

کنترل مسیر خودکار میکرو زیردریایی ۳ درجه آزادی با الهام از حرکت کوسه‌ماهی

عبدالرسول میاهی^۱، عقیل یوسفی کما*^۱، علی رنگین کمان^۱ و حسام ملکی^۱

^۱دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۶/۲/۱۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۲/۵، تاریخ تصویب ۸۸/۳/۱)

این مقاله، به بحث درباره کنترل یک میکروزیردریایی که با الهام از حرکت کوسه‌ماهی طراحی و ساخته شده است، می‌پردازد. مراحل طراحی شامل طراحی مفهومی، طراحی مکانیزم‌های حرکتی، شبیه‌سازی سازه‌ای در نرم‌افزار ADAMS و آنالیز هیدرودینامیکی در نرم‌افزار FLUENT می‌شود. همچنین مدل ریاضی حرکت کوسه‌ماهی نیز استخراج شد. پس از ساخت زیردریایی، مراحل آزمایش با هدف ثبت داده‌های آزمایش برای استخراج تابع تبدیل انجام گرفت. با آزمایش میکروزیردریایی و ثبت داده‌های مربوط به زمان، فرکانس حرکت و موقعیت زیردریایی در هر لحظه، شناسایی سیستم و استخراج تابع تبدیل انجام گرفت. به کمک روش دوم زیگلر-نیکولز حدود ضرایب کنترلر PID استخراج شد. سه سنسور نوری فاصله‌سنج نیز روی زیردریایی نصب شد که به عنوان عکس‌العمل در سیستم کنترلی حلقه بسته عمل می‌کند. سرانجام پس از اعمال کنترلر، زیردریایی قادر به حفظ پایداری در یک باند ۲۰ سانتی‌متری و در یک فاصله ۱۰ سانتی‌متری از دیواره شد.

: میکروزیردریایی، MUV، کنترل خودکار، PID، روبات ماهی

به طور بهینه عمل نمی‌کنند و نیروی thrust مفید برای پیشروی را فراهم نمی‌آورند [۳] و [۴]. همچنین زیردریایی‌ها به دلیل وجود فرکانس منتشره حاصل از چرخش پروانه پیشران آنها و نیز تشکیل حباب‌های هوای ناشی از پدیده کاویتاسیون که حاصل برخورد پروانه با آب در سرعت‌های بالا است، شناسایی می‌شوند [۵] (شکل ۱).



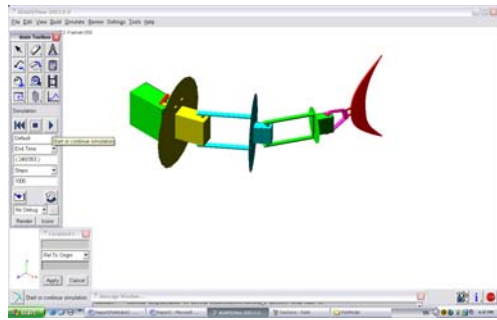
شکل ۱: پره‌های توربین هنگام چرخش در آب تولید حباب می‌کند [۴].

به عنوان راه حل، استفاده از سیستم‌های پیشرانی که ماهی‌ها برای حرکت و مانوردهی از آنها استفاده می‌کنند، مفید به نظر رسید.

در همین راستا و برای شناخت دقیق و در دست داشتن اطلاعات دقیق از نحوه حرکت ماهی‌ها، مطالعاتی پایه‌ای روی عملکرد حرکتی ماهیان انجام گرفت. در واقع

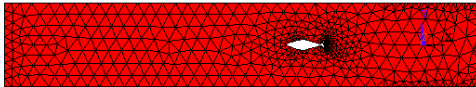
پیشرفت در راستای استفاده از سیستم‌های بدون سرنشین اعم از سیستم‌های هوایی، زمینی و یا دریایی، امکان تسلطی دقیق و کم هزینه است که در اختیار نیروهای نظامی در سراسر جهان وجود دارد [۱]. هدف از انجام این پروژه، طراحی، ساخت، کنترل خودکار، هدایت و آنالیز نوع جدیدی از انواع زیردریایی‌های بدون سرنشین Unmanned Underwater Vehicle (UUV) است که از نظر اندازه بسیار کوچک بوده و با سرعت‌های پیشروی متوسط حرکت می‌کنند. این نوع زیردریایی‌ها را، میکرو زیردریایی Micro Underwater Vehicle (MUV) می‌نامند. هدف در این پروژه، طراحی MUVهایی بدون ردیابی، با قدرت مانور بالا، سبک، با مصرف انرژی پایین و چند منظوره است. با وجود اینکه تحقیقات وسیعی در زمینه MUVها انجام گرفته است، این موضوع همچنان به عنوان یک موضوع پرتطرفدار تحقیقاتی در مراکز علمی و صنعتی دنیا در حال بررسی است [۲].

به طور تقریبی همه زیردریایی‌ها از یک پروانه که به موتور متصل شده است، برای پیشروی استفاده می‌کند. با مطالعاتی که انجام شده است، ثابت شده که این پروانه‌ها



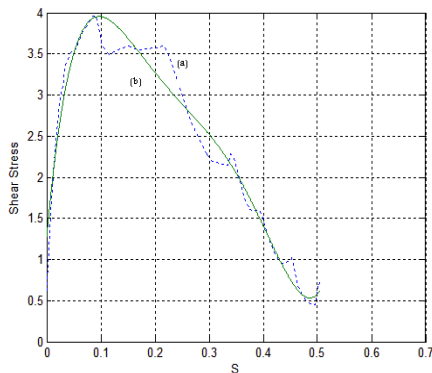
شکل ۴: فرآیند simulation (فرم Render).

محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر میکروزیردریایی از آن نظراهمیت می‌یابد که با دانستن این نیروها، دید درستی در طراحی نیروی محرکه میکرو زیردریایی‌ها به دست می‌آید [۸]. برای بررسی عددی نیروهای وارد بر ماهی، از روش اجزای محدود و نرم‌افزار Ansys استفاده شد (شکل ۵).



شکل ۵: مدل‌سازی در ANSYS.

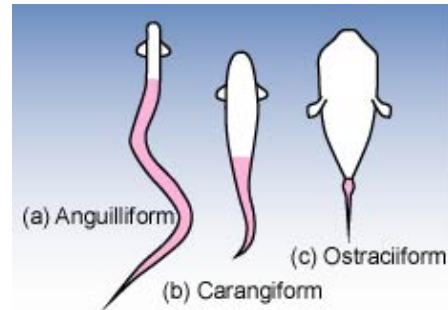
با توسعه نرم‌افزار، مسئله برای دو حالت، یکی ماهی ساکن و سیال متحرک و دیگری سیال ساکن و ماهی متحرک حل و این دو حالت با هم مقایسه شد. در نهایت در شکل (۶) نشان داده شد که نیروها در این دو حالت برای جسمی شبیه به ماهی تفاوت چندانی نمی‌کند و می‌توان نتایج را با فرض ماهی ساکن به دست آورد و به کار برد.



شکل ۶: تنش برشی بر حسب فاصله از نوک ماهی (a) ماهی متحرک (b) ثابت.

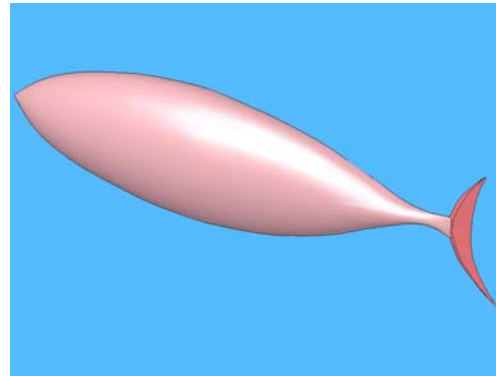
تأثیر اندازه باله‌ها، نوع پوشش، محل قرارگیری باله‌ها و تقابلات بین بدن ماهی و سیال اطراف آن، که محیط اصلی مانور یک ماهی است، بررسی شد.

از میان این مطالعات، تصمیم گرفته شد از حرکت کوسه‌ماهی مدل‌سازی شود. کوسه‌ماهی در طبقه‌بندی حرکت ماهیان در دسته ماهیان carangiform قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (۲) ملاحظه می‌شود، این ماهیان از دم و قسمت انتهایی بدن خود برای پیشروی بهره می‌گیرند [۲].



شکل ۲: اندام‌شناسی انواع ماهیان [۶].

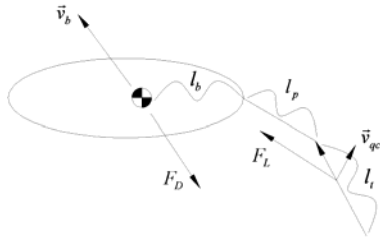
طراحی در این قسمت، مدل‌سازی سازه را در بر می‌گیرد که شامل مدل‌سازی کلی (شکل ۳) و تعیین ساختار اصلی روبات و مدل‌سازی مکانیزم‌های حرکتی و اجزای صلب است [۷].



شکل ۳: مدل solid ماهی.

از نرم‌افزار ADAMS برای مدل‌سازی استفاده شده است. از آنجا که مدل‌سازی مراحل طولانی را طی کرده است، در اینجا به سراغ مراحل نهایی مدل‌سازی می‌رویم که در شکل (۴) نمایش داده شده است.

می‌شود، h ارتفاع صفحه، a اختلاف فاصله بین مرکز جرم و مرکز ثقل است. مقدار عامل S که از $l/2 + a$ تا $l/2 - a$ متغیر است و بردار واحد e_1 نیز در واقع جهت مثبت محور است که نسبت به بدنه ثابت سنجیده می‌شود.



شکل ۸: مدل ایده‌آل ماهی [۱۲].

همان‌طور که در شکل (۸) می‌بینید، در مدل ایده‌آل فرض شده است فاصله بین مرکز جرم بدنه و قسمت میانی با l_b نمایش داده شود. l_p نیز متعلق به طول میانی است و دم نیز طولی به اندازه l_t و سطح مقطع A دارد. \vec{e}_t را یک بردار واحد در جهت لبه جلویی هیدروفویل دم در نظر می‌گیریم که در محور مختصاتی که همراستا با محور اصلی بدنه ماهی است، قرار دارد.

$$\vec{e}_t = -(\cos(\theta_2), \sin(\theta_1), 0) \quad ()$$

بدنه ماهی دارای سرعت انتقالی لحظه‌ای $\dot{\vec{x}}$ و \dot{y} در راستای طولی و جانبی است. همچنین سرعت دورانی لحظه‌ای نیز با $\dot{\phi}$ نمایش داده می‌شود. \vec{v}_{qc} بیانگر سرعت است که به این شکل تعریف می‌شود:

$$\vec{v}_{qc} = \begin{pmatrix} \dot{x} - \dot{\phi}(l_p \sin(\theta_1) + (l_t/4) \sin(\theta_2)) \\ -\dot{\theta}_1 l_p \sin(\theta_1) - \dot{\theta}_2 (l_t/4) \sin(\theta_2) \\ \dot{y} + \dot{\phi}(l_p \cos(\theta_1) + (l_t/4) \cos(\theta_2)) \\ + \dot{\theta}_1 l_p \cos(\theta_1) + \dot{\theta}_2 (l_t/4) \cos(\theta_2) \\ 0 \end{pmatrix} \quad ()$$

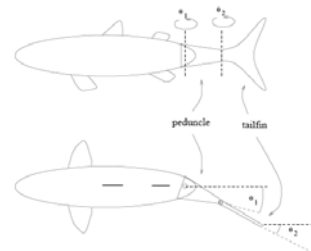
همان‌طور که دیده شد، سرعت از رابطه بالا به دست می‌آید. همچنین $\dot{\vec{x}}$ و \dot{y} نیز از سرعت بدنه در محور مختصات مرجع طبق روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \vec{v} \quad ()$$

در حالی که \vec{v} سرعت ماهی و یا زیردریایی در دستگاه مختصات محلی است، با استفاده از تئوری Kutta-Joukowski و با فرض اینکه جریان اطراف هیدروفویل دم به صورت پایدار است، نیروی لیفت روی هیدروفویل دم به این ترتیب محاسبه می‌شود [۱۳]:

مدل‌سازی زیردریایی در این بخش، مدل صفحه‌ای از یک ماهی carangiform است. این مدل در واقع یک مدل‌سازی ایده‌آل از یک مکانیزم سه لینیکی است. یک بدنه صلب در قسمت جلو، یک دم مثلثی شکل در قسمت انتهایی و یک قسمت بلند و باریک در قسمت وسط است که رابط سر و ته مکانیزم است. این سه لینک صلب توسط مفصل‌های چرخشی و با زاویه‌های θ_1 و θ_2 به هم متصل شده‌اند که با جهت‌یابی زیر مشخص می‌شود (شکل ۷) و نسبت به مختصات اصلی مرجع اندازه‌گیری می‌شود.

$$r = [\theta_1, \theta_2]^T \quad (۱)$$



شکل ۷: مدل ساده ماهی carangiform با سه لینک [۹].

نیروهای اصلی اعمال شده به سیستم نیز نیروهای لیفت و درگ هستند که روی بدنه اصلی زیردریایی اعمال می‌شوند. عمده نیروی لیفت ناشی از باله‌ها و نیروی درگ ناشی از بدنه است.

در خلال این مدل‌سازی، ساده‌سازی‌هایی نیز انجام گرفته است. از نیروی لیفت بدنه، نیروی درگ باله‌ها و نیروی اصطکاک روکش سیلیکون صرف‌نظر شده است. همچنین می‌توان از تأثیر سه‌بعدی مدل نیز صرف‌نظر کرد و حرکت را کاملاً "صفحه‌ای در نظر گرفت" [۱۰] و مدل‌سازی را دو بعدی انجام داد. با این تفاسیر و طبق مدلی که Mason در [۱۱] آورده است، نیروی درگ به این شکل به دست می‌آید:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_d h \int_{\frac{l}{2}-a}^{\frac{l}{2}+a} \zeta \|(a+s)e_1\| \zeta \|(a+s)e_1\| ds \quad (۲)$$

همچنین گشتاور مربوط به آن نیز این‌طور محاسبه می‌شود:

$$M_D = \frac{1}{2} \rho C_d h \int_{\frac{l}{2}-a}^{\frac{l}{2}+a} \zeta \|(a+s)e_1\| \times e_1 \zeta \|(a+s)e_1\| \times e_1 ds \quad (۳)$$

در حالی که ρ چگالی سیال، C_d ضریب درگ صفحه در حالتی که سرعت در راستای y محاسبه

روبات حرکت مستقیم‌روی یک خط نخواهد داشت، بنابراین:

$$u_1 = -A_1 \omega_1^2 \sin(\omega_1 t) \quad ()$$

$$u_2 = -A_2 \omega_2^2 \sin(\omega_2 t - \pi/2) \quad ()$$

که اینها معادلات نهایی توابع ورودی برای حرکت رو به جلو هستند. شرایط اولیه اعمال شده به سیستم نیز بدین ترتیب فرض شده‌اند:

$$\dot{\theta}_1(0) = -A_1 / \omega_1 \quad (15)$$

$$\dot{\theta}_2(0) = 0 \quad (16)$$

$$\theta_1(0) = 0 \quad (17)$$

$$\theta_2(0) = A_2 / \omega_2^2 \quad (18)$$

مدل‌سازی دینامیکی انجام شده در این پروژه که به تفصیل در بالا به آن اشاره شد، در حقیقت تلفیقی از معادلات ذکر شده در [۱۰] الی [۱۶] بود که تحت یک سری ساده‌سازی و کاهش مرتبه‌سازی قرار گرفته است، تا نیروهای لیفت و درگ به سادگی محاسبه شوند.

تعداد سه servomotor در این میکرو زیردریایی استفاده شده است. دو servomotor نقش تأمین‌کننده نیروی پیشران را بازی می‌کنند که یکی روی باله دم‌ی و دیگری روی مفصل تعبیه‌شده بر کمر روبات متصل شده است و یکی دیگر در سر آن جا سازی شده است که نقش محرک برای حرکت‌های بالا و پایین را بازی می‌کند. شکل نهایی سیستم ساخته شده در شکل ۹ قابل ملاحظه است. جنس باله‌ها از پلکسی گلاس و روکش آن سیلیکون است.



شکل ۹: مدل نهایی میکرو زیردریایی.

آزمایش میکرو زیردریایی‌های ساخته شده در این بخش، با هدف استخراج تابع تبدیل انجام گرفته است.

$$F_L = \pi \rho A (\vec{v}_{qc} \times \vec{e}_t) \times \vec{v}_{qc} \quad ()$$

منظور از اولین عامل در عبارت ارائه شده برای l ، لحاظ کردن مواردی است که زاویه حمله هیدروفویل بین $\pi/2$ و $3\pi/2$ است، یعنی مواردی که دنباله هیدروفویل، در واقع لبه جلویی خواهد بود.

در مدل‌سازی فرض بر این بوده است که حرکت زیردریایی تنها در راستای طولی انجام می‌گیرد. یعنی تنها مؤلفه طولی، X مقدار دارد و مقدار \dot{Y} و $\dot{\phi}$ صفر در نظر گرفته شده است و این فرضی است که در آزمایش‌ها نیز دخیل بوده است و بنا بر همین فرض، همه مدل‌سازی در این راستا انجام گرفته است. سرانجام نیز با اضافه کردن عامل جرم، مدل دینامیکی این زیردریایی یا روبات ماهی به این ترتیب استخراج می‌شود [۱۴]:

$$\begin{pmatrix} m\ddot{x} \\ m\ddot{y} \\ I\ddot{\phi} \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{L,x} + F_{D,x} \\ F_{L,y} + F_{D,y} \\ [x, y] \times [F_{L,x} + F_{L,y}] + M_D \\ u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

که عامل m جرم زیردریایی و I ممان اینرسی است. البته جرم کلی در قسمت ابتدایی، یا سر روبات ماهی فرض شده است و قسمت انتهایی و دم بدون جرم در نظر گرفته شده و از تغییرات ممان اینرسی نیز چشم‌پوشی شده است.

$F_{L,x}$ و $F_{L,y}$ نیز مؤلفه‌های نیروهای لیفت به ترتیب در راستاهای x و y هستند. با استناد به مدل دینامیکی (Morganson. et all. 2002) توابع سینوسی θ_1 و θ_2 به این شکل تعریف می‌شوند [۱۵]:

$$\theta_1 = A_1 \sin(\omega_1 t) \quad ()$$

$$\theta_2 = A_2 \cos(\omega_2 t) \quad (10)$$

و با دوبار مشتق‌گیری، مقادیر توابع ورودی برای حرکت مستقیم روی یک خط رو به جلو به شکل u_1 و u_2 قابل استخراج است.

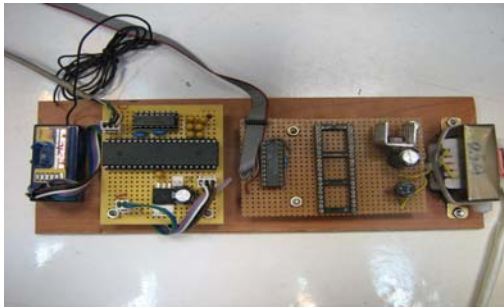
$$u_1 = -A_1 \omega_1^2 \sin(\omega_1 t) \quad ()$$

$$u_2 = -A_2 \omega_2^2 \cos(\omega_2 t) \quad ()$$

پس از انجام شبیه‌سازی کنترل در حالت حلقه باز، به این نتیجه می‌رسیم که اگر همین ورودی به روبات در حالت ساکن اعمال شود، از آنجا که حرکات اولیه بدون اعمال عکس‌العمل خطای جانبی متعادل نخواهد بود،

استفاده شد که شامل یک گیرنده رادیویی در همان فرکانس و یک برد میکروکنترلر است. وظیفه این سیستم، دریافت کپی اطلاعات ارسالی به میکرو زبردربایی و ارسال آن به کامپیوتر است (شکل ۱۰).

در کنترلر گیرنده از یک میکروکنترلر AVR استفاده شده و طوری برنامه‌ریزی شده است که پس از اندازه‌گیری، پهنای پالس هر یک از کانال‌ها، آنها را به صورت یک عدد سه رقمی و به شکل سریال، به چیپ مبدل RS232 تحویل دهد (شکل ۱۱).

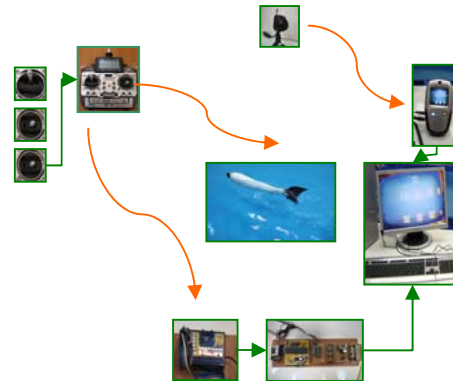


شکل ۱۱: برد رابط کامپیوتر و رادیو کنترلر.

برای ارتباط کامپیوتر با دیگر سیستم‌های خارجی به شکل سریال، پروتکلی به نام RS232 وجود دارد که در آن سطح ولتاژ سیگنال‌های ارسالی و دریافتی در بازه ولتاژی بالاتری قرار دارند. بدین معنی که حالت‌های ۰ و ۱ با سطح ولتاژ +۱۰ و -۱۰ ولت نمایش داده می‌شوند و این باعث نویزپذیری کمتر و امکان تبادل اطلاعات توسط کابل با فواصل بیشتری می‌شود. آی‌سی مبدل RS232، این وظیفه را بر عهده دارد که سطح ولتاژ ۰ تا ۵ ولت خروجی از میکرو کنترلر را به سطح ولتاژ +۱۰ و -۱۰ ولت تبدیل می‌کند. برنامه دریافت اطلاعات در کامپیوتر توسط Simulink تهیه شده است تا به شیوه ساده‌تری اطلاعات استخراج شده قابل ارزیابی و استفاده در محیط Matlab باشند. زمان نمونه‌برداری و اطلاعات و ارسال برای کامپیوتر ۰.۱ ثانیه انتخاب شده است. بدین ترتیب، زمانی که ماهی در حال حرکت است و سیستم‌های گیرنده و فرستنده فعال هستند، اطلاعات ارسالی و یا ورودی‌های سیستم همراه با برچسب‌های زمانی توسط کامپیوتر، دریافت و ثبت می‌شود. این اطلاعات در فایلی به صورت دیتا ذخیره می‌شوند تا پس از انجام آزمایش و نمونه‌برداری برای ارزیابی و شناسایی سیستم مورد استفاده قرار گیرند.

هدف اصلی، کنترل میکرو زبردربایی به طریق خودکار^۳ است. اطلاعاتی که در این قسمت به دست خواهد آمد، در طراحی کنترلر برای مرحله بعدی به کار خواهد آمد. برای شناسایی سیستم در این مرحله از اطلاعات ورودی و خروجی به سیستم استفاده می‌شود و به کمک آنها عوامل و تابع تبدیل سیستم تخمین زده می‌شود. اطلاعات ورودی به این سیستم، فرمان‌های صادر شده توسط اپراتور است. این اطلاعات به کمک ریموت کنترلر به زبردربایی (سیستم) ارسال می‌شود و پس از دریافت توسط گیرنده^۴ به کنترلر سیستم اعمال می‌شود. فرمان‌های اصلی که اپراتور در اختیار دارد تا بتواند سیستم را کنترل کند، شامل فرمان سرعت، فرمان چپ و راست رفتن و فرمان بالا و پایین است.

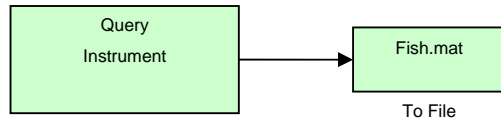
گیرنده این سیستم بسیار کوچک و کارآمد بوده و قابلیت دریافت اطلاعات از طریق ۶ کانال را دارد. فرمان‌های ارسالی از طرف فرستنده توسط کانال‌های ۱، ۲ و ۳ این گیرنده دریافت شده و پس از دی‌کد شدن به صورت ولتاژ خروجی در کانال‌ها ظاهر می‌شود. خروجی هر یک از کانال‌ها شکل موجی PWM^۵ است که اختصار عبارت Pulse With Modulation است که فرکانس این پالس 40HZ و پهنای پالس آن، بسته به مقدار ورودی به پهنای پالسی از 1msec تا 2msec تبدیل می‌شود.



شکل ۱۰: مجموعه آماده شده برای آزمایش.

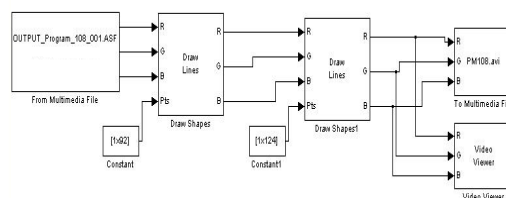
یک میکرو کنترلر روی سیستم، وظیفه کنترل و هدایت را بر عهده دارد. برای استخراج اطلاعات ارسالی به سیستم، از آنجا که میکرو زبردربایی در داخل آب حرکت می‌کند و کنترل آن باید به شکل ریموت انجام گیرد، شیوه‌ای اجرا شد تا بتوان اطلاعات ارسالی را به صورت آنلاین^۶ خواند. برای این هدف از یک سیستم گیرنده

ارسالی به زیردریایی را از راه پورت COM1 دریافت کرده و از راه simulink در matlab و مطابق آنچه در شکل (۱۴) ملاحظه می‌شود، اطلاعات در یک فایل با عنوان Fish.mat ذخیره می‌شود.



شکل ۱۴: دیاگرام تبدیل اطلاعات رادیوکنترل به داده‌های موردنظر.

این اطلاعات در یک ماتریس ذخیره می‌شود که این ماتریس شامل ۴ ستون اصلی است. ستون اول مربوط به زمان ثبت نتایج است که هر نیم ثانیه انجام می‌گیرد. ستون‌های دوم تا چهارم نیز به ترتیب مربوط به داده‌های کانال‌های اول تا سوم رادیوکنترل است که کانال اول، فرکانس دم‌زدن یا همان فرکانس پیشروی است. کانال دوم تغییر جهت به چپ و راست است و در نهایت کانال سوم نیز مود بالا و پایین رفتن میکرو زیردریایی یا همان تغییر عمق را مشخص می‌کند. در مرحله بعد تصاویری که توسط دوربین تهیه می‌شود و در اختیار کامپیوتر قرار می‌گیرد، بار دیگر از طریق simulink نرم‌افزار matlab آنالیز می‌شود.



شکل ۱۵: دیاگرام مش‌بندی تصاویر دریافتی از طریق simulink در matlab.

طبق آنچه در شکل (۱۵) نمایش داده شده است، نرم‌افزار، تصویر دریافتی را مش‌بندی می‌کند. این مش‌بندی در حقیقت توسط رسم دو سری خطوط افقی و عمودی انجام می‌گیرد که از روش دو ماتریس اعمال می‌شود. مش‌بندی تصاویر دریافتی به صورت هر نیم ثانیه انجام یافته است. در حقیقت فیلم دریافتی به صورت هر 2 frame/Sec نمایش داده شده است. شکل (۱۶) تصویر دریافتی مش‌بندی شده را نمایش می‌دهد.

برای شناسایی، خروجی‌های سیستم نیز مورد نیاز هستند. خروجی‌های اصلی که در این سیستم ارزیابی می‌شوند، موقعیت و سرعت سیستم در جهت‌های مختصات x و y است. برای این هدف، یک دوربین در فاصله‌ای که به اندازه کافی زیاد باشد تا کل محدوده حرکتی را پوشش دهد، نصب شده است. تصاویر همزمان با ثبت اطلاعات ورودی توسط کامپیوتر ضبط شدند. اکنون از روی تصاویر که به نوعی گویای حرکت و موقعیت ماهی در زمان‌های مختلف است، می‌توان عوامل سرعت و موقعیت را به طور دقیق استخراج کرد. در شکل (۱۲) نیز استخر آزمایش این نمونه قابل ملاحظه است. همچنین تصویر (۱۳) نیز آزمایش در تونل آب را نمایش می‌دهد.

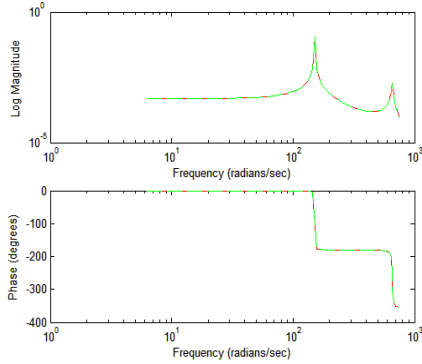


شکل ۱۲: آزمایش در استخر.



شکل ۱۳: آزمایش در تونل آب.

هدف این قسمت، استخراج تابع تبدیل است. در حقیقت با این روش به نوعی به مدل‌سازی سیستم می‌پردازیم [۱۷]. از راه matlab اطلاعات خروجی از رادیو کنترل و دوربینی که حرکت زیردریایی را تعقیب می‌کرد، ثبت شدند. مورد رابط کامپیوتر و رادیوکنترل اطلاعات



شکل ۱۹: نمودار Bode در matlab.

شایان ذکر است تابع تبدیل از درجه ۴، Fit شده است و برابر است با:

$$\begin{aligned}
 &\text{Transfer function:} \\
 &P = \frac{-6.206e-012 s^4 - 8.426e-010 s^3 - 6.77e-006 s^2 + 0.0006333 s + 3.1}{0.0001 s^4 + 0.009156 s^3 + 45.36 s^2 + 392.6 s + 9.774e005} \quad (19)
 \end{aligned}$$

در حقیقت می‌دانیم معادلات فضای حالت یک سیستم به شکل زیر تعریف می‌شود؛ سپس برای ماتریس‌های A و B و C و D خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (20)$$

A=

1.0e+009 *

```

-0.0000000000000000  0.0000000001000000  -0.0000000000000000  0.0000000000000000
0.0000000000000000  0  0.0000000001000000  -0.0000000000000000
0.0000000000000000  0.0000000000000000  0.0000000000000000  0.0000000001000000
-9.78054128703215  -0.00795932274247  -0.00045513686160  -0.000000018779329

```

B=

1.0e+006 *

```

-0.000000000083907
-0.00000650315188
0.00362548088830
7.01279214049573

```

C=

```

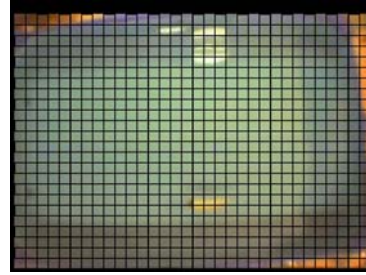
1.0000000000000000  0.0000000000000000  -0.0000000000000000  0.0000000000000000

```

D=

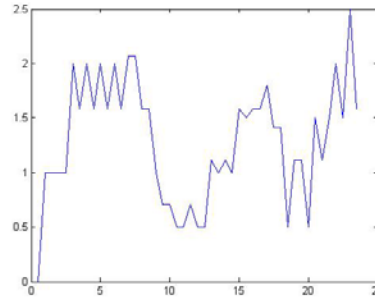
-7.095389627230964e-006

برای کنترل خودکار میکرو زیردریایی از یک سیستم سنسوری مجهز به ۳ عدد سنسور فاصله‌سنج نوری بهره گرفته شد. پکیج این سه سنسور در شکل (۲۰) ملاحظه می‌شود.

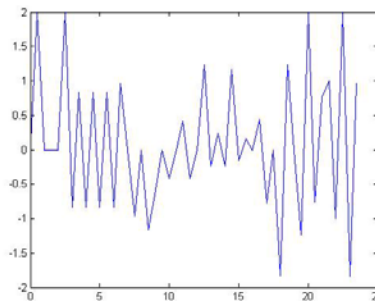


شکل ۱۶: تصویر زیردریایی در فریم اول ثانیه ششم.

با در اختیار داشتن تصاویر مش‌بندی شده، امکان ردگیری لحظه به لحظه زیردریایی وجود دارد. سپس به این ترتیب می‌توان نمودارهای سرعت و شتاب را بر حسب زمان استخراج کرد. این نمودارها در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) قابل ملاحظه هستند. این داده‌ها در قسمت بعد و برای System Identification مفیدند.



شکل ۱۷: نمودار سرعت زیردریایی بر حسب زمان در آزمایش حلقه باز.



شکل ۱۸: نمودار شتاب زیردریایی بر حسب زمان در آزمایش حلقه باز.

پس از آماده‌سازی داده‌ها، نوبت استخراج تابع تبدیل و معادلات فضای حالت می‌رسد. هدف در این بخش از پروژه، شناسایی تابع ریاضی سیستم است. این کار توسط Fitsys در نرم‌افزار matlab انجام می‌شود. شکل (۱۹) نمودار بود را در matlab نشان می‌دهد.

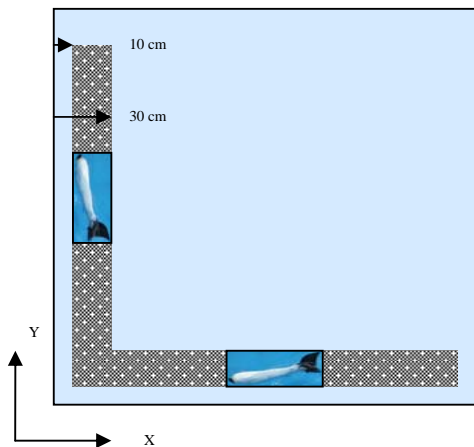
$$K_c = 87.36 \quad T_i = 2 \times 10^{-3} \quad T_d = 5 \times 10^{-4} \quad (29)$$

PID

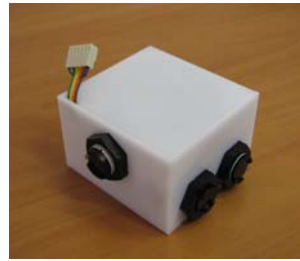
قبل از هر گونه صحبتی درباره طراحی کنترلر، به توضیحی اجمالی درباره ساختار این طراحی می‌پردازیم. همان طور که در شکل (۷) نمایش داده شده است، این زیردریایی در صفحه افقی، ۲ درجه آزادی دارد. در نگاه اول دو زاویه θ_1 و θ_2 که مربوط به دو servomotor می‌شود، دو متغیری به نظر می‌رسند که انتظار می‌رود از راه کنترلر، کنترل شوند. θ_1 زاویه مربوط به لینک میانی و $\dot{\theta}_2$ فرکانس لینک انتهایی و یا همان لینک دمی است. در واقع $\dot{\theta}_2$ همان سرعت پیشروی است. همچنین با توجه به مطالب یادشده در بخش آزمایش، خروجی سیستم x و y در هر لحظه در نظر گرفته شده است. یعنی اینکه انتظار می‌رود کنترلر در هر لحظه با کنترل θ_1 و $\dot{\theta}_2$ بتواند موقعیت x و y را داشته باشد. این سیستم، یک سیستم با دو ورودی و دو خروجی است که یک تابع تبدیل از مرتبه ۲ دارد.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (27)$$

حال چنانچه به هدف طراحی نگاهی دقیق‌تر انداخته شود، ابعاد تازه‌ای روشن خواهد شد. همان طور که در شکل (۲۱) مشخص است، هدف از طراحی کنترلر، کنترل موقعیت این زیردریایی در یک باند ۲۰ سانتی‌متری و با فاصله ۱۰ سانتی‌متری از دیواره است.



شکل ۲۱: کنترل موقعیت زیردریایی در یک باند ۲۰ سانتی‌متری و با فاصله ۱۰ سانتی‌متری از دیواره.



شکل ۲۰: سه سنسور وظیفه شناسایی موقعیت زیردریایی را بر عهده دارد.

برای طراحی کنترلر و اعمال آن روی سیستم، نیاز به در اختیار داشتن ضرایب اولیه کنترلر است. البته کالیبراسیون ضرایب کنترلر، هنگام آزمایش و بیشتر به کمک سعی و خطا انجام می‌گیرد. اما برای در اختیار داشتن مقادیر اولیه، از یکی از روش‌های معمول در این زمینه استفاده شد. در واقع برای طراحی کنترلر در این بخش، از روش دوم زیگلر-نیکولز (روش حساسیت مقدار نهایی و یا روش Ultimate Sensitivity Method) برای تعیین عوامل کنترلر بهره گرفته شد [۱۸]. در این روش، از اطلاعات مربوط به سیستم مدار بسته تحت تأثیر کنترلر P-action در مرز پایداری استفاده می‌شود. در این روش، مقادیر دو کمیت K_U و P_u اساس تعیین عوامل کنترلر قرار می‌گیرند. عبارت K_U است از مقدار بزرگنمایی مربوط به P-action که سیستم مدار بسته را در مرز پایداری قرار می‌دهد و P_u پریود ارتعاش‌های عکس‌العمل سیستم مدار بسته در مرز پایداری است. برای کنترلر نوع P-action:

$$K_c = 0.5 K_u \quad (21)$$

برای کنترلر نوع PI-action:

$$K_c = 0.45 K_u \quad (22)$$

$$T_i = 0.83 P_u \quad (23)$$

برای کنترلر نوع PID-action:

$$K_c = 0.6 K_u \quad (24)$$

$$T_i = 0.5 P_u \quad (25)$$

$$T_d = 0.125 P_u \quad (26)$$

مقادیر زیر نیز برای K_U و P_u به دست آمدند:

$$K_U = 145.6 \quad (27)$$

$$P_u = 0.004 \quad (28)$$

و از آنجا داریم:

ذکر این نکته پر اهمیت است که برنامه کنترل میکرو زبردربایی از راه یک میکرو کنترلر روی سیستم اعمال شد. میکرو زبردربایی به طور کامل نسبت به محیط خارج ایزوله است. به همین دلیل نمی‌توان اطلاعات تبادل یافته بین میکروکنترلر و servomotorها را در اختیار داشت. به همین دلیل نموداری که نشان‌دهنده نحوه عمل کنترلر باشد، در اختیار نیست. برای اثبات درستی طراحی کنترلر، همین بس که در عمل به خوبی عمل می‌کند و سیستم را در باند ۲۰ سانتی‌متری و با فاصله ۱۰ سانتی از دیواره نگه می‌دارد (شکل ۲۲).



شکل ۲۲: اعمال کنترلر روی میکرو زبردربایی و پایداری حرکت آن در یک باند ۲۰ سانتی‌متری و با فاصله ۱۰ سانتی از دیواره.

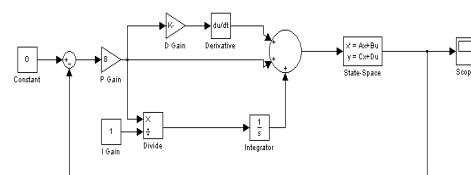
در این مقاله، به توضیحاتی هر چند کوتاه، درباره مراحل طراحی، مدل‌سازی سازه‌ای، تحلیل هیدرودینامیکی و مدل‌سازی دینامیکی از حرکت کوسه‌ماهی پرداخته شد. در حقیقت به دنبال دستیابی به دانش طراحی و ساخت انواع جدیدی از زبردربایی‌های بدون سرنشین، این مراحل سپری شد. همچنین به اختصار درباره ساخت این میکرو زبردربایی مطالبی عنوان شد. مراحل آزمایش نیز به تفصیل شرح داده شد. تابع تبدیل سیستم نیز شناسایی شد. پیش از طراحی کنترلر PID، از روش زیگلر-نیکولز، ضرایب کنترلر استخراج شدند. این ضرایب از روش سعی و خطا بهبود پیدا کردند. اعمال کنترلر گام نهایی در راستای انجام پروژه بود. این کنترلر، زبردربایی را در یک باند ۲۰ سانتی‌متری و با فاصله ۱۰ سانتی‌متر از دیواره پایدار نگه می‌دارد.

حال در ابتدا فرض می‌کنیم به عنوان حالت ۱، زبردربایی قرار است در راستای x و با فاصله Δy از دیواره حرکت کند. در مرحله بعد که حالت ۲ می‌نامیم، این حرکت در راستای y و با فاصله Δx از دیواره انجام می‌گیرد. با نگاهی دقیق متوجه می‌شویم که در حالت ۱ دانستن مقدار x و در حالت ۲ مقدار y مدنظر نیست. هدف از طراحی کنترلر، حفظ فاصله از دیواره در یک باند مشخص است. پس در حالت ۱ تنها Δy و در حالت دوم تنها Δx است که اهمیت دارد که می‌توان آنها را با مقدار Δd جایگزین کرد. شایان ذکر است که زبردربایی برای حفظ موقعیت خود در باند یادشده، به این ترتیب عمل می‌کند که با پیدا کردن محدوده باند و حرکت مستقیم، چنانچه از محدوده خارج شود، با هدایت خود به چپ و یا راست، تلاش می‌کند موقعیت خود را در این باند حفظ کند. این عمل از طریق دستور به servomotorها انجام می‌گیرد. ذکر این نکته ضروری است که تنها متغیری که با هدف حفظ موقعیت و برای گردش به راست و یا چپ کنترل می‌شود، مقدار θ_1 است و $\dot{\theta}_2$ که سرعت پیشروی است، ثابت در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال برای گردش به راست، زاویه θ_1 به مقدار نهایی خود می‌رسد و ثابت می‌ماند و مقدار $\dot{\theta}_2$ از قبل ثابت بوده است. این عمل ادامه می‌یابد تا کنترلر به کمک سنسورها، فرمان گردش به راست را متوقف کند. پس تنها ورودی موردنظر مقدار θ_1 است.

حال با توجه به همه موارد ذکرشده به این نتیجه می‌رسیم که این سیستم، یک سیستم تک ورودی-تک خروجی و یا به اصطلاح SISO است. همچنین برای این سیستم داریم:

$$[\theta_1] = [G][\Delta d] \quad (28)$$

همچنین دیاگرام حلقه بسته کنترل میکرو زبردربایی برای حفظ موقعیت در باند ۲۰ سانتی‌متری و با فاصله ۱۰ سانتی از دیوار مطابق شکل (۲۲) است.



شکل ۲۲: بلوک دیاگرام مدار بسته کنترل موقعیت میکرو زبردربایی.

آموزشی خود را در اختیار این پروژه قرار دادند و کمک شایانی به پیشبرد این پروژه کردند، قدردانی به عمل می‌آید.

در پایان از مرکز پژوهش‌های دریایی سازمان صنایع دفاع، با پشتیبانی مالی خود و از مرکز وسایل نقلیه پیشرفته دانشگاه تهران که امکانات آزمایشگاهی، کارگاهی و

- 1 - Madis, L., Georg, M. and deivied, P. "Design of a Semiautonomous Biomimetic Underwater Vehicle for Environmental Monitoring".
 - 2 - Edward, C. and Kevin, M. (2004). "Mechanics and Control of Swimming". *IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING*. Vol. 29, No. 3.
 - 3 - R, Mittal. (2004). "Computational modelling in bio-hydrodynamics: Trends, challenges, and recent advances," *IEEE J. Oceanic Eng.* Vol. 29, PP. 595–604.
 - 4 - M. S. Triantafyllou, A. H. Techet, and F. S. Hover (2004). "Review of experimental work in biomimetic foils," *IEEE J. Oceanic Eng.* Vol. 29, PP. 585–594.
 - 5 - J. A. Walker and M. W. Westneat (2000). "Mechanical performance of aquatic rowing and flying". *Proc. R. S. Lond. B*. Vol. 267, PP. 1875–1881.
 - 6 - http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/fish/index_e.html.
 - 7 - Ottsson, g. (1998). "Model Flexibility Method in ADAMS/Flex". *Provided with the ADAMS/Flex documentation or available from MDI link*.
 - 8 - Ura, T. and Takagawa, S. (1994). "Underwater Robots", Seizan-do.
 - 9 - Michael, S., David, M. and Burce, C. Davies (1994). "Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion". *In Proc. Of IEEE journal of OCEANIC ENGINEERING*. Vol.24, No. 2.
 - 10 - Barrett, D. S., et al. (1999). "Drag reduction in fish-like locomotion". *J. Fluid Mechanics, Cambridge University Press*. Vol. 392, PP. 183-212.
 - 11 - R.J. Mason and J.W. Burdick. (2000). "Experiments in carangiform robotic fish locomotion". *In Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Aut.* PP. 428–35.
 - 12 - C. C. Lindsey. (1978). "Form, Function and locomotory Habits in Fish". *In Fish Physiology Vol. VII Locomotion, W. S. Hoar and D. J. Randall, Eds. New York: Academic*, PP. 1–100.
 - 13 - R.J. Mason and J.W. Burdick. (1999). "Construction and modeling of a carangiform robotic fish". *In Proc. Int. Symp. Exp. Rob.* PP. 235–242.
 - 14 - K.A. Morgansen, V. Duindam, R.J. Mason, J.W. Burdick, and R.M. Murray. (2001). "Nonlinear control methods for planar carangiform robot fish locomotion". *In Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Aut.* PP. 427–34.
 - 15 - N.E. Leonard. (1995). "Periodic forcing, dynamics and control of underactuated spacecraft and underwater vehicles". *In Proc. 34th IEEE Conf. Dec. Cont.* PP. 1131–6.
 - 16 - Keenong, S. et. All, "Exploring Optimal Gaits for Planar Carangiform Robot Fish Locomotion" *IFAC journal*.
 - 17 - Bahram, T. and Aghil, Y. (2006). "Stability Control of Micro Aerial Vehicle", a thesis submitted to the graduate Studies in Master of Science. University of Tehran.
 - 18 - Anderson, J.M. and Kerrebrock, P.A. (1999). "The Vorticity Control Unmanned Undersea Vehicle (VCUUV) Performance Results," *Proc. 11th Int. Symp. On Unmanned Submersible Technology, Durham, NH, Also, Draper Report*. PP. 3744-3747.
-

1 - Unmanned Underwater Vehicle (UUV)
3- Autonomous
5 - PWM (Pulse with Modulation)

2 - Micro Underwater Vehicle (MUV)
4 - Receiver
6 - Real-Time