

بادداشت فنی

بازرسی خطوط انتقال نفت و گاز زیر دریا بوسیله ربات زیرسطحی با بردار رانش متغیر جدید

علی کددخایی^۱، رضا حسن زاده قاسمی^{۲*}^۱ کارشناس ارشد، دانشگاه حکیم سبزواری؛^۲ استادیار، دانشگاه حکیم سبزواری؛ r.hasanzadeh@hsu.ac.ir

چکیده

در این مقاله یک ربات زیرسطحی جدید به منظور بازرسی از خطوط انتقال نفت و گاز زیر دریا ارائه شده است. به دلایل فشار بسیار زیاد آب در قسمت‌های عمیق دریا و همچنین طول بسیار زیاد خطوط لوله، تحمل چنین شرایطی برای بازرس غواص بسیار مشکل بوده لذا این نوع بازرسی عمدتاً توسط ربات‌های زیرسطحی انجام می‌شود. این مقاله به ارائه و شبیه‌سازی نوع خاصی از ربات‌های زیرسطحی می‌پردازد که با داشتن چهار عدد تراستر با بردار رانش متغیر قادر خواهد بود به طور همزمان شش درجه آزادی را کنترل کند. این امر سبب مانورپذیری بالای این ربات زیر سطحی در مقایسه با نمونه‌های مشابه خواهد شد. ربات معرفی شده در این مقاله از سیستم دو سرو و موتور متعامد جهت جهت گیری تراسترهای بصورت مستقل از یکدیگر بهره می‌برد. در این مقاله، مدلسازی و کنترل همزمان شش درجه آزادی و تعقیب مسیر مطلوب انجام گرفته است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷

کلمات کلیدی:

ربات هوشمند زیرسطحی

تراستر

بردار رانش متغیر

Inspection of Undersea Oil and Gas Pipelines by New Variable Thrust Vector Underwater Robotic Platform

Ali Kadkhodaei¹, Reza Hasanzadeh Ghasemi^{2*}¹ Master of Science, Hakim Sabzevari University; alikadkhodaei86@gmail.com² Assistant Professor, Hakim Sabzevari University; r.hasanzadeh@hsu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2 Feb. 2016

Accepted: 27 Nov. 2016

Keywords:

Autonomous Underwater Vehicle

Thruster

Variable Thrust Vector

ABSTRACT

This paper presents a special underwater robot for subsea pipelines inspection which is used to transport extracted oil and gas from oil platforms to onshore facilities. Due to the high pressure in the deep sea and the long pipelines, it is impossible to inspect by divers. Therefore underwater robot can be used to solve this problem. This paper investigate a hovering type of underwater vehicle including four thruster with variable thrust vector, which it is able to simultaneous control of six degrees of freedom. Therefore, high flexibility is an advantage of this underwater robot. Using two perpendicular servomotors for each thruster, we prepare independent and time variable orientation for each thruster. This paper investigates a trajectory controller for this hovering type autonomous underwater vehicle to meet the demands of in-water pipeline inspection.

اقیانوس‌ها و دریاهای مورد جستجو قرار گرفته است. در سال‌های

اخیر شناورهای زیرسطحی خودکار (AUV) جایگاه خود را به عنوان مهم‌ترین ابزار جستجو و کشف در اعمق دریاهای بیش از هر زمان گذشته‌ای نشان داده‌اند. به‌طوری‌که امروزه مراکز صنعتی و

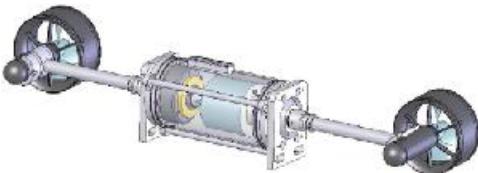
در دهه‌های اخیر با رشد روز افزون جمعیت نیاز به منابع جدید انرژی بیش از پیش احساس می‌شود و این در حالیست که دریاهای سرشار از منابع انرژی و معدنی هستند و تنها کمتر از ۱۰ درصد از

۱ - مقدمه

ربات پیشنهاد شده در این مقاله برای بازرگانی خطوط لوله زیر دریا، به منظور افزایش قابلیت مانور، از سیستم بردار رانش متغیر بهره می‌برد که به بحث درباره پیکربندی آن پرداخته می‌شود.

۱-۲-تاریخچه کاربرد سیستم بردار رانش متغیر در شناورهای زیر سطحی

در سال ۲۰۰۹ اسکسن و همکاران [۱]، سیستم رانش دوار را برای ربات اودیسه ۴ معرفی کردند. سیستم رانش این ربات با استفاده از چهار تراستر^۱ قادر بود چهار درجه آزادی را کنترل کند. دو تا از تراسترهای قادر به کنترل حرکت در راستای محور y (اسوی) و دوران حول محور z (یاو) بوده و ۲ تا تراستر دیگر قادر به ایجاد نیروی رانش با جهت‌گیری مطلوب به منظور کنترل حرکت در راستای محور x (سرج) و محور z (هیو) بودند. سیستم رانش دوار ربات اودیسه ۴ در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱- سیستم رانش دوار به منظور جهت‌گیری مستقل دو تراستر [۱]

ربات نریوس [۲] دارای مکانیزم مشابهی بود. تراسترهای اصلی ربات ثابت بودند و یک تراستر کمکی برای حالت‌های خاص حرکت استفاده می‌شد. در سال‌های اخیر، مکانیزم بردار رانش^۲ توسعه پیدا کرده است [۳]. در سال ۲۰۱۰ لوپز و همکاران [۴] به مدل کردن و کنترل نوعی میکرو AUV با چهار تراستر پرداختند. در سال ۲۰۱۴ جین و همکاران [۵] یک ربات زیرسطحی را معرفی کردند که دارای چهار تراستر بود. تراسترهای قادر بودند در دو وضعیت صفر و ۹۰ درجه تغییر جهت دهند. در حالتی که تراسترهای در وضعیت افقی سوییچ می‌کردن، ربات قادر بود تنها ۳ درجه آزادی سرج، اسوی و یاو را کنترل کند و زمانی که تراسترهای در وضعیت عمودی سوییچ می‌کردن ربات قادر بود هیو، رول و پیچ را کنترل کند. لذا کنترل همزمان ۶ درجه آزادی نیازمند سوییچ مداوم تراسترهای بین این دو وضعیت بود که این امر سبب استهلاک سیستم و افزایش خطای کنترلی می‌شد. در این مقاله ما به طراحی نوع خاصی از شناورهای زیرسطحی می‌پردازیم که جهت‌گیری پیوسته و مستقل هر کدام از تراسترهای به صورت تابعی از زمان قادر خواهد بود ۶ درجه آزادی را به صورت همزمان کنترل کند.

تحقیقاتی دنیا در زمینه هیدرودینامیک نگاه ممتازی به طراحی، تولید و توسعه وسیله‌های زیرسطحی خودکار دارند. یک وسیله زیرسطحی خودکار در حقیقت یک ربات است که درون آب به وسیله یک سیستم پیشرانش به جلو حرکت می‌کند. سیستم فرمان‌پذیری لحظه‌ای و مانور‌پذیری سه بعدی در بیشتر شرایط جوی به AUV این امکان را می‌دهد که اهداف داده شده به آن را در هر زمان و مکان دنبال کند. طی کردن مسیر از پیش تعريف شده، می‌تواند در کاربردهایی مانند اکتشاف میدان نفتی دریایی، تحقیقات در بخش‌های عمیق دریا، استخراج از منابع زیردریا، نقشه برداری‌های مربوط به اقیانوس‌شناسی، ارزیابی خطوط لوله زیر آب، عملیات نظامی و ... به خوبی مورد ارزیابی قرار گیرد.

۱-۱-کاربرد شناورهای زیرسطحی در عملیات بازرگانی خطوط لوله

ذخایر هیدرولیکی موجود در دریا توسط سکوهای فراساحلی استخراج شده و پس از پالایش جزئی، توسط خطوط لوله زیر دریا به پالیشگاه‌های واقع در خشکی انتقال می‌یابد. امروزه خطوط لوله با طول‌های متغیر تا ۱۲۰۰ کیلومتر در نقاط مختلف جهان فعال هستند. در کشور ما نیز اجرای خطوط لوله زیر دریا از سال ۱۹۶۰ بین بندر خارک و بندر گناوه آغاز گردیده است. شرایط مخرب و خورنده زیر دریا باعث وارد آمدن آسیب به خطوط لوله زیر دریا می‌گردد. گاه آسیب‌های جزئی در صورت نادیده گرفتن می‌تواند منجر به خدمات مالی و جانی بسیار بالا شود. استانداردهای مربوط به خطوط لوله زیر آب بازرگانی‌های دوره‌ای را برای خطوط لوله زیر دریا، ضروری می‌داند.

به طور کلی بازرگانی خطوط لوله می‌تواند شامل این موارد باشد: بررسی خدمات مکانیکی واردہ به لوله، پوشش بتونی دور لوله، پوشش ضد خوردگی، لعب محافظه موضع اتصال و آند فدا شونده، بررسی نشتی‌های احتمالی از خطوط لوله، ارزیابی حرکات اضافی خط لوله مانند اثرات ناشی از انبساط و انقباض، شرایط رایزرهای از نظر خودگی و خدمات واردہ و موجودات دریایی چسبیده به آن.

از آنجا که سیستم‌های خطوط لوله در اعماق زیاد دریا که گاه تا عمق ۲۰۰۰ متر می‌رسد قرار دارند، لذا تحمل شرایط برای غواص بازرگانی‌پذیر نیست. لذا استفاده از ربات‌های زیرسطحی جهت بازرگانی خطوط لوله از اهمیت زیادی برخوردار است. بازرگانی سیستماتیک زیر دریا توسط ربات‌های زیرسطحی از سال ۱۹۷۸ برای اندازه گیری پتانسیل کاتدی سیستم حفاظت خودگی آغاز شده و در سال ۱۹۸۱ اولین بازرگانی خطوط لوله توسط ربات مجهز کنترل از راه دور بجای غواص بازرگانی شد.

این معادله براساس دستگاه مختصات بدنی متصل به شناور نوشته شده است. در اینجا ۷ بیانگر بردار سرعت خطی و دورانی نسبت به دستگاه مختصات بدنی و ۷ موقعیت خطی و دورانی شناور نسبت به دستگاه مختصات اینرسی می‌باشد. ارتباط بین سرعت در دستگاه مختصات بدنی با سرعت دستگاه مختصات اینرسی به کمک ماتریس ژاکوبی بیان می‌شود.

ماتریس جرم و اینرسی M شامل دو عبارت M_{RB} و M_{ADD} به صورت رابطه (۲) قبل بیان می‌باشد. ترم‌های ماتریس جرم افروده ناشی از مدل‌سازی اثرات هیدرودینامیکی شتاب‌گیری خطی و دورانی شناور درون سیال می‌باشد.

$$M = M_{RB} + M_{ADD}$$

$$M_{ADD} = \begin{pmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{pmatrix}$$

$$M_{RB} = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{xy} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{xz} & -I_{yz} & I_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

ماتریس C تحت عنوان ماتریس کریولیس شناخته می‌شود که بر اثر شتاب کریولیس ناشی از دوران دستگاه مختصات غیراینرسی بدنی ایجاد می‌شود و با در نظر گرفتن اثرات هیدرودینامیکی به شکل معادله (۳) تعریف می‌شود.

$$C(v) = C_{RB}(v) + C_{ADD}(v)$$

$$C_{RB}(v) = \begin{pmatrix} 0_{3 \times 3} & C_{12}(v) \\ -C_{12}^T(v) & C_{22}(v) \end{pmatrix}$$

$$C_{ADD}(v) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

درایه‌های این ماتریس‌ها در پیوست آمده است.

ماتریس‌های C_{ADD} و M_{RB} طبق روش‌های تحلیل بر پایه تئوری پتانسیل [۱۱] بدست می‌آیند. ماتریس دمپینگ شامل نیروهای هیدرودینامیکی می‌باشد به شکل معادله (۴) خواهد بود.

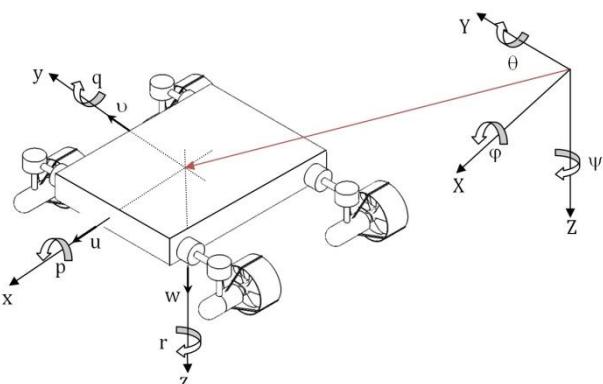
$$D(V) = \text{diag}(X_u + X_{u|u|}|u|, Y_v + Y_{v|v|}|v|, Z_w + Z_{w|w|}|w|, K_p + K_{p|p|}|p|, M_q + M_{q|q|}|q|, N_r + N_{r|r|}|r|) \quad (4)$$

۱-۳- دینامیک و تکنیک‌های کنترلی

معادلات حاکم بر شناورهای زیر سطحی اولین بار توسط گرتلر و هاگن در سال ۱۹۶۷ بدست آمد و در سال‌های بعد افرادی نظیر ناهون [۶] و چن [۷] به مدل‌سازی دینامیکی شناورهای زیر سطحی پرداختند. در زمینه کنترل مسیر ربات‌های زیر سطحی افرادی نظیر فوسن [۸] و آنتونلی و همکاران [۹] از پیشگامان این امر محسوب می‌شوند. مسایل متعدد از جمله خواص فیزیکی و مکانیکی منحصر بفرد آب، وجود نیروهای متعدد در جهت‌های مختلف، رفتار بسیار غیر خطی و متغیر با زمان سیستم، ضرایب هیدرودینامیکی تقریبی که به شکل ظاهری و سرعت ربات وابسته‌اند، اغتشاشات خارجی و ... سبب شده روش‌های کنترلی متعددی به منظور انجام ماموریت‌های مختلف طراحی و پیاده‌سازی شوند که هر کدام دارای نقاط ضعف و قوت خاصی است. بیشتر ربات‌های زیر سطحی از روش‌های کنترل کلاسیک مثل کنترل PID استفاده می‌کنند. با این حال در سال‌های اخیر کنترلرهایی از جمله کنترلر فازی، کنترل شبکه‌های عصبی، کنترل مد لغزشی، کنترل مدبک حالت و ... استفاده شده است [۱۰].

۱-۴- درجات آزادی شناور زیر سطحی

یک شناور زیر سطحی در حالت کلی دارای ۶ درجه آزادی می‌باشد که شامل حرکات انتقالی در ۳ جهت محور مختصات کارتزین و حرکات دورانی حول هر کدام از این محورها می‌باشد. عموماً دو نوع دستگاه مختصات اینرسی و دستگاه مختصات بدنی جهت تشریح سینماتیک و دینامیک شناور بکار برده می‌شود (شکل ۲).

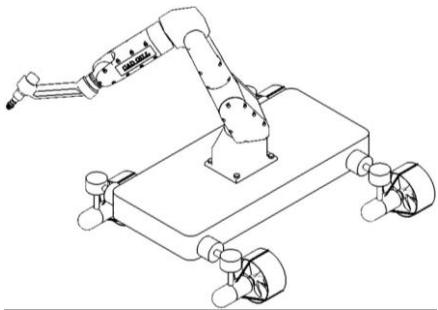


شکل ۲- دستگاه‌های مختصات مورد نیاز برای بررسی شناور زیر سطحی

۲- مدل‌سازی دینامیکی شناور زیر سطحی

معادله دینامیکی کلی حاکم بر شناور زیر سطحی با ۶ درجه آزادی به شکل معادله (۱) می‌باشد:

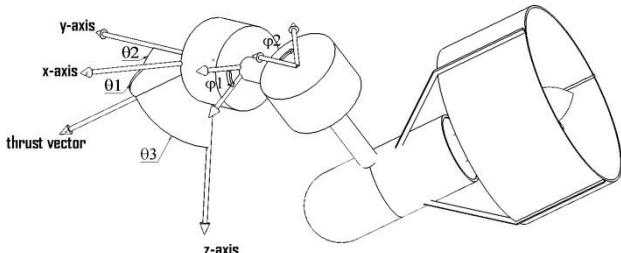
$$M\ddot{v} + C(v)\dot{v} + D(v)v + g(\eta) = \tau_c + \tau_e \quad (1)$$



شکل ۴- شناور ارائه شده مجهر به بازوی مکانیکی ماهر

همانگونه که در شکل ۵ مشخص است با دوران سروو موتور اول به اندازه φ_1 حول محور y و دوران سروو موتور دوم به اندازه φ_2 حول محور z جهت‌گیری بردار تراست نسبت به دستگاه مختصات بدنی طبق شکل ۵ خواهد بود. روابط بین θ_1 , θ_2 , θ_3 با φ_1 و φ_2 طبق معادله (۵) می‌باشد.

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \cos^{-1}(\cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)) \\ \theta_2 &= \cos^{-1}(\cos(\varphi_1)\sin(\varphi_2)) \\ \theta_3 &= \frac{\pi}{2} - \varphi_1\end{aligned}\quad (5)$$



شکل ۵- جهت‌گیری بردار تراستر نسبت به دستگاه مختصات بدنی

رابطه بین بردار τ و نیروی ایجاد شده توسط هر تراستر f_i به صورت رابطه (۶) می‌باشد:

$$\tau_c = B(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

و با تعریف $c(\theta) = \cos(\theta)$ ماتریس B به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$B = \begin{pmatrix} c(\theta_1)_1 & c(\theta_1)_2 & c(\theta_1)_3 & c(\theta_1)_4 \\ c(\theta_2)_1 & c(\theta_2)_2 & c(\theta_2)_3 & c(\theta_2)_4 \\ c(\theta_3)_1 & c(\theta_3)_2 & c(\theta_3)_3 & c(\theta_3)_4 \\ -\frac{w}{2}c(\theta_3)_1 & -\frac{w}{2}c(\theta_3)_2 & \frac{w}{2}c(\theta_3)_3 & \frac{w}{2}c(\theta_3)_4 \\ -\frac{l}{2}c(\theta_3)_1 & \frac{l}{2}c(\theta_3)_2 & \frac{l}{2}c(\theta_3)_3 & -\frac{l}{2}c(\theta_3)_4 \\ a & b & c & d \end{pmatrix}$$

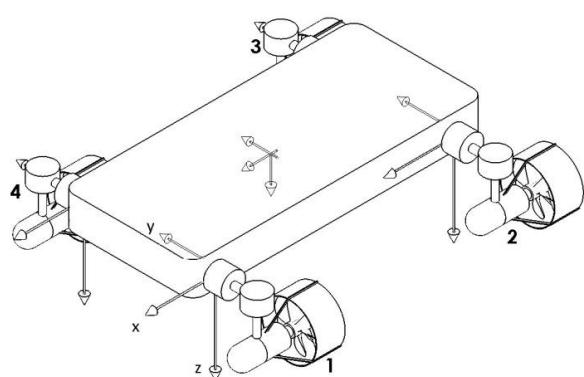
$$a = \frac{w}{2}c(\theta_1)_1 + \frac{l}{2}c(\theta_2)_1$$

که شامل ترم‌های خطی و مرتبه دوم ضرایب درگ می‌باشد. با فرض اینکه ربات کاملاً غوطه‌ور باشد ضرایب درگ مربوط به سرعت خطی با شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار ANSYS و ضرایب درگ مربوط به سرعت دورانی طبق روش تحلیلی [۱۲] بدست می‌آیند. در این شبیه‌سازی از ترم‌های خطی ضرایب درگ صرف‌نظر کردند.

ماتریس g شامل اثرات نیروی وزن و نیروی شناوری می‌باشد. در اینجا با در نظر گرفتن انطباق مرکز جرم و مرکز شناوری و در نظر گرفتن شناوری خنثی برای سیستم از بردار $g(\eta)$ صرف‌نظر می‌کنیم. τ_c بیانگر بردار نیرو و گشتاور کنترلی است که بواسیله تراسترهای ایجاد می‌شود و τ_e شامل بردار نیرو و گشتاورهای خارجی است که تحت عنوان اغتشاش وارد بر سیستم، شناخته می‌شود.

۳- پیکربندی ربات

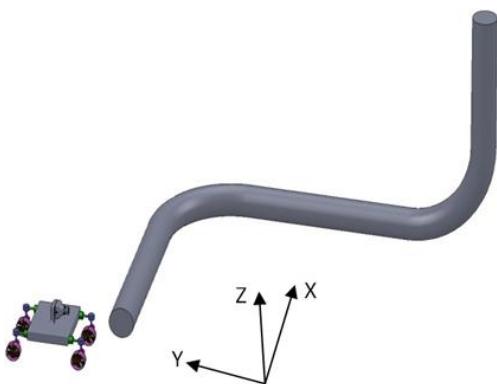
اکثر قریب به اتفاق شناورهای زیرسطحی دارای تراسترهای ثابت می‌باشند و لذا جهت حرکت در یک مسیر خاص و کنترل همزمان چند درجه آزادی مجبور به استفاده از ۶ تا ۸ عدد تراستر می‌باشند. افزایش تعداد تراسترهای سبب بزرگ شدن منبع تغذیه ربات و در نهایت منجر به افزایش وزن ربات می‌گردد. در این مقاله به ارائه نوع خاصی از شناورهای زیرسطحی از نوع بردار رانش متغیر می‌پردازیم که دارای ۴ عدد تراستر می‌باشد که جهت‌گیری هر کدام از آنها به صورت تابعی از زمان بوده و قابلیت کنترل همزمان ۶ درجه آزادی را داراست. نوع مکانیزم بکار رفته به منظور تغییر جهت تراسترهای می‌تواند با استفاده از مکانیزم ربات‌های موازی و یا سیستم MTVS [۱۳] و یا دو سروو موتور متعامد باشد. جهت‌گیری هر یک از تراسترهای این ربات بواسیله ۲ عدد سروو موتور که به صورت عمود بر یکدیگر واقع شده‌اند، کنترل می‌شوند (شکل ۳). تغییر پیکربندی سیستم به صورت تابعی از زمان، این امکان را برای ما فراهم می‌کند که بتوان در جهات مختلف و به صورت همزمان حرکت نمود. نصب بازوی مکانیکی ماهر روی این ربات بر قابلیت‌های آن خواهد افزود (شکل ۴).



شکل ۳- شناور ارائه شده با ۲ عدد سروو موتور برای هر تراستر

در محل زانوی دوم، جهت بازرسی، نیاز به حرکت هلیکال خمیده حول محور زانو می‌باشد. علاوه بر این در این ناحیه به اندازه $\pi/3$ - حول محور X حرکت پیچ خواهیم داشت.

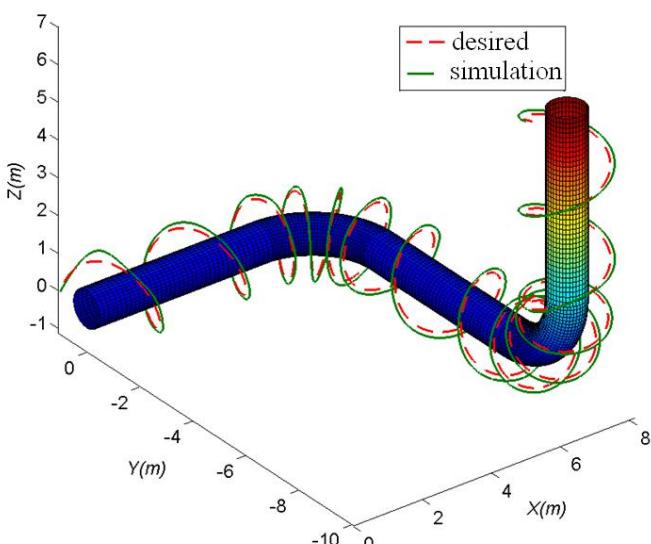
در نهایت پس از گذر از زانوی دوم در قسمت عمودی لوله، ربات با حفظ پیکربندی مرحله قبل خود، حرکت هلیکال عمودی و همزمان حرکت رول را حول محور لوله انجام خواهد داد و در این مرحله نیاز به کنترل همزمان سرج، اسوی، هیو و رول می‌باشد.



شکل ۶- بازرسی خط لوله زیر آب توسط ربات مججهز به فلوریمتر

لازم به ذکر است چرخش ربات حول محور رول در طول مسیر به نحوی است که در هر دور گردش ربات حول محور لوله، به اندازه 2π رادیان حرکت رول خواهیم داشت در این حالت همواره جهت فلوریمتر، در جهت شعاع لوله قرار خواهد گرفت. همچنین حرکت یاو در محل زانوی اول به اندازه $\pi/2$ - π - و حرکت پیچ در محل زانوی دوم به اندازه $\pi/3$ - π - دوران خواهد کرد.

در شکل ۷ نحوه حرکت ربات در مسیر تعیین شده مشاهده می‌گردد. در شکل ۸ نیروهای تراسته وارد بر ربات مشخص می‌باشد.



شکل ۷- کنترل همزمان حرکت در مسیر هلیکال مستقیم و خمیده

$$\begin{aligned} b &= \frac{w}{2} c(\theta_1)_2 - \frac{l}{2} c(\theta_2)_2 \\ c &= -\frac{w}{2} c(\theta_1)_3 - \frac{l}{2} c(\theta_2)_3 \\ d &= -\frac{w}{2} c(\theta_1)_4 + \frac{l}{2} c(\theta_2)_4 \end{aligned} \quad (7)$$

۴- کنترل و شبیه سازی ربات زیرسطحی ارائه شده

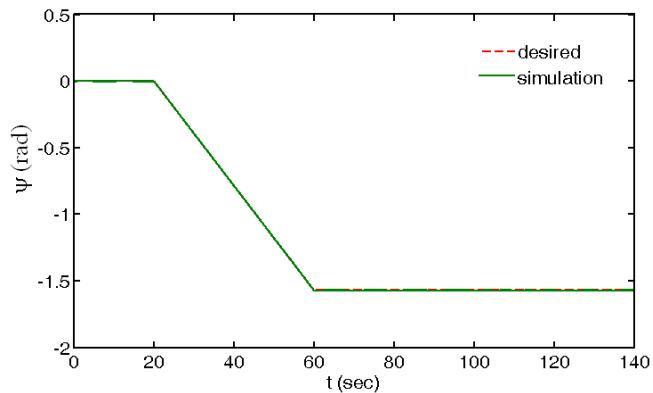
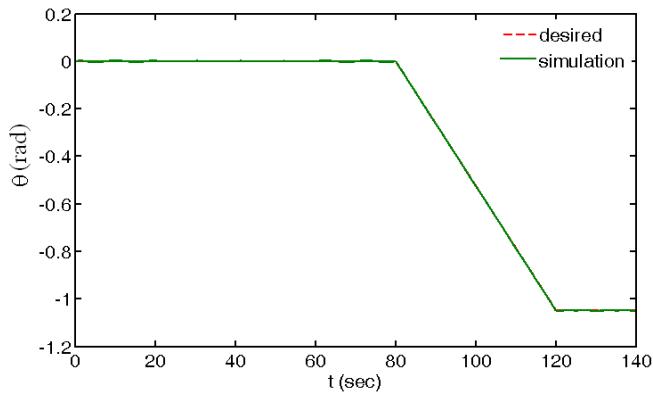
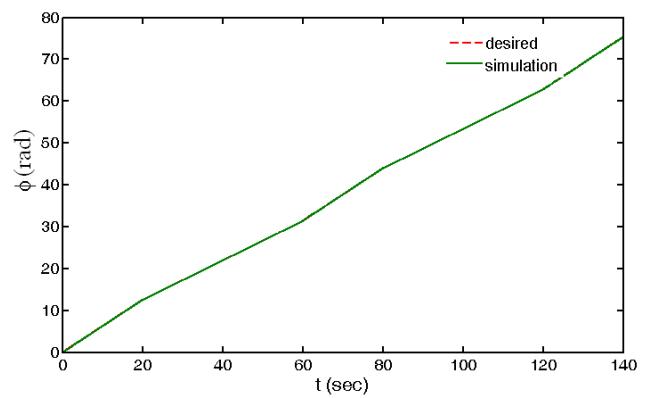
پس از پیاده‌سازی مدل دینامیکی غیرخطی کوپله در نرم‌افزار متلب، ورودی‌های کنترلی شامل نیروهای لازم که باید توسط هر کدام از تراسترهای ایجاد شود و همچنین جهت‌گیری هر کدام از تراسترهای، به منظور طی کردن مسیر دلخواه توسط ربات، تعیین می‌گردد. برای کنترل هر کدام از درجات آزادی ربات از کنترل PD استفاده شده است. اگر η بردار موقعیت واقعی ربات و η_d موقعیت مطلوب ربات باشد سیگنال خطاب به صورت $e = \eta_d - \eta$ تعریف می‌شود. قانون کنترلی را به صورت $\tau_C = J(\eta)^T(K_p e + K_D \dot{e})$ [۵] در نظر می‌گیریم.

۴-۱- حرکت هلیکال جهت بازرسی خطوط لوله در زیر دریا

به منظور بازرسی، معمولاً شناورهای زیرسطحی کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای بازرسی خطوط لوله در زیر دریا، از ربات طراحی شده که مججهز به سیستم فلوریمتر است بهره می‌بریم. شکل ۶ نشان دهنده یک مسیر پیچیده از خطوط لوله و ربات مججهز به سیستم فلوریمتر می‌باشد.

به منظور بازرسی کامل از خط لوله، حرکت مارپیچی یا هلیکال را حول محور خط لوله انجام می‌دهیم. فرض می‌شود در ابتدای حرکت، محور طولی ربات با راستای خط لوله موازی می‌باشد. از آنجایی که می‌باشد جهت تابش سیستم فلوریمتر به منظور بررسی نشتی، همواره در جهت شعاع خط لوله باشد، لذا ربات باید در حین دور زدن اطراف لوله، حول محور طولی خود دوران کند. این بدان معنی است که در قسمت اول بازرسی از خط لوله سه حرکت سرج، اسوی و هیو به منظور حرکت هلیکال مستقیم مورد نیاز است و همچنین به منظور ثابت نگه داشتن جهت تابش سیستم فلوریمتر در جهت شعاع خط لوله، به طور همزمان حرکت دورانی رول باید تحت کنترل باشد.

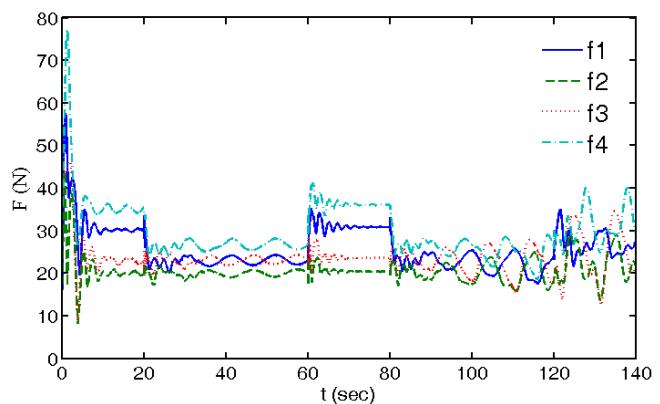
در محل زانوی اول پایپینگ، نیاز به حرکت هلیکال خمیده حول محور زانو می‌باشد و به منظور حفظ حفظ شعاع تابش سیستم فلوریمتر، نیاز به حرکت رول داشته و برای اینکه محور طولی ربات همواره در راستای محور خط لوله باشد و در محل زانوی اول، ربات باید به اندازه $\pi/2$ - π - حول محور Z حرکت یاو داشته باشد. پس از زانوی اول در قسمت مستقیم لوله، مانند ناحیه اول نیاز به کنترل همزمان سرج، اسوی، هیو و رول می‌باشد.



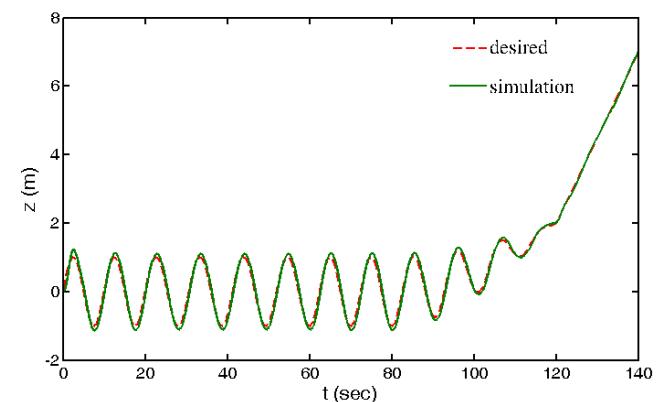
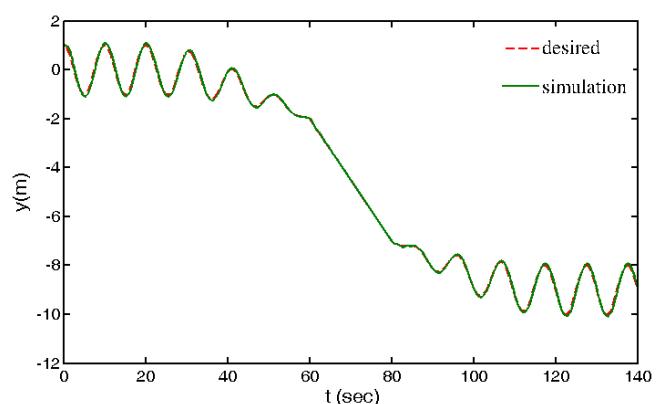
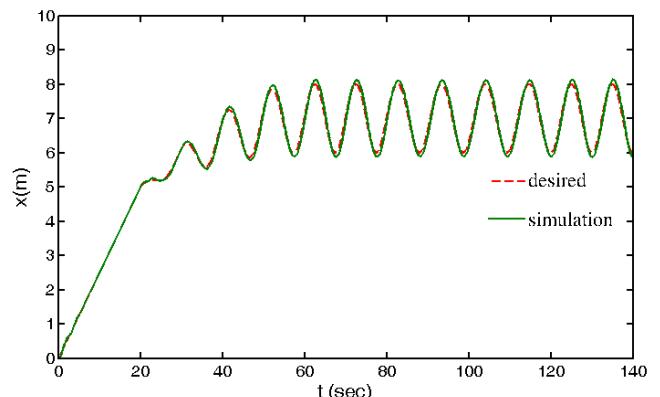
شکل ۹- مقایسه جهت و موقعیت مطلوب با جهت و موقعیت حاصل از شبیه‌سازی

در شکل ۹ مقایسه مقادیر $(x, y, z, \varphi, \theta, \psi)$ مطلوب و طی شده توسط ربات با هم مقایسه شده است. این نمودارها شامل مقایسه موقعیت و وضعیت مطلوب شناور و موقعیت و وضعیت واقعی شناور می‌باشد.

همانطور که نتایج نشان می‌دهد، چیدمان ارائه شده برای شناور زیرسطحی نوع هاورینگ به همراه کنترل بکار رفته، به خوبی مسیر مورد نظر برای بازرسی خطوط لوله زیر آب را دنبال کرده است. این نتایج اطمینان از بازرسی دقیق و کامل خطوط لوله را فراهم می‌کند.



شکل ۸- نیروهای رانش تراسترهای جهت حرکت هلیکال



interactions, IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Vol.17, No.3, p.563-571.

4- Lopez, R., Torres, I., Escareno, J., Salazar, S. and Palomino, A., (2010), *Quad-tilting thrusters micro submarine: Modeling and control of the attitude*, 20th International Conference on Electronics, Communications and Computer, Cholula, Mexico.

5- Jin, S., Kim, J., Kim, J. and Seo, T., (2014), *Six degree of freedom hovering control of an underwater robotic platform with four tilting thrusters via selective switching control*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.20, No.5, p.2370-2378.

6- Nahon, M., (1996), *A simplified dynamics model for autonomous underwater vehicles*, Proceedings of the Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, Monterey, CA, USA, p.373-379.

7- Yang, C., (2007), *Modular modeling and control for autonomous underwater vehicle*, Master Thesis, Department Of Mechanical Engineering, National University Of Singapore.

8- Fossen, T. I. and Fjellstad, O. E., (1995), *Robust adaptive control of underwater vehicles: A comparative study*, Proceedings of 3rd IFAC Workshop on Control Applications in Marine System, p.66 -76.

9- Antonelli, G., Chiaverini, S., Sarkar, N. and West, M., (2001), *Adaptive control of an autonomous underwater vehicle: Experimental results on ODIN*, IEEE Transactions On Control Systems Technology, Vol.9, No.5, p.756-765.

10- Shamshiri Amirkolai, F. and Hasanzadeh Ghasemi, R., (2015), *Representation of an autonomous underwater vehicle and trajectory controller design for in-water ship hull inspection*, Modares Mechanical Engineering, Vol.15, No.10, p.12-22. (In Persian)

11- Ribas, D., Palomeras, N., Ridao, P., Carreras, M. and Mallios, A., (2012), *Girona 500 AUV: From survey to intervention*, IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Vol.17, No.1, p.46-53.,

12- Zhao, S. and Yuh, J., (2005), *Experimental study on advanced underwater robot control*, IEEE Transaction on Robotics, Vol.21, No.4, p.695-703.

13- Kopman, V., Cavaliere, N. and Porfiri, M., (2012), *MASUV-1: A miniature underwater vehicle with multidirectional thrust vectoring for safe animal interactions*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.17 , No.3, p.563-571.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله نوع خاصی از ربات‌های زیرسطحی معرفی شد که دارای چهار تراستره با بردار رانش متغیر بوده و از سیستم دو سرو موتور متعامد به منظور جهت‌گیری متغیر با زمان هر کدام از تراسترهای، به صورت مستقل از یکدیگر بهره می‌برد که این امر سبب قابلیت کنترل همزمان ۶ درجه آزادی برای این نمونه ربات‌ها گردیده است. این ربات می‌تواند مجهز به سیستم فلوریمتر جهت بررسی نشتی جریان در خطوط انتقال و همچنین مجهز به بازوی مکانیکی ماهر و تجهیزات NDT به منظور ضخامت‌سنجی و بررسی میزان خوردگی خطوط لوله در اعماق دریا باشد. قدرت مانور بالای این ربات، ظرفیت‌ها و توانایی‌های آن و همچنین طراحی یک سیستم کنترل ساده و کارآمد، آن را به عنوان جایگزین مناسبی به جای غواص در بازرگانی تاسیسات زیر سطحی، مبدل کرده است.

پیوست: درایه‌های مربوط به ماتریس‌های معادله (۳)

$$C_{12}(v)$$

$$= \begin{pmatrix} m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G R + v) \\ -m(y_G q + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) \end{pmatrix}$$

$$C_{22}(v)$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_zr & I_{yz}r + I_{xy}p - I_yq \\ I_{yz}q + I_{xz}p - I_zr & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_xp \\ -I_{yz}r - I_{xy}p + I_yq & I_{xz}r + I_{xy}q - I_xp & 0 \end{pmatrix}$$

$$a_1 = X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r$$

$$a_2 = X_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r$$

$$a_3 = X_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r$$

$$b_1 = X_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r$$

$$b_2 = X_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + K_{\dot{p}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r$$

$$b_3 = X_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + K_{\dot{p}}p + M_{\dot{q}}q + N_{\dot{r}}r \quad (8)$$

کلید واژگان

1- Thruster

2- Thruster vectoring

3- Multi directional thrust vector system

4- Two perpendicular servo motors

۶- مراجع

1- Eskesen, J., Owens, D., Soroka, M., Morash, J., Hover, F.S. and Chrysostomidis, C., (2009), *Design and performance of ODYSSEY IV: A deep ocean hover-capable AUV*, MIT Sea Grant College Program Report, Department of Mechanical Engineering, MIT.

2- Jakuba, M. V., Yoerger, D. R. and Whitcomb, L.L., (2007), *Longitudinal control design and performance evaluation for the Nereus 11000 m underwater vehicle*, Proceedings of OCEANS Conference, Vancouver, Canada.

3- Kopman, V., Cavaliere, N. and Porfiri, M., (2012), *MASUV-1: A Miniature underwater vehicle with multidirectional thrust vectoring for safe animal interactions*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.17 , No.3, p.563-571.