

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

علی کدخدایی^۱، رضا حسن زاده قاسمی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد، دانشگاه حکیم سبزواری؛ alikadkhodae86@gmail.com

^۲ استادیار، دانشگاه حکیم سبزواری؛ r.hasanzadeh@hsu.ac.ir

چکیده

در این مقاله یک ربات زیرسطحی جدید به منظور بازرسی از خطوط لوله 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 سروو موتور متعامد جهت جهت‌گیری تراسترها، 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

ناریخچه 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; alikadkhodae86@gmail.com

² 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 inspection 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.

۱ - مقدمه

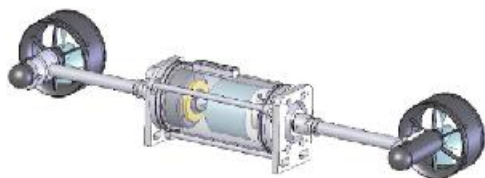
اقیانوس‌ها و دریاها مورد جستجو قرار گرفته است. در سال‌های اخیر شناورهای زیرسطحی خودکار (AUV) جایگاه خود را به عنوان مهم‌ترین ابزار جستجو و کشف در اعماق دریاها بیش از هر زمان گذشته‌ای نشان داده‌اند. به‌طوری‌که امروزه مراکز صنعتی و

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

ربات پیشنهاد شده در این مقاله برای بازرسی 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 تراسترها 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 نیروس [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. تراسترها قادر بودند در دو وضعیت صفر و ۹۰ درجه تغییر جهت دهند. در حالتی که تراسترها در وضعیت افقی سویچ می‌کردند، ربات قادر بود تنها ۳ درجه آزادی سرج، اسوی و یاو را کنترل کند و زمانی که تراسترها در وضعیت عمودی سویچ می‌کردند ربات قادر بود هیو، رول و پیچ را کنترل کند. لذا کنترل همزمان ۶ درجه آزادی نیازمند سویچ مداوم تراسترها 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 تراسترها 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 تعریف شده، می‌تواند در کاربردهایی مانند اکتشاف میادین 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 بازرسی خطوط لوله

ذخایر هیدروکربنی موجود در دریا توسط سکوه‌های فراساحلی استخراج شده و پس از پالایش جزئی، توسط خطوط لوله زیر دریا به پالایشگاه‌های 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 صدمات مالی و جانی بسیار بالا شود. استانداردهای مربوط به خطوط لوله زیر آب بازرسی‌های دوره‌ای را برای خطوط لوله زیر دریا، ضروری می‌داند.

به طور کلی بازرسی خطوط لوله می‌تواند شامل این موارد باشد: بررسی صدمات مکانیکی وارده به لوله، پوشش بتونی دور لوله، پوشش ضد خوردگی، لعاب محافظ موضع اتصال و آند فدا شونده، بررسی نشستی‌های احتمالی از خطوط لوله، ارزیابی حرکات اضافی خط لوله مانند اثرات ناشی از انبساط و انقباض، شرایط رایزرها از نظر خوردگی و صدمات وارده 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 بازرسی امکان‌پذیر نیست. لذا استفاده از ربات‌های زیرسطحی جهت بازرسی خطوط لوله از اهمیت زیادی برخوردار است.

بازرسی سیستماتیک زیر دریا توسط ربات‌های زیرسطحی از سال ۱۹۷۸ برای اندازه‌گیری پتانسیل کاتدی سیستم حفاظت خوردگی آغاز شده و در سال ۱۹۸۱ اولین بازرسی خطوط لوله توسط ربات مجهز کنترل از راه دور بجای غواص بازرسی انجام شد.

۳-۱- دینامیک و تکنیک‌های کنترلی

این معادله براساس دستگاه مختصات بدنی متصل به شناور نوشته شده است. در اینجا v بیانگر بردار سرعت خطی و دورانی نسبت به دستگاه مختصات بدنی و η 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) قابل بیان می‌باشد. ترم‌های ماتریس جرم افزوده 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.

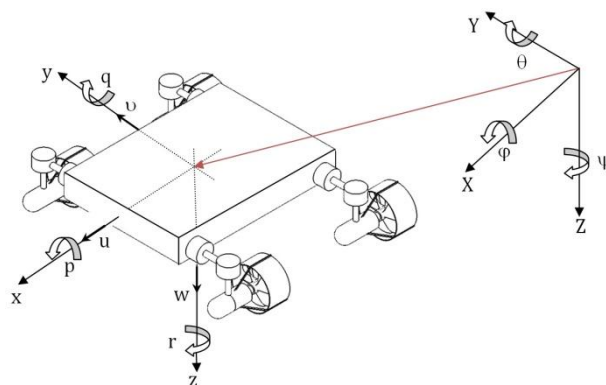
ماتریس‌های M_{RB} و C_{ADD} طبق روش‌های تحلیل بر پایه تئوری پتانسیل [۱۱] بدست می‌آیند. ماتریس دمپینگ شامل نیروهای هیدرودینامیکی می‌باشد به شکل معادله (۴) خواهد بود.

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

معادلات حاکم بر شناورهای زیر سطحی اولین بار توسط گرتر و هاگن در سال ۱۹۶۷ بدست آمد و در سال‌های بعد افرادی نظیر ناهون [۶] و چن [۷] به مدل‌سازی دینامیکی شناورهای زیرسطحی پرداختند. در زمینه کنترل مسیر ربات‌های زیرسطحی 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 زیرسطحی از روش‌های کنترل کلاسیک مثل کنترلر PID استفاده می‌کنند. با این حال در سال‌های اخیر کنترلرهایی از جمله کنترلر فازی، کنترلر شبکه‌های عصبی، کنترلر مد لغزشی، کنترلر فیدبک حالت و ... استفاده شده است [۱۰].

۴-۱- درجات آزادی شناور زیرسطحی

یک شناور زیرسطحی 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. معمولاً دو نوع دستگاه مختصات اینرسی و دستگاه مختصات بدنی جهت تشریح سینماتیک و دینامیک شناور بکار برده می‌شود (شکل ۲).

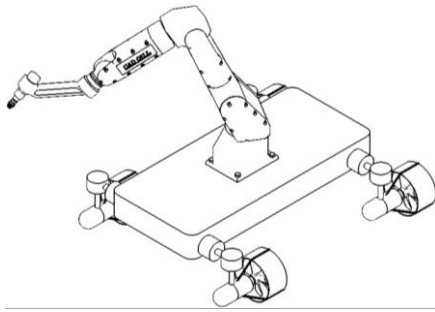


شکل ۲- دستگاه‌های مختصات مورد نیاز برای بررسی شناور زیرسطحی

۲- مدل‌سازی دینامیکی شناور زیرسطحی

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

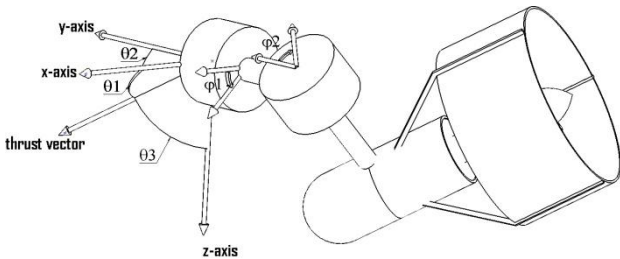
$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau_c + \tau_e \quad (1)$$



شکل ۴- شناور ارائه شده مجهز 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 جهت گیری بردار تراست نسبت به دستگاه مختصات بدنی طبق شکل ۵ خواهد بود. روابط بین θ_1 ، θ_2 و θ_3 با φ_1 و φ_2 طبق معادله (۵) می باشد.

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



شکل ۵- جهت گیری بردار تراست نسبت به دستگاه مختصات بدنی

رابطه بین بردار τ_c و نیروی ایجاد شده توسط هر تراستر f_i به صورت رابطه (۶) می باشد:

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

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

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

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

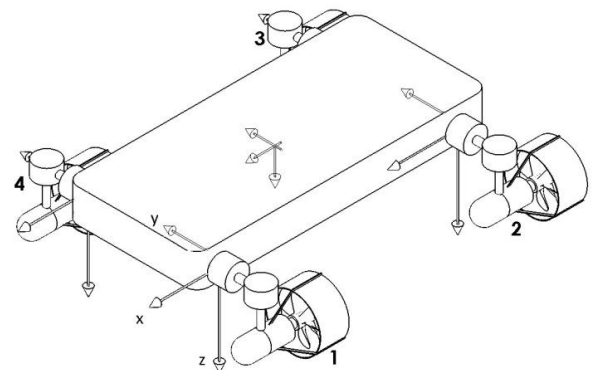
که شامل ترم های خطی و مرتبه دوم ضرایب درگ می باشند. با فرض اینکه ربات کاملاً غوطه ور باشد ضرایب درگ مربوط به سرعت خطی با شبیه سازی به کمک نرم افزار ANSYS و ضرایب درگ مربوط به سرعت دورانی طبق روش تحلیلی [۱۲] بدست می آیند. در این شبیه سازی از ترم های خطی ضرایب درگ صرف نظر کرده ایم.

ماتریس g شامل اثرات نیروی وزن و نیروی شناوری می باشد. در اینجا با در نظر گرفتن انطباق مرکز جرم و مرکز شناوری و در نظر گرفتن شناوری خنثی برای سیستم از بردار $g(\eta)$ صرف نظر می کنیم. τ_c بیانگر بردار نیرو و گشتاور کنترلی است که بوسیله تراسترها ایجاد می شود و τ_e شامل بردار نیرو و گشتاورهای خارجی است که تحت عنوان اغتشاش وارد بر سیستم، شناخته می شود.

۳- پیکربندی ربات

اکثر قریب به اتفاق شناورهای زیرسطحی دارای تراسترهای ثابت می باشند و لذا جهت حرکت در یک مسیر خاص و کنترل همزمان چند درجه آزادی مجبور به استفاده از ۶ تا ۸ عدد تراستر می باشند. افزایش تعداد تراسترها سبب بزرگ شدن منبع تغذیه ربات و در نهایت منجر به افزایش وزن ربات می گردد. در این مقاله به ارائه نوع خاصی از شناورهای زیرسطحی از نوع بردار رانش متغیر می پردازیم که دارای ۴ عدد تراستر می باشد که جهت گیری 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 تراسترها می تواند با استفاده از مکانیزم ربات های موازی و یا سیستم $MTVS^2$ [۱۳] و یا دو سروو موتور متعامد^۴ باشد. جهت گیری هر یک از تراسترهای این ربات بوسیله ۲ عدد سروو موتور که به صورت عمود بر یکدیگر واقع شده اند، کنترل می شوند (شکل ۳).

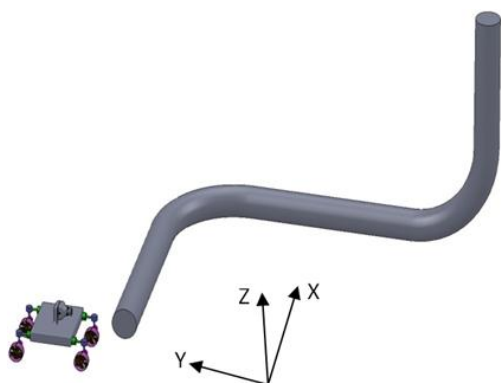
تغییر پیکربندی سیستم به صورت تابعی از زمان، این امکان را برای ما فراهم می کند که بتوان در جهات مختلف و به صورت همزمان حرکت نمود. نصب بازوی مکانیکی ماهر روی این ربات بر قابلیت های آن خواهد افزود (شکل ۴).



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.

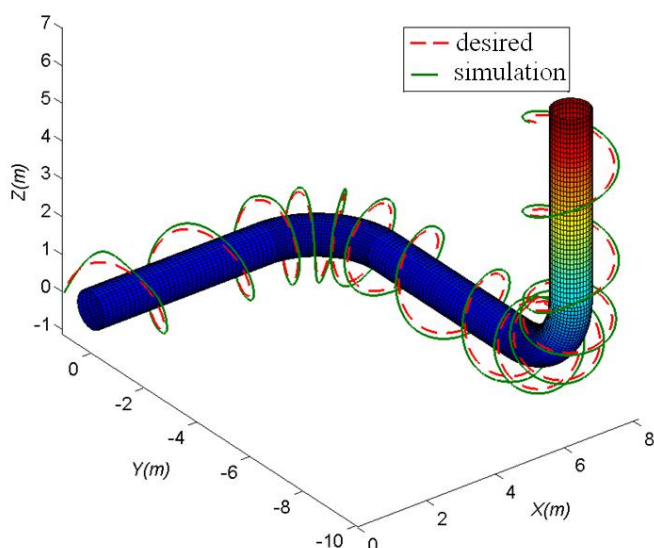
در نهایت پس از گذر از زانوی دوم در قسمت عمودی لوله، ربات با حفظ پیکربندی مرحله قبل خود، حرکت هلیکال عمودی و همزمان حرکت رول را حول محور لوله انجام خواهد داد و در این مرحله نیاز به کنترل همزمان سرج، اسوی، هیو و رول می‌باشد.



شکل ۶- بازرسی خط لوله زیر آب توسط ربات مجهز 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 یو در محل زانوی اول به اندازه $\pi/2$ - و حرکت پیچ در محل زانوی دوم به اندازه $\pi/3$ - دوران خواهد کرد.

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



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

$$b = \frac{w}{2}c(\theta_1)_2 - \frac{l}{2}c(\theta_2)_2$$

$$c = -\frac{w}{2}c(\theta_1)_3 - \frac{l}{2}c(\theta_2)_3$$

$$d = -\frac{w}{2}c(\theta_1)_4 + \frac{l}{2}c(\theta_2)_4 \quad (7)$$

۴- کنترل و شبیه سازی ربات زیرسطحی ارائه شده

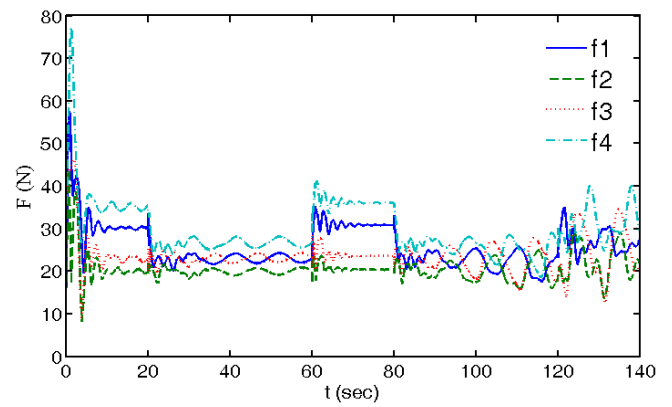
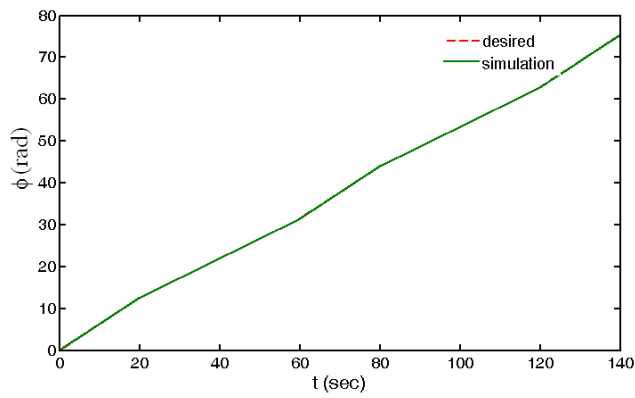
پس از پیاده سازی مدل دینامیکی غیرخطی کوپله در نرم افزار متلب، ورودی های کنترلی شامل نیروهای لازم که باید توسط هر کدام از تراسترها ایجاد شود و همچنین جهت گیری هر کدام از تراسترها، به منظور طی کردن مسیر دلخواه توسط ربات، تعیین می‌گردد. برای کنترل هر کدام از درجات آزادی ربات از کنترلر PD استفاده شده است. اگر η بردار موقعیت واقعی ربات و η_d موقعیت مطلوب ربات باشد سیگنال خطا به صورت $e = \eta_d - \eta$ تعریف می‌شود. قانون کنترلی را به صورت $\tau_C = J(\eta)^T(K_P e + K_D \dot{e})$ در نظر می‌گیریم.

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

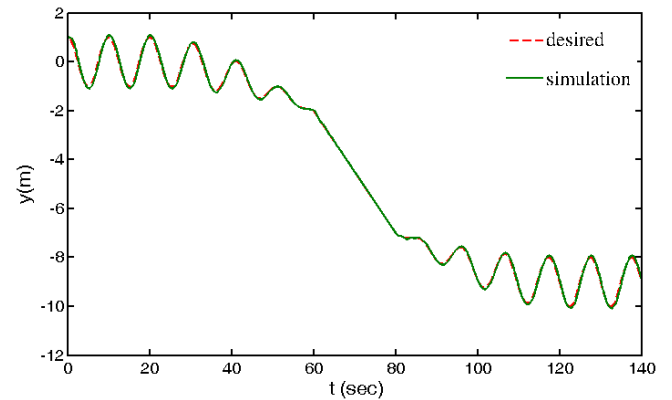
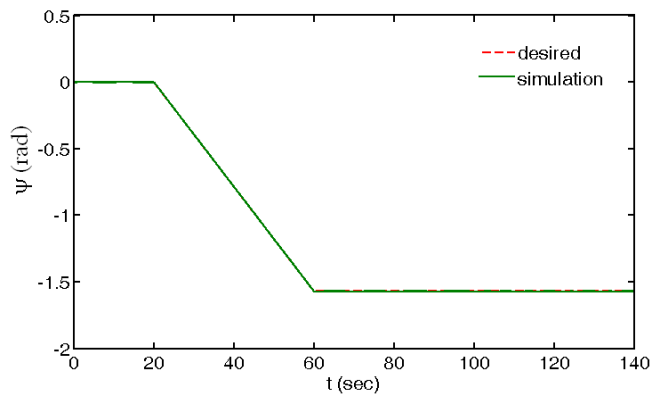
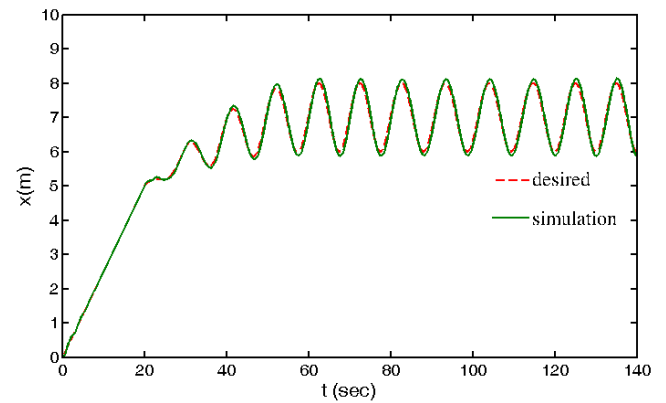
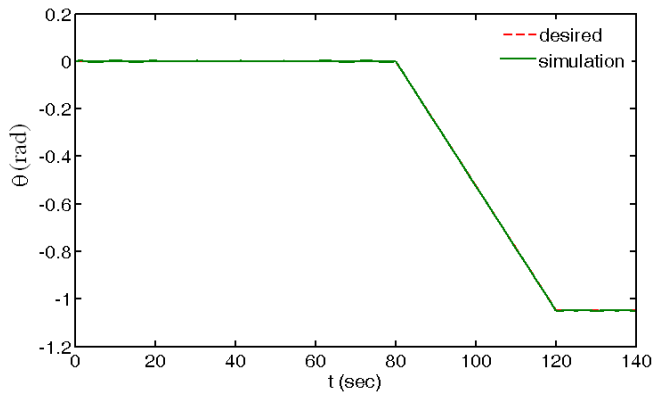
به منظور بازرسی، معمولا شناورهای زیرسطحی کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای بازرسی خطوط لوله در زیر دریا، از ربات طراحی شده که مجهز به سیستم فلوریمتر است بهره می‌بریم. شکل ۶ نشان دهنده یک مسیر پیچیده از خطوط لوله و ربات مجهز به سیستم فلوریمتر می‌باشد.

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 می‌بایست 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.

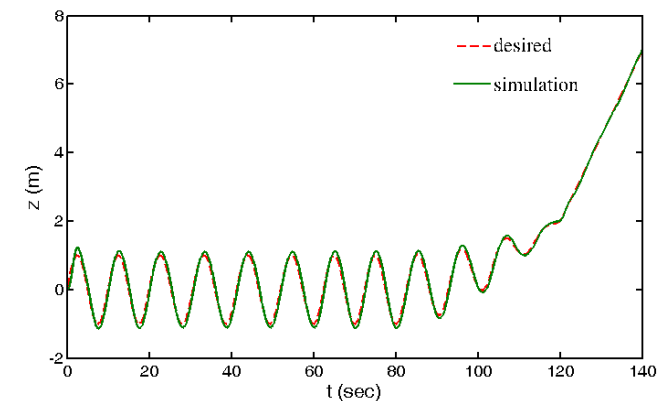
در محل زانوی اول پایپینگ، نیاز به حرکت هلیکال خمیده حول محور زانو می‌باشد و به منظور حفظ جهت شعاع تابش سیستم فلوریمتر، نیاز به حرکت رول داشته و برای اینکه محور طولی ربات همواره در راستای محور خط لوله باشد و در محل زانوی اول، ربات باید به اندازه $\pi/2$ - حول محور Z حرکت یو داشته باشد. پس از زانوی اول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



شکل ۸- نیروهای رانش تراسترها جهت حرکت هلیکال



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.

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 تراستر با بردار رانش متغیر بوده و از سیستم دو سروو موتور متعامد به منظور جهت‌گیری متغیر با زمان هر کدام از تراسترها، 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 بالایی 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 بازرسی تاسیسات زیر سطحی، مبدل کرده است.

پیوست: درایه‌های مربوط به ماتریس‌های معادله (۳)

$$C_{12}(v) = \begin{pmatrix} m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ -m(y_G q + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) \end{pmatrix}$$

$$C_{22}(v) = \begin{pmatrix} 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_z r & I_{yz}r + I_{xy}p - I_y q \\ I_{yz}q + I_{xz}p - I_z r & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_x p \\ -I_{yz}r - I_{xy}p + I_y q & I_{xz}r + I_{xy}q - I_x p & 0 \end{pmatrix}$$

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

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

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

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

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

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

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*