



طراحی، مدل سازی و شبیه سازی حرکتی بازوهای رباتیکی با ساختار متغیر با زمان در محیط سیال

سیاوش فتح الهی دهکردی

استادیار، مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، خوزستان
sfdehkordi@scu.ac.ir ۶۱۳۵۷۸۳۱۵۱ صندوق پستی

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق، مدل دینامیکی یک بازوی رباتیکی با ساختار متغیر با زمان در محیط سیال استخراج می‌گردد. تغییر محیط کاری بازوهای رباتیکی و استفاده از آن‌ها بصورت مکانیزم‌های ساختار متغیر با زمان، موجب رفع محدودیت فضای کار ربات در هنگام استفاده در محیط سیال می‌شود. از سوی دیگر موجب ایجاد دسترسی بیشتر پنجه‌ی ربات با استفاده از طرح ربات ساختار متغیر با مفاصل دورانی - کشوری می‌گردد. این در حالی است که مدل ساختار جدید متناسب با کاربرد آن در درون سیال، بدست می‌آید. بدین ترتیب با در نظر گرفتن اثر متقابل ناشی از برهم کنش میان سیال و بازوی رباتیکی در قالب نیروهای هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی، معادلات نهایی حرکت محاسبه می‌گردند. اگرچه تغییر ساختار مکانیکی بازوی رباتیکی و اثر عمل و عکس‌العمل متقابل آن بر سیال سبب می‌گردد، معادلات حرکت بدست آمده با سیستم‌های مشابه که ساختار متغیر با زمان ندارند، متفاوت شود. در نتیجه، معادلات نهایی وابسته به زمان می‌باشند. این موضوع از مقایسه نتایج به دست آمده از رفتار ربات در محیط هوا و سیال، مشخص می‌گردد؛ بدین ترتیب، علاوه بر حرکت دورانی، در حرکت خطی مفصل کشویی نیز بواسطه ویژگی تراکم ناپذیر بودن سیال، از طرف سیال نیروی عکس‌العمل مقاوم به بازوی رباتیکی وارد می‌شود. در این راستا مدل دینامیکی با استفاده از فرمولاسیون گیبس اپل بازگشتی بدست آمده و در ادامه در محیط نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل ارائه می‌گردند. معادلات بر اساس سطح مقطع‌های متفاوت بازوها، محیط متفاوت و همچنین با لحاظ اثر هر یک از نیروهای هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی شبیه‌سازی می‌گردد. در نتیجه‌ی آن، دامنه‌ی حرکت پنجه‌ی ربات در محیط آب به نسبت هوا به میزان ۶۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در مقایسه اثرات نیروهای برهم‌کنش میان سیال و لینک‌های ربات، میزان اثرپذیری حرکت ربات از نیروی درگ از سایر نیروهای مقاوم بیشتر می‌باشد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۲ خرداد ۱۴۰۱
داوری اولیه: ۱۸ خرداد ۱۴۰۱
پذیرش: ۷ تیر ۱۴۰۱

کلیدواژگان:

بازوهای رباتیکی با دینامیک متغیر با زمان
برهم‌کنش سیال و بازوهای رباتیکی
مفاصل دورانی کشویی

Design, modeling and motion simulation of robotic manipulators with time-varying structure in a fluid environment

Siavash Fathollahi Dehkordi

Mechanic Engineering Department, Shahid Chamran University of Ahwaz, Ahwaz, Khuzestan, Iran
P.O.B. 6135783151 Ahwaz, Khuzestan, Iran, sfdehkordi@scu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 23 May 2022
First Decision: 8 June 2022
Accepted: 28 June 2022

Keywords:

Robotic manipulators with time-varying dynamics
Fluid and robotic arms interaction
Revolute-Prismatic joints

Abstract

This paper presents a dynamic model of a robotic manipulator with a time-varying structure in a fluid medium. Changing the working environment of the manipulators and using them as time-varying structure cause to eliminate the robot workspace limitations when used in a fluid medium. In addition, it provides more access for end-effectors via new manipulator structures design that used revolute-prismatic joints. While the new manipulator structure's model is obtained commensurate with its application in the fluid environment. Thus, by considering the hydrostatic and hydrodynamic interaction forces that implemented between the fluid and the robot arm, the final motion equations of the robot are evaluated. However, the change in the robot's structure and its fluid implemented action and reaction force, caused the obtained motion equations differ from similar systems with time-invariant structures. As a result, the final equations are time dependent. This is evidenced by comparing the results obtained from the robot's behavior in air and fluid medium. Thus, in addition to the rotational motion, in the linear motion of the prismatic joint, due to the incompressibility of the fluid, a resistive force is applied by the fluid to manipulator links. In this regard, the dynamic model is obtained using the recursive Gibbs-Apple formulation and then simulated in MATLAB software. The equations are simulated and discussed based on the different links cross-sectional areas, various environments, as well as the effect of each of the hydrostatic and hydrodynamic forces. As a result, the robot's motion in the water medium is reduced by 60% relative to the air environment. The robot's motion is more affected by the drag force than other resistive forces.

Please cite this article using:

S. Fathollahi Dehkordi, Design, modeling and motion simulation of robotic manipulators with time-varying structure in a fluid environment, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 41- 51, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.157561>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

با گسترش روزافزون عملیات‌های دریایی و همچنین تلاش برای انجام تحقیقات زیرسطحی در زمینه‌های اکتشافات، تعمیر و نگهداری خطوط، پایش وضعیت، محیط‌زیست و همچنین توسعه‌ی تحقیقات کاربردی در اعماق دریا، استفاده از بازوهای رباتیکی زیرسطحی (زیرآبی) مورد توجه قرار گرفته است [۱]. کاربرد این نوع از ربات‌ها بواسطه‌ی محدودیت‌های سیستم‌های موجود و ضرورت حفظ جان انسان‌ها با گذشت زمان از محدوده‌ی دریا و آب‌های آزاد فراتر رفته و در رودخانه‌ها و مکان‌های دارای جریان‌های متلاطم آب نیز مورد توجه واقع شده است [۲]. اگرچه در محیط‌های خلق‌شده توسط انسان اعم از دریاچه‌های مصنوعی، استخرها و آب‌راه‌ها نیز به‌منظور نظافت و فرآوری، استفاده از آن‌ها قابل توجه است. اگرچه در فناوری‌های جدید نیز می‌توان به استفاده از ربات‌ها در استخرهای آب سبک و سنگین در نیروگاه‌های اتمی اشاره نمود [۳]. براین اساس هدف محققین پیشنهاد ساختارهای جدید برای استفاده در محیط‌های مورد اشاره می‌باشد [۴]. این در حالی است که توسعه روش‌ها و ساختارهای مورد اشاره سبب پیچیدگی محاسباتی می‌گردد و استخراج روابط و پیاده‌سازی روش‌های کنترلی بر روی آن‌ها دشوار خواهد بود [۵، ۶]. این موضوع از سوی دیگر سبب می‌گردد، عملکرد ربات توسعه‌یافته و امکان بهره‌برداری از آن در چهارچوب‌های متنوع نیز فراهم گردد [۷].

ساختارهای دینامیکی غیرخطی متغیر با زمان در سیستم‌های مکترونیک بر مبنای تغییر سازه‌ی بازوی رباتیکی به وجود می‌آیند [۸-۱۰]. بدین ترتیب با استفاده از اتصالاتی، ساختار کلی ربات را در طول زمان و به‌منظور افزایش قدرت مانور و دسترسی آن دستخوش تغییر می‌کنند. استفاده از بازوهای رباتیکی با ساختار دینامیکی متغیر با زمان، موضوعی است که قبلاً توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه با تغییر محیط استفاده از هوا به درون سریال این تغییرات به واسطه‌ی برهم‌کنش میان سیال و سازه‌های دینامیکی مشمول تغییرات اساسی می‌گردند [۱۱]. در این راستا معادلات دینامیکی با در نظر گرفتن نیروهای شناوری، درگ [۱۲] و ... بعلاوه نیروی ناشی از سیال به واسطه‌ی عدم فشردگی و مقابله با حرکت خطی لینک‌های ربات، می‌بایست مورد بررسی قرار بگیرند [۱۳، ۱۴]. برای استخراج معادلات حرکت، فرمولاسیون‌های گوناگون مورد توجه می‌باشند که از آن جمله می‌توان به فرمولاسیون اوپلر لاگرانژ، نیوتن-اوپلر، کین و گیبس-اوپل [۱۵] اشاره نمود که در استخراج معادلات، نتایج مشابه دارند

و تفاوت آن‌ها در نحوه‌ی پیاده‌سازی محاسبات و پیچیدگی محاسبات است.

کارایی سیستم‌های رباتیکی مختلف بر اساس فضای کار و دسترسی و همچنین میزان ظرفیت حمل بار دینامیکی سنجیده می‌شود. این در حالی است که علاوه بر موارد فوق در شرایط مشابه میزان مصرف انرژی در طول انجام مأموریت مشابه بر انتخاب ساختارهای مختلف رباتیکی تأثیر می‌گذارد [۱۶]. در این راستا بررسی شرایط مختلف و تحلیل نتایج به‌همراه در نظر گرفتن پارامترهای تعیین‌کننده در انتخاب ساختار نهایی با توجه به کاربرد مورد انتظار از جمله پارامترهای اثرگذار می‌باشند. استفاده از بازوهای رباتیکی در محیط‌های عملکردی متفاوت، سبب تغییر محاسبات قبلی می‌شود و بر اساس محیط جدید و نحوه عملکرد بازوی رباتیکی مجدداً معادلات نهایی استخراج می‌گردند [۱۷].

در این تحقیق، مدل دینامیکی یک بازوی رباتیکی با دینامیک متغیر با زمان بر مبنای طراحی صورت گرفته به‌منظور استفاده در سیال استخراج گردیده است. هدف از طراحی و مدل‌سازی بازوی رباتیکی توسعه فضای کاری و دسترسی پنجه ربات به‌منظور بهبود عملکرد سیستم‌های ارتباطی موجود است. بدین ترتیب بر اساس طرح‌های موجود، استفاده از بازوهای رباتیکی با در نظر گرفتن مفاصل دورانی-کشویی در حالت کلی همراه با اعمال نیروهای محیطی ناشی از برهم‌کنش بازوها و سیال اطراف پیشنهاد گردیده است. اگرچه نسبت به تحقیقات قبلی بواسطه‌ی حرکت خطی بازوها همراه با حرکت دورانی و با لحاظ نمودن مقاومت سیال در برابر فشردگی (اصل سیال تراکم‌ناپذیر) موجب پیچیدگی محاسبات و دشواری استخراج معادلات نهایی می‌گردد. از سوی دیگر به‌منظور بهره‌برداری و همچنین ارزیابی عملکرد طرح پیشنهادی معادلات بر اساس سطح مقطع‌های متفاوت بازوها، محیط متفاوت و همچنین با لحاظ اثر هر یک از نیروهای هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی شبیه‌سازی می‌گردد. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب صورت گرفته و نتایج تحلیل می‌گردند. در ادامه و در بخش ۲ طراحی بازوی رباتیکی پیشنهادی و در بخش ۳ مدل‌سازی دینامیکی با استفاده از فرمولاسیون گیبس-اوپل بازگشتی صورت می‌پذیرد. در بخش ۴ شبیه‌سازی نتایج و در بخش ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه می‌گردند.

۲- طراحی بازوی رباتیکی ساختار متغیر به‌منظور استفاده

در محیط سیال

مطابق توضیحات ارائه شده ساختارهای مکانیکی بازوهای رباتیکی مورد استفاده در درون سیار بواسطه‌ی آسانی ساخت و

۳- مدل‌سازی دینامیکی بازوی رباتیکی ساختار متغیر در

محیط سیال با استفاده از فرمولاسیون گیبس - اپل

در این بخش در ابتدا، روابط سینماتیکی بازوهای رباتیکی با در نظر گرفتن محیط سیال استخراج می‌شوند. در ادامه با استفاده از روابط سینماتیکی به دست آمده، استخراج معادلات حرکت زنجیره‌های رباتیکی در محیط سیال، شامل محاسبه بر همکنش‌های دینامیکی میان سیال و لینک‌های ربات و به دست آوردن معادلات دینامیکی زنجیره‌ی رباتیکی با در نظر گرفتن این برهم‌کنش‌ها صورت می‌پذیرد.

۳-۱- استخراج معادلات سینماتیکی بازوی رباتیکی با ساختار

متغیر با زمان در محیط سیال

برای بیان حرکت ربات، دستگاه‌های مختصات مرجع و محلی وابسته به زنجیره‌ی رباتیکی انتخاب و در ادامه روابط سینماتیکی مرتبط نیز بر اساس دستگاه‌های مختصات ارائه شده، تعریف می‌گردند. دستگاه‌های مختصات برای بیان حرکت پنجه‌ی بازوی رباتیکی در فضا مشتمل بر ۳ درجه‌ی آزادی مربوط به موقعیت مکانیکی و همچنین ۳ درجه‌ی آزادی مربوط به موقعیت زاویه‌ای آن که به‌عنوان زوایای اوپلر شناخته می‌شوند، بکار می‌روند. بر اساس طرح مکانیکی ارائه شده، هر بازوی ربات دارای دو حرکت هم‌زمان دورانی و رفت‌وبرگشتی است. مطابق شکل ۱ دستگاه مختصات مرجع $X_0Y_0Z_0$ جهت بیان حرکت بازوی رباتیکی (دستگاه مختصات ثابت) تعیین می‌گردد. بدین ترتیب با توجه به آنکه پایه‌ی بازوی رباتیکی امکان حرکت ندارد، دستگاه مختصات اول بر روی پایه‌ی بازوی رباتیکی قرار داده می‌شود تا حرکت مفصل اول بازوی رباتیکی، نسبت به آن بیان شود. در ادامه نیز برای بیان حرکت هر یک از لینک‌های بازوی رباتیکی، یک دستگاه مختصات در محل اتصال آن قرار داده می‌شود. از این دستگاه مختصات برای بیان میزان دوران مفصل آن لینک و همچنین حرکت خطی لینک نسبت به غلاف بکار می‌رود؛ بنابراین، در حالت کلی N دستگاه مختصات برای بیان حرکت بازوی رباتیکی مورد نیاز می‌باشد. بر اساس دستگاه‌های مختصات تعیین شده، مختصات‌های تعمیم‌یافته‌ی حرکت صلب برای یک بازوی رباتیکی N لینکی به صورت $\theta = [\theta_1, l_1, \dots, \theta_n, l_n]^T$ تعریف می‌شوند که در آن θ بیانگر مختصات تعمیم‌یافته‌ی مفصل دورانی و l_n نیز حرکت خطی لینک نسبت به غلاف آن را بیان می‌نمایند. هر مفصل (دورانی و یا رفت‌وبرگشتی) در ساختار رباتیکی پیشنهادی، به‌صورت مستقل توسط موتور الکتریکی متصل به آن تحریک می‌گردد. در نتیجه برای بیان حرکت مود صلب آن، از $N2$

همچنین سهولت در مدل‌سازی اغلب به‌صورت مفاصل دورانی و غیر متغیر با زمان در نظر گرفته می‌شوند. این موضوع سبب می‌گردد که فضای کاری بازوهای رباتیکی محدود گردد. از سوی دیگر بر اساس طرح‌های پیشنهادی محققان، استفاده از ساختارهای رباتیکی متغیر با زمان در محیط هوا مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. این در حالی است که استفاده از این نوع از بازوهای رباتیکی در محیط سیال بواسطه‌ی محدودیت‌های ناشی از شرایط محیطی و همچنین پیچیدگی‌های ذکر شده در زمینه‌ی استخراج معادلات حرکت ربات، مورد توجه قرار نگرفته‌اند. برای این منظور، مفاصل کشویی به‌صورت هم‌زمان با مفاصل دورانی به‌صورت یک ساختار یکپارچه در یک مفصل، مورد استفاده قرار می‌گیرند. ایجاد قابلیت تغییر طول در لینک‌های بازوی رباتیکی سبب می‌شود، فضای کاری ربات افزایش یابد. این در حالی است که در کاربردهای بازرسی و همچنین اکتشافات در زیر آب و ... این قابلیت موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های ناشی از استفاده از ربات‌های متحرک می‌گردد. همچنین در صورت وجود مانع، قدرت مانور بازوهای رباتیکی افزایش می‌یابد. در بخش طراحی، مسئله‌ی اصلی انتخاب مکانیزم مناسب برای ایجاد حرکت خطی است. مطابق مطالعات قبلی استفاده از راهنمای خطی، بال اسکرو و همچنین لید اسکرو مرسوم است. مکانیزم‌های متفاوت برای حرکت بر اساس نرخ گام پیشروی و همچنین عملکرد تعریف شده، پیشنهاد می‌گردند. اگرچه جک‌های هیدرولیکی، موتورهای خطی، دنده و شانه، تسمه و ... از جمله گزینه‌های قابل استفاده می‌باشند. در مورد سیال علاوه بر نیروهای معمول هیدرواستاتیک و هیدرولیکی، تضمین دوام عملکرد در شرایط مختلف دمایی، عمق و محیطی نیز مورد توجه است.

در مورد سیال علاوه بر نیروهای معمول هیدرواستاتیک و هیدرولیکی، تضمین دوام عملکرد در شرایط مختلف دمایی، عمق و همچنین شرایط محیطی نیز مورد توجه است.

بدین ترتیب با توجه به تمرکز مفاصل علاوه بر گسترش فضای کار، میزان ظرفیت حمل بار و همچنین دقت عملکرد ربات نیز افزایش می‌یابد. این مقایسه در قالب رفتار ربات تک بازویی با مفاصل دورانی کشویی و همچنین ربات دو بازویی با مفاصل دورانی توجیه‌پذیرتر می‌باشد. از سوی دیگر، استفاده از مفاصل کشویی این مزیت را داشته که امکان تنظیم دقت حرکت پنجه ربات را توسعه می‌دهد. این به این معنی است که استفاده از مکانیزم‌های خطی مورد اشاره تنوع بیشتری داشته و بر حسب دقت مورد انتظار امکان انتخاب برایشان وجود دارد.

مختصات تعمیم‌یافته استفاده می‌شود تا حرکت پنجه‌ی زنجیره‌ی رباتیکی توصیف شود. در نامگذاری دستگاه‌های مختصات متصل به هر یک از لینک‌ها از روش نامگذاری دناویت

مختصات تعمیم‌یافته استفاده می‌شود تا حرکت پنجه‌ی زنجیره‌ی رباتیکی توصیف شود. در نامگذاری دستگاه‌های مختصات متصل به هر یک از لینک‌ها از روش نامگذاری دناویت

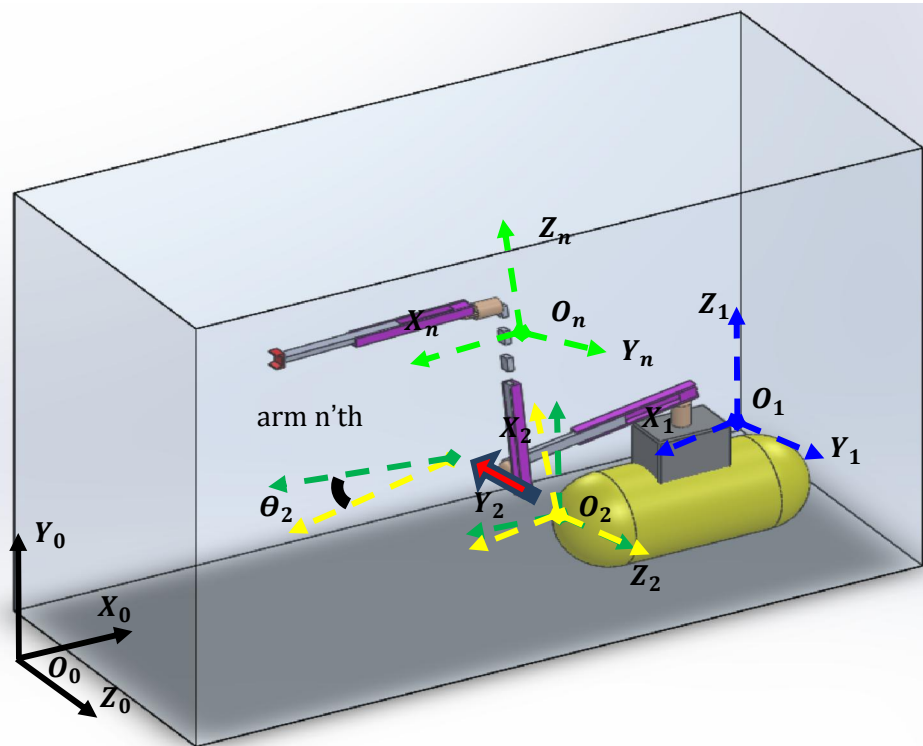


Fig. 1 The coordinates assignment for structure variable manipulator in fluid medium

شکل ۱ انتخاب دستگاه‌های مختصات برای بازوی رباتیکی متغیر با زمان در محیط سیال

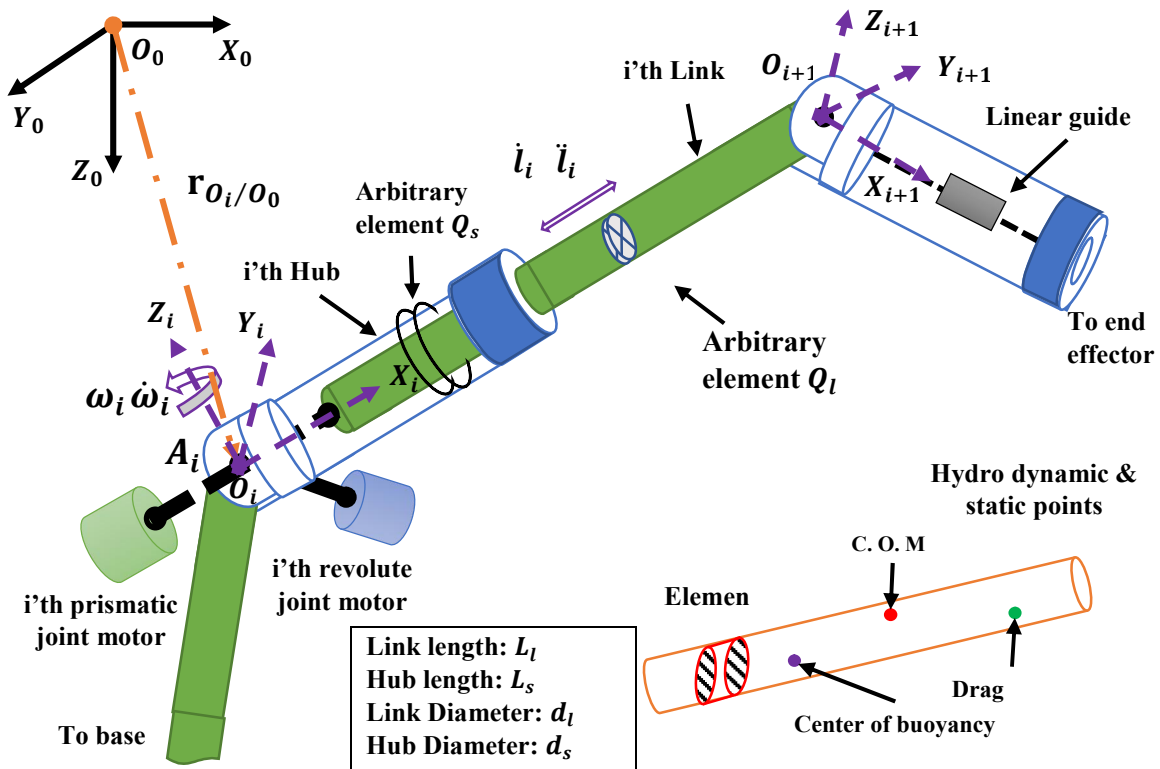


Fig. 2 Kinematics of the i -th link of N-links structure variable manipulator in fluid medium

شکل ۲ سینماتیک لینک i ام بازوی N لینکی ساختار متغیر در محیط سیال

بردار شتاب المان‌های دیفرانسیلی Q_i و Q_s به صورت مطلق و به صورت بازگشتی بدست می‌آیند.

$$\ddot{\mathbf{r}}_{Q_i} = \ddot{\mathbf{r}}_{o_i} + \ddot{\mathbf{r}}_{Q_i/o_i} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \dot{\mathbf{r}}_{Q_i/o_i} + 2 \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \dot{\mathbf{r}}_{Q_i/o_i} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times (\dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \dot{\mathbf{r}}_{Q_i/o_i}) \quad (9)$$

$$\ddot{\mathbf{r}}_{Q_s} = \ddot{\mathbf{r}}_{o_i} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \dot{\mathbf{r}}_{Q_s/o_i} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times (\dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \dot{\mathbf{r}}_{Q_s/o_i}) \quad (10)$$

که در آن بردار $\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$ نشان‌دهنده‌ی شتاب زاویه‌های لینک i ام می‌باشد.

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \dot{\mathbf{z}}_i \dot{\theta}_i + \mathbf{R}_{i-1}^{-1} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} + \mathbf{R}_{i-1} (\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} \times \dot{\mathbf{z}}_i \dot{\theta}_i) \quad (11)$$

۲-۳- استخراج معادلات دینامیکی بازوی رباتیکی با ساختار متغیر با زمان در محیط سیال

استخراج معادلات حرکت بازوهای رباتیکی متأثر از شناخت دقیق ورودی‌های سیستم مکاترونیکی و همچنین خروجی‌های مورد نیاز می‌باشد. این در حالی است که اثر نیروهای خارجی بر عملکرد سیستم رباتیکی قابل توجه می‌باشد. این اثر در محیط هوا صرفاً به صورت اثر گرانش در صورت عدم وجود نیروهای خارجی دیگر در نظر گرفته می‌شود. استفاده از بازوی رباتیکی در محیط سیال، موجب بر همکنش‌های دینامیکی میان سیال و لینک‌های ربات می‌گردد. از این رو در مرحله‌ی اول، اثرات هیدرودینامیکی و هیدرواستاتیکی سیال بر روی لینک‌های ربات محاسبه می‌شوند.

نیروهای هیدرودینامیکی ایجاد شده بواسطه‌ی حرکت بازوهای رباتیکی در درون سیال، اغلب غیرخطی می‌باشند. بحث‌وبررسی در خصوص این نیروها و اثر آنها بر اجسام که به طور کامل در سیال فرورفته‌اند به صورت گسترده بررسی شده‌اند. محاسبه‌ی این نیروها با استفاده از جریان سیال تراکم‌ناپذیر به وسیله‌ی معادلات ناویراستوکس صورت می‌پذیرد. اگرچه حل این معادلات به ندرت به صورت دقیق به پاسخ می‌رسند و در حالت‌های خاص، این نیروها به صورت تقریبی و متمرکز برای کاربردهای خاص و با فرضیات مشخص مدل می‌گردند. اثر این نیروها به صورت چهار بر همکنش مجزا شناسائی شده و در مدل‌سازی و شبیه‌سازی اجسام که در سیال فرورفته‌اند، مورد توجه قرار می‌گیرند. این اثرات عبارت‌اند از: جرم افزوده، شناوری، شتاب سیال و نیروهای لیفت و درگ.

حرکت هارمونیک یک جسم در درون سیال موجب می‌گردد، نیروی متقابل ناشی از فشار و همچنین ممان اینرسی متناسب با آن به صورت تابع خطی از شتاب آن به جسم وارد شوند. برآیند این نیروها به صورت جرم افزوده و همچنین ممان اینرسی افزوده

برای محاسبه‌ی بردار موقعیت، سرعت‌های خطی و زاویه‌های و همچنین بردارهای شتاب خطی و زاویه‌های اجزاء سیستم رباتیکی، المان دیفرانسیلی Q_i بر روی لینک i ام و همچنین المان دیفرانسیلی Q_s بر روی غلاف i ام به صورت آزاد انتخاب می‌گردند. در شکل ۲ \mathbf{r}_{Q_i/o_i} و همچنین \mathbf{r}_{Q_s/o_i} بردارهای موقعیت المان‌های دیفرانسیلی را در دستگاه‌های مختصات محلی نمایش می‌دهند. بردار موقعیت این المان‌ها نسبت به دستگاه مختصات محلی متصل به لینک i ام (O_i) به صورت معادلات (۱ و ۲) بیان می‌شوند.

$$\mathbf{r}_{Q_i/o_i} = \eta_i \mathbf{x}_i \quad (1)$$

$$\mathbf{r}_{Q_s/o_i} = \eta_s \mathbf{x}_i \quad (2)$$

که در آن بردار \mathbf{x}_i ، بردار یکه در راستای محور x_i می‌باشد. همچنین η نیز فاصله فی ما بین مرکز دستگاه مختصات (O_i) و المان‌های دیفرانسیلی Q_i و Q_s را بیان می‌نماید. برای بیان بردار موقعیت المان‌های دیفرانسیلی به صورت مطلق، از معادلات بازگشتی استفاده شده و در ابتدا موقعیت المان‌های مذکور نسبت به مرکز دستگاه مختصات (O_i) و سپس نسبت به دستگاه مختصات متصل به پایه استخراج می‌شوند.

$$\mathbf{r}_{Q_s/orl} = \mathbf{r}_{Q_s/orl/o_i} + \mathbf{r}_{o_i} \quad (3)$$

که در آن برای محاسبه‌ی $\mathbf{r}_{o_i/o_{i-1}}$ کافی است موقعیت المان دیفرانسیلی در انتهای لینک $i-1$ ام در نظر گرفته شود. ماتریس \mathbf{R}_{i-1} ماتریس دورانی بین مبدا مختصات متصل به لینک i ام و $i-1$ ام می‌باشد که به صورت $\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_{i-1} \mathbf{A}_i$ ماتریس دورانی مفصل i ام می‌باشد. با استفاده از معادله‌ی (۳) و مشتق‌گیری نسبت به زمان، بردار سرعت المان‌های دیفرانسیلی محاسبه می‌گردند.

$$\dot{\mathbf{r}}_{Q_i} = \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \dot{\mathbf{r}}_{Q_i/o_i} + \dot{\mathbf{r}}_{Q_i/o_i} + \dot{\mathbf{r}}_{o_i} \quad (4)$$

$$\text{where } \dot{\mathbf{r}}_{Q_i/o_i} = \dot{\mathbf{l}}_i \mathbf{x}_i \quad (5)$$

که در آن بردار $\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$ نشان‌دهنده‌ی سرعت زاویه‌های لینک i ام می‌باشد.

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \dot{\mathbf{z}}_i \dot{\theta}_i + \mathbf{R}_{i-1}^{-1} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} \quad (6)$$

که در آن، $\dot{\theta}_i$ برابر سرعت زاویه‌های مفصل i ام می‌باشد. بردارهای $\dot{\mathbf{r}}_{o_i}$ و $\dot{\mathbf{r}}_{o_i}$ به صورت بازگشتی مطابق معادلات (۷ و ۸) محاسبه می‌شوند.

$$\dot{\mathbf{r}}_{o_i} = \mathbf{R}_{i-1} (\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} \times \mathbf{r}_{o_i/o_{i-1}} + \dot{\mathbf{r}}_{o_{i-1}}) \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_{o_i} = \mathbf{R}_{i-1} ((\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} \times \mathbf{r}_{o_i/o_{i-1}}) + 2 \cdot (\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} \times \dot{\mathbf{r}}_{o_i/o_{i-1}}) + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} \times (\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} \times \mathbf{r}_{o_i/o_{i-1}}) + \dot{\mathbf{r}}_{o_{i-1}}) \quad (8)$$

در معادلات دینامیکی جسم لحاظ می گردند.

نیروی اصطکاک سیال بر روی المان های همسان در عمق مشابه به صورت نیرویی که در مرکز فشار لینک های بازوی رباتیکی اعمال می گردند، در نظر گرفته می شوند. این نیروها از جنس نیروی درگ بوده و در راستای جریان سرعت عمل می نمایند. بدین ترتیب جریان ورتکس ناشی از آن سبب ایجاد نیروی نوسانی در راستای درگ و همچنین در راستای عمود بر راستای درگ (لیفت) می شود.

در هنگام حرکت لینک های بازوی رباتیکی در درون سیال، اثرات دینامیکی ناشی از میرایی دورانی، نیروی شناوری و همچنین نیروی ناشی از فشار جریان بر لینک های مینوپلاتور وارد می شوند که این اثرات به صورت مجزا محاسبه می شوند. اثر ممان اینرسی ناشی از میرایی سیال تابعی از سرعت زاویه ای لینک های بازوی رباتیکی، زاویه ای هجوم و همچنین زاویه ای لغزش جانبی می باشد؛ بنابراین در حالت کلی فرض آنکه ممان اینرسی ناشی از میرایی سیال، تابع خطی از سرعت زاویه ای لینک های بازوی رباتیکی باشد، منطقی است. نیروی شناوری نیروی ترمیمی است که بواسطه ی اثر سیال جابه جا شده توسط لینک های بازوی رباتیکی ایجاد می شود. همچنین نیروی هجوم به نقطه ی مرکز شناوری لینک و معادل میزان سیال جابه جا شده وارد می گردد. فشار جریان سیال نیز به لینک های بازوی رباتیکی وارد شده و تابعی از سرعت نسبی لینک های ربات و سیال می باشد. در فرایند طراحی برای حفظ عمق مطلوب ربات در درون سیال، بگونه ای طراحی می شوند که مرکز شناوری و مرکز ثقل آن ها در یک مکان قرار بگیرد. نیروی شناوری بازوی رباتیکی در حالتی که در درون سیال قرار بگیرد، برای لینک i ام بر اساس معادله ی (۱۲) محاسبه می شود.

$$b_i = \rho g \nabla_i \quad (12)$$

که در آن ∇_i عبارت است از تغییرات حجمی سیال ناشی از حرکت لینک i ام و g نیز شتاب گرانش را نمایش می دهد.

در فرمولاسیون گیبس اپل بازگشتی، به منظور استخراج معادلات حرکت، در مرحله اول تابع گیبس سیستم بر اساس بردارهای شتاب، انرژی پتانسیل و همچنین تابع استهلاک ریلی محاسبه می گردند. در سیستم هایی که نیروهای ناپایستار (Non-Conservative) وجود دارند، لازم است اثر آن در تابع استهلاک ریلی در نظر گرفته شود.

- تابع گیبس بازوی رباتیکی در محیط سیال

تابع گیبس بازوی رباتیکی در درون سیال عبارت است از:

۱- تابع گیبس لینک ها (S_L)، ۲- تابع گیبس غلاف ها (S_g)، ۳-

تابع گیبس ناشی از جرم و ممان اینرسی افزوده ($S_{AL} + S_{AS}$) و ۴- تابع گیبس ناشی از جرم موتورها و جرم متمرکز پنجه (S_p).

با در نظر گرفتن توضیحات فوق الذکر، به منظور محاسبه ی تابع گیبس در لینک ها که به صورت جسم صلب مورد توجه قرار می گیرند، المان های دیفرانسیلی انتخاب شده ی Q_L و Q_S بر روی لینک i ام بازوی رباتیکی مورد توجه می باشند. در نتیجه تابع گیبس برای هر یک از المان های دیفرانسیلی عبارت خواهد بود از:

$$dS_{L_i} = \frac{1}{2} \mu_{L_i}(\eta) \left(\dot{\mathbf{i}}^T \mathbf{T}_{Q_L} \cdot \dot{\mathbf{i}}^T \mathbf{T}_{Q_L} \right) d\eta \quad (13)$$

$$dS_{S_i} = \frac{1}{2} \mu_{S_i}(\eta) \left(\dot{\mathbf{i}}^T \mathbf{T}_{Q_S} \cdot \dot{\mathbf{i}}^T \mathbf{T}_{Q_S} \right) d\eta \quad (14)$$

$$dS_{AL_i} = \frac{1}{2} C_m \mu_{AL_i}(\eta) \left(\dot{\mathbf{i}}^T \mathbf{T}_{Q_L} \cdot \dot{\mathbf{i}}^T \mathbf{T}_{Q_L} \right) d\eta \quad (15)$$

$$dS_{AS_i} = \frac{1}{2} C_m \mu_{AS_i}(\eta) \left(\dot{\mathbf{i}}^T \mathbf{T}_{Q_S} \cdot \dot{\mathbf{i}}^T \mathbf{T}_{Q_S} \right) d\eta \quad (16)$$

$$S_{P_i} = \frac{1}{2} M_{m_i} \left(\dot{\mathbf{i}}^T \mathbf{T}_{O_{i+1}} \cdot \dot{\mathbf{i}}^T \mathbf{T}_{O_{i+1}} \right) \quad (17)$$

که در آن، μ_i مقدار جرم واحد طول، μ_{A_i} نیز جرم حجمی واحد طول با در نظر گرفتن چگالی سیالی که لینک و غلاف بازوی رباتیکی را فرا گرفته است می باشند. M_{m_i} نیز جرم موتورهای مفصل دورانی و کشویی i ام بازوی رباتیکی که در محل دستگاه مختصات $i+1$ ام قرار گرفته است، را بیان می نماید. همچنین C_m ضریب هیدرودینامیکی جرم و ممان اینرسی افزوده می باشد. در ادامه با انتگرال گیری در طول هر لینک و همچنین جمع مقادیر بدست آمده برای هر لینک تابع گیبس کل سیستم محاسبه می شود.

$$S = \sum_{i=1}^n \left(\int_0^{L_i} dS_{S_i} + \int_{L_i}^{L_i+L_i} dS_{L_i} + \int_{L_i}^{L_i+L_i} dS_{AL_i} + \int_0^{L_i} dS_{AS_i} + S_{P_{i+1}} \right) \quad (18)$$

- انرژی پتانسیل بازوی رباتیکی در درون سیال

برای محاسبه ی انرژی پتانسیل، اثر دو منبع محاسبه می شود: ۱- انرژی پتانسیل به واسطه جاذبه زمین ۲- انرژی پتانسیل ناشی از نیروی شناوری.

با توجه به تقارن موجود در ساختار بازوهای رباتیکی، اثر گرانش و شناوری با استفاده از اعمال شتاب به پایه ثابت ربات معادل با رابطه (۱۲) که برای نیروی شناوری معادل $\left(\frac{\rho \nabla_i}{m_i} g \right)$ و برای شتاب گرانش معادل g ، در نظر گرفته می شوند. هر دو در راستای محور Z دستگاه مختصات مرجع XYZ اعمال می گردند.

- تابع استهلاک ریلی بازوی رباتیکی در درون سیال

در سیستم های دینامیکی، نیروهای ناپایستار از جمله نیروهایی هستند که موجب تحلیل انرژی سیستم می شوند. در هنگام استفاده از بازوهای رباتیکی در درون سیال نیروهای درگ

همراه بردار ورودی‌های گشتاور Γ مقادیر سمت راست معادله‌ی دینامیک مستقیم می‌باشند.

$$I(\theta, \dot{\theta})\ddot{\theta} = Re(\theta, \dot{\theta}) + \Gamma \quad (23)$$

درایه‌های ماتریس اینرسی مشتمل بر جملاتی است که برحسب متغیرهای سینماتیکی لینک‌های قبل نوشته شده‌اند (فرم بازگشتی). در ادامه می‌بایست این مقادیر برحسب جملاتی که مشتمل بر شبه شتاب‌های تعمیم‌یافته هستند، تفکیک گردند. حاصل این تفکیک، مقادیری هستند که می‌بایست از فرم بازگشتی خارج و به صورت حاصل جمع بازنویسی شوند. از نتایج به دست آمده نسبت به شبه شتاب‌های تعمیم‌یافته مشتق گرفته تا در درایه‌های ماتریس اینرسی جایگزین گردند. بدین ترتیب از قرارگرفتن معادلات به دست آمده در ماتریس اینرسی و همچنین در ماتریس نیروها و جملات باقی‌مانده (معادله ۲۳)، معادله‌ی نهایی حرکت بصورت معادله‌ی (۲۴) حاصل می‌شود.

$$\begin{bmatrix} I_{11} & \dots & I_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{n1} & \dots & I_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \vdots \\ \ddot{\theta}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Re_1 \\ \vdots \\ Re_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_1 \\ \vdots \\ \Gamma_n \end{bmatrix} \quad (24)$$

که در آن I_{ij} درایه‌های ماتریس اینرسی، Re_i درایه‌های ماتریس نیروها و مقادیر باقی‌مانده و Γ_i درایه‌های بردار گشتاور اعمالی می‌باشند. بر این اساس و با در نظر گرفتن متغیرهای تعمیم‌یافته‌ی تغییر طول و همچنین تغییر زاویه، معادلات دینامیک مستقیم و معکوس بدست می‌آیند.

۴- شبیه‌سازی عددی و تحلیل نتایج

در این قسمت شبیه‌سازی کامپیوتری برای یک ربات دو لینکی با ساختار متغیر با زمان مورد توجه قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی برای سه حالت مختلف: الف) مقایسه محیط آب با هوا، ب) مقایسه در سطح مقطع‌های مختلف لینک و ج) مقایسه بر اساس اثر نیروهای هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی صورت می‌پذیرد. شکل ۳ نمایشی از ربات دو لینکی ساختار متغیر را نمایش می‌دهد. شبیه‌سازی‌های در نظر گرفته شده در این بخش به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شده‌اند که ربات از حالت سکون و بر اساس اثر گشتاور و نیروهای اعمال شده به مفاصل ربات به مدت ۱۵ ثانیه شروع به حرکت می‌نماید.

مقادیر نیروها و گشتاورهای اعمالی در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند. شرایط اولیه آن نیز عبارت است از:

$$\theta_1 = \theta_2 = \dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = \dot{l}_1 = \dot{l}_2 = 0; l_1 = l_2 = 0.5m \quad (25)$$

در جدول ۱ ویژگی‌های ساختاری ربات ارائه گردیده است.

و لیفت در ردیف نیروهای ناپایستار قرار می‌گیرند که در محاسبه‌ی تابع استهلاک ریلی لحاظ می‌شوند. برای محاسبه‌ی انرژی کاسته شده در تابع استهلاک ریلی می‌بایست کار نیروی درگ و لیفت محاسبه شود. استهلاک محاسبه شده بواسطه‌ی کار انجام شده توسط بازوی رباتیکی به منظور حرکت سیال اطراف لینک‌های ربات می‌باشد. از سوی دیگر می‌توان با محاسبه‌ی انرژی جنبشی سیال میزان تابع استهلاک ریلی را محاسبه نمود. بدین ترتیب تابع استهلاک ریلی ناشی از نیروهای درگ و لیفت عبارت است از:

$$D_{d_i}^d = \frac{1}{2} \left\{ \int_0^{L_i} \rho_s C_D d_{si} \eta_i ({}^i \dot{\mathbf{r}}_{Q_s}^T \cdot {}^i \dot{\mathbf{r}}_{Q_s}) d\eta_i + \int_{L_i}^{L_i+L_i} \rho_l C_D d_{li} \eta_i ({}^i \dot{\mathbf{r}}_{Q_l}^T \cdot {}^i \dot{\mathbf{r}}_{Q_l}) d\eta_i \right\} \quad (19)$$

$$D_{d_i}^L = \frac{1}{2} \left\{ \int_0^{L_i} \rho_s C_L d_{si} \eta_i ({}^i \dot{\mathbf{r}}_{Q_s}^T \cdot {}^i \dot{\mathbf{r}}_{Q_s}) d\eta_i + \int_{L_i}^{L_i+L_i} \rho_l C_L d_{li} \eta_i ({}^i \dot{\mathbf{r}}_{Q_l}^T \cdot {}^i \dot{\mathbf{r}}_{Q_l}) d\eta_i \right\} \quad (20)$$

که در آن C_D ضریب درگ و C_L ضریب لیفت می‌باشند. در ادامه با جمع مقادیر بدست آمده برای هر لینک تابع استهلاک ریلی کل سیستم قابل محاسبه می‌باشد.

$$\begin{aligned} D_d &= \sum_{i=1}^n (D_{d_i}^L + D_{d_i}^d) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} \left\{ \int_0^{L_i} \rho_s (C_D + C_L) d_{si} \eta_i ({}^i \dot{\mathbf{r}}_Q^T \cdot {}^i \dot{\mathbf{r}}_Q) d\eta_i + \int_{L_i}^{L_i+L_i} \rho_l (C_D + C_L) d_{li} \eta_i ({}^i \dot{\mathbf{r}}_Q^T \cdot {}^i \dot{\mathbf{r}}_Q) d\eta_i \right\} \right) \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} (W_{0i}) {}^i \dot{\mathbf{r}}_{O_i}^T {}^i \dot{\mathbf{r}}_{O_i} + {}^i \dot{\mathbf{r}}_{O_i}^T {}^i W_{1i} - {}^i \dot{\mathbf{r}}_{O_i}^T W_{2i} {}^i \omega_i + \frac{1}{2} W_{3i} + \frac{1}{2} {}^i \omega_i^T (W_{4i}) {}^i \omega_i \right) \end{aligned} \quad (21)$$

استخراج معادلات دینامیک معکوس بازوی رباتیکی در درون سیال

فرم دینامیک معکوس فرمولاسیون گیبس- اپل بازگشتی مطابق معادله‌ی (۲۲) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\frac{\partial S}{\partial \theta_j} + \frac{\partial D_d}{\partial \theta_j} + \frac{\partial V}{\partial \theta_j} = \tau_j \quad j = 1, \dots, n \quad (22)$$

که در آن τ بردار گشتاورهای موتورهای مفاصل دورانی و کشویی ربات می‌باشند. برای تشکیل ترم‌های معادله‌ی (۲۲) مشتق‌گیری از مقادیر اسکالر بدست آمده صورت می‌پذیرد.

استخراج معادلات دینامیک مستقیم بازوی رباتیکی در درون سیال

فرم کلی معادلات دینامیک مستقیم، بدین صورت است که جملاتی که تابع مشتق دوم مختصات‌های تعمیم‌یافته هستند، در سمت چپ به همراه ضرایب متناظر آن‌ها قرار می‌گیرند و تشکیل ماتریس اینرسی $(I(\theta, \dot{\theta}))$ سیستم را می‌دهند. سایر جملات به سمت راست منتقل شده و تشکیل بردار نیروها و جملات باقی‌مانده را می‌دهند. بدین ترتیب بردار $Re(\theta, \dot{\theta})$ به

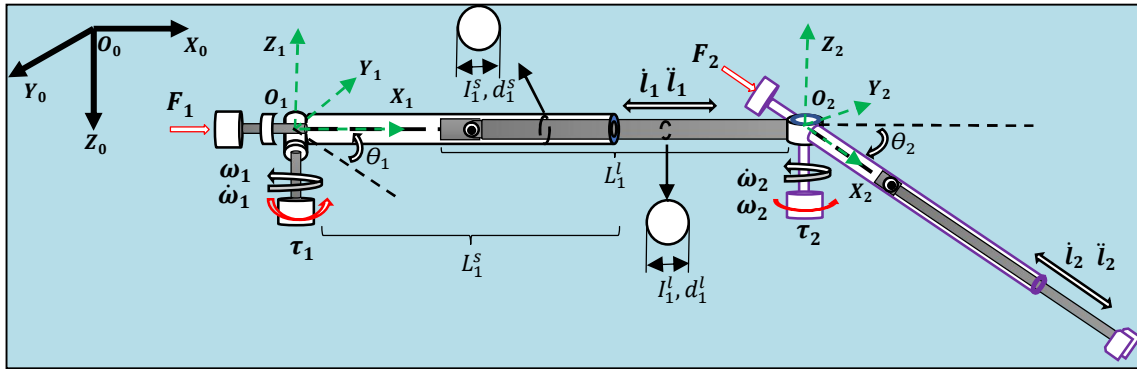


Fig. 3 Two-links manipulator with time variable structure in fluid medium

شکل ۳ بازوی رباتیکی دو لینکی با ساختار متغیر با زمان در محیط سیال

شکل ۵ سرعت زاویه‌ای مفاصل دورانی ربات را در دو محیط هوا و آب نمایش می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که با قرارگرفتن ربات در درون آب دامنه‌ی تغییرات سرعت بواسطه‌ی نیروهای مقاوم کاهش‌یافته و همچنین ارتعاشی و ناپایدار می‌گردد که این موضوع بواسطه‌ی غیرخطی بودن این نیروها می‌باشد.

در شکل ۶ سرعت خطی مفاصل کشویی ربات نمایش داده شده‌اند. مطابق تفاوت بیان شده در خصوص محیط آب و هوا، نیروهای مقاوم ناشی از برهمکنش سیال و لینک‌های ربات سبب می‌گردد لینک‌ها با سرعت ثابت حرکت کنند. این موضوع ناشی از عکس‌العمل مقاوم در برابر حرکت خطی ربات می‌باشد. در شکل ۷ سرعت حرکت پنجه‌ی لینک‌های ربات رسم شده است. در این شکل حرکت در محیط آب موج گردیده ماکزیمم سرعت به‌صورت تقریبی تا ۳۰٪ سرعت در محیط هوا کاهش یابد. این در حالی است که حرکت در درون آب حرکت آزاد پنجه‌ی ربات را میرا می‌نماید. همچنین همان‌طور که در شکل ۶ به آن اشاره شده، دامنه‌ی سرعت خطی نیز محدود می‌گردد.

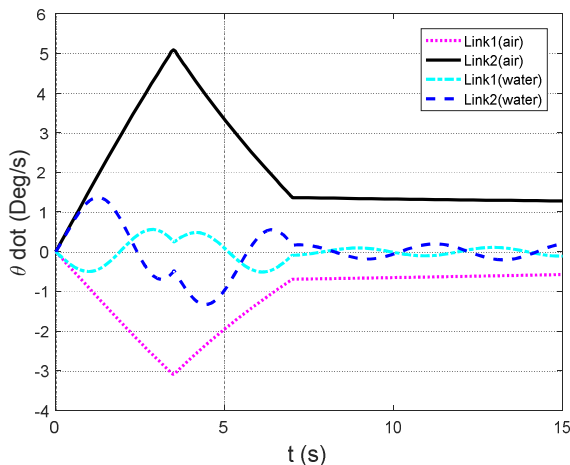


Fig. 5 The revolute joints angular velocity

شکل ۵ سرعت زاویه‌ای مفاصل دورانی

۴-۱- شبیه‌سازی در دو محیط هوا و آب

در این حالت، ربات ساختار متغیر در دو فضای محیط آب و هوا قرار گرفته و بر اساس مشخصات جدول ۱ و همچنین ورودی‌های نمایش‌داده‌شده در شکل ۴ در شرایط عملکردی مشابه مورد ارزیابی واقع می‌گردد.

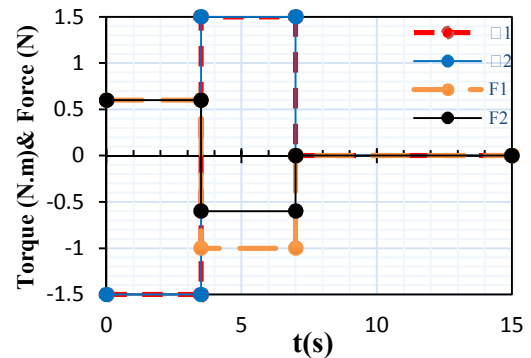


Fig. 4 The joints input torques and Forces

شکل ۴ نیروها و گشتاورهای اعمالی به مفاصل

جدول ۱ مشخصات مکانیکی بازوی رباتیکی دو لینکی ساختار متغیر

Table 1 Specifications of two-links manipulator with variable structure

پارامتر	تعریف	واحد	مقدار
$L_1^s = L_2^s$	طول غلاف مفصل کشویی	m	۱/۲
$L_1^l = L_2^l$	طول لینک ربات	m	۱
$r_1^s = r_2^s$	شعاع غلاف مفصل کشویی	mm	۸
$r_1^l = r_2^l$	شعاع لینک ربات	mm	۵
$\mu_1^l = \mu_2^l$	جرم واحد طول لینک	Kg/m	۳۰/۸۳
$\mu_1^s = \mu_2^s$	جرم واحد طول غلاف	Kg/m	۹۹/۰۲
$\rho_1^l = \rho_2^l$	چگالی لینک	Kg/m ³	۷۸۵۰
$\rho_1^s = \rho_2^s$	چگالی غلاف	Kg/m ³	۹۸۵۰
C_m	ضریب هیدرودینامیکی جرم	---	۲
C_l	ضریب لیفت	---	۰/۱
C_d	ضریب درگ	---	۱/۲
ρ_w	چگالی آب	Kg/m	۹۹۷
g	شتاب گرانش	m/s ²	۱۰

کشویی نمایش داده شده است. مطابق توضیحات ارائه شده بواسطه‌ی تغییر سطح مقطع لینک‌های ربات، میزان نیروهای مقاوم خطی و همچنین برهم‌کنش میان سیال و لینک‌ها تغییر می‌نماید. این تغییر موجب کاهش جابه‌جایی خطی مفصل کشویی با افزایش سطح مقطع لینک‌های ربات می‌گردد. اگرچه میزان آن در لینک دوم بواسطه‌ی تماس آزاد با آب بیشتر می‌باشد.

در شکل ۱۰ مسیر حرکت پنجه‌های لینک‌های ربات نمایش داده شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است، تأثیر تفاوت سطح مقطع لینک‌ها در مسیر حرکت پنجه‌ی لینک دوم بیشتر از پنجه‌ی لینک اول قابل‌مشاهده می‌باشد. لازم بذکر است اثر دامنه‌ی حرکت لینک اول در حرکت لینک دوم مؤثر بوده و بخشی از تفاوت مسیر ایجاد شده ناشی از این موضوع می‌باشد.

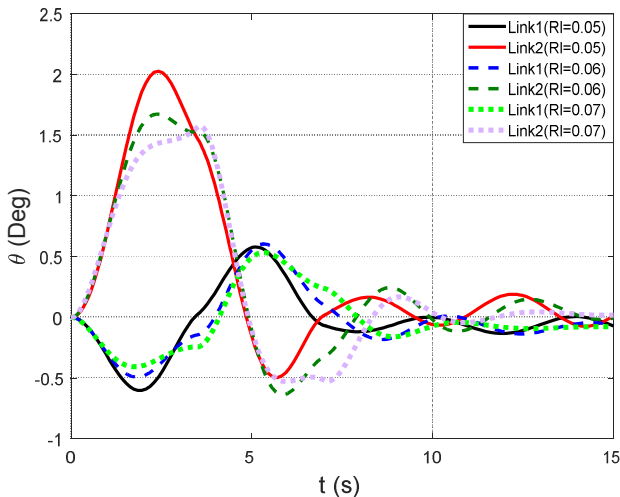


Fig. 8 The revolute joints rotations

شکل ۸ تغییر زاویه‌ی مفاصل دورانی

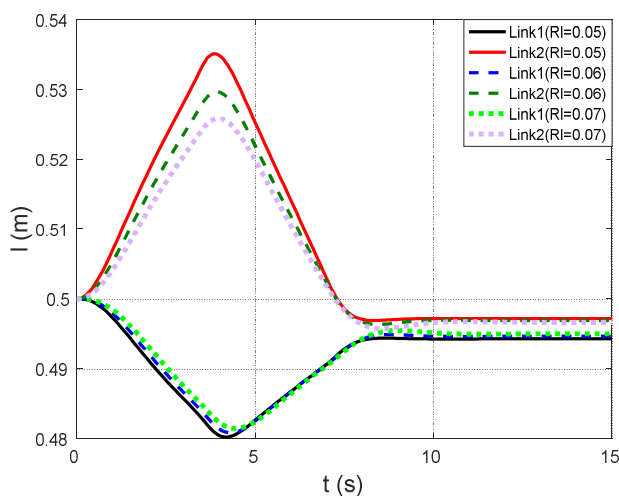


Fig. 9 The prismatic joints link's length variation

شکل ۹ تغییر طول لینک‌های ربات

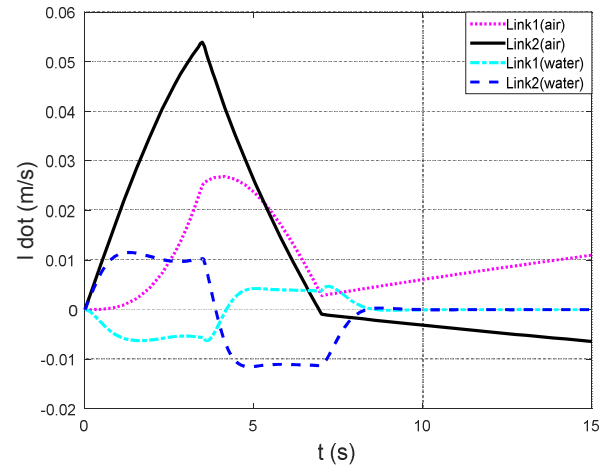


Fig. 6 The prismatic joints axial velocity

شکل ۶ سرعت خطی مفاصل کشویی

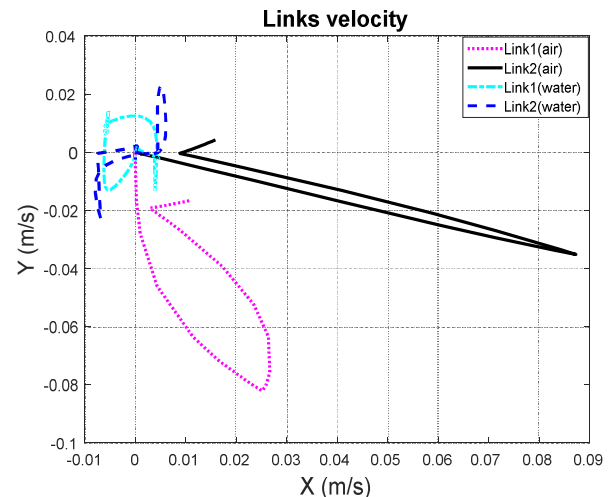


Fig. 7 The endpoint velocity of links in plane

شکل ۷ سرعت حرکت پنجه لینک‌های ربات در صفحه

۴-۲- شبیه‌سازی با فرض سطح مقطع‌های متفاوت لینک در آب

در این حالت، تغییرات سطح مقطع لینک‌های ربات ساختار متغیر در محیط آب بررسی گردیده و نتایج آن ارائه می‌شود. برای این منظور شعاع لینک ربات در سه حالت ۰/۰۵، ۰/۰۶ و ۰/۰۷ متر در نظر گرفته می‌شود.

در شکل ۸ میزان تغییر زاویه‌ی مفاصل دورانی ربات نمایش داده شده است. همان‌طور که از نتایج به دست آمده مشخص است، میزان تفاوت تغییرات بواسطه‌ی سطح مقطع لینک‌های ربات ناچیز می‌باشد.

این بدان معنی است که اختلاف حرکت دورانی رخ داده ناشی از تفاوت وزن لینک‌های ربات می‌باشد. اگرچه اثر این تفاوت بر لینک دوم بیشتر از لینک اول است. در شکل ۹ میزان تغییرات طولی لینک‌های ربات بواسطه‌ی حرکت خطی مفاصل

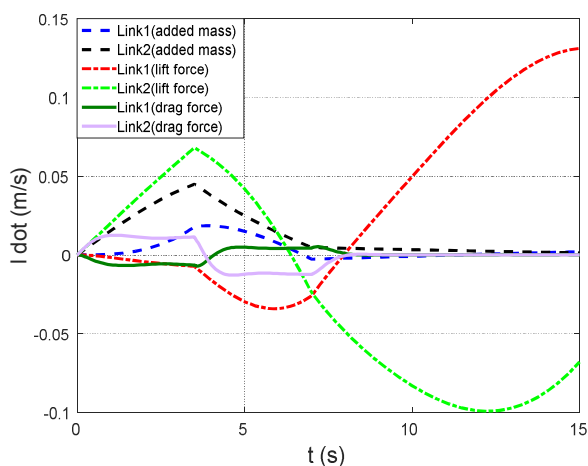


Fig. 12 The prismatic joints axial velocity

شکل ۱۲ سرعت خطی مفاصل کشویی

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات آینده

در این تحقیق مدل دینامیکی یک سیستم رباتیکی با ساختار متغیر با زمان در شرایطی محیطی سیال استخراج شده است. ساختار متغیر با زمان پیشنهادی، با استفاده از مفاصل دورانی-کشویی فراهم گردیده است. این ساختار موجب می‌گردد فضای کار ربات در شرایط مشابه و در مقایسه با مفاصل دورانی و همچنین کشویی، افزایش پیدا کرده و بتوان از آن در فضای کار گسترده‌تری استفاده نمود. اگرچه تغییر طول لینک‌های ربات در درون سیال و نیروی مقاوم اعمالی از طرف سیال موجب می‌گردد، نیروی بیشتری به‌منظور برنامه‌ریزی حرکت آن موردنیاز باشد. این در حالی است که تغییر طول لینک‌های ربات بوسیله‌ی مفاصل کشویی، علاوه بر مقاومت در برابر حرکت خطی در حرکت دورانی نیز به‌واسطه لینک‌های بلندتر نیاز به گشتاور موتورها را برای حرکت افزایش می‌دهد. این موضوع از آن نظر حائز اهمیت است که استخراج مدل دینامیکی با دقت مناسب وابسته به مدل‌سازی برهم‌کنش نیروهای میان سیال و لینک‌های ربات می‌باشد. برای استخراج معادلات حرکت در این مقاله از فرمولاسیون گیبس-پل بازگشتی استفاده شده است. برهم‌کنش دینامیکی میان سیال و لینک‌های ربات در قالب اثر جرم افزوده، نیروهای درگ و لیفت در راستاهای حرکت و همچنین نیروی شناوری محاسبه می‌گردد. از نتایج به دست آمده که با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی گردیده‌اند، مشخص می‌گردد که براساس انتظار موجود، دامنه‌ی حرکت پنجه‌ی ربات در محیط آب به نسبت هوا به میزان ۶۰ درصد کاهش می‌یابد. این میزان تغییر در حرکت ربات بواسطه نیروهای مقاوم مورد اشاره می‌باشد که در مقایسه اثرات نیروهای برهم‌کنش میان سیال و

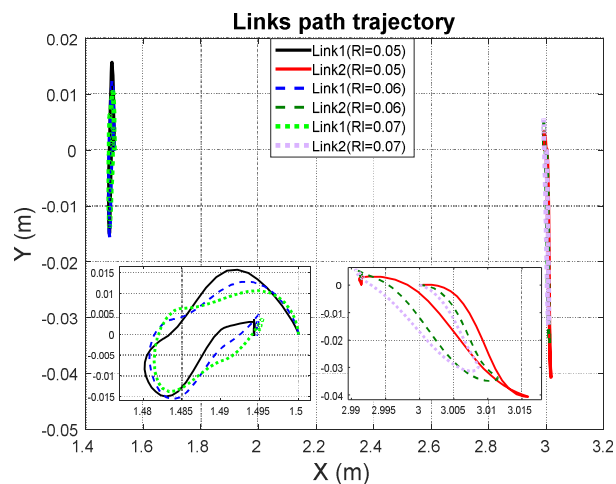


Fig. 10 The path of links endpoint

شکل ۱۰ مسیر حرکت پنجه لینک‌های ربات در صفحه

۴-۳- شبیه‌سازی نیروهای هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی

در این حالت، اثر هر یک از نیروهای هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی به‌صورت مجزا برای عملکرد ربات در نظر گرفته می‌شود و نتایج حاصل بررسی می‌گردد.

در شکل ۱۱ سرعت زاویه‌ای مفاصل دورانی ارائه شده است. نتایج بیان می‌نمایند که اثر نیروهای درگ بر حرکت دورانی ربات محسوس‌تر می‌باشند. این در حالی است که رفتار سیستم در اثر آن نیز ناپایدار گردیده است. از سوی دیگر در مقایسه با شکل ۵ نیروهای لیفت نیز سبب ناپایداری سیستم گردیده‌اند. از بررسی نیروهای ناشی از اثر جرم‌افزوده نیز این موضوع مشخص می‌شود که عملکرد سیستم به‌صورت خطی تغییر نموده است.

در شکل ۱۲ نیز مشابه آنچه در خصوص شکل ۱۱ بیان گردید، نیروهای لیفت سبب ناپایدار شدن رفتار سیستم در حرکت خطی نیز می‌گردند. از جهت دیگر نیز بیشترین تأثیر در نیروهای درگ می‌باشد. در این حالت رفتار سیستم در مقایسه با شکل ۶ ناپایدار گردیده است.

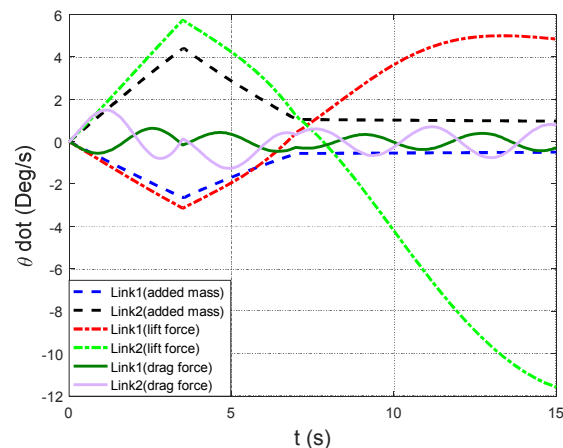


Fig. 11 The revolute joints angular velocity

شکل ۱۱ سرعت زاویه‌ای مفاصل دورانی

- 153, pp. 122–131, Apr. 2018.
- [6] S. Zhou, C. Shen, Y. Xia, Z. Chen, and S. Zhu, Adaptive robust control design for underwater multi-DoF hydraulic manipulator, *Ocean Eng.*, Vol. 248, p. 110822, Mar. 2022.
- [7] S. F. Dehkordi, Dynamic analysis of flexible-link manipulator in underwater applications using Gibbs-Appell formulations, *Ocean Eng.*, Vol. 241, p. 110057, Dec. 2021.
- [8] M. H. Korayem, S. F. Dehkordi, M. Mojarradi, and P. Monfared, Analytical and experimental investigation of the dynamic behavior of a revolute-prismatic manipulator with N flexible links and hubs, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Apr. 2019.
- [9] M. H. Korayem, S. F. Dehkordi, and O. Mehrjooee, Nonlinear analysis of open-chain flexible manipulator with time-dependent structure, *Adv. Sp. Res.*, Vol. 69, No. 2, pp. 1027–1049, Jan. 2022.
- [10] E. Karamipour, S. F. Dehkordi, and M. H. Korayem, Reconfigurable Mobile Robot with Adjustable Width and Length: Conceptual Design, Motion Equations and Simulation, *J. Intell. Robot. Syst.*, Vol. 99, No. 3–4, pp. 797–814, Sep. 2020.
- [11] H. Huang, G. Tang, H. Chen, L. Han, and D. Xie, Dynamic Modeling and Vibration Suppression for Two-link Underwater Flexible Manipulators, *IEEE Access*, pp. 1–1, 2022.
- [12] A. K. Sharma and S. K. Saha, Simplified Drag Modeling for the Dynamics of an Underwater Manipulator, *IEEE J. Ocean. Eng.*, Vol. 46, No. 1, pp. 40–55, Jan. 2021.
- [13] H. Yan *et al.*, Dynamics and stability of an extending beam attached to an axially moving base immersed in dense fluid, *J. Sound Vib.*, Vol. 383, pp. 364–383, Nov. 2016.
- [14] B. Lévesque and M. J. Richard, Dynamic Analysis of a Manipulator in a Fluid Environment, *Int. J. Rob. Res.*, Vol. 13, No. 3, pp. 221–231, Jun. 1994.
- [15] M. Aghajari, S. Fathollahi Dehkordi, and M. H. Korayem, Nonlinear dynamic analysis of the extended telescopic joints manipulator with flexible links, *Arab. J. Sci. Eng.*, Vol. 46, No. 8, pp. 7909–7928, Aug. 2021.
- [16] A. A. Yusof, F. Wasbari, and M. Q. Ibrahim, Research Development of Energy Efficient Water Hydraulics Manipulator for Underwater Application, *Appl. Mech. Mater.*, Vol. 393, pp. 723–728, Sep. 2013.
- [17] J. Zhang *et al.*, Development of a Virtual Platform for Telepresence Control of an Underwater Manipulator Mounted on a Submersible Vehicle, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 64, No. 2, pp. 1716–1727, Feb. 2017.
- لینک‌های ربات، میزان اثرپذیری حرکت ربات از نیروی درگ از سایر نیروهای مقاوم بیشتر می‌باشد. اگرچه نیروی لیفت نیز موجب ایجاد ناپایداری در حرکت ربات و بوجود آمدن اغتشاش ناشی از دینامیک غیرخطی می‌گردد. با استفاده از نتایج حاصل از تغییر سطح مقطع لینک‌های ربات نیز این موضوع مشخص می‌گردد که با افزایش سطح مقطع لینک‌های ربات، میزان نیروی مقاوم درگ در حرکت خطی نیز افزایش یافته و در نتیجه دامنه‌ی حرکت در شرایط برابر کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن تحلیل‌های ارائه شده این امر استنتاج می‌گردد که مدل ارائه شده بیان درستی از رفتار سیستم ربات بازوئی با ساختار متغیر با زمان ارائه می‌دهد. همچنین ساختار پیشنهاد شده محدودیت‌های قبلی را مرتفع نموده و موجب افزایش فضای کار ربات می‌گردد.
- با در نظر گرفتن نتایج معادلات بدست آمده و همچنین شبیه‌سازی صورت گرفته بعنوان تحقیقات آینده می‌توان به ضرورت انجام موارد ذیل اشاره نمود:
- الف) در نظر گرفتن مدل دینامیکی مفاصل بواسطه‌ی اثرات نوسانی ناشی از حرکت ربات در درون سیال؛
- ب) در نظر گرفتن اثر الاستیسیته لینک‌های ربات بمنظور افزایش دقت مدل بدست آمده؛
- ج) محاسبه ظرفیت بار دینامیکی برای حرکت در مسیر مشخص و همچنین بین دو نقطه مشخص؛
- د) بررسی نحوه تأمین و همچنین میزان مصرف انرژی؛

۶- مراجع

- [1] *Underwater Robots – 2nd Edition*, Vol. 2. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [2] S. Sivčev, J. Coleman, E. Omerdić, G. Dooly, and D. Toal, Underwater manipulators: A review, *Ocean Eng.*, Vol. 163, pp. 431–450, Sep. 2018.
- [3] W.-S. Chu *et al.*, “Review of biomimetic underwater robots using smart actuators, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 7, pp. 1281–1292, Jul. 2012.
- [4] J. Long, Y. Tian, W. Chen, J. Leng, and Y. Wang, Locating, trajectory planning and control of an underwater propeller cleaning manipulator, *Ocean Eng.*, Vol. 243, p. 110262, Jan. 2022.
- [5] W. Kolodziejczyk, The method of determination of transient hydrodynamic coefficients for a single DOF underwater manipulator, *Ocean Eng.*, Vol.