



کنترل عمق یک شناور زیرسطحی خودکار در شرایط عدم قطعیت پارامتری به روش کنترل مود لغزشی

رضا حسن زاده قاسمی^۱، محمد هدایتی خدایاری^۲

^۱استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، r.hasanzadeh@hsu.ac.ir

^۲کارشناسی ارشد مهندسی برق، سازمان صنایع دریایی

چکیده

نقش شناورهای زیرسطحی خودکار در تحقیقات زیرآبی افزایش یافته است. همچنین منیپولاتور ربات را می توان روی شناورهای زیرسطحی خودکار و شناورهای زیرسطحی کنترل از راه دور نصب کرد، که در این صورت سیستم های زیرسطحی کامل تری ایجاد می شود که در فرآیندهای زیرآبی دارای کاربردهای بسیار زیادی است. کنترل شناورهای زیرسطحی به دلیل معادلات غیرخطی، عدم قطعیت پارامتری و اغتشاشات خارجی دارای پیچیدگی زیادی است. کنترلر مود لغزشی با توجه به مقاوم بودن برای کنترل شناور زیرسطحی بسیار مناسب است. در این مقاله کنترلر مود لغزشی برای کانال عمق شناور بکار برده شده و نتایج برای سیستم خطی و غیرخطی در شرایط عدم قطعیت پارامترها بررسی شده است. نتایج نشان دهنده کارایی بالای کنترلر مود لغزشی در رهگیری مسیر دلخواه می باشد.

کلمات کلیدی: کنترل مود لغزشی، شناور زیرسطحی خودکار، چترینگ.

مقدمه

در چند سال اخیر با افزایش کاربردهای نظامی، تجاری و علمی شناورهای زیرسطحی خودکار (AUV)^۱، استفاده از این شناورها بشدت مورد توجه محققان قرار گرفته است. یکی از مهم ترین موضوعات در شناورهای زیرسطحی طی کردن دقیق مسیر مطلوب است. این موضوع می تواند در کاربردهای مانند اکتشاف میادین نفتی دریایی، تحقیقات در بخش های عمیق دریا، استخراج از منابع زیر دریا، نقشه برداری های مربوط به اقیانوس شناسی، ارزیابی خطوط لوله زیرآب، عملیات نظامی و ... به خوبی مورد ارزیابی قرار گیرد [۱-۳].

در بسیاری از مطالعات مربوط به رهگیری مسیر توسط AUV، می توان از کوپلینگ حرکت در صفحات افقی و عمودی صرف نظر کرد. به عبارتی دو کانال سمت و عمق را می توان مستقل از هم در نظر گرفت. این فرض توسط Lionel و Soetanto [۴]، Lee و Li [۵] و نیز Carlos و همکاران [۶] بکار گرفته شده است. در این مقاله نیز ما از این فرض کمک می گیریم.

اما طراحی سیستم های دقیق کنترل موقعیت همچنان به عنوان یک موضوع چالشی مطرح است. مشکلات اصلی برای طراحی سیستم کنترلی مناسب عبارتند از: خواص بشدت غیر خطی سیستم، عدم قطعیت در ضرایب هیدرودینامیک و اغتشاشات خارجی به دلیل جریانات دریایی. ثابت شده است که روش کنترل مود لغزشی (SMC)^۲ به دلیل مقاوم بودن در مقابل عدم قطعیت های مدل سازی و اغتشاشات خارجی، بسیار موثر بوده و می تواند مشکلات ذکر شده برای کنترل موقعیت سیستم های زیرسطحی را به خوبی برطرف نماید [۷ و ۸].

کنترل مود لغزشی (SMC) با عنوان کنترل با ساختار متغیر (VSC)^۳ نیز شناخته می شود. مقاوم بودن^۴ کنترلر به کمک مفهوم سطح لغزش تضمین می شود. در واقع به کمک لغزش در امتداد خط سیر^۵ مطلوب و تلاش بر رهگیری آن، با وجود خطاهای مدل سازی یا اغتشاش، پاسخ در حد مطلوب نگه داشته باشد. به این ترتیب به این خط سیر مطلوب سطح لغزش^۶ گفته می شود. در صورت اختلاف بین رفتار قانون کنترلی در زمانی که پاسخ بالای سطح لغزش است با زمانی که پاسخ پایین سطح لغزش است، به سادگی می توان به این مفهوم رسید. کنترلر مود لغزشی به خوبی عملکرد سیستم را بهبود خواهد داد اما این بهبود به قیمت پدیده چترینگ^۷ در رفتار کنترلر تمام می شود. در ادامه نشان داده می شود که امکان کاهش این پدیده وجود دارد.

¹ Autonomous Underwater Vehicle

² Sliding Mode Control

³ Variable Structure Control

⁴ Robustness

⁵ Trajectory

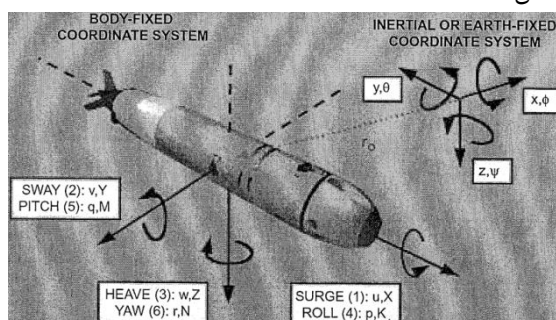
⁶ Sliding Surface

⁷ Chattering

انواع مختلفی از کنترلرهای مود لغزشی برای کنترل مدل‌های مختلف AUV و ROV^۱ بکار برده شده است. از آن جمله می‌توان به کنترلر مود لغزشی معمولی توسط Ha و همکاران [۹]، Zhou و همکاران [۱۰]، Kwon و همکاران [۱۱]، کنترلر مود لغزشی تطبیقی بر اساس شبکه عصبی توسط Zhang و Chu [۱۲]، کنترلر مود لغزشی تطبیقی فازی توسط Bessa و همکاران [۱۳]، کنترلر مود لغزشی فازی با سطح لغزش PID [۱۴]، کنترلر مود لغزشی تطبیقی برای شناور زیرسطحی سرعت بالا [۱۵] اشاره کرد. روشی که در اینجا استفاده می‌شود بر اساس روشی است که توسط Lienard و Healey [۱۶] و نیز در مرجع [۱۷ و ۱۸] ارائه شده است. این روش بر اساس تکنیک فیدبک حالت بعلاوه بخش غیرخطی به خاطر رفتار لغزش است.

مدل‌سازی شناور زیرسطحی

مدل واقعی شناور زیرسطحی، یک مدل غیرخطی دو ورودی- دو خروجی بوده که در [۱۹] به طور کامل استخراج شده است. در یکی از روش‌های طراحی کنترلر مود لغزشی، نیاز به مدل خطی‌سازی شده از مدل واقعی است. بدین منظور و برای امکان اعمال کنترلر، معادلات شناور زیرسطحی، خطی‌سازی و دی کوپله می‌شود. به این ترتیب با سیستم کاملاً مجزا خطی برای کانال عمق کار خواهیم کرد. در شکل ۱ نحوه الصاق دستگاه‌های مختصات و نیز متغیرهای مختلف سیستم نشان داده شده است.



شکل ۱: دستگاه‌های مختصات استفاده شده برای مدل‌سازی دینامیکی شناور زیر سطحی خودکار [۱۹]

با تغییر زاویه بالک‌های افقی^۲، نیروی بالابر روی بالک‌ها تغییر کرده و گشتاور پیچ مربوطه نیز تغییر می‌کند. نتیجه این کار تغییر زاویه پیچ AUV خواهد بود. زمانی که AUV با سرعت رو به جلو ثابت در حال حرکت است، تغییر زاویه پیچ به معنی بالا و پایین رفتن شناور و در نهایت تغییر عمق شناور می‌باشد.

برای کنترل عمق، چهار پارامتر درگیر می‌شود: سرعت در راستای Z (w)، نرخ پیچ (q)، زاویه پیچ (θ) و عمق (Z). متغیر کنترلی تغییر زاویه بالک افقی (s) است. زیر سیستم مربوط به کنترل عمق بوسیله چهار معادله زیر قابل بیان است.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -u \sin \theta + v \cos \theta \sin \phi + w \cos \theta \cos \phi \\ \dot{\theta} &= q \cos \phi - r \sin \phi \\ m[\dot{w} - uq + vp + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p}) - z_G(p^2 + q^2)] \\ &= Z_{res} + Z_{w|w|}w|w| + Z_{q|q|}q|q| + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uu\delta_s}u^2\delta_s \\ I_y\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m[-x_G(\dot{w} - uq + vp) + z_G(\dot{u} - vr + wq)] &= M_{res} + M_{w|w|}w|w| + M_{q|q|}q|q| + M_{uq}uq + \\ M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uu\delta_s}u^2\delta_s \end{aligned} \quad (1)$$

برای استفاده از کنترلر مود لغزشی معادلات بالا در نقطه تعادل زیر خطی‌سازی می‌شود:

$$u = 1.5 \text{ m/s}, \quad \theta = w = q = 0$$

به این ترتیب فرم خطی شده، عبارتست از [۱۹]:

$$\begin{bmatrix} m - Z_{\dot{w}} & -Z_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ -M_{\dot{w}} & I_{yy} - M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_w & mU + Z_q & 0 & 0 \\ M_w & M_q & 0 & M_\theta \\ 1 & 0 & 0 & -U \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ z \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{\delta_s} \\ M_{\delta_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \quad (2)$$

با جایگذاری پارامترهای ارائه شده در مرجع [۱۹] می‌توان معادلات را به فرم فضای حالت زیر نوشت:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad A = \begin{bmatrix} -1.125 & 0.593 & 0 & 0.020 \\ 3.946 & -0.962 & 0 & -0.697 \\ 1.000 & 0 & 0 & -1.540 \\ 0 & 1.000 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -0.650 \\ -4.003 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

¹ Remoted Operated Vehicle

² Stern

کنترلر مود لغزشی

در این بخش روند طراحی کنترلر مود لغزشی، ارائه و برای سیستم دینامیکی شناور زیر سطحی خودکار، مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرض کنید می‌توان مدل دینامیکی را به صورت سیستم تک ورودی-چند متغیر حالت زیر بیان کرد:

$$\dot{x} = Ax + bu + f(x) \quad (4)$$

که $f(x)$ تابع غیرخطی است که شامل عدم قطعیت و کوپلینگ‌های مدل نشده است. به این ترتیب قانون کنترلی دارای دو بخش زیر است:

$$u = \hat{u} + \bar{u} \quad (5)$$

که \hat{u} بخش نامی یا محاسبه شده و \bar{u} بخش لغزشی غیرخطی است. \hat{u} از بخش خطی معادله ۴ برای تعیین رفتار کنترلر استفاده می‌کند که از فرآیند طراحی کنترل فیدبک حالت معمولی نتیجه می‌شود. \bar{u} به سیستم اطمینان می‌دهد با وجود نقص در مدل، حالت سیستم روی سطح لغزش باقی می‌ماند. در این روش صفحه لغزش به این صورت تعریف می‌شود:

$$\sigma(\tilde{x}) = h^T \tilde{x}, \quad \tilde{x} = x - x_d \quad (6)$$

h بردار بهره است. سطح لغزش باید به گونه‌ای تعریف شود که چنانچه سطح لغزش تمایل دارد صفر شود آنگاه خطای حالت نیز تمایل به صفر شدن دارد.

سطح لغزش $\sigma(\tilde{x})$ را می‌توان به وسیله جابجایی قطب تعریف کرد که در مورد متغیرهای حالت با تعیین مقادیر ویژه λ_i به آسانی انجام می‌گیرد. با استفاده از تکنیک فیدبک حالت، بردار بهره فیدبک k به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{u} = -k^T x \quad (7)$$

با جایگذاری آن در معادله ۴ دینامیک حلقه بسته عبارتست از:

$$\dot{x} = A_c x + b \bar{u} + f(x) \quad A_c = A - bk^T \quad (8)$$

برای تعیین بخش غیرخطی کنترلر، معادله ۴ را در h^T ضرب کرده و سپس از آن $h^T \dot{x}_d$ کسر می‌شود:

$$\dot{\sigma}(\tilde{x}) = h^T A_c x + h^T b \bar{u} + h^T f(x) - h^T \dot{x}_d \quad (9)$$

با انتخاب زیر

$$h^T b \bar{u} = h^T \dot{x}_d - h^T f(x) - \eta \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (10)$$

که در آن $\eta > 0$ و $\hat{f}(x)$ تخمینی از $f(x)$ است، داریم:

$$\dot{\sigma}(\tilde{x}) = h^T A_c x - \eta \operatorname{sgn}(\sigma) + h^T [f(x) - \hat{f}(x)] \quad (11)$$

که در این رابطه sgn تابع علامت است. اگر همیشه دارای علامت مخالف با σ باشد، سیستم همگرا خواهد بود. با انتخاب h به عنوان بردار ویژه A_c^T برای مقدار ویژه $\lambda = 0$ داریم:

$$h^T A_c x = 0 \quad (12)$$

و بنابراین رابطه ۱۱ به صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{\sigma}(\tilde{x}) = -\eta \operatorname{sgn}(\sigma) + h^T [f(x) - \hat{f}(x)] \quad (13)$$

بنابراین سیستم همیشه همگراست اگر شرط زیر تامین شده باشد:

$$\eta > |h| \cdot |f(x) - \hat{f}(x)| \quad (14)$$

اما در عمل به دلیل ناپیوستگی عبارت sgn ، پدیده چترینگ قابل اجتناب نیست. این پدیده را می‌توان به کمک تابع \tanh یا تابع اشباع^۱ برطرف کرد. به این ترتیب قانون کنترل نهایی ترکیبی از دو ورودی کنترلی بوده و عبارتست از:

$$u = -k^T x + (h^T b)^{-1} \left[h^T \dot{x}_d - h^T \hat{f}(x) - \eta \tanh\left(\frac{\sigma}{\phi}\right) \right] \quad (15)$$

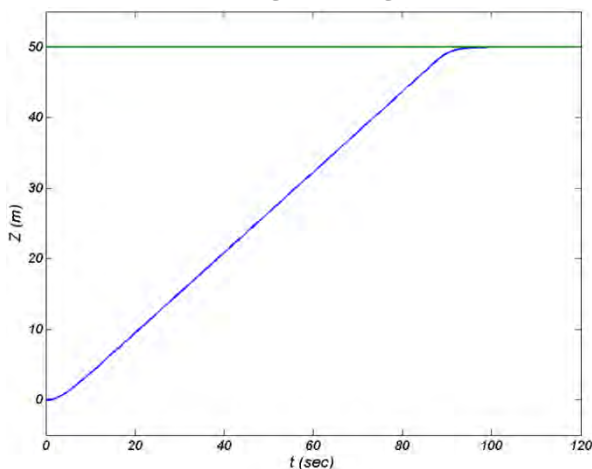
که در آن ϕ ضخامت لایه مرزی برای تابع \tanh بوده و به صورت یک فیلتر پایین‌گذر برای حذف اثرات چترینگ و نویز عمل می‌کند. هر چه اغتشاشات مدل نشده بزرگ‌تر باشد، باید پارامتر η بزرگ‌تر انتخاب شود، اما این مساله به قیمت افزایش فراجش^۲ و نوسانی شدن سیستم تمام خواهد شد.

طراحی کنترلر مود لغزشی برای سیستم خطی‌سازی شده

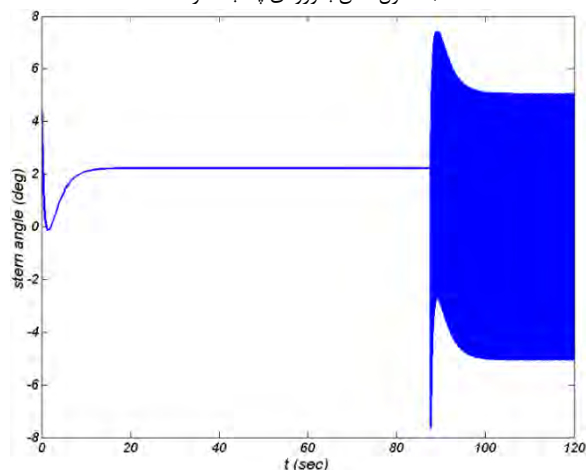
به منظور عملیاتی بودن نتایج کنترل مود لغزشی، برای زاویه بالک‌های افقی که ورودی کنترلی هستند، محدوده مجاز تعریف می‌کنیم. محدوده مجاز به صورت $-10 \text{ deg} < \delta_s, \delta_r < 10 \text{ deg}$ در نظر گرفته شده است. همین‌طور که می‌دانیم پاسخ زمانی سیستم را به کمک جابجایی قطب‌ها تعیین می‌کنیم. به این ترتیب قطب طوری انتخاب شده است که پاسخ زمانی مطلوب باشد.

¹ Saturation
Overshoot

ورودی عمق مطلوب به صورت یک تابع پله با مقدار 50 m در نظر گرفته شده است. در رابطه ابتدایی مربوط به قانون کنترلی مود لغزشی از تابع علامت (sgn) استفاده می‌شود که البته به دلیل ایجاد چترینگ با تابع tanh جایگزین می‌شود. اما برای نشان دادن اثرات چترینگ در شکل ۲-الف نتیجه مربوط به کنترل عمق با تابع علامت آمده است که نشان دهنده عملکرد مطلوب کنترلر می‌باشد. اما در شکل ۲-ب ورودی کنترلی بالک افقی نشان دهنده عملکرد ضربه‌ای بالک است که از نظر عملیاتی مطلوب نمی‌باشد.



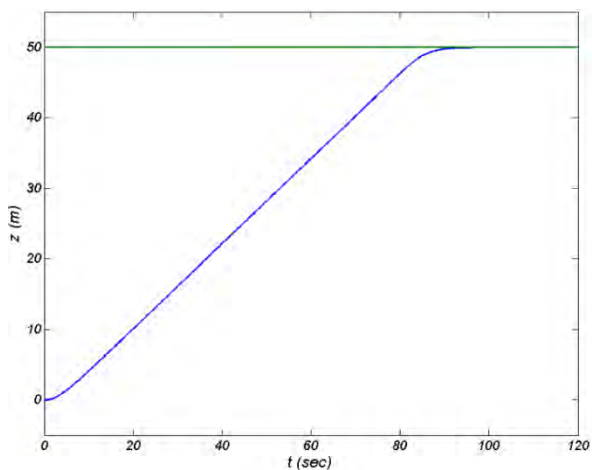
الف) کنترل عمق با ورودی پله با اندازه 50 m



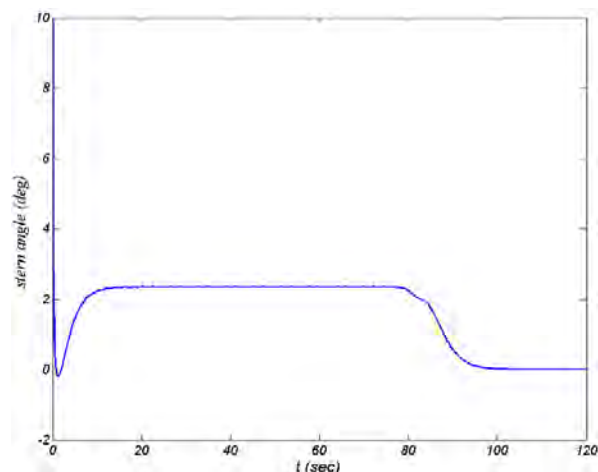
ب) تغییرات زاویه بالک افقی

شکل ۲: کنترل مود لغزشی عمق شناور با وجود sgn در قانون کنترلی برای سیستم خطی

اکنون برای نشان دادن حذف چترینگ ورودی کنترلی بالک افقی، قانون کنترل مود لغزشی را با تابع tanh استفاده می‌کنیم. نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد علاوه بر مطلوب بودن عملکرد کنترلر در رسیدن به عمق مورد نظر، تغییرات بالک نیز منطقی و مطلوب می‌باشد. در واقع اعمال این ورودی کنترلی در عمل امکان‌پذیر است.



الف) کنترل عمق با ورودی پله با اندازه 50 m

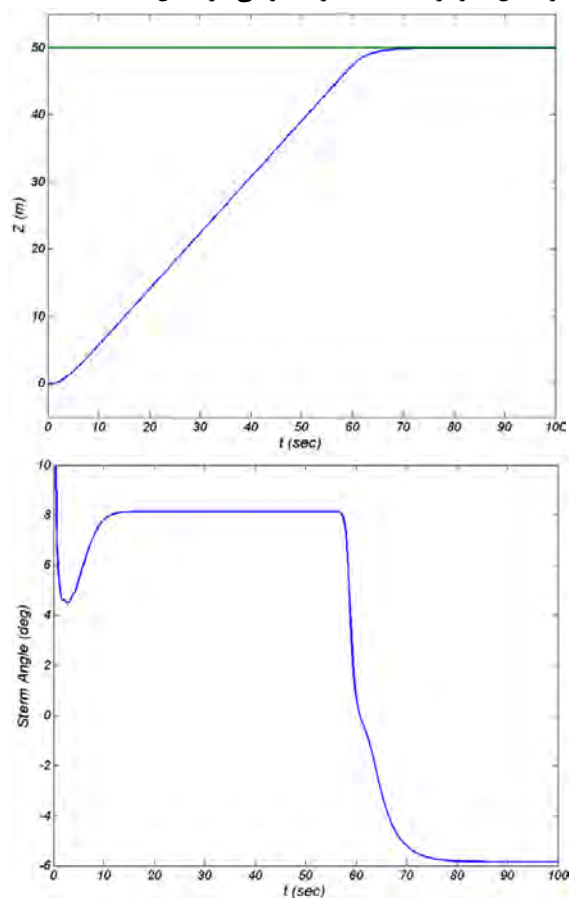


ب) تغییرات زاویه بالک افقی

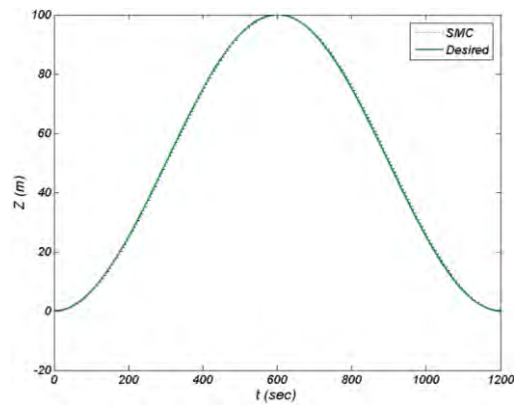
شکل ۳: کنترل مود لغزشی عمق شناور با وجود \tanh در قانون کنترلی برای سیستم خطی

اعمال کنترل مود لغزشی طراحی شده به مدل غیر خطی سیستم

اگرچه طراحی کنترلر مود لغزشی بر اساس سیستم خطی سازی شده انجام می گیرد، اما باید بعد از اعمال به سیستم غیر خطی اصلی پاسخ مناسب داشته باشد. به منظور بررسی، سیستم خطی سازی شده برداشته می شود و به جای آن سیستم غیرخطی جایگزین می گردد. بنابراین در این حالت خروجی کنترلر، به جای سیستم خطی به سیستم غیرخطی وارد می شود و فیدبک های حالت لازم، از سیستم غیرخطی گرفته می شود. در این کنترلر، آنچه را کنترلر در اختیار سیستم قرار می دهد زاویه بالک افقی بوده و آنچه از سیستم به کنترلر تحویل می شود متغیرهای سرعت در راستای Z (w)، سرعت زاویه ای حول Y (q)، موقعیت شناور در راستای Z و زاویه پیچ شناور (θ) می باشد. به این ترتیب با اعمال ورودی های مطلوب قبلی برای عمق نتایج حاصل از کنترلر مود لغزشی به سیستم غیرخطی واقعی بدست می آید. نمودار کنترل عمق و ورودی کنترلی بالک افقی در شکل ۴ و برای یک مسیر سینوسی در شکل ۵ آمده است.

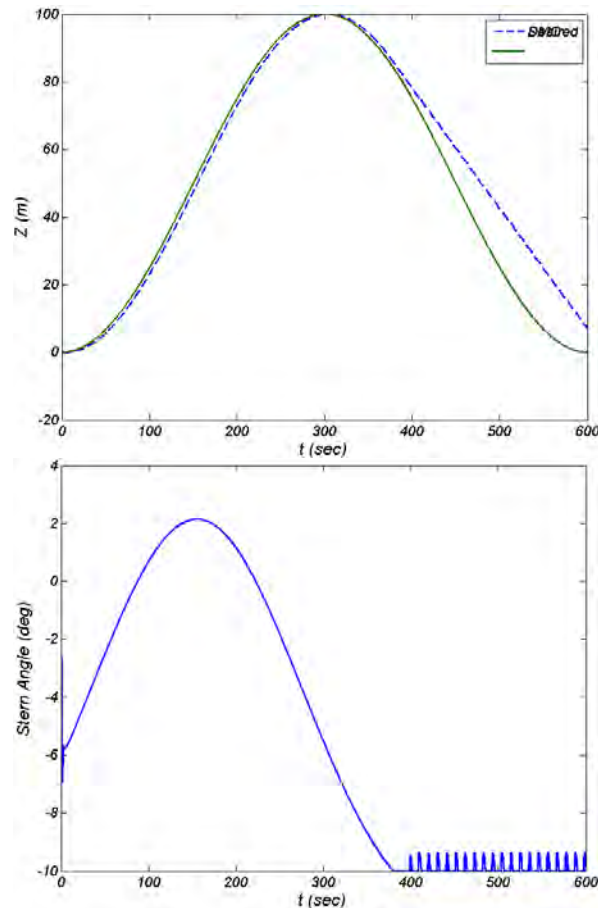


شکل ۴: نمودار کنترل عمق و ورودی کنترلی بالک افقی برای سیستم غیر خطی



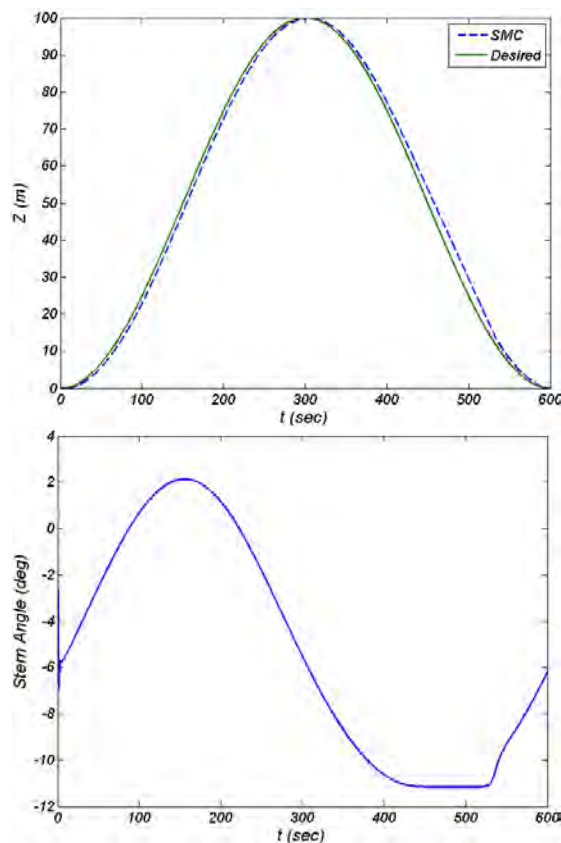
شکل ۵: نمودار کنترل Z برای سیستم غیرخطی

نتایج بدست آمده نشان دهنده رفتار مطلوب سیستم تحت کنترل مود لغزشی می باشد. به این ترتیب کنترلر مود لغزشی طراحی شده بر اساس سیستم خطی سازی شده، برای سیستم غیرخطی نیز مطلوب بوده و قابل استفاده است. با دقت در نمودار مربوط به Z ، مشاهده می شود که زمان ها به نحوی در نظر گرفته شده است که از تغییر شدید اجتناب شود تا برای رهگیری، بالک ها به اشباع نروند. به این ترتیب کنترلر به خوبی مسیر مورد نظر را رهگیری کرده است. اما در ادامه نمونه ای از مسیر ارائه می شود که در آن به دلیل اشباع بالک ها، رهگیری مسیر به خوبی حالت قبل انجام نگرفته است. نمودارهای مربوط به این حالت در شکل ۶ آورده شده است. عملکرد بالک ها نشان دهنده اشباع در بخش هایی از مسیر مربوط به عمق است. اما بالک افقی برای رهگیری Z باید مقادیری بیش از 10 درجه را داشته باشد تا بتواند مسیر را به طور دقیق طی کند.



شکل ۶: نمودار کنترل Z ، برای تغییرات شدید Z با محدوده زاویه $\pm 10^\circ$ برای بالک ها

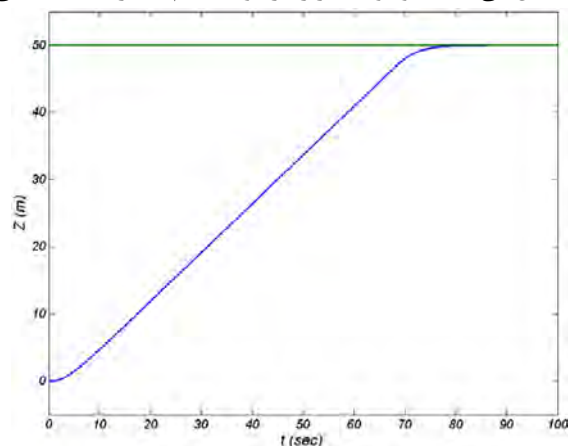
در صورتیکه محدوده اشباع را از $\pm 10^\circ$ به $\pm 12^\circ$ درجه افزایش دهیم، نتایج رهگیری برای Z به نحو بهتری انجام می پذیرد. این موضوع در شکل ۷ نشان داده شده است.

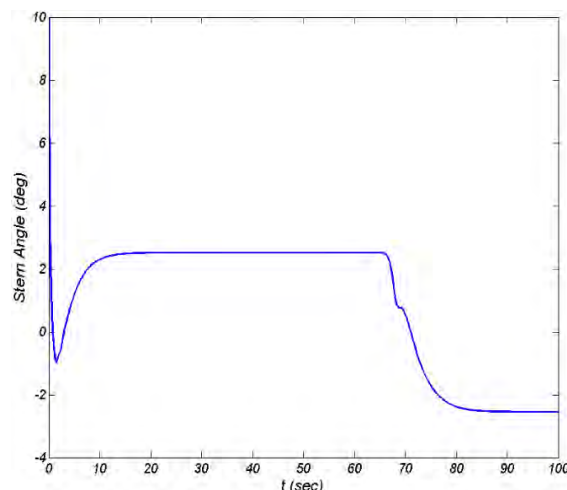


شکل ۷: نمودار کنترل z ، برای تغییرات شدید z با محدوده زاویه $\pm 12^\circ$ برای بالک‌ها

اعمال عدم قطعیت مدل‌سازی با استفاده از پارامترهای جدید و بررسی نتایج حاصل از کنترلر طراحی شده

اطمینان از کنترلر طراحی شده در صورتی تامین خواهد شد که مقاوم بودن آن در مقابل عدم قطعیت‌های مدل‌سازی تضمین شده باشد. برای بررسی این مهم، تمامی ضرایب هیدرودینامیک استفاده شده در سیستم غیرخطی که از مرجع [۱۹] گرفته شده با ضرایب هیدرودینامیک محاسبه شده به کمک روش‌های تحلیلی جایگزین می‌شود تا هم مقاوم بودن کنترلر بررسی شود و هم تاییدی باشد بر ضرایب استخراج شده. لازم به ذکر است با محاسبه میانگین درصد خطای ضرایب، ضرایب جدید نسبت به ضرایب مرجع [۱۹] در کل در حدود ۳۰ درصد اختلاف دارد. نتایج حاصل از اعمال کنترلر مود لغزشی در شکل ۸ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد سیستم جدید نیز دارای رفتار مطلوبی از رسیدن به عمق ورودی می‌باشد. این بررسی مقاوم بودن کنترلر مود لغزشی طراحی شده را تایید می‌کند. این بررسی را می‌توان به ازاء سیستم‌های مختلف با ضرایب متفاوت نیز بررسی کرد. این نتایج نشان می‌دهد، با وجود کنترلر هر دو سیستم مسیر کاملاً یکسانی را طی نموده‌اند.





شکل ۸: نتایج شبیه‌سازی کنترلر مود لغزشی برای سیستم غیرخطی با ضرایب محاسبه شده

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک کنترلر مود لغزشی برای ربات زیرسطحی طراحی و اعمال شد. روش طراحی کنترلر مود لغزشی براساس مدل خطی‌سازی شده بوده و در نهایت به سیستم غیرخطی اعمال شد. در طراحی کنترلر، دقت لازم برای عملیاتی بودن نتایج لحاظ شده است. در واقع محدوده تغییرات بالک‌ها و پاسخ زمانی سیستم از جمله معیارهای مورد بررسی بوده است. به منظور تایید مقاوم بودن کنترلر مود لغزشی، اعمال عدم قطعیت‌های مدل‌سازی به سیستم مورد بررسی قرار گرفت. مجموعه کنترلی ارائه شده در این مقاله را می‌توان به سادگی برای دیگر شناورهای زیر سطحی بکار برد. همچنین به دلیل عملیاتی بودن نتایج و ورودی‌های کنترلی، امکان اعمال و استفاده از این کنترلر در تست‌های واقعی شناورهای زیرسطحی به خوبی وجود دارد.

مراجع

- [1] Caccia M, Bono R and Bruzzone G. B (1999) Variable configuration UUVs for marine science applications, IEEE Robotics and Automation Magazine 6: 22-23.
- [2] Zhang L.J, Jia H.M and Jiang D.P (2014) Sliding Mode Prediction Control for 3D Path Following of An Underactuated AUV, 19th IFAC World Congress Cape Town, South Africa, August 24-29.
- [3] Calyo O, Sousa A, Rozenfeld A and Acosta G (2009) Smooth path planning for autonomous pipeline inspections, The 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, Tunisia: 1-9.
- [4] Lapierre L and Soetanto D (2007) Nonlinear pathfollowing control of an AUV, Ocean Engineering 34: 1734–1744.
- [5] Li J.H and Lee P.M. (2005) A neural network adaptive controller design for free-pitch-angle diving behavior of an autonomous underwater vehicle, Robotics and Autonomous Systems 52(2-3): 132-147.
- [6] Silvestre C, Cunha R, Paulino N and Pascoal A (2009) A bottom-following preview controller for autonomous underwater vehicles, IEEE Transactions on control systems technology 17(2): 257-266.
- [7] Bessa W.M, Dutra M.S and Kreuzer E (2008) Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller, Robotics and Autonomous Systems 56: 670-677.
- [8] Wang Y et al (2013) Depth Control of Remotely Operated Vehicles Using Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode Control Method, Oceans Conference, San Diego, CA.
- [9] Ha T.K, Binugroho E.H, Seo Y.B and Choi J.W (2008) Sliding mode control for autonomous underwater vehicle under open control platform environment, SICE Annual Conference: 1345-1350.
- [10] Zhou H, Liu K and Feng X (2011) State feedback sliding mode control without chattering by construction Hurwitz matrix for AUV movement, International Journal of Automation and Computing 8(2): 262-268.
- [11] Kwon S.T, Shin D.H and Joo M.G (2012) Way-point tracking of AUV using sliding mode controller, The journal of Korean institute of information technology 10: 17-22.
- [12] Zhang M and Chu Z (2012) Adaptive sliding mode control based on local recurrent neural networks for underwater robot, Ocean Engineering 45: 56-62.
- [13] Bessa W.M, Dutra M.S and Kreuzer E (2010) An adaptive fuzzy sliding mode controller for remotely operated underwater vehicles, Robotics and Autonomous Systems 58: 16-26.
- [14] Esfahani H.N and Azimirad V (2013) A New Fuzzy Sliding Mode Controller with PID Sliding Surface for Underwater Manipulators, International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology 3(9): 224-249.

- [15] Xiao M (2013) Modeling and Adaptive Sliding Mode Control of the Catastrophic Course of a High-speed Underwater Vehicle, *International Journal of Automation and Computing* 10(3): 210-216.
- [16] Healey A.J and Lienard D (1993) Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 18(3): p. 327-339.
- [17] Lea R.K, Allen R and Merry S.L (1999) A Comparative Study of Control Techniques for an Underwater Flight Vehicle, *International Journal of Systems Science* 30(9): 947-964.
- [18] Fossen T.I (1995) *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, New York, Wiley.
- [19] Prestero J.T (2001) *Verification of A Six-Degree of Freedom Simulation Model For The REMUS AUV*, Master's thesis, MIT, Department of Ocean and Mechanical Engineering.