

طراحی کنترل کننده مبتنی بر مد لغزشی ترمینال با تابع عملکرد از پیش تعیین شده برای سیستم‌های تثبیت موقعیت پویای کشتی

مدرس، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)، نوشهر، ایران،
a.meighani@stu.nit.ac.ir

مدرس، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)، نوشهر، ایران، seied64@nit.ac.ir

دانشجو، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران،
be.sobhani@yahoo.com

ابوالفضل میقانی نژاد*

سید مصطفی حسینی

بهنام صبحانی گندشمین

چکیده

در این پژوهش یک کنترل کننده برای کنترل و حفظ موقعیت کشتی طراحی می‌شود به طوری که هم قابلیت نگهداری کشتی در یک نقطه، انتقال خودکار کشتی از یک نقطه به نقطه دیگر و هم قابلیت ردیابی یک هدف را دارا می‌باشد. برای بالا بردن دقت و سرعت عملکرد از یک کنترل کننده پسگام مبتنی بر روش مد لغزشی ترمینال استفاده می‌گردد که همگرایی زمان-محدود خطای ردیابی را بدون وابستگی به شرایط اولیه سیستم تضمین می‌کند. همچنین جهت تضمین عملکرد حالت گذرا، از یک تابع عملکرد از پیش تعیین شده در طراحی استفاده می‌شود. کنترل کننده طراحی شده ضمن تضمین عملکرد خطای ردیابی در یک محدوده از پیش تعیین شده، سیستم کشتی را در زمان ثابت بدون وابستگی به شرایط اولیه به صورت کراندار نهایتاً یکنواخت پایدار می‌سازد به طوری که خطای ردیابی به یک همسایگی نزدیک مبدا همگرا می‌شود. جهت صحت سنجی، کنترل کننده مورد نظر در محیط متلب بر روی مدل کشتی آزمایش می‌شود و نتایج نشان می‌دهد که کنترل کننده طراحی شده موقعیت کشتی را به خوبی کنترل می‌کند و تمامی یافته‌های تئوری نیز تایید می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تثبیت موقعیت پویای کشتی، کنترل پسگام، تابع عملکرد از پیش تعیین شده، کنترل مد لغزشی ترمینال.

Design of terminal sliding mode based controller with Prescribed performance function for ship dynamic positioning system

Abolfazl Meighani-nejad

Seyed Mostafa Hoseini

Behnam Sobhani Gendeshmin

Electrical Engineering Department, Imam Khomeini maritime University, Noshahr, Iran

Electrical Engineering Department, Imam Khomeini maritime University, Noshahr, Iran

Electrical and Computer Engineering Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Abstract

In this paper, a controller is designed to automatically control and keep the ship positioning, in a way that, it has ability to keep the ship at a coordination, automatically transfer the ship from one coordination to another one, and it's also able to track a target without model uncertainties. To increase the accuracy and speed of the controller response, a backstep controller based on the terminal sliding mode is used, which guarantees the time-limited stability of the tracking error without depending on the initial conditions of the system. Also, in order to guarantee the controller's transient performance, a prescribed performance function is used in the controller design method. The designed controller, while guaranteeing the performance of the tracking error within a prescribed range, stabilizes the ship response in a constant time without dependence on the initial conditions of the system in a limited time so that the tracking error converges to a neighborhood of the target point. In order to validate the designed controller, the desired controller is tested in MATLAB environment on a ship model and the results show that the designed dynamic positioning controller is able to control the ship positioning well and all the theoretical findings are confirmed.

Keywords: Ship Dynamic Positioning System, back-step control, Prescribed Performance function, terminal sliding mode control.

آب‌های عمیق استفاده از این ابزار امکان‌پذیر نبوده و یا توجه فنی و اقتصادی ندارد. سیستم تثبیت موقعیت پویا^۱ یک فناوری برای رفع این نیاز مهم است. سامانه تثبیت موقعیت پویا متشکل از سیستم کنترل، سیستم مرجع موقعیت، سیستم مرجع زاویه سمت، سیستم مرجع محیطی، سیستم قدرت و سیستم محرکه است [۱]. باتوجه به توسعه بهره‌برداری در دریاها و توسعه سامانه‌های اندازه‌گیری موقعیت، بهینه‌سازی عملکرد این سامانه‌ها مورد توجه روزافزون محققین قرار گرفته است [۲]. شکل ۱، بلوک دیاگرام سامانه کنترل تثبیت موقعیت

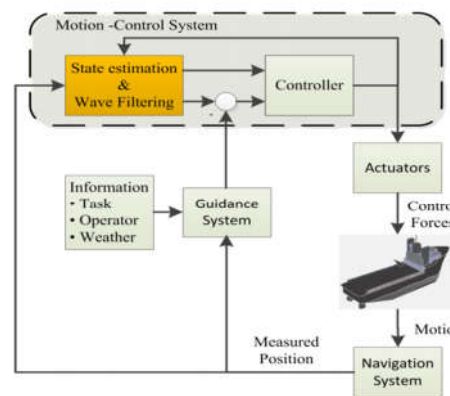
۱- مقدمه

یکی از مسائل مهم در حوزه فعالیت‌های فراساحلی حفظ موقعیت شناور در حین انجام عملیات است. شناورها همواره در معرض نیروهای اختلالی محیطی همچون نیروی باد و جریان دریایی قرار دارند و در اثر اعمال این نیروها، شناور موقعیت خود را از دست می‌دهد. در آب‌های کم‌عمق می‌توان با استفاده از اتصالات مکانیکی بین شناور و بستر دریا، از قبیل کابل‌ها و لنگر، موقعیت شناور را تثبیت کرد، اما در

¹ Dynamic Positioning System (DPS)

پویا یک شناور سطحی را نمایش می‌دهد.

[۷ و ۸]. تحقیق ارائه شده در مرجع [۹] یک رویکرد تطبیقی به منظور تثبیت پویای موقعیت برای تقریب سرعت وسیله نقلیه زیر آب با کنترل از راه دور^۲ (ROV) و عدم قطعیت‌های پارامتری پیشنهاد کرد. علاوه بر این، یک فیلتر کالمن خطی^۳ (LKF)، یک فیلتر کالمن توسعه یافته^۴ (EKF)، یک فیلتر کالمن تطبیقی و یک مدل ریاضی مبتنی بر رویکرد غیرخطی را بر روی ROV Minerva پیشنهاد کرده است. علاوه بر این، یک کنترل کننده تطبیقی برای تخمین پارامترهای DPS غیرخطی توسط تئوری منطق فازی تطبیقی در [۱۰-۱۵] توسعه داده شده است. در [۱۶-۱۹] یک الگوریتم عصبی فازی ارائه شده است که شامل یک الگوریتم شبکه عصبی مبتنی بر کنترل فازی است تا بتوان پایگاه قواعد فازی و تابع عضویت



شکل ۱- بلوک دیاگرام سامانه کنترل موقعیت پویا [۳].

در این سامانه، میزان انحراف شناور از وضعیت مطلوب محاسبه شده و نیروی مورد نیاز جهت اصلاح این انحراف از طریق پیشرانه‌ها ایجاد می‌گردد. استفاده از سامانه تثبیت موقعیت پویا، بیشتر در مورد شناورهای سطحی مانند کشتی‌ها مرسوم بوده است، اما در سال‌های اخیر و با افزایش کاربرد ربات‌های زیرسطحی در صنایع فراساحلی، ایجاد این قابلیت در این شناورها مورد توجه محققین قرار گرفته است. مهم‌ترین مزایای سامانه‌های تثبیت موقعیت پویا عبارت‌اند از: تثبیت موقعیت و جهت شناور توسط پیشرانه، قابلیت دنبال کردن مسیر مشخص در سرعت‌های کم، تغییر سریع موقعیت شناور، فراهم کردن قابلیت کار در هر عمقی از آب، مرتفع کردن خطر آسیب رساندن به بستر دریا (ناشی از لنگراندازی) و افزایش سرعت واکنش شناور به تغییرات آب و هوایی و یا دستورات اپراتور [۱].

را در طول فرایند یادگیری شبکه ایجاد کرد. در [۲۰]، فناوری DP، مدل ریاضی کشتی DP، کنترل کننده‌ها و رویکردهای DP، تخصیص رانشرها، و همچنین کنترل ترکیبی نتایج آزمایش کشتی‌های DP مورد بررسی قرار گرفت. برای تأکید بر نیاز به بررسی بیشتر در این زمینه، تحقیق ارائه شده در [۲۱-۲۵] بر روی تکنیک‌های کنترل ترکیبی و عملیات در کشتی‌های DP از شرایط آرام تا شدید دریا متمرکز بود و یک روش کنترل ترکیبی برای سوئیچینگ بین کنترل‌های خطی یا غیرخطی در حداکثر شرایط عملیاتی را تجزیه و تحلیل کرد. باهدف افزایش بیشتر عملکرد کنترل، محققان در [۲۶-۳۱] مدل کنترل پیش‌بین^۵ (MPC) را پیشنهاد کردند. روش الگوریتم MPC یک روش پیشرفته‌تری است که قابلیت رعایت کردن قیود و اجرای اهداف پیچیده کنترلی را داراست. با توجه به رفتار غیرخطی DPS، MPC برای DPS به‌عنوان یک الگوریتم سودمند در مقایسه با روش کنترل مرسوم پیشنهاد شد [۲۶ و ۲۷]. طراحی کنترل کننده DP به دلیل مدل‌های غیرخطی، عدم قطعیت‌ها، اختلالات، ورودی و خروجی چندمتغیره و قیود، بسیار پیچیده است. در حال حاضر مقالاتی در رابطه با این مسئله وجود دارد که روش‌های کنترل غیرخطی مختلفی را پیشنهاد می‌کنند [۲۸]. مناسب‌ترین روش در این رویکرد طراحی روش کنترل MPC است. MPC در مواردی که مدل ریاضی دقیق سیستم کنترل به طور کامل درک نشده باشد، کنترل با کارایی بالا را ارائه می‌دهد. در [۳۲]، نشان داده شد که MPC را می‌توان با موفقیت برای DPS در زمینه کنترل مقید، با کیفیت بالا اجرا کرد. دامنه اجرای عملیات MPC را می‌توان برای مسائل کنترل کشتی DP افزایش داد. با استفاده از اختلاف بین نقاط تنظیم موقعیت / زاویه سمت مشخص شده توسط اپراتور و نقطه تنظیم فعلی، واریانس‌ها در عناصر بهره ضرب می‌شوند که نیرو و گشتاور لازم برای هدایت کشتی به موقعیت و زاویه سمت مطلوب به دست می‌آید [۳۳]. علاوه بر این، دو رویکرد DPS مقاوم در [۳۱] برای کشتی‌های سطحی خودران با فرض اینکه که حالت‌ها به طور کامل قابل اندازه‌گیری بودند و تنها حالت‌های جزئی با خطاهای اندازه‌گیری در دسترس بودند پیشنهاد شده است. ضمناً، مدل‌های خطی برای تخمین هیدرودینامیک

در دهه‌های اخیر پژوهش‌های زیادی در زمینه کنترل سیستم‌های تثبیت موقعیت پویا توسط پژوهشگران صورت گرفته است. از نظر تاریخی، DPS اولین بار در دهه ۱۹۶۰ باهدف کنترل حرکت کشتی‌ها در سه درجه آزادی افقی مانند Sway، Surge و Yaw مورد استفاده قرار گرفت که از سیستم‌های کنترل تک ورودی-تک خروجی (SISO) و تناسبی-انترگالی-مشتقی^۱ (PID) به همراه فیلتر پایین‌گذر استفاده شد. متأسفانه سیستم کنترل PID باعث تغییر فاز شد که بر پایداری سیستم تأثیر گذاشت [۴]. مطالعه در [۵] قوانین کنترل غیرخطی پایداری مجانبی سراسری، بر اساس روش پس‌گام که در آن اختلالات محیطی در نظر گرفته نمی‌شود، معرفی شد. با این حال، اختلال اکولوژیکی ناشی از شرایط دریا پویا است و نمی‌توان از آن غافل شد. عملکرد روش مورد استفاده برای طراحی قاعده کنترل تناسبی-مشتقی (PD)، برای ارزیابی بازخورد خروجی سیستم موقعیت پویا، در [۶] مورد بررسی قرار گرفت. تکنیک‌های کنترلی جدید، مدل پیشرفته و هوشمندی را ارائه می‌دهند و روش‌های محاسباتی برای پشتیبانی از آن‌ها توسعه یافته‌اند. یک کنترل کننده غیرخطی PID تطبیقی برای کاهش انحراف کشتی‌ها از موقعیت مورد نظر در اثر اختلالات محیطی که باعث تغییرات ناگهانی غیرمنتظره موقعیت می‌شود، طراحی گردید

² Remotely Operated Underwater Vehicle (ROV)

³ Linear Kalman Filter (LKF)

⁴ Extended Kalman Filter

⁵ Model Predictive Control

¹ Proportional-Integral-Derivative

از یابی نامعینی‌های ناشی از ناپایداری دریا به‌عنوان پارامترهای متغیر با زمان معلوم در سیستم دینامیکی، یک تکنیک مد لغزشی مبتنی بر FAC پیشنهاد شده است.

غیرخطی در ناحیه محلی نقطه کار DP، پیشنهاد گردید. همچنین، یک کنترل‌کننده DP مقاوم با بازخورد خروجی با استفاده از یک رویکرد ساده لیونبرگر برای تخمین حالت‌های سیستم در زمانی که حالت‌ها به طور کامل در دسترس نبود، پیشنهاد شد. در [۳۴]، هدف قانون DPS، کنترل موقعیت یک کشتی حفاری تحت اختلالات دریا است و برای

جدول ۱- مقایسه روش های کنترلی DP

کنترل‌کننده	مزایا	معایب
کنترل پیش‌بین مبتنی بر فیلتر کالمن [۳۱ و ۲۵]	- کاهش مصرف سوخت، گازهای گلخانه‌ای و نوسانات سیستم قدرت - کاهش ساییدگی قطعات مکانیکی به‌خصوص پیش‌رانه‌ها به دلیل عملکرد کنترلی بسیار روان. - توسعه حذف نویز در اندازه‌گیری موقعیت با عملکرد بهتر در حفظ موقعیت. - کنترل مقاوم ترکیبی از سنسورهای موقعیت به‌روزرسانی بالا و پایین، مانند سیستم موقعیت‌یابی جهانی دیفرانسیلی (DGPS) و موقعیت‌یابی سنتی هیدرو آکوستیک Long Base-Line	- بسته به ماهیت آن، MPC به‌سرعت به تغییرات ناگهانی در نیروهای محیطی مانند وزش باد واکنش نشان نمی‌دهد، مگر اینکه پیش‌بینی‌کننده موقعیت تشخیص دهد که اقدامات باید فوراً انجام شود.
کنترل‌کننده Neuro-PD [۳۹]	- پیش‌بینی رابطه دینامیکی غیرخطی بین عملکرد حرکت کشتی (انحراف Sway، Surge، Heading) و سرعت چرخش رانشگر.	- نقطه‌ضعف اصلی سیستم PD مبتنی بر شبکه عصبی این بود که تنها دو بهره کنترل تناسبی (KP) و مشتقی (KD) در روش پیشنهادی نظارت می‌شود که در آن عامل انتگرال (KI) وجود ندارد که برای اهداف ثابت و مستقل مناسب است.
کنترل‌کننده شبکه عصبی تطبیقی [۴۰، ۳۵، ۱۶]	- به مدل دینامیکی کشتی نیاز ندارد و کنترل‌کننده بادقت خوبی موقعیت کشتی را تنظیم می‌کند.	- مدل کنترلی برای سیستم DP برای تنظیم خودکار وزن‌های شبکه عصبی به قوانین فازی نیازمند است.
کنترل‌کننده عصبی-فازی [۱۹، ۱۷]	- یک کنترل عصبی فازی DP می‌تواند انحراف موقعیت و زاویه سمت را با حداقل قدرت رانش حفظ کند. - در اکثر ناآرامی‌های دریایی، کنترل پیشنهادی عملکرد بالایی در حین حرکت کشتی دارد. - مصرف برق در مقایسه با روش PD بسیار مقرون‌به‌صرفه است.	- پیاده‌سازی در یک سیستم کنترل DP واقعی به دلیل اینکه سیگنال سنسور از فیلترهای کالمن عبور داده می‌شود و همچنین به دلیل وجود تاخیر در کنترل رانش، قابل‌اجرا نیست.

شده و نتایج مناسبی استخراج شده است. آقای رودریگز و همکاران [۴۴] نیز یک روش بر پایه مد لغزشی برای یک شناور سطحی ارائه داده‌اند. در این مرجع، سعی شده است که زمان نشست سیستم به حداقل مقدار خود برسد.

مقایسه کنترل‌کننده‌های هوشمند و معمولی پیشنهاد شده در مقالات در جدول ۱ ارائه شده است.

باتوجه به آنچه در جدول ۱ ارائه شده است، مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده‌های ارائه شده در تحقیقات قبلی دارای معایبی می‌باشند. به‌عنوان مثال، کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر فیلتر کالمن از پاسخ کند در مقابل تغییرات ناگهانی رنج می‌برد. همچنین باتوجه به آنچه در مرور مقالات ارائه شد، سرعت پایین و زمان نشست بالا از جمله مشکلات رایج در کنترل موقعیت شناور محسوب می‌شود. بنابراین، برای رفع چنین مشکلاتی محققین مختلف روش‌های متفاوتی را ارائه داده‌اند. به‌عنوان مثال، کنترل‌کننده‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای کنترل موثر موقعیت شناور پیشنهاد شده‌اند. همان‌طور که از جدول ۱ مشهود است، تنظیم پارامترهای سیستم‌های هوش مصنوعی و پیاده‌سازی این سیستم‌ها از جمله مشکلات این نوع از کنترل‌کننده‌ها محسوب می‌شود. بنابراین طراحی کنترل‌کننده برای سیستم DP از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و باتوجه به دینامیک غیرخطی کشتی یک چالش بزرگ محسوب می‌شود.

از این رو این پژوهش به طراحی کنترل‌کننده برای سیستم DP

در [۳۵] یک کنترل منطق فازی^۱ (FLC) برای سیستم DP در کشتی‌هایی مانند کشتی‌های حفاری و نیمه شناور در آب‌های عمیق پیشنهاد شده است. FLC شامل ماژول‌های خاص پیش‌پردازش، فازی‌ساز و استنتاج قانون، پایگاه قواعد، غیرفازی‌ساز و پس‌پردازش است. در مرجع [۳۶-۳۸] یک کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی با در نظر گرفتن اغتشاشات نامعلوم متغیر با زمان دریا و عملکرد لحظه‌ای بیان می‌شود. در این کنترل‌کننده، یک قانون به‌روز شده تطبیقی در اطلاعات قبلی اغتشاش موردنیاز نیست و زمان محدود بودن حلقه کنترل به‌شدت تأیید می‌شود. با طراحی تئوری کنترل زمان محدود، این روش سرعت سیستم حلقه بسته کنترل‌کننده را برای تجزیه و تحلیل پایداری تضمین می‌کند. فو و همکاران [۴۱] روش مد لغزشی زمان گسسته را برای کنترل موقعیت کشتی با اغتشاشات متغیر با زمان بر اساس مسیر مرجع غیر سوئیچینگ بررسی کرده‌اند. همچنین یک روش تطبیقی - مقاوم بر پایه شبکه عصبی برای تثبیت موقعیت پویای شناور در [۴۲] پیشنهاد شده است که سیستم را تحت نامعینی مدل و اغتشاشات خارجی کنترل می‌کند. آقای وانگ و همکاران [۴۳] روشی بر پایه مد لغزشی ترکیب شده با منطق فازی ارائه داده‌اند. کنترل‌کننده طراحی شده برای مواقع بروز عیب در سیستم نیز اعمال

¹ Fuzzy Logic Control

می‌پردازد. در این پژوهش از روش کنترل مد لغزشی ترمینال استفاده می‌شود که تضمین می‌کند خطای ردیابی در مدت‌زمان محدود که مستقل از شرایط اولیه سیستم است به یک همسایگی نزدیک مبدأ همگرا می‌شود؛ همچنین با استفاده از تکنیک تابع عملکرد از پیش تعیین شده^۱، عملکرد حالت گذرای کنترل‌کننده تضمین می‌گردد، به طوری که خطای ردیابی را می‌توان همواره در یک بازه از پیش تعیین شده قرار داد. محدود کردن خطای حالت گذرا که با استفاده از تابع عملکرد از پیش تعیین شده در کنترل‌کننده پیشنهادی ارائه شده است، یک مزیت مهم در چنین سیستم‌هایی محسوب می‌شود. بعلاوه، این تابع از بروز ناپایداری در سیستم هنگام تغییرات ناگهانی جلوگیری می‌کند.

باتوجه به این گفته‌ها مهم‌ترین اهداف این پژوهش عبارت‌اند از:

- طراحی کنترل‌کننده پسگام مبتنی بر روش مد لغزشی ترمینال برای دستیابی به همگرایی زمان محدود.
- استفاده از PPF برای تضمین عملکرد حالت گذرای سیستم و جلوگیری از ناپایداری سیستم در تغییرات ناگهانی.

آنچه که در ادامه این مقاله خواهیم خواند بدین ترتیب است: در بخش ۲ به توصیف مدل ریاضی سیستم تثبیت موقعیت پویا پرداخته می‌شود و لم‌ها و تعاریف موردنیاز برای توسعه کنترل‌کننده بیان می‌شود. در بخش ۳ به طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال با تابع عملکرد از پیش تعیین شده پرداخته می‌شود. در بخش ۴، نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی در محیط متلب آورده می‌شود و مورد بحث و تحلیل قرار می‌گیرد و در بخش ۵ نیز یک نتیجه‌گیری از پژوهش صورت گرفته ارائه خواهد شد.

۲- توصیف مدل ریاضی سیستم DP

در کاربردهای سرعت پایین کشتی نظیر نگهداری ایستگاه کشتی‌های سطحی، مرسوم است که مدل ریاضی فرکانس پایین کشتی در Surge، Sway و Yaw در نظر گرفته شود و این مدل به لحاظ دینامیکی، خطی و به لحاظ سینماتیکی، غیرخطی است و به نام مدل DP معروف است. در این مدل فرض می‌شود زوایای رول و پیچ کوچک هستند و جملات مربوط به کوریولیس و گریزازمرکز ناچیز هستند، از این رو مدل ریاضی غیرخطی حرکت یک شناور در مد DP با ۳ درجه آزادی به صورت زیر بیان می‌گردد که در واقع مدل ساده شده ۶ درجه آزادی است [۴۵، ۴۶].

$$\dot{\eta} = R(\psi)v \quad (1)$$

$$M\dot{v} = -Dv + \tau$$

که $\eta = [x \ y \ \psi]^T$ بردار موقعیت در چهارچوب زمین-ثابت است که شامل موقعیت Surge یا x ، موقعیت Sway یا y و زاویه Heading یا $\psi \in [0, \pi]$ شناور می‌باشد. $v = [u, v, r]^T$ بردار سرعت مرکز کشتی در چهارچوب بدنه-ثابت است که شامل سرعت Surge یا u ، سرعت Sway یا v و نرخ Yaw شناور یا r است. $R(\psi)$ ماتریس دوران است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

گشتاورهای کلی τ از طریق رابطه زیر تعیین می‌گردد:

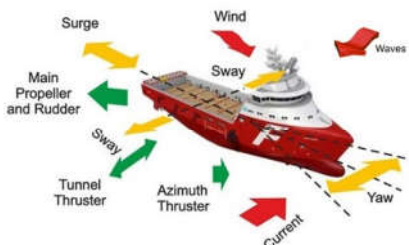
$$\tau(\alpha) = B(\alpha)u_\tau \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (3)$$

که $u_\tau = [u_{1\tau}, u_{2\tau}, \dots, u_{m\tau}]^T \in \mathbb{R}^m$ و $u_{\tau i} (i = 1, 2, \dots, m)$ نیروی i امین رانشگر است و $B(\alpha) \in \mathbb{R}^{3 \times m}$ ماتریس پیکربندی نام دارد که i امین ستون آن برابرست با:

$$B_i(\alpha_i) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i) \\ \sin(\alpha_i) \\ l_{xi} \sin(\alpha_i) - l_{yi} \cos(\alpha_i) \end{bmatrix} \quad (4)$$

که $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m]^T \in \mathbb{R}^m$ و $\alpha_i \in [0, 360^\circ)$ زاویه جهت i امین رانشگر است و (l_{xi}, l_{yi}) مختصات محل قرارگیری i امین رانشگر در کشتی است. نیروها و گشتاورهای کنترلی $\tau_c = [\tau_{cx}, \tau_{cy}, \tau_{cz}]^T$ به صورت زیر تخصیص داده شده‌اند:

$$\tau_c = B(\alpha_c)u_c \quad (5)$$



شکل ۲- نمایش حرکت شناور در سه جهت Surge، Sway و Yaw

که $u_c = [u_{1c}, u_{2c}, \dots, u_{mc}]^T$ و $\alpha_c = [\alpha_{1c}, \alpha_{2c}, \dots, \alpha_{mc}]^T$ به ترتیب بردار نیروی تخصیص یافته و بردار زاویه جهت تخصیص یافته رانشگر هستند و از رابطه زیر قابل محاسبه هستند:

² Added mass

³ Thruster

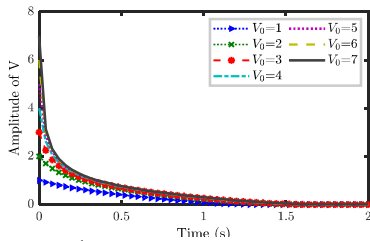
¹ Prescribed Performance Function (PPF)

عملکرد $e(t)$ به طوری که عملکرد گذرا و حالت پایدار آن را بتوان تضمین کرد، می‌توان از تبدیل زیر استفاده کرد.

$$z(t) = T^{-1} \left(\frac{e(t)}{\chi(t)} \right) \quad (11)$$

که $T(z(t))$ یک تابع صعودی یکنواخت اکید^۴ با ویژگی‌های زیر است:

در اینجا، $\lim_{z \rightarrow +\infty} T(z) = +1$ ، $\lim_{z \rightarrow -z} T(z) = -1$ که T^{-1} معکوس تابع T است. تابع عملکرد از پیش‌تعیین شده است که یک تابع نرم نزولی مثبت می‌باشد به طوریکه: $\chi(t): \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$ یا $\lim_{t \rightarrow \infty} \chi(t) = \chi_\infty$ عملکرد از پیش‌تعیین شده $e(t)$ را می‌توان با استفاده از نابرابری زیر بیان کرد.



شکل ۳- نمودار پاسخ زمانی سیستم $\dot{V} = -V^3 - V^3$ به ازای V شرط اولیه متفاوت

$$-\chi(t) \leq e(t) \leq \chi(t) \quad (12)$$

PPF معمولاً به صورت زیر انتخاب می‌شود:

$$\chi(t) = (\chi_0 - \chi_\infty)e^{-\ell t} + \chi_\infty \quad (13)$$

که $\chi_0 > \chi_\infty$ و ℓ اعداد مثبت هستند. تابع $T(z(t))$ نیز معمولاً به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$T(z(t)) = \frac{e^{z(t)} - e^{-z(t)}}{e^{z(t)} + e^{-z(t)}} \quad (14)$$

بنابراین، $e(t)$ تبدیل شده را می‌توان به صورت زیر نشان داد، که معادله مقید در معادله (۱۳) را به شکل غیر مقید زیر تبدیل می‌کند:

$$z(t) = T^{-1} \left(\frac{e(t)}{\chi(t)} \right) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \omega}{1 - \omega} \right) \quad (15)$$

که شکل $\omega = \frac{e(t)}{\chi(t)}$ عملکرد از پیش‌تعیین شده $e(t)$ را نشان می‌دهد.

لم ۲: اگر $e(t)$ تبدیل شده، $z(t)$ ، محدود باشد، آنگاه محدود بودن از پیش‌تعیین شده عملکرد $e(t)$ تضمین خواهد شد.

اثبات: از محدود بودن $z(t)$ می‌توان فرض کرد که ثابت‌هایی مانند \bar{z} و \underline{z} وجود دارد به طوری که: $\bar{z} \geq z(t) \geq \underline{z}$ برای تمام $t \geq 0$ چون T یک تابع صعودی یکنواخت اکید است و $\chi(t)$ یک تابع مثبت است، بنابراین می‌توان گفت: $\chi(t)T(\bar{z}) \leq \chi(t)T(z(t)) \leq \chi(t)T(\underline{z})$.

بر اساس معادله (۱۲) داریم: $e(t) = \chi(t)T(z(t))$ همچنین با توجه به ویژگی $-1 \leq T(\bullet) \leq 1$ داریم: $-\chi(t) \leq e(t) \leq \chi(t)$ بنابراین اثبات تکمیل شد.

$$B_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 1 & \dots \\ -l_{y1} & l_{x1} & -l_{y2} & l_{x2} & \dots \end{bmatrix}$$

$$u_{cxy} = B_L^T \tau_c$$

$$u_c = \left[\sqrt{u_{cxy}^2(1) + u_{cxy}^2(2)}, \sqrt{u_{cxy}^2(3) + u_{cxy}^2(4)}, \dots, \sqrt{u_{cxy}^2(2m-1) + u_{cxy}^2(2m)} \right]^T \quad (6)$$

$$\alpha_c = \left[\tan^{-1} \left(\frac{u_{cxy}(2)}{u_{cxy}(1)} \right), \tan^{-1} \left(\frac{u_{cxy}(4)}{u_{cxy}(3)} \right), \dots, \tan^{-1} \left(\frac{u_{cxy}(2m)}{u_{cxy}(2m-1)} \right) \right]^T$$

که B_L^T شبه معکوس ماتریس B_L است. برای توسعه و طراحی کنترل‌کننده، تعاریف و لم‌های زیر ارائه می‌شود:

تعریف ۱ (پایداری زمان - ثابت^۱): برای سیستم غیرخطی

$$\dot{z}(t) = f(z(t)), z(0) = z_0 \quad (7)$$

که $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ ، $f(z(t)): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ یک تابع پیوسته است و با فرض اینکه در این سیستم یک جواب یکتا برای هر حالت اولیه وجود داشته باشد، اگر سیستم معادله (۷) پایدار زمان-محدود سراسری باشد و زمان نشست $T(z_0)$ به وسیله $T(z_0) < T_{max}$ محدود باشد، به چنین سیستمی پایدار زمان-ثابت^۲ گفته می‌شود [۴۷].

لم ۱ [۴۷]: سیستم غیرخطی (۷) را در نظر بگیرید و فرض

کنید که یک تابع معین مثبت پیوسته مانند $V(z)$ وجود دارد که

$$\dot{V}(z) \leq -aV(z)^{p/q} - \bar{a}V(z)^{\bar{p}/\bar{q}} + b \quad (8)$$

که $a, \bar{a}, b > 0$ ، $p < q, \bar{p} > \bar{q}$ همگی اعداد فرد مثبت هستند. با توجه به معادله (۸) می‌توان گفت سیستم معادله (۷) پایدار زمان-ثابت است و ناحیه همگرایی آن به صورت زیر محدود می‌گردد:

$$\Omega = \left\{ z | V(z) \leq \min \left\{ \left(\frac{b}{(1-\theta)a} \right)^{\frac{q}{p}}, \left(\frac{b}{(1-\theta)\bar{a}} \right)^{\frac{\bar{q}}{\bar{p}}} \right\} \right\} \quad (9)$$

که $0 < \theta < 1$ یک ثابت است. زمان نشست در نامساوی زیر صدق خواهد کرد:

$$t < T \frac{1}{a \left(1 - \frac{p}{q} \right) \bar{a} \left(\frac{\bar{p}}{q} - 1 \right)} \max \quad (10)$$

برای مثال، پاسخ سیستم با معادله دیفرانسیل $\dot{V} = -V^{\frac{1}{3}} - V^3$ به ازای V شرط اولیه متفاوت $V(0) = \{1, 2, \dots, 7\}$ در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۳ مشخص است زمان نشست سیستم $\dot{V} = -V^{\frac{1}{3}} - V^3$ مستقل از شرایط اولیه است و برابر است با $t \leq \frac{1}{a(1-\frac{p}{q})} + \frac{1}{\bar{a}(\frac{\bar{p}}{q}-1)} = 2$ تطابق دارد.

تعریف ۲ (محدود بودن عملکرد از پیش‌تعیین شده^۳):

در صورتی که متغیر $e(t)$ همواره بتواند در یک بازه از پیش‌تعیین شده باقی بماند، گفته می‌شود عملکرد $e(t)$ به صورت از پیش‌تعیین شده محدود (PPB) است. جهت تضمین محدود بودن از پیش‌تعیین شده

¹ Fixed-Time Stability

² Fixed-Time Stable

³ Pre described Performance Bounded (PPB)

⁴ Strictly Monotonic Increasing

$$= \Lambda(\dot{e} - \chi^{-1}\dot{\chi}e)$$

$$\chi = \text{diag}(\chi_1, \chi_2, \chi_3), \Lambda = \text{diag}(\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3), \Lambda_j = \text{که}$$

$$\frac{1}{\chi_j(1-\omega_j^2)}$$

توجه داشته باشید Λ یک ماتریس مثبت معین و معکوس پذیر است [۴۸].

با استفاده از معادله (۱)، (۱۷) و (۲۱) داریم:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 &= \Lambda(\dot{\eta} - \dot{\eta}_d - \chi^{-1}\dot{\chi}e) \\ &= \Lambda(R(\psi)v - \dot{\eta}_d - \chi^{-1}\dot{\chi}e) \\ &= \Lambda(R(\psi)Z_2 + R(\psi)\tau_v - \dot{\eta}_d - \chi^{-1}\dot{\chi}e) \end{aligned} \quad (22)$$

قانون کنترل مجازی τ_v را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\tau_v = R^{-1}(\psi) \left(\dot{\eta}_d + \chi^{-1}\dot{\chi}e - \Lambda^{-1} \left(c_1 Z_1 + k_1 Z_1 \|Z_1\|^{\frac{p-2}{q}} + \bar{k}_1 Z_1 \|Z_1\|^{\frac{p-2}{q}} \right) \right) \quad (23)$$

با جایگذاری معادله (۲۳) در (۲۲) داریم:

$$\dot{Z}_1 = -c_1 Z_1 - k_1 Z_1 \|Z_1\|^{\frac{p-2}{q}} - \bar{k}_1 Z_1 \|Z_1\|^{\frac{p-2}{q}} + \Lambda R(\psi)Z_2 \quad (24)$$

که c_1 ، k_1 و \bar{k}_1 ثابت‌های مثبت طراحی هستند. همچنین $p < q$ و $\bar{p} > \bar{q}$ اعداد مثبت فرد هستند.

مرحله ۲: با مشتق‌گیری از Z_2 داریم:

$$\dot{Z}_2 = -M^{-1}Dv + M^{-1}\tau_c - \dot{\tau}_v \quad (25)$$

برای محاسبه مشتق قانون کنترل مجازی از رابطه زیر استفاده می‌کنیم.

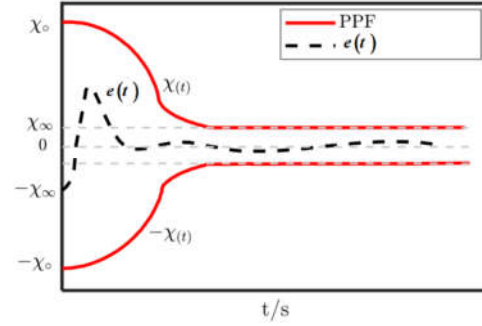
$$\begin{aligned} \dot{\tau}_v &= \dot{R}_I \left(\dot{\eta}_d + \chi^{-1}\dot{\chi}e \right. \\ &\quad \left. - \Lambda^{-1} \left(c_1 Z_1 + k_1 Z_1 \|Z_1\|^{\frac{p-2}{q}} + \bar{k}_1 Z_1 \|Z_1\|^{\frac{p-2}{q}} \right) \right) \\ &\quad + R^{-1} \left(\dot{\eta}_d + \dot{\chi}_I \dot{\chi}e + \chi^{-1}\dot{\chi}e + \chi^{-1}\dot{\chi}\dot{e} \right. \\ &\quad \left. + \Lambda^{-1} \left(c_1 \dot{Z}_1 + k_1 \dot{Z}_1 \|Z_1\|^{\frac{p-2}{q}} \right) \right. \\ &\quad \left. + 2k_1 \left(\frac{p}{q} - 1 \right) Z_1 \dot{Z}_1^T Z_1 \|Z_1\|^{\frac{p-4}{q}} \right. \\ &\quad \left. + \bar{k}_1 \dot{Z}_1 \|Z_1\|^{\frac{p-2}{q}} + 2\bar{k}_1 \left(\frac{\bar{p}}{q} \right) \right. \\ &\quad \left. - 1 \right) Z_1 \dot{Z}_1^T Z_1 \|Z_1\|^{\frac{p-4}{q}} - \dot{\Lambda}_I \left(c_1 Z_1 + k_1 Z_1 \|Z_1\|^{\frac{p-2}{q}} \right. \\ &\quad \left. + \bar{k}_1 Z_1 \|Z_1\|^{\frac{p-2}{q}} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \psi = R_I \dot{R}_I &= \begin{bmatrix} -\dot{\psi} \sin(\psi) & \dot{\psi} \cos(\psi) & 0 \\ -\dot{\psi} \cos(\psi) & -\dot{\psi} \sin(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \dot{\chi}_j(t) &= -\ell_j (\chi_{0j} - \chi_{\infty j}) \exp(-\ell_j t), j = 1, 2, 3, \\ \dot{\chi} &= \text{diag}([\dot{\chi}_1(t), \dot{\chi}_2(t), \dot{\chi}_3(t)]), \\ \dot{\chi}_j^2(t) &= -\ell_j^2 (\chi_{0j} - \chi_{\infty j}) \exp(-\ell_j t), j = 1, 2, 3, \\ \dot{\chi} &= \text{diag}([\dot{\chi}_1(t), \dot{\chi}_2(t), \dot{\chi}_3(t)]) \\ \dot{\chi}_I &= \text{diag} \left(\left[-\frac{\dot{\chi}_1(t)}{\chi_1^2(t)}, -\frac{\dot{\chi}_2(t)}{\chi_2^2(t)}, -\frac{\dot{\chi}_3(t)}{\chi_3^2(t)} \right] \right) \\ \dot{e} &= R(\psi)v - \dot{\eta}_d \\ \dot{Z}_1 &= \Lambda(\dot{e} - \chi^{-1}\dot{\chi}e) \\ \dot{\omega}_j &= \frac{\dot{\chi}_j e - \dot{\chi}_j e}{\chi_j^2(t)}, j = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \dot{\Lambda}_I &= \text{diag}([\dot{\chi}_1(t)(1-\omega_1^2) - 2\chi_1(t)\omega_1\dot{\omega}_1, \\ &\quad \dot{\chi}_2(t)(1-\omega_2^2) - 2\chi_2(t)\omega_2\dot{\omega}_2, \\ &\quad \dot{\chi}_3(t)(1-\omega_3^2) - 2\chi_3(t)\omega_3\dot{\omega}_3]) \end{aligned}$$

قانون کنترل واقعی τ_c رو به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\tau_c = D_0 v + M_0 (\dot{\tau}_v - c_2 Z_2 - k_2 Z_2 \|Z_2\|^{\frac{p-2}{q}} - \bar{k}_2 Z_2 \|Z_2\|^{\frac{p-2}{q}} - R^T(\psi)\Lambda^T Z_1) \quad (28)$$



شکل ۴- تصویر تابع عملکرد از پیش تعیین شده و $e(t)$

۳- طراحی کنترل کننده

در این قسمت یک کنترل کننده مبتنی بر مد لغزشی ترمینال با تابع عملکرد از پیش تعیین شده طراحی می‌کنیم که قادر است موقعیت کشتی را در حضور خطای محرک در زمانی محدود مستقل از شرایط اولیه و با تضمین عملکرد خطای ردیابی کنترل نماید. خطای ردیابی را به صورت تعریف می‌کنیم:

$$e = \eta - \eta_d \quad (16)$$

که η_d شامل موقعیت x ، y و زاویه سمت ψ مطلوب است.

فرض ۱: مسیر مطلوب η_d یک سیگنال نرم و مشتق پذیر از هر مرتبه‌ای است.

برای تضمین عملکرد و مشخصات حالت گذرای خطای ردیابی، مشابه معادله (۹) یک تبدیل به فرم زیر تعریف می‌کنیم:

$$Z_1 = [T^{-1}(\omega_1), T^{-1}(\omega_2), T^{-1}(\omega_3)]^T \quad (17)$$

که

$$T^{-1}(\omega_j) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+\omega_j}{1-\omega_j} \right) \quad (18)$$

و

$$\omega_j = \frac{e_j}{\chi_j}, j = 1, 2, 3 \quad (19)$$

e_j ، زامین عنصر بردار e و χ_j یک PPF متغیر با زمان است که طبق معادله (۱۴) تعریف می‌گردد. اگر $Z_1(j)$ (زامین عنصر Z_1 است) محدود باشد، آنگاه $-\chi_j < e_j < \chi_j$ و این یعنی خطای ردیابی را می‌توان همواره در یک بازه از پیش تعیین شده محدود کرد.

برای طراحی کنترل کننده از روش پسگام استفاده خواهیم کرد. بنا به روال همیشگی روش پسگام، یک متغیر خطای مجازی تعریف می‌کنیم که شامل قانون کنترل مجازی τ_v است.

$$Z_2 = v - \tau_v \quad (20)$$

باتوجه به اینکه مرتبه مشتق معادلات دیفرانسیل سیستم، ۲ است؛ بنابراین روش پسگام شامل ۲ مرحله خواهد بود. مراحل به صورت زیر هستند.

مرحله ۱: مشتق Z_1 را محاسبه می‌کنیم.

$$\dot{Z}_1 = \begin{bmatrix} \dot{e}_1 - \chi_1^{-1}\dot{\chi}_1 e_1 & \dot{e}_2 - \chi_2^{-1}\dot{\chi}_2 e_2 & \dot{e}_3 - \chi_3^{-1}\dot{\chi}_3 e_3 \\ \chi_1(1-\omega_1^2) & \chi_2(1-\omega_2^2) & \chi_3(1-\omega_3^2) \end{bmatrix} \quad (21)$$

^۱ Virtual Control

برآورده شدن مشخصات حالت گذرا و دائمی به صورت زیر تعریف می شود [۴۹].

$$Z_1 = [T^{-1}(\omega_1), T^{-1}(\omega_2), T^{-1}(\omega_3)]^T$$

$$T^{-1}(\omega_j) = \tanh^{-1}(\omega_j) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \omega_j}{1 - \omega_j} \right), \quad (33)$$

$$\omega_j = \frac{e_j}{\chi_j}, j = 1, 2, 3$$

e_j : زامین عنصر بردار e است.

در این شبیه سازی پارامترهای مربوط به PPF به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\chi_j(t) = (\chi_{0j} - \chi_{\infty j}) \exp(-\ell_j t) + \chi_{\infty j}, j = 1, 2, 3$$

$$\begin{cases} \chi_{01} = \chi_{02} = 30, \chi_{03} = 180(\pi/180) \\ \chi_{\infty j} = 0.1 \\ \ell_j = 0.001 \end{cases} \quad (34)$$

خطای مجازی نیز به صورت زیر تعریف می گردد:

$$Z_2 = v - \tau_v \quad (35)$$

همان طور که قبلاً گفته شد، قانون کنترل مجازی با قابلیت پایداری زمان - ثابت نیز به صورت زیر است.

$$\tau_v = R^{-1}(\psi) \left(\eta_d + \chi^{-1} \dot{\chi} e - \Lambda^{-1} \left(c_1 Z_1 + k_1 Z_1 \|Z_1\|^{2\frac{p}{q}-2} + \bar{k}_1 Z_1 \|Z_1\|^{2\frac{p}{q}-2} \right) \right) \quad (36)$$

که $\dot{\chi}_j(t) = -\ell_j(\chi_{0j} - \chi_{\infty j}) \exp(-\ell_j t) + \chi_{\infty j}, j = 1, 2, 3$

$$\Lambda_j = \frac{1}{\chi_j(1-\omega_j^2)}, j = 1, 2, 3$$

$\Lambda = \text{diag}(\{\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3\})$ ضرایب و پارامترهای قانون کنترل مجازی نیز به صورت زیر در نظر گرفته شده اند:

$$\begin{aligned} c_1 &= \text{diag}(\{0.01, 0.01, 0.01\}), \\ k_1 &= \text{diag}(\{0.1, 0.1, 0.1\}) \\ \bar{k}_1 &= \text{diag}(\{0.1, 0.1, 0.1\}), \\ p &= 31, q = 33, \bar{p} = 17, \bar{q} = 3; \end{aligned} \quad (37)$$

قانون کنترل اصلی با قابلیت پایداری زمان ثابت به صورت زیر تعریف شده است:

$$\tau_c = Dv + M \left(\dot{\tau}_v - c_2 Z_2 - k_2 Z_2 \|Z_2\|^{2\frac{p}{q}-2} - \bar{k}_2 Z_2 \|Z_2\|^{2\frac{p}{q}-2} - R^T(\psi) \Lambda^T Z_1 \right) \quad (38)$$

که

$$\begin{aligned} c_2 &= \text{diag}(\{100, 100, 150\}), \\ k_2 &= \text{diag}(\{0.1, 0.1, 0.1\}), \bar{k}_2 = \text{diag}(\{0.1, 0.1, 0.1\}), \end{aligned} \quad (39)$$

جهت نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، شبیه سازی را در حالت بدون حضور عدم قطعیت پارامتری انجام می دهیم. در این حالت کنترل کننده را به مدل کشتی اعمال می کنیم. موقعیت و زاویه سمت کشتی و مقادیر مطلوب آن ها در شکل ۶ آورده شده است و همان گونه که مشخص است کنترل کننده عملکرد ردیابی بسیار مطلوبی دارد. در این شکل مقادیر مطلوب برای مختصات کشتی و همچنین زاویه سمت کشتی نمایش داده شده است. همان طور که از این اشکال مشخص است، کنترل کننده طراحی شده توانسته است شناور را در مدت زمان ۴۰ ثانیه به مقادیر مطلوب رسانیده و در این نقطه حفظ کند. کنترل کننده طراحی شده توانسته است وظیفه کنترل کشتی را به خوبی و بدون هیچ فراجهدی انجام داده و به خوبی شناور مورد نظر را کنترل کند.

$c_2 > 0.5$ ، k_2 و \bar{k}_2 ثابت های مثبت طراحی هستند.

با جایگذاری (۲۸) در (۲۶) داریم:

$$\dot{Z}_2 = -c_2 Z_2 - k_2 Z_2 \|Z_2\|^{2\frac{p}{q}-2} - \bar{k}_2 Z_2 \|Z_2\|^{2\frac{p}{q}-2} - R^T(\psi) \Lambda^T Z_1 \quad (29)$$

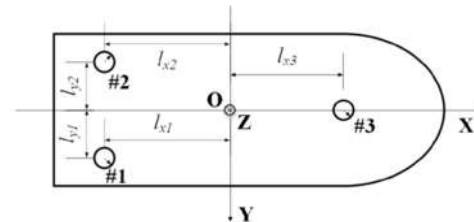
۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش، کنترل کننده پیشنهادی بر روی یک کشتی DP در محیط نرم افزار MATLAB شبیه سازی می شود و نتایج شبیه سازی مورد بحث و تحلیل قرار خواهد گرفت.

همان طور که قبلاً بیان شد مدل ریاضی غیرخطی حرکت یک کشتی در حالت DP در معادلات (۱) و (۲) آورده شده است.

رابطه تخصیص رانش و گشتاورها در رابطه (۴) بیان شده است.

کشتی مدل که در این شبیه سازی به کار گرفته شده است (شناور WHUT-i) دارای سه رانشگر آزیموت است که یکی از آن ها در جلو (رانشگر شماره ۳) و دوتا از آن ها در عقب (رانشگرهای شماره ۱ و ۲) جایابی شده است که در شکل ۵ موقعیت آن ها نشان داده شده است [۴۶].



شکل ۵- پیکربندی رانشگر کشتی WHUT-i

پارامترهای مربوط به موقعیت قرارگیری رانشگرها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- پارامترهای پیکربندی رانشگر

$l_{x1} (m)$	-۰/۶۹۰	$l_{y1} (m)$	۰/۱۸۵
$l_{x2} (m)$	-۰/۷۰۰	$l_{y2} (m)$	-۰/۱۸۰
$l_{x3} (m)$	۰/۸۹۰	$l_{y3} (m)$	۰
$l_{x1} (m)$	-۰/۶۹۰	$l_{y1} (m)$	۰/۱۸۵

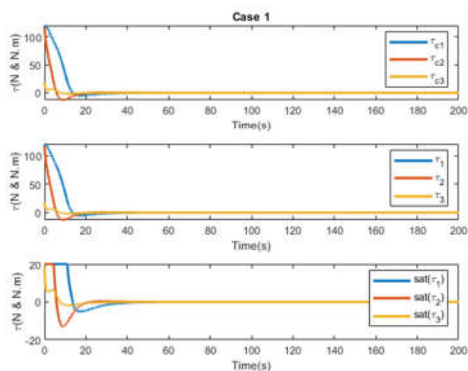
جدول ۳- ابعاد اصلی کشتی WHUT-I

جرم (کیلوگرم)	۱۶۵	طول (متر)	۲/۳
ارتفاع (متر)	۰/۶۵	پهنا (متر)	۰/۷۵۰

در شبیه سازی مسیر مطلوب و شرایط اولیه به ترتیب به صورت $\eta(0) = [0^m, 0^m, 0^\circ]^T$ و $\eta_d = [10^m, 10^m, 60^\circ]^T$ در نظر گرفته شده است. خطای ردیابی برابرست با:

$$e = \eta - \eta_d \quad (32)$$

یک تبدیل از خطای ردیابی جهت تضمین باقی ماندن خطای ردیابی در یک محدوده از پیش تعیین شده برای تمام زمان ها و



شکل ۸- گشتاورهای تولیدی توسط کنترل‌کننده و رانشگر و گشتاورهای اشباع شده اعمالی به کشتی و در نهایت، مقایسه روش پیشنهادی با مراجع مختلف در جدول ۴ نشان می‌دهد که زمان نشست برای کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال پیشنهاد شده به مقدار قابل توجهی نسبت به مراجع و کارهای مشابه کاهش یابد.

جدول ۴- مقایسه زمان نشست روش پیشنهادی با کارهای مشابه.

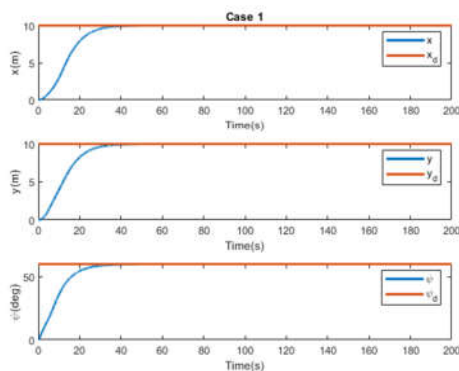
زمان نشست (ثانیه)	روش کنترلی	مراجع
۱۱۰	روش غیرخطی تطبیقی - مقاوم	[۷]
۵۵	روش فازی - تطبیقی	[۱۱]
۸۰	روش مد لغزشی فازی - تطبیقی	[۱۵]
۱۶۰	روش تطبیقی بر پایه سیستم فازی - عصبی	[۱۸]
۶۰	روش مد لغزشی بر پایه شبکه عصبی	[۴۰]
۹۰	روش فیدبک بر پایه هوش مصنوعی	[۴۶]
۴۰	روش مد لغزشی ترمینال با تابع از پیش تعیین شده	روش پیشنهادی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال برای افزایش دقت و سرعت عملکرد کنترل‌کننده طراحی گردید. در این کنترل‌کننده همگرایی زمان - محدود خطای ردیابی بدون وابستگی به شرایط اولیه تضمین شد. همچنین از یک تابع عملکرد از پیش تعیین شده جهت تضمین عملکرد حالت گذرای سیستم استفاده شد. شبیه‌سازی روش پیشنهادی بر روی مدل یک کشتی DP بدون حضور عدم قطعیت‌های پارامتری مدل انجام شد و نتایج شبیه‌سازی عملکرد مطلوب کنترل‌کننده پیشنهادی را نشان داد و موقعیت کشتی در محدوده تعیین شده قرار گرفت.

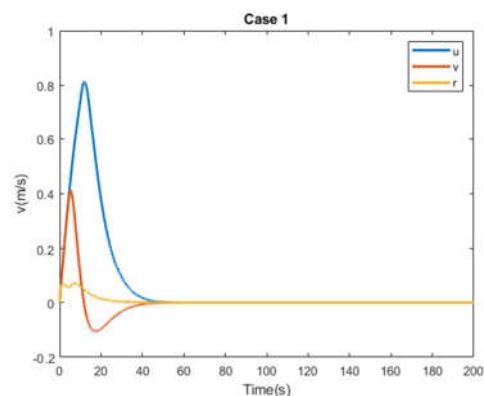
۶- مراجع

- [1] Balchen J. G., Jenssen N. A., Mathisen E., Sælid S., A dynamic positioning system based on Kalman filtering and optimal control. Modeling, Identification and Control, Vol. 1, No.3, pp. 135-163, 1980.
- [2] Fung P., Grimble M., Dynamic Ship Positioning Using Self-Tuning Kalman Filter. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 28, No.3, pp. 339-349, 1983.
- [3] Sælid S., Jenssen, N., Balchen J., Design and analysis of a dynamic positioning system based on Kalman filtering and



شکل ۶- موقعیت و زاویه سمت اندازه‌گیری شده و مقدار مطلوب آن‌ها

در شکل ۷، نمودارهای سرعت کشتی آورده شده است. سرعت کشتی در جهات x و y به ترتیب از ۰/۸۱ و ۰/۴۱ فراتر نرفته است که نشان می‌دهد مقادیر معقولی برای این سرعت‌ها به دست آمده است و در عمل نیز دستیابی به این سرعت‌ها امکان‌پذیر است. همچنین سرعت زاویه‌ای کشتی نیز به مقدار حداکثر ۰/۰۸ رسیده است که سرعت زاویه‌ای قابل قبولی برای شناور محسوب می‌شود.



شکل ۷- سرعت‌های کشتی

در شکل ۸ گشتاورهای تولید شده توسط کنترل‌کننده τ_c گشتاورهای تولید شده توسط رانشگرها τ و گشتاورهای اشباع شده اعمالی به کشتی $sat(\tau)$ نشان داده شده‌اند. از آنجا که در این مورد خطا در نظر گرفته نشده است نمودارهای τ_c و τ یکی هستند. همانطور که مشاهده می‌شود، رانشگرهای استفاده شده توانسته‌اند در مدت زمان ۳۰ ثانیه شناور را به نقطه مطلوب برسانند، و فروجهش بسیار کمی در این مسیر رخ داده است. در نهایت نیز محدودیت موتورهای استفاده شده اعمال شده‌اند. همانطور که در شکل سوم نمایش داده شده است، در مقدار ۲۰ نیوتون متر به اشباع رسیده‌اند. این مساله باعث شده است که زمان نشست از ۳۰ ثانیه به ۴۰ ثانیه افزایش پیدا کند و فروجهش بیشتری در پاسخ‌ها مشاهده می‌شود. اما بازم کنترل‌کننده طراحی شده توانسته است در مدت زمان ۴۰ ثانیه به خوبی سیستم را کنترل کرده و به مقدار مطلوب برساند.

- [27] Veksler A., Johansen T. A., Borrelli F., Realfsen B., Dynamic positioning with model predictive control. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, No.4, pp. 1340–1353, 2016.
- [28] Zheng H., Negenborn R. R., Lodewijks G., Trajectory tracking of autonomous vessels using model predictive control. *IFAC Proc.*, Vol. 47, pp. 8812–8818, 2014.
- [29] Yan Z., Wang J., Model predictive control for tracking of under actuated vessels based on recurrent neural networks. *IEEE J. Ocean. Eng.*, Vol. 37, pp. 717–726, 2012.
- [30] Chen H., Wan L., Wang F., Zhang G., Model predictive controller design for the dynamic positioning system of a semi-submersible platform. *J. Mar. Sci. Appl.*, Vol. 11, pp. 361–367, 2012.
- [31] Zheng H., Wu J., Wu W., Zhang Y., Robust dynamic positioning of autonomous surface vessels with tube-based model predictive control. *Ocean Eng.*, 199, p. 106820, 2020.
- [32] Yan Z., Wang J., Model predictive control for tracking of under actuated vessels based on recurrent neural networks. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 37, pp. 717–726, 2012.
- [33] Chen H., Wan L., Wang F., Zhang G., Model predictive controller design for the dynamic positioning system of a semi-submersible platform. *J. Mar. Sci. Appl.*, 11, pp. 361–367, 2012.
- [34] Stephens R. I., Burnham K. J., Reeve P. J., A practical approach to the design of fuzzy controllers with application to dynamic ship positioning. *IFAC Proc.*, Vol. 28, pp. 370–377, 1995.
- [35] Amjad M., Ishaque K., Abdullah S. S., Salam Z., An alternative approach to design a Fuzzy Logic Controller for an autonomous underwater vehicle. In *Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, Singapore, pp. 195–200, 2010.
- [36] Liang K., Lin X., Chen Y., Li J., Ding F., Adaptive sliding mode output feedback control for dynamic positioning ships with input saturation. *Ocean Eng.*, 206, p. 107245, 2020.
- [37] Tannuri E. A., Agostinho A. C., Morishita, H.M., Moratelli L., Jr. Dynamic positioning systems: An experimental analysis of sliding mode control. *Control Eng. Pract.*, 18, pp. 1121–1132, 2010.
- [38] Wang R., Chen Z., Zhang W., Zhu Q., Sliding-Mode Control of STENA DRILLMAX Drillship with Environmental Disturbances for Dynamic Positioning. In *Proceedings of the 11th International Conference on Modelling, Identification, and Control (ICMIC2019)*, Tianjin, China, 2019.
- [39] Zhang G., Zhang H., Huang X., Wang J., Yu H., Graaf R., Active fault-tolerant control for electric vehicles with independently driven rear inwheel motors against certain actuator faults, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 24, No.5, pp. 1557–1572, 2016.
- [40] Shen Z.; Bi Y., Wang Y., Guo C., MLP neural network-based recursive sliding mode dynamic surface control for trajectory tracking of fully actuated surface vessel subject to unknown dynamics and input saturation. *Neurocomputing*, 377, pp. 103–112, 2020.
- [41] Rodriguez J., Castañeda H., Gonzalez-Garcia A., Gordillo J. L. Finite-time control for an Unmanned Surface Vehicle based on adaptive sliding mode strategy. *Ocean Engineering* 254, p. 111255, 2022.
- [42] Wang Y., Hao L. Y., Li T., Chen C. P. Integral Sliding Mode-Based Fault-Tolerant Control for Dynamic Positioning of Unmanned Marine Vehicles Based on a TS Fuzzy Model." *Journal of Marine Science and Engineering*, No.2 .p. 370, 2023.
- [43] Li J., Xiang X., Yang S. Robust adaptive neural network control for dynamic positioning of marine vessels with prescribed performance under model uncertainties and input saturation, *Neurocomputing* 484, pp. 1-12, 2022.
- [44] Fu M., Zhang G., Xu Y., Non-switching reference trajectory based discrete-time sliding mode path following control for dynamic positioning ship with time-varying disturbances. *Ocean Engineering* 264, p. 112385, 2022.
- [45] Witkowska A., Śmierczalski R., Adaptive dynamic control allocation for dynamic positioning of marine vessel based on backstepping method and sequential quadratic programming. *Ocean Eng.* 163, pp. 570–582, 2018.
- [46] Yu W., Xu H., Han X., Chen Y., Zhu M., Fault-tolerant control for dynamic positioning vessel with thruster faults based optimal control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 28, No.3, pp 331-339, 1983.
- [4] Fossen T. I., A survey on nonlinear ship control: From theory to practice. *IFAC Proc.*, Vol. 33, No.21, pp. 1–16, 2000.
- [5] Fossen T. I., Grovlen A., Nonlinear output feedback control of dynamically positioned ships using vectorial observer backstepping. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, No.6, pp. 121–128, 1998.
- [6] Loria A., Fossen T. I., Panteley E., A separation principle for dynamic positioning of ships: Theoretical and experimental results. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, No.8, pp. 332–343, 2000.
- [7] Hu X., Du J., Li J., Sun Y., Asymptotic regulation of dynamically positioned vessels with unknown dynamics and external disturbances. *J. Navig.*, No.73, 253–266, 2020.
- [8] Fossen T. I., Paulsen M. J. Adaptive feedback linearization applied to steering of ships. In *Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications*. Dayton, OH, USA, pp. 1088–1093, 1993.
- [9] Candeloro M., Sørensen A. J., Longhi S., Dukan F., Observers for dynamic positioning of ROVs with experimental results. *IFAC*, No.45, pp. 85–90, 2012.
- [10] Yamamoto M., Morooka, C.K. Dynamic positioning system of the semi-submersible platform using fuzzy control. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2005, 27, 449–455.
- [11] Hu X., Du J., Shi J., Adaptive fuzzy controller design for dynamic positioning system of vessels. *Appl. Ocean Res.*, No.53, pp. 46–53, 2015.
- [12] Tao W., Shaocheng T., Adaptive fuzzy robust control for nonlinear system with dynamic uncertainties based on backstepping. In *Proceedings of the International Conference on Innovative Computing Information and Control*, Dalian, Liaoning, China, pp. 18–20, 2008.
- [13] Stephens R. I., Burnham K. J., Reeve P. J., A practical approach to the design of fuzzy controllers with application to dynamic ship positioning. *IFAC Proc.*, Vol. No 28, pp. 370–377, 1995.
- [14] He H., Xu S., Wang L., Li B., Mitigating surge-pitch coupled motion by a novel adaptive fuzzy damping controller for a semisubmersible platform. *J. Mar. Sci. Technol.*, No.25, pp. 234–248, 2020.
- [15] Wang Y., Zhang X., Fu Y., Ding F., Fu M., Wang C., Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller for Dynamic Positioning of FPSO Vessels. In *Proceedings of the OCEANS 2019-Marseille*, Marseille, France, pp. 1–7, 2019.
- [16] Fang M. C., Lee Z. Y., Application of neuro-fuzzy algorithm to a portable dynamic positioning control system for ships. *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, No.8, pp. 38–52, 2016.
- [17] Jang J. S., Sun C. T., Neuro-fuzzy modeling and control. *Proc. IEEE*, No.83, pp. 378–406, 1995.
- [18] Zhang D., Ashraf M. A., Liu Z., Peng W. X., Golkar M. J., Mosavi A., Dynamic modeling and adaptive controlling in GPS-intelligent buoy (GIB) systems based on neural-fuzzy networks. *Ad Hoc Netw.*, No.103, p. 102149, 2020.
- [19] Du J., Yang Y., Wang D., Guo C., A robust adaptive neural networks controller for maritime dynamic positioning system. *Neurocomputing*, No.110, pp. 128–136, 2013.
- [20] Sørensen A. J., A survey of dynamic positioning control systems. *Annu. Rev. Control*, No.35, pp. 123–136, 2011.
- [21] Nguyen T. D., Sørensen A. J., Quek S. T., Design of hybrid controller for dynamic positioning from calm to extreme sea conditions. *Automatica*, No.43, pp. 768–785, 2007.
- [22] Fossen T. I., *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. IEEE Control Syst., No.36, pp. 78–79, 2016.
- [23] Ambrosovskaya M. E., Design and control session approach for advanced testing of DP control system. In *Proceedings of the MTS DP Conference*, Houston, TX, USA, 2014.
- [24] Donnarumma S., Figari M., Martelli M., Vignolo S., Viviani M., Design and validation of dynamic positioning for marine systems: A case study. *IEEE J. Ocean. Eng.*, No.43, pp. 677–688, 2018.
- [25] Maritime K., Benelux B. V., Dynamic Positioning System, Dual Redundant-K-Pos DP-21/22-Kongsberg Maritime. Available online, 2018.
- [26] Sotnikova M.V., Veremey E. I., Dynamic positioning based on nonlinear MPC. *IFAC Proc.*, Vol. 46, No.33, pp. 37–42, 2013.

on the neural modified extended state observer. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, pp. 5905-17, 2019.

[47] Gao M., Ding L., Jin X., ELM-Based Adaptive Faster Fixed-Time Control of Robotic Manipulator Systems. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021.

[48] Cao X., Shi P., Li Z., Liu M., Neural-network-based adaptive backstepping control with application to spacecraft attitude regulation. IEEE transactions on neural networks and learning systems, Vol. 29, No.9, pp. 4303-13, 2017.

[49] Shi W., Luo R., Li B., Adaptive fuzzy prescribed performance control for MIMO nonlinear systems with unknown control direction and unknown dead-zone inputs. ISA transactions, Vol.66, pp. 86-95, 2017.