

کنترل مود لغزشی یک شناور زیرسطحی خودکار در شرایط عدم قطعیت پارامتری و نویز حسگر

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزواری، ایران
دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

رضا حسن‌زاده قاسمی*
محمد هدایتی خدایاری

چکیده

کنترل مود لغزشی با توجه به مقاوم بودن برای کنترل شناور زیرسطحی بسیار مناسب است. پیچیدگی محیط زیر آب و وجود اغتشاشات سبب می‌شود کنترلگرهای مقاوم از جمله کنترل مود لغزشی در عمل نتایج خوبی را به همراه داشته باشد. در این مقاله کنترلگر مود لغزشی برای هر دو کانال سمت و عمق شناور خودکار زیرسطحی بکار برده شده و نتایج برای سیستم خطی و غیرخطی در شرایط عدم قطعیت پارامترها و نیز وجود نویز مورد بررسی قرار گرفته است. در صورت وجود نویز اندازه‌گیری یا معیوب بودن حسگرها، استفاده از مشاهده‌گرهای حالت می‌تواند در بهبود نتایج، کمک بزرگی نماید. بدین منظور مشاهده‌گر فیلتر کالمن برای تخمین متغیر حالت بکار برده شده است. نتایج نشان‌دهنده کارایی بالای کنترلگر مود لغزشی و فیلتر کالمن در رهگیری مسیر دلخواه می‌باشد. **واژه‌های کلیدی:** کنترل مود لغزشی، شناور زیرسطحی خودکار، چترینگ، مشاهده‌گر فیلتر کالمن.

Sliding mode Control of an Autonomous Underwater vehicle with Parametric uncertainty and Sensors Noises

R. Hasanzadeh Ghasemi
M. Hedayati Khodayari

Department of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran
Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

Sliding mode control, due to its great robustness, is very effective approach for underwater vehicles. Due to complexity of underwater environment and existence of disturbance, robust controllers such as sliding mode control have appropriate results in experimental tests. In this paper, sliding mode control has been used for depth channel and steering channel. It has been used for linear and nonlinear systems with parametric uncertainty and sensor noise. Kalman filter observer has been applied to estimate the values of state variables of the underwater vehicle dynamic system that is excited by stochastic disturbances and stochastic measurement noise. Simulation results show that the proposed method is effective in control of depth and steering of the AUV and show that this method can obtain high precision tracking control performance.

Keywords: Sliding Mode Control; Autonomous Underwater Vehicle; Chattering; Kalman Filter Observer.

ضرایب هیدرودینامیک و اغتشاشات خارجی به دلیل جریان‌های دریایی. ثابت شده است که روش کنترل مود لغزشی (SMC) به دلیل مقاوم بودن در مقابل عدم قطعیت‌های مدل‌سازی و اغتشاشات خارجی، بسیار موثر بوده و می‌تواند مشکلات ذکر شده برای کنترل موقعیت سیستم‌های زیرسطحی را به خوبی برطرف نماید [۷ و ۸].

در [۹] یک کنترل مود لغزشی چند متغیره^۳ برای یک ROV^۴ ارائه شده است که در مقابل عدم قطعیت پارامتری مقاوم است.

در [۱۰] کنترل مود لغزشی چند متغیره تطبیقی ارائه شده است که بر اساس بازخورد حالت^۵ بوده و در آن سرعت، سمت و عمق دکوپله شده اند. کنترلگر طراحی شده به طور موفقیت آمیزی روی AUV مدل NPS ARIES اجرا شده است [۱۱].

انواع مختلفی از کنترلگرهای مود لغزشی برای کنترل مدل‌های مختلف AUV و ROV بکار برده شده است. از آن جمله می‌توان به کنترلگر مود لغزشی معمولی توسط ها و همکاران [۱۲]، ژو و همکاران [۱۳]، ون و همکاران [۱۴]، کنترلگر مود لغزشی تطبیقی بر اساس شبکه عصبی توسط ژانگ و چو [۱۵]، کنترلگر مود لغزشی تطبیقی فازی

۱- 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 مهم‌ترین موضوعات در شناورهای زیرسطحی طی کردن دقیق مسیر مطلوب است. این موضوع می‌تواند در کاربردهای مانند اکتشاف میادین نفتی دریایی، تحقیقات در بخش‌های عمیق دریا، استخراج از منابع زیردریا، نقشه برداری‌های 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، می‌توان از کوبلینگ حرکت در صفحات افقی و عمودی صرف‌نظر کرد. به عبارتی دو کانال سمت و عمق را می‌توان مستقل از هم در نظر گرفت. این فرض توسط لیونل و سوتانتو [۴]، لای و لی [۵] و نیز کارلوس و همکاران [۶] بکار گرفته شده است. در این مقاله نیز ما از این فرض کمک می‌گیریم.

اما طراحی سیستم‌های 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

² Sliding Mode Control

³ multivariable

⁴ Remotely Operated Vehicle

⁵ State Feedback

¹ Autonomous Underwater Vehicle

اما، برای بدست آوردن یک پاسخ کنترل بهینه تنظیم شیب صفحه سویچ کننده کنترل مود لغزشی باید در عمل و به صورت آزمایشگاهی انجام گیرد. در صورتی که کنترل مود لغزشی مطابق با یک منحنی غیرخطی بهینه زمانی سویچ کند، پاسخ زمانی کنترل بهینه را می‌توان بدون هر تنظیم دستی بدست آورد. اما تعیین جواب این منحنی غیرخطی به صورت تحلیلی بسیار مشکل خواهد بود. در [۲۶] یک کنترل مود لغزشی بهینه زمانی برای اساس شبکه عصبی ارائه شده است که از شبکه عصبی برای حل منحنی غیرخطی بدون هیچ مدل دینامیکی تحلیلی از سیستم استفاده می‌کند.

روش‌های کنترل مود لغزشی به دلیل ذات پیچیده آن معمولاً دارای مشکلاتی در شبیه سازی و اجرا می‌باشد. در واقع روش بررسی شده در این مقاله سعی کرده است، روش قابل کاربردی را ارائه نماید که در عمل نیز قابل پیاده سازی باشد. نیاز به پردازش گره‌های قوی و نیز وجود چترینگ از عیوب کنترلگرهای مود لغزشی در عمل هستند که معمولاً در مقام شبیه سازی بی اهمیت تلقی می‌شود و محققین این حوزه از کنترل از آن غفلت می‌کنند و به این مهم پرداخته نمی‌شود که آیا کنترلگر ارائه شده می‌تواند در عمل قابل پیاده سازی باشد یا خیر. روش بکار برده شده در این مقاله به دلیل استفاده از بازخورد حالت و نیز استفاده از روابط ریاضی ساده نیازمند پردازش گر ساده است تا بتوان کنترل *real time* ارائه کرد و با حذف مناسب و کامل چترینگ امکان اجرا توسط عملگر و آسیب ندیدن آنها را به همراه خواهد داشت. برای بررسی اصول اولیه روش‌های کنترل مود لغزشی مبتنی بر بازخورد حالت می‌توان از مقاله هیللی و لینارد [۲۷] و نیز در مرجع [۲۸ و ۲۹] استفاده کرد. این روش بر اساس تکنیک فیدبک حالت بعلاوه بخش غیرخطی به خاطر رفتار لغزش است.

۲- مدل سازی شناور زیرسطحی

مدل واقعی شناور زیرسطحی، یک مدل غیرخطی دو ورودی- دو خروجی بوده که در [۳۰] به طور کامل استخراج شده است. در یکی از روش‌های طراحی کنترلگر مود لغزشی، نیاز به مدل خطی سازی شده از مدل واقعی است. بدین منظور و برای امکان اعمال کنترلگر، معادلات شناور زیرسطحی، خطی سازی و دی کویله می‌شود. به این ترتیب با دو سیستم کاملاً مجزا خطی در دو کانال عمق و سمت کار خواهیم کرد. در شکل ۱ نحوه الصاق دستگاه‌های مختصات و نیز متغیرهای مختلف سیستم نشان داده شده است.

۲-۱- کانال عمق

با تغییر زاویه بالک‌های افقی^۱، 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.

توسط بسا و همکاران [۱۶]، کنترلگر مود لغزشی فازی با سطح لغزش PID [۱۷]، کنترلگر مود لغزشی تطبیقی برای شناور زیرسطحی سرعت بالا [۱۸] اشاره کرد.

کنترل مود لغزشی (SMC) با عنوان کنترل با ساختار متغیر (VSC)^۱ نیز شناخته می‌شود. مقاوم بودن کنترلگر به کمک مفهوم سطح لغزش تضمین می‌شود. در واقع به کمک لغزش در امتداد خط سیر^۲ 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^۳ گفته می‌شود. 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 می‌توان به این مفهوم رسید. کنترلگر مود لغزشی به خوبی عملکرد سیستم را بهبود خواهد داد اما این بهبود به قیمت پدیده چترینگ^۴ در رفتار کنترلگر تمام می‌شود. در ادامه نشان داده می‌شود که امکان کاهش این پدیده وجود دارد.

به این ترتیب کنترل مود لغزشی شامل دو مولفه است: یک بخش راه انداز که متغیرهای حالت سیستم را برای رسیدن و ماندن روی سطح لغزش پایدار از پیش تعریف شده مجبور می‌کند و یک صفحه لغزش که اطمینان می‌دهد دینامیک خطای سیستم‌ها در وضعیت مطلوب قرار دارد [۱۹]. معمولاً سطح لغزش بوسیله یک دینامیک خطی دلخواه بیان می‌شود و تنها پایداری مجانبی را تضمین می‌کند که بدین معناست که متغیرهای حالت سیستم به زمان بی نهایت نیاز دارند تا به نقطه تعادل همگرا شوند. اما واضح است که پایداری در زمان محدود سبب دقت بالا و پاسخ دینامیکی سریع‌تر سیستم خواهد شد [۲۰].

بنابراین کنترل مود لغزشی ترمینال (TSMC)^۵ و ویرایش بهبود یافته آن NTSMC که شکل دیگری از کنترل مود لغزشی معمولی هستند و می‌توانند پایداری زمان محدود را تامین کنند، در [۲۱] پیشنهاد و بررسی شده است. با الهام از این ایده بعضی استراتژی‌های کنترلی به همراه حساب کسری^۶ و TSMC/NTSMC هم برای مرتبه کسری و هم برای مرتبه صحیح در سال‌های گذشته گزارش شده است [۲۲]. یکی از استراتژی‌های کنترلی جذاب ترکیب روش کنترل مرتبه کسری^۷ با کنترل مود لغزشی است [۲۳ و ۲۴]. تایید شده است که روش TSMC/NTSMC مرتبه کسری، عملکرد کنترل بهتری از مورد مرتبه صحیح ایجاد می‌کند. این مساله حتی برای سیستم‌های مرتبه صحیح نیز صادق است. با مطالعه توسعه روش‌های کنترل مود لغزشی مرتبه کسری در سال‌های گذشته، بیشتر مطالعات تئوریک و کاربردهای عملی روی استراتژی‌های کنترل بازخورد کامل تمرکز کرده‌اند که در بسیاری از کاربردهای عملی به دلیل عدم امکان اندازه گیری همه متغیرهای حالت این مساله مناسب نخواهد بود. به همین دلیل در [۲۵] برای یک طبقه از سیستم‌های غیرخطی کسری این معضل بررسی شده است.

¹Variable Structure Control

²Robustness

³Trajectory

⁴Sliding Surface

⁵Chattering

⁶Terminal Sliding Mode Control

⁷Fractional Calculus

⁸Fractional Order

⁹Stem

$$\begin{aligned}
 &+z_G(qr - \dot{p}) = Y_{res} + Y_{v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + Y_{ur}ur \\
 &+ Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_G\dot{v} + Y_r\dot{r} + Y_{uu}\delta_r u^2 \delta_r \\
 I_z \dot{r} + (I_y - I_z)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) \\
 &- y_G(\dot{u} - vr + wq)] \\
 &= N_{res} + N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_{ur}ur + N_{wp}wp \\
 &+ N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_v\dot{v} + N_r\dot{r} + N_{uu}\delta_r u^2 \delta_r
 \end{aligned}$$

بعد از خطی‌سازی، معادلات مطابق معادله (۵) تعیین می‌شود [۳۱]:

$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -Y_r & 0 & 0 \\ -N_{\dot{v}} & I_z - N_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_v & Y_r & 0 \\ N_v & N_r & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ y \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{\delta_r} \\ N_{\delta_r} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (5)$$

با جایگذاری پارامترهای ارائه شده در مرجع [۳۲] می‌توان معادلات را به فرم فضای حالت (۶) نوشت:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= Ax + Bu \\
 A &= \begin{bmatrix} -1.036 & 0.009 & 0 \\ -0.777 & -0.821 & 0 \\ 0 & 1.000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 B &= \begin{bmatrix} 0.186 \\ -1.144 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (6)$$

اما مدل کنترلی برای y را می‌توان به صورت معادله (۷) استفاده کرد [۳۳]:

$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -Y_r & 0 & 0 \\ -N_{\dot{v}} & I_z - N_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_v & Y_r - mU \\ N_v & N_r \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ y \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{\delta_r} \\ N_{\delta_r} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (7)$$

که با جایگذاری پارامترها و نوشتن به فرم فضای حالت (۸) خواهد بود:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= Ax + Bu \\
 A &= \begin{bmatrix} -1.036 & -0.707 & 0 & 0 \\ -0.777 & -0.987 & 0 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0 & 1.540 \\ 0 & 1.000 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 B &= \begin{bmatrix} 0.186 \\ -1.144 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (8)$$

۳- کنترلگر مود لغزشی

در این بخش روند طراحی کنترلگر 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- با چند متغیر حالت (۹) بیان کرد:

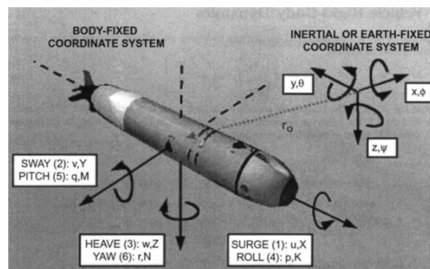
$$\dot{x} = Ax + bu + f(x) \quad (9)$$

که $f(x)$ تابع غیرخطی است که شامل عدم قطعیت و کوپلینگ‌های مدل نشده است. به این ترتیب قانون کنترلی دارای دو بخش به صورت معادله (۱۰) است:

$$u = \hat{u} + \bar{u} \quad (10)$$

که \hat{u} بخش نامی یا محاسبه شده و \bar{u} بخش لغزشی غیرخطی است. \hat{u} از بخش خطی معادله (۹) برای تعیین رفتار کنترلگر 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 صورت معادله (۱۱) تعریف می‌شود:

$$\sigma(\bar{x}) = h^T \bar{x}, \quad \bar{x} = x - x_d \quad (11)$$



شکل ۱- دستگاه‌های مختصات متصل به بدنه و اینرسی [۱۹]

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 (δ_s) است. زیر سیستم مربوط به کنترل عمق بوسیله چهار معادله (۱) قابل بیان است.

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

برای استفاده از کنترلگر مود لغزشی، معادلات حرکت (۱) در نقطه تعادل $\theta = w = q = 0$ و سرعت $u = 1.5 \text{ m/s}$ خطی‌سازی می‌شود. به این ترتیب شکل خطی معادله (۲) خواهد بود [۳۰]:

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

با جایگذاری پارامترهای ارائه شده در مرجع [۳۰] می‌توان معادلات را به فرم فضای حالت (۳) زیر نوشت:

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

۲-۲- کانال سمت

زمانی که AUV در صفحه افقی حرکت می‌کند، تغییر زاویه بالک‌های عمودی^۱، سبب گشتاور یاو روی شناور شده و نتیجه‌اش تغییر سمت شناور می‌باشد. برای کنترل سمت، سه پارامتر مرتبط عبارتست از: سرعت در راستای Y (v)، نرخ زاویه یاو (r) و زاویه یاو (ψ). متغیر کنترلی نیز تغییر زاویه بالک عمودی (δ_r) است.

مشابه با کنترلگر عمق معادلات زیرسیستم مربوطه به صورت معادله (۴) خواهد بود:

$$\begin{aligned}
 \dot{\psi} &= \frac{\sin \phi}{\cos \theta} q + \frac{\cos \phi}{\cos \theta} r \\
 m[\dot{v} - wp + ur + x_G(pq + \dot{r}) - y_G(r^2 + p^2)
 \end{aligned} \quad (4)$$

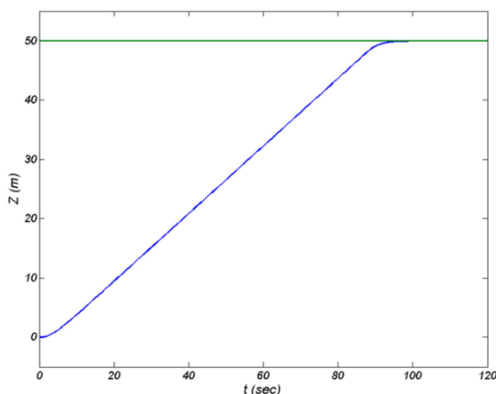
^۱Rudder

نظر گرفته شده است. همین‌طور که می‌دانیم پاسخ زمانی سیستم را به کمک جایابی قطب‌ها تعیین می‌کنیم. به این ترتیب قطب طوری انتخاب شده است که پاسخ زمانی مطلوب باشد.

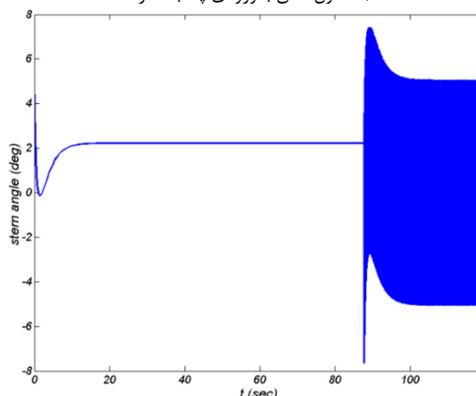
۳-۱-۱- کنترل عمق

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 نشان‌دهنده عملکرد مطلوب کنترلگر می‌باشد. اماد شکل ۲-ب ورودی کنترلی بالک افقی نشان‌دهنده عملکرد چترینگ می‌باشد. عملیاتی مطلوب نمی‌باشد.

اکنون برای نشان دادن حذف چترینگ ورودی کنترلی بالک افقی، قانون کنترلی مود لغزشی را با تابع tanh استفاده می‌کنیم. نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد علاوه بر مطلوب بودن عملکرد کنترلگر 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 ۲- کنترل مود لغزشی عمق شناور با وجود sgn در قانون کنترلی برای سیستم خطی

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

سطح لغزش $\sigma(\tilde{x})$ را می‌توان به وسیله جایابی قطب تعریف کرد که در مورد متغیرهای حالت با تعیین مقادیر ویژه پلایه آسانی انجام می‌گیرد. با استفاده از تکنیک فیدبک حالت، بردار بهره فیدبک k به صورت معادله (۱۲) تعریف می‌شود:

$$\tilde{u} = -k^T x \quad (12)$$

با جایگذاری آن در معادله (۹) دینامیک حلقه بسته به صورت معادله (۱۳) خواهد بود:

$$\dot{x} = A_c x + b \tilde{u} + f(x) A_c = A - b k^T \quad (13)$$

برای تعیین بخش غیرخطی کنترلی، معادله (۹) را در h^T ضرب کرده و سپس از آن $h^T \dot{x}_d$ کسر می‌شود، که معادله (۱۴) بدست می‌آید:

$$\dot{\sigma}(\tilde{x}) = h^T A_c x + h^T b \tilde{u} + h^T f(x) - h^T \dot{x}_d \quad (14)$$

با انتخاب معادله (۱۵)

$$h^T b \tilde{u} = h^T \dot{x}_d - h^T \hat{f}(x) - \eta \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (15)$$

که در آن $\eta > 0$ و $\hat{f}(x)$ تخمینی از $f(x)$ است، معادله (۱۶) بدست می‌آید:

$$\dot{\sigma}(\tilde{x}) = h^T A_c x - \eta \operatorname{sgn}(\sigma) + h^T [f(x) - \hat{f}(x)] \quad (16)$$

که در رابطه (۱۶) تابع علامت است. اگر همیشه دارای علامت مخالف با σ باشد، سیستم همگرا خواهد بود. با انتخاب به عنوان بردار ویژه A_c^T برای مقدار ویژه $\lambda = 0$ معادله (۱۷) برقرار است:

$$h^T A_c x = 0 \quad (17)$$

و بنابراین رابطه (۱۶) به صورت معادله (۱۸) در خواهد آمد:

$$\dot{\sigma}(\tilde{x}) = -\eta \operatorname{sgn}(\sigma) + h^T [f(x) - \hat{f}(x)] \quad (18)$$

بنابراین سیستم همیشه همگراست اگر شرط (۱۹) تامین شده باشد:

$$\eta > |h| \cdot |f(x) - \hat{f}(x)| \quad (19)$$

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 کنترلی نهایی ترکیبی از دو ورودی کنترلی بوده و به صورت معادله (۲۰) خواهد بود:

$$u = -k^T x + (h^T b)^{-1} \left[h^T \dot{x}_d - h^T \hat{f}(x) - \eta \tanh\left(\frac{\sigma}{\varphi}\right) \right] \quad (20)$$

که 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.

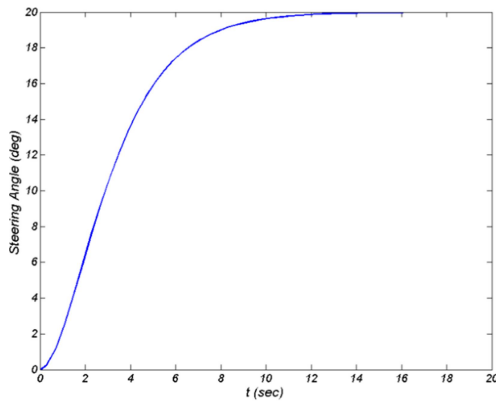
۳-۱- طراحی کنترلگر مود لغزشی در دو کانال عمق و

سمت برای سیستم خطی سازی شده

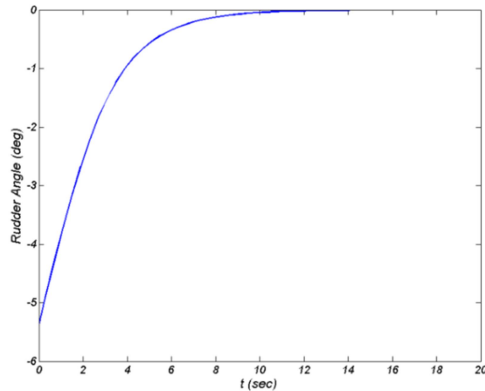
به منظور عملیاتی بودن نتایج کنترلی مود لغزشی، برای زاویه بالک‌ها (افقی و عمودی) که ورودی کنترلی هستند، محدودهمجاز تعریف می‌کنیم. محدوده مجاز به صورت $10 \text{ deg} < \delta_p, \delta_s < 10 \text{ deg}$ در

¹Saturation

²Overshoot

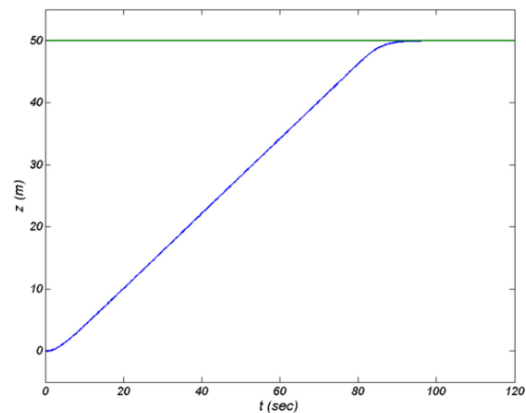


الف) کنترل سمت با ورودی پله با اندازه 20 deg

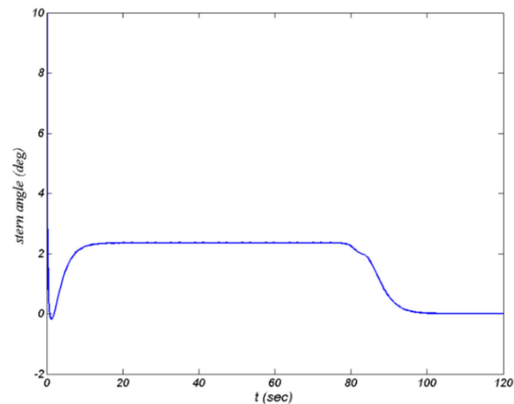


ب) تغییرات زاویه بالک عمودی

شکل ۴- نتایج شبیه سازی کانال سمت با کنترلگر مود لغزشی برای سیستم خطی



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

در زیر سیستم کنترل سمت آنچه را کنترلگر در اختیار سیستم قرار می دهد زاویه بالک عمودی بوده و آنچه از سیستم به کنترلگر تحویل می شود متغیرهای سرعت در راستای ψ ، سرعت زاویه ای حول Z ($\dot{\psi}$) و زاویه یاو (ψ) می باشد. همچنین در زیر سیستم کنترل عمق آنچه را کنترلگر در اختیار سیستم قرار می دهد زاویه بالک افقی بوده و آنچه از سیستم به کنترلگر تحویل می شود متغیرهای سرعت در راستای Z (\dot{W})، سرعت زاویه ای حول ψ (Q)، موقعیت شناور در راستای Z و زاویه پیچ شناور (θ) می باشد.

به این ترتیب با اعمال ورودی های مطلوب قبلی برای عمق و زاویه یاو نتایج حاصل از کنترلگر مود لغزشی به سیستم غیرخطی واقعی بدست می آید. نمودار کنترل عمق و ورودی کنترلی بالک افقی در شکل ۵ و نمودار کنترل سمت و ورودی کنترلی بالک عمودی در شکل ۶ آمده است.

نتایج بدست آمده نشان دهنده رفتار مطلوب سیستم تحت کنترل مود لغزشی می باشد. به این ترتیب کنترلگر مود لغزشی طراحی شده بر اساس سیستم خطی سازی شده، برای سیستم غیرخطی نیز مطلوب بوده و قابل استفاده است.

۳-۱-۲- کنترل سمت

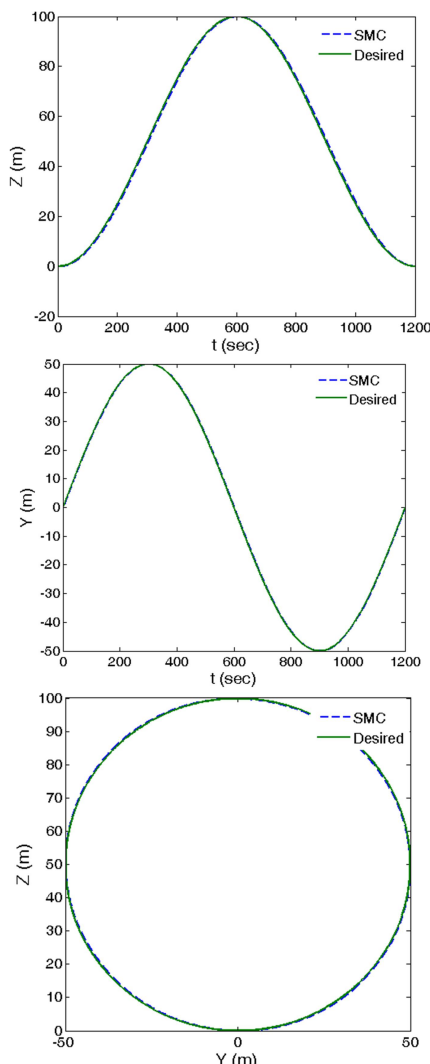
مشابه با کانال عمق، برای طراحی کنترلگر مود لغزشی کانال سمت نیز از مدل خطی سازی شده استفاده می شود. در صورت اعمال ورودی پله مطلوب 20 deg برای زاویه یاو^۱ نمودار رهگیری شناور و ورودی کنترلی بالک عمودی در شکل ۴ الف و ب، ارائه شده است. نتایج کنترلگر مود لغزشی برای کانال سمت نیز مطلوب بوده و بالک عمودی نیز تغییرات مطلوب و منطقی دارد.

۳-۲- اعمال کنترل مود لغزشی طراحی شده به مدل غیر خطی سیستم

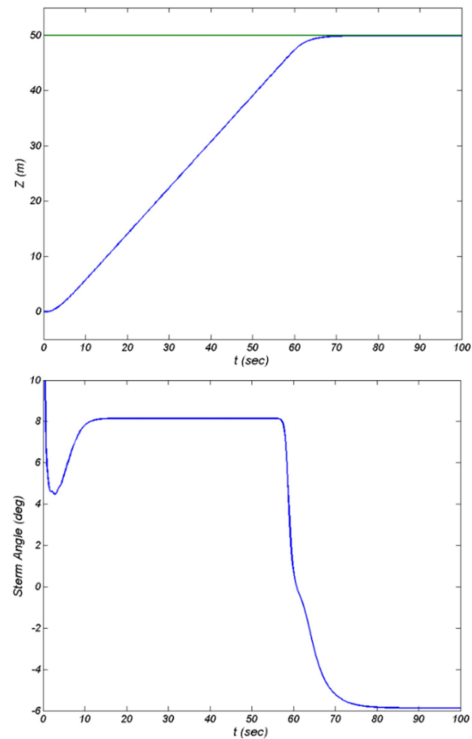
اگرچه طراحی کنترلگر مود لغزشی بر اساس سیستم خطی سازی شده انجام می گیرد، اما باید بعد از اعمال به سیستم غیر خطی اصلی پاسخ مناسب داشته باشد. به منظور بررسی، سیستم خطی سازی شده برداشته می شود و به جای آن سیستم غیرخطی جایگزین می گردد. بنابراین در این حالت خروجی کنترلگر، به جای سیستم خطی به سیستم غیرخطی وارد می شود و فیدبک های حالت لازم، از سیستم غیرخطی گرفته می شود. با توجه به اینکه سیستم کلی شامل کنترل عمق و سمت می باشد، دو زیر سیستم به منظور طراحی کنترلگر مود لغزشی طراحی می شود.

^۱Yaw Angle

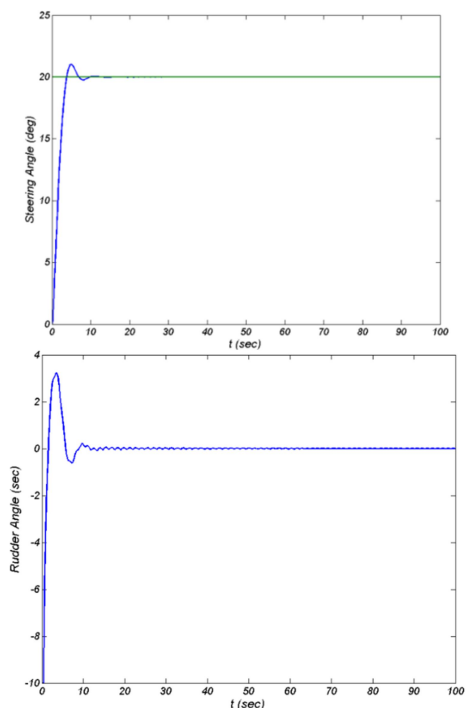
قرار داد. نتایج مربوط به کنترل هر کدام از مولفه‌های z و z و کنترل مسیر دایره‌ای در شکل ۷ آورده شده است. با دقت در نمودارهای مجزا مربوط به z و z ، مشاهده می‌شود که زمان‌ها به نحوی در نظر گرفته شده است که از تغییر شدید اجتناب شود تا برای رهگیری بالک‌ها به اشباع نرسند. به این ترتیب کنترلگر به خوبی مسیر مورد نظر را رهگیری کرده است. اما در ادامه نمونه‌ای از مسیر ارائه می‌شود که در آن به دلیل اشباع بالک‌ها، رهگیری مسیر به خوبی حالت قبل انجام نگرفته است. نمودارهای مربوط به این حالت در شکل ۸ آورده شده است. عملکرد بالک‌ها نشان‌دهنده اشباع در بخش‌هایی از مسیر مربوط به عمق است. در واقع بالک عمودی برای رهگیری z نیاز به تغییرات بیش از محدوده نمی‌باشد. 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 ۷- نمودار کنترل z و y و مسیر دایره‌ای در صفحه z - y برای سیستم غیرخطی

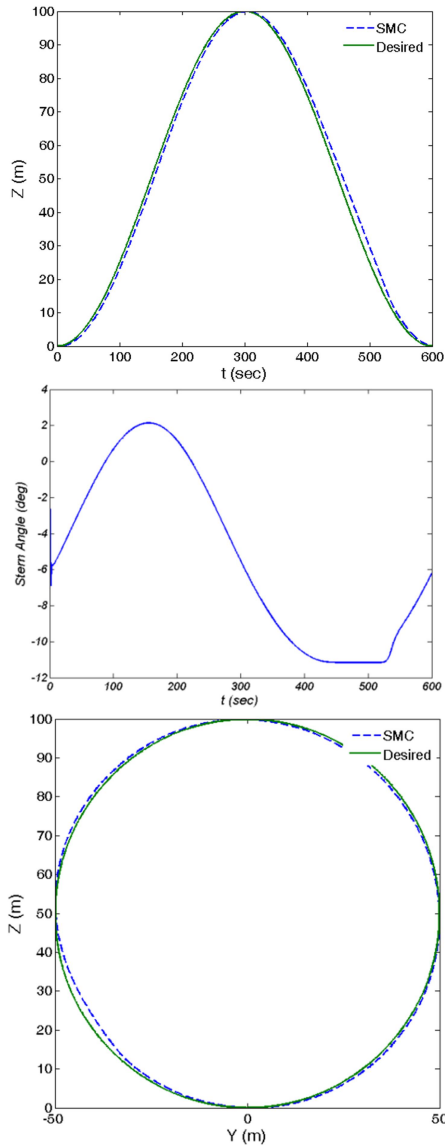


شکل ۵- نمودار کنترل عمق و ورودی کنترلی بالک افقی برای سیستم غیرخطی



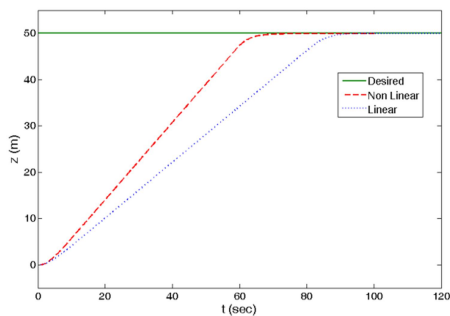
شکل ۶- نمودار کنترل سمت و ورودی کنترلی بالک عمودی برای سیستم غیرخطی

در صورتی که در سیستم کلی هدف کنترل همزمان z و z باشد می‌توان به کمک کنترل مسیر دایره‌ای، عملکرد کنترلگر را مورد ارزیابی

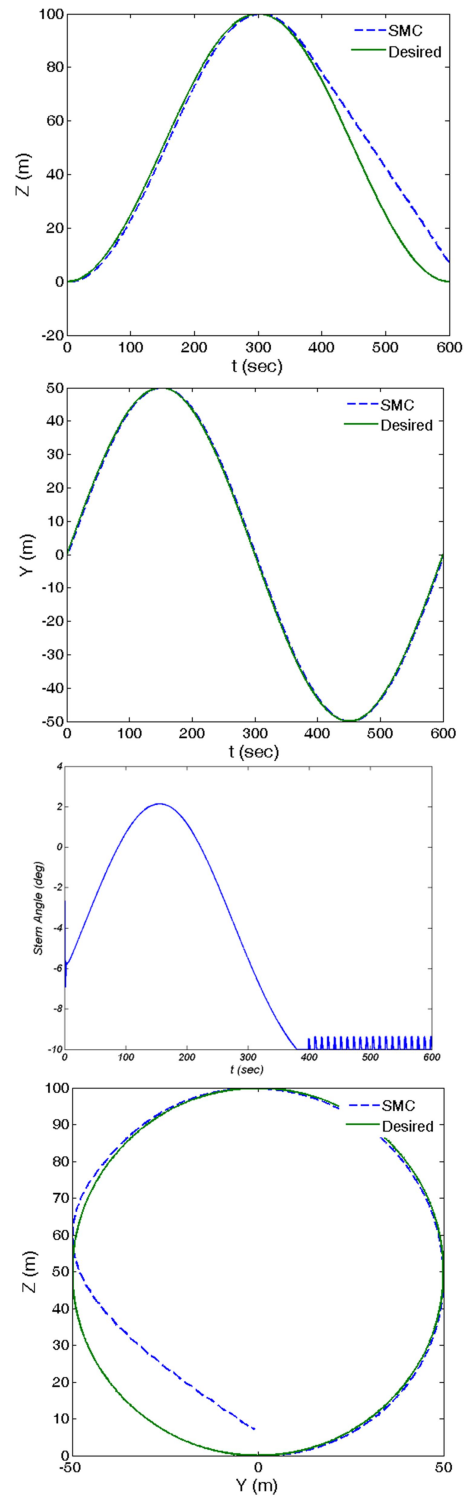


شکل ۹- نمودار کنترل z و y و مسیر دایره‌ای در صفحه z - y برای تغییرات شدید z و y با محدوده زاویه ± 12 درجه برای بالک‌ها

به منظور مقایسه نتایج حاصل از سیستم خطی و غیر خطی، در شکل ۱۰ مقایسه کنترل عمق در این دو مدل ارائه شده است که نشان دهنده نزدیک بودن نتایج هر دو مدل می‌باشد.



شکل ۱۰- مقایسه کنترل عمق برای مدل خطی و غیر خطی



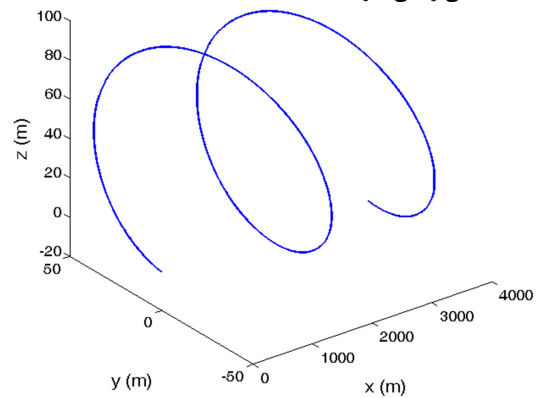
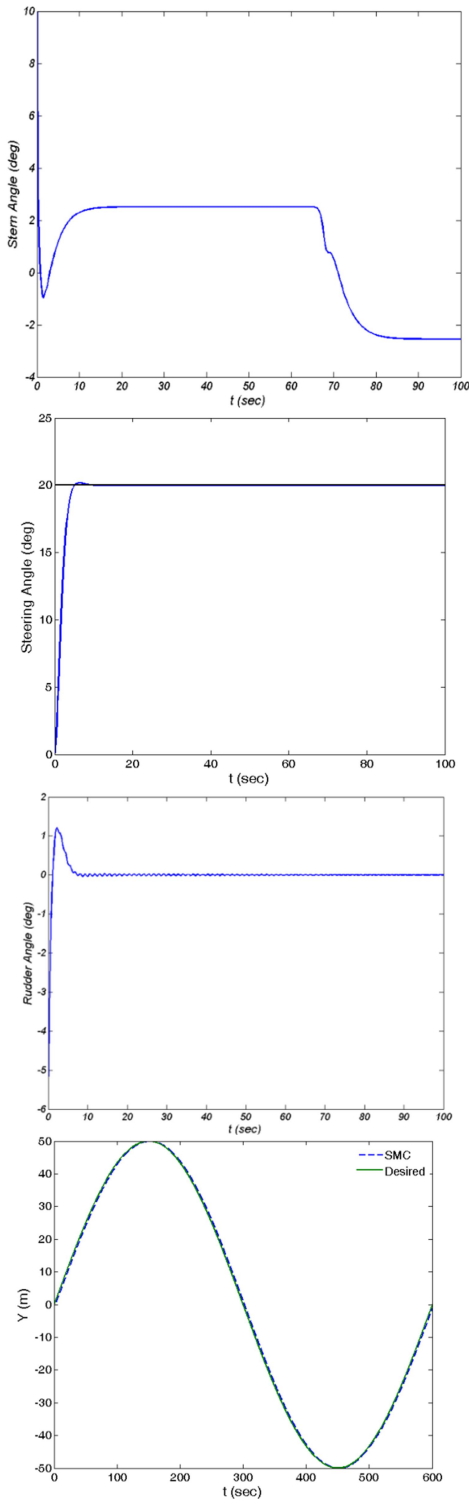
شکل ۸- نمودار کنترل z و y و مسیر دایره‌ای در صفحه z - y برای تغییرات شدید z و y با محدوده زاویه ± 10 درجه برای بالک‌ها

در صورتیکه محدوده اشباع را از ± 10 درجه به ± 12 درجه افزایش دهیم، نتایج رهگیری برای z و در نتیجه برای مسیر دایره‌ای به نحو بهتری انجام می‌پذیرد. این موضوع در شکل ۹ نشان داده شده است.

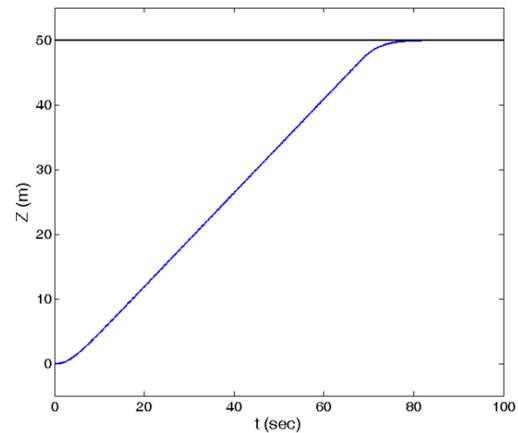
۳-۳- اعمال عدم قطعیت مدل سازی با استفاده از پارامترهای جدید و بررسی نتایج حاصل از کنترلگر طراحی شده

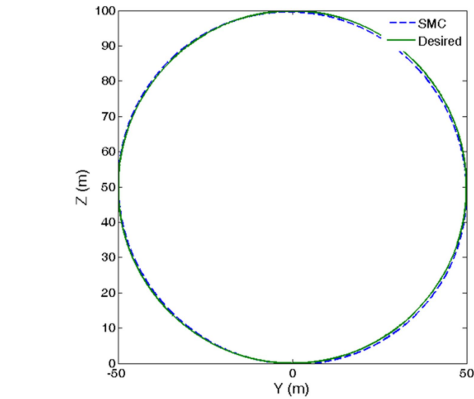
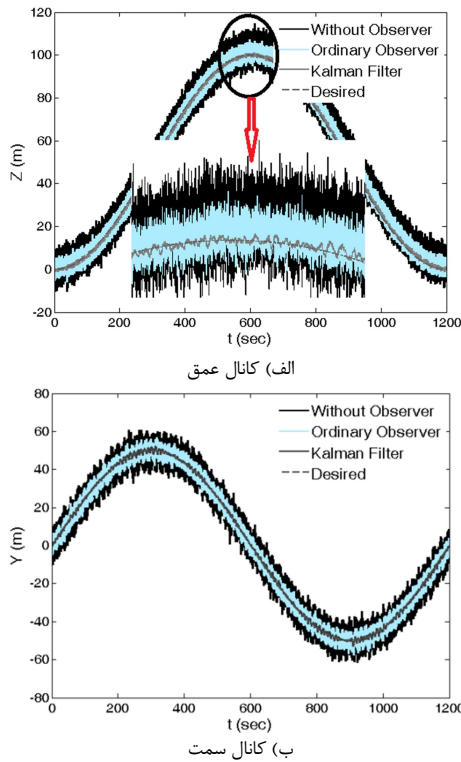
اطمینان از کنترلگر طراحی شده در صورتی تامین خواهد شد که مقاوم بودن آن در مقابل عدم قطعیت‌های مدلسازی و اغتشاشات تضمین شده باشد. برای بررسی این مهم، تمامی ضرایب هیدرودینامیک استفاده شده در سیستم غیرخطی که از مرجع [۳۰] گرفته شده با ضرایب هیدرودینامیک محاسبه شده به کمک روش‌های تحلیلی جایگزین می‌شود تا هم مقاوم بودن کنترلگر 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 [۳۰] در کل در حدود ۳۰ درصد اختلاف دارد.

نتایج حاصل از اعمال کنترلگر مود لغزشی در شکل ۱۱ و ۱۲ آورده شده است. در شکل ۱۱ مسیر سه بعدی طی شده با وجود کنترلگر مود لغزشی برای دو مجموعه ضرایب مذکور آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد سیستم جدید نیز دارای رفتار مطلوبی از رسیدن به عمق و زاویه یاو ورودی می‌باشد. این بررسی مقاوم بودن کنترل مود لغزشی طراحی شده را تایید می‌کند. این بررسی را می‌توان به ازاء سیستم‌های مختلف با ضرایب متفاوت نیز بررسی کرد. با وجود کنترلگر هر دو سیستم مسیر کاملاً یکسانی را طی نموده‌اند.



شکل ۱۱- مسیر سه بعدی با ضرایب مرجع [۱۹] و ضرایب محاسبه شده





شکل ۱۲- نتایج شبیه سازی کنترلرگر مد لغزشی برای سیستم غیرخطی با ضرایب محاسبه شده

۴- بررسی کنترلر مد لغزشی در شرایط اعمال ورودی اغتشاشی و نویز حسگر

در این بخش شرایط واقعی تری از مدل سازی را مورد بررسی قرار می دهیم. در این حالت فرض می شود که سیستم تحت تاثیر ورودی اغتشاشی گوسی بوده و حسگرها نیز در اندازه گیری دارای نویزهای سفید هستند.

برای کانال عمق مشخصات اغتشاش ورودی $mean\ value=0$; $variance=0.1$ و مشخصات نویز اندازه گیری $mean\ value=0$; $variance=10$ در نظر گرفته شده و به همین ترتیب برای کانال سمت مشخصات اغتشاش ورودی $mean\ value=0$; $variance=0.1$ و مشخصات نویز اندازه گیری $mean\ value=0$; $variance=10$ در نظر گرفته شده است. برای تمامی نویزها $sample\ time=0.01$ لحاظ شده است.

نتایج نشان می دهد کنترلرگر مد لغزشی با وجود اغتشاش قادر است سیستم را کنترل نماید. در واقع پایداری سیستم مطلوب بوده، اما دارای عملکردی خوبی نیست (شکل ۱۳). به این ترتیب در این شرایط به منظور جلوگیری از اثرات مخرب اغتشاش از تخمین گرهای حالت کمک گرفته می شود. در این بخش ما با سیستم پیوسته کار می کنیم و بنابراین تخمین گرها نیز از نوع پیوسته هستند. در انتخاب تخمین گر می توان از تخمین گرهای معمولی استفاده کرد. اما با توجه به نویزی بودن متغیرهای حالت به نظر می رسد استفاده از تخمین گر فیلتر کالمن می تواند نتایج بهتری را در اختیار ما قرار دهد. پارامتر تخمین زده شده برای کنترل عمق Z و برای کنترل سمت Y می باشد.

در شکل ۱۳ مقایسه بین شرایطی که سیستم بدون مشاهده گر است و شرایطی که از مشاهده گر معمولی و مشاهده گر فیلتر کالمن استفاده شده است، انجام گرفته است. نتایج نشان می دهد، در تمام شرایط کنترلرگر مسیر مورد نظر را به خوبی رهگیری کرده است، اما دامنه نوسانات در اطراف مسیر برای فیلتر کالمن بسیار کمتر و مطلوب تر از مشاهده گر معمولی بوده و همچنین مشاهده گر معمولی دارای عملکرد بهتر از شرایط بدون مشاهده گر می باشد.

شکل ۱۳- مقایسه عملکرد کنترلرگر مد لغزشی با وجود اغتشاش در سیستم و نویز در اندازه گیری در صورت استفاده با عدم استفاده از تخمین گر حالت

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک کنترلرگر مد لغزشی برای ربات زیرسطحی طراحی و اعمال شد. روش طراحی کنترلرگر مد لغزشی براساس مدل خطی سازی شده بوده و در نهایت به سیستم غیرخطی اعمال شد. در طراحی کنترلرگر، 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 کنترلرگر مد لغزشی، اعمال عدم قطعیت های مدل سازی و اغتشاش به سیستم مورد بررسی قرار گرفت. برای بهبود عملکرد سیستم در شرایط وجود اغتشاش و نویز از مشاهده گرهای حالت کمک گرفته شد. که نتایج برای مشاهده گر فیلتر کالمن بسیار بهتر از مشاهده گر معمولی بوده است. مجموعه کنترلی ارائه شده در این مقاله را می توان به سادگی برای دیگر شناورهای زیر سطحی بکار برد. همچنین به دلیل عملیاتی بودن نتایج و ورودی های کنترلی، امکان اعمال و استفاده از این کنترلرگر در تست های واقعی شناورهای زیرسطحی به خوبی وجود دارد.

۶- مراجع

[1] Caccia M., Bono R. and Bruzzone G. B., Variable Configuration UUVs for Marine Science Applications. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 6, pp. 22-32, 1999.

[2] Zhang L. J., Jia H. M. and Jiang D. P., Sliding Mode Prediction Control for 3D Path Following of an Underactuated AUV. *19th IFAC World Congress*, Cape Town, South Africa, August 24-29, 2014.

- [21] Zak M., Terminal Attractor for Addressable Memory in Neural Network. *Physics Letters A*, Vol. 133, pp. 18-22, 1988.
- [22] Aghababa M. P., A Novel Terminal Sliding Mode Controller for a Class of non-Autonomous Fractional-Order Systems. *Nonlinear Dynamics*, Vol. 73, pp. 679-688, 2013.
- [23] Dadras S. and Momeni H. R., Passivity-Based Fractional-Order Integral Sliding-Mode Control Design for Uncertain Fractional-Order Nonlinear Systems. *Mechatronics*, Vol. 23, pp. 880-887, 2013.
- [24] Delavari H., Ghaderi R., Ranjbar A. and Momani S., Fuzzy Fractional-Order Sliding Mode Controller for Nonlinear Systems, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 15, No. 4, pp. 963-978, 2010.
- [25] Dadras S. and Momeni H. R., Fractional-Order Dynamic Output Feedback Sliding Mode Control Design for Robust Stabilization of Uncertain Fractional-Order Nonlinear System. *Asian Journal of Control*, Vol. 16, pp. 1-9, 2014.
- [26] Chatchanayuenyong T. and Parnichkun M., Neural Network Based-Time Optimal Sliding Mode Control for an Autonomous Underwater Robot, *Mechatronics*, Vol. 16, pp. 471-478, 2006
- [27] Healey A. J. and Lienard D., Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 327-339, 1993.
- [28] Lea R. K., Allen R. and Merry S. L., A Comparative Study of Control Techniques for an Underwater Flight Vehicle. *International Journal of Systems Science*, Vol. 30, No. 9, pp. 947-964, 1999.
- [29] Fossen T. I., Guidance and Control of Ocean Vehicles. *New York, Wiley*, 1995.
- [30] Prestero J. T., Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS AUV. *Master's Thesis*, MIT, Department of Ocean and Mechanical Engineering, 2001.
- [31] Yang C., Modular Modeling and Control for Autonomous Underwater Vehicle (AUV). *Master's Thesis*, Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, 2007.
- [32] Hall R. and Anstee R., Trim Calculation Methods for a Dynamical Model of the REMUS 100 Autonomous Underwater Vehicles. *Maritime Operations Division, DSTO-TR-2576*, 2011.
- [33] Mishra S. and Dinesh K., Heading Control of an Underwater Vehicle. *Bachelor Thesis*, Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, 2012.
- [3] Calyo O., Sousa A., Rozenfeld A. and Acosta G., Smooth Path Planning for Autonomous Pipeline Inspections. *The 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, Tunisia, 2009.
- [4] Lapiere L. and Soetanto D., Nonlinear Path Following Control of an AUV. *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 1734-1744, 2007.
- [5] Li J. H. and Lee P. M., A Neural Network Adaptive Controller Design for Free-Pitch-Angle Diving Behavior of an Autonomous Underwater Vehicle. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 52, No. 2, pp. 132-147, 2005.
- [6] Silvestre C., Cunha R., Paulino N. and Pascoal A., A Bottom-Following Preview Controller for Autonomous Underwater Vehicles. *IEEE Transactions on control systems technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 257-266, 2009.
- [7] Bessa W. M., Dutra M. S. and Kreuzer E., Depth Control of Remotely Operated Underwater Vehicles Using an Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 56, pp. 670-677, 2008.
- [8] Wang Y., Gu L., Gao M., Jia X., Zhou J., Liu J. and Zhou D., Depth Control of Remotely Operated Vehicles Using Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode Control Method. *Oceans Conference*, San Diego, CA, 2013.
- [9] Fossen T. I. and Sagatun S., Adaptive Control of Nonlinear System: A Case Study of Underwater Robotic Systems. *Journal of Robotics System*, Vol. 8, pp. 393-412, 1991.
- [10] Cristi R., Papoulias F. A. and Healey A. J., Adaptive Sliding Mode Control of Autonomous Underwater Vehicles in the Dive Plane. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 15, pp.152-160, 1990.
- [11] Marco D. B. and Healey A. J., Command, Control, and Navigation Experimental Results with the NPS ARIES AUV. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 26, pp. 466-476, 2001.
- [12] Ha T. K., Binugroho E. H., Seo Y. B. and Choi J. W., Sliding Mode Control for Autonomous Underwater Vehicle under Open Control Platform Environment. *Society of Instrument and Control Engineers of Japan Annual Conference*, Tokyo, Japan, August 20-22, 2008.
- [13] Zhou H., Liu K. and Feng X., State Feedback Sliding Mode Control without Chattering by Construction Hurwitz Matrix for AUV Movement. *International Journal of Automation and Computing*, Vol. 8, No. 2, pp. 262-268, 2011.
- [14] Kwon S. T., Shin D. H. and Joo M. G., Way-Point Tracking of AUV Using Sliding Mode Controller. *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 10, pp. 17-22, 2012.
- [15] Zhang M. and Chu Z., Adaptive Sliding Mode Control Based on Local Recurrent Neural Networks for Underwater Robot. *Ocean Engineering*, Vol. 45, pp. 56-62, 2012.
- [16] Essa W. M., Dutra M. S. and Kreuzer E., An Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller for Remotely Operated Underwater Vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 58, pp. 16-26, 2010.
- [17] Esfahani H. N. and Azimirad V., A New Fuzzy Sliding Mode Controller with PID Sliding Surface for Underwater Manipulators. *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*, Vol. 3, No. 9, pp. 224-249, 2013.
- [18] Xiao M., Modeling and Adaptive Sliding Mode Control of the Catastrophic Course of a High-speed Underwater Vehicle. *International Journal of Automation and Computing*, Vol. 10, No. 3, pp. 210-216, 2013.
- [19] Jin M., Lee J., Chang P. H. and Choi C., Practical Nonsingular Terminal Sliding-Mode Control of Robot Manipulators for High-Accuracy Tracking Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, pp. 3593-3601, 2009.
- [20] Yu S., Yu X., Shirinzadeh B. and Man Z., Continuous Finite-Time Control for Robotic Manipulators with Terminal Sliding Mode. *Automatica*, Vol. 41, No. 11, pp. 1957-1964, 2005.