



طراحی کنترل کننده‌ی پیش‌بین مقید برای شناور زیرسطحی هوشمند و بهینه‌سازی زمان محاسبات در حضور اغتشاشات

ایوب خداپرست¹، علی جبار رشیدی^{2*}، بهرام کریمی²

1- دانشجوی دکتری، مهندسی برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

2- دانشیار، مهندسی برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

* تهران، صندوق پستی 1587517740، rashidi@mut-es.ac.ir

چکیده

در این مقاله کنترل کننده‌ی پیش‌بین مقید با استفاده از توابع لاگر برای کنترل سمت و عمق یک شناور زیرسطحی هوشمند در حضور اغتشاشات طراحی شده است. شناور زیرسطحی هوشمند به دلیل دینامیک غیرخطی کوبل شده، نامعینی‌های پارامتری و اغتشاشات خارجی ناشی از محیط زیر آب دارای پیچیدگی زیادی است. علاوه بر این شناور زیرسطحی در نظر گرفته شده در این مقاله، دارای قیود موجود بر روی عملگرها می‌باشد که این محدودیت‌ها بر پیچیدگی کنترل آن افزوده است. در این تحقیق ابتدا دینامیک غیرخطی شناور زیرسطحی هوشمند مدل‌سازی می‌شود و در ادامه طراحی کنترل کننده‌ی پیش‌بین مقید انجام می‌شود. در طراحی کنترل کننده‌ی پیش‌بین مقید از توابع متعامد لاگر به منظور بهینه‌سازی و کاهش بار محاسباتی در بازه زمانی استفاده شده است. از مزایای کنترل کننده‌ی طراحی شده می‌توان به برخط و بهینه بودن، دقت بالا، قابلیت پیاده‌سازی، برخورد هدف‌مند با قیود و همچنین دارا بودن خواص مقاوم در برابر اغتشاشات اشاره کرد. به منظور نشان دادن کارایی روش، کنترل کننده‌ی پیشنهادی بر روی شناور زیرسطحی مورد نظر شبیه‌سازی شده و مقایسه‌ای بین زمان محاسبات کنترل کننده با استفاده از توابع لاگر و بدون استفاده از آن صورت گرفته است. نتایج شبیه‌سازی، کارایی و موثر بودن کنترل کننده ارائه شده را به خوبی نشان می‌دهد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 بهمن 1396

پذیرش: 26 فروردین 1397

ارائه در سایت: 21 اردیبهشت 1397

کلید واژگان:

شناور زیرسطحی هوشمند

کنترل کننده پیش‌بین

کاهش زمان محاسبات

توابع لاگر

Design of Constrained Predictive Controller for Autonomous Underwater Vehicle and Optimization of Computation Time in the Presence of Disturbances

Ayoub Khodaparast, Ali Jabar Rashidi*, Bahram Karimi

Department of Electrical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

* P.O.B. 1587517740, Tehran, Iran, rashidi@mut-es.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 15 February 2018

Accepted 15 April 2018

Available Online 11 May 2018

Keywords:

Autonomous Underwater Vehicle

Predictive Controller

Reduce Computational Time

Laguerre Functions

ABSTRACT

In this paper, a constrained predictive controller is designed using Laguerre functions to control the depth and steering of an autonomous underwater vehicle considering underwater disturbances. Due to under-actuated nonlinear coupled dynamics, parameters uncertainty, external underwater disturbances autonomous underwater vehicles are complicated. Moreover, the underwater autonomous vehicle investigated in this study includes constraints on actuators leading a more complex problem. In this study, first, the nonlinear dynamics of the autonomous underwater vehicle utilized for the controller design has been modeled. Then, Laguerre orthogonal functions were used in the constrained predictive controller design for reducing computational time and accelerating optimization process. Optimized, online, high precision, implementation capability, consider constraints purposefully and robust properties against disturbances can be mentioned as the most important advantages of designed controller. In addition, predictive control method is robust against disturbances. To monitor the methods' performance, the autonomous underwater vehicle was modeled and then a comparison between the controller's calculation time with and without the Laguerre functions was also represented. At the end, the simulation results obtained from this controller, using Laguerre functions, showed the efficiency and effectiveness of the proposed solution.

مناطق راهبردی به حساب می‌آید و برتری نظامی و سیاسی با کشوری است که به این مناطق تسلط بیشتری داشته باشد. یکی از کارآمدترین وسایل زیرآبی برای شناسایی و کنترل این مناطق، شناور زیرسطحی هوشمند¹ است. این وسیله‌ی بدون سرنشین با قدرت مانور، سرعت و عمق نفوذ خود می‌تواند

1- مقدمه

در سال‌های اخیر توجه و استفاده از شناورهای زیرسطحی در کاربردهای دفاعی- امنیتی و غیردفاعی و به تبع آن انجام تحقیقات جهت دستیابی به دانش و فناوری و سامانه‌های مرتبط با آن رشد چشم‌گیری در کشورهای پیشرفته دنیا داشته است. در شبکه‌ی قدرت ژئوپلیتیک، زیر آب یکی از

¹ Autonomous Underwater Vehicle

در [8] یک کنترل کننده مقاوم برای شناور زیرسطحی هوشمند پیشنهاد شده که مشکل تزویج میان صفحه‌ای افقی و قائم را برطرف کرده است. در این مرجع یک کنترل کننده‌ی مقاوم $5H_{\infty}$ برای کنترل عمق و سمت پیشنهاد شده است. کنترل کننده مذکور تطبیقی نبوده ولی اهمیت آن در جداسازی اثر غلتش شناور در دینامیک عمق و سمت شناور برحسب سرعت کل شناور در نظر گرفته شده است. یکی از مشکلات این روش کنترلی که حل آن را مشکل می‌کند، به حداقل رساندن ماتریس نامساوی خطی⁵ است [9]. از دیگر معایب کنترل مقاوم طراحی شده می‌توان به پردازش محاسباتی زیاد و بالا رفتن درجه کنترل کننده اشاره کرد [10]. در [11] کنترل مدل پیش‌بین برای یک گلايدر زیرسطحی هوشمند⁶ برای جبران اثرات ناشی از اغتشاشات اقیانوسی طراحی و شبیه‌سازی شده است. همچنین برای افزایش عملکرد سیستم کنترلی و مقرون به صرفه‌تر بودن گلايدر زیرسطحی هوشمند از نظر انرژی و زمان، یک تکنیک تعلیق زمان همراه با کنترل مدل پیش‌بین برای تضمین این که گلايدر یک مسیر معین را به جای مسیر وابسته به زمان دنبال کند، طراحی شده است. در [12] یک کنترل کننده شبکه عصبی-تطبیقی برای حرکت شیرجه‌زنی⁷ شناور زیرسطحی هوشمند کم‌عملگر در حضور نامعینی طراحی شده است. شبکه‌های عصبی به صورت طبیعی حداقل شامل یک لایه مخفی با تابع فعال‌سازی غیرخطی می‌باشند که این ویژگی، آن‌ها را قادر به حل مسائل کنترل غیرخطی می‌نماید [13]. در این روش برای حرکت در صفحه قائم سه متغیر حالت جدید بر مبنای خطای عمق، خطای میزان چرخش و خطای سرعت چرخش تعریف شده است و طراحی کنترل کننده با در نظر گرفتن اغتشاشات انجام گرفته است. در مقاله مذکور محدودیت‌هایی که معمولاً بر روی عملگرها و زاویه پیچش در نظر گرفته می‌شود، لحاظ نشده است. تأخیر زمانی و حجم زیاد پردازش در آموزش داده‌های شبکه عصبی و عدم قابلیت پیاده‌سازی عملی از معایب روش پیشنهادی است. در [14] کنترل مدل پیش‌بین برای کاهش خطای موقعیت یک ربات زیرسطحی کنترل از راه دور⁸ با دینامیک ساده‌شده خطی و تحت موج‌ها و اغتشاشات در آب کم عمق طراحی شده است. در این مقاله از تخمین‌زن حالت مدل پیش‌بین به منظور حل تئوری موج خطی⁹ برای تقریب و جبران دینامیک سیال تحت موج‌های زیرآبی استفاده شده است. همچنین مقایسه‌ای بین خطای موقعیت کنترل مدل پیش‌بین با وجود نویز گوسین¹⁰ و در غیاب آن با کنترل پس‌خور¹¹ PD انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد خطای میانگین مربعات¹² در حالت کنترل پس‌خور بسیار بیشتر از کنترل مدل پیش‌بین بدون در نظر گرفتن نویز گوسین و یا با وجود نویز گوسین است. همچنین کارایی و بهینه بودن روش کنترل پیش‌بین در کمینه کردن تابع هزینه نیز بررسی شده است. از چالش‌های تحقیق مذکور می‌توان به زمان محاسباتی زیاد و عدم بلادرنگ بودن کنترل کننده‌ی پیشنهادی اشاره کرد. در [15] یک مدل غیرخطی برای شناور زیرسطحی هوشمند ارائه شده است. در این مرجع به منظور بهبود توصیف عملکرد دینامیکی این شناور، مدل به صورت دو زیرسیستم طولی و عرضی با در نظر گرفتن نیروها و گشتاورهای وارد بر سیستم استخراج شده است. مدل پیشنهادی تعمیم مدل خطی این شناورها در مانورهای عمق و سمت می‌باشد

در قلمرو وسیعی از زیردریا به انجام مأموریت بپردازد. دینامیک غیرخطی و کوپل شده و کم‌عملگر¹، نامعینی‌های ساختاری و غیرساختاری و وابسته بودن پارامترهای مدل به سرعت شناور از یک طرف و وجود اغتشاشات خارجی نظیر جریان‌های زیرآبی و محدودیت‌های زیادی مانند قیود روی سیگنال ورودی عملگرها و نرخ تغییرات آن از طرف دیگر، چالش‌هایی را برای کنترل این وسایل زیرآبی ایجاد کرده است. لذا کنترل این سیستم‌ها به طور ویژه‌ای مورد توجه قرار می‌گیرد [4-1].

امروزه روش‌های مختلفی برای کنترل شناورهای زیرسطحی هوشمند پیشنهاد شده است. از این میان کنترل کننده‌ی پیش‌بین به دلیل برخط² و بهینه بودن، دقت بالا، قابلیت پیاده‌سازی، برخورد هدفمند با قیود و همچنین دارا بودن خواص مقاوم نسبت به بسیاری از روش‌های کنترلی دیگر برتری داشته و می‌تواند به سادگی در سامانه‌های هوشمند پیاده‌سازی و مورد استفاده قرار گیرد. کنترل کننده‌ی پیش‌بین یا کنترل مدل پیش‌بین به دسته‌ای از الگوریتم‌های کنترلی اطلاق می‌شود که از مدل سیستم به صورت مستقیم برای پیش‌بینی پاسخ آینده‌ی آن استفاده می‌کند. در این روش کنترلی برای تعیین بهترین عمل کنترلی از روش بهینه‌سازی تابع هزینه استفاده می‌شود. الگوریتم کنترل کننده‌ی پیش‌بین در هر بازه زمانی سعی بر آن دارد که با محاسبه‌ی یک دنباله از متغیرهای کنترلی رفتار آینده‌ی سیستم را بهینه‌سازی نماید. برای کنترل شناورهای زیرسطحی هوشمند در یک صفحه افقی یا عمودی می‌توان معادلات حرکت شش درجه آزادی را به چند معادله دو درجه آزادی تبدیل کرد. روش کنترل دکوپله³ به صورت عمده در طراحی سیستم‌های کنترل شناورهای زیرسطحی هوشمند به منظور شکستن معادلات شش درجه آزادی حرکت به سه زیرسیستم مجزا و بدون درهم‌کنش، به کار برده می‌شود. این سه زیرسیستم که اصطلاحاً به آن کانال هم اطلاق می‌شود، برای کنترل سرعت، سمت و عمق استفاده می‌شود. در زمینه استخراج مدل دینامیکی شناورهای زیرسطحی هوشمند و طراحی کنترل کننده برای آن، کارهای زیادی انجام شده است. در [5] ابتدا به مدل‌سازی دینامیک غیرخطی یک نمونه از شناور زیرسطحی هوشمند پرداخته شده و سپس کنترل کننده‌ی فازی مقاوم برای آن در حضور اغتشاشات و جریان‌های زیرآبی طراحی شده است. در این طراحی جریان‌های زیرآبی ناشناخته توسط فیلتر کالمن توسعه یافته⁴ تخمین زده شده است. از مشکلات این کار می‌توان به حجم محاسباتی زیاد روش ارائه شده، اشاره کرد. در [6] کنترل کننده مدل پیش‌بین ساده برای کنترل یک شناور زیرسطحی خاص پیاده‌سازی شده است. در این کار مقایسه‌ای بین دو روش PID و مدل پیش‌بین انجام شده و مزایای روش کنترل مدل پیش‌بین از جمله دقت کنترلی بالا، بهینه بودن سیگنال کنترلی و مقاوم بودن در برابر خطا و اختلال نسبت به روش PID اثبات شده است. اما یکی از مشکلات این روش در پیاده‌سازی عملی به بار محاسباتی زیاد و بلادرنگ نبودن آن اشاره شده است. در [7] به منظور تعقیب مسیر مطلوب یک شناور زیرسطحی هوشمند از روش کنترل مدل پیش‌بین استفاده شده است. در ابتدا به این نکته اشاره شده که روش کنترل مدل پیش‌بین برخلاف روش‌های PID و LQR، برخط بوده و نیازی به تنظیمات دستی نداشته و متناسب با شرایط تنظیم می‌شود، سپس به کمینه بودن توابع هزینه و بهیگی روش پرداخته شده است. از جمله معایب این کار می‌توان به حجم عملیاتی بالا و کندی روش اشاره کرد.

⁵ H-Infinity⁶ Linear Matrix Inequality (LMI)⁷ Autonomous Underwater Glider⁸ Diving⁹ Remotely Operated Vehicles¹⁰ Linear Wave Theory¹¹ Gaussian noise¹² Feedforward control¹³ Root Mean Square¹ Underactuated² On-Line³ Decoupled⁴ Extended Kalman Filter

در ادامه چیدمان بخش‌های مختلف مقاله به شرح زیر تنظیم شده است: در بخش دوم مدل‌سازی شناور زیرسطحی هوشمند و معادلات دکوپله شده آن در صفحات افقی و قائم معرفی خواهد شد. در بخش سوم به الگوریتم کنترل پیش‌بین مقید و فرمول‌بندی آن و همچنین توابع لاگر پرداخته خواهد شد. نتایج حاصل از اعمال کنترل کننده‌های طراحی شده و مقایسه‌ی انجام شده بین آن‌ها در بخش چهارم آورده شده است. در بخش پنجم نتیجه‌گیری حاصل از تحقیق ارائه شده است.

2- مدل‌سازی شناور زیرسطحی هوشمند

بررسی حرکت متحرک‌های دریایی شامل مطالعه استاتیکی و دینامیکی آن‌هاست. استاتیک، بررسی پایداری وسیله در حالت سکون یا حرکت با سرعت ثابت است و دینامیک مربوط به حرکت شتابدار آن است. معمولاً مطالعات دینامیکی را به دو بخش تقسیم می‌کنند: سینماتیک⁵ که فقط جنبه هندسی حرکت را بررسی می‌کند و سینتیک⁶ که به تحلیل نیروهای به وجود آورنده حرکت می‌پردازد [17]. مدل‌سازی و توصیف عملکرد سیستم توسط یک دسته معادلات دینامیکی، از مراحل مقدماتی و بسیار مهم می‌باشد که طراحی کنترل کننده بر مبنای آن صورت می‌گیرد. با توجه به فعالیت‌هایی که در زمینه مدل‌سازی شناور زیرسطحی هوشمند صورت گرفته است، تقریباً مدل کاملی از شناور زیرسطحی استخراج شده است [18]. در "شکل 1" نمونه‌ای از شناور زیرسطحی و متغیرهای دینامیکی آن در دستگاه مختصات متصل به بدنه⁷ و قرارگیری آن نسبت به دستگاه مختصات اینرسی⁸ نشان داده شده است.

در جدول 1، متغیرهای مختلف مدل که به عنوان رفتارهای حرکتی شناور زیرسطحی هوشمند تعریف می‌شوند، مطابق استاندارد انجمن طراحان و مهندسان دریایی⁹ ارائه شده است.

2-1- معادلات دینامیکی شناور زیرسطحی هوشمند

در این بخش معادلات دینامیکی غیرخطی برای طراحی کنترل کننده در حرکت سمت و عمق استخراج می‌شود. برای ایجاد یک مدل دینامیکی برای شناور زیرسطحی هوشمند، ابتدا بایستی معادلات سینماتیکی به دست آورد و سپس نیروهای خارجی در معادله حرکت تحلیل و استخراج شود. به‌طور کلی رفتارهای حرکتی معادلات شناور زیرسطحی در دو دستگاه مختصات اینرسی

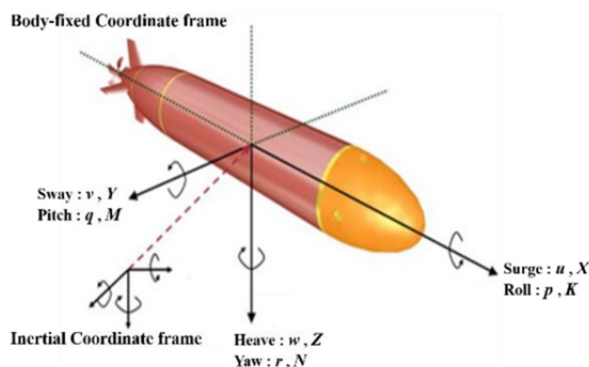


Fig. 1 General Scheme of a AUV and its dynamic variable [19]

شکل 1 شمای کلی یک شناور زیرسطحی هوشمند و متغیرهای دینامیکی [19]

و برخی دینامیک‌های غیرخطی جهت توصیف دقیق‌تر عملکرد زیرسیستم‌ها در نظر گرفته شده است. پس از تعیین فرم معادلات دینامیکی سیستم، تخمین ضرایب مدل پیشنهادی بررسی شده است. همچنین با توجه به مباحث کاربردی و براساس فرم معادلات سیستم از روش حداقل مربعات¹ جهت تعیین ضرایب مدل استفاده شده است. در ادامه به منظور تنظیم ساده و بکارگیری در تست‌های عملی در حرکت سمت و عمق از کنترل کننده PID استفاده شده است. در [16] به مسئله بهینه‌سازی مسیر حرکت یک ربات هوشمند با در نظر گرفتن معادلات غیرخطی و کم‌عملگر پرداخته شده است. در این مرجع با استفاده از روش غیرمستقیم کنترل بهینه شرایط بهینگی را به صورت یک مجموعه معادلات دیفرانسیل غیرخطی استخراج نموده است.

در این مقاله هدف طراحی کنترل کننده برای کنترل سمت و عمق یک شناور زیرسطحی هوشمند به صورتی است که شناور زیرسطحی مورد نظر بتواند در محیطی با وجود اغتشاشات زیرآبی، مسیری را در کمترین زمان ممکن طی کند. شناور زیرسطحی مسئله دارای دینامیک غیرخطی کوپله شده و کم‌عملگر، نامعینی‌های پارامتری، اغتشاشات خارجی و قیود موجود بر روی عملگرها می‌باشد. در این تحقیق با توجه به ویژگی‌های روش کنترل پیش‌بین از جمله مقید بودن، مقاوم بودن، امکان پیاده‌سازی و طراحی بهینه سیگنال کنترلی از این کنترل کننده استفاده شده است. یکی از چالش‌های موجود بر سر راه اعمال عملی این نوع کنترل کننده، بار محاسباتی بر خط و زمان بر بودن عملیات کنترلی در هر گام زمانی است. در این مقاله از توابع متعامد لاگر برای کاهش بار محاسباتی، سرعت بخشیدن به روند بهینه‌سازی و قابلیت بلادرنگ کردن این کنترل کننده، استفاده شده است. همچنین استفاده از روش کنترل پیش‌بین با در نظر گرفتن تابع هزینه بهینه انجام شده است و لذا همزمان بهینگی و برخط بودن نیز فراهم شده است. در این تحقیق از مدل کنترل پیش‌بین توسعه یافته² استفاده شده است. در این روش به جای سیگنال کنترلی u از تغییرات سیگنال کنترلی (Δu) استفاده شده که باعث افزایش مرتبه سیستم و به تبع آن حذف اغتشاش، کاهش خطای ماندگار و افزایش مقام بودن سیستم شده است. در ادامه به دلیل اثرات سیال اطراف شناور (جریان‌های زیرآبی) به عنوان اغتشاش اعمالی به وسیله، اغتشاشات به صورت متغیر با زمان در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای فیزیکی (دما، شوری و چگالی) در دریا که باعث تغییر در ضرایب هیدرودینامیکی شناور زیرسطحی می‌شود، عدم قطعیت پارامتری با درصد خطا در نظر گرفته شده است. در مسئله بهینه‌سازی از روش مجموعه فعال³ استفاده شده است. در حداقل‌سازی با قیود نامساوی تعداد قیود می‌تواند بیش‌تر از تعداد متغیرهای تصمیم باشد. در این مقاله از شرایط کوهن-تاگر⁴ در قیدهای فعال و غیرفعال برحسب ضرایب لاگرانژ برای بهینه‌سازی مسئله مقید استفاده شده است. بنابراین کنترل کننده پیش‌بین مقید با استفاده از توابع لاگر و با مفروضات بیان شده برای کنترل سمت و عمق یک شناور زیرسطحی هوشمند با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، قیود روی عملگرها و نرخ آن در حضور اغتشاشات ناشی از محیط زیر آب طراحی شده است. به منظور نشان دادن اعتبار روش پیشنهادی، مقایسه‌ای بین زمان محاسبات کنترل کننده با استفاده از توابع لاگر و بدون استفاده از آن صورت گرفته است. نتایج شبیه‌سازی حاصل از اعمال این کنترل کننده با استفاده از توابع لاگر کارایی و موثر بودن روش پیشنهادی را به خوبی نشان می‌دهد.

⁵ Kinematics

⁶ Kinetics

⁷ Body-fixed coordinate frame

⁸ Inertial coordinate frame

⁹ Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME)

¹ Least square error

² Generalized Predictive Control (GPC)

³ Active Set Method

⁴ Kuhn-Tucker

جدول 1 تعریف متغیرهای مدل

Table 1 Definition of Model Variables

درجات آزادی	موقعیت و زوایای اولیه	سرعت خطی و زاویه‌ای	نیرو و گشتاور
حرکت در راستای محور X	x	u	X
حرکت در راستای محور Y	y	v	Y
حرکت در راستای محور Z	z	w	Z
دوران حول محور X	φ	p	K
دوران حول محور Y	θ	q	M
دوران حول محور Z	ψ	r	N

$$M = I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)]$$

$$N = I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{zz})pq + m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wp)] \quad (7)$$

در روابط (7) عبارات سمت چپ نیروها و گشتاورهای وارد بر شناور است که به دلیل حجم زیاد از بیان آن صرف نظر شده است [20].

2-2- دیکوپله سازی معادلات دینامیکی شناور زیرسطحی هوشمند

با توجه به پیچیدگی‌های دینامیک غیرخطی شناورهای زیرسطحی هوشمند، فرم‌های ساده شده‌ای از این معادلات جهت توصیف رفتار دینامیکی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در [21] توصیف دینامیکی سیستم در حرکت در صفحات افقی و قائم از یکدیگر تفکیک شده و مدل‌های ساده شده‌ای مرتبط با عملکرد دو زیرسیستم در مانورهای مختلف ارائه شده است. ایده تفکیک رفتار دینامیکی به دو زیرسیستم طولی و عرضی¹ در اغلب مباحث مدل سازی مطرح شده است. در این زمینه با حذف برخی متغیرهای کم اثر هیدرودینامیکی، مدل‌های ساده تری جهت توصیف رفتار دینامیکی ارائه می‌گردد. وضعیت شناور زیرسطحی مورد نظر با دو بالک افقی یا بالابر² و دو بالک عمودی یا سکان³ کنترل می‌شود. برای محاسبه نیروها و گشتاور خارجی سه عملکرد شامل یک سیستم پیشران⁴ و دو بالک در دسترس است که در ادامه بیان می‌شوند. سیستم پیشران شناور زیرسطحی مورد نظر موتور و پروانه است. این شناور زیرسطحی در تست‌های دریایی سرعت رو به جلویی معادل 1.54(m/s) با سرعت پروانه‌ای 1500 دور در دقیقه دارد. فرض بر آن شده که در این سرعت ثابت نیروی پیشران شناور منطبق بر پسی⁴ محوری آن به صورت رابطه (8) است.

$$X_{prop} = -2.73X_{u|u|} \approx 3.86 \quad (8)$$

گشتاور پیشران مدل مطابق رابطه (9) در نظر گرفته می‌شود:

$$K_{prop} = -K_{HS} = (y_g w - y_b B) \cos \theta \cos \varphi + (z_g w - z_b B) \cos \theta \sin \varphi = 0.995(y_g w - y_b B) - 0.093(z_g w - z_b B) \quad (9)$$

با توجه به دینامیک شناور زیرسطحی مد نظر که با یک پروانه و دو بالک کنترل می‌شود، تنها سه عملکرد کنترلی برای شناور در دسترس است. بنابراین کنترل شش درجه آزادی چنین شناورهایی به دلیل کم عملکرد بودن با دقت کافی انجام نمی‌گیرد. بدین منظور یک راه حل، کنترل مجزای سمت، عمق و سرعت است. بنابراین دینامیک شناور را در صفحه‌ای افقی و قائم تجزیه کرده و در هر صفحه یک کنترل کننده پیش بین ارائه می‌شود. هنگامی که شناور زیرسطحی در صفحه جانبی حرکت می‌کند، زاویه بالک عمودی باعث ایجاد گشتاور گردش در وسیله شده و نتیجه‌اش تغییر سمت وسیله می‌شود. برای کنترل سمت سه حالت وابسته سرعت خطی جانبی $v(t)$ ، نرخ زاویه گردش $r(t)$ و زاویه سمت $\psi(t)$ می‌باشد. متغیر کنترلی، تغییر زاویه بالک عمودی $\delta_r(t)$ می‌باشد. زیرسیستم مربوط به کنترل سمت با سه معادله حرکت به صورت روابط (10) مدل سازی می‌شود.

$$\dot{\psi} = \frac{\sin \varphi}{\cos \theta} q + \frac{\cos \varphi}{\cos \theta} r$$

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(pq - \dot{r})] =$$

و دستگاه مختصات متصل به بدنه به صورت بردارهای زیر توصیف می‌شوند:

- بردار η که مطابق رابطه (1) نشان دهنده موقعیت و وضعیت شناور

زیرسطحی در دستگاه مختصات اینرسی می‌باشد.

$$\eta = [\eta_1, \eta_2]^T : \eta_1 = [x, y, z], \eta_2 = [\varphi, \theta, \psi] \quad (1)$$

- بردار v که مطابق رابطه (2) نشان دهنده سرعت خطی و زاویه‌ای

شناور زیرسطحی در دستگاه مختصات بدنه است.

$$v = [v_1, v_2]^T : v_1 = [u, v, w], v_2 = [p, q, r] \quad (2)$$

- بردار τ که مطابق رابطه (3) نشان دهنده نیروها و گشتاورهای وارد

بر شناور زیرسطحی در دستگاه مختصات بدنه است.

$$\tau = [\tau_1, \tau_2]^T : \tau_1 = [X, Y, Z], \tau_2 = [K, M, N] \quad (3)$$

ارتباط بین متغیرهای سرعت v در دستگاه مختصات متصل به بدنه و

متغیرهای موقعیت η در دستگاه مختصات اینرسی به صورت رابطه (4) است.

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0 \\ 0 & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

در رابطه (4)، J_1 و J_2 ماتریس‌های تبدیل از دستگاه مختصات متصل به

بدنه به دستگاه مختصات اینرسی هستند و به صورت (5) در نظر گرفته

می‌شوند.

$$J_1 = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\varphi - s\psi c\varphi & c\psi s\theta c\varphi + s\psi s\varphi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\varphi + c\psi c\varphi & s\psi s\theta c\varphi - c\psi s\varphi \\ -s\theta & c\theta s\varphi & c\theta c\varphi \end{bmatrix}$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} 1 & s\varphi t\theta & c\varphi t\theta \\ 0 & c\varphi & -s\varphi \\ 0 & \frac{s\varphi}{c\theta} & \frac{c\varphi}{c\theta} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} s. = \sin. \\ c. = \cos. \\ t. = \tan. \end{matrix} \quad \theta \neq \pm \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

شکل کلی معادلات شش درجه آزادی شناور زیرسطحی در دستگاه

مختصات متصل به بدنه به صورت رابطه (6) بیان می‌شود.

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (6)$$

در رابطه (6)، M ماتریس جرم و ممان اینرسی، $C(v)$ ماتریسی شامل

جملات مربوط به نیروهای کریولیس و مرکزگرا، $D(v)$ ماتریس جملات

میراکننده، $g(\eta)$ شامل نیروها و ممان‌های ناشی از گرانش و τ بردار

ورودی‌های کنترلی است. معادلات حرکت شش درجه آزادی شناور

زیرسطحی هوشمند به صورت روابط (7) استخراج می‌شود.

$$X = m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + x_g(pq + \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})]$$

$$Y = m[\dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr + \dot{p}) + x_g(pq + \dot{r})]$$

$$Z = m[\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp + \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p})]$$

$$K = I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)]$$

¹ Longitudinal and Lateral Subsystems

² Elevator

³ Rudder

⁴ Drag

$$= \begin{bmatrix} z\delta_e \\ M\delta_e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_e] \quad (15)$$

طبق فرم فضای حالت استاندارد رابطه (12)، معادلات حالت و خروجی دکوپله شده عمق با بردار حالت $\vec{x} = [w \ q \ z \ \theta]^T$ به صورت رابطه (16) بیان می شود:

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - z\dot{w} & -z\dot{q} & 0 & 0 \\ -M\dot{w} & I_{yy} - M\dot{q} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_w & mu + z_q & 0 & 0 \\ M_w & M_q & 0 & M_\theta \\ 1 & 0 & 0 & -u \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ z \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m - z\dot{w} & -z\dot{q} & 0 & 0 \\ -M\dot{w} & I_{yy} - M\dot{q} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z\delta_e \\ M\delta_e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_e] \quad (16)$$

بنابراین در این بخش معادلات حالت دکوپله شده ی مورد نیاز برای کنترل سمت و عمق شناور زیرسطحی به صورت روابط (13) و (16) استخراج شدند.

3- الگوریتم کنترل پیش بین

در این بخش به معرفی بیان ریاضی کنترل پیش بین و نحوه به دست آوردن معادلات حاکم بر آن پرداخته می شود. نکته ی قابل توجه این که ایده ی استفاده از توابع لاگر در طراحی کنترل پیش بین اولین بار توسط وانگ معرفی شده است [22]. اساس روش کنترل پیش بین بر حل یک مسئله کنترل بهینه در هر فاصله نمونه برداری استوار است. این الگوریتم را می توان در چند محور اصلی بیان نمود [23]:

- استفاده از یک مدل قابل شناسایی برای پیش بینی خروجی سیستم در زمان آینده
- محاسبه ی سیگنال کنترلی با بهینه سازی یک تابع هدف که معمولاً تابعی از خطای پیش بینی و تلاش کنترلی است.
- اعمال عناصر سیگنال کنترلی حاصل از بهینه سازی (معمولاً عنصر اول استفاده می شود)
- تکرار این سه مرحله در هر گام
- مراحل کار در الگوریتم کنترل پیش بین در "شکل 2" نشان داده شده است.
- اختلاف استراتژی های مختلف کنترل پیش بین را می توان در مدل مورد

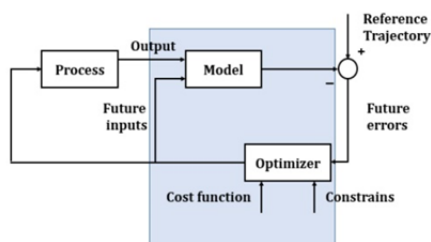


Fig. 2 The overall structure of predictive control [24]

شکل 2 ساختار کلی کنترل پیش بین [24]

$$Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{uu}\delta_r u^2 \delta_r + I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{zz})pq + m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wp)] = N_{res} + N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_v\dot{v} + N_r\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu}\delta_r u^2 \delta_r \quad (10)$$

با خطی سازی حول نقطه تعادل $v = r = 0$ و $u = 1.54(m/s)$ ، زیرسیستم سمت به صورت (11) به دست می آید:

$$\begin{bmatrix} m - Y_v & -Y_r & 0 \\ -N_v & I_z - N_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_v & Y_r - mu & 0 \\ N_v & N_r & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y\delta_r \\ N\delta_r \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_r] \quad (11)$$

برای بیان معادله (11) به صورت معادلات حالت دکوپله شده از فرم استاندارد فضای حالت رابطه (12) استفاده می شود. برای زیرسیستم سمت با فرض بردار حالت $\vec{x} = [v \ r \ \psi]^T$ معادلات حالت دکوپله شده شامل معادلات حالت و خروجی مطابق رابطه (13) به دست می آید:

$$\begin{cases} \dot{\vec{x}} = A\vec{x} + B\vec{u} \\ \vec{y} = C\vec{x} + D\vec{u} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - Y_v & -Y_r & 0 \\ -N_v & I_z - N_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_v & Y_r - mu & 0 \\ N_v & N_r & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m - Y_v & -Y_r & 0 \\ -N_v & I_z - N_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y\delta_r \\ N\delta_r \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_r] \quad (13)$$

در رابطه (13) ماتریس ها و بردارهای رابطه (12) به تفکیک مشخص شده است. همچنین در این معادله به دلیل تحقق پذیری و اکیداً سره بودن سیستم، ماتریس انتقال مستقیم D برابر صفر است. با تغییر زاویه بالک عقب (دو باله افقی) نیروی بالابر بر روی بالک ها عوض شده و گشتاور عمودی مربوطه تغییر خواهد کرد. زمانی که شناور زیرسطحی در یک سرعت ثابت رو به جلو حرکت می کند، تغییر زاویه پیچ در بالاروندگی یا فروروندگی وسیله نتیجه خواهد داد و نهایتاً عمق شناور تغییر خواهد کرد. برای کنترل عمق چهار متغیر درگیر سرعت خطی $w(t)$ ، نرخ پیچ $q(t)$ ، زاویه پیچ $\theta(t)$ و عمق $z(t)$ می باشند. متغیر کنترل زاویه انحراف بالک عقب، $\delta_e(t)$ می باشد. زیرسیستم مربوط به کنترل عمق با چهار معادله حرکت به صورت روابط (14) می باشد:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -\sin\theta u + \cos\theta \sin\phi v + \cos\theta \cos\phi w \\ \dot{\theta} &= \cos\phi q - \sin\phi r \\ m[\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq - \dot{p})] &= z_{uq}uq + z_{vp}vp + z_{rp}rp + z_{uw}uw + z_{uu}\delta_e u^2 \delta_e \\ I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] &= M_{re} + M_{w|w}|w| + M_{q|q}|q| + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + \\ M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uu}\delta_e u^2 \delta_e \end{aligned} \quad (14)$$

با خطی سازی روابط زیرسیستم عمق حول نقاط تعادل $\theta = q = 0$ و $u = 1.54(m/s)$ این زیرسیستم به صورت رابطه (15) ساده می شود:

$$\begin{bmatrix} m - z\dot{w} & -z\dot{q} & 0 & 0 \\ -M\dot{w} & I_{yy} - M\dot{q} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_w & mu + z_q & 0 & 0 \\ M_w & M_q & 0 & M_\theta \\ 1 & 0 & 0 & -u \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ z \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z\delta_e \\ M\delta_e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_e]$$

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}_{N_p \times n}$$

$$H = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & CAB & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix}_{(q \times N_p) \times (N_c \times m)} \quad (22)$$

تابع هزینه‌ای که برای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده به صورت (23) است:

$$J = E^T Q E + \Delta U^T R \Delta U$$

$$E = W - Y = W - (Fx(k) + H\Delta U) \quad (23)$$

در روابط (23)، بردار خروجی‌های پیش‌بینی شده سیستم در زمان‌های آینده، بردار مقدار سیگنال مرجع در زمان‌های آینده و بردار سیگنال کنترلی زمان‌های آینده است که از بهینه‌سازی تابع هزینه به‌دست می‌آید. همچنین R ، Q ماتریس‌های مثبت معین و قطری هستند که برای وزن‌دهی در تابع هزینه استفاده می‌شود. با مشتق‌گیری از تابع هزینه و برابر صفر قرار دادن آن بردار سیگنال کنترلی Δu به صورت رابطه (24) به‌دست می‌آید:

$$\Delta U_{\text{optimal}} = (H^T Q H + R I)^{-1} H^T Q (w - Fx(k)) \quad (24)$$

پاسخ بهینه یک دنباله از ورودی‌ها است اما همان‌طور که قبلاً اشاره شد تنها المان اول از این دنباله به‌عنوان ورودی کنترلی بهینه شده به سیستم اعمال می‌شود و در بازه زمانی بعدی برای به‌دست آوردن ورودی کنترلی جدید محاسبات دوباره تکرار می‌شود [25].

3-2- کنترل پیش‌بین مقید

یکی از ویژگی‌های اصلی کنترل‌کننده پیش‌بین که آن را به ویژه در کنترل سامانه‌های هوشمند فراگیر کرده است توانایی برخورد مستقیم این کنترل‌کننده با قیود سخت موجود در سیستم می‌باشد. علاوه بر این کنترل‌کننده پیش‌بین به سادگی قابل تعمیم برای سیستم‌های چند متغیره، تأخیردار و غیرحداقل فاز¹ است. فرمول‌بندی کنترل پیش‌بین تاکنون با این فرض انجام شد که تمام سیگنال‌ها می‌توانند هر مقداری اختیار کنند و محدودیتی نداشته باشند. اما این فرض چندان با واقعیت تطابق ندارد چرا که در عمل بسیاری از سیستم‌ها دارای محدودیت هستند. در روش‌های طراحی کنترل مقید، نظیر کنترل پیش‌بین مقید این محدودیت‌ها در فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله برای طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین مقید برای کنترل سمت و عمق شناور از روش برنامه‌ریزی مربعی برای بیان تابع هزینه و قیود موجود استفاده شده است. با توجه به این که تابع هزینه برحسب نرخ تغییرات سیگنال کنترلی Δu می‌باشد، پس بایستی قیود و محدودیت‌هایی که روی سیگنال کنترلی u و یا بر روی خروجی‌های y وجود دارند را با تغییراتی به قیود و محدودیت بر روی Δu تبدیل کنیم. در نتیجه قیود بر روی دو متغیر (u, y) با تبدیلات زیر به قیود بر روی Δu تبدیل می‌شود و در نهایت نمایش استاندارد مسئله بهینه‌سازی مقید جدید به‌صورت روابط (25) در نظر گرفته می‌شود.

$$J = [w - Fx(k) - H\Delta U]^T Q [w - Fx(k) - H\Delta U] + \Delta U^T R \Delta U$$

$$T\Delta U \leq u_{\max} I_{m \times 1} - u(t-1) \times I_{m \times 1}$$

$$-T\Delta U \leq -u_{\min} I_{m \times 1} + u(t-1) \times I_{m \times 1}$$

$$H\Delta U \leq y_{\max} I_{p \times 1} - Fx(k)$$

استفاده برای پیش‌بینی رفتار سیستم و همچنین تابع هزینه‌ای که باید کمینه گردد، دانست. مدل فرآیند باید بتواند به خوبی رفتار و وضعیت سیگنال‌های خروجی آن را تشریح کند. خروجی‌های آینده با استفاده از مدل فرآیند پیش‌بینی می‌شوند. این مقادیر به حالت فعلی فرآیند و سیگنال‌های کنترلی آینده بستگی دارند. تابع هزینه در کنترل پیش‌بین عموماً تابعی از خطای پیش‌بینی است. همچنین در بسیاری از الگوریتم‌ها تغییرات سیگنال کنترلی نیز در تابع هزینه لحاظ می‌شود و با کمینه کردن تابع هزینه، خطای پیش‌بینی و تغییرات سیگنال کنترلی توأماً به مقدار بهینه می‌رسند. این تابع هزینه ممکن است تک پله‌ای یا چند پله‌ای باشد یعنی ممکن است خطای پیش‌بینی و تغییرات سیگنال کنترلی تنها در یک لحظه در آینده در تابع هزینه در نظر گرفته شده باشد یا این که مجموع آن‌ها در چندین گام در لحظات آینده در تابع هزینه وارد شود [24].

3-1- فرمول‌بندی کنترل پیش‌بین

فرض کنید سیستمی دارای m ورودی و q خروجی بوده و تعداد حالت‌های آن برابر n باشد. این سیستم با معادلات فضای حالت گسسته (17) را در نظر بگیرید.

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k)$$

$$y(k) = C_m x(k) \quad (17)$$

در رابطه (17)، بردار ورودی کنترلی، u بردار خروجی سیستم و بردار حالت سیستم را نشان می‌دهد. معمولاً مناسب است تا یک انتگرال‌گیر گسسته از Δu به u در ورودی دینامیک فرآیند در نظر گرفته شود، تا به حذف اغتشاش و نیز کاهش خطای ماندگار فرآیند کمک کند. با استفاده از عمل تفاضلی رابطه (18) حاصل می‌شود:

$$x(k+1) - x(k) = \Delta x(k+1) = A(x(k) - x(k-1)) + B(u(k) - u(k-1))$$

$$y(k+1) - y(k) = C_m(x(k+1) - x(k)) = C_m A_m \Delta x(k) + C_m B_m \Delta u(k) \quad (18)$$

بردار متغیرهای حالت جدید به صورت رابطه (19) انتخاب می‌شوند:

$$x(k) = [\Delta x(k) \quad y(k)]^T \quad (19)$$

با جایگذاری روابط به‌دست آمده روابط (20) به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \Delta x(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix}_{x(k+1)} = \underbrace{\begin{bmatrix} A_m & 0_{q \times n} \\ C_m A_m & I_{q \times q} \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ y(k) \end{bmatrix}}_{x(k)} + \underbrace{\begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix}}_B \Delta u(k)$$

$$y(k) = \underbrace{[0_{q \times n} \quad I_{q \times q}]}_C \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ y(k) \end{bmatrix}}_{x(k)} \quad (20)$$

در روابط (20)، I یک ماتریس همانی با ابعاد $q \times q$ بوده و 0 یک ماتریس صفر با ابعاد $q \times n$ را نشان می‌دهد [25]. جهت به‌دست آوردن کنترل پیش‌بین برای سیستم به‌دست آمده، دو بردار به صورت روابط (21) تعریف می‌شود.

$$\Delta U = [\Delta u(k)^T \quad \Delta u(k+1)^T \quad \dots \quad \Delta u(k+N_c-1)^T]^T$$

$$Y = [y(k+1|k)^T \quad y(k+2|k)^T \quad \dots \quad y(k+N_p|k)^T]^T \quad (21)$$

در روابط (21)، $y(k+i|k)$ نشان‌دهنده خروجی در لحظه زمانی $k+i$ براساس حالت در لحظه زمانی k یعنی $x(k)$ است و N_c و N_p به ترتیب افق کنترل‌کننده و افق پیش‌بینی هستند. براساس مدل فضای حالت جدید به دست آمده بردار متغیر خروجی به فرم ماتریسی (22) نشان داده می‌شود:

$$Y = Fx(k) + H\Delta U$$

¹ Non-minimum Phase

موجود در افق پیش بینی و در نتیجه تعداد پارامترهایی که در هر گام کنترل کننده با آن سروکار دارد را کاهش داده و بار محاسباتی این کنترل کننده برای سیستم های با ابعاد وسیع و یا دینامیک پیچیده کم کرد. علاوه بر این یک عامل کاهش نیایی در توابع لاگر وجود دارد که تضمین کننده همگرایی تفاضل سیگنال کنترل به سمت صفر، بعد از یک مدت زمان گذرا می باشد. بنابراین در بیشتر موارد می توان تعداد قیود موجود در مسئله کنترل پیش بین را نیز کاهش داد. برای فرمول بندی دوباره ی کنترل پیش بین و ساده سازی پاسخ آن، توابع لاگر جهت بیان مسئله اصلی مورد استفاده قرار می گیرد. علاوه بر این با استفاده از این توابع می توان پارامترهای زیادی که در افق های پیش بینی طولانی وجود دارد را با تعداد کمتری پارامتر جایگزین نمود. توابع لاگر یک مجموعه از توابع گسسته با پایه ی متعامد هستند که تبدیل z آن ها به صورت روابط (28) بیان می شود:

$$\begin{aligned} F_1(z) &= \frac{\sqrt{1-a^2}}{1-az^{-1}} \\ F_2(z) &= \frac{\sqrt{1-a^2}}{1-az^{-1}} \frac{z^{-1}-a}{1-az^{-1}} \\ &\vdots \\ F_N(z) &= \frac{\sqrt{1-a^2}}{1-az^{-1}} \left(\frac{z^{-1}-a}{1-az^{-1}} \right)^{N-1} \end{aligned} \quad (28)$$

در روابط (28)، a قطب توابع لاگر است و به آن فاکتور مقیاس گفته می شود. برای پایداری لازم است که $0 \leq a < 1$ باشد. راه دست یافتن به توابع زمانی گسسته استفاده از تحقق فضای حالت این شبکه ها به صورت (29) است.

$$L(k) = [l_1(k) \quad l_2(k) \quad \dots \quad l_N(k)]^T \quad (29)$$

رابطه بازگشتی (29) به صورت (30) محاسبه می شود:

$$L(k+1) = A_L L(k) \quad (30)$$

در رابطه (30) ماتریس A_L یک ماتریس $N \times N$ است و تابعی از پارامترهای α و $\beta = 1 - \alpha^2$ می باشد. مقدار این توابع در لحظه ی صفر به صورت رابطه (31) می باشد:

$$L(0)^T = \sqrt{\beta} [1 \quad -\alpha \quad \alpha^2 \quad -\alpha^3 \quad \dots \quad (-1)^{N-1} \alpha^{N-1}] \quad (31)$$

برای توابع لاگر با مرتبه پنج $N = 5$ ماتریس A_L و بردار $L(0)$ به صورت

(32) خواهد بود:

$$A_L = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta & \alpha & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha\beta & \beta & \alpha & 0 & 0 \\ \alpha^2\beta & -\alpha\beta & \beta & \alpha & 0 \\ -\alpha^3\beta & \alpha^2\beta & -\alpha\beta & \beta & \alpha \end{bmatrix} \quad L(0) = \sqrt{\beta} \begin{bmatrix} 1 \\ -\alpha \\ \alpha^2 \\ -\alpha^3 \\ \alpha^4 \end{bmatrix} \quad (32)$$

در حالت $\alpha = 0$ توابع لاگر به توابع ضربه تبدیل شوند. اگر زمان K_i باشد، میزان تغییرات ورودی کنترل پیش بینی شده در k لحظه ی بعدی (لحظه ی اختیاری) به صورت (33) به دست می آید:

$$\Delta u(k_i + k) = \sum_{j=1}^N c_j(k_i) l_j(k) \quad (33)$$

در چارچوب کاری (33)، افق کنترل N_c دیگر وجود ندارد و به جای آن N به همراه پارامتر α ، خط سیر³ کنترل را توصیف می کند، که به صورت رابطه (34) به دست می آید:

$$\begin{aligned} \Delta u(k_i + k) &= L(k) \eta \\ \eta &= [c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_N]^T \\ L(k) &= [l_1(k) \quad l_2(k) \quad \dots \quad l_M(k)] \end{aligned} \quad (34)$$

در رابطه (34) N تابع لاگر و M ضریب لاگر به ترتیب در بردارهای η و

$$\begin{aligned} -H\Delta U &\leq -y_{\min} I_{p \times 1} + Fx(k) \\ \Delta u_{\min} I_{m \times 1} &\leq \Delta U \leq \Delta u_{\max} I_{m \times 1} \end{aligned} \quad (25)$$

در روابط (25)، T ماتریسی بالا مثلثی است که درایه غیرصفرش 1 می باشد.

3-2-1- حداقل سازی با قیود نامساوی به کمک روش مجموعه فعال

در حداقل سازی با قیود نامساوی تعداد قیود می تواند بیش تر از تعداد متغیرهای تصمیم باشد. اگر قیود نامساوی به صورت $Mx \leq \gamma$ در نظر گرفته شود (که همه ی قیدهای روی ورودی، نرخ ورودی، حالت ها، خروجی ها و غیره که کنترل پیش بین مقید در بر می گیرد) می تواند شامل قیود فعال و غیرفعال نیز باشد. شرایط کوهن-تاکر قیدهای فعال و غیرفعال را برحسب ضرایب لاگرانژ برای بهینه سازی یک مسئله مقید در نظر می گیرد. شرایط کوهن-تاکر که شرایط لازم برای مسئله بهینه سازی مقید است، به صورت روابط (26) می باشد:

$$\begin{aligned} \text{Min } J(x) &= \frac{1}{2} x^T E x + x^T F \\ s.t. \quad Mx &\leq \gamma \\ Ex + F + M^T \lambda &= 0 \\ Mx - \gamma &\leq 0 \\ \lambda &\geq 0 \end{aligned} \quad (26)$$

روشی که در این مقاله برای بهینه سازی مقید برای به دست آوردن سیگنال کنترلی استفاده شده است، روش مجموعه فعال می باشد. روش مجموعه فعال برای حل مسئله بهینه سازی با قیود نامساوی در هر مرحله مجموعه ای از قیود را به عنوان مجموعه ای فعال تعیین می کند و مسئله را با قیود تساوی (27) حل می کند.

$$J = \frac{1}{2} x^T E x + x^T F + \lambda (Mx - \gamma) \quad (27)$$

اگر تمام ضرایب لاگرانژ مثبت باشند ($\lambda_i \geq 0$) نقطه ی کنونی یک حل محلی از مسئله می باشد و اگر $\lambda_i < 0$ شد، آن گاه قید مربوطه غیرفعال است. باید آن را حذف کرده و حل مسئله به صورت حرکت روی سطح تعریف شده با مجموعه فعال ادامه داده شود [25].

3-3- کنترل پیش بین با استفاده از توابع لاگر

در سیستم هایی که زمان نمونه برداری آن ها بسیار کوچک باشد و یا دینامیک سیستم پیچیده است، کنترل پیش بین در هر گام زمانی با تعداد زیادی متغیر تصمیم گیری روبه رو خواهد شد و همین باعث کاهش سرعت اجرای بلادرنگ این کنترل کننده می شود. بنابراین یکی از روش هایی که برای کاهش حجم محاسباتی کنترل کننده پیش بین استفاده می شود آن است که سیگنال کنترل به صورت تابعی از شرایط اولیه به صورت خارج از خط¹ محاسبه شده و در یک جدول مراجعه ای² قرار گیرد تا کنترل کننده به صورت برخط با توجه به شرایط اولیه ی سیستم به این جدول مراجعه نموده و ورودی کنترلی را برای سیستم محاسبه کند. این روش توانسته است در سیستم های کوچک سرعت را تا 100 برابر افزایش دهد. اما در این روش با افزایش پارامترهایی چون افق پیش بینی، افق کنترل، تعداد حالت ها و ورودی ها، تعداد المان های این جدول افزایش می یابد. بنابراین در سیستم های ابعاد وسیع اجرای عملی این روش با مشکل مواجه است. یکی از رویکردهای بسیار مناسب برای کاهش بار محاسباتی این کنترل کننده استفاده از توابع لاگر در طراحی آن می باشد. با پارامتری کردن دنباله سیگنال کنترل می توان به طور موثری تعداد قیود

³ Trajectory

¹ Off-Line

² Lookup table

این پارامترها نیز در زیرسیستم عمق به صورت (41) انتخاب شده‌اند:

$$N_p = 60, N = 4, \alpha = 0.85 \quad (41)$$

به دلیل این که تخمین خروجی همواره همراه با خطا است، در این قسمت نامعینی‌ها و اغتشاشات را در سیستم شناور اضافه می‌کنیم. در تمامی شبیه‌سازی‌های کنترل پیش‌بین، این خطا به صورت نویز سفید با دامنه 0.01 در نظر گرفته شده است. برای در نظر گرفتن نیروی جریان آب به عنوان نیروهای مزاحم در بردار اغتشاش، آن‌ها را به صورت ضربی از سرعت‌های خطی و زاویه‌ای شناور در نظر می‌گیریم به صورتی که بردار اغتشاشات وارد بر شناور به صورت (42) به دینامیک سیستم اعمال می‌شود.

$$\text{dis} = [u_0 \sin\left(\frac{t}{2}\right), 0.5v \sin\left(\frac{t}{4}\right), 0.2w \text{rand}(), 0.5p \sin\left(\frac{t}{4}\right), 0.3q \sin\left(\frac{t}{4}\right), 0.5r \sin\left(\frac{t}{4}\right)] \quad (42)$$

همچنین نویز سفیدی با دامنه 0.01 به عنوان نویز اندازه‌گیری در خروجی در نظر گرفته شده است. به دلیل شرایط خاص محیط زیر آب برای تست وسیله که طی آن ضرایب هیدرودینامیکی استخراج می‌شود، در اثر نامعینی‌های موجود این مقادیر همراه با خطا محاسبه می‌شوند و ممکن است این خطا منجر به رفتار نامطلوب و حتی ناپایداری شناور گردد. بنابراین کنترل کننده می‌بایست طوری طراحی شود تا در حضور این نامعینی‌ها مقاوم بوده و همچنان مطلوب رفتار نماید. پس لازم است قبل از به کارگیری کنترل کننده در عمل در طراحی آن نامعینی به شبیه‌سازی افزوده شده و رفتار آن بررسی گردد. در جدول 2 خطای هیدرودینامیکی که در شبیه‌سازی استفاده شده، آورده شده است.

تمام ضرایب هیدرودینامیکی از مرجع [20] استفاده شده است. در هر زیرسیستم هدف آن است که شناور طوری کنترل شود که مسیرهای مطلوب در هر صفحه که به ترتیب در صفحه افقی برای زیرسیستم سمت، زاویه گردش شناور و در صفحه عمودی برای زیرسیستم عمق، با توجه به زاویه چرخش عمق شناور می‌باشد، دنبال شوند. در انتخاب مسیرهای مطلوب سعی شده است که برای آن که نتایج شبیه‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر باشد از لبه‌های تیز خودداری شود. در ادامه نتایج شبیه‌سازی حاصل از اعمال کنترل کننده طراحی شده برای کنترل سمت و عمق شناور در دو حالت یکی با اعمال کنترل کننده پیش‌بین ساده و دیگری کنترل کننده پیش‌بین مقید و با استفاده از توابع لاگر بیان می‌شود. همچنین لازم به ذکر است در هر دو سناریو به شناور اغتشاشات خارجی وارد می‌شود.

4-1- ارزیابی مدل و شبیه‌سازی حلقه باز

به منظور اطمینان از مدل دینامیکی استخراج شده که طراحی کنترل کننده بر مبنای آن انجام می‌شود، به ارزیابی مدل و شبیه‌سازی حلقه باز پرداخته

جدول 2 خطای مدل سازی هیدرودینامیکی

Table 2 Hydrodynamic modeling error

کمیت	درصد خطا	کمیت	درصد خطا
N_{vv}	60%	M_{ww}	80%
N_{uv}	80%	M_{qq}	80%
N_{ur}	80%	M_{uw}	80%
$N_{uu}\delta_r$	50%	M_{uq}	80%
Y_{vv}	50%	Z_{ww}	70%
Y_{rr}	50%	Z_{qq}	70%
Y_{uv}	60%	Z_{uw}	70%
Y_{ur}	60%	Z_{uq}	70%
Y_{wp}	60%	Z_{vp}	70%
Y_{pq}	60%	Z_{rp}	70%
$Y_{uu}\delta_r$	50%	$Z_{uu}\delta_s$	30%

$L(k)$ نمایش داده شده‌اند. در این صورت پیش‌بینی متغیرهای حالت و خروجی در m گام بعدی به صورت روابط (35) به دست می‌آید:

$$x(k_i + m|k_i) = A^m x(k_i) + \sum_{i=0}^{m-1} A^{m-i-1} B \eta L(i)$$

$$y(k_i + m|k_i) = C A^m x(k_i) + \sum_{i=0}^{m-1} C A^{m-i-1} B \eta L(i) \quad (35)$$

روابط به دست آمده به صورت روابط (36) در تابع هزینه جایگزین

می‌شوند:

$$J = (W - Y)^T Q (W - Y) + \eta^T R \eta \quad (36)$$

بنابراین به جای Δu در روش‌های قبل، در این روش طراحی، بردار ضریب η به صورت بهینه به دست می‌آید. در حالتی که بهینه‌سازی مقید داشته باشیم و از توابع لاگر در طراحی استفاده شود، محدودیت‌ها از طریق روابط (37) به دست می‌آیند:

$$\Delta u^{\min} \leq \Delta u(k_i + m) \leq \Delta u^{\max}$$

$$\Delta u(k_i + m) = L(m)^T \eta$$

$$\Delta u^{\min} \leq \begin{bmatrix} L_1(m)^T & 0_2^T & \dots & 0_m^T \\ 0_1^T & L_2(m)^T & \dots & 0_m^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0_1^T & 0_2^T & \dots & L_m(m)^T \end{bmatrix} \eta \leq \Delta u^{\max} \quad (37)$$

با بهره‌گیری از توابع لاگر می‌توان تعداد قیود بیشتری در افق پیش‌بین را کاهش داد و در نتیجه از بار محاسبات کاست. از این‌رو می‌توان در سیستم‌های با ابعاد وسیع و بلادرنگ بهره جست. در کنترل پیش‌بین تنها افق‌های کنترل و پیش‌بینی و ماتریس‌های وزن دهی در تابع هزینه به عنوان پارامترهای تنظیم وجود دارند. با اضافه شدن توابع لاگر از ضرایب لاگر نیز به عنوان پارامتر تنظیم استفاده می‌شود [26].

4- نتایج شبیه‌سازی

سناریو حرکتی به صورتی در نظر گرفته شده که شناور زیرسطحی در حین پیمایش مسیری به مدت زمان 100 ثانیه، با سه مانع در زمان‌های 20، 40 و 80 ثانیه مواجه می‌شود که بایستی با تغییر وضعیت به موقع بالک‌های افقی و عمودی از برخورد با آن‌ها اجتناب کند و بعد از عبور از موانع به مسیر قبلی ادامه دهد. در ابتدا زمان نمونه‌برداری جهت گسسته‌سازی سیستم با توجه به روش کنترل پیش‌بین توسعه‌یافته‌ی زمان گسسته انتخاب می‌شود. با توجه به دینامیک شناور زیرسطحی موردنظر و پس از یافتن پاسخ فرکانسی و فرکانس قطع در دیاگرام بود¹ زمان نمونه‌برداری برای زیرسیستم سمت برابر $T_s = 0.5$ ثانیه و برای زیرسیستم عمق معادل $T_s = 0.6$ ثانیه در نظر گرفته شده است. با توجه به سطوح کنترلی و بالک‌های افقی و عمودی شناور زیرسطحی موردنظر و فرمول بندی قیود با استفاده از مرجع [20] بیشینه زاویه بالک‌های عمودی و افقی شناور به صورت روابط (38) می‌باشد:

$$-1.36e^{+001}(\text{deg}) \leq u = \delta_r \leq 1.36e^{+001}(\text{deg})$$

$$-1.36e^{+001}(\text{deg}) \leq u = \delta_e \leq 1.36e^{+001}(\text{deg}) \quad (38)$$

برای نرخ سیگنال کنترل نیز قیدها به صورت روابط (39) می‌باشند:

$$-0.5 \left(\frac{\text{deg}}{s}\right) \leq \Delta u = \Delta \delta_r \leq 0.5 \left(\frac{\text{deg}}{s}\right)$$

$$-0.5 \left(\frac{\text{deg}}{s}\right) \leq \Delta u = \Delta \delta_e \leq 0.5 \left(\frac{\text{deg}}{s}\right) \quad (39)$$

پارامترهای طراحی در زیرسیستم سمت به صورت (40) در نظر گرفته

شده‌اند:

$$N_p = 40, N = 4, \alpha = 0.95 \quad (40)$$

¹ Bode Diagram

زیرسطحی مورد نظر شامل موقعیت های خطی و دورانی را نشان می دهد. همان طور که در "شکل 4" قسمت الف مشخص است موقعیت شناور در راستای محوره های x و y به صورت نوسانی است که نشان از چرخش شناور در صفحه می باشد. همچنین حرکت در راستای محور z در حال افزایش است که نشان از بالا آمدن شناور به سطح آب است. در قسمت ب زاویه گردش نشان دهنده این است که کنترلی بر روی بالک ها وجود نداشته و بالک های عمودی به دلیل نیروی مزاحم آن در حداکثر وضعیت قرار گرفته اند.

4-2- شبیه سازی کنترل کننده پیش بین ساده

سناریو حرکتی زیرسیستم سمت به صورتی در نظر گرفته شده که بالک های عمودی شناور در ثانیه 20 بایستی به میزان 58 درجه به سمت چپ و در ثانیه 40 به میزان 86 درجه به سمت راست و سپس در ثانیه 80 به میزان 28 درجه به سمت چپ تغییر وضعیت دهد. در "شکل 5" تا "شکل 7" نتایج حاصل از اعمال کنترل کننده پیش بین طراحی شده برای زیرسیستم سمت نشان داده شده است. "شکل 5" تعقیب مسیر در مانور گردش شناور در زیرسیستم سمت را نشان می دهد. همان طور که مشخص است خروجی (زاویه سمت) شناور به خوبی ورودی مطلوب را دنبال می کند.

در "شکل 6" زاویه بالک عمودی شناور برای زیرسیستم سمت در طراحی کنترل پیش بین ساده نشان داده شده است. همان طور که مشخص است در لحظاتی که شناور بایستی تغییر وضعیت دهد ورودی کنترلی زیادی

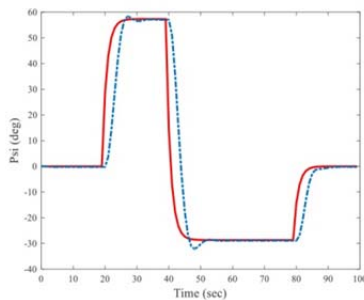


Fig. 5 Trajectory tracking for the Yaw maneuver in steering subsystem, Reference input (dash) and Output (dash dot). (simple predictive control)

شکل 5 تعقیب مسیر در مانور گردش شناور در زیرسیستم سمت، ورودی مرجع (خط)، خروجی (خط نقطه). (کنترل پیش بین ساده)

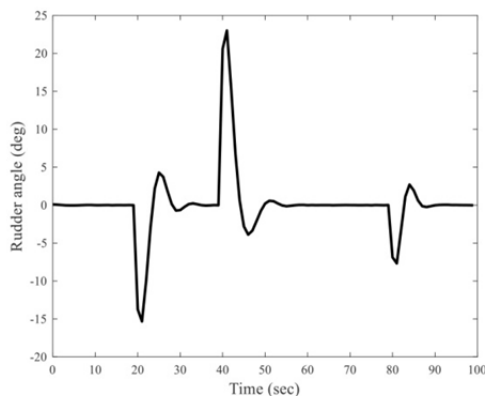


Fig. 6 The rudder angle in steering subsystem (simple predictive control)

شکل 6 زاویه بالک های عمودی شناور در زیرسیستم سمت (کنترل پیش بین ساده)

می شود. برای شبیه سازی حلقه باز مدل به دست آمده، از محیط نرم افزار متلب¹ استفاده شده است. نیروی پیشران شناور و زاویه ی دو بالک انتهایی آن، ورودی های اعمالی به مدل را تشکیل می دهند. شبیه سازی مورد نظر برای سرعت رو به جلوی ثابت 1.54 m/s با نیروی پیشران ثابت 3.86 (N) و زاویه ی بالک های صفر انجام شده است. برای پایداری شناور زیرسطحی، همواره مرکز جرم² پایین تر از مرکز شناوری³ آن است. این ویژگی سبب می شود در حالتی که شناور در حالت سکون قرار دارد نیروی شناوری، زیرسطحی را به سطح آب بیاورد. در "شکل 3" حرکت شناور زیرسطحی در فضای سه بعدی بدون اعمال سیگنالی بر روی بالک ها و با در نظر گرفتن گشتاور پیشران و نیروی اعمالی آب نشان داده است.

همان طور که در "شکل 3" نشان داده شده است، در ابتدا شناور در عمق 40 متری زیر آب قرار داشته سپس این شناور با سرعت 1.54 m/s و زاویه ی بالک صفر رها می شود. همان طور که انتظار می رفت با توجه به این که مرکز جرم شناور پایین تر از مرکز شناوری است، باعث به سطح آب آمدن شناور شده و در نتیجه مدل دینامیکی غیرخطی استخراج شده عملکرد صحیح و قابل اطمینانی دارد. "شکل 4" شبیه سازی رفتار 6 درجه آزادی شناور

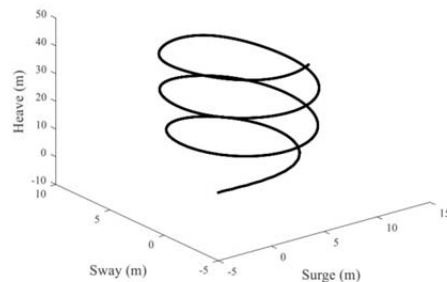


Fig. 3 AUV motion in 3D space in open loop simulation

شکل 3 حرکت شناور زیرسطحی در فضای سه بعدی در شبیه سازی حلقه باز

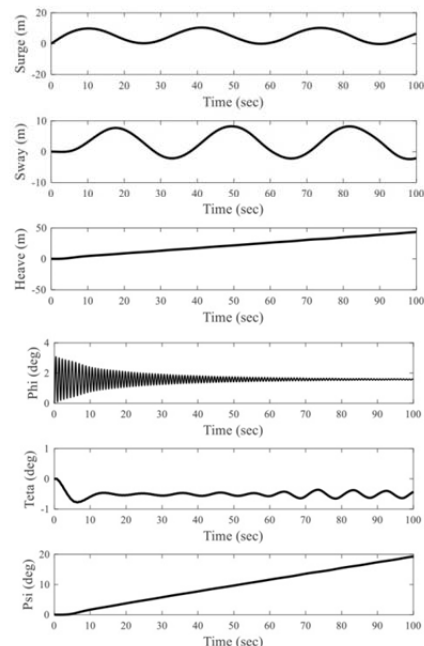


Fig. 4 Six-degree of freedom for AUV linear/ rotational situations

شکل 4 رفتار شش درجه آزادی شناور برای موقعیت های خطی و دورانی

¹ MATLAB

² Center of Gravity

³ Buoyancy force

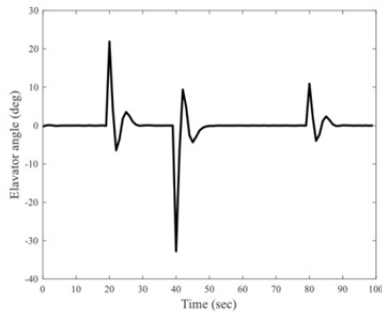


Fig. 9 The elevator angle (simple predictive control)

شکل 9 زاویه بالک های افقی شناور (کنترل پیش بین ساده)

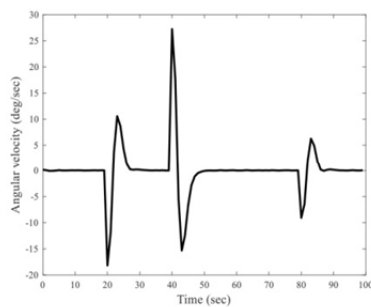


Fig. 10 The angular velocity in depth subsystem (simple predictive control)

شکل 10 سرعت زاویه ای شناور در زیرسیستم عمق (کنترل پیش بین ساده)

شده است.

4-3- شبیه سازی کنترل کننده پیش بین مقید و با استفاده از توابع لاگر

یکی از مسائل مهم سامانه های هوشمند، بلادرنگ بودن است. بلادرنگ بودن یک سیستم در پیاده سازی یک الگوریتم بسیار حائز اهمیت است و چه بسا روشی، پاسخ های معقول و مناسبی داشته باشد اما قابل پیاده سازی عملی نباشد. بنابراین بلادرنگ بودن خود یک چالش کنترلی است. همان طور که در قسمت قبل بیان شد در این مقاله برای کاهش بار محاسباتی و قابلیت بلادرنگ شدن سیستم از توابع متعامد لاگر استفاده شده است. در این بخش اجرای شبیه سازی با در نظر گرفتن قیود سیستم و محدودیت های موجود در سیگنال ورودی و نرخ تغییرات آن و همچنین استفاده از توابع متعامد لاگر انجام شده است. "شکل 11" شبیه سازی این روش در نشان داده شده است.

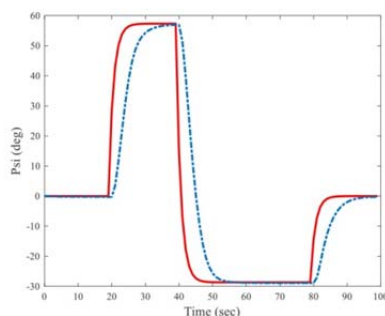


Fig. 11 Trajectory tracking for the Yaw maneuver in steering subsystem, Reference input (dash) and Output (dash dot). (Constrained predictive control with Laguerre)

شکل 11 تعقیب مسیر در مانور گردش شناور در زیرسیستم سمت، ورودی مرجع (خط)، خروجی (خط نقطه). (کنترل پیش بین مقید با لاگر)

اعمال می شود و به تبع آن زاویه بالک های عمودی تغییرات زیادی داشته است.

در "شکل 7" سرعت زاویه ای شناور برای زیرسیستم سمت در طراحی کنترل پیش بین ساده نشان داده شده است.

سناریو حرکتی زیرسیستم عمق نیز به صورتی در نظر گرفته شده که بالک های افقی در ثانیه 20 بایستی به میزانی تغییر وضعیت دهند که شناور 1 متر صعود کرده و در ثانیه 40 به میزانی تا 1.5 متر غوص و در ثانیه 80 به میزانی تغییر کند تا 0.5 متر صعود کند تا شناور بتواند بدون برخورد با موانع مسیر مشخص شده را طی کند. در "شکل 8" تا "شکل 10" نتایج حاصل از اعمال کنترل کننده پیش بین برای زیرسیستم عمق نشان داده شده است. "شکل 8" تعقیب مسیر در مانور چرخش شناور در زیرسیستم عمق را نشان می دهد. مشخص است خروجی (زاویه عمق) به خوبی ورودی مطلوب را دنبال می کند.

در "شکل 9" زاویه بالک های افقی شناور برای زیرسیستم عمق و در حالت طراحی کنترل پیش بین ساده نشان داده شده است.

در "شکل 10" سرعت زاویه ای شناور برای زیرسیستم عمق و در حالت طراحی کنترل پیش بین ساده نشان داده شده است.

نتایج ارائه شده در این قسمت نشان می دهد که مطلوب مسئله ی طراحی که همگرایی خروجی به ورودی مطلوب و صفر شدن سرعت زاویه ای شناور در حضور اغتشاشات، برآورده شده است. اما در این بخش محدودیت های سطوح کنترلی شناور مدنظر در نظر گرفته نشده و مشکلاتی همچون بزرگ بودن دامنه سیگنال ورودی و سرعت زاویه ای و زمان بر بودن محاسبات اجرای برنامه مشهود است. در بخش بعد راه کارهایی برای رفع این مشکلات بیان

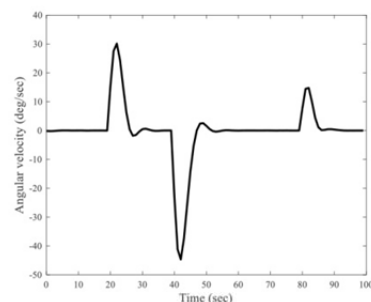


Fig. 7 The angular velocity in steering subsystem (simple predictive control)

شکل 7 سرعت زاویه ای شناور در زیرسیستم سمت (کنترل پیش بین ساده)

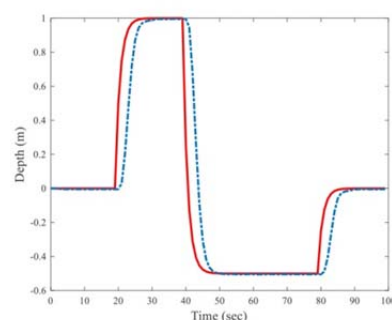


Fig. 8 Trajectory tracking for the Pitch maneuver in depth subsystem, Reference input (dash) and output (dash dot). (simple predictive control)

شکل 8 تعقیب مسیر در مانور چرخش در زیرسیستم عمق، ورودی مرجع (خط)، خروجی (خط نقطه). (کنترل پیش بین ساده)

همان‌طور که در "شکل 14" مشخص است خروجی (زاویه عمق) شناور به خوبی ورودی مطلوب را دنبال می‌کند. در "شکل 15" زاویه بالک‌های افقی شناور برای زیرسیستم عمق با استفاده از کنترل پیش‌بین مقید با لاگر نشان داده شده است.

در "شکل 16" سرعت زاویه‌ای شناور برای زیرسیستم عمق با استفاده از کنترل پیش‌بین مقید با لاگر نشان داده شده است.

همان‌طور که در شبیه‌سازی انجام شده در سناریوی کنترل پیش‌بین مقید و با استفاده از توابع لاگر نشان داده شده است، دامنه سیگنال کنترلی در مقایسه با دامنه این سیگنال در طراحی کنترل پیش‌بین ساده کمتر است. همچنین خروجی در مدت زمان بسیار کمتری در مقایسه با نتایج حاصل از کنترل پیش‌بین ساده به مسیر مرجع همگرا شده است. پس از اندازه‌گیری زمان‌های پردازش شده برای هر یک از دو کنترل کننده پیش‌بین ساده و کنترل کننده پیش‌بین مقید با استفاده از توابع لاگر، زمان محاسبات در زیرسیستم سمت برای کنترل پیش‌بین ساده 60.245 ثانیه و برای کنترل پیش‌بین مقید و با استفاده از توابع لاگر 5.313 ثانیه و در زیرسیستم عمق زمان محاسبات برای کنترل پیش‌بین ساده 86.235 ثانیه و برای کنترل پیش‌بین مقید و با استفاده از توابع لاگر 7.928 ثانیه به طول انجامید. شبیه‌سازی و زمان‌های به دست آمده با استفاده از رایانه همراه و با مشخصات سیستمی به صورت یک واحد پردازنده با پنج هسته و فرکانس کاری معادل 1.7 گیگاهرتز انجام شده است.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله کنترل کننده‌ی پیش‌بین مقید با استفاده از توابع لاگر برای کنترل سمت و عمق یک شناور زیرسطحی هوشمند در حضور اغتشاشات

همان‌طور که بیان شد در این قسمت از روش کنترل پیش‌بین مقید به منظور در نظر گرفتن قیود روی عملگر و به منظور کاهش بار محاسباتی از توابع لاگر استفاده شده است. همان‌طور که در "شکل 11" نشان داده شده است، خروجی شناور به خوبی ورودی مطلوب را دنبال می‌کند. بدیهی است تعقیب خروجی از سیگنال مرجع در سناریو اول (کنترل پیش‌بین ساده) به دلیل در نظر نگرفتن قیود، همگرا تر از این سناریو انجام شده است. در "شکل 12" زاویه بالک‌های عمودی شناور برای زیرسیستم سمت با استفاده از کنترل پیش‌بین مقید و با استفاده از توابع لاگر نشان داده شده است.

در "شکل 13" سرعت زاویه‌ای شناور برای زیرسیستم سمت با استفاده از کنترل پیش‌بین مقید با لاگر نشان داده شده است.

در "شکل 14" تعقیب مسیر در مانور چرخش شناور در زیرسیستم عمق برای کنترل پیش‌بین مقید و با استفاده از توابع لاگر نشان داده شده است.

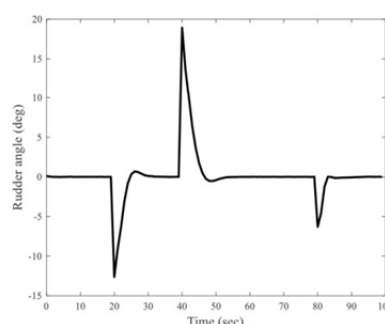


Fig. 12 The rudder angle (Constrained predictive control with Laguerre)

شکل 12: زاویه بالک‌های عمودی شناور (کنترل پیش‌بین مقید با لاگر)

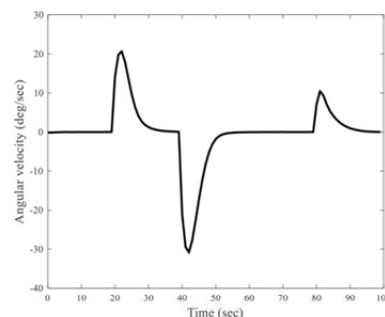


Fig. 13 The angular velocity in steering subsystem (Constrained predictive control with Laguerre)

شکل 13: سرعت زاویه‌ای در زیرسیستم سمت (کنترل پیش‌بین مقید با لاگر)

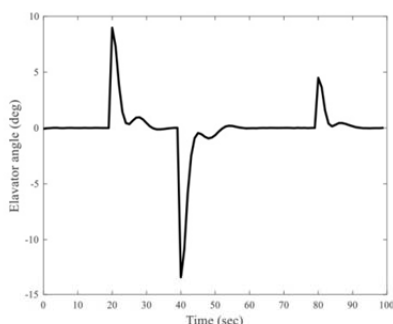


Fig. 15 The elevator angle (Constrained predictive control with Laguerre)

شکل 15: زاویه بالک‌های افقی شناور (کنترل پیش‌بین مقید با لاگر)

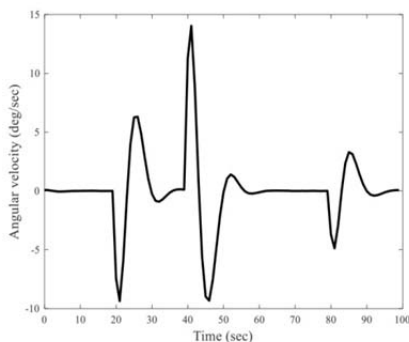


Fig. 16 The angular velocity in depth subsystem (Constrained predictive control with Laguerre)

شکل 16: سرعت زاویه‌ای در زیرسیستم عمق (کنترل پیش‌بین مقید با لاگر)

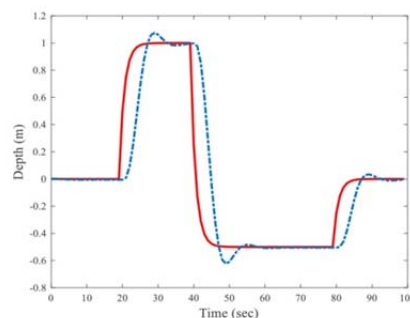


Fig. 14 Trajectory tracking for the Pitch maneuver in depth subsystem, Reference input (dash) and Output (dash dot). (Constrained predictive control with Laguerre)

شکل 14: تعقیب مسیر در مانور چرخش شناور در زیرسیستم عمق، ورودی مرجع (خط)، خروجی (خط نقطه). (کنترل پیش‌بین مقید با لاگر)

- No. 9, pp. 339-346, 2016. (in Persian)
- [3] A. Basohbat Novinzadeh, M. Asadi Matak, Design of stable nonlinear guidance of an underwater vehicle in the ship wake via estimated path by particle filter, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 260-266, 2017. (in Persian)
 - [4] N. Janatian Ghadikolae, A. Kamali Eigoli, H. Naderan Tahan, Investigation of effective parameters in point to point control for two-link fish robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 173-184, 2017. (in Persian)
 - [5] T. Ken, A. Edgar, P. Philippe, J. Beaujean, A robust fuzzy Autonomous Underwater Vehicle (AUV) docking approach for unknown current disturbances, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 37, No. 2, pp. 143-155, 2012.
 - [6] A. Budiyo, Model predictive control for autonomous underwater vehicle, *IEEE Journal of Geo-Marine Sciences*, Vol. 40, No. 2, pp. 191-199, 2011.
 - [7] M. Lashika, S. B. Williams, Model predictive control of an autonomous underwater vehicle in an in situ estimated water current profile, *IEEE Conference of Oceans*, Yeosu, South Korea: IEEE, pp. 21-24, 2012.
 - [8] J. Petrich, D. J. Stilwell, Robust control for an autonomous underwater vehicle that suppresses pitch and yaw coupling, *Ocean Engineering*, Vol. 38, No. 1, pp. 197-204, 2011.
 - [9] G. Valdovinos, L. Govinda, et al. Modelling, design and robust control of a remotely operated underwater vehicle, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-16, 2014.
 - [10] R. Yang, B. Celement, A. Mansour, Modeling of a complex-shaped underwater vehicle for robust control scheme, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 80, No. 3, pp. 491-506, 2015.
 - [11] I. Abraham, J. Yi, Model predictive control of buoyancy propelled autonomous underwater glider, *American Control Conference*, Chicago: IEEE, pp. 1181-1186, 2015.
 - [12] B. S. Park, Neural network-based tracking control of underactuated autonomous underwater vehicles with model uncertainties, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 137, No. 2, pp. 1-7, 2015.
 - [13] R. Cui, Ch. Yang, Y. Li, Adaptive neural network control of AUVs with control input nonlinearities using reinforcement learning, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 47, No. 6, pp. 1019-1029, 2017.
 - [14] D. C. Fernández, G. A. Hollinger, Model predictive control for underwater robots in ocean waves, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 2, No. 1, pp. 88-95, 2017.
 - [15] M. Ekramian, M. Danesh, A. Kamali, Nonlinear Model for Autonomous Underwater Vehicle and Identification Based on Least Square Algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 317-326, 2017. (in Persian)
 - [16] M. H. Korayem, M. Nazemizadeh, H. Ghaffarpour, Optimal Path Planning of Nonholonomic Mobile Robots using Optimal Control Method and Verification of the Method via Experimental Tests of the Scout Mobile Robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 87-94, 2012. (in Persian)
 - [17] T. I. Fossen, *Nonlinear Modelling and Control of Underwater Vehicles*, pp. 15-20, Norway: Engineering Cybernetics, 1991.
 - [18] T. I. Fossen, *Guidance and control of ocean vehicles*, pp. 30-45, New York: John Wiley and Sons Incorporated, 1994.
 - [19] S. S. Patel, K. Kumar, B. Botre, S. Akbar, Design of fuzzy logic based controller with pole placement for the control of yaw dynamics of an autonomous underwater vehicle, *Annual IEEE India Conference (INDICON)*, New Delhi: IEEE, pp. 1-6, 2015.
 - [20] T. J. Prestero, *Verification of a Six-Degree of freedom Simulation Model for the Remus Autonomous Underwater Vehicle*, PhD Thesis, Woods Hole Oceanographic Institution, Massachusetts institute of technology, 2001.
 - [21] S. M. Doherty, *Cross Body Thruster Control and Modeling of a Body of Revolution Autonomous Underwater Vehicle*, PhD Thesis, Naval Postgraduate School Monterey, 2011.
 - [22] L. Wang, Continuous time model predictive control design using orthonormal functions, *International Journal of Control*, Vol. 74, No. 16, pp. 1588-1600, 2001.
 - [23] E. F. Camacho, B. A. Carlos, *Model Predictive Control*, pp. 51-65, Berlin: Springer, 2013.
 - [24] B. Kouvaritakis, C. Mark, *Model Predictive Control*, pp. 121-135, Switzerland: Springer, 2016.
 - [25] L. Wang, *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®*, Second Edition, pp. 4-20, London: Springer, 2009.
 - [26] W. Yang, S. Boyd, Fast Model Predictive Control Using Online Optimization, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 267-278, 2010.

ناشی از جریان‌های زیرآبی طراحی شد. در ابتدا ضمن بررسی نیروها و گشتاورهای وارد بر سیستم، فرم کلی دینامیک غیرخطی شش درجه آزادی شناور زیرسطحی استخراج شد. با توجه به این‌که شناور زیرسطحی مورد نظر فقط سه عملگر کنترلی دارد، دینامیک آن کم‌عملگر بوده و کنترل شش درجه آزادی با دقت کافی انجام نمی‌گیرد. بدین منظور از کنترل مجزای سمت، عمق و سرعت استفاده شد و دینامیک شناور در صفحه‌ی افقی و قائم تجزیه شد. سپس الگوریتم کنترل پیش‌بین و فرمول‌بندی آن برای مسئله ارائه شد. با توجه به این‌که شناور زیرسطحی موردنظر دارای قیود بر روی عملگرها است از کنترل پیش‌بین مقید استفاده شد. با توجه به محدودیت‌های عملی، جهت کاهش بار محاسباتی و بهینه‌سازی در بازه زمانی از توابع معامد لاگر استفاده شد. برای شبیه‌سازی در ابتدا ارزیابی و صحت‌گذاری معادلات دینامیکی استخراج شده و اطمینان از عملکرد صحیح آن یک شبیه‌سازی حلقه باز بدون کنترل بر حرکت بالک‌ها و با در نظر گرفتن گشتاور پیشران‌ش و نیروی اعمالی از طرف آب انجام شد. همان‌طور که انتظار می‌رفت با توجه به این‌که مرکز جرم شناور پایین‌تر از مرکز شناوری آن است، باعث به سطح آب آمدن شناور شد و در نتیجه مدل دینامیکی غیرخطی استخراج شده عملکرد صحیح و قابل اطمینانی از خود نشان داد. در ادامه برای هر کدام از زیرسیستم‌های سمت و عمق در دو سناریو کنترل‌کننده پیش‌بین ساده و دیگری کنترل‌کننده پیش‌بین مقید و با استفاده از توابع لاگر انجام شد. در هر دو سناریو تعقیب مسیر مرجع در مانور گردش و چرخش شناور به ترتیب در زیرسیستم سمت و عمق به خوبی دنبال شد. همچنین نشان داده شد که با وجود اغتشاشات خارجی، ردیابی مسیر مختل نشده و کنترل‌کننده به‌طور مطلوبی مقاوم است. قیدهای در نظر گرفته شده برای سیگنال کنترلی و نرخ تغییرات آن به خوبی برآورده شده است. دامنه سیگنال کنترلی در طراحی به کمک توابع لاگر در مقایسه با دامنه این سیگنال در طراحی کنترل پیش‌بین ساده کمتر شده است. در نهایت مقایسه‌ای بین زمان‌های کنترل پیش‌بین ساده و کنترل پیش‌بین مقید و با استفاده از توابع لاگر انجام گرفت و نشان داده شد در سناریوی دوم علی‌رغم در نظر گرفتن قیود، زمان محاسبات نسبت به سناریوی اول، بسیار کمتر است. زمان محاسبات برای کنترل پیش‌بین مقید با استفاده از توابع لاگر در زیرسیستم سمت 91.18 درصد و در زیرسیستم عمق 90.81 درصد نسبت به کنترل پیش‌بین ساده کاهش یافت.

6- تقدیر و تشکر

از اعضای محترم مرکز علم و فناوری مهندسی مکترونیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر به دلیل همکاری بی‌دریغشان سپاسگزاری می‌شود.

7- مراجع

- [1] E. Zakeri, S. Farahat, Safe path planning and control of an Unmanned Underwater Vehicle (UUV) using particle swarm optimization and fuzzy logic control method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 199-210, 2015. (in Persian)
- [2] A. Selk Ghafari, K. Daryani Tabrizi, S. Hosseini, A. Meghdari, Design and fabrication of a robotic fish with flexible tail and the control of its movement using Fuzzy Logic Controller, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16,