

طراحی کنترل کننده شبکه عصبی تابع پایه شعاعی تطبیقی با ترم مقاوم مد لغزشی برای شناورهای زیر سطحی

بهداد گرانمهر^۱، کامران وفایی^۲

Behdad.Geranmehr@Gmail.com

۲،۱- دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد واحد بوئین زهرا، قزوین، ایران

چکیده

در این مقاله شناورهای زیر سطحی برای طراحی کنترل غیر خطی که هم برای نقص عملگر شناورهای سطحی و هم برای تضمین ردیابی مناسب باشند مورد بررسی قرار گرفته اند. بدین منظور کنترلگری با توانمندی تخمین هوشمند نامعینی ها و جبران سازی اغتشاشات جریان آب اقیانوس برای هر دو مد کنترل عمق و سمت پیشنهاد می شود. برای تقریب دینامیک های غیر خطی نامعین، کنترل کننده شبکه عصبی تابع پایه شعاعی تطبیقی پیشنهاد شده است. در ادامه، مساله طراحی یک کنترل کننده شبکه عصبی تابع پایه شعاعی تطبیقی با یک ترم مد لغزشی تقویت شده است تا خطای ردیابی و تنظیم در حضور نامعینی ها بهبود یابد در نتیجه هم بر عدم قطعیت ها غلبه خواهد شد و هم در کنترل عمق، اثر نقص عملگر در راستای عمق جبران خواهد شد. همچنین، پایداری روش کنترلی پیشنهاد شده با تئوری لیاپانوف اثبات شده است. طراحی و شبیه سازی ها بدون ساده سازی سیستم دینامیکی بکار گرفته شده است. اگر چه در این مقاله روش کنترلی پیشنهاد شده روی مدل REMUS پیاده سازی اما این روش قابلیت پیاده سازی روی هر شناور سطحی و زیر سطحی را دارا می باشد.

واژگان کلیدی: شناورهای زیر سطحی، REMUS، شبکه عصبی تابعی پایه شعاعی تطبیقی، کنترل مد لغزشی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۰۲/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۶/۰۷/۱۷

۱- مقدمه

امروزه شاهد کاربردهای فراگیر شناورهای زیر سطحی در عرصه های گوناگون علمی، تجاری و نظامی هستیم. ازسوی دیگر شناورهای زیر سطحی به دلیل مدل دینامیکی با غیرخطی‌های شدید، عدم قطعیت‌ها و پارامترهای نامعین مورد توجه هستند. علاوه بر این رفتار پیچیده شناورهای زیر سطحی و محدودیت‌ها در طراحی کنترل برای حرکت شش درجه آزادی موجب شده است که طراحان از ساده سازی‌هایی نظیر خطی سازی یا دکوپله^۱ کردن معادلات حرکت غیر خطی جهت غلبه بر این پیچیدگی‌ها استفاده نمایند.

چو و ژو^۲ [۱] یک کنترلگر را براساس کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی برای رفع اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها تنها برای کنترل سمت ارائه نموده اند. گرانمهر و رفیعی نکو^۳ [۲] مطالعه جامعی را روی مدل کاملا دکوپله^۴ و حرکت شش درجه آزادی شناور زیر سطحی با کنترل کننده بهینه به روش متغیر معادله ریکاتی وابسته به حالت انجام داده اند و همچنین مدل دکوپله مدهای سمت و عمق را با کنترل کننده بهینه با ترم مقاوم بررسی نموده اند که اگر چه روش بهینه می‌باشد اما به عدم قطعیت و اغتشاشات حساس می‌باشد [3, 4]. در پژوهش‌های دیگر، کنترل کننده مد لغزشی و تکنیک گام به عقب برای کنترل شناورهای زیر سطحی بکار گرفته شده است [5].

برای اولین بار کنترل کننده شبکه عصبی تابع پایه شعاعی تطبیقی توسط لوئیس و دوستانش^۵ [6] روی بازو رباتیکی سری پیاده سازی شد و یک ترم مقاوم مد لغزشی جهت تضمین کارایی ردیابی به آن افزوده شد. اخیرا، کنترل کننده شبکه عصبی تابع پایه شعاعی تطبیقی در کاربردهای گوناگونی مورد استفاده قرار گرفته است [7-10].

از آنجایی که شناورهای زیر سطحی، سیستم‌های با نقص عملگر^۶ به شمار می‌روند و اعمال نیروی کنترلی در تمام جهات بطور مستقیم میسر نمی‌باشد. گرانمهر و رفیعی نکو^۴ [4] برای رفع مشکل نقص عملگر در کنترل عمق از

یک جبران‌ساز ترم مقاوم در کنار کنترل بهینه استفاده کرده‌اند. اما روش پیشنهادی آنها در مقابل عدم قطعیت‌های بیشتر و بخصوص در مقابل اغتشاشات ضعیف می‌باشد لذا در این مقاله، با الهام از آنها، برای اولین بار اتوپایلویت سمت و عمق برای شناور زیر سطحی REMUS بر پایه کنترل کننده شبکه عصبی تابع پایه شعاعی تطبیقی با ترم مقاوم سطح لغزشی طراحی شده است. علاوه بر آن برای شبیه سازی شرایط واقعی و همچنین پررنگ کردن توانایی ترم های تطبیقی و مقاوم بکار رفته در روش کنترلی پیشنهادی، جریان‌های آب اقیانوس به عنوان اغتشاش به سیستم اضافه شده است. روش کنترلی پیشنهادی با بهره گیری توامان از شبکه عصبی پایه شعاعی تطبیقی و ترم مقاوم این توانایی را دارد تا در حضور اغتشاشات محیطی هم بر نقص عملگر در راستای حرکتی عمق و هم در تضمین ردیابی حرکت صفحه‌ای سمت بخوبی عمل نماید. در پایان، اثبات پایداری روش کنترلی پیشنهادی نیز با کمک تئوری لیاپانوف بیان شده است.

در ادامه این مقاله؛ مدل ریاضی یک شناور در مد های سمت و عمق در بخش ۲، ساختار روش کنترلی در بخش ۳، پایده سازی قانون کنترل روی شناور REMUS در بخش ۴، نتایج شبیه سازی در بخش ۵ و در پایان نتیجه گیری در بخش ۶ آورده شده است.

۲- مدل دینامیکی شناورهای زیر سطحی

به دلیل وجود نیروهای درگ هیدرودینامیکی، میرایی و بالابر، کریولیس و جانب مرکز، ثقل و شناوری و پیشران، دینامیک‌های سیستم شناورها بسیار غیرخطی، کوپله و متغیر با زمان می باشد. نمای شماتیک یک شناور زیر سطحی با دستگاه‌های مختصات مرتبط با آن در شکل (۱) به تصویر کشیده شده است. این دستگاه‌های مختصات که شامل دستگاه مختصات متصل به جسم و دستگاه مختصات متصل به زمین می‌باشد برای بیان معادلات حرکت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- 1 Decoupled
- 2 Chu and Zhu
- 3 Geranmehr and Rafee Nekoo
- 4 Fully Coupled
- 5 Lewis and et al.
- 6 Under Actuated

که در آن

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \\ -\mathbf{M}(\boldsymbol{\eta})^{-1}(\mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{G}(\boldsymbol{\eta})) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}(t)) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{6 \times 1} \\ \mathbf{M}(\boldsymbol{\eta})^{-1} \end{bmatrix}$$

با مقایسه بین سیستم کاملا کوپله و دکوپله پی می‌بریم که می‌توان پیچیدگی سیستم را با بیان دکوپله کاهش داد. یک شناور شش درجه آزادی را می‌توان با سه زیر سیستم دکوپله یا کوپله نرم بیان کرد؛ سرعت، سمت و عمق [۲]. [۱۱]

۲-۱ سمت

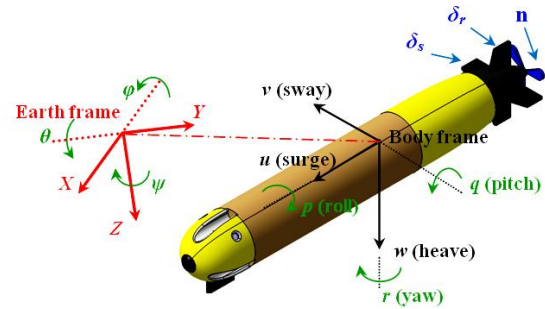
معمولا زیر سیستم سمت توسط حرکت شناور در صفحه‌ی X-Y با متغیرهای حالت $\mathbf{x}(t) = [\psi \ v \ r]^T$ بیان می‌شود. اما در این مقاله برای نشان دادن توانایی روش کنترلی از سیستم نیم-کوپله بهره گرفته شده است که با متغیرهای حالت $\mathbf{x}(t) = [\boldsymbol{\eta}(t) \ \mathbf{v}(t)]^T$ که $\boldsymbol{\eta}(t) = [x \ y]^T$ و $\mathbf{v}(t) = [u \ v]^T$ می‌باشند. در این بیان نیم کوپله علاوه بر ورودی کنترل سکان (δ_r) برای سمت، سرعت دورانی پروانه (n) نیز برای کنترل سرعت سرج شناور به عنوان ورودی به سیستم وارد می‌شود.

بر پایه متغیرهای حالت تعریف شده و بازنویسی معادله (۱) برای دینامیک سمت شناور؛

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \\ \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -Y_{uv}u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -X_{u|u}|u| & 0 \\ 0 & -Y_{v|v}|v| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} = \boldsymbol{\tau}, \quad (5)$$

$\mathbf{D}(\mathbf{v})$



شکل (۱) شماییک شش درجه آزادی شناور زیر سطحی [4]

برپایه نامگذاری استفاده شده در شکل (۱) معادله حرکت کلی شناور شش درجه آزادی بوسیله متغیرهای حالت $\boldsymbol{\eta} = [\boldsymbol{\eta}_1 \ \boldsymbol{\eta}_2]^T = [x_c \ y_c \ z_c \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ و $\mathbf{v} = [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2]^T = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ به صورت زیر قابل بیان است:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \\ \mathbf{M}(\boldsymbol{\eta})\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{G}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} \end{cases} \quad (1)$$

جای که $\mathbf{M} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ ماتریس اینرسی، $\mathbf{C}(\mathbf{v}) \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ ماتریس کریولیس و جانب مرکز، $\mathbf{D}(\mathbf{v}) \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ ماتریس میرایی و $\mathbf{G}(\boldsymbol{\eta}) \in \mathcal{R}^{6 \times 1}$ ماتریس نیروهای گرانش به شناوری می‌باشند. همچنین $\boldsymbol{\tau} \in \mathcal{R}^{6 \times 1}$ بردار ورودی‌های کنترل نسبت به نیروها و گشتاورهای عمل کننده AUV است.

سینماتیک AUV در دستگاه جهانی بوسیله زوایای اوپلر بیان می‌شود:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\boldsymbol{\eta}) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{T}(\boldsymbol{\eta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

در آن $\mathbf{R}(\boldsymbol{\eta})$ ماتریس دوران از دستگاه مختصات متصل به جسم به دستگاه مختصات متصل به زمین و $\mathbf{T}(\boldsymbol{\eta})$ ماتریس انتقال برای سرعت‌های انتقالی بین دو دستگاه است. بردار متغیرهای حالت بصورت $\mathbf{x} = [x_c \ y_c \ z_c \ \phi \ \theta \ \psi \ u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ بیان می‌شوند. نمایش فضای حالت سیستم بصورت خواهد شد:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{g}(\mathbf{x}(t))\mathbf{u}(t), \quad (3)$$

1 Semi coupled
2 Surge

مرکزی C تشکیل شده است که بردار پارامتری هم بعد با بردار ورودی x است. فاصله اقلیدوسی بین مرکز و شبکه بردارهای ورودی بوسیله $\|x(t) - c_j(t)\|$ بیان می‌شود. خروجی لایه پنهان بوسیله تابع فعال‌سازی $h_j(t)$ تولید می‌شود [۶]؛

$$h_j(t) = \exp\left(-\frac{\|x(t) - c_j(t)\|^2}{2b_j^2}\right), \quad j=1, \dots, m \quad (۸)$$

در آن b_j گره‌هایی با مقدار اسکالر مثبت به نام پهنا می‌باشند و m تعداد گره‌های لایه‌های پنهان است. لایه خروجی یک ترکیب وزن‌دار خطی است؛

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^m w_{ji} h_j(t), \quad i=1, \dots, n \quad (۹)$$

که w وزن لایه‌های خروجی، n تعداد گره‌های خروجی‌ها و y خروجی شبکه است.

۲-۳ الگوریتم تابع پایه شعاعی تطبیقی

روش کنترلی شبکه عصبی تابع پایه شعاعی تطبیقی برخط بر اساس تئوری پایداری لیاپانوف طراحی شده است تا تابع غیرخطی نامعین را تخمین بزند. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود از سیگنال مطلوب $e(t) = \eta_d(t) - \eta(t)$ برای ساختن بردار ورودی به شکل $[e \quad \dot{e}]$ استفاده می‌شود و از RBF برای طراحی $\hat{f}(x)$ تا تابع خروجی $f(x)$ تقریب زده شود. برای بردار خروجی [۶]؛

$$\hat{f}(x) = \hat{W}^T \mathbf{h}(x). \quad (۱۰)$$

۳-۳ کنترل مد لغزشی

کنترل مد لغزشی یک روش کنترل غیرخطی برای اصلاح دینامیک‌های سیستم بوسیله سیگنال‌های کنترلی گسسته است.

در آن $\{X_u, Y_v\}$ ضرایب جرم افزوده، Y_{uv} ضریب کریولیس و جانب مرکز و $\{X_{|u|}, Y_{|v|}\}$ میرایی غیر خطی هستند [11].

۲-۲ عمق

زیر سیستم عمق حرکت شناور در صفحه $X-Z$ را بیان می‌کند. متغیرهای حالت در این زیر سیستم کاملاً کوپله بصورت $\mathbf{x}(t) = [\boldsymbol{\eta}(t) \quad \mathbf{v}(t)]^T$ است که در آن $\boldsymbol{\eta}(t) = [z \quad \theta]^T$ و $\mathbf{v}(t) = [w \quad q]^T$ است. با بازنویسی معادله (۱) بر حسب متغیرهای حالت اشاره شده؛

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\eta}} \\ \dot{\mathbf{v}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) & \mathbf{y} \\ \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix}, \quad (۶)$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} m - Z_{\dot{w}} & -(mx_G + Z_{\dot{q}}) \\ -(mx_G + M_{\dot{w}}) & I_y - M_{\dot{w}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} -Z_{uw}u & -Z_{uq}u - mu - mqz_G \\ mu - M_{uw}u + mqz_G & -M_{uq}u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} -Z_{w|w}|w| & -Z_{q|q}|q| \\ -M_{w|w}|w| & -M_{q|q}|q| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} \cos(\theta)(B - W) \\ -\sin(\theta)(Bz_B - Wz_G) - \cos(\theta)(Bx_B - Wx_G) \end{bmatrix} = \tau. \end{aligned} \quad (۷)$$

در آن I_y اینرسی حول محور y ، $\{Z_{\dot{w}}, Z_{\dot{q}}, M_{\dot{w}}, M_{\dot{q}}\}$ ، ضرایب جرم افزوده، $\{Z_{uw}, Z_{uq}, M_{uw}, M_{uq}\}$ ضرایب کریولیس و جانب مرکز و $\{Z_{w|w}, M_{q|q}\}$ ضرایب میرایی غیر خطی هستند [11].

۳- طراحی کنترل کننده شبکه عصبی تابع پایه شعاعی تطبیقی با ترم مقاوم مد لغزشی

۱-۳ الگوریتم تابع پایه شعاعی

شبکه عصبی تابع پایه شعاعی از سه لایه تشکیل شده است؛ لایه ورودی، لایه پنهان و لایه خروجی. تابع پایه شعاعی نرون‌ها را در لایه پنهان فعال می‌کند. لایه پنهان متشکل از آرایه‌های از واحدهای محاسباتی است که گره‌های پنهان نامیده می‌شود. هر گره پنهان از یک بردار

۴- پیاده سازی

با توجه به معادله حرکت AUV و خطای ردیابی $e(t) = \eta_d(t) - \eta(t)$ تابع مد لغزشی بصورت $s = \dot{e} - \Lambda e$ تعریف می‌شود بطوری که $\Lambda = \Lambda^T = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \dots \ \lambda_n]^T > 0$ در آن لغزش $\dot{\eta} = -s + \dot{\eta}_d + \Lambda e$ خواهیم داشت؛

$$\begin{aligned} M\dot{s} &= M(\dot{\eta}_d - \ddot{\eta} + \Lambda\dot{e}) \\ &= M(\ddot{\eta}_d + \Lambda\dot{e}) - M(\ddot{\eta}) \\ &= M(\ddot{\eta}_d + \Lambda\dot{e}) + C\dot{\eta} + G + \tau_d - \tau \\ &= -Cs - \tau + f(x) + \tau_d \end{aligned} \quad (14)$$

جایی که $f(x) = M\ddot{\eta}_r + C\dot{\eta}_r + G$ ، $\dot{\eta}_r = \dot{\eta}_d + \Lambda e$ هدف طراحی کنترل کننده‌اس است که بدون داشتن اطلاعات مدل، مقاوم پایدار باشد. بدین منظور از RBF برای تخمین زدن $f(x)$ استفاده شده است. در نتیجه، $\tilde{W} = W - \hat{W}$ ، $f - \hat{f} = \tilde{W}^T h + \varepsilon$ و $\|\tilde{W}\|_F \leq W_{\max}$ در پایمان ورودی RBF باید بصورت $x = [e^T \ \dot{e}^T \ \eta_d^T \ \dot{\eta}_d^T \ \ddot{\eta}_d^T]^T$ انتخاب

۴-۱ قانون کنترل

قانون کنترلی برای معادله دینامیک AUV (۱) با ترم مقاوم $v = -(\varepsilon_N + b_d) \text{sgn}(s)$ بصورت زیر پیشنهاد می‌گردد؛

$$\tau = \hat{f}(x) + K_v s - v, \quad (15)$$

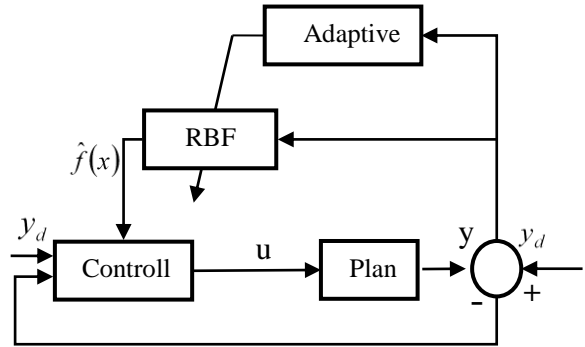
قانون تطبیقی RBF متناظر؛

$$\dot{\hat{W}} = \Gamma h s^T, \quad \Gamma = \Gamma^T > 0 \quad (16)$$

با جایگذاری در معادله (۱۴)؛

$$M\dot{s} = -(K_v + C)s + \zeta_1 \quad (17)$$

جایی که $\zeta_1 = \tilde{W}^T \varphi + (\varepsilon + \tau_d) + v$



شکل (۲) دیاگرام جعبه‌ای شماتیک کنترلی

سیگنال کنترلی گسسته سیستم را مجبور می‌کند در راستای رفتار مطلوب سیستم بلغزد. مسئله طراحی کنترل گرفتن متغیرهای حالت $x = [x \ \dot{x} \ \dots \ x^{(n-1)}]$ برای دنبال کردن یک متغیر حالت متغیر با زمان x_d در حضور عدم قطعیت $f(x)$ و $g(x)$ است. بدین منظور یک سطح متغیر با زمان $s(t)$ در فضای حالت سیستم \mathcal{R}^n بوسیله متغیر $s(x, t)$ بصورت زیر تعریف می‌شود [12].

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \tilde{x}(t) \quad (11)$$

که λ ثابت اکیدا مثبت و $\tilde{x}(t) = x(t) - x_d(t)$ خطای خروجی حالت است. انتخاب قانون کنترلی برای معادله (۱۱) در سیستم ساده شده مرتبه اول تا مقدار اسکالر s را در صفر نگه دارد.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \quad (12)$$

در آن η ثابت اکیدا مثبت است. قانون کنترلی بصورت زیر باید باشد؛

$$u(t) = \hat{u}(t) - k(x, t) \text{sgn}(s(t)) \quad (13)$$

با انتخاب مقدار بزرگی برای $k(x, t)$ بطوری که $k(x, t) = F(x, t) + \eta$

۴-۲ تحلیل پایداری

اثبات پایداری حلقه بسته سیستم در دو گام بیان می‌شود. نخست، تعریف تابع لیاپانوف؛

$$c = 0.05 \begin{bmatrix} -1.5 & -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 & 1.5 \\ -1.5 & -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 & 1.5 \end{bmatrix}$$

پارامترهای ثابت AUV انتخاب شده در منبع [۱۳] آمده است. مسیر دایروی 2D طی شده در شکل (۳)، متغیرهای حالت موقعیت در شکل (۴) و متغیرهای حالت سرعت در شکل (۵) نمایش داده شده‌اند. در ادامه، تقریب $\mathbf{f}(x)$ در شکل (۶) و سیگنال‌های کنترلی در شکل (۷) تصویر شده است.

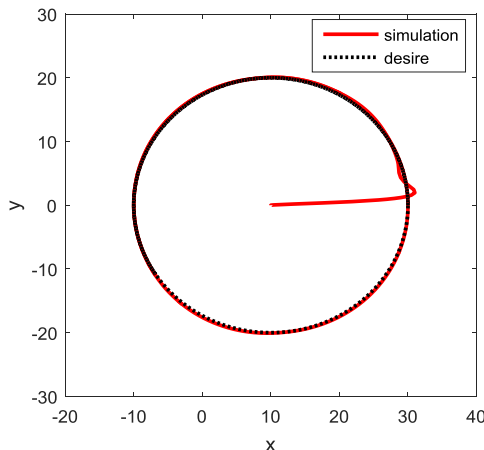
اگرچه ردیابی دقیق تر مسیر با افزایش ضریب بهره ترم مقاوم میسر است اما بهره بزرگتر منجر به افزایش تلاش کنترلی می‌شود که مطلوب ما نمی‌باشد زیرا در پیاده سازی عملی مشکل ساز است. همچنین با افزایش b می‌توان تقریب دقیق تری از $\mathbf{f}(x)$ داشت اما باعث افزایش خطای ردیابی می‌گردد که مطلوب ما نیست و برعکس.

۵-۲ عمق

شرایط اولیه برای شبیه سازی حرکت عمق $\mathbf{x}(t) = [0.6 \ 0.3 \ 0.5 \ 0.5]^T$ است. تعداد گره‌های پنهان ۵ عدد و پارامترهای قانون کنترلی بصورت $b=3$ ، $b_d=0.1$ ، $\varepsilon_N=0.5$ ، $\mathbf{K}_v=100\mathbf{I}_{2 \times 2}$ ، $\lambda=2\mathbf{I}_{2 \times 2}$ و

$$c = 0.05 \begin{bmatrix} -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 \\ -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$

انتخاب می‌شوند. متغیرهای حالت معرف موقعیت و سرعت AUV به ترتیب در شکل های (۸) و (۹) نمایش داده شده اند. تقریب $\mathbf{f}(x)$ و سیگنال‌های کنترلی نیز به ترتیب در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) آورده شده‌اند.



شکل (۳) مسیر دایروی سمت طی شده توسط REMUS

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{L}} &= \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{M} \mathbf{s} + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}^T \Gamma^{-1} \tilde{\mathbf{W}}) \\ \Rightarrow \dot{\mathbf{L}} &= \mathbf{s}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{s}} + \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{M}} \mathbf{s} + \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{W}}}) \end{aligned} \quad (18)$$

گام دوم، قرار دادن معادله (۱۷) در معادله (۱۸)؛

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{L}} &= -\mathbf{s}^T \mathbf{K}_v \mathbf{s} + \frac{1}{2} \mathbf{s}^T (\dot{\mathbf{M}} - 2\mathbf{C}) \mathbf{s} \\ &+ \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{W}}} + \mathbf{h} \mathbf{s}^T) + \mathbf{s}^T (\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\tau}_d + \mathbf{v}) \end{aligned} \quad (19)$$

به دلیل ویژگی پاد متقارن بودن دینامیک AUV؛ الف) $(\dot{\mathbf{M}} - 2\mathbf{C}) \mathbf{s} = 0$ ب) $\text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{h} \mathbf{s}^T) = \mathbf{s}^T \tilde{\mathbf{W}} \mathbf{h}$ (ج) و همچنین $\dot{\mathbf{L}} = -\mathbf{s}^T \mathbf{K}_v \mathbf{s} + \mathbf{s}^T (\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\tau}_d + \mathbf{v})$ و همچنین $\mathbf{s}^T (\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\tau}_d + \mathbf{v}) = \mathbf{s}^T (\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\tau}_d) - \|\mathbf{s}\| (\varepsilon_N + b_d) \leq 0$ لذا $\dot{\mathbf{L}} \leq -\mathbf{s}^T \mathbf{K}_v \mathbf{s} \leq 0$

۵-۵ شبیه سازی

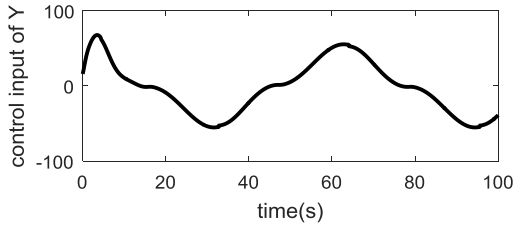
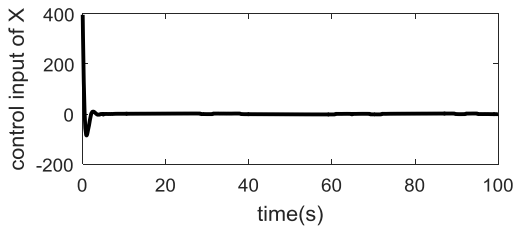
۵-۱ سمت

شرایط اولیه و مسیر مطلوب دایروی صفحه‌ای به ترتیب برابر است با $\mathbf{x}(t) = [1.0 \ 0 \ 0.05 \ 0.05]^T$ و $x_{des} = 10 \times \cos(0.2t) + 1$ و $y_{des} = 10 \times \sin(0.2t)$ برای اغتشاشات از مدل جریان آب اقیانوسی استفاده شده است؛

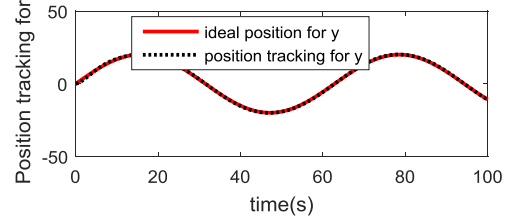
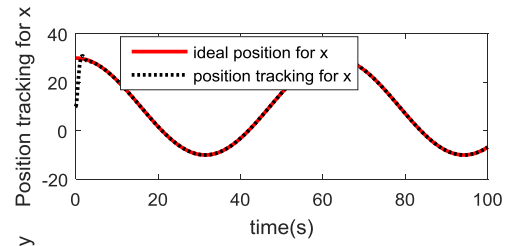
$$\begin{aligned} u_{dis} &= v_C \cos \beta \\ v_{dis} &= v_C \sin \beta \end{aligned} \quad (20)$$

که در آن $\mathbf{v}_C = \sqrt{u^2 + v^2}$ سرعت جریان آب و β زاویه بین سمت و جهت جریان به رادیان است.

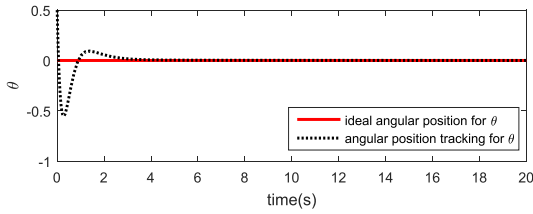
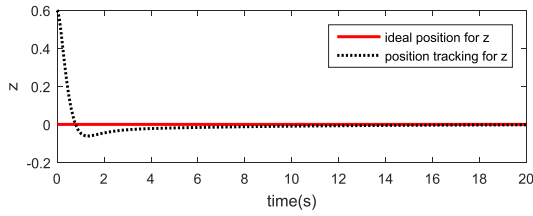
زمان شبیه سازی ۱۰۰ ثانیه است در حالی که زمان مورد نیاز برای یک دور کامل حدود ۸۵ ثانیه می‌باشد. تعداد گره‌های انتخاب شده برای لایه پنهان ۷ عدد می‌باشد. پارامترهای قانون کنترلی بصورت زیر انتخاب شده اند؛ $\varepsilon_N = 0.75$ ، $\mathbf{K}_v = 100\mathbf{I}_{2 \times 2}$ ، $\lambda = 2\mathbf{I}_{2 \times 2}$ ، $b = 1$ و $b_d = 0.25$ ؛



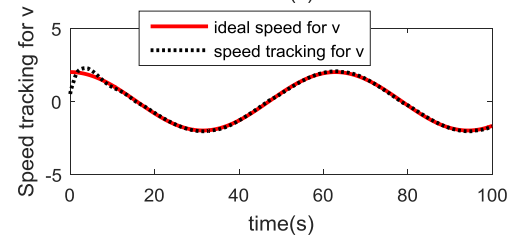
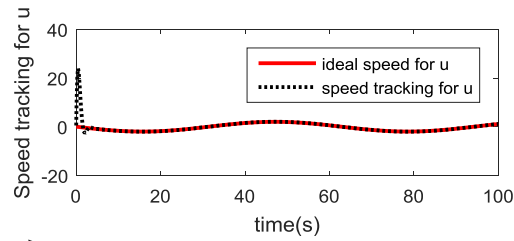
شکل (۷) سیگنال های کنترل



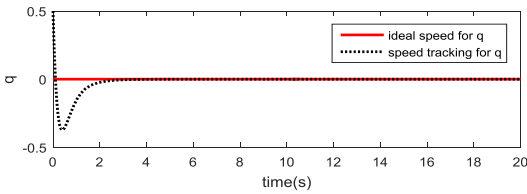
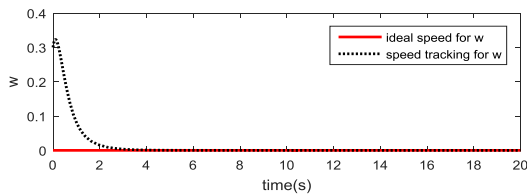
شکل (۴) متغیرهای حالت موقعیت REMUS



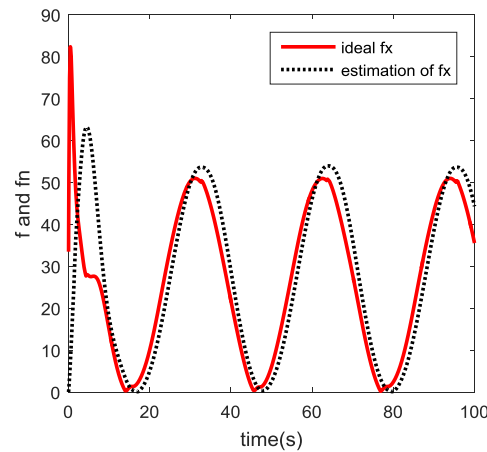
شکل (۸) متغیرهای حالت موقعیت عمق REMUS



شکل (۵) سرعت های خطی REMUS



شکل (۹) سرعت های خطی و زاویه ای REMUS در مد عمق

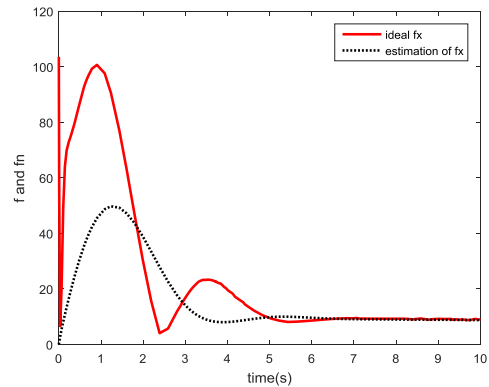


شکل (۶) تقریب $f(x)$

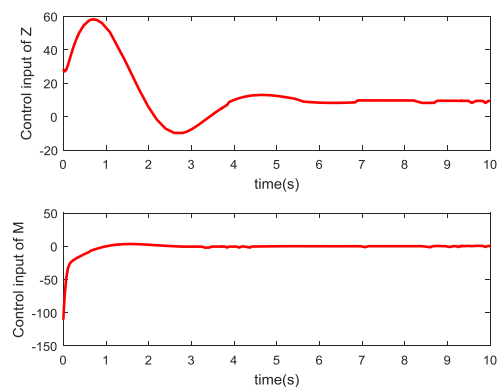
عمق، را دارا می‌باشد. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که کنترل پیشنهاد شده می‌تواند شناور زیر سطحی انتخاب شده را در هر دو مد سمت و عمق چه بصورت حرکت نقطه به نقطه (کنترل تنظیم) و چه بصورت ردیابی (کنترل تعقیب) بخوبی کنترل نماید. در پایان، پایداری لیاپانوف روش کنترلی پیشنهادی برای شناور زیر سطحی اثبات شده است.

۷- منابع

- [1] Chu, Z. and D. Zhu. Adaptive sliding mode heading control for autonomous underwater vehicle including actuator dynamics. in OCEANS 2016-Shanghai. 2016. IEEE.
- [2] Geranmehr, B. and S.R. Nekoo, Nonlinear suboptimal control of fully coupled non-affine six-DOF autonomous underwater vehicle using the state-dependent Riccati equation. Ocean Engineering, 2015. 96: p. 248-257.
- [3] Geranmehr, B. and S.R. Nekoo. The state-dependent set-point regulation and tracking control of horizontal motion of AUV. in Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2014 Second RSI/ISM International Conference on. 2014. IEEE.
- [4] Geranmehr, B. and S.R. Nekoo. The nonlinear suboptimal diving control of an autonomous underwater vehicle. in Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2014 Second RSI/ISM International Conference on. 2014. IEEE.
- [5] Rezazadegan, F. and K. Shojaei. An Adaptive Control Scheme for 6-DOF Control of an AUV Using Saturation Functions. in Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Computational Systems, April. 2013.
- [6] Lewis, F.L., K. Liu, and A. Yesildirek, Neural net robot controller with guaranteed tracking performance. IEEE Transactions on Neural Networks, 1995. 6(3): p. 703-715.
- [7] Fateh, M.M., S.M. Ahmadi, and S. Khorashadizadeh, Adaptive RBF network control for robot manipulators. Journal of AI and Data Mining, 2014. 2(2): p. 159-166.
- [8] Lei, X. and P. Lu, The adaptive radial basis function neural network for small rotary-wing unmanned aircraft. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014. 61(9): p. 4808-4815.



شکل (۱۰) تقریب $f(x)$ در مد عمق



شکل (۱۱) تلاش‌های کنترلی در مد عمق

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک دستاورد قابل پیاده سازی برای طراحی کنترل غیرخطی از طریق شبکه عصبی تابع پایه شعاعی تطبیقی با ترم مقاوم مد لغزشی آورده شده است. برای شبیه سازی قانون کنترلی ارائه شده از مدل شناور زیر سطحی REMUS استفاده شده است. کنترل کننده شبکه عصبی تابع پایه شعاعی تطبیقی با ترم مقاوم مد لغزشی به چندین دلیل انتخاب شده است؛ نخست، رسیده به مدل دقیق شناورهای زیر سطحی میسر نمی‌باشد. دوم، مدل AUV شامل غیرخطی‌های شدید و رفتار پیچیده است. سوم، AUV در محیط‌های ناشناخته استفاده می‌شود در نتیجه تحت تاثیر عوامل محیطی از پیش ناشناخته قرار دارد. با این اوصاف از شبکه عصبی تابع پایه شعاعی تطبیقی برای تخمین زدن $f(x)$ و از ترم مقاوم برای غلبه بر نامعینی‌ها در مدلسازی بهره گرفته شده است. روش کنترلی پیشنهادی به دلیل تخمین هوشمند اغتشاشات و ترم مقاوم مد لغزشی توانایی تضمین ردیابی و همچنین توانایی جبران نقص عملگر، بخصوص در کنترل

-
- [9] Chu, Y. and J. Fei, Adaptive global sliding mode control for MEMS gyroscope using RBF neural network. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015. 2015.
- [10] Daachi, M., et al., A radial basis function neural network adaptive controller to drive a powered lower limb knee joint orthosis. *Applied Soft Computing*, 2015. 34: p. 324-336.
- [11] Presterio, T., Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. 2001, Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution.
- [12] Slotine, J.-J.E. and W. Li, *Applied nonlinear control*. Vol. 199. 1991: prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.