

طراحی و ساخت یک ربات ماهی باله موجی و ساخت یک نمونه باله موجی برای جایگزینی پروانه ها به منظور تولید نیروی پیشران ایده آل

احمد قنبری^۱، محسن سیاه منصوری^۲، محمد تقی شروانی تبار^۳

^۱استادیار، دانشگاه تبریز؛ a-ghanbari@tabrizu.ac.ir

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز؛ mohsen.siahmansouri@gmail.com

^۳دانشیار، دانشگاه تبریز؛ msherv@tabrizu.ac.ir

چکیده

الهام گیری از طبیعت برای تولید محصولات رفع کننده ی نیاز های بشری همواره مورد توجه انسان بوده است. در این بین حرکت و مانور آبزیان از جایگاه خاصی برخوردار است. در این مقاله ابتدا به مقایسه قابلیت های گونه های مختلف ربات های مقلد می پردازیم و سپس با توجه به بررسی خواص ربات ماهی ها ی گوناگون، به طراحی، بررسی بازدهی هیدرودینامیکی و ساخت نوعی ربات ماهی می پردازیم که برای ساخت آن از ماهی تیغه ای^۱ الهام گرفته ایم. این ربات دارای یک باله ی موجی چندتکه ای^۲ در قسمت زیرینش است که نیروی لازم را برای پیشروی و مانور ربات فراهم می کند. این ربات همچنین برای تغییر جهت و عمق از یک سیستم مکانیکی شامل دو سروو موتور^۳ استفاده می کند. این ربات به کمک یک دسته کنترلی و توسط یک سیستم کنترل بی سیم^۴، فرمانهای لازم را به برد کنترلی نصب شده بر روی ربات ماهی جهت حرکت و مانور ارسال می کند. بدین ترتیب کنترل ربات از بیرون استخر امکان پذیر می شود. به کمک این سیستم کنترلی می توان سرووموتورهای موجود در باله و سیستم مکانیکی کنترل جهت و عمق را تا فاصله ۱۵۰ متری کنترل کرد.

کلمات کلیدی: الهام گیری از طبیعت، ربات ماهی، باله موجی، کنترل جهت و عمق، سیستم کنترل بی سیم

مقدمه

به نظر می رسد تقلید از طبیعت یکی از راه های حفظ آن است. دخالت بیش از حد انسان در طبیعت باعث تخریب آن شده است. یکی از بزرگترین و مهمترین زمینه هایی که بشر باعث بر هم خوردن نظم طبیعت شده است، زندگی دریایی است. این مساله ما را به سوی ساخت وسایلی که با طبیعت مطابقت بیشتری داشته باشند، سوق می دهد. برای نیل به این هدف ایجاد تغییراتی در ساختار وسایل موجود اجتناب ناپذیر است. یکی از مهمترین این تغییرات بررسی روش های جدید تولید نیروی پیشران است. برای مثال استفاده از پره ها^۵ در موتور کشتی ها و قایق ها باعث آسیب های شنوایی^۶ شدید موقتی و پایدار بر روی موجودات دریایی می شود [1]. در طبیعت در موارد بسیاری این نیروی پیشران توسط ایجاد موج های سینوسی تولید می شود. یکی از راههای بررسی کارایی موجهای سینوسی در تولید نیروی پیشران لازم برای حرکت کشتی ها و زیردریایی ها، استفاده از این موجها برای حرکت و مانور ربات ماهی ها است.

علاوه بر طبیعت، پره ها در کاربرد های صنعتی نیز در مواردی باعث بروز مشکلاتی می شوند. پاک شدن لایه های محافظ خوردگی در مخازن سیالات در اثر جدا شدن مواد اکسندنده شیمیایی نظیر اکسیژن، کلر، اسید سولفوریک، اسید نیتریک، پرمنگنات در اثر همرفت ناشی از حرکت شدید در پره ها [2]، کارایی پایین در لزجت های بالا، عدم کاربرد در موارد رسوبی و لجنی، امولسیون مضر مثلا در مراحل تصفیه آب و انفجار در اثر همرفت ناشی از حرکت شدید پره ها به دلیل پایین بودن انرژی فعال سازی برخی سیالات، نمونه هایی از مضرات کاربرد پره ها در شناگرهای ساخت بشر هستند. استفاده از موجهای سینوسی در جهت کاهش مشکلات فوق الذکر بسیار موثر است. بنابراین می توان به طبیعت به عنوان یک منبع مهم الهام گیری برای تولیدات و پرورش نوآوری ها توجه کرد [3]. سعی بر آن است که با الهام گیری از طبیعت نیروی لازم را برای حرکت و مانور ربات های ماهی تولید کرد.

در طبیعت نیروی پیشران ماهی ها از دو طریق تولید نوسان بدنه یا باله و یا تولید موج قابل تولید است. ماهی های موجی به نوبه خود به دو نوع بدن موجی^۷ یا باله موجی^۸ تقسیم می شوند. البته ترکیب روش های فوق هم قابل اعمال است.

¹ Knifefish

² Modular

³ Servomotor

⁴ Wireless

⁵ Propellers

⁶ Acoustic effects

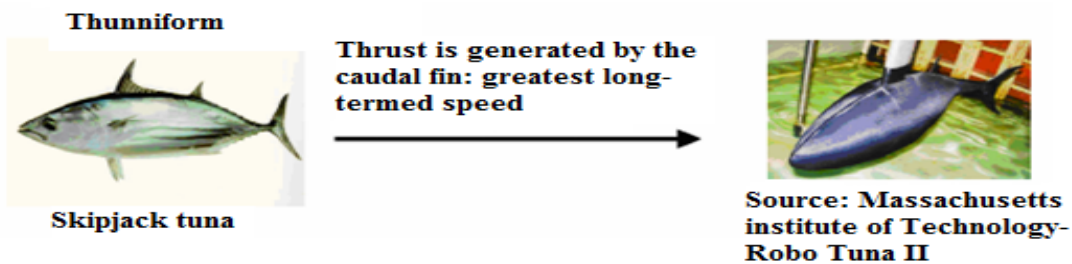
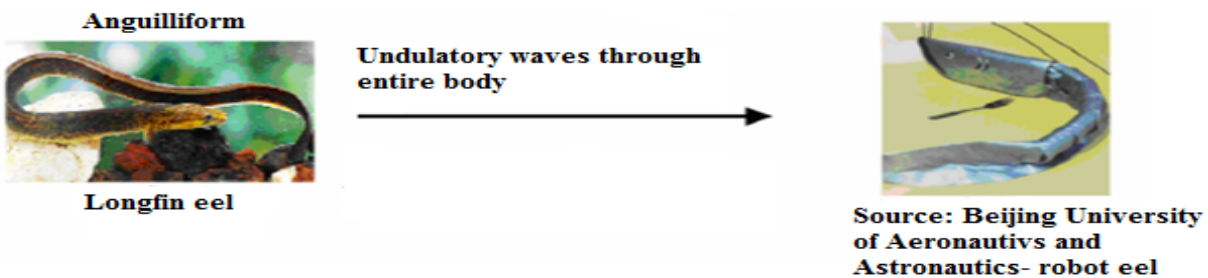
⁷ Body and/or caudal fin, BCF

⁸ Median and/or paired fin, MPF

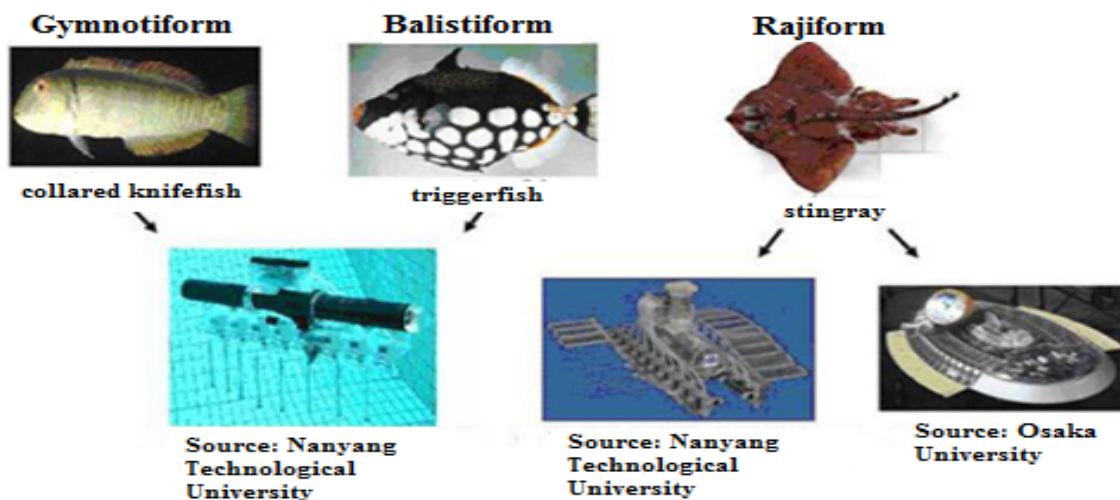
ما در اینجا قصد داریم ربات ماهی هایی در ابعاد چند ده سانتی متری را بررسی کنیم و در این ربات ها حرکت نوسانی به دلیل ایجاد نوسانات شدید در آب و هدر دادن توان و همچنین نداشتن مهارت لازم برای شناگری مناسب نیست. در این مقاله ما به بررسی قابلیت های ربات ماهی های BCF و MPF می پردازیم. سپس دو گونه ی قابل تولید ربات های الهام گرفته از ماهی های MPF را بررسی می کنیم و طرح برتر را بر می گزینیم و ضمن بیان نحوه ی تولید موجهای سینوسی گوناگون به کمک شش سروو موتور موجود در باله نوع برتر ، به طراحی یک سیستم مکانیکی شامل دو سروو موتور کنترل عمق و جهت می پردازیم و مدار های مخابراتی و الکتریکی را برای کنترل بی سیم این ربات ماهی بیان می کنیم.

تقلید و کارایی ربات های BCF و MPF

در این بخش به بررسی و مقایسه ی ربات های الهام گرفته از ماهی های BCF و MPF می پردازیم. در سالیان اخیر نمونه های زیادی از ربات ماهی های الهام گرفته از هر دو نوع ماهی ذکر شده، ساخته شده است. در شکل های ۱ و ۲ نمونه هایی از ربات ماهی های مقلد به همراه نام موسسه سازنده و نمونه طبیعی آنها آورده شده است.



شکل ۱ : نمونه ها یی از ماهی های BCF و ربات های مقلد آن ها [4]



شکل ۲: نمونه ها یی از ماهی های MPF و ربات های مقلد آن ها [5]

یکی از روش های مقایسه ای در طراحی، ذکر کردن قابلیت های مطلوب و امتیازدهی به میزان ارضاء قابلیت ذکر شده در هریک از طرفین در حال مقایسه است. در جدول ۱ نیز به همین روش به مقایسه ی ربات های BCF و MPF می پردازیم.

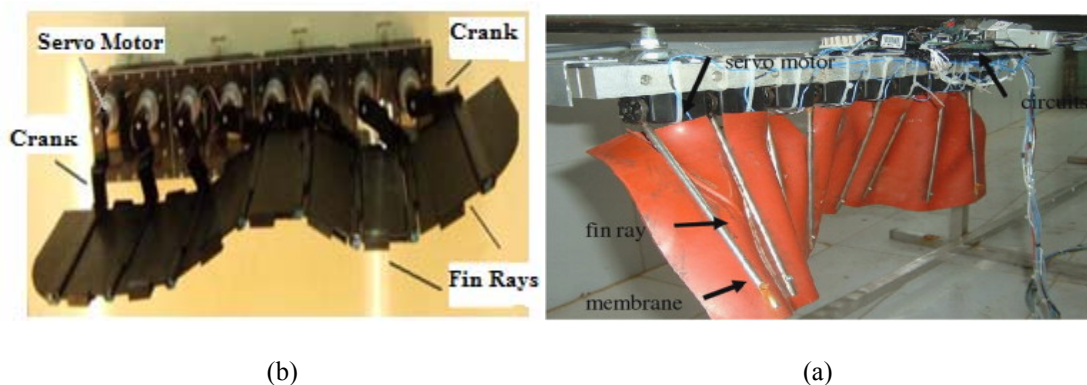
جدول ۱:مقایسه موردی ربات های مقلد

مقایسه موارد	ربات های مقلد ماهی MPF	ربات های مقلد ماهی BCF
نیروی درگ ^۱ (دراثر حرکت محوربدنه)	۱	۰
میزان نوسان آب	۲	۱
سرعت	۱	۱
داشتن مهارت و تعادل در شنا گری	۲	۰
ابعاد	۰	۱
نمره کل	۶	۳

بنابراین نمونه برتر از نظر ارضای پارامتر های مطلوب ما ربات های مقلد ماهی های MPF می باشد.

مقایسه دو نوع مختلف ربات ماهی های MPF

تاکنون چند نمونه [1,5-9,10] از این تقلید برای ساخت ربات های مقلد انجام شده است. در این بخش دو طرح ساخته شده باله ی موجی را بررسی و مقایسه می کنیم، (شکل ۳). دربرخی از این نمونه ها مانند نمونه های هو^۲ [6] و ژنگ^۳ [7]، میله های باله^۴ مستقیما به محور سرووموتورها متصل است و میله های باله حرکت رفت و برگشتی را در یک صفحه انجام می دهند و باعث تولید موج طولی می شوند که نمونه ای از این مکانیزم در قسمت (a) شکل ۳ آمده است. در برخی دیگر از این مکانیزم ها مانند طرح های لو^۵ [1,5,8,10] و طرح ویلی^۶ [9] هر کدام از میله های باله به طور قائم به یک لنگ^۷ متصل هستند که این لنگ ها توسط محور سروو موتورها به حرکت در می آیند و با حرکت کمانی شکل میله های باله، موج طولی تولید می شود که نمونه ای از این مکانیزم در قسمت (b) شکل ۳ آمده است.



شکل ۳: (a) مکانیزم باله ربات MPF ساخت دانشگاه ملی صنایع دفاع چین، چنگسا^۷ [7] (b) مکانیزم باله ربات MPF در ربات NKF-II ساخت دانشگاه صنعتی نانیانگ سنگاپور^۹ [1]

¹ Drag force

² Hu, T.

³ Zhang, D.

⁴ Fin rays

⁵ Low, K.H.

⁶ Willy, A.

⁷ Crank

⁸ University of defense technology, Changsha

⁹ Nanyang technological university, Singapore

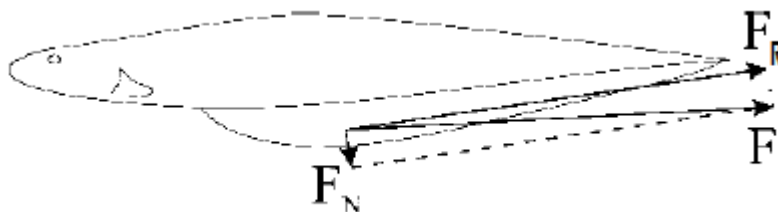
در هر دو طرح بالا برای تولید موج، فاصله بین دو میله باله مجاور همواره در حال تغییر می باشد. در طرح (a) که به طور کامل از ماهی های طبیعی الهام گرفته است باید جنس غشاء باله از جنس مناسبی انتخاب شود که شبیه باله های ماهی قابلیت انقباض و انبساط داشته باشد. در غیر این صورت به دلیل فاصله ی متفاوت قسمت انتهایی دو میله باله مجاور و سر آن ها و همچنین تغییر فاصله دو میله باله مجاور در حین تولید موج، ایجاد چروکیدگی اجتناب ناپذیر است. البته شاید بتوانیم لغزنده¹ های ویژه ای هم تولید کنیم که در بین دو میله باله مجاور قرار گیرد و این مشکل را برطرف کند که البته طرح چندان ساده ای نیست.

اما در طرح (b) به دلیل این که میله های باله همواره موازی هستند، با لغزنده های بسیار ساده تری می توان از چروکیدگی باله جلوگیری کرد. البته این طرح برای تولید موج سینوسی ساده است و به طور کامل از ماهی ها تقلید نمی کند. موازی بودن میله های باله این خاصیت را دارد که بدون لغزنده و با بیشتر کردن تعداد موتورها و همچنین کاهش اختلاف فاز بین آنها نیز می توان چروکیدگی باله را در هنگام تولید موج به حداقل رساند.

نوع (a) در حین تولید موج علاوه بر تولید نیرویی در راستای طولی باله، یک نیروی عمودی هم تولید می کند. اما نوع (b) تنها به تولید یک نیرو در راستای طولی باله در حین تولید موج منجر می شود که جهت این نیرو را می توانیم به سادگی به بالا و پایین و طرفین منحرف کنیم و کنترل جهت نیروی پیشران در طرح (b) ساده تر و دقیق تر از نوع (a) می باشد. بنابراین طرح برگزیده ما طرح (b) می باشد.

آنالیز نیرویی ربات ماهی MFP با میله های باله موازی

برای پیشروی و مانور ربات ماهی و البته برای غلبه بر نیروی برآیند نیروهای وزن و شناوری وارد بر ربات به یک نیروی پیشران با قابلیت تغییر جهت نیاز داریم. برای کاهش چگالی ربات می توانیم از طرح های متنوعی استفاده کنیم [1,8,9]، که البته ما در این ربات از یک جلیقه کاهنده چگالی استفاده می کنیم. برای حرکت رو به جلو، باید باله ی ربات یک نیروی رو به عقب به سیال وارد کند و برای غلبه بر نیروی برآیند وزن و شناوری، باله باید یک نیروی رو به پایین به سیال وارد کند. به این دلیل که چگالی ربات حتی با جلیقه ی کاهنده چگالی هم باید بیشتر از چگالی سیال باشد. پس، همانند آنچه که در شکل ۴ آمده است، جهت برآیند این نیروها برای حرکت رو به جلوی ربات به شکل تأمین می شود.



شکل ۴: نیروهای تولید شده توسط باله ماهی و برآیند آن ها [11]

برای حرکت ربات رو به بالا جهت این نیروی برآیند به جهت F_N و برای حرکت روبه پایین آن به جهت نیروی F_R نزدیک می شود. برای حرکت به سمت های چپ و راست ربات نیز این نیرو در صفحات افقی و برای تغییر عمق ربات نیز این نیرو در صفحات قائم چرخش خواهد داشت. از دیگر خواص این ربات توانایی ترکیب حرکات ذکر شده در فوق است. با بیشتر شدن تعداد باله ها در ماهی ها بررسی نیروهای هیدرودینامیکی موجود دشوارتر می شود [12].

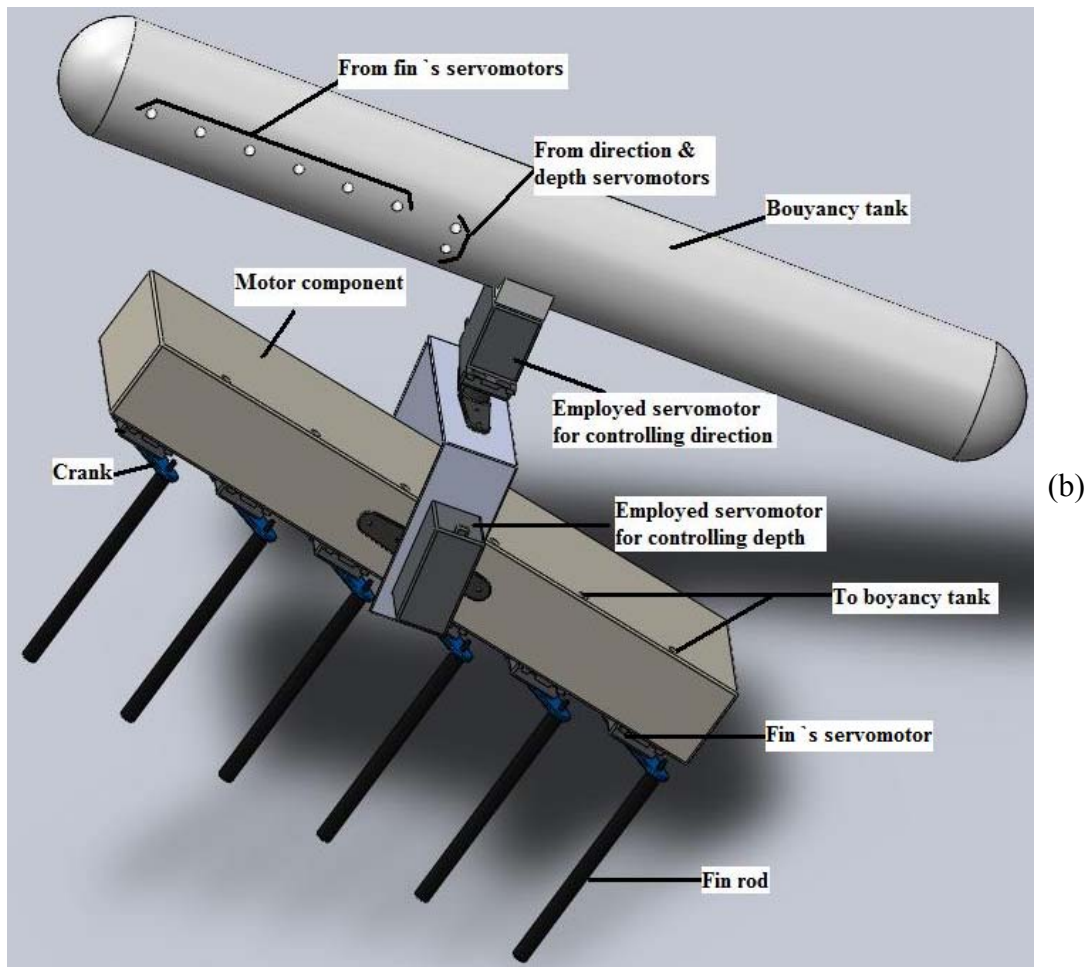
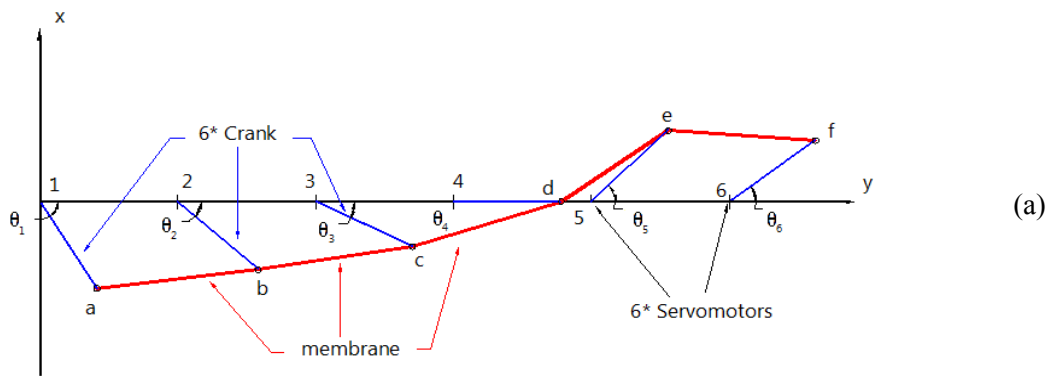
طراحی مدل مکانیکی ربات ماهی

در اینجا طرح باله انجام شده همانند طرح های لو [1,5,8,10] و طرح ویلی [9] است و به صورت آنچه که در شکل 5(a) نشان داده شده است شش سروموتور برای تولید موج سینوسی بکار می روند. اما آنچه که در این طرح منحصر بفرد است کاربرد یک سیستم مکانیکی شامل دو سروموتور جداگانه برای کنترل جهت و عمق است. هرلنگ در باله می تواند نسبت به راستای طولی بدنه ربات از ۹۰- درجه تا ۹۰+ درجه چرخش داشته باشد که میزان این چرخش برای تمامی سروموتور ها یکسان و توسط کاربر قابل کنترل می باشد. اختلاف فاز بین دو لنگ مجاور نیز یکسان و قابلیت تغییر بین ۱۰ تا ۱۲۰ درجه را دارد.

برای تغییر جهت و تغییر عمق شنای ربات، همانطور که در شکل 5(b) آمده است، یک سیستم مکانیکی ویژه شامل دو سروموتور جداگانه طراحی شده است. برای حرکت به سمت های چپ و راست ربات، باله توسط سروموتور کنترل جهت نسبت به صفحه قائم فرضی عبور کننده از راستای طولی بدنه ربات از ۹۰- تا ۹۰+ چرخش خواهد داشت و برای تغییر عمق ربات نیز باله ربات توسط موتور کنترل عمق نسبت به صفحه

¹ Slider

افق فرضی عبور کننده از راستای طولی بدنه ربات از -90° تا $+90^\circ$ درجه می چرخد. بدین ترتیب ربات ماهی توانایی شنا و مانور در کل استخر را خواهد داشت.



شکل ۵: (a) سروموتورهای موجود در باله با اختلاف فاز مشخص بین لنگ های مجاور،
(b) مدل شماتیک ربات ماهی

بررسی بازدهی هیدرودینامیکی باله

آنچه که در بیان این نوع بازدهی مطرح است مختص توان باله برای تولید توان مقابله با نیروهای اصطکاکی^۱ و درگ و همچنین تولید توان شتابدهنده^۲ ربات است که به ترتیب با p_f و p_d و p_p نمایش داده می شوند و به ترتیب با روابط (۳) تا (۵) محاسبه می شوند. بنابراین هر سه توان ذکر شده در بالا جزء توان های مفید ما هستند. در واقع اگر تمام توان الکتریکی دستگاه برای غلبه بر نیروهای اصطکاکی و درگ و همچنین

^۱ Track friction
^۲ Accelerator power

شتاب دستگاه صرف شود بازدهی باله یک است و باله ربات ایده آل خواهد بود. برای محاسبه توان های ذکر شده لازم است که در ابتدا سرعت و شتاب ربات را در زمان های مختلف محاسبه کنیم.

اگر تعداد نقاط برگزیده برای جمع آوری اطلاعات آزمایش را با n نمایش دهیم، سرعت و شتاب حرکت ربات با روابط (۱) و (۲) محاسبه می شوند،

$$V_i = \begin{cases} 0 & i = 1 \\ \frac{S_i - S_{i-1}}{\Delta t} & i = 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

$$a_i = \begin{cases} 0 & i = 1 \\ \frac{V_i - V_{i-1}}{\Delta t} & i = 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

که در آن S_i مسافت طی شده در نقاط برگزیده جمع آوری اطلاعات است. و داریم،

$$p_f = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n f \cdot V_i \quad (3)$$

$$p_d = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{1}{2} \rho C_d A_s V_i^3 \quad (4)$$

$$p_p = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n m a_i V_i \quad (5)$$

که در آن ها f ، ضریب اصطکاک بین بدنه ربات و سیال، ρ ، چگالی سیال، C_d ، ضریب درگ، A_s ، سطح تصویر شده برش عرضی بدنه ربات و m ، جرم ربات است. توان الکتریکی مصرفی باله، p_t ، نیز از رابطه (۶) محاسبه می شود،

$$p_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n U_i I_i \quad (6)$$

که در U_i و I_i ، به ترتیب بیان کننده ولتاژ و شدت جریان مصرفی نقاط متناظر است. در نهایت بازدهی هیدرودینامیکی باله، η ، از رابطه (۷) محاسبه می شود،

$$\eta = \frac{p_e}{p_t} * 100\% = \frac{p_f + p_d + p_p}{p_t} * 100\% \quad (7)$$

که در آن p_e ، توان کل در دسترس^۱ است. شایان ذکر است که در محاسبه تمام توان های بیان شده بهتر است میزان میانگین در طول بازه زمانی در محاسبات وارد شود.

سیستم کنترل وایرلس

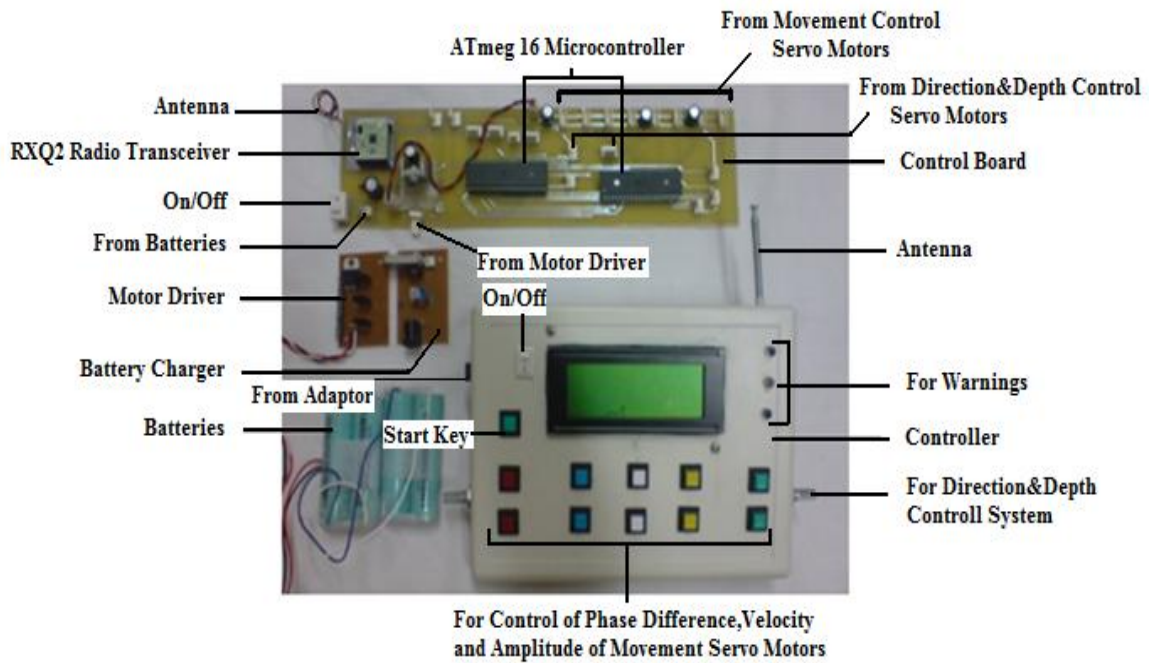
تا کنون چندین نمونه از سیستم های کنترلی این نوع از ربات های ماهی اجرا شده است [5,8,10]. این سیستم های کنترلی به روش های خاصی به کنترل ربات ماهی های تک باله زیرشکمی^۲ [5,8]، و دو باله پهلویی^۳ [10] می پردازند.

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، سیستم کنترلی ربات ماهی ارائه شده در این مقاله از دو قسمت تشکیل شده است. این سیستم کنترلی شامل دسته کنترلی و بورد کنترلی نصب شده بر روی ربات است.

¹ Available power

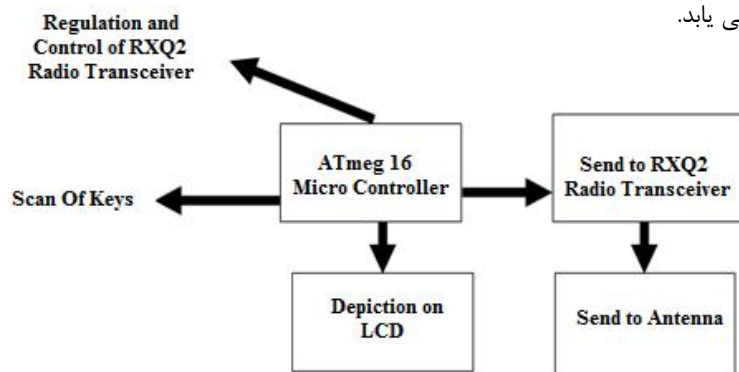
² Anal fin

³ Pectoral fin



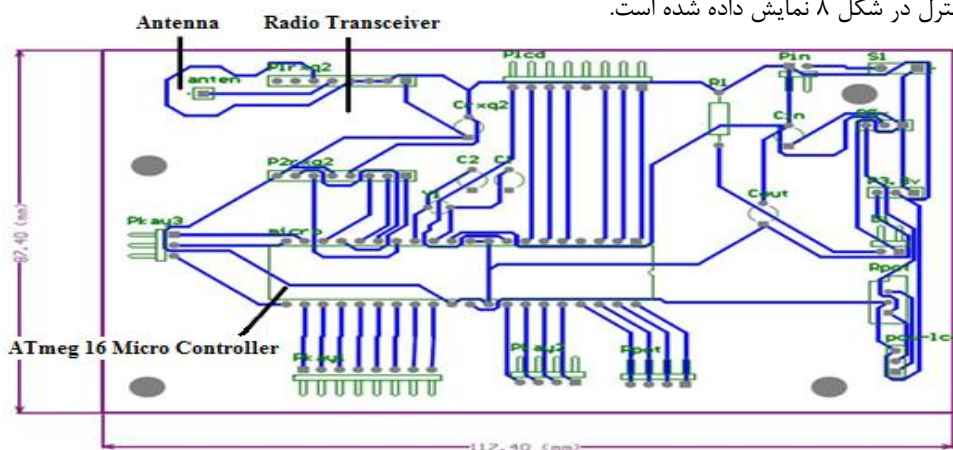
شکل ۶: اجزای سیستم کنترل ربات ماهی

دسته کنترلی این ربات حاوی یک برد کنترل می باشد. برنامه ای که برای میکروکنترلر^۱ این برد نوشته شده اعمال نشان داده شده در شکل ۷ را انجام می دهد. فرمان های برنامه ریزی شده در میکرو موجود در این دسته در LCD نمایش داده می شوند و با زوج کلید های افزایشی و کاهشیی دسته کنترلی قابلیت کنترل و تغییر دارند. سپس این فرمان ها با ماژول مخابراتی^۲ تقویت و به کمک آنتن موجود در دسته کنترلی به آنتن برد نصب شده بر روی ربات انتقال می یابد.



شکل ۷: روند کنترل ماژول مخابراتی بکار رفته در برد کنترل دسته کنترل ربات ماهی

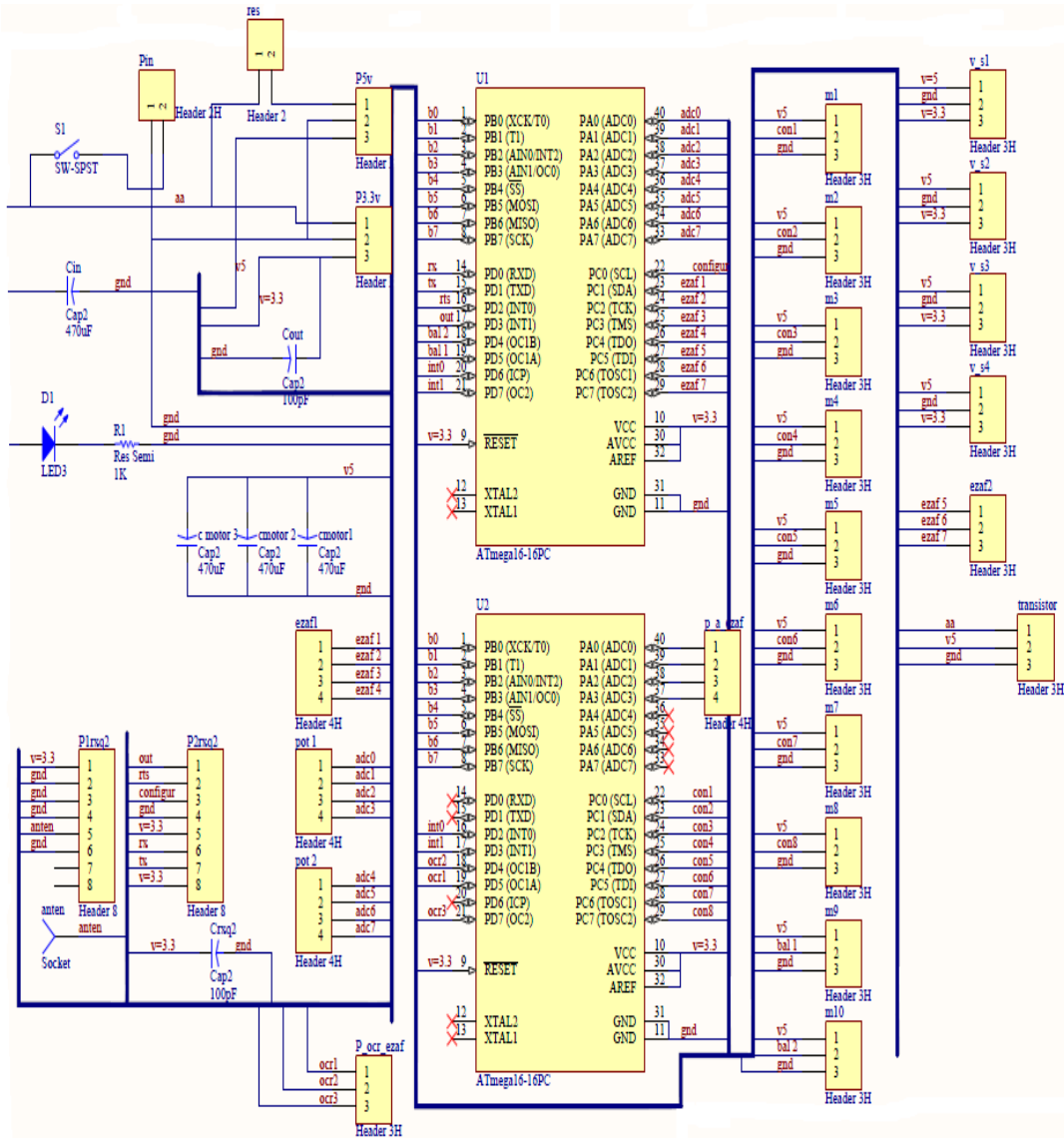
مدار برد کنترلی دسته کنترل در شکل ۸ نمایش داده شده است.



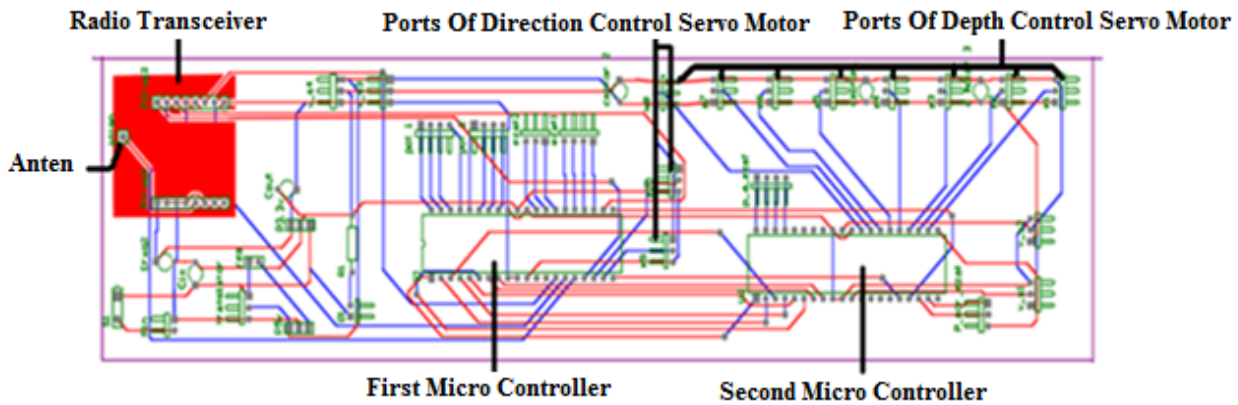
(a)

¹ Microcontroller

² Radio transceiver RXQ2



(a)



(b)

شکل (a,b) ۱۰: مدار برد کنترلی نصب شده بر روی ربات

اختلاف فاز موجود در بین هر دو سروموتور مجاور سبب تولید موج سینوسی منظمی می شود. با کنترل اختلاف فاز دو سروموتور مجاور، نوسان و همچنین دامنه چرخش محور سروموتورها، سرعت تولید و تعداد موج های سینوسی در باله ربات کنترل می شود. افزایش اختلاف فاز در سروموتورهای مجاور، موجب افزایش تعداد موج ها از طریق رابطه (\wedge) می شود،

که در آن N ، تعداد موج های تولید شده در باله و β ، اختلاف فاز بین سروموتورهای مجاور درباله است.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله ضمن بیان لزوم پیروی از طبیعت برای ساخت محصولات جدید، به مقایسه مکانیزم‌های گوناگون برای تولید نیروی پیشران درسیال پرداختیم و ضمن برگزیدن مکانیزم باله موجی چندتکه ای بامیله‌های باله موازی، مزایای این نوع باله نسبت به پیشراننده‌های فعلی را بیان کردیم. در ادامه بازدهی هیدرودینامیکی این طرح را بر روی ربات ماهی‌ها بررسی کردیم. طرح باله در این مقاله در آینده می‌تواند جایگزین مکانیزم‌های فعلی برای تولید نیروی پیشران لازم برای حرکت و مانور شده و مضرات کاربرد پره‌ها، که به تفصیل به آن‌ها پرداختیم، را به حداقل مقدار ممکن برساند. در ادامه مقاله مکانیزم مکانیکی ویژه‌ای را ویژه کنترل عمق و جهت مانور ربات ماهی طراحی کردیم. سپس به طراحی مدارهای الکترونیکی و مخابراتی لازم برای کنترل سروو موتورهای بکار رفته در ربات ماهی پرداختیم. این سیستم کنترلی به کمک یک سیستم وایرلس ربات ماهی را از خارج استخر و تا فاصله ۱۵۰ متری کنترل می‌کند. در نهایت یک نمونه ربات ماهی طبق مکانیزم و طرح‌های بیان شده در این مقاله ساخته شد.

آزمایشات نشان می‌دهند که با افزایش اختلاف فاز بین دو سرووموتور مجاور در باله، دوران‌های نامطلوب حول محورهای مختصات، که منجر به کاهش تعادل ربات می‌شود، کاهش می‌یابد. همچنین این موضوع سبب نوسانات سرعت کمتر در حرکت ربات ماهی می‌شود. در آینده آزمایشات تحت فشار آب و بررسی فاکتورهای موثر در افزایش بازدهی در این شرایط، می‌تواند دستور کار محققان قرار گیرد. در مطالعات آینده، پژوهشگران همچنین می‌توانند ظرفیت حمل بار و فاکتورهای موثر در بالا بردن این ظرفیت را بررسی کنند. هماهنگی و کار گروهی ربات ماهی‌ها نیز مد نظر محققان است [13]. صرفه جویی در انرژی بوسیله تولید باله‌های الکتریکی و همچنین تولید میکرو ربات‌ها برای رفع محدودیت‌های فضایی نیز مورد توجه دانشمندان است [14,15].

تشکر و قدردانی

نویسندگان از شرکت پالایش نفت تبریز به دلیل تامین هزینه‌های مالی پروژه کمال تشکر را دارند.

مراجع

- [1] Low, K. H., "Modeling and parametric study of modular undulating fin rays for fish robots," Mechanism and Machine Theory, Vol. 44, pp. 615-632, 2009.
- [2] Fontana, M. G., *Corrosion engineering (Third Edition)*, McGraw-Hill. 1986.
- [3] Low, K. H., "Preface: Why biomimetic?," Mechanism and Machine Theory, Vol. 44, pp. 511-512, 2009.
- [4] Low, K. H., "Parametric study of modular and reconfigurable robotic fish with oscillating caudal fin mechanisms," *International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin, China, 2007.
- [5] Low, K. H., "Maneuvering of biomimetic fish by integrating a buoyancy body with modular undulating fins," *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 4, pp. 671-695, 2007.
- [6] Hu, T., Shen, L., Lin, L., Xu, H., "Biological inspirations, kinematics Modelling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus*," Mechanism and Machine Theory, Vol. 44, pp. 633-645, 2009.
- [7] Zhang, D., Hu, D., Shen, L., Xie, H., "Design of an artificial bionic neural network to control fish-robot's locomotion," *Neurocomputing*, Vol. 71, pp. 648-654, 2008.
- [8] Low, K. H., "Design, development and locomotion control of bio-fish robot with undulating anal fins," *International Journal of Robotics and Automation*, Vol. 22, pp. 88-99, 2007.
- [9] Willy, A., Low, K. H., "Development and initial experiment of modular undulating fin for untethered biorobotic AUVs," *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*.
- [10] Low, K. H., Willy, A., "Biomimetic motion planning of an undulating robotic fish fin," *Journal of Vibration and Control*, Vol. 12, pp. 1337-1359, 2006.
- [11] Sfakiotakis, M., Lane, D. M., Davies, J. B. C., "Review of fish swimming modes for aquatic locomotion," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 24, pp. 237-252, 1999.
- [12] Lauder, G. V., Drucker, E. G., "Morphology and experimental hydrodynamics of fish fin control surfaces," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 29, pp. 556-571, 2004.
- [13] Shao, J., Wang, L., Yu, J., "Development of an artificial fish-like robot and its application in cooperative transportation," *Control Engineering Practice* Vol. 16, pp. 569-584, 2008.
- [14] Sugiyama, K., Ishii, K., Kaneto, K., "Development of an oscillating fin type actuator for underwater robots," *International Congress Series*, Vol. 1301, pp. 214-217, 2007.
- [15] Wanga, Z., Hanga, G., Li, J., Wang, Y., Xiao, K., "A micro-robot fish with embedded SMA wire actuated flexible biomimetic fin," *Sensors and Actuators A*, Vol. 144, pp. 354-360, 2008.