روش‌های اجتناب از موانع نظیر توابع پتانسیل⁹ می‌باشد.

اجتناب از موانع به کمک تابع پتانسیل برای اولین بار در سال 1986 مطرح گردید، [16]. در مرجع مذکور به طراحی مسیر ربات متحرک در حضور موانع ثابت پرداخته شده و با استفاده از گرادیان تابع پتانسیل و ایجاد نیروی مجازی مانع از برخورد ربات متحرک با موانع ساکن در مسیر شده است. سپس در [17, 18] از این روش جهت جلوگیری از برخورد ربات‌های زیرسطحی با موانع استفاده شده است. همچنین مرجع [19] به توسعه قوانین کنترل خطی کلاسیک با استفاده از روش تابع پتانسیل مجازی پرداخت.

بر این اساس در این پژوهش تلاش می‌شود قوانین کنترلی مقاوم با استفاده از تئوری توابع پتانسیل ارتقا یابند تا ربات زیرآبی موردنظر ضمن پیمودن مسیر مطلوب از موانع موجود نیز دوری نماید و پس از عبور از موقعیت‌های موانع، حرکت خود را در مسیر مشخص شده دنبال کند.

به طور کلی دستاوردهای مقاله عبارتند از:

¹ sliding mode control (SMC)
² higher order sliding mode control
³ terminal sliding mode control
⁴ adaptive control
⁵ neural network control
⁶ fuzzy control
⁷ robust feedback linearization (RFL)
⁸ trajectory tracking

⁹ Roll
¹⁰ Pitch

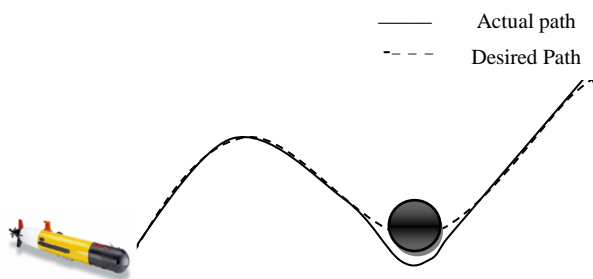


Fig. 2 Trajectory tracking in presence of obstacles [19]

شکل 2 ردیابی مسیر در حضور موانع [19]

4- فرمول بندی مسئله

مسیر مرجع جهت پیمودن توسط ربات زیرآبی در فضای کارترین به صورت توابع زمانی (3) بیان می‌گردد.

$$\begin{aligned} x_d &= x_d(t) \\ y_d &= y_d(t) \end{aligned} \quad (3)$$

اختلاف بین مسیر مرجع و مسیر حرکت ربات به عنوان خطای ردیابی شناخته می‌شود و مطابق رابطه (4) تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} e_x(t) &= x(t) - x_d(t) \\ e_y(t) &= y(t) - y_d(t) \end{aligned} \quad (4)$$

معادلات دیفرانسیلی خطای ردیابی به صورت رابطه (5) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{e}_x(t) &= \dot{x}(t) - \dot{x}_d(t) \\ \dot{e}_y(t) &= \dot{y}(t) - \dot{y}_d(t) \end{aligned} \quad (5)$$

به منظور طراحی الگوریتم کنترلی، معادلات خطای سرعت‌های خطی و مشتقات زمانی آن‌ها نیز در فضای کارترین استخراج می‌شود. این روابط به شرح زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned} e_u &= u - u_d \\ e_v &= v - v_d \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_u(t) &= \dot{u}(t) - \dot{u}_d(t) \\ \dot{e}_v(t) &= \dot{v}(t) - \dot{v}_d(t) \end{aligned} \quad (7)$$

5- اجتناب از موانع

روبات‌های زیرآبی عموماً در محیط‌هایی نظیر دریا و اقیانوس که غنی از موانع ثابت و متحرک هستند، فعالیت دارند. از این رو لزوم استفاده از الگوریتم‌های اجتناب از موانع همواره مورد توجه قرار گرفته است. از مطرح‌ترین راهکارهای ارائه شده جهت اجتناب از موانع، توابع پتانسیل مجازی است.

ایده اصلی این روش معرفی تابعی است که نشان‌دهنده انرژی سیستم است و تولیدکننده نیروی مجازی جهت اجتناب از موانع در ربات می‌باشد. بدین صورت که با کاهش فاصله، نیروی مجازی افزایش می‌یابد تا از برخورد با مانع جلوگیری شود و حداکثر مقدار آن زمانی است که فاصله بین ربات و مانع صفر می‌گردد و پس از خروج از محدوده مانع مقدار این نیرو به صفر متمایل می‌گردد.

تابع پتانسیل می‌تواند به صورت ثابت، خطی، درجه دو و ... تعریف گردد. در مرجع [19] این تابع به صورت رابطه (8) بیان شده است و مقدار نیروهای مجازی جهت اجتناب، از گرادینان تابع مطرح شده، محاسبه گردیده است.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y} &= u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (1)$$

برای محاسبه روابط دینامیکی، ربات زیرآبی به عنوان جسم صلب در نظر گرفته می‌شود و معادلات دینامیکی براساس قوانین نیوتن اولر استخراج می‌گردد. سپس براساس مباحث هیدرودینامیکی ربات‌های زیرآبی، نیروها و گشتاورهای خارجی وارد بر ربات محاسبه می‌شود. از این رو معادلات دینامیکی سیستم مطابق با روابط (2) قابل دست‌یابی است.

مقادیر پارامترهای هیدرودینامیکی و جرم‌های افزوده رابطه (2) در جدول 1 ارائه شده‌است، [5].

$$\begin{aligned} \dot{u} &= \frac{X_u}{m - X_{\dot{u}}} u + \frac{m - Y_v}{m - X_{\dot{u}}} vr + \frac{1}{m - X_{\dot{u}}} F_u \\ \dot{v} &= \frac{Y_v}{m - Y_v} v + \frac{m - Y_v}{m - Y_v} ur + \frac{1}{m - Y_v} F_v \\ \dot{r} &= \frac{N_r}{I_z - N_r} r + \frac{Y_v - X_{\dot{u}}}{I_z - N_r} uv \end{aligned} \quad (2)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود تنها دو ورودی به سیستم اعمال می‌شود در حالی که سیستم دارای سه متغیر حالت و خروجی است. بنابراین سیستم از نوع کم‌عملگر می‌باشد و با تعداد کمتری عملگر کنترل می‌شود، که نتیجه آن مقرون به‌صرفه شدن سیستم خواهد بود. ضمن آن‌که روش‌های کنترلی به کار گرفته شده، سیستم‌های بدون کمبود عملگر را نیز کنترل خواهند کرد.

3- تعقیب مسیرهای حرکت زمانی در حضور موانع

یکی از مسائل مطرح در کنترل ربات‌های متحرک، تعقیب مسیرهای حرکت زمانی است. در این گونه مسائل انتظار می‌رود ربات با شروع از هر نقطه اولیه به مسیر موردنظر در فضای کارترین برسد و با رعایت زمان بندی مناسب مسیر را تعقیب نماید، که علاوه بر کنترل ربات نیازمند کنترل سرعت پیشروی نسبت به مسیر زمانی مرجع نیز می‌باشد، [20].

در این پژوهش هدف ارتقا قوانین کنترلی ارائه شده به‌منظور اجتناب از موانع موجود در تقاطع مسیر ضمن تعقیب آن می‌باشد. در این راستا انتظار می‌رود در مناطقی که مانع در مسیر وجود ندارد خطای ردیابی مسیر $(x - y_d)$ با گذشت زمان به صفر میل کند و هنگام نزدیک شدن به مانع با ایجاد فاصله مناسب از آن عبور نماید، (شکل 2). به بیان دیگر خطای ردیابی به سمت عدد ثابتی میل می‌کند، که مقدار این عدد ثابت متضمن ایجاد فاصله‌ای ایمن جهت اجتناب از برخورد خواهد بود. شایان ذکر است که حرکت ربات زیرآبی رو به جلو فرض شده است و ربات دارای سرعت پیشروی مثبت می‌باشد.

جدول 1 مقادیر پارامترهای سیستم

Table 1 The system parameters

پارامتر	توصیف	مقدار
m	جرم ربات	30.48 kg
I_z	ممان اینرسی حول محور z	3.45 kg.m ²
X_u	میرایی هیدرودینامیکی	-8.8065 kgs ⁻¹
Y_v	میرایی هیدرودینامیکی	-65.5457 kgs ⁻¹
N_r	میرایی هیدرودینامیکی	-6.7352 kgs ⁻¹
$X_{\dot{u}}$	جرم افزوده	-0.93 kg
$Y_{\dot{v}}$	جرم افزوده	-35.5 kg
$N_{\dot{r}}$	جرم افزوده	-35.5 kg

صفر شدن خطای سرعت زمانی رخ خواهد داد که دو عبارت \dot{e}_x و $0.5 \tanh(-k_x e_x)$ و $0.5 \tanh(-k_y e_y)$ صفر گردند و یا به بیان دیگر مشتق خطای موقعیت به صورت (12) محاسبه گردد.

$$\begin{aligned} \dot{e}_x &= 0.5 \tanh(-k_x e_x) \\ \dot{e}_y &= 0.5 \tanh(-k_y e_y) \end{aligned} \quad (12)$$

برای اثبات پایداری روش با انتخاب تابع کاندیدای لیاپانوف (13) همگرایی خطای موقعیت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$V_e = \frac{1}{2} e_x^2 + \frac{1}{2} e_y^2 \quad (13)$$

مشتق گیری برحسب زمان از تابع کاندیدای لیاپانوف انتخابی در قالب رابطه (14) بیان می‌شود. منفی معین بودن رابطه (14) همگرایی خطای موقعیت را نشان می‌دهد که مستلزم انتخاب ضرایب مثبت (k_y, k_x) خواهد بود.

$$\dot{V}_e = \dot{e}_x e_x + \dot{e}_y e_y = -k_x e_x \tanh(k_x e_x) - k_y e_y \tanh(k_y e_y) \quad (14)$$

در ادامه نیز ابتدا روش کنترل مقاوم مد لغزشی و ترکیب آن با توابع پتانسیل شرح داده می‌شود، سپس قوانین کنترلی پیشنهادی خطی ساز فیدبک مقاوم همراه با توابع پتانسیل ارائه می‌گردد.

6-1- قانون کنترلی مد لغزشی

ربات‌های زیرآبی عمدتاً در محیط‌های پرخطر و متفاوت مانند اقیانوس‌ها کاربرد دارند. از این رو نیازمند روش‌های کنترلی هستند که علاوه بر دقت کافی، از مقاومت خوبی در برابر اغتشاشات وارده نیز برخوردار باشند و حتی توانایی تضعیف نویز را نیز داشته باشند. کنترل‌کننده مد لغزشی یکی از روش‌های کنترلی است که ویژگی‌های ذکر شده را داراست. در این راستا سطح لغزش تناسبی-انتگرالی براساس خطای ردیابی سرعت‌ها به صورت (15) تعریف می‌گردد. تعریف قوانین کنترلی دینامیکی با استفاده از خطای سرعت-ها به جای خطای موقعیت‌ها کاهش مرتبه سیستم را در پی خواهد داشت که این امر موجب ساده‌تر شدن آن خواهد شد. علاوه بر این، قوانین کنترلی در این حالت برای کلیه مسیرهای انتخابی کارایی دارند و ربات قادر به پیمودن هر مسیر دلخواه می‌باشد، [22].

$$\begin{aligned} s_u &= e_u + \lambda_1 \int_0^t e_u(\tau) d\tau \\ s_v &= e_v + \lambda_2 \int_0^t e_v(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (15)$$

لم 1. قانون کنترلی (16) با جهت‌گیری پتانسیلی و سطوح لغزش (15)، سیستم دینامیکی (2) را حول مسیرهای مرجع پایدار می‌سازد.

$$\begin{aligned} F_u &= -X_u u - (m - Y_v)vr + \\ &\frac{1}{m - X_u} \left(\dot{u}_d - \lambda_1 e_u - K_{u,SMC} S_u - W_{u,SMC} \text{sign}(S_u) \right) \\ &\quad + 100(x - x_{obs}) \frac{(r_{obs}^2 - d^2)}{r_{obs}^6} \\ F_v &= -Y_v v - (X_u - m)ur + \\ &\frac{1}{m - Y_v} \left(\dot{v}_d - \lambda_2 e_v - K_{v,SMC} S_v - W_{v,SMC} \text{sign}(S_v) \right) \\ &\quad + 100(y - y_{obs}) \frac{(r_{obs}^2 - d^2)}{r_{obs}^6} \end{aligned} \quad (16)$$

لازم به ذکر است که مجموع نیروهای به‌دست‌آمده از قوانین کنترلی و نیروی مجازی حاصل از تابع پتانسیل به عنوان ورودی کنترلی به سیستم بر اساس روابط (16) اعمال می‌گردد. همان‌طور که در قسمت قبل نیز اشاره شد، برای اجتناب از موانع از تابع ریاضی استفاده شده است که نیروی مجازی بین ربات و موانع قرار گرفته در طول مسیر را ایجاد کند، که موجب می‌شود

شایان ذکر است که توابع پتانسیل پیشنهاد شده از سطح مطلوبی از انرژی نیز برخوردارند به طوری که در مناطق حضور مانع، انرژی لازم جهت جلوگیری از برخورد را تامین می‌کنند.

$$U_{rep} = \frac{1}{\left\| \frac{r_{obs}}{d^2} \right\|} + \log_{10} \left\| \frac{r_{obs}}{d^2} \right\| \quad (8)$$

در این مقاله نیز با الهام از پژوهش‌های قبلی نیروی پتانسیل مجازی در مواقع روبرویی با موانع در جهت‌های x, y ربات زیرآبی که نیروهای کنترلی نیز حضور دارند به صورت روابط (9) در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} F_{rep,x} &= -100(x - x_{obs}) \frac{(r_{obs}^2 - d^2)}{r_{obs}^6} \\ F_{rep,y} &= -100(y - y_{obs}) \frac{(r_{obs}^2 - d^2)}{r_{obs}^6} \end{aligned} \quad (9)$$

نیروهای مجازی $F_{rep,x}$ و $F_{rep,y}$ ارائه شده قادر به حرکت ایمن ربات زیرآبی در محیط‌های غنی از موانع می‌باشند. این ادعا را می‌توان در ادامه و در شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته مشاهده کرد.

6-2- الگوریتم‌های کنترلی

هدف از این بخش ارائه قوانین کنترلی به‌منظور تولید نیروهای کنترلی است. به‌نحوی که ربات مسیر مرجع زمانی را تعقیب کند و از موانع موجود اجتناب نماید. ساختار کنترلی در شکل 3 نمایش داده شده است.

در صورتی که معادلات خطای موقعیت و سرعت سیستم پایدار شوند مسیر حرکت ربات در حاشیه مناسبی از مسیر زمانی مرجع قرار خواهد گرفت و در این صورت ربات قادر به تعقیب آن خواهد بود، [21]. بنابراین با در نظر گرفتن پژوهش‌های قبلی صورت‌گرفته در زمینه طراحی کنترلی‌کننده ربات زیرآبی، [22]، سرعت‌های مطلوب خطی به‌نحوی تعیین می‌گردد، که همگرایی خطای موقعیت را تضمین کنند.

$$\begin{aligned} u_d &= \dot{x}_d \cos \psi + \dot{y}_d \sin \psi + \frac{1}{2} \tanh(-k_x e_x) \cos \psi \\ &\quad + \frac{1}{2} \tanh(-k_y e_y) \sin \psi \\ v_d &= \dot{y}_d \cos \psi - \dot{x}_d \sin \psi + \frac{1}{2} \tanh(-k_y e_y) \cos \psi \\ &\quad - \frac{1}{2} \tanh(-k_x e_x) \sin \psi \end{aligned} \quad (10)$$

در نتیجه می‌توان خطای سرعت‌ها در قالب ماتریسی (11) بیان کرد.

$$\begin{bmatrix} e_u \\ e_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{e}_x - 0.5 \tanh(-k_x e_x) \\ \dot{e}_y - 0.5 \tanh(-k_y e_y) \end{bmatrix} \quad (11)$$

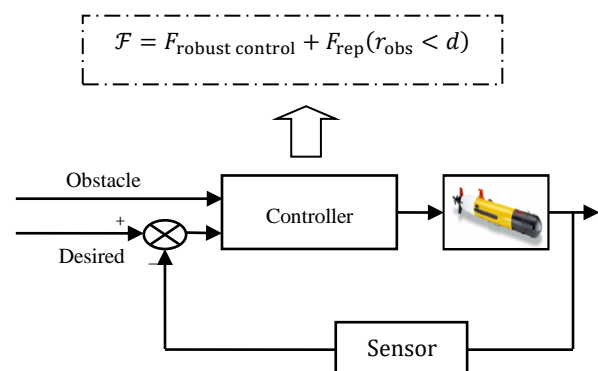


Fig. 3 Control structure for trajectory tracking in presence of obstacles
شکل 3 دیگرام بلوکی کنترلی تعقیب مسیر در حضور موانع

2-6- قانون کنترلی مقاوم پیشنهادی

کنترل کننده مود لغزشی از روش های موثر برای کنترل ربات زیرآبی است. از معایب این نوع کنترل کننده، بی نهایت بودن زمان رسیدن خطا به صفر و پدیده چترینگ است. از این رو برای حل این مشکلات و نیز کاهش خطاهای ثابت، کنترل کننده فیدبک خطی ساز مقاوم با دینامیک خطای انتگرالی-نمایی پیشنهاد شده است. در این راستا برای دستیابی به اهداف مورد نظر، دینامیک خطای سیستم به صورت انتگرالی و نمایی مطابق با روابط (25) تعریف می گردد.

$$\begin{aligned}\epsilon_u &= e_u + \int_0^t e_u(\tau) d\tau + \beta_u \left(\int_0^t e_u(\tau) d\tau \right)^{\alpha_u} \\ \epsilon_v &= e_v + \int_0^t e_v(\tau) d\tau + \beta_v \left(\int_0^t e_v(\tau) d\tau \right)^{\alpha_v}\end{aligned}\quad (25)$$

لم 2. قانون کنترلی فیدبک خطی ساز مقاوم با جهت گیری پتانسیلی (26)، سیستم دینامیکی (2) را حول مسیره های مرجع پایدار می سازد.

$$\begin{aligned}\mathcal{F}_{u,RFL} &= -X_u u - (m - Y_v)vr + \\ &\frac{1}{m - X_u}(\dot{u}_d - e_u - \beta_u \alpha_u e_u \left(\int_0^t e_u(\tau) d\tau \right)^{\alpha_u - 1} \\ &- K_{u,RFL} \epsilon_u - W_{u,RFL} \frac{\epsilon_u}{\text{abs}(\epsilon_u) + \epsilon}) \\ &- 100(x - x_{obs}) \frac{(r_{obs}^2 - d^2)}{r_{obs}^6} \\ \mathcal{F}_{v,RFL} &= -Y_v v - (X_u - m)ur + \\ &\frac{1}{m - Y_v}(\dot{v}_d - e_v - \beta_v \alpha_v e_v \left(\int_0^t e_v(\tau) d\tau \right)^{\alpha_v - 1} \\ &- K_{v,RFL} \epsilon_v - W_{v,RFL} \frac{\epsilon_v}{\text{abs}(\epsilon_v) + \epsilon}) \\ &- 100(y - y_{obs}) \frac{(r_{obs}^2 - d^2)}{r_{obs}^6}\end{aligned}\quad (26)$$

اثبات. تابع کاندیدای لیاپانوف برای اطمینان از پایداری سیستم حلقه بسته به صورت رابطه (27) انتخاب می شود.

$$V_{RFL} = \frac{1}{2}(\epsilon_u^2 + \epsilon_v^2)\quad (27)$$

مشتق زمانی تابع لیاپانوف انتخابی به صورت رابطه (28) بیان می گردد.

$$\dot{V}_{RFL} = \epsilon_u \dot{\epsilon}_u + \epsilon_v \dot{\epsilon}_v\quad (28)$$

رابطه (29) با جایگذاری روابط دینامیکی سیستم (2) و اعمال ورودی های کنترلی (26) حاصل می شود.

$$\begin{aligned}\dot{V}_{RFL} &= \epsilon_u \dot{\epsilon}_u + \epsilon_v \dot{\epsilon}_v \\ &= \epsilon_u \left(X_u u + (m - Y_v)vr + (\mathcal{F}_{RFL,u} \right. \\ &\quad \left. + F_{rep,x}(r_{obs} < d)) - \dot{u}_d + e_u \right. \\ &\quad \left. + \beta_u \alpha_u e_u \left(\int_0^t e_u(\tau) d\tau \right)^{\alpha_u - 1} \right) \\ &\quad + \epsilon_v \left(Y_v v + (X_u - m)ur + (\mathcal{F}_{RFL,v} \right. \\ &\quad \left. + F_{rep,y}(r_{obs} < d)) - \dot{v}_d \right. \\ &\quad \left. + \beta_v \alpha_v e_v \left(\int_0^t e_v(\tau) d\tau \right)^{\alpha_v - 1} \right) \\ &= \epsilon_u \left(-K_{u,RFL} \epsilon_u - W_{u,RFL} \frac{\epsilon_u}{\text{abs}(\epsilon_u) + \epsilon} \right) \\ &\quad + \epsilon_v \left(-K_{v,RFL} \epsilon_v - W_{v,RFL} \frac{\epsilon_v}{\text{abs}(\epsilon_v) + \epsilon} \right)\end{aligned}$$

ربات از برخورد با موانع اجتناب نماید.

اثبات. با برقراری شرط لغزش (17) از وجود مود لغزش در سیستم روی سطح لغزش و پایداری سیستم حلقه بسته اطمینان حاصل می شود. برقراری شرط لغزش متضمن جاذب بودن لایه مرزی سطح لغزش است، [20].

$$\frac{1}{2} \dot{V}_S \leq -\eta^T |S|\quad (17)$$

بدین منظور تابع (18) که تابع مثبت معین است به عنوان تابع لیاپانوف در نظر گرفته می شود. شایان ذکر است که η^T برداری با عناصر مثبت می باشد.

$$V_S = \frac{1}{2} S_u^2 + \frac{1}{2} S_v^2\quad (18)$$

مشتق اول زمانی این تابع به صورت رابطه (19) می باشد.

$$\dot{V}_S = S_u \dot{S}_u + S_v \dot{S}_v\quad (19)$$

و با جایگذاری روابط (2) و افزودن نیروی مجازی به معادلات دینامیکی

روابط (20) حاصل می شود.

$$\begin{aligned}\dot{V}_S &= S_u \left(\frac{X_u}{m - X_u} u + \frac{m - Y_v}{m - X_u} vr + \frac{1}{m - X_u} (\mathcal{F}_u \right. \\ &\quad \left. + F_{rep,x}(r_{obs} < d)) - \dot{u}_d + \lambda_1 e_u \right) \\ &\quad + S_v \left(\frac{Y_v}{m - Y_v} v + \frac{X_u - m}{m - Y_v} ur + \frac{1}{m - Y_v} (\mathcal{F}_v \right. \\ &\quad \left. + F_{rep,y}(r_{obs} < d)) - \dot{v}_d + \lambda_2 e_v \right)\end{aligned}\quad (20)$$

با اعمال ورودی های کنترلی (16)، رابطه (20) را می توان به صورت رابطه (21) ساده نمود.

$$\begin{aligned}\dot{V}_S &= S_u (-K_{u,SMC} S_u - W_{u,SMC} \text{sign}(S_u)) \\ &\quad + S_v (-K_{v,SMC} S_v - W_{v,SMC} \text{sign}(S_v)) \\ &= -K_{u,SMC} S_u^2 - W_{u,SMC} |S_u| - K_{v,SMC} S_v^2 \\ &\quad - W_{v,SMC} |S_v|\end{aligned}\quad (21)$$

در نتیجه برای تحقق پایداری سیستم و برقراری شرط لغزش (17) لازم است ضرایب $K_{u,SMC}$ ، $W_{u,SMC}$ ، $K_{v,SMC}$ و $W_{v,SMC}$ مثبت در نظر گرفته شود.

بنابراین قوانین کنترلی مقاوم ارائه شده، همگرایی خطاهای ردیابی را تضمین می کند. واضح است که هیچ کنترلی بر روی زاویه چرخش ψ وجود ندارد و تنها دو کنترل کننده در دسترس می باشد. در نتیجه برای اطمینان از محدود بودن سرعت زاویه r با استفاده از قوانین کنترلی پیشنهادی، به تحلیل پایداری آن خواهیم پرداخت.

تابع منتخب لیاپانوف به صورت رابطه (22) در نظر گرفته می شود.

$$V_r = \frac{1}{2} r^2\quad (22)$$

رابطه (23) با مشتق گیری از رابطه (22) و جایگذاری از روابط دینامیکی (2) حاصل می شود.

$$\dot{V}_r = r \dot{r} = r \left(\frac{N_r}{I_z - N_r} r + \frac{Y_v - X_u}{I_z - N_r} uv \right)\quad (23)$$

اثبات پایداری تابع لیاپانوف با منفی بودن مشتق آن حاصل می شود، با توجه به علامت ضرایب $N_r < 0$ ، $I_z - N_r > 0$ می توان گفت:

$$(Y_v - X_u)uv < -N_r r \quad r > 0 \text{ اگر}$$

$$(Y_v - X_u)uv > -N_r r \quad r < 0 \text{ اگر}$$

در نتیجه سرعت زاویه ای از رابطه (24) پیروی می کند. که نشان دهنده

محدود بودن آن است.

$$|r| > \left| \frac{Y_v - X_u}{N_r} uv \right|\quad (24)$$

برای دو مسیر مرجع می‌باشد. نیروهای کنترلی نیز در هر دو حالت از مسیرهای مرجع انتخابی در شکل‌های 8 تا 11 نشان داده شده است.

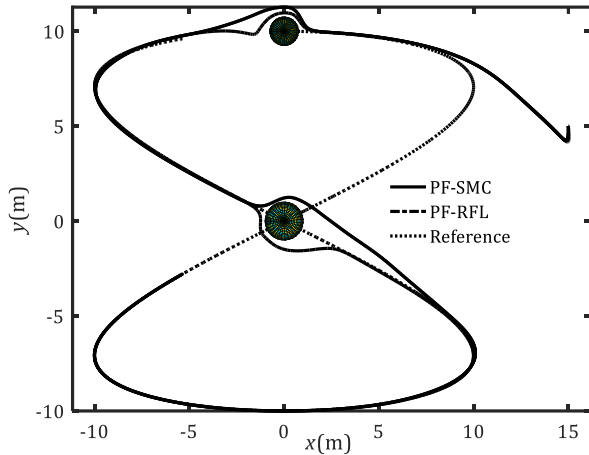


Fig. 4 Motion path for underwater robot and the reference path in planar motion

شکل 4 مسیر حرکت ربات زیرآبی و مسیر مرجع در حرکت صفحه‌ای

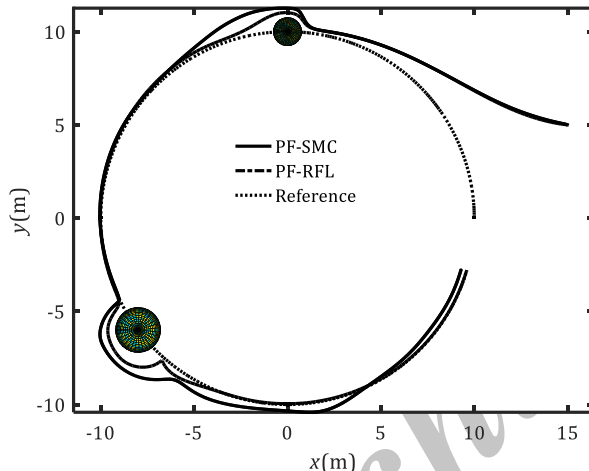


Fig. 5 Motion path for underwater robot and the reference path in planar motion

شکل 5 مسیر حرکت ربات زیرآبی و مسیر مرجع در حرکت صفحه‌ای

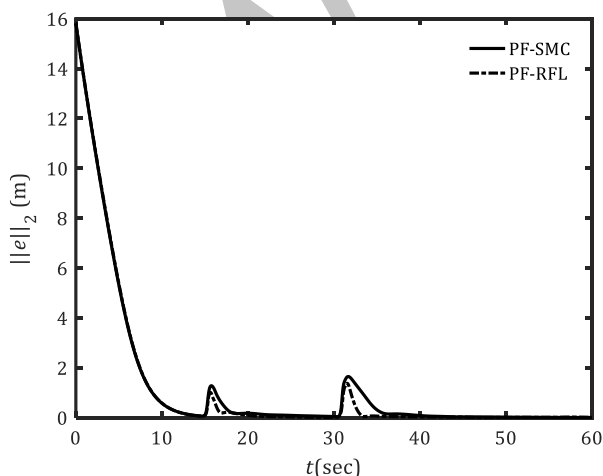


Fig. 6 Error signals for the tracking control of the reference path (8shape)

شکل 6 سیگنال خطای کنترلی تعقیب مسیر مرجع (8 شکل)

$$= -K_{u,RFL}\epsilon_u^2 - W_{u,RFL} \frac{\epsilon_u^2}{\text{abs}(\epsilon_u) + \epsilon} - K_{v,RFL}\epsilon_v - K_{v,RFL}\epsilon_v^2 - W_{v,RFL} \frac{\epsilon_v^2}{\text{abs}(\epsilon_v) + \epsilon} \quad (29)$$

در نتیجه برای تحقق پایداری سیستم و همگرایی خطای سرعت‌ها باید مشتق تابع مثبت معین لیاپانوف انتخابی همواره منفی باشد. بنابراین لازم است ضرایب $K_{v,RFL}$ ، $K_{u,RFL}$ ، $W_{v,RFL}$ ، $W_{u,RFL}$ مثبت در نظر گرفته شوند. همگرایی و محدود بودن سرعت زاویه‌ای نیز مشابه کنترل‌کننده مود لغزشی کلاسیک قابل اثبات است.

7- نتایج شبیه سازی

در این بخش نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم کنترلی جهت بررسی کارایی کنترل‌کننده‌ها بر روی سیستم دینامیکی (2) ارائه شده است. مسیر مرجع پیشنهادی در حضور موانع ثابت در نظر گرفته شده است. بنابراین مطلوب است ربات ضمن تعقیب مسیرهای پیشنهادی از موانع موجود نیز بدون برخورد عبور نماید. نتایج ارائه شده حاصل از پیاده‌سازی هر دو الگوریتم کنترلی مقاوم مود لغزشی کلاسیک و فیدبک خطی‌ساز مقاوم می‌باشد. پارامترهای کنترلی در جدول 2 ارائه شده است. مقادیر پارامترها با روش سعی و خطا انتخاب گردیده‌اند، به نحوی که ضمن ایجاد ورودی‌های کنترلی معقول عملکرد مطلوب سیستم حلقه بسته را نیز در برخواهند داشت. مسیرهای حرکت مرجع در مسیر به صورت روابط (30) در نظر گرفته شده است.

$$x_d = 10 \sin\left(\frac{t}{5}\right), y_d = 10 \sin\left(\frac{t}{10}\right) \\ x_d = 10 \sin\left(\frac{t}{5}\right), y_d = 10 \sin\left(\frac{t}{5}\right) \quad (30)$$

لازم به ذکر است که موقعیت موانع (η_{obs}) در مسیر 8 شکل و دایروی شکل به صورت نقاط زیر در نظر گرفته شده است.

موقعیت موانع در مسیر 8 شکل:

$$\eta_{obs}^1 = (0,0) \text{ \& } \eta_{obs}^2 = (0,10)$$

موقعیت موانع در مسیر دایروی شکل:

$$\eta_{obs}^1 = (0,0) \text{ \& } \eta_{obs}^2 = (-8,-6)$$

شکل 4 مسیر حرکت ربات تحت قوانین کنترلی مود لغزشی و فیدبک خطی-ساز مقاوم برای مرجع زمانی 8 شکل را نشان می‌دهد. ربات از موقعیت اولیه (5,15) شروع به حرکت می‌کند و پس از گذشت زمانی محدود به مسیر مرجع موردنظر می‌رسد. شکل 5 نیز ترسیم حرکت ربات در مسیر دایروی شکل را ارائه می‌کند. در این شبیه‌سازی نیز ربات با شروع از موقعیت اولیه دلخواه، پس از گذشت چند ثانیه به مسیر مورد نظر می‌رسد و به خوبی آن را ردیابی می‌نماید. شکل 6 و 7 نیز نشان‌دهنده سیگنال خطای موقعیت سیستم

جدول 2 مقادیر پارامترهای کنترلی

Table 2 The control parameters

مقدار	پارامتر
10	$K_{u,SMC}, K_{u,RFL}$
10	$K_{v,SMC}, K_{v,RFL}$
0.5	$W_{u,SMC}, W_{u,RFL}$
3	$W_{v,SMC}, W_{v,RFL}$
0.25	k_x, k_y
0.6	β_u, β_v
0.6	α_u, α_v
2	λ_1
7	λ_2

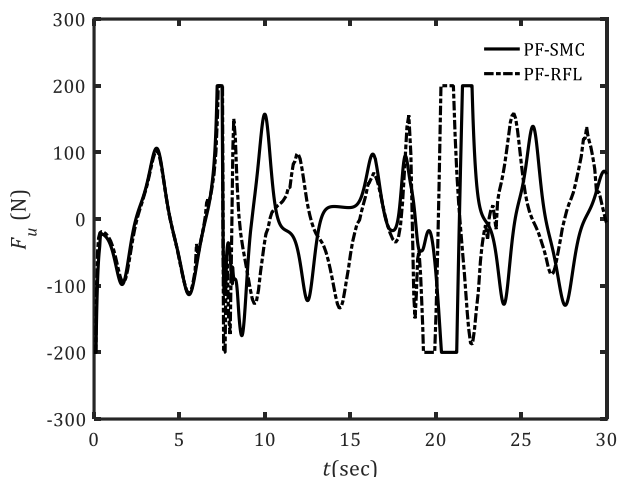


Fig. 10 The surge forces of the underwater robot (O shape)

شکل 10 ورودی کنترلی در راستای محور x مسیر مرجع (دایروی شکل)

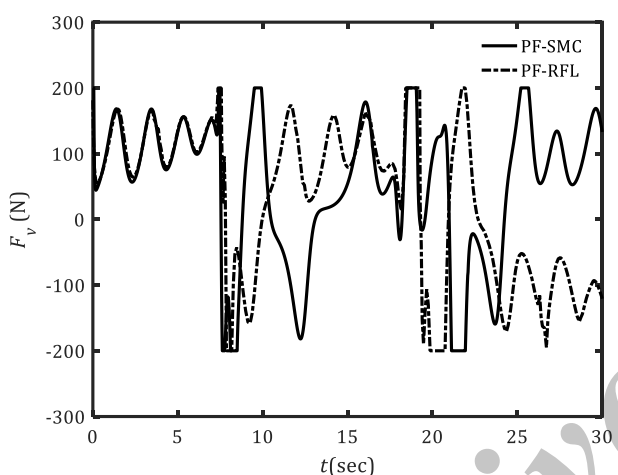


Fig. 11 The sway forces of the underwater robot (O shape)

شکل 11 ورودی کنترلی در راستای محور y مسیر مرجع (دایروی شکل)

مناسب بدون برخورد عبور نموده و پس آن مجدداً به تعقیب مسیر مورد نظر می‌پردازد. با توجه به نمودارهای خطا همان گونه که انتظار می‌رود در محدوده موانع، سیگنال خطا از صفر فاصله گرفته، که ناشی از اضافه شدن نیروهای مجازی پتانسیل است و اجتناب از برخورد را در پی خواهد داشت و پس از عبور از موانع مجدداً خطا به صفر همگرا شده است. شایان ذکر است که اختلاف سیگنال خطایی در موقعیت‌های قرارگیری موانع ناشی از اختلاف اندازه موانع در نظر گرفته شده می‌باشد. مقایسه نتایج ارائه شده، عملکرد بهتر الگوریتم کنترلی مقاوم پیشنهادی در مواجه شدن با موانع را نشان می‌دهد به طوری که با عبور از محدوده قرارگیری موانع، ربات با سرعت بیشتری نسبت به کنترل کننده مود لغزشی کلاسیک به مسیر مرجع باز می‌گردد و به ادامه حرکت خود بر روی مسیر مورد نظر می‌پردازد. بنابراین کاهش خطای ثابت و به طور کلی بهبود تمام اهداف کنترلی را در پی خواهد داشت.

با توجه به نیروهای کنترلی نیز مشخص است که مقادیر عددی، دامنه تغییرات و نوسانات سیگنال‌ها در تمامی حالت‌ها در محدوده معقولی قرار دارد و عملگرهای ربات قادر به تولید آن می‌باشند.

8- نتیجه گیری

در این پژوهش یک روش کنترلی مقاوم با دینامیک خطای انتگرالی-نمایی ارائه شده و با استفاده از تئوری توابع پتانسیل ارتقا یافته است، به طوری که

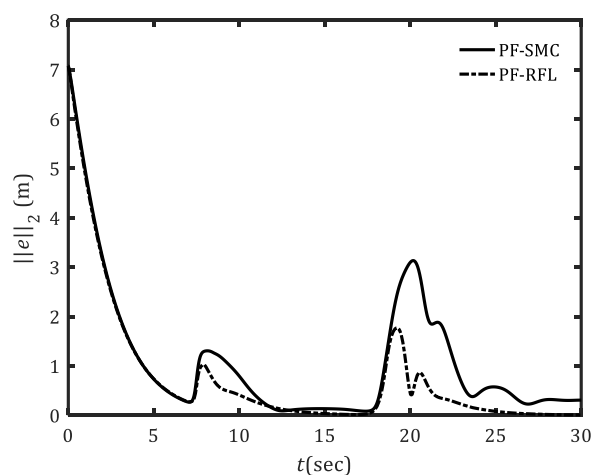


Fig. 7 Error signals for the tracking control of the reference path (O shape)

شکل 7 سیگنال خطای کنترلی تعقیب مسیر مرجع (دایروی شکل)

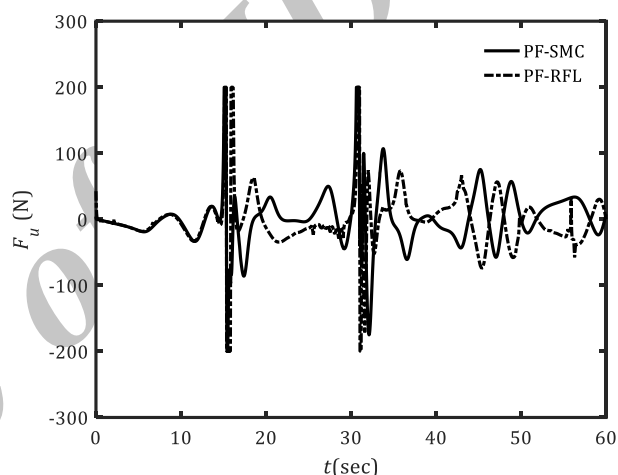


Fig. 8 The surge forces of the underwater robot (8 shape)

شکل 8 ورودی کنترلی در راستای محور x مسیر مرجع (شکل 8)

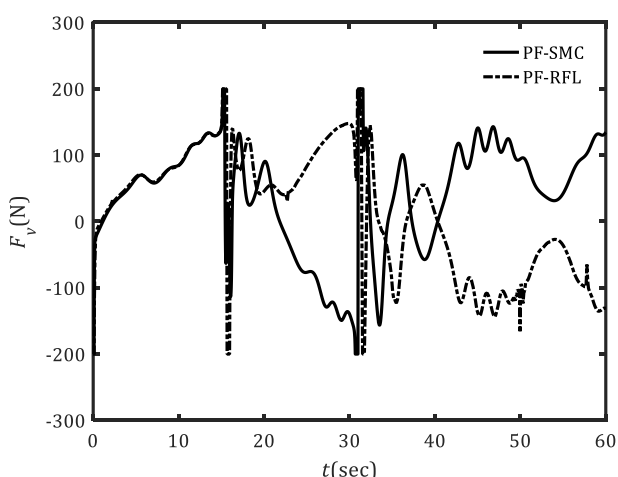


Fig. 9 The sway forces of the underwater robot (8 shape)

شکل 9 ورودی کنترلی در راستای محور y مسیر مرجع (شکل 8)

نتایج نشان دهنده عملکرد مطلوب کنترل کننده‌ها در شرایط دلخواه می‌باشند. همان گونه که مشاهده می‌شود ربات با شروع از موقعیت نسبتاً دور از مسیر مرجع در زمان کوتاهی در محدوده مناسبی از آن قرار گرفته است و مسیر مرجع مورد نظر را دنبال می‌کند. در هنگام رویایی با موانع نیز با ایجاد فاصله

- [2] H. Ashrafiuon, K. R. Muske, L. C. McNinch, and R. A. Soltan, Sliding-mode tracking control of surface vessels, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 11, pp. 4004-4012, 2008.
- [3] L. Wang, L. J. Zhang, H. M. Jia, H. B. Wang, Horizontal tracking control for AUV based on nonlinear sliding mode, in *Information and Automation (ICIA), International Conference on*, pp. 460-463, 2012.
- [4] H. Joe, M. Kim, S. C. Yu, Second-order sliding-mode controller for autonomous underwater vehicle in the presence of unknown disturbances, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 78, No. 1, pp. 183-196, 2014.
- [5] T. Elmokadem, M. Zribi, K. Youcef-Toumi, Terminal sliding mode control for the trajectory tracking of underactuated Autonomous Underwater Vehicles, *Ocean Engineering*, Vol. 129, pp. 613-625, 10.1016/j.oceaneng.2016.10.032, 2017.
- [6] Y. Chen, R. Zhang, X. Zhao, J. Gao, Adaptive fuzzy inverse trajectory tracking control of underactuated underwater vehicle with uncertainties, *Ocean Engineering*, Vol. 121, pp. 123-133, 10.1016/j.oceaneng.2016.05.034, 2016.
- [7] K. D. Do, J. Pan, Z. Jiang, Robust and adaptive path following for underactuated autonomous underwater vehicles, *Ocean Engineering*, Vol. 31, No. 16, pp. 1967-1997, 2004.
- [8] J.-S. Wang, C. G. Lee, Self-adaptive recurrent neuro-fuzzy control of an autonomous underwater vehicle, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 2, pp. 283-295, 2003.
- [9] B. K. Sahu, B. Subudhi, Adaptive tracking control of an autonomous underwater vehicle, *International Journal of Automation and Computing*, Vol. 11, No. 3, pp. 299-307, 2014.
- [10] E. Sebastián, M. A. Sotelo, Adaptive fuzzy sliding mode controller for the kinematic variables of an underwater vehicle, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 49, No. 2, pp. 189-215, 2007.
- [11] J. S. Wang, C. G. Lee, Self-adaptive recurrent neuro-fuzzy control of an autonomous underwater vehicle, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 2, pp. 283-295, 2003.
- [12] J. Yuh, A neural net controller for underwater robotic vehicles, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 161-166, 1990.
- [13] X. Liang, L. Wan, J. I. Blake, R. A. Shenoi, N. Townsend, Path following of an underactuated AUV based on fuzzy backstepping sliding mode control, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 13, No. 3, pp. 122, 2016.
- [14] H. Delavari, H. Heydarinejad, Adaptive fractional order Backstepping sliding mode controller design for a magnetic levitation system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 187-195, 2017. (in Persian)
- [15] Y. Nikoo, B. Rezaie, Z. Rahmani, Designing an intelligent finite-time terminal sliding mode controller with application to atomic force microscope, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 269-279, 2016. (in Persian)
- [16] O. Khatib, Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 5, No. 1, pp. 90-98, 1986.
- [17] D. Gu, H. Hu, Using fuzzy logic to design separation function in flocking algorithms, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 16, No. 4, pp. 826-838, 2008.
- [18] D. Gu, Z. Wang, Leader-follower flocking: algorithms and experiments, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 17, No. 5, pp. 1211-1219, 2009.
- [19] B. K. Sahu, B. Subudhi, Potential function-based path-following control of an autonomous underwater vehicle in an obstacle-rich environment, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 39, No. 8, pp. 1236-1252, 2017.
- [20] A. K. Khalaji, 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. (in Persian)
- [21] A. K. Khalaji, Formation control of differential drive wheeled robot in trajectory tracking, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 103-112, 2016. (in Persian)
- [22] T. Elmokadem, M. Zribi, and K. Youcef-Toumi, Trajectory tracking sliding mode control of underactuated AUVs, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 84, No. 2, pp. 1079-1091, 2016.

ربات زیرآبی قادر به ردیابی مسیر مورد نظر در محیط‌های پرمانع می‌گردد. کنترل‌کننده پیشنهادی با هدف بهبود تمام اهداف کنترلی مطلوب از جمله پاسخ گذرا، زمان نشست و ... طراحی شد و عملکرد موفق آن نیز در شبیه سازی‌های ارائه شده نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد. نتایج مقایسه‌ای نیز بین کنترل‌کننده پیشنهادی و کنترل‌کننده مود لغزشی صورت گرفته است، که نشان دهنده برتری عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی در رویارویی با موانع می‌باشد، ضمن آن‌که کنترل‌کننده پیشنهادی از دقت بالاتری نیز در ردیابی مسیر برخوردارست. علاوه بر این سیستم مورد بررسی نیز کم عملگر می‌باشد و متغیرهای کنترلی کمتر از متغیرهای حالت سیستم می‌باشند. اما با استفاده از توابع لیاپانوف پایداری متغیر کنترل نشده نیز در حضور قوانین کنترلی پیشنهادی تضمین شده است.

9- فهرست علائم

d	فاصله اطمینان بخش اجتناب از برخورد (m)
e_u, e_v	خطای ردیابی سرعت
F_u, F_v	ورودی‌های کنترلی (N)
$F_{rep,x,y}$	نیروی مجازی (N)
$k_{u,v}, k_{x,y}$	پارامترهای کنترلی
r	سرعت (rads ⁻¹)
S_u, S_v	سطوح لغزش
u, v	سرعت‌های خطی در دستگاه متحرک (ms ⁻¹)
v	تابع لیاپانوف
$W_{u,v}$	پارامترهای کنترلی
x, y	موقعیت قرار گیری ربات در صفحه (m)
η^1, η^2	موقعیت موانع اول و دوم

علائم یونانی

α	بهره کنترلی RFL
β	بهره کنترلی RFL
ϵ	دینامیک خطا
λ	بهره کنترلی SMC
ψ	زاویه چرخش ربات

زیرنویس‌ها

d	کمیت مرجع
e	دستگاه مختصات (ثابت)
SMC	کنترل‌کننده مود لغزشی
RFL	کنترل‌کننده خطی سازی فیدبک مقاوم
Obs	موقعیت موانع

10- مراجع

- [1] A. Karimi, R. Hasanzadeh Ghasemi, Equipping of a hovering type autonomous underwater vehicle with ballast tanks and its effect on degrees of freedom, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 397-404, 2017. (in Persian)