

کنترل ردیابی شناورهای سطحی بدون سرنشین به روش مُد لغزشی غیرخطی در حضور موانع ثابت و متحرک

فرزانه عبداللهی^۲

دانشکده مهندسی برق
دانشگاه صنعتی امیرکبیر

خداداد واحدی^۱ و مصیب نوروزی نیا^۲

دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ دریافت: ۹۴/۳/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۹/۱)

چکیده

در این مقاله، به کنترل ردیابی شناورهای سطحی بدون سرنشین با استفاده از روش کنترل مقاوم مُد لغزشی در حضور موانع ثابت و متحرک پرداخته شده است. مدل ریاضیاتی شناورها به صورت سه درجه آزادی بوده و تنها شامل سینماتیک و دینامیک مربوط به راستاهای طولی، عرضی و دوران حول محور قائم است. این شناورها به صورت زیر-تحریک کنترل می‌شوند؛ یعنی با آن‌که سه درجه آزادی دارند؛ اما تنها به دو محرک در راستاهای طولی و دوران حول قائم مجهزند. ما از روش کنترل مُد لغزشی استفاده کرده‌ایم و دو سطح لغزش مرتبه اول و دوم که توابعی از خطاهای ردیابی هستند، برای راستاهای طولی و دوران حول قائم تعریف کرده‌ایم و با روش پایداری لیاپانوف، پایداری دینامیک خطا را اثبات کرده‌ایم. سپس، موانع ثابت و متحرکی را در مسیر شناور قرار داده‌ایم تا توانمندی شناور را در عبور ایمن از آن‌ها محک بزنییم. در پایان، شبیه‌سازی‌های عددی پیاده‌سازی شده‌اند تا صحت عملکرد کنترل‌کننده‌ها را نشان دهند.

واژه‌های کلیدی: شناور سطحی بدون سرنشین، کنترل مقاوم مُد لغزشی، سامانه زیر-تحریک، موانع ثابت و متحرک، روش پایداری لیاپانوف

Tracking Control of Unmanned Surface Vessels with Nonlinear Sliding Mode Method in Presence of Fixed & Moving Obstacles

Kh. Vahedi and M. Norouzi Nia
Imam Hossein Comprehensive University

F. Abdollahi
Electrical Engineering Department
AmirKabir University of Technology

(Received: June 1, 2015; Accepted: November 21, 2016)

ABSTRACT

In this paper, tracking control of unmanned surface vessels by using the robust mode sliding control in the presence of fixed and moving obstacles are investigated. The mathematical model of vessels is in three degree of freedom (3DOF) and only contains the kinematics and dynamics of relevant to surge, sway and yaw. These vessels are controlled in under actuated manner; although they have (3DOF), but only are equipped to two actuators in direction of surge and yaw. Next, we are used the mode sliding control method and introduced the first and second order of sliding surfaces as a function of tracking errors in direction of surge and yaw. Based on Lyapunov stability method, stability of dynamics of error has been proven. Then, we have put the fixed and moving obstacles in the trajectory of vessels to examine the safe crossing ability of them. Finally, numerical simulations are implemented to demonstrate the validity of proposed controllers.

Keywords: Unmanned Surface Vessel, Robust Control of Sliding Mode, Underactuated System, Fixed & Moving Obstacles, Lyapunov Stability Method

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): khvahedi@ihu.ac.ir

۲- کارشناس ارشد: kpnorozin@ihu.ac.ir

۳- استادیار: f_abdollahi@aut.ac.ir

۱- مقدمه

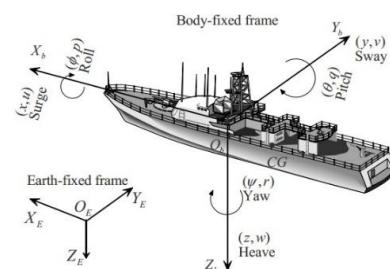
شناورهای سطحی بدون سرنشین کاربردهای عملی مختلفی دارند، نظیر: جست و جوی معادن زیر آب، جست و جوی کف دریا، جست و جوی غواصان مشکوک و ممانعت از ورود آن‌ها به یک منطقه حفاظت شده، ردیابی و تعقیب دیگر شناورهای مهاجم و همچنین، تجهیز آنان به دوربین‌هایی همه سویی^۶ و سلاح‌های نظامی برای مصارف نظامی [۱]. شناورها عمدتاً به صورت زیر-تحریک^۷ کنترل می‌شوند. کنترل سامانه‌های زیر-تحریک به دلیل طبیعت غیرخطی ذاتی و کاربردهای عملی‌اش به یکی از حوزه‌های تحقیقاتی فعال تبدیل شده است. یک سامانه زیر-تحریک است، اگر تعداد محرک‌های مستقل‌اش کم‌تر از تعداد درجات آزادی سامانه باشد. برای مثال، کنترل کشتی‌ها یا شناورهای سطحی بدون سرنشین اخیراً توجه بسیار زیادی از محققان را به خود جلب کرده است. شناورها معمولاً به دو پیشران یا یک پیشران با یک سکان^۸ مجهزند. این ساختار اساساً در شناورهای مرسوم استفاده می‌شود [۳]. پیچیدگی اصلی در کنترل شناورهای سطحی زیر-تحریک این است که آن‌ها در راستای محور عرضی^۹ هیچ‌گونه محرکی ندارند. از این گذشته برعکس سامانه‌های زیر-تحریک با قیدهای انتگرال‌ناپذیر، شناورهای سطحی مطرح‌شده دسته‌ای از سامانه‌های زیر-تحریک با دینامیک انتگرال‌ناپذیر هستند و قابل تبدیل به یک سامانه خوش تعریف است [۴]. با این حال، چندین مولف مسلط کنترل ردیابی مسیر را مطالعه کرده‌اند. کنترل‌کننده فیدبک حالت نامتغیر با زمان پیوسته در [۵] بررسی شده است تا به یک ردیابی موقعیت نمایی فراگیر دست یابند، با این فرض که سرعت طولی مرجع همیشه مثبت است. در [۶]، نویسندگان یک کنترل‌کننده ردیابی سینماتیکی پیشنهاد داده‌اند که پایداری نمایی فراگیر را برای یک شناور سطحی زیر-تحریک فراهم می‌آورد. در [۷]، یک قانون کنترل نامتغیر با زمان پیوسته برای به دست آوردن ردیابی نمایی فراگیر هم موقعیت و هم جهت‌گیری پیشنهاد شده است. در [۸]، یک کنترل‌کننده ردیابی متغیر با زمان پیوسته، با تبدیل مسئله ردیابی شناور به یک سامانه عمومی مطالعه شده است که شبیه سامانه یک روبات سیار شده است [۹]. دوحل سودمند برای مسئله ردیابی مسیر، با استفاده از روش مستقیم لیپانوف و تحت شرایط

امروزه کنترل شناورهای سطحی بدون سرنشین^۱، به یکی از حوزه‌های فعال و مورد علاقه محققان در حوزه کنترل تبدیل شده است. به موازات توسعه و گسترش وسایل نقلیه بدون سرنشین زمینی^۲ مانند انواع مختلف روبات‌های زمینی و وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین مانند UAV^۳ ها، امروزه وسایل نقلیه دریایی بدون سرنشین^۴ نیز، به سرعت در حال توسعه و تکامل هستند [۱]، (شکل ۱).



شکل (۱): نمایی کلی از یک شناور سطحی بدون سرنشین.

عمدتاً دو مدل دینامیکی برای توصیف رفتار یک شناور وجود دارد: مدل شش درجه آزادی و مدل سه درجه آزادی. مدل شش درجه آزادی شامل تمامی حرکات یک جسم صلب یعنی: حرکت طولی، حرکت عرضی و حرکت عمودی و دوران حول محور طولی، دوران حول محور عرضی و دوران حول محور عمودی است، حال آن‌که در مدل سه درجه آزادی، از حرکت عمودی، دوران حول محور طولی و دوران حول محور عرضی، به دلیل تاثیر ناچیزشان بر رفتار دینامیکی شناور صرف نظر می‌شود و سه درجه‌ی آزادی عمده و موثر بر حرکت را، یعنی: حرکت طولی، حرکت عرضی و دوران حول محور عمودی (حرکت در صفحه) را مدل‌سازی می‌کنند. شکل ۲ چارچوب مختصات جسم-ثابت^۵ و راستاهای حرکتی یک شناور دریایی را در حالت کلی نمایش می‌دهد [۲].



شکل (۲): چارچوب مختصات جسم-ثابت برای یک شناور دریایی.

6- Omnidirectional Camera

7- Under-actuated

8- Rudder

9- Sway

1- Unmanned Surface Vessels (USVs)

2- Unmanned Ground Vehicles (UGVs)

3- Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)

4- Unmanned Maritime Vehicles (UMVs)

5- Body-Fixed Frame

۲- فرمول بندی مسئله

مدل ریاضیاتی شناور سطحی زیر-تحریک سه درجه آزادی، در راستاهای طولی، عرضی و دوران حول محور قائم این گونه توصیف می شود [۳]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos(\psi) - v \sin(\psi) \\ \dot{y} &= u \sin(\psi) + v \cos(\psi) \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{u} &= \frac{1}{m_{11}} (\tau_u + m_{22}vr - d_{11}u) \\ \dot{v} &= \frac{1}{m_{22}} (-m_{11}ur - d_{22}v) + \frac{E}{m_{22}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\dot{r} = \frac{1}{m_{33}} (\tau_r - (m_{22} - m_{11})uv - d_{33}r)$$

مدل سینماتیکی (۱) شناور سطحی زیر-تحریک توسط رابطه زیر فشرده سازی شده است:

$$\dot{\eta} = R(\psi)v \quad (3)$$

که در آن، $\eta = [x, y, \psi]^T$ موقعیت‌ها در راستاهای طولی و عرضی و زاویه سمت^۸ هستند که در چارچوب مختصاتی زمین-ثابت تعریف شده‌اند. $v = [u, v, r]^T$ نشان‌دهنده سرعت شناور است؛ $R(\psi)$ نیز ماتریسی است که چارچوب مختصاتی زمین-ثابت را به چارچوب مختصاتی جسم-ثابت شناور انتقال می‌دهد. m_{11} ، m_{22} و m_{33} اثرات اینرسی و جرم افزوده شده شناور است، d_{11} ، d_{22} و d_{33} ترم‌های دمپینگ سیال هستند، نیروی طولی τ_u و گشتاور سمت τ_r تنها ورودی‌های سامانه هستند. E نیز یک نیروی خارجی اغتشاشی است. در این جا مسیر مرجع را به‌عنوان یک شناور مجازی زیر-تحریک در نظر می‌گیریم:

$$\begin{aligned} \dot{x}_d &= u_d \cos(\psi_d) - v_d \sin(\psi_d) \\ \dot{y}_d &= u_d \sin(\psi_d) + v_d \cos(\psi_d) \\ \dot{\psi}_d &= r_d \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{u}_d &= \frac{1}{m_{11}} (\tau_{ud} + m_{22}v_d r_d - d_{11}u_d) \\ \dot{v}_d &= \frac{1}{\hat{m}_{22}} (-\hat{m}_{11}u_d r_d - \hat{d}_{22}v_d) + E \\ \dot{r}_d &= \frac{1}{m_{33}} (\tau_{rd} - (m_{22} - m_{11})u_d v_d - d_{33}r_d) \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن، x_d ، y_d و ψ_d جابجایی مرجع رهبر مجازی و زاویه حرکت هستند، u_d ، v_d و r_d سرعت مرجع است، τ_{ud} و τ_{rd} ورودی‌های کنترلی مطلوب هستند. E نیز یک نیروی

کافی تحریک ماندگار در [۱۰] پیشنهاد شده است. غمام^۱ در [۱۱] یک روش برای حل موضوعات پایدارسازی و ردیابی مسیر، با استفاده از تکنیک‌های بازگشت به عقب^۲ پیشنهاد داد. دو^۳ در [۱۲]، کارهای بسیاری را روی مسائل ردیابی مسیر انجام داده است؛ مثلاً در [۱۳] یک کنترل‌کننده ردیابی به‌طور مجانبی و فراگیر را ارائه کرده است تا شناور یک مسیر مرجع را در چارچوب مختصاتی شناور تعقیب کند که توسط یک شناور مجازی به‌دست آمده است و این مسیر مرجع، می‌تواند منحنی‌وار یا مستقیم باشد. او در [۱۴] نیز به کنترل آرایش‌بندی شناورهای سطحی بیضوی شکل پرداخته است. ژوانگ لین^۴ و همکاران در [۱۵]، از یک روش جدید و قدرتمند برای کنترل یک شناور سطحی زیر-تحریک، تحت عنوان مد لغزشی مراتب بالاتر بهره برده است. او برای هر راستای تحت کنترل مجموع ضرایبی از سه سطح لغزشی مرتبه بالاتر را در نظر گرفته است.

در این مقاله، مسئله کنترل ردیابی یک شناور بدون سرنشین در حضور موانع ثابت و متحرک، با استفاده از روش مد لغزشی بررسی شده است. شناورها مدل دینامیکی سه درجه آزادی داشته و به‌صورت زیر-تحریک کنترل شده‌اند؛ یعنی با آن‌که شناور سه درجه آزادی است اما تنها دو محرک^۵ در راستاهای طولی^۶ و دوران حول محور قائم^۷ برای هدایت شناور طراحی و کنترل شده است. روش مد لغزشی یکی از روش‌های کنترل مقاوم به‌شمار می‌آید [۳]. در ادامه، دو سطح لغزشی تعریف شده است؛ یک سطح لغزشی مرتبه اول برحسب خطاهای ردیابی برای راستای طولی و یک سطح لغزش مرتبه دوم برای راستای دوران حول محور قائم. سپس، تابع لیاپانوف برحسب سطوح لغزش تعریف شده است تا پایداری دینامیک خطای شناور و همگرایی ردیابی مسیر شناور را به مسیر مطلوب، اثبات کند. پس از آن، از روش تابع پتانسیل استفاده می‌کنیم تا شناور بتواند با فاصله‌ای ایمن از موانع ثابت و متحرک بر سر راه خود، با اطمینان و ایمن عبور کند. در نهایت، شبیه‌سازی‌های عددی نمایش داده شده‌اند تا صحت و کارآمدی روش کنترلی استفاده شده را تایید کند.

- 1- GHommam
- 2- Back-Stepping
- 3- Do, K.D.
- 4- ZHuang, L., Dong
- 5- Actuator
- 6- Surge
- 7- Yaw

۳-۱- قانون کنترل برای راستای طولی τ_u

ما یک سطح لغزش به صورت زیر انتخاب می‌کنیم:

$$S_1 = u_e + \lambda_1 \int_0^t u_e(\tau) d\tau \quad (13)$$

که، $\Delta_1 > 0$. مشتق زمانی معادله (۱۳) به قرار زیر است:

$$\dot{S}_1 = \dot{u}_e + \lambda_1 u_e \quad (14)$$

با جایگذاری معادله (۸) در (۱۲) داریم:

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 &= \frac{1}{m_{11}}((\tau_u - \tau_{ud}) + m_{22}(vr - v_d r_d) - d_{11}u_e) + \lambda_1 u_e \\ &= \frac{m_{22}}{m_{11}}(vr - v_d r_d) + \left(\lambda_1 - \frac{d_{11}}{m_{11}}\right)u_e + \frac{1}{m_{11}}(\tau_u - \tau_{ud}) \end{aligned} \quad (15)$$

قانون کنترل معادل را این‌گونه انتخاب می‌کنیم:

$$\tau_{ueq} = \tau_{ud} - m_{22}(vr - v_d r_d) - (m_{11}\lambda_1 - d_{11})u_e \quad (16)$$

با هدف تضعیف کردن پدیده چترینگ^۱، ما یک تابع اشباع^۲ را به جای تابع علامت^۳ برمی‌گزینیم:

$$\text{sat}\left(\frac{S_1}{\Delta_1}\right) = \begin{cases} 1, & S_1 > \Delta_1 \\ \left(\frac{S_1}{\Delta_1}\right), & \left|\frac{S_1}{\Delta_1}\right| \leq 1 \\ -1, & S_1 < -\Delta_1 \end{cases} \quad (17)$$

سپس قانون کنترل طولی را به صورت زیر طراحی می‌کنیم:

$$\tau_u = \tau_{ueq} - \eta_1 \text{sat}\left(\frac{S_1}{\Delta_1}\right) \quad (18)$$

که، $\Delta_1 > 0$.

حال برای اثبات درستی انتخاب قانون کنترل مان، یک تابع لیاپونوف به صورت زیر کاندید می‌کنیم:

$$V_1 = \frac{1}{2} m_{11} S_1^2 \quad (19)$$

مشتق زمانی معادله (۱۹) این‌گونه حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= m_{11} S_1 \dot{S}_1 = m_{11} S_1 [\dot{u}_e + \lambda_1 u_e] \\ &= m_{11} S_1 \left[\frac{m_{22}}{m_{11}}(vr - v_d r_d) + \left(\lambda_1 - \frac{d_{11}}{m_{11}}\right)u_e + \frac{1}{m_{11}}(\tau_u - \tau_{ud}) \right] \\ &= S_1 [m_{22}(vr - v_d r_d) + (m_{11}\lambda_1 - d_{11})u_e + (\tau_u - \tau_{ud})] \end{aligned} \quad (20)$$

$$= S_1 \left[-\eta_1 \text{sat}\left(\frac{S_1}{\Delta_1}\right) \right]$$

خارجی اغتشاشی است. با معرفی یک ماتریس انتقال برای معادله سینماتیکی (۱)، نتیجه می‌شود:

$$R(\psi)R^T(\psi) = R^T(\psi)R(\psi) = I \quad (6)$$

$$\det(R(\psi)) = 1 \quad (7)$$

و سپس:

$$\begin{aligned} u &= \dot{x} \cos(\psi) + \dot{y} \sin(\psi) \\ \dot{u} &= \ddot{x} \cos(\psi) + \ddot{y} \sin(\psi) + vr \\ v &= -\dot{x} \sin(\psi) + \dot{y} \cos(\psi) \\ \dot{v} &= -\ddot{x} \sin(\psi) + \ddot{y} \cos(\psi) - ur \end{aligned} \quad (8)$$

مشابه معادله (۸)، سرعت‌های مطلوب به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} u_d &= \dot{x}_d \cos(\psi_d) + \dot{y}_d \sin(\psi_d) \\ \dot{u}_d &= \ddot{x}_d \cos(\psi_d) + \ddot{y}_d \sin(\psi_d) + v_d r_d \\ v_d &= -\dot{x}_d \sin(\psi_d) + \dot{y}_d \cos(\psi_d) \\ \dot{v}_d &= -\ddot{x}_d \sin(\psi_d) + \ddot{y}_d \cos(\psi_d) - u_d r_d \end{aligned} \quad (9)$$

خطاها این‌گونه تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} u_e &= u - u_d \\ v_e &= v - v_d \\ r_e &= r - r_d \end{aligned} \quad (10)$$

و در نهایت دینامیک خطا به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{u}_e &= \frac{1}{m_{11}}((\tau_u - \tau_{ud}) + m_{22}(vr - v_d r_d) - d_{11}u_e) \\ \dot{v}_e &= \frac{1}{m_{22}}(-m_{11}u_e r_d - d_{22}v_e - ur_e) \\ \dot{r}_e &= \frac{1}{m_{33}}((\tau_r - \tau_{rd}) - (m_{22} - m_{11})(uv - u_d v_d) - d_{33}r_e) \end{aligned} \quad (11)$$

۳- طراحی کنترل

به منظور کنترل شناور سطحی زیر- تحریک با استفاده از دو ورودی کنترلی، ما دو مرحله را برای کنترل کننده‌ها طری می‌کنیم. ابتدا قانون کنترل راستای طولی τ_u را طراحی می‌کنیم و در وهله دوم، قانون کنترل حرکت جانبی τ_r طراحی شده است. سطح پایدار جانبی S تعریف شده است. همه مسیرهای سامانه در زمان رسیدن t_{reach} به این سطح همگرا می‌شوند. شرط رسیدن به این سطح را با معرفی تابع لیاپانوف تعریف می‌کنیم:

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (12)$$

که، دیفرانسیل معادله (۱۲) منفی است. شرط رسیدن به

سطح لغزش این است که $\dot{V} = SS \leq -\gamma|S| \leq 0$ که $\gamma > 0$.

1- Chattering Phenomena

2- Saturation Function

3- Sign Function

و بنابراین، قانون کنترل سطح لغزشی τ_r به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_r = \tau_{rd} + \frac{p - \eta_2 \text{sat}\left(\frac{S_2}{\Delta_2}\right)}{q} \quad (31)$$

زمانی که $q=0$ ، قانون کنترل τ_r تکین است و این غیرقابل قبول است. پس فرض می‌کنیم که $u > 0$.

حال برای این سطح لغزش نیز یک تابع لیاپونوف کاندید می‌کنیم تا در واقع نشان دهیم خطای ردیابی به صفر میل می‌کند:

$$V_2 = \frac{1}{2} m_{22} m_{33} S_2^2 \quad (32)$$

با مشتق‌گیری زمانی از معادله (۳۲) و استفاده از معادله‌های (۲۷) و (۳۱) می‌توانیم معادله زیر را استخراج کنیم:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= m_{22} m_{33} S_2 \dot{S}_2 \\ &= m_{22} m_{33} S_2 \left[\frac{q(\tau_r - \tau_{rd}) - p}{m_{22} m_{33}} \right] \end{aligned} \quad (33)$$

$$= S_2 \left[-\eta_2 \text{sat}\left(\frac{S_2}{\Delta_2}\right) \right]$$

اگر $\eta_2 = m_{22} m_{33} \gamma_2$ انتخاب شود، شرط رسیدن به سطح لغزشی حاصل می‌شود:

$$\dot{V}_2 = m_{22} m_{33} S_2 \dot{S}_2 \leq -m_{22} m_{33} \gamma_2 |S_2| \quad (34)$$

۴- تحلیل پایداری

قضیه ۱: نیروی ورودی در راستای طولی τ_u و گشتاور ورودی در راستای سمت τ_r که با (۱۸) و (۳۱) بیان شده‌اند، پایدار مجانبی هستند. و سرعت زاویه سمت r شناور سطحی زیر-تحریک نیز، پایدار ورودی-محدود خروجی-محدود است.

اثبات: تحت شرایط رسیدن به سطح لغزشی معادله‌های (۲۱) و (۳۴)، نیروی طولی τ_u و گشتاور در راستای سمت τ_r که در معادلات (۱۸) و (۳۱) داده شده‌اند، توسعه و ایجاد شده‌اند. قوانین کنترل پیشنهادی می‌توانند اطمینان دهند که همه مسیرهای سامانه می‌توانند در یک زمان محدود، به صفحات لغزشی تعریف شده در معادله‌های (۱۳) و (۲۲) برسند و چون در زمانی محدود به مطلوب می‌رسند، در نتیجه کنترل‌کننده‌ها به صورت مجانبی پایدار هستند.

حال اگر $\eta_1 = m_{11} \gamma_1$ انتخاب شود، شرط رسیدن به سطح لغزشی می‌تواند به صورت زیر استخراج شود:

$$\dot{V}_1 = m_{11} S_1 \dot{S}_1 \leq -m_{11} \gamma_1 |S_1| \quad (21)$$

۳-۲- قانون کنترل برای راستای سمت τ_r

مشابه سطح لغزش (۱۳)، بر اساس طبیعت زیر-تحریک شناور سطح لغزشی به طور نمایشی پایدار مرتبه دومی، به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$S_2 = \dot{v}_e + 2\lambda_2 v_e + \lambda_2^2 \int_0^t v_e(\tau) d\tau \quad (22)$$

که، $\lambda_2 > 0$.

مشتق زمانی معادله (۲۲) این گونه حاصل می‌شود:

$$\dot{S}_2 = \ddot{v}_e + 2\lambda_2 \dot{v}_e + \lambda_2^2 v_e \quad (23)$$

با جایگذاری معادله‌های (۸) و (۱۱) در (۲۳) داریم:

$$\ddot{v}_e = \frac{1}{m_{22}} (-m_{11} (\dot{u}_e r_d + u_e \dot{r}_e) - d_{22} \dot{v}_e - m_{11} (\dot{u} r_e + u \dot{r}_e)) \quad (24)$$

$$M = \frac{-1}{m_{22}} (m_{11} (\dot{u}_e r_d + u_e \dot{r}_e) + d_{22} \dot{v}_e + m_{11} \dot{u} r_e) \quad (25)$$

$$\ddot{v}_e = M - \frac{m_{11}}{m_{22}} u \dot{r}_e \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_2 &= M - \frac{m_{11}}{m_{22}} u \dot{r}_e + 2\lambda_2 \dot{v}_e + \lambda_2^2 v_e \\ &= M - \frac{m_{11}}{m_{22}} \frac{m_{11} - m_{22}}{m_{33}} u (u v - u_d v_d) \\ &\quad + \frac{m_{11}}{m_{22}} \frac{d_{33}}{m_{33}} u r_e \\ &\quad - \frac{m_{11}}{m_{22}} \frac{1}{m_{33}} u (\tau_r - \tau_{rd}) + 2\lambda_2 \dot{v}_e + \lambda_2^2 v_e \end{aligned} \quad (27)$$

قانون کنترل معادل τ_{req} را به صورت زیر انتخاب می‌کنیم:

$$\tau_{req} = \tau_r + \frac{p}{q} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} p &= m_{22} m_{33} M \\ &\quad - m_{11} (m_{11} - m_{22}) u (u v - u_d v_d) \\ &\quad + m_{11} d_{33} u r_e + 2\lambda_2 \dot{v}_e + \lambda_2^2 v_e \end{aligned} \quad (29)$$

$$q = m_{11} u \quad (30)$$

(x_o, y_o) خواهد بود. فاصله بین شناور و مرکز مانع به صورت زیر محاسبه می شود [۱۶]:

$$r = \sqrt{(x-x_o)^2 + (y-y_o)^2} \quad (۳۹)$$

حال اگر فاصله ایمن را برای عبور از مانع R_{saf} بنامیم، آن گاه اگر شرط زیر برقرار شود، الگوریتم دوری از مانع رسماً وارد عمل می شود:

$$r < R_o + R_{saf} \quad (۴۰)$$

به بیانی دیگر، اگر فاصله بین شناور و مرکز مانع از مجموع شعاع مانع و فاصله ایمن کم تر شود، بایستی از مانع دور شویم. حال باید تابع پتانسیلی را معرفی کنیم تا با اعمال روی شناور، باعث دوری و عدم برخورد آن شود. این تابع پتانسیل به صورت زیر معرفی شده است:

$$F_x = \frac{k(x-x_o)}{r^2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_o + R_{saf}} \right) \quad (۴۱)$$

$$F_y = \frac{k(y-y_o)}{r^2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_o + R_{saf}} \right) \quad (۴۲)$$

که در آن، F_x و F_y به ترتیب نیروهای اعمال شده از طرف میدان پتانسیل به شناور، به ترتیب در راستاهای x و y سامانه مختصات زمین- ثابت فراگیر^۱ است، k یک ضریب بهره مثبت است و ترم $\frac{1}{R_o + R_{saf}}$ نیز به خاطر آن است که اگر مانع درست در مرز حس کردن شناور قرار گرفت، یعنی $r = R_o + R_{saf}$ ، آن گاه نیروهای میدان صفر شده و شناور بتواند عبور نرم و روانی^۲ را از کنار مانع داشته باشد. پس الگوریتم شرطی اجتناب از برخورد با موانع به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{if } r < R_o + R_{saf} \\ F_x = \frac{k(x-x_o)}{r^2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_o + R_{saf}} \right) \\ F_y = \frac{k(y-y_o)}{r^2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_o + R_{saf}} \right) \quad (۴۳)$$

else
end

اگر شرط فوق حاصل شود و F_x و F_y به کنترل کننده راستای سمت^۳ با علامت منفی اضافه شوند، آن گاه در واقع

$$u_e \rightarrow 0 \Rightarrow \int_0^t u_e(\tau) d\tau \rightarrow 0 \Rightarrow x \rightarrow x_d \quad (۳۵)$$

$$v_e \rightarrow 0 \Rightarrow \int_0^t v_e(\tau) d\tau \rightarrow 0 \Rightarrow y \rightarrow y_d \quad (۳۶)$$

و در ادامه نیز، ثابت خواهیم کرد که زاویه سمت شناور سطحی زیر- تحریک، ورودی- محدود خروجی- محدود است. تابع لیاپانوف زیر را کاندید می کنیم:

$$V_3 = \frac{1}{2} r^2 \quad (۳۷)$$

با استفاده از رابطه (۳) و مشتق گرفتن از (۳۷) داریم:

$$\dot{V}_3 = r\dot{r} = r \left[\frac{(m_{11} - m_{22})}{m_{33}} uv - \frac{d_{33}}{m_{33}} r + \frac{1}{m_{33}} \tau_r \right] \\ = -\frac{d_{33}}{m_{33}} r^2 + \frac{(m_{11} - m_{22})}{m_{33}} uvr + \frac{1}{m_{33}} \tau_r r \\ \leq -\rho_r \dot{V}_3 + \mu_r \quad (۳۸)$$

که $\rho_r = \frac{2d_{33}}{m_{33}}$ و $\mu_r = \frac{(m_{11} - m_{22})}{m_{33}} uvr + \frac{1}{m_{33}} \tau_r r$ ، مادامی که $\dot{V}_3 < 0$ آن گاه $|r| > \frac{[(m_{11} - m_{22})uv + \tau_r]}{d_{33}}$ و بنابراین کران دار است.

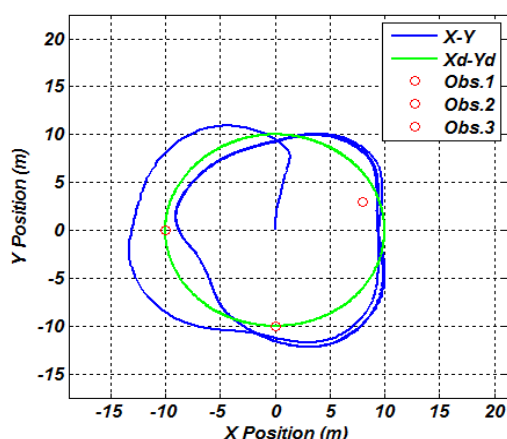
۵- اجتناب از برخورد با موانع

در این قسمت، به تشریح الگوریتم عبور از مانع می پردازیم. در این جا، موانع به صورت دایره در نظر گرفته شده اند. شرط فعال شدن الگوریتم رهایی از برخورد، این است که مانع در ابتدا، در محدوده حس نمودن و تشخیص شناور قرار بگیرد. در نتیجه شعاع حس حسگر روبات را با R_{sen} نمایش می دهیم. بدیهی است که اگر مانع در فاصله ای کم تر از شعاع حس حسگر $d < R_{sen}$ شناور قرار بگیرد، تشخیص داده خواهد شد. حال که مانع شناسایی شد بایستی شناور بتواند مزاحم بودن یا نبودن آن را تشخیص دهد. به طور مثال، اگر شناور از سمت راست یک صخره سنگی رو به جلو در حرکت باشد و صخره درست به موازات مسیر حرکت آن باشد، بدیهی است که صخره مزاحمتی برای حرکت آن ایجاد نخواهد کرد. اما اگر در راستای حرکت شناور، حسگرها نقاطی از مانع را تشخیص دهند، بایستی الگوریتم دوری از مانع فعال شود. بعد از آن که مانع مزاحم تشخیص داده شد، مختصات روبات و مانع را به چارچوب مختصاتی زمین- ثابت منتقل می کنیم، چراکه در چارچوب جسم- ثابت موقعیت های شناور قابل اندازه گیری نیستند تا با موقعیت مانع مقایسه شوند. پس موقعیت شناور (x, y) ، همچنین شعاع و موقعیت مرکز مانع به ترتیب R_o و

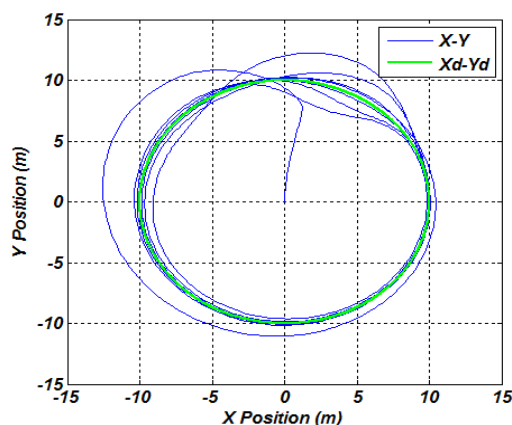
1- Global

2- Smooth

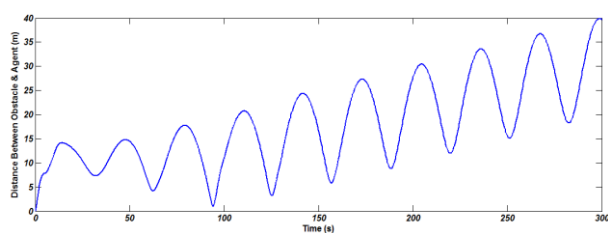
3- Yaw



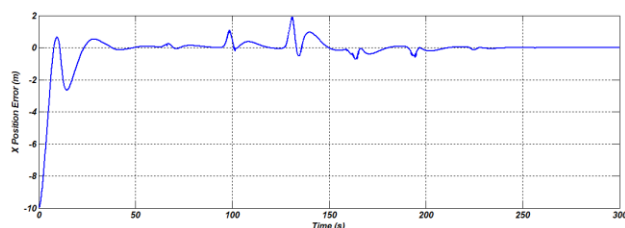
شکل (۵): ردیابی مسیر شناور در عبور از سه مانع ثابت.



شکل (۶): ردیابی مسیر شناور در عبور از مانع متحرک.



شکل (۷): فاصله بین مانع متحرک و شناور در طول زمان.



شکل (۸): خطای ردیابی طولی در حضور مانع متحرک.

گشتاورهایی خواهند بود که سعی در چرخش شناور برای جلوگیری از برخورد با موانع خواهند نمود.

۶- شبیه‌سازی‌های عددی

در این قسمت، ما برخی شبیه‌سازی‌ها را برای تصدیق درستی مسئله و کارامدی قوانین کنترل طراحی می‌کنیم. پارامترهای شبیه‌سازی به قرار زیر هستند [۱۵]:

$$(m_{11}, m_{22}, m_{33}) = (1.956, 2.405, 0.043)$$

$$(d_{11}, d_{22}, d_{33}) = (2.436, 12.992, 0.0564)$$

$$(x_d(t), y_d(t)) = (10 \times \cos(0.2t), 10 \times \sin(0.2t))$$

$$(x(0), y(0), \psi(0)) = \left(0, 0, \frac{\pi}{2}\right)$$

$$(u(0), v(0), r(0)) = (0, 0, 0)$$

همچنین، ما یک مانع متحرک و سه مانع ثابت را به ترتیب در زیر تعریف می‌کنیم:

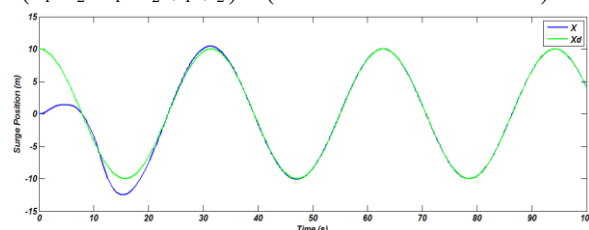
$$(x_{o1}, y_{o1}) = (0.05t, 0.05t)$$

$$(x_{o3}, y_{o3}) = (0, -10), (x_{o4}, y_{o4}) = (-10, 0),$$

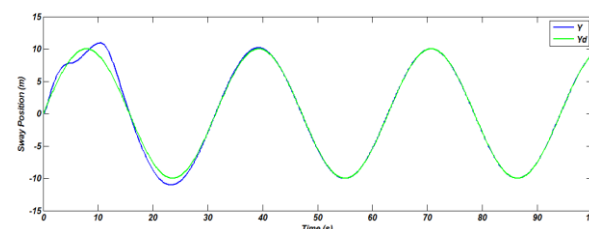
$$(x_{o5}, y_{o5}) = (8, 3)$$

شعاع هر کدام از موانع $R_o = 1$ متر و فاصله ایمن $R_{saf} = 4$ متر و همچنین $k = 50$ و $r_s = 6$ متر در نظر گرفته شده است. دیگر پارامترهای کنترل نیز به قرار زیر هستند:

$$(\lambda_1, \lambda_2, \Delta_1, \Delta_2, \gamma_1, \gamma_2) = (1.5, 3, 0.01, 0.05, 0.1, 0.002)$$



شکل (۳): ردیابی طولی مسیر شناور در غیاب موانع.



شکل (۴): ردیابی عرضی مسیر شناور در غیاب موانع.

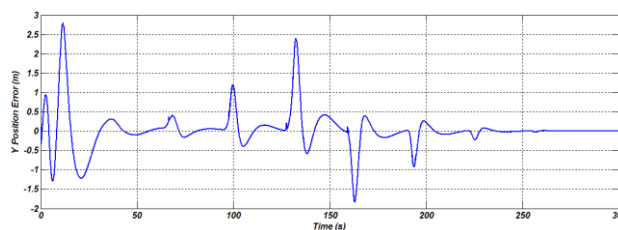
شده‌اند یعنی با آن که مدل دینامیکی شناور سه درجه آزادی است، اما تنها دو محرک طراحی می‌شود و در واقع، تعداد محرک‌ها کم‌تر از تعداد درجات آزادی است. دو سطح لغزش مرتبه اول و دوم برحسب خطاهای ردیابی، به ترتیب برای راستاهای طولی و دوران حول محور قائم تعریف شده و در ادامه با استفاده از روش لیاپانوف قوانین کنترل مطلوب برای محرک‌ها طراحی شدند. این قوانین کنترل قادرند تا به‌طور موثری پدیده چترینگ^۱ را در کنترل مد لغزشی تضعیف نموده و به نرمی^۲ ورودی‌های مطلوب را تولید نمایند. از روش تابع پتانسیل برای اجتناب از برخورد با موانع استفاده شد. این توابع در واقع گشتاورهایی هستند که در محرک موجود در راستای دوران حول محور قائم ایجاد می‌شود تا هنگام نزدیک شدن به موانع شناور را مجبور به تغییر جهت‌گیری حرکت کند. همان‌طور که مشاهده شد، کنترل‌کننده‌های مد لغزشی طراحی شده و توابع پتانسیل اعمال شده، مجموعاً شناور را قادر خواهند ساخت که خود را در مسیر مطلوب قرار داده و در صورت وجود موانع، از آن‌ها به‌طور ایمن عبور کرده و از برخورد با آن‌ها اجتناب ورزد. برای کارهای بیش‌تر در این حوزه، کنترل آرایش‌بندی شناور در حضور موانع و در نظر گرفتن موانع دارای فرورفتگی یا مقعر، که امکان گیر افتادن شناور در این نواحی وجود دارد، پیشنهاد می‌شود.

۸- مراجع

- Bertram, V. "Unmanned Surface Vehicles – A Survey", Skibsteknisk Selskab, Copenhagen, Denmark, 2008.
- Nuno A. Cruz. "Autonomous Underwater Vehicles", In-Tec, 2011.
- Yu, R., Zhu, Q. Xia, G. and Liu, Z. "Sliding Mode Tracking Control of an underactuated Surface Vessel", IET Control Theory & Applications, Vol. 6, No. 3, pp. 461-466, 2012.
- Wichlund, K.Y., Sordalen, O.J. and Egeland, O. "Control Properties of Underactuated Vehicles", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2009-2014. 1995.
- Godhavn, J.M., Fossen, T.I. and Berge, S.P. "Nonlinear Adaptive Backstepping Designs for Tracking Control of Ships", Int. J. Adapt. Control Signal Process, Vol. 12, pp. 649-670, 1998.

1- Chattering Phenomena

2- Smooth



شکل (۹): خطای ردیابی عرضی در حضور موانع متحرک.

شکل‌های (۳) و (۴) ردیابی مسیر دایره‌ای را توسط شناور، در راستاهای طولی و عرضی نشان می‌دهد. همان‌طور که پیداست شناور پس از مدت‌زمان کوتاهی به مسیر مطلوب همگرا می‌شود. شکل ۵، مسیر انتخابی شناور را برای اجتناب از برخورد با سه مانع ثابت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو مانع دقیقاً بر سر راه مسیر مطلوب شناور قرار گرفته‌اند و شناور قادر است به‌طور ایمن از آن‌ها عبور کند. شکل ۶، مسیر حرکت شناور را برای رهایی از موانع متحرک نشان می‌دهد. جذابیت این شکل در آن است که شناور تا زمانی که مانع هنوز به دایره مطلوب سبز نرسیده است، ترجیح می‌دهد که از جلوی آن (بالای دایره سبز)، با فاصله‌ای ایمن عبور کند. اما پس از آن که مانع متحرک به دایره سبز رسید، این‌بار شناور با فاصله‌ای ایمن از پشت آن (زیر دایره سبز) عبور می‌کند. در نهایت، وقتی مانع به اندازه کافی از دایره دور شد، شناور مسیر مطلوب اولیه خود را باز می‌یابد و روی دایره به حرکت خود ادامه می‌دهد. چون نمایش زنده حرکت موانع متحرک روی شکل امکان‌پذیر نبود، ما از نمودار شکل ۷ استفاده کرده‌ایم تا نشان دهیم فاصله بین موانع متحرک و شناور هیچگاه صفر نشده و در واقع برخوردی با هم نداشته‌اند. شکل‌های ۸ و ۹، نیز خطای ردیابی شناور را در عبور از موانع متحرک نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که خطا پس از دور شدن موانع متحرک، به صفر همگرا می‌شود. از مجموعه شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که کنترل‌کننده‌های طراحی شده به خوبی قادرند که شناور را به مسیر مطلوب همگرا کرده و از برخورد با موانع اجتناب ورزند.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، کنترل ردیابی یک شناور سطحی بدون سرنشین در حضور موانع ثابت و متحرک مورد مطالعه قرار گرفت. در طراحی کنترل‌کننده‌ها از روش کنترل مقاوم مد لغزشی استفاده شده است. شناورها نیز به‌طور زیر-تحریک کنترل

11. Ghommam, J. Mnif, F. and Derbel. N. "Global Stabilization and Tracking Control of Underactuated Surface Vessels", *IET Control Theory Appl*, Vol. 4, No. 1, pp. 71-88, 2010.
12. Do, K.D. and Pan. J. "Control of Ships and Underwater Vehicles", Springer, 2009.
13. Do, K.D., Jiang, Z.P. and Pan. J. "Underactuated Ship Global Tracking under Relaxed Conditions", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 47, No. 9, pp. 1529-1536, 2002.
14. Do. K.D. "Formation Control of Underactuated Ships with Elliptical Shape Approximation and limited Communication Ranges", *Automatica*, Vol. 48, pp. 1380–1388, 2012.
15. Zhuang, L., Dong, B. and Guo. Z. "Higher Sliding Mode Tracking Control for Underactuated Surface Vessel", In *Proceedings of 2013 Chinese Intelligent Automation Conference*, pp. 569-578. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
16. Lounis, A., Benzerrouk, A. and Philippe Martinet. "Mobile Robot Navigation in Cluttered Environment using Reactive Elliptic Trajectories", In *18th IFAC World Congress*, 2011.
6. Pettersen, K.Y. and Nijmeijer, H. "Global Practical Stabilization and Tracking for an Underactuated Ship -A Combined Averaging and Backstepping Approach", *Model. Identif. Control*, Vol. 20, No. 4, pp. 189–199, 1999.
7. Pettersen, K.Y. and Nijmeijer, H. "Tracking Control of an Underactuated Surface Vessel", *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control*, Tampa, Florida, pp. 4561–4566, 1998.
8. Behal, A., Dawson, D. and et al. "Tracking and Regulation Control of an Underactuated Surface Vessel with Nonintegrable Dynamics", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 47, No. 3, pp. 495-500, 2002.
9. Dixon, W., Dawson, D. and et al. "Robust Tracking and Regulation Control for Mobile Robots", *Proceedings of IEEE Conference on Control and application*, Vol. 2, No. 1, pp. 1015-1020, 1999.
10. Jiang, Z.P. "Global Tracking Control of Underactuated Ships by Lyapunov's Direct Method", *Automatica*, Vol. 38, No. 2, pp. 301-309, 2009.