

کنترل کننده pid-fuzzy type2 بهینه شده با الگوریتم NSGA_II

صفر ذاکری نیا^۱، مرتضی ذاکری نیا^۲، سیدمهدی رخت اعلا رستمی^۳

۱ هیئت علمی، گروه برق، دانشکده شناوری، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه السلام)، s.zakerinya@gmail.com

۲ کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه گلستان

۳ عضو هیئت علمی دانشگاه گلستان

چکیده:

این مقاله به طراحی و توسعه سیستم کنترل برای حلقه داخلی زیرسیستم یک ربات خودکار زیرسطحی (AUV) می پردازد. با استفاده از رویکرد فضای حالت سیستم غیرخطی چند ورودی چند خروجی (MIMO)، معادله خطی شده، بدست آمده و تابع تبدیل موردنظر از معادله خطی مربوطه استخراج می شود. پس از آن ابتدا تابع تبدیل را در معرض کنترل کننده PID و سپس در معرض کنترل کننده PID_fuzzy type 2 بررسی نموده و در انتها با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه، پارامترهای کنترل کننده فازی اعم از قوانین، توابع عضویت ورودی و خروجی و بهره خروجی بهینه می گردد. از مقایسه نتایج به دست آمده در این روش با کارهای مشابه پیشین، مشاهده می شود که روش پیشنهادی در این تحقیق قادر خواهد بود پارامترهای کنترلی ماکزیمم مقدار فراجهدش و زمان نشست متغیرهای حالت سیستم را به میزان چشمگیری بهبود بخشد. البته روش پیشنهادی، دارای حجم محاسبات بالایی در مدل غیرخطی و گندی روند اجرای شبیه سازی در مقایسه با کارهای پیشین بوده که برای رفع آن نیز راهکارهایی ارائه خواهد شد.

واژگان کلیدی:

فازی، کنترل کننده، الگوریتم ژنتیک، سیستم خطی، زیرسطحی خودکار، AUV

Pid-fuzzy type 2 controller optimized with NSGA_II algorithm

Safar Zakernia, Morteza Zakerinia, S.mehdi Rakht aala rostami

Department of Electricity, Imam Hossein University

Golestan University, Golestan, Gorgan, Iran

Faculty of Electrical Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran

Abstract:

This paper discusses the design and development of a control system for the internal loop subsystem of an AUV. Using the multi-input multi-output (MIMO) nonlinear system state space approach, the linearized equation is obtained, and the desired conversion function is extracted from the corresponding linear equation. Then first examine the conversion function exposed to PID controller and then to PID_fuzzy type 2 controller, then using multi-objective genetic algorithm, fuzzy controller parameters including rules, input and output membership functions and optimal output gain Turns. And the results obtained in this method will be compared with similar previous works. The proposed method in this research will be able to significantly improve the control parameters of the maximum value of the metamorphosis and the settling time of the system state variables. Of course, the proposed method will have a high volume of calculations in the nonlinear model and the slowness of the simulation process compared to previous works, which will also provide solutions to solve it.

Keywords:

Fuzzy, Controller, Genetic algorithm, Linear system, Automated subsurface, AUV

با اغتشاش و عدم قطعیت عملکرد مناسبی ندارد؛ نیاز به بهینه‌سازی داشته که پس‌از آن در این مقاله از روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه استفاده می‌شود. ترکیب کنترل فازی و الگوریتم ژنتیک می‌تواند به‌گونه‌ای باشد که ضمن تعیین بهینه‌ی قوانین کنترل فازی، نیاز آن را به اطلاعات فرد خبره از بین ببرد [۲].

الگوریتم تکاملی در نظر گرفته‌شده، تحت عنوان NSGA-II^۳ شناخته‌شده است که در واقع، یکی از حالت‌های چندهدفه‌ی مربوط به خانواده‌ی الگوریتم ژنتیک (GA^۴) می‌باشد. دلیل انتخاب الگوریتم ژنتیک، موازی بودن ماهیت جستجوی تصادفی آن‌ها در فضای مسئله است؛ زیرا هر کدام از کروموزوم‌های تصادفی تولیدشده به‌وسیله‌ی الگوریتم، یک نقطه شروع جدید برای جستجوی بخشی از فضای حالت مسئله به حساب آمده و جستجو در تمام آن‌ها به شکل هم‌زمان صورت می‌گیرد. علاوه بر آن، با هیچ محدودیتی در مسیر جستجو و انتخاب پاسخ‌های تصادفی روبرو نیست. هدف از به‌کارگیری الگوریتم NSGA-II در این پژوهش، تعیین بهینه‌ی قوانین مربوط به کنترل‌کننده‌ی فازی بدون نیاز به در دسترس بودن اطلاعات فرد خبره در مورد سیستم زیردریایی بدون سرنشین می‌باشد. همچنین لازم است، در صورت اعمال هرگونه اغتشاشی به سیستم، کنترل‌کننده کارایی خود را حفظ کرده و سیستم را پایدار نگه دارد [۳].

۲- توضیحات مدل

۲-۱- سیستم‌های مختصات، معادلات حرکتی و دینامیکی

AUV در زیر آب دارای آزادی حرکت در همه جهات، یعنی شش درجه آزادی است که در اصطلاح مهندسی دریایی حرکت در راستای محورهای طولی، عرضی و عمودی به ترتیب سرچ^۵، اسوی^۶، هیو^۷ و حرکت دورانی حول این سه محور را رول^۸، پیچ^۹ و یاو^{۱۰} می‌گویند (شکل ۱).

امروزه زیردریایی‌ها به ابزاری کاربردی در پژوهش‌ها، صنعت، کار و صنایع نظامی تبدیل گشته‌اند. به دلیل شرایط غیرقابل پیش‌بینی و پیچیده‌ی اقیانوس‌ها، در بسیاری از موارد شناسایی و مدل‌سازی سیستم زیردریایی از دقت بالایی برخوردار نبوده و مدل به‌دست‌آمده دارای عدم قطعیت می‌باشد. مسئله‌ی کنترل زیردریایی‌های بدون سرنشین به دلیل خواص غیرخطی، تغییرپذیری با زمان و اغتشاشات غیرقابل پیش‌بینی مانند نیروی تولیدشده توسط محیط، جریان‌های آبی و همچنین عدم مدل‌سازی دقیق به مسئله‌ای چالش‌برانگیز برای پژوهشگران تبدیل شده است. از این رو برای مقابله با عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات، بر روی کنترل این تجهیزات، توسط کنترل‌کننده‌های مختلف تمرکز شده است [۱]. زیردریایی‌های بدون سرنشین انواع مختلفی دارند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان از UUV، ROV و AUV نام برد. پس از بررسی پژوهش‌های چند سال اخیر، این نتیجه حاصل شد که یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در زمینه‌ی مطالعه‌ی آکادمیک روی سیستم‌های زیردریایی بدون سرنشین، انتخاب مدل ریاضی توصیف‌کننده‌ی فرآیند است؛ زیرا اولاً سیستم دارای چند ورودی-چندخروجی^۱ بوده و ثانیاً غیرخطی^۲ است؛ بنابراین سیستم به‌خودی‌خود پیچیده بوده و هر چه در مدل‌سازی جزئیات بیشتری لحاظ شود این پیچیدگی بیشتر می‌شود. در این مقاله در ابتدا کنترل‌کننده‌ی کلاسیک PID به‌عنوان کنترل‌کننده‌ی مبنا پیشنهاد می‌شود؛ دلیل این انتخاب، سادگی پیاده‌سازی و هزینه‌ی پایین می‌باشد؛ زیرا کنترل‌کننده‌های PID جزو ارزان‌ترین و پرکاربردترین‌ها در صنعت بوده که همواره گزینه‌ی نخست جهت پایدارسازی می‌باشند. از طرفی کنترل‌کننده PID در مواجهه با سیستم‌های غیرخطی عملکرد مناسبی ندارد به همین دلیل در مرحله بعدی از ترکیب کنترل‌کننده فازی نوع دوم با PID استفاده خواهد شد. کنترل‌کننده جدید نیز به دلیل اینکه اولاً نیاز به اطلاعات فرد خبره دارد و ثانیاً در مواجهه

^۷ heave = حرکت در صفحه عمودی (حرکت بالا و پایین)

^۸ roll = دوران AUV حول محور طولی

^۹ pitch = چرخش AUV حول محور عرضی

^{۱۰} yaw = چرخش AUV حول محور عمود بر سطح آب‌خور

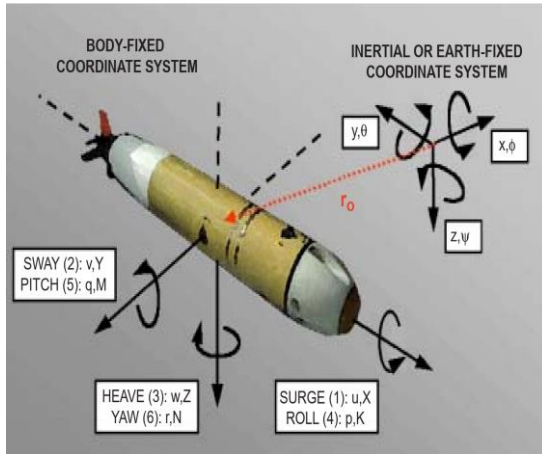
^۱ MIMO

^۲ nonlinear

^۳ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
^۴ Genetic Algorithm

^۵ surge = تغییرات سرعت AUV در جهت محور طولی

^۶ sway = حرکت در صفحه افقی یعنی اسوی (حرکت عرضی)



شکل ۲- شش درجه آزادی بر روی مدل AUV

۲-۲- معادلات نهایی برای شبیه‌سازی حرکت AUV

معادلات حرکت AUV به شرح زیر می‌باشد: [۵]

$$\dot{\phi} = p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta$$

$$\dot{\theta} = q \cos \phi - r \sin \phi$$

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

$$\dot{x} = u(\cos \theta \cos \psi) + v(\sin \phi \sin \theta \cos \psi) + w(\cos \phi \sin \theta \cos \psi) + \sin \phi \sin \psi$$

$$\dot{y} = u(\cos \theta \sin \psi) + v(\sin \phi \sin \theta \sin \psi) + w(\cos \phi \sin \theta \sin \psi) - \sin \phi \cos \psi$$

$$\dot{h} = u(\sin \theta) + v(-\sin \phi \cos \theta) + w(-\cos \phi \cos \theta)$$

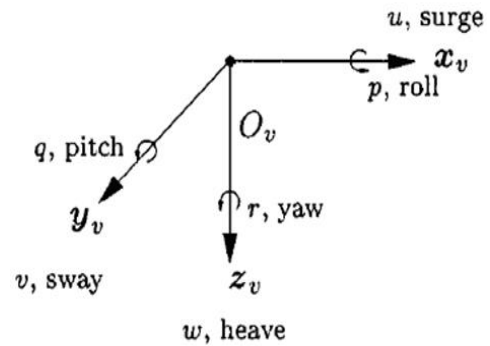
۳- طراحی کنترل کننده

بر اساس مدل خطی شامل ۳ حالت، یک کنترل کننده PID_FUZZY_type2 که با الگوریتم ژنتیک توسعه یافته بهینه شده، برای کنترل زاویه pitch طراحی می‌گردد. [۶]

۳-۱- مدل خطی شده حاوی سه حالت

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{M_q}{I_{yy} - M_{\dot{q}}} & 0 & \frac{M_{\theta}}{I_{yy} - M_{\dot{q}}} \\ 0 & 0 & -U \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} q \\ z \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{S_s} \\ I_{yy} - M_{\dot{q}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} * [S_s]$$

که در آن تابع تبدیل مربوط به زاویه Pitch وسیله زیرسطحی به شرح زیر است:



شکل ۱- شش درجه آزادی

معادلات شش درجه آزادی توسط دو محور مختصات ایجاد شده که مؤلفه‌های سرعت آن $[u, v, w, p, q, r]$ (سرعت، نوسان، سرعت بالا رفتن، غلتش، نرخ گام، نرخ انحراف) در محور ثابت بدنه تعریف می‌شوند؛ درحالی‌که محور ثابت روی زمین، چرخش‌ها و موقعیت‌های مربوطه را تعریف می‌کند $[x, y, z, \phi, \theta, \psi]$. وضعیت محورها و شش درجه آزادی در جدول (۱) به صورت کامل آمده است.

جدول ۱- وضعیت محورها و شش درجه آزادی

حالت‌ها	نمادها	سرعت خطی
Z	1:heave	W
Y	2:sway	V
X	3:surye	U
ψ	4:yaw	R
θ	5:pitch	Q
ϕ	6:roll	P

شش درجه آزادی بر روی مدل AUV در شکل ۲ نشان داده شده است. [۴]

جدول ۲- بهره‌های استفاده‌شده در بلوک‌های سیستم

کنترل‌کننده

کنترل‌کننده	K_p	K_i	K_d
Fuzzy_p	$GE * GU$		
Fuzzy_{pi}	$GCE * GU$	$\frac{GE}{GCE}$	
Fuzzy_{pd}	$GE * GU$		$\frac{GCE}{GU}$
Fuzzy_{pd+i}	$GE * GU$	GIE	$\frac{GCE}{GU}$

سیستم فازی مورد استفاده، دارای دو ورودی (خطا و مشتق خطا) و یک خروجی (سیگنال کنترلی) بوده و به ازای هر ورودی سیستم فازی، ۵ تابع عضویت و برای خروجی سیستم فازی، ۷ تابع عضویت قرار داده شده است که مجموعه قوانین آن مطابق جدول شماره ۳ می‌باشد.

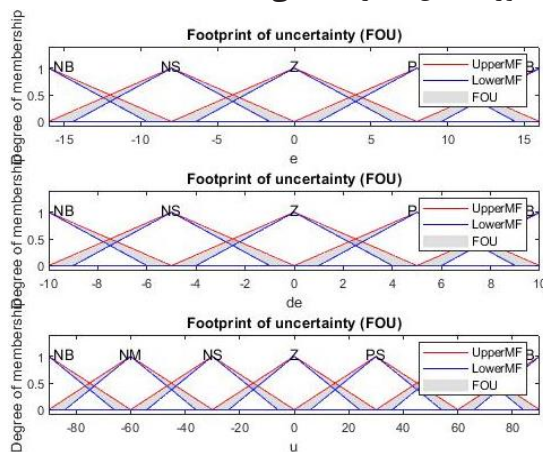
جدول ۳- توابع عضویت

$\dot{e} \setminus e$	NB	N	ZE	P	PB
NB	NB	NM	NS	NS	ZE
N	NM	NS	NS	ZE	PS
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
P	NS	ZE	PS	PS	PM
PB	ZE	PS	PS	PM	PB

نحوه قرائت جدول قوانین به صورت زیر است:

if (e is NB) and (ė is NB) then (u is NB)

توابع عضویت مربوط به سیستم فازی مورد استفاده، به صورت شکل شماره ۴ می‌باشد.



شکل ۴- دیاگرام‌های خروجی سیستم کنترل‌کننده فازی

۳-۳- بهینه‌سازی با الگوریتم NSGA_II

الگوریتم ژنتیک یک روش جستجوی تصادفی برای یافتن بهترین پاسخ برای مسائل پیچیده می‌باشد. این روش برای

$$G_{\theta}(s) = \frac{\theta(s)}{S_s(s)} = \frac{M_{S_s} - M_{\dot{q}}}{I_{yy} - M_{\dot{q}}} = \frac{3.18}{s^2 - \frac{M_q}{I_{yy} - M_q} s - \frac{M_{\theta}}{I_{yy} - M_{\dot{q}}}}$$

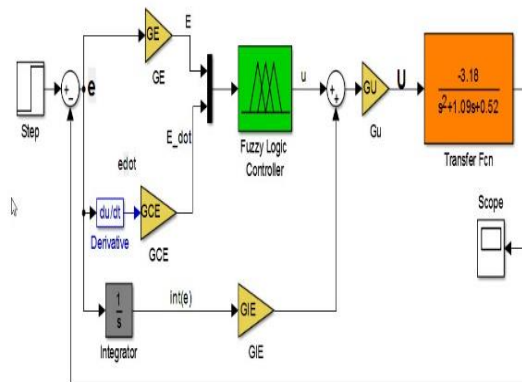
$$G_{\theta}(s) = -\frac{3.18}{s^2 + 1.09s + 0.52}$$

$$s_{1,2} = -0.545 \pm 0.4722i$$

$$e_{\theta} = \theta_d - \theta$$

۳-۲- طراحی کنترل‌کننده PID_Fuzzy_type2 :

با توجه به سیستم کنترلی مورد نظر و ویژگی‌های دینامیکی و سینماتیکی مدل AUV، بلوک‌های سیستم کنترل کننده PID_Fuzzy_type2 طراحی می‌گردد (شکل ۳).



شکل ۳- سیستم کنترل‌کننده PID_Fuzzy_type2

به کمک نرم‌افزار متلب پارامترهای کنترل‌کننده PID به صورت زیر استخراج می‌گردد:

$$PID \text{ Controller 1: } \begin{cases} P = -0.369202709263227 \\ I = -0.185931235675294 \\ D = -0.1742458498047 \end{cases}$$

که در آن بهره‌های استفاده‌شده در بلوک‌های سیستم کنترل‌کننده PID، با استفاده از جدول ۲ بدست آمده و بر اساس تعریف داریم:

$$GCE = \frac{K_d}{GU}, \quad GIE = \frac{K_i}{GU} GU = \frac{K_p}{GE}$$

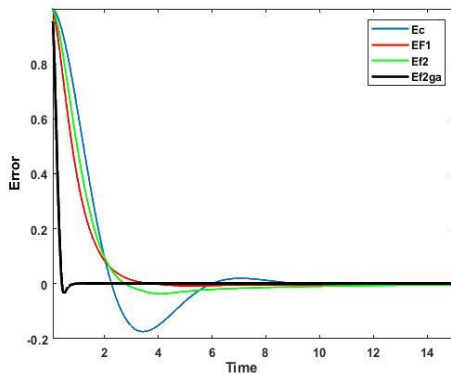
که در آن GE ضریب خطا و عددی دلخواه بوده و بقیه پارامترهای GCE, GIE, GU به نسبت آن تنظیم می‌شوند.

۴- نتایج بدست آمده

سیستم را در دو حالت، یعنی بدون حضور اغتشاش و در مرحله بعدی با وجود اغتشاش مورد بررسی قرار داده و نتایج حاصل را مورد مقایسه قرار می‌دهیم.

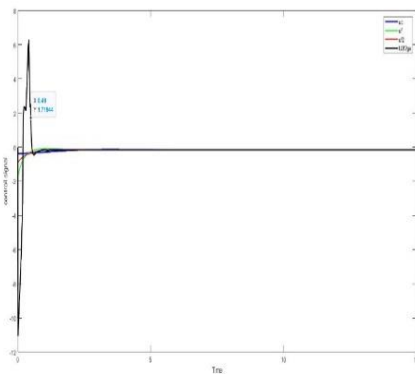
۴-۱- نتایج بدست آمده بدون در نظر گرفتن اغتشاش

ابتدا سیستم را بدون وجود اغتشاش مورد آزمایش قرار می‌دهیم (شکل‌های شماره‌ی ۶ تا ۹).



شکل ۶- مقایسه مقادیر خطا در کنترل کننده‌های

PID, PIDFuzzy, PIDFuzzytype2, PIDFuzzy2_optimize by NSGA_II



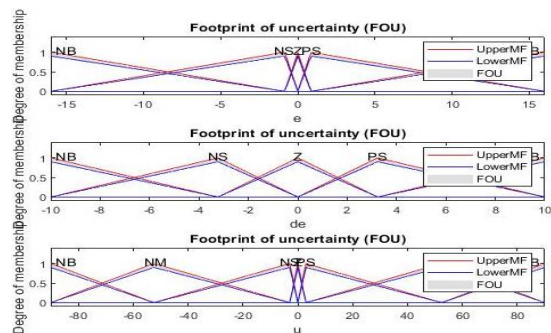
شکل ۷- مقایسه مقادیر سیگنال کنترلی برای

کنترل کننده‌های PID, PIDFuzzy, PIDFuzzytype2, PIDFuzzy2_optimize by NSGA_II

اولین بار توسط آقای جان هالند^{۱۱} مطرح شد. در طی چند سال اخیر این روش به ابزاری مهم در حل بسیاری از مسائل جستجو، بهینه‌سازی و یادگیری ماشینی تبدیل شده است. الگوریتم ژنتیک یک فرآیند تکراری است که در هر تکرار یک تعداد جهت $P(t)$ با اندازه ثابت از حل‌های کاندیدا را حفظ می‌کند. الگوریتم با انتخاب تصادفی جمعیتی، از ورودی‌های تابع که با رشته‌های بیتی نشان داده می‌شوند شروع گردیده و در طول هر گام تکرار که هر تکرار یک نسل نامیده می‌شود، ساختارهای جمعیت فعلی ارزیابی شده و بر پایه این ارزیابی، نسل جدیدی از حل‌های کاندیدا، ایجاد می‌شوند. در الگوریتم ژنتیک حل‌های کاندیدای ایجادشده فعلی به‌طور میانگین بهتر از حل‌های نسل قبلی بوده و این امر دلیل تکرار نسل‌ها در الگوریتم ژنتیک می‌باشد [۷]. تابع هزینه‌ای که برای الگوریتم تکاملی در نظر گرفته شده، شامل دو پارامتر انتگرال مربعات خطا و اضافه جهش^{۱۲} مقدار خروجی می‌باشد.

$$Fitness\ function = \int e^2(t) dt \quad \& \quad max(y)$$

در این قسمت پارامترهای قوانین، توابع عضویت ورودی و خروجی، همچنین بهره سیگنال ورودی، توسط این الگوریتم بهینه گردیده که نتایج حاصله در شکل شماره‌ی ۵ و جدول شماره‌ی ۴ آمده است.



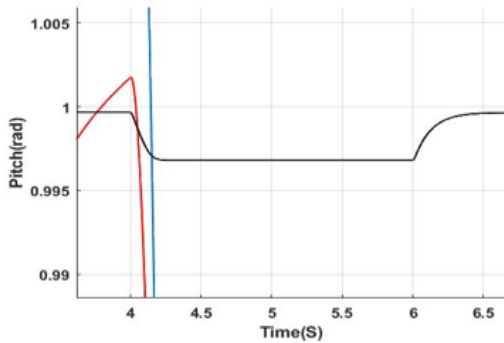
شکل ۵- دیاگرام‌های بهینه خروجی سیستم کنترل کننده فازی

جدول ۴- توابع عضویت ورودی و خروجی

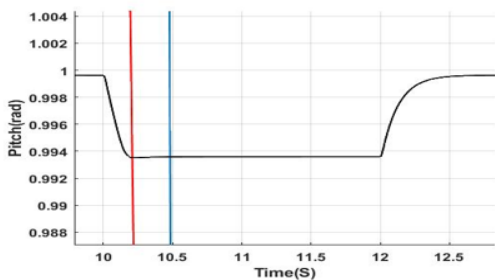
$e \setminus e$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NS	NB	NS	NM	ZE
NS	NB	NS	NM	ZE	PM
ZE	NS	NM	ZE	PM	PS
PS	NM	ZE	PM	PS	PB
PB	ZE	PM	PS	PB	PS

¹² overshoot

¹¹ John Holland



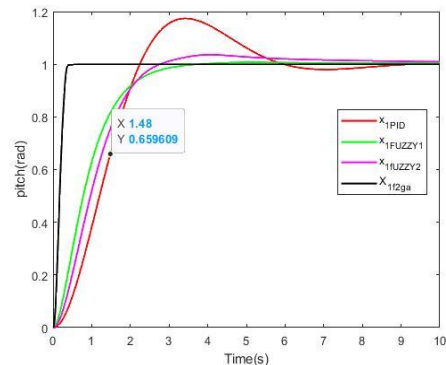
شکل ۱۱- بزرگنمایی عملکرد سیستم در برابر اغتشاش در زمان ۴ ثانیه



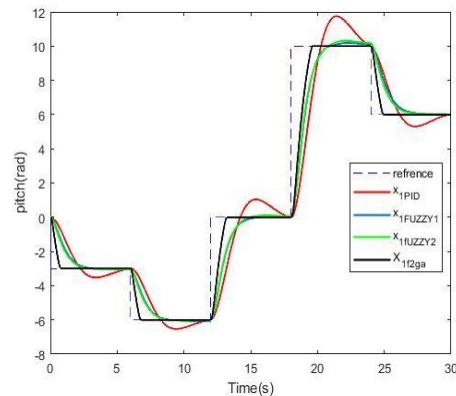
شکل ۱۲- بزرگنمایی عملکرد سیستم در برابر اغتشاش در زمان ۱۰ ثانیه

۴-۳- بررسی پارامتری کنترل کننده های استفاده شده

همانگونه که انتظار می رود سیستم کنترلی مورد نظر توانسته است پیش بینی های ارائه شده را محقق کند. پس از مقایسه کنترل کننده های PID، PID فازی نوع دوم و PID فازی نوع دوم به کمک الگوریتم هوشمند ژنتیک توسعه یافته NSGAI، پارامترهایی که برای یک کنترل کننده اهمیت داشته و از شکل های شماره ۸ و شماره ۱۰ استخراج شده است در جدول شماره ۵ مورد بررسی قرار گرفته است.

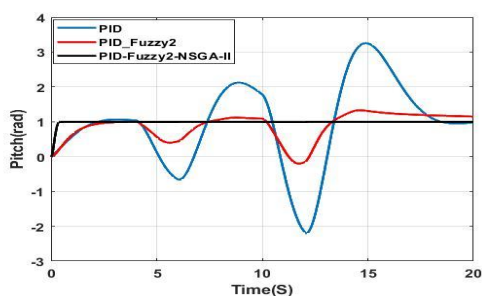


شکل ۸- مقایسه مقادیر خروجی برای سیگنال ورودی واحد در کنترل کننده های PID, PIDFuzzy, PIDFuzzytype2, PIDFuzzy2_optimize by NSGA_II



شکل ۹- مقایسه مقادیر خروجی به ازای سناریوی تعریف شده در کنترل کننده های PID, PIDFuzzy, PIDFuzzytype2, PIDFuzzy2_optimize by NSGA_II

۴-۲- نتایج بدست آمده در حضور اغتشاش در این مرحله سیستم را با حضور اغتشاش که در زمان های ۴ و ۱۰ ثانیه به آن اعمال شده است، مورد بررسی قرار می دهیم (شکل های شماره ۱۰ تا ۱۲).



شکل ۱۰- تأثیر اغتشاش ورودی به سیستم در خروجی سیستم pitch

جدول ۵- پارامترهای به دست آمده از خروجی سیستم بر اساس کنترل کننده‌ی PID و PID فازی نوع دوم و PID فازی نوع دوم به کمک الگوریتم هوشمند ژنتیک توسعه یافته‌ی NSGAI

پارامترها	PID	PID_fuzzy type2	PID_fuzzy type2_NSGA-II
حالت ایده‌آل	۲,۹۸۲۶	۲,۹۹۸۷	۱,۸۰۴۳
در حضور اغتشاش	۷۵,۱۱۵۷	۹,۶۸۷۸	۱,۸۰۴۵
حالت ایده‌آل	۶,۷	۰,۶۱۲۷	۰
در حضور اغتشاش	۲۳۲,۱۵	۱۵,۷۳	۰,۰۰۱۵
حالت ایده‌آل	۷,۱	۲,۸۸۴۴	۰,۳۶۱۲
در حضور اغتشاش	۱۸,۲۵	۱۸,۴۵	۰,۳۶۱۲۲

خواسته‌های طراح را از سیستم کنترل، بهتر و مطلوب‌تر برآورده نماید.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

۵-۱- نتیجه‌گیری

از مقایسه‌ی نتایج به دست آمده در این روش با کارهای مشابه پیشین، مشاهده شد که روش پیشنهادی در این تحقیق توانسته است پارامترهای کنترلی ماکزیمم مقدار فرآهش و زمان نشست متغیرهای حالت سیستم را به میزان چشمگیری بهبود ببخشد. از معایب روش پیشنهادی، می‌توان به حجم بالای محاسبات در مدل غیرخطی آن و کندی روند اجرای شبیه‌سازی در مقایسه با کارهای پیشین اشاره کرد که می‌تواند ناشی از ترکیبی بودن الگوریتم پیشنهادی باشد. برای مقابله با چنین پدیده‌ای، می‌توان بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوشمند نوین همچون بهینه‌سازی چندمنظوره‌ی تکاملی را به عنوان بخشی از کارهای آینده در این حوزه پیشنهاد کرد.

۵-۲- پیشنهادات

همان‌گونه که دیده شد، کنترل نهایی این پژوهش از نوع Fuzzy Type 2-PID بهینه‌شده با الگوریتم NSGA-II گویای این موضوع بود که کنترل کننده‌های هوشمند با وجود تمام قابلیت‌های مطلوب آن، جهت عملکرد صحیح برای هر سیستم، نیاز به اطلاعات فرد خبره در مورد همان سیستم دارند؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود استفاده از الگوریتم فازی نوع دوم برای بهبود عملکرد کنترل کننده مد لغزشی مورد استفاده قرار گرفته و یا کنترل کننده فازی نوع دوم با شبکه‌های عصبی ادغام شود تا قابلیت یادگیری شبکه عصبی افزایش یابد و یا می‌توان بجای استفاده از PID معمولی از PID مرتبه کسری در ساختار کنترل ترکیبی پیشنهادی استفاده کرد تا

منابع

- [1] Y. Xia, K. Xu, Y. Li, G. Xu, and X. Xiang, "Improved line-of-sight trajectory tracking control of under-actuated AUV subjects to ocean currents and input saturation," *Ocean Eng.*, vol. 174, pp. 14–30, 2019.
- [2] H. Abderazek, D. Ferhat, and A. Ivana, "Adaptive mixed differential evolution algorithm for bi-objective tooth profile spur gear optimization," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, pp. 1–11, 2016.
- [3] M. Pazooki and A. H. Mazinan, "Hybrid fuzzy-based sliding-mode control approach, optimized by genetic algorithm for quadrotor unmanned aerial vehicles," *Complex Intell. Syst.*, vol. 4, no. 2, pp. 79–93, 2018.
- [4] Yue, C., S. Guo, and M. Li. ANSYS FLUENT-based modeling and hydrodynamic analysis for a spherical underwater robot. in 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2013
- [5]: Soroush Vahid1, Kaveh Javanmard " Modeling and Control of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) In Heading and Depth Attitude via PPD Controller with State Feedback " *IJCOE No. 4 / Autumn 2016 p (11-18)*
- [6] T. T. J. Presterio, "Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle," PhD Thesis, Massachusetts institute of technology, 2001.
- [7] C. A. C. Coello, G. B. Lamont, D. A. Van Veldhuizen, and others, *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*, vol. 5. Springer, 2007.