

مدل سازی و کنترل تعقیب اجسام متحرک برای یک ربات ماهی سه لینیکی

حامد آل منصور* (کارشناس ارشد)

غلامرضا ونوقی (استاد)

دانشکده ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۳)
دوری ۲ - ۳۰، شماره ۱/۲، ص. ۸۹-۷۷

هدف این مطالعه مدل سازی دینامیکی ربات ماهی سه لینیکی به صورت تحلیلی، و کنترل آن به منظور تعقیب اجسام متحرک است. برای مدل سازی دینامیکی ربات ماهی از نظریه ی جسم کشیده با دامنه ی حرکات بزرگ لایتهیل استفاده شده و نیروهای پیش رانش با استفاده از این نظریه به دست آمده است. با تعیین نیروهای پیش رانش، معادلات دینامیکی ربات ماهی نیز به دست آمده است. به منظور تعقیب جسم متحرک از دو روش کنترلی فازی و یادگیری عاطفی استفاده شده است. در نهایت معادلات دینامیکی ربات ماهی شبیه سازی شده و عملکرد کنترل کننده ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که مدل سازی انجام شده به خوبی اثرات ناپایا را مدل سازی می کند و ربات قادر است به وسیله ی کنترل کننده های طراحی شده مأموریت خود را به خوبی انجام دهد. همچنین این نتایج نشان می دهد که کنترل کننده های طراحی شده نسبت به عدم قطعیت های پارامتریک نیز مقاومت خوبی از خود نشان می دهند.

واژگان کلیدی: ربات ماهی، نظریه ی لایتهیل، کنترل کننده فازی، یادگیری عاطفی.

۱. مقدمه

در دو دهه ی اخیر استفاده از خودروهای زیرسطحی و ربات های زیردریایی بسیار متداول شده است. خودروهای دریایی بدون سرنشین قادر به انجام مأموریت هایی هستند که انسان به دلیل مخاطره انگیز بودن و محدودیت فعالیت در زیر آب قادر به انجام آن نیست. اما این نوع خودروها با مشکلاتی چون عدم مانورپذیری مناسب و بازده پایین مواجه اند.^[۱] به منظور یافتن پیش رانش مانورپذیرتر و پربازده تر کافی است به طبیعت نگاه ی بیندازیم. ماهیان میلیون ها سال است که به وسیله ی باله ها و دم خود در محیط های آبی شنا می کنند و در طی این سال ها قابلیت شنای آنها بسیار بیشتر از تکنولوژی دریایی که ما تا به امروز به آن دست یافته ایم تکامل پیدا کرده است. ماهی تن می تواند در سرعت بالا و با بازده زیاد شنا کند، اردک ماهی می تواند در یک لحظه شتاب بگیرد و مارماهی می تواند به صورت ماهرانه یی در محیط های باریک نفوذ کند.^[۲] همچنین ماهیان قادرند جهت حرکت خود را بدون کاهش سرعت و با شعاع چرخشی به اندازه ی ۱۰ تا ۳۰ درصد طول بدن شان معکوس کنند.^[۳] از مهم ترین کاربردهای ربات ماهی می توان به بررسی زندگی دریایی، بررسی خط لوله، سرگرمی و حوزه های نظامی اشاره کرد.

یکی از چالش های پیش رو در طراحی خودروهای زیرسطحی بیومیمتیک، ایجاد مدل های هیدرو دینامیکی برای طراحی حرکت و کنترل بالادرنگ است. در اینجا با توجه به مزایای سادگی، بسیاری از مدل های ایجاد شده از فرضیات ساده کننده ی مختلفی استفاده می کنند.^[۴،۵] تاکنون مدل سازی های مختلفی از قبیل استفاده از

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت ۱۳۹۲/۶/۱۹، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۲/۱۰، پذیرش ۱۳۹۲/۱۲/۲۰.

hamed.alemansour@gmail.com
vossough@sharif.edu

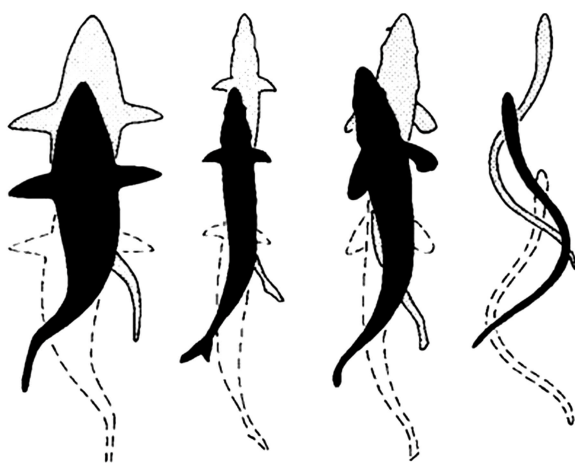
فرض جریان شبه پایا و استفاده از نظریه ی دوبعدی باله ها،^[۶] شبه استاتیک در نظر گرفتن سیال و به دست آوردن نیروی پیش رانش بدون در نظر گرفتن سرعت ربات.^[۷] استفاده از نظریه ی لایتهیل برای حرکت با دامنه ی کوچک^[۷] و استفاده از نظریه ی لایتهیل برای حرکت با دامنه ی بزرگ^[۸] برای ربات ماهی ارائه شده است. اما اغلب این مدل سازی ها، ساده سازی های بسیاری به همراه دارند به گونه یی که عملاً مدل به دست آمده دیگر دقت قابل قبولی نخواهد داشت. اولین ربات ماهی به نام روبوتیونا در سال ۱۹۹۴ و در دانشگاه ام آی تی با هدف ساخت سیستم پیش رانش مطلوب برای خودروهای زیرسطحی ارائه شد. به دلیل سرعت و شتاب بالای ماهی تن، این ماهی به عنوان مدل انتخاب شد.^[۹] پس از روبوتیونا، روبوپایک در دانشگاه ام آی تی و با الهام گیری از اردک ماهی ساخته شد. عمده ی تمرکز این دو پروژه بر پارامتری سازی مدل سینماتیکی استوار بود و تنها ساخت یک مدل دینامیکی مورد نظر نبود.^[۱۰،۱۱] میسون تلاش کرد تا بتواند شنای ماهی از گونه ی کارانجیفرم^۱ را تقلید کند. او یک مدل دینامیکی برای به دست آوردن نیروهای پیش رانش و معادلات دینامیکی نوعی ربات ماهی سه لینیکی که فقط قادر به حرکت در یک راستا بود به دست آورد. در این مدل نیروی پیش رانش با فرض جریان شبه پایا به دست آمده بود و اثرات جرم افزوده وارده بر دم نادیده گرفته شده بود.^[۱۲] مورگانسن در سال ۲۰۰۱ مدل میسون را گسترش داد و اثرات جرم افزوده را در نظر گرفت. در این مدل ربات ماهی قادر به حرکت در صفحه بود و از نظریه ی ایرفویل ها در جریان شبه پایا برای به دست آوردن نیروهای برا استفاده شده بود.^[۱۳] در سال ۲۰۰۳ مورگانسن از تکنیک های مکانیک هندسی و نظریه ی کنترل هندسی برای مدل سازی و کنترل ربات ماهی سه لینیکی

۲. مدل سازی دینامیکی

در این بخش با استفاده از نظریه ی جسم کشیده با دامنه ی حرکات بزرگ لایتهیل، یک ربات ماهی سه لاینکی مدل سازی شده است. لایتهیل در سال ۱۹۷۰ نظریه یی ارائه کرد که براساس آن نیروهای پیش رانش ماهی کارنجی فرم به صورت تحلیلی محاسبه می شود. ماهیان کارنجی فرم در گروه شناگرهای BCF^۳ قرار می گیرند. از گونه های حرکتی این گروه می توان به انگوتیلیفرم^۴، سابکارنجیفرم^۵، کارنجی فرم و تونیفرم^۶ اشاره کرد. در حرکت انگوتیلیفرم تمام بدن در ایجاد پیش رانش نقش دارد. نیروی پیش راننده به وسیله ی حرکت یک موج پیش رونده ی عرضی از سر به سمت دم ایجاد می شود. به دلیل نیروی پسا زیاد و همچنین پیش رانش غیر بهینه ی انگوتیلیفرم، ماهیان سریع تنها از قسمت انتهایی بدن خود در ایجاد پیش رانش استفاده می کنند. هرچه از نوع حرکتی سابکارنجیفرم به سمت کارنجی فرم و تونیفرم پیش می رویم از نقش قسمت جلویی بدن در ایجاد پیش رانش کاسته شده و به نقش قسمت های انتهایی آن افزوده می شود (شکل ۱). ماهی کارنجی فرم گونه یی از ماهیان است که حرکت بدن شان در یک سوم انتهایی آن محدود شده و قسمت جلویی بدن تقریباً صلب است.^[۳۰]

از ویژگی های نظریه ی لایتهیل می توان به در نظر گرفتن اثرات جرم افزوده و غیر پایا و تحلیلی بودن آن اشاره کرد. در نظریه ی لایتهیل فرض می شود که ماهی در یک سطح افقی ثابت شنا می کند. محور z عمودی و محورهای x و y محورهای افقی هستند. فاصله نقطه یی مفروض از انتهای دم ماهی به وسیله پارامتری به نام (a) ، که در راستای ستون فقرات اندازه گیری می شود، مشخص می گردد (شکل ۲). همچنین $(\partial y/\partial a, \partial x/\partial a)$ بردار یکه در جهت عمود بر ستون فقرات و $(\partial x/\partial a, \partial y/\partial a)$ بردار یکه در جهت مماس بر آن است. Π صفحه یی است که انتهای دم را در زاویه یی عمود بر ستون فقرات قطع می کند و V نیم فضایی است که به وسیله ی صفحه ی Π محدود شده است و ماهی را در بر می گیرد. u سرعت در جهت ستون فقرات، w سرعت عمود بر آن، و m جرم افزوده است. لایتهیل نشان داد که می توان جرم افزوده را برای یک سطح مقطع معین به صورت $2.5\pi\rho s^2$ بیان کرد، که در آن s عمق سطح مقطع است و همچنین نیروی فشاری اعمالی به روی صفحه Π می توان به صورت $\rho\Delta mw$ نوشت.^[۲۹]

لایتهیل اندازه حرکت در واحد طول را به صورت $mw(-\partial y/\partial a, \partial x/\partial a)$



الف) انگوتیلی فرم؛ ب) سابکارنجی فرم؛ ج) کارنجیفرم؛ د) تونی فرم.

شکل ۱. تغییرات نوع حرکت شناگرهای BCF.^[۳۰]

بهره برد و با در نظر گرفتن اثرات جرم افزوده به صورت ساده شده و همچنین در نظر گرفتن نیروی برا (لیفت) و نیروی پسا (درگ) به صورت نیمه ایستا، توانست به یک مدل ساده شده برای ربات ماهی متحرک در صفحه دست یابد.^[۱۱] مورگانشن در سال ۲۰۰۷ مدل خود را به حرکت در سه بعد گسترش داد؛ او این مدل را به وسیله ی یک ربات ماهی بسیار پیشرفته که در دانشگاه واشنگتن ساخته شده بود مورد آزمایش قرار داد. اما باز هم در این مدل از فرضیه ی جریان نیمه پایا استفاده شده بود.^[۶] از دیگر کارهای انجام شده می توان به کارهای لیو در دانشگاه اسکس اشاره کرد.^[۱۸-۱۳] تمرکز اصلی لیو بر ایجاد الگوریتم کنترل حرکت ماهی گون برای ربات ماهی به منظور تقلید از حرکت ماهی واقعی و همچنین ایجاد الگوریتم جهت یابی خودکار برای ربات بود. او آبی را که ربات ماهی در آن شنا می کند یک سیال نیمه ایستا در نظر گرفت و فرض کرد که نیروی پیش رانش را می توان بدون در نظر گرفتن سرعت ربات ماهی و تنها با پارامترهای حرکتی دم ربات ماهی به دست آورد.^[۱۵] بسیاری از پژوهش های دیگر نیز بر ایجاد یک مدل سینماتیکی بر پایه ی مطالعات زیست شناسی برای تعیین شیوه ی حرکت ربات ماهی متمرکز شده و کم تر به نیروهای بین ربات ماهی و آب پرداخته شده است.^[۱۹، ۱۶، ۱۲] به طور مثال، برت به کمک الگوریتم ژنتیک و با مطالعه ی شیوه ی حرکتی ماهی تن، پارامترهای سینماتیکی ربات ماهی را به گونه یی به دست آورد که بازده را بهینه می کرد.^[۲۰] همچنین طول لینک های یک ربات ماهی چهار لاینکی به منظور داشتن خصوصیات هیدرودینامیکی مناسب بهینه شد.^[۲۱] یو حرکت ربات ماهی شش مفصلی را به چند حالت پایه دسته بندی کرد و یک کتابخانه ی جست وجو درست کرد تا بتواند حرکت ماهی کارانجیفرم واقعی را تقلید کند.^[۲۲]

بخش عظیمی از پژوهش های انجام شده در زمینه ی کنترل ربات ماهی، به بهینه سازی عددی و کنترل زوایای مفاصل ربات ماهی در مدل سینماتیکی به منظور تقلید از حرکت ماهی واقعی اختصاص داشته است.^[۲۶-۲۳، ۲۰، ۱۹، ۱۶، ۱۲] کاتو یک کنترل کننده ی فازی برای کنترل باله های جانبی یک ربات ماهی طراحی کرد؛ این کنترل برای مانور پذیری در صفحه و به منظور رسیدن به یک نقطه ی معین و ثابت ماندن در یک نقطه طراحی شده بود.^[۲۸، ۲۷] لیو برای کنترل سرعت ربات ماهی خود از یک کنترل پی آی دی و برای کنترل جهت آن نیز از یک کنترل کننده ی فازی استفاده کرد.^[۱۹]

با توجه به مرور ادبیات انجام شده جای خالی یک مدل تحلیلی دقیق برای پیش بینی نیروهای وارده بر ربات ماهی، و کنترل و شبیه سازی ربات بر پایه ی این مدل حس می شود. خوشبختانه لایتهیل در پژوهشی که انجام داد یک رابطه ی تحلیلی برای پیش بینی نیروهای وارده بر ماهی کارانجیفرم ارائه داده است.^[۲۹] در این نوشتار برای اولین بار از نظریه ی جسم کشیده با دامنه ی حرکت بزرگ لایتهیل که یکی از دقیق ترین نظریه ها پیش بینی کننده ی نیروهای وارده بر ماهی کارانجیفرم است برای به دست آوردن نیروهای ناشی از دم زدن ربات ماهی سه لاینکی استفاده شد و معادلات دینامیکی ربات ماهی به صورت تحلیلی به دست آورده شد. در نهایت نیز از کنترل کننده ی فازی و کنترل کننده ی هوشمند مبتنی بر یادگیری عاطفی مغز (BELBIC)^۲ برای کنترل ربات ماهی به منظور تعقیب اجسام متحرک بهره گرفته و این دو نوع کنترل کننده با یکدیگر مقایسه شده اند. بنابراین بخش دوم این مقاله به مدل سازی دینامیکی ربات ماهی اختصاص یافته است. بخش سوم به طراحی کنترل کننده ی فازی و بخش چهارم به طراحی BELBIC می پردازد. در بخش پنجم نتایج شبیه سازی های رایانه یی ارائه شده و در نهایت در بخش ششم نتیجه گیری کلی بیان شده است.

شده، به صورت رابطه‌ی ۲ درمی‌آید:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \int_0^{L_r} m_r v_r \left(-\frac{\partial y}{\partial a}, \frac{\partial x}{\partial a} \right) da \\ & + \frac{d}{dt} \int_{L_r}^{L_1+L_r} m_v v_v \left(-\frac{\partial y}{\partial a}, \frac{\partial x}{\partial a} \right) da = -(P, Q) \\ & + \left[-u_r m_r v_r \left(-\frac{\partial y}{\partial a}, \frac{\partial x}{\partial a} \right) + {}^\circ \int \Delta m_r v_r^\dagger \left(\frac{\partial x}{\partial a}, \frac{\partial y}{\partial a} \right) \right]_{a=0} \quad (2) \end{aligned}$$

با جایگزینی $\partial y/\partial a$ و $\partial x/\partial a$:

$$\begin{aligned} P &= -\frac{d}{dt} \left(\int_0^{L_r} m_r v_r \sin \theta_r da + \int_{L_r}^{L_1+L_r} m_v v_v \sin \theta_v da \right) \\ &+ \left[-u_r m_r v_r \sin \theta_r + {}^\circ \int \Delta m_r v_r^\dagger \cos \theta_r \right]_{a=0} \\ Q &= -\frac{d}{dt} \left(\int_0^{L_r} m_r v_r \cos \theta_r da + \int_{L_r}^{L_1+L_r} m_v v_v \cos \theta_v da \right) \\ &+ \left[-u_r m_r v_r \cos \theta_r - {}^\circ \int \Delta m_r v_r^\dagger \sin \theta_r \right]_{a=0} \quad (3) \end{aligned}$$

سرعت لینک اول دم ربات ماهی در فاصله‌ی a از انتهای دم ربات برابر است با:

$$\begin{cases} u_v = u \cos \theta_v - v \sin \theta_v + \dot{\psi} r_b L_b \sin \theta_v \\ v_v = u \sin \theta_v + v \cos \theta_v \\ + (L_1 + L_r - a) \dot{\theta}_v - \dot{\psi} (r_b L_b \cos \theta_v + L_1 + L_r - a) \end{cases} \quad (4)$$

سرعت لینک دوم دم ربات ماهی در فاصله‌ی a از انتهای دم ربات برابر است با:

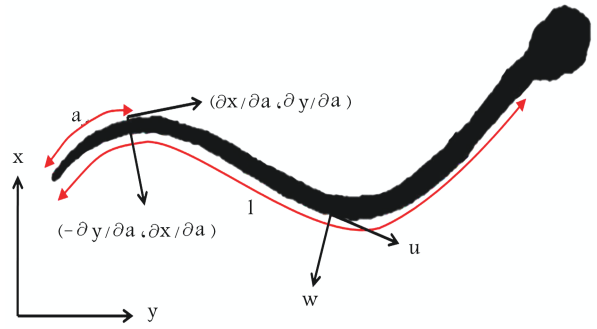
$$\begin{aligned} u_r &= \dot{\psi} (r_b L_b \sin \theta_r + L_1 \sin(\theta_r - \theta_v)) + \\ & u \cos \theta_r - v \sin \theta_r - L_1 \dot{\theta}_v \sin(\theta_r - \theta_v) \\ v_r &= -\dot{\psi} (r_b L_b \cos \theta_r + L_1 \cos(\theta_r - \theta_v) + L_r - a) + \\ & u \sin \theta_r + v \cos \theta_r + L_1 \dot{\theta}_v \cos(\theta_r - \theta_v) + (L_r - a) \dot{\theta}_r \quad (5) \end{aligned}$$

عبارت $-\frac{d}{dt} \int_0^{L_r} m_r v_r \sin \theta_r da$ را P_r می‌نامیم، و بنابراین:

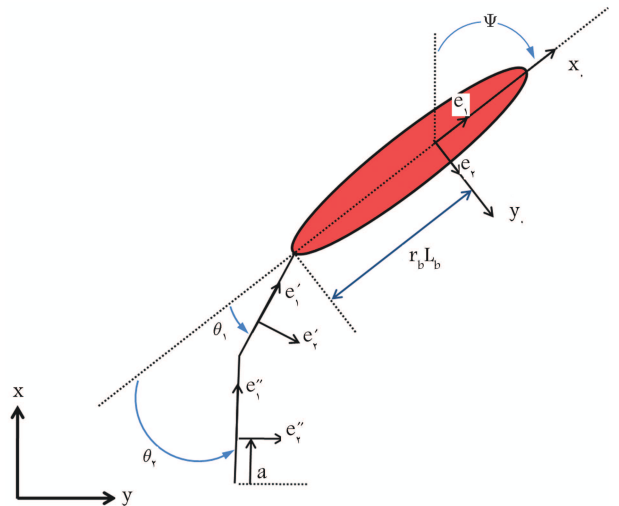
$$P_r = P_{r1} + P_{r2} \dot{u} + P_{r3} \dot{v} + P_{r4} \dot{r} \quad (6)$$

هریک از عبارات رابطه‌ی ۶ برابر می‌شوند با:

$$\begin{aligned} P_{r1} &= -{}^\circ \int \Delta \rho \pi A_r \left[u \dot{\theta}_r \sin \theta_r + v \dot{\theta}_r \cos \theta_r \right. \\ &+ L_1 \ddot{\theta}_v \sin \theta_r \cos(\theta_r - \theta_v) + L_1 \dot{\theta}_v \dot{\theta}_r \cos \theta_r \cos(\theta_r - \theta_v) \\ &- (\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_v) L_1 \dot{\theta}_v \sin \theta_r \sin(\theta_r - \theta_v) \\ &- \dot{\psi} \dot{\theta}_r \cos \theta_r (r_b L_b \cos \theta_r + L_1 \cos(\theta_r - \theta_v)) \\ &\left. + \dot{\psi} \sin \theta_r (r_b L_b \dot{\theta}_r \sin \theta_r + L_1 (\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_v) \sin(\theta_r - \theta_v)) \right] \\ &- {}^\circ \int \Delta \rho \pi B_r \left[\ddot{\theta}_r \sin \theta_r + \dot{\theta}_r (\dot{\theta}_r - \dot{\psi}) \cos \theta_r \right] \\ P_{r2} &= -{}^\circ \int \Delta \rho \pi A_r \sin^2 \theta_r, \quad P_{r3} = -{}^\circ \int \Delta \rho \pi A_r \sin \theta_r \\ P_{r4} &= {}^\circ \int \Delta \rho \pi A_r \sin \theta_r (r_b L_b \cos \theta_r + L_1 \cos(\theta_r - \theta_v)) \\ &+ {}^\circ \int \Delta \rho \pi B_r \sin \theta_r \quad (7) \end{aligned}$$



شکل ۲. دستگاه مختصات، بردارهای یکپه و بردارهای سرعت مماسی و عمودی استفاده شده برای توصیف حرکت ماهی.



شکل ۳. نمای شماتیک ربات ماهی سه‌لینکی و برخی از مقادیر فیزیکی و هندسی ربات ماهی نظیر زوایا و بردارهای یکپه.

بیان کرد که نرخ تغییر آن را می‌توان به صورت جمع سه عبارت نوشت: (الف) نرخ تغییر ناشی از جابه‌جایی اندازه حرکت خارج از V از طریق صفحه‌ی II؛ (ب) نرخ تغییر ناشی از نیروی فشاری اعمالی بر صفحه‌ی II؛ (ج) تفاضل نیروهای واکنشی (P, Q) که سیال بر ماهی اعمال می‌کند. بنابراین: [۲۹]

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \int_0^l m w \left(-\frac{\partial y}{\partial a}, \frac{\partial x}{\partial a} \right) da = -(P, Q) \\ & + \left[-u m w \left(-\frac{\partial y}{\partial a}, \frac{\partial x}{\partial a} \right) + {}^\circ \int \Delta m w^\dagger \left(\frac{\partial x}{\partial a}, \frac{\partial y}{\partial a} \right) \right]_{a=0} \quad (1) \end{aligned}$$

در این نوشتار طول لینک اول دم با L_1 و لینک دوم با L_r نمایش داده شده است. زوایای ψ ، θ_v و θ_r و همچنین بردارهای یکپه (e_v, e_r) ، (e_v', e_r') و (e_v'', e_r'') در شکل ۳ تعریف شده‌اند. سرعت بدن ربات ماهی را در جهت e_v با u و در جهت e_r با v نشان داده‌ایم. سرعت نقطه‌ی دلخواه از لینک اول دم، در جهت e_v' با u_1 و در جهت e_r' با v_1 نشان داده شده است. همچنین سرعت نقطه‌ی دلخواه از لینک دوم دم را در جهت e_v'' با u_2 و در جهت e_r'' با v_2 نشان داده‌ایم.

رابطه‌ی ۱ با توجه به مختصات به کار گرفته شده برای ربات ماهی در نظر گرفته

پارامترهای A_1, B_1 و A_2, B_2 چنین تعریف شده اند:

$$A_1 = \int_{L_r}^{L_1+L_r} s_1^2 da \quad B_1 = \int_{L_r}^{L_1+L_r} s_1^2 (L_1 + L_r - a) da \quad (8)$$

$$A_2 = \int_0^{L_r} s_2^2 da, \quad B_2 = \int_0^{L_r} s_2^2 (L_r - a) da \quad (9)$$

عبارت $P_1 - \frac{d}{dt} \int_{L_r}^{L_1+L_r} m_1 v_1 \sin \theta_1 da$ می نامیم، و بنابراین:

$$P_1 = P_{11} + P_{12} \dot{u} + P_{13} \dot{v} + P_{14} \dot{r} \quad (10)$$

عبارات رابطه ی ۱۰ تبدیل می شوند به:

$$P_{11} = -\frac{1}{4} \rho \pi A_1 \left[u \dot{\theta}_1 \sin 2\theta_1 + \dot{\theta}_1 (v - \dot{\psi} r_b L_b) \cos 2\theta_1 \right] - \rho \pi B_1 \left[\ddot{\theta}_1 \sin \theta_1 + \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 - \dot{\psi}) \cos \theta_1 \right]$$

$$P_{12} = -\rho \pi A_1 \sin^2 \theta_1, \quad P_{13} = -\rho \pi A_1 \sin 2\theta_1, \quad P_{14} = \rho \pi A_1 r_b L_b \sin 2\theta_1 + \rho \pi B_1 \sin \theta_1 \quad (11)$$

با محاسبه ی عبارت $P_2, [-u_2 m_2 v_2 \sin \theta_2 + \rho \pi B_2 v_2^2 \cos \theta_2]_{a=0}$ برابر خواهد شد با:

$$P_2 = \rho \pi B_2 S_r^2 \left(u \sin \theta_2 + v \cos \theta_2 + L_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_2 - \theta_1) + L_2 \dot{\theta}_2 - \dot{\psi} (r_b L_b \cos \theta_2 + L_1 \cos(\theta_2 - \theta_1) + L_2) \right) \times \left[-\rho \pi u \sin 2\theta_2 + (v - r_b L_b \dot{\psi}) (\sin^2 \theta_2 - \cos^2 \theta_2) + \rho \pi L_1 (\dot{\theta}_1 - \dot{\psi}) \times (\cos \theta_1 - \cos(\theta_1 - 2\theta_2)) + \rho \pi L_2 (\dot{\theta}_2 - \dot{\psi}) \cos \theta_2 \right] \quad (12)$$

حال عبارات مختلف نیروی Q محاسبه می شود. عبارت $-\frac{d}{dt} \int_0^{L_r} m_2 v_2 \cos \theta_2 da$ را Q_2 می نامیم، و بنابراین:

$$Q_2 = Q_{21} + Q_{22} \dot{u} + Q_{23} \dot{v} + Q_{24} \dot{r} \quad (13)$$

هریک از عبارات رابطه ی ۱۳ برابرند با:

$$Q_{21} = -\rho \pi A_2 \left[u \dot{\theta}_2 \cos 2\theta_2 - v \dot{\theta}_2 \sin 2\theta_2 + L_1 \ddot{\theta}_1 \cos \theta_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) - L_1 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) - (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) L_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) + \dot{\psi} \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 (r_b L_b \cos \theta_2 + L_1 \cos(\theta_2 - \theta_1)) + \dot{\psi} \cos \theta_2 (r_b L_b \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 + L_1 (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) \sin(\theta_2 - \theta_1)) \right] - \rho \pi B_2 \left[\ddot{\theta}_2 \cos \theta_2 - \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 - \dot{\psi}) \sin \theta_2 \right]$$

$$Q_{22} = -\rho \pi A_2 \sin 2\theta_2, \quad Q_{23} = -\rho \pi A_2 \cos^2 \theta_2, \quad Q_{24} = \rho \pi A_2 \cos \theta_2 (r_b L_b \cos \theta_2 + L_1 \cos(\theta_2 - \theta_1)) + \rho \pi B_2 \cos \theta_2 \quad (14)$$

عبارت $Q_1 - \frac{d}{dt} \int_{L_r}^{L_1+L_r} m_1 v_1 \cos \theta_1 da$ می نامیم، و بنابراین:

$$Q_1 = Q_{11} + Q_{12} \dot{u} + Q_{13} \dot{v} + Q_{14} \dot{r} \quad (15)$$

هریک از عبارات رابطه ی ۱۵ برابرند با:

$$Q_{11} = -\rho \pi A_1 \left[u \dot{\theta}_1 \cos 2\theta_1 - \dot{\theta}_1 (v - \dot{\psi} r_b L_b) \sin 2\theta_1 \right] - \rho \pi B_1 \left[\ddot{\theta}_1 \cos \theta_1 - \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 - \dot{\psi}) \sin \theta_1 \right]$$

$$Q_{12} = -\rho \pi A_1 \sin 2\theta_1, \quad Q_{13} = -\rho \pi A_1 \cos^2 \theta_1, \quad Q_{14} = \rho \pi A_1 r_b L_b \cos^2 \theta_1 + \rho \pi B_1 \cos \theta_1 \quad (16)$$

با محاسبه ی عبارت $Q_2, [-u_2 m_2 v_2 \cos \theta_2 + \rho \pi B_2 v_2^2 \sin \theta_2]_{a=0}$ برابر می شود با:

$$Q_2 = \rho \pi B_2 S_r^2 \left(u \sin \theta_2 + v \cos \theta_2 + L_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_2 - \theta_1) + L_2 \dot{\theta}_2 - \dot{\psi} (r_b L_b \cos \theta_2 + L_1 \cos(\theta_2 - \theta_1) + L_2) \right) \times \left[\rho \pi (v - r_b L_b \dot{\psi}) \sin 2\theta_2 - u (\sin^2 \theta_2 - \cos^2 \theta_2) - \rho \pi L_1 (\dot{\theta}_1 - \dot{\psi}) (\sin \theta_1 - \sin(\theta_2 - \theta_1)) - \rho \pi L_2 (\dot{\theta}_2 - \dot{\psi}) \sin \theta_2 \right] \quad (17)$$

حال با توجه به شکل ۴ و با صرف نظر کردن از جرم و اینرسی دم -- با توجه به ناچیز بودن آن -- مقادیر F_u, F_v و τ وارده به بدنه ی ربات ماهی چنین محاسبه می شود:

$$F_u = P_1 + P_2 + P_3, \quad F_v = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$\tau = r_{P_1} L_1 \sin \theta_1 P_1 + (L_1 \sin \theta_1 + r_{P_2} L_2 \sin \theta_2) P_2 + (L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2) P_3 + (L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2) Q_2 + (L_1 \cos \theta_1 + r_{Q_2} L_2 \cos \theta_2) Q_3 + r_{Q_1} L_1 \cos \theta_1 Q_1 \quad (18)$$

اگر مبدأ دستگاه چرخان منطبق بر مرکز جرم ربات باشد، معادلات حرکت ربات در صفحه عبارت خواهد بود از: [۳۷]

$$\dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi$$

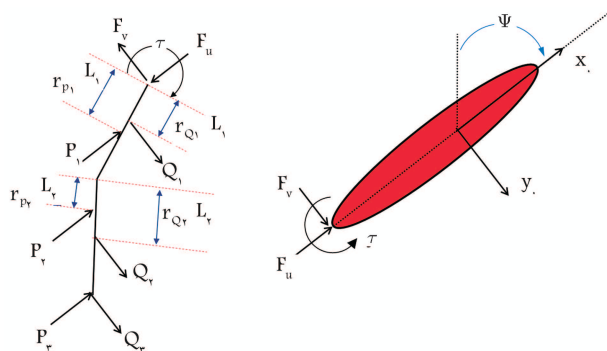
$$\dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi$$

$$\dot{\psi} = r$$

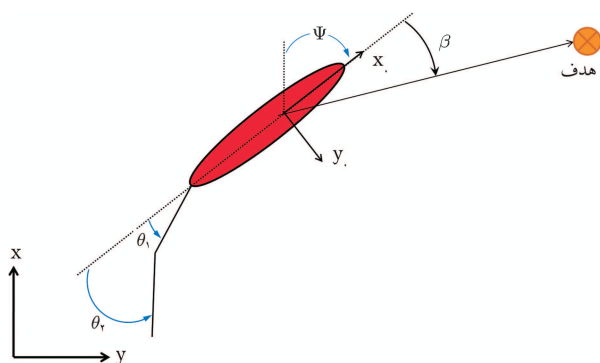
$$(m - X_{\dot{u}}) \dot{u} + (Y_{\dot{v}} - m) v r + F_{Du} = F_u$$

$$(m - Y_{\dot{v}}) \dot{v} + (m - X_{\dot{u}}) u r + F_{Dv} = F_v$$

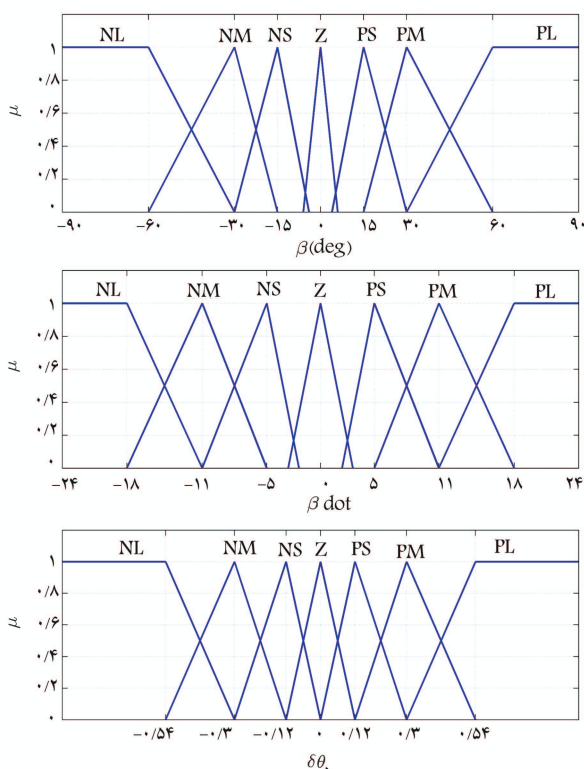
$$(I_z - N_{\dot{r}}) \dot{r} + (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}}) u v + \tau_{Dr} = -\tau - r_b L_b F_v \quad (19)$$



شکل ۴. نیرو و گشتاورهای ناشی از دم زدن وارده بر ربات.



شکل ۵. جهت‌گیری ربات نسبت به نقطه‌ی هدف و نحوه‌ی تعریف زاویه‌ی β .



شکل ۶. توابع تعلق فازی برای β ، $\dot{\beta}$ و $\delta\theta$ به‌منظور کنترل جهت ربات.

جدول ۱. قواعد فازی سیستم کنترل جهت.

β							$\dot{\beta}$
PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL	
Z	NM	NM	NL	NL	NL	NL	NL
PS	Z	NS	NM	NL	NL	NL	NM
PZ	PM	Z	NS	NM	NL	NL	NS
PL	PL	PS	Z	NS	NL	NL	Z
PL	PL	PM	PS	Z	NM	NM	PS
PL	PL	PL	PM	PS	Z	NS	PM
PL	PL	PL	PL	PM	PM	Z	PL

که در آن F_{Du} نیروی پسا در راستای x_o ، F_{Dv} نیروی پسا در راستای y_o و τ_{Dr} نیروی پسا دورانی است. همچنین $-X_u$ جرم افزوده در راستای محور x_o ناشی از شتاب $\ddot{u}$ ، $-Y_v$ جرم افزوده در راستای محور y_o ناشی از شتاب $\ddot{v}$ و $-N_r$ اینرسی افزوده ناشی از شتاب دورانی ربات است.

۳. طراحی کنترل‌کننده‌ی فازی

در بخش قبل معادلات دینامیکی ربات‌ماهی سه‌لینکی به‌صورت تحلیلی به دست آمد. چنان‌که مشاهده شد از آنجا که هدف تحقیق مدل‌سازی دقیق ربات‌ماهی بود، شکل نیروها و معادلات دینامیکی به دست آمده بسیار پیچیده، طولانی و غیرخطی شد و این امر طراحی کنترل‌کننده‌ی غیرخطی و مقاوم مبتنی بر مدل را ناممکن ساخت. از این رو برای طراحی کنترل‌کننده‌ی ربات‌ماهی به روش‌های فازی و مبتنی بر سیستم‌های هوشمند روی آورده شد. در این قسمت یک کنترل‌کننده‌ی فازی برای کنترل جهت ربات و کنترل‌کننده‌ی دیگر برای کنترل فرکانس دم‌زدن طراحی شده است.

زاویه‌ی دم به‌صورت یک تابع سینوسی از زمان و طبق معادله‌ی ۲۰ تعریف شده که در آن f فرکانس دم‌زدن، $(\theta_{\max})_1$ دامنه‌ی نوسان و $(\theta_0)_1$ زاویه‌ی بایاس است.

$$\begin{cases} \theta_1 = (\theta_0)_1 + (\theta_{\max})_1 \sin(2\pi f_1 t) \\ \theta_2 = (\theta_0)_2 + (\theta_{\max})_2 \sin(2\pi f_2 t) \end{cases} \quad (20)$$

به‌منظور ساده‌تر شدن فرایند کنترل ربات‌ماهی و با الهام از نحوه‌ی حرکت ماهیان در طبیعت، فرکانس دم‌زدن لینک اول و دوم $f_1 = f_2 = f$ و همچنین مقادیر انحراف اولیه‌ی دم $(\theta_0)_1 = (\theta_0)_2 = \theta_0$ برای هر دو لینک یکسان در نظر گرفته می‌شود. با شبیه‌سازی‌های دینامیکی مختلفی که از ربات‌ماهی انجام شد، مشاهده شد که فرکانس دم‌زدن $\theta_{\max}$ تأثیر کمی در جهت‌گیری ربات‌ماهی دارند؛ و ورودی اصلی برای آن که ربات در یک جهت دلخواه قرار گیرد میزان انحراف دم θ_0 است. بنابراین خروجی سیستم کنترلی $\delta\theta_0$ خواهد بود. مطابق با شکل ۵ در طراحی کنترل‌کننده‌ی هدف صفرکردن زاویه‌ی بین بدنه‌ی ربات و نقطه‌ی هدف (β) است. بنابراین خطا در این حالت زاویه‌ی بین ربات و نقطه‌ی هدف تعریف می‌شود. با داشتن مکان و جهت‌گیری ربات‌ماهی (x, y, ψ) و مکان هدف (x_t, y_t) نسبت به دستگاه مختصات مرجع، زاویه‌ی β عبارت خواهد بود از:

$$\beta = \text{ATAN2}((y_t - y) \cos \psi - (x_t - x) \sin \psi, (x_t - x) \cos \psi + (y_t - y) \sin \psi) \quad (21)$$

توابع تعلق در نظر گرفته شده برای β ، $\dot{\beta}$ و $\delta\theta_0$ در شکل ۶ نمایش داده شده است. ورودی‌های کنترل‌کننده‌ی جهت‌گیری عبارت‌اند از: β و $\dot{\beta}$ ، و خروجی آن $\delta\theta_0$ خواهد بود. این کنترل‌کننده‌ی فازی از ۴۹ قاعده و مطابق جدول ۱ تشکیل شده است. NL نشان‌دهنده‌ی منفی بزرگ، NM منفی متوسط، NS منفی کوچک، Z صفر، PS مثبت کوچک، PM مثبت متوسط و PL مثبت بزرگ است.

این توابع تعلق برای یک ربات خاص که مقادیر پارامترهای آن در بخش نتایج آورده شده، بهینه‌سازی شده است. در پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌ی فازی از موتور استنتاج کمینه، فازی‌ساز منفرد، و غیرفازی‌ساز میانگین مراکز استفاده شده است. فرض کنید ربات‌ماهی می‌خواهد جسم متحرکی را تعقیب و فاصله‌ی نسبی خود را تا آن در یک

برای d به گونه‌ای در نظر گرفته شده که ربات در فاصله‌ی ۱٫۵ متری هدف قرار گیرد. این توابع تعلق برای یک ربات خاص که مقادیر پارامترهای آن در بخش نتایج آورده شده بهینه شده است. در پیاده‌سازی کنترل‌کننده از موتور استنتاج کمینه، فازی ساز منفرد، و غیر فازی‌ساز میانگین مراکز استفاده شده است.

۴. طراحی کنترل‌کننده‌ی BELBIC

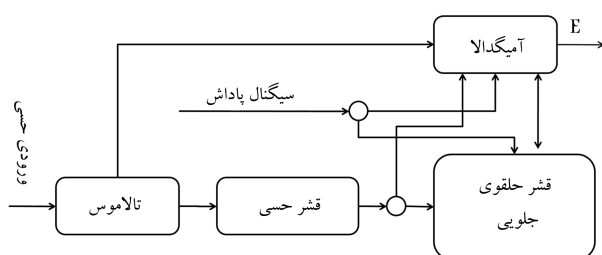
به دلیل ماهیت غیرخطی ربات و همچنین عدم قطعیت پارامتریک و منابع اغتشاشات متعدد، بهره‌گیری از کنترل‌کننده‌های تطبیقی برای کنترل ربات‌های مفید خواهد بود. به صورت سنتی، عواطف به عنوان چیزی تصویری می‌شود که فاقد استدلال و تفکر است؛ اما محققین دریافتند که عواطف در فرایند تصمیم‌گیری نقشی مثبت ایفا می‌کنند. [۲۲] آنان مدلی ایجاد کردند که رفتار آمیگدالا^۷، قشر حلقوی جلویی^۸، تالاموس^۹ و قشر حسی^{۱۰} را مدل می‌کند. [۲۳] آمیگدالا و قشر حلقوی جلویی در پردازش عواطف نقش اصلی را ایفا می‌کنند، در حالی که تالاموس و قشر حسی مسئولیت پردازش ورودی‌های حسی را به عهده دارند. بر پایه‌ی این مدل، یک الگوریتم کنترلی به نام کنترل هوشمند مبتنی بر یادگیری عاطفی (BELBIC) ارائه شده است. BELBIC یک سازوکار تصمیم‌گیری بر مبنای ورودی‌های حسی و سیگنال‌های پاداش است. مهم‌ترین انگیزه برای به کارگیری عواطف در زمینه‌ی کنترل این است که در توسعه‌ی سیستم‌های کنترل هوشمند توجه زیادی به روش‌های مبتنی بر استدلال شده، در حالی که در جهان واقعی بشر برای تصمیم‌گیری از «تعقل» استفاده‌ی محدودی دارد. [۲۴] به دلیل پیچیدگی محاسباتی پایین و آموزش سریع، کنترل‌کننده‌ی BELBIC یک روش قدرتمند در کنترل بلادرنگ و در سیستم‌های تصمیم‌گیری است. [۲۵]

در این بخش به کمک عاطفه یک ساختار کنترلی تطبیقی ارائه می‌شود که از مدل محاسباتی یادگیری عاطفی در آمیگدالا استفاده می‌کند [۲۳] و بدین ترتیب می‌تواند در حضور عوامل غیرخطی، اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها عملکردی مطلوب داشته باشد.

مدل یادگیری عاطفی آمیگدالا و قشر حلقوی جلویی در شکل ۸ نشان داده شده است. وظیفه‌ی تالاموس فراهم کردن یک سیگنال تحریک سریع است. این قابلیت تالاموس به وسیله‌ی فرستادن بزرگ‌ترین سیگنال حسی به آمیگدالا مدل‌سازی می‌شود. بنابراین اگر بردار S نشان‌دهنده‌ی ورودی‌های حسی به سیستم باشد به‌ازاء هر ورودی حسی یک نقطه‌ی ورودی در آمیگدالا (A) وجود خواهد داشت. علاوه بر این، آمیگدالا یک ورودی نیز از تالاموس خواهد داشت (A_{th}) که بیشینه‌ی ورودی‌های حسی است: [۲۵-۲۳]

$$A_{th} = \max(S_i) \quad (22)$$

خروجی هر نقطه در آمیگدالا از ضرب هر ورودی با یک ضریب بهره تطبیقی V_i



شکل ۸. ساختار مدل محاسباتی یادگیری عاطفی در مغز.

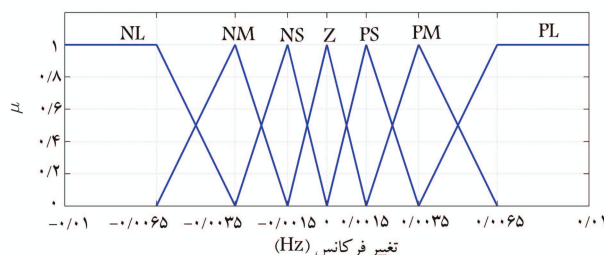
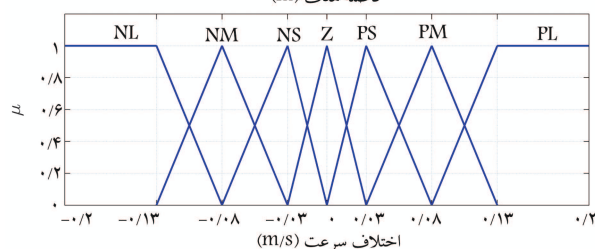
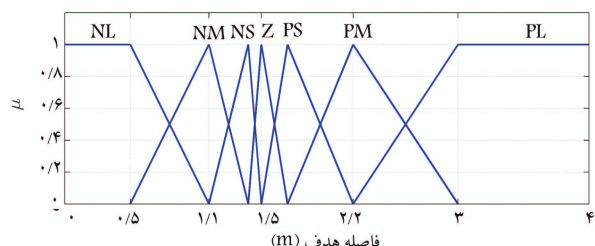
مقدار دلخواه حفظ کند. برای این منظور می‌توان نقاطی را که جسم متحرک از آن عبور می‌کند در هر لحظه به عنوان نقطه‌ی هدف به سیستم کنترل جهت ربات‌ماهی داد. کنترل‌کننده، ورودی θ را به گونه‌ای به سیستم اعمال می‌کند که ربات به صورت مستقیم به سمت هدف حرکت کند. اما هدف ما حفظ فاصله‌ی نسبی از هدف متحرک است؛ برای تحقق این موضوع باید سرعت ربات نیز کنترل شود تا ربات در فاصله‌ی دلخواه از هدف قرار گیرد. به همین منظور در ادامه به مسئله‌ی کنترل فرکانس ربات به روش فازی می‌پردازیم.

برای کنترل فرکانس ربات‌ماهی دو پارامتر به عنوان ورودی‌های کنترل‌کننده تعریف می‌شود. اولین پارامتر فاصله‌ی بین ربات‌ماهی و هدف (d)، و دومین پارامتر اختلاف سرعت بین هدف و ربات‌ماهی ($\delta v = v_t - v_r$) است. خروجی کنترل‌کننده نیز تغییر فرکانس (δf) خواهد بود. این کنترل‌کننده نیز از ۴۹ قاعده‌ی فازی طبق جدول ۲ تشکیل شده است.

توابع تعلق در نظر گرفته شده برای d ، δv و δf مطابق شکل ۷ است. توابع تعلق

جدول ۲. قواعد فازی سیستم کنترل فرکانس.

d							
δv	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL
NM	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL
NS	NL	NL	NL	NS	Z	PM	PL
Z	NL	NL	NS	Z	PS	PM	PL
PS	NL	NL	NS	Z	PS	PM	PL
PM	NL	NL	NS	Z	PS	PM	PL
PL	NL	NL	NS	Z	PS	PM	PL



شکل ۷. توابع تعلق فازی در نظر گرفته شده برای d ، δv و δf .

به دست می‌آید:

$$A_i = S_i V_i \quad (23)$$

قانون یادگیری آمیگدالا طبق رابطه‌ی ۲۴ عبارت است از:

$$\Delta V_i = \alpha_a (S_i \max(\cdot, Rew - \sum_j A_j)) \quad (24)$$

در این رابطه α عبارتی ثابت است و برای تنظیم سرعت یادگیری از آن استفاده می‌شود (نرخ یادگیری آمیگدالا)، S_i ورودی‌های حسی، Rew سیگنال پاداش و خروجی آمیگدالا است.

در آمیگدالا وزن V نمی‌تواند کاهش یابد؛ زیرا زمانی که در آمیگدالا واکنشی عاطفی فراگرفته شد این یادگیری دائمی است و نمی‌تواند فراموش شود. دلیل استفاده از عبارت بیشینه در رابطه‌ی ۲۴ نیز همین موضوع است. اگر واکنشی نامناسب باشد وظیفه‌ی قشر حلقوی جلویی ممانعت از انجام آن عمل است. قانون یادگیری قشر حلقوی جلویی بسیار شبیه آمیگدالا است، اما وزن آن می‌تواند افزایش یا کاهش یابد. خروجی هر نقطه در قشر حلقوی جلویی از ضرب هر ورودی با یک ضریب بهره تطبیقی W_i به دست می‌آید:

$$O_i = S_i W_i \quad (25)$$

قانون یادگیری عاطفی در قشر حلقوی جلویی طبق رابطه‌ی ۲۶ بیان می‌شود. در این رابطه α_o عبارتی ثابت است و برای تنظیم سرعت یادگیری کاربرد دارد:

$$\Delta W_i = \alpha_o (S_i (E' - Rew)) \quad (26)$$

خروجی مدل (E) از جمع خروجی‌های تحریک‌کننده‌ی گره A و کم کردن خروجی‌های بازدارنده‌ی گره O از آن به دست می‌آید. همچنین گره E' از جمع خروجی‌های A به جز A_{th} و کم کردن گره‌های O از آن به دست می‌آید:

$$E = \sum_i A_i - \sum_i O_i \quad (A_{th} \text{ در نظر گرفتن}) \quad (27)$$

$$E' = \sum_i A_i - \sum_i O_i \quad (A_{th} \text{ بدون در نظر گرفتن}) \quad (28)$$

توابع استفاده شده در بلوک‌های سیگنال پاداش و ورودی حسی را می‌توان به صورت توابعی دلخواه از خروجی سیستم (y)، خروجی کنترل‌کننده (u)، ورودی مرجع (y_r) با سیگنال خطا (e) و به صورت روابط ۲۹ در نظر گرفت، که طراح می‌بایست توابع مناسب برای کنترل را بیابد. [۳۶، ۳۲]

$$REW = J(S_i, e, y_p) \quad S_i = f(u, e, y_p, y_r) \quad (29)$$

در طراحی کنترل‌کننده، هدف صفرکردن زاویه‌ی بین بدن ربات و نقطه‌ی هدف (β) است. در این حالت β به عنوان خطا تعریف می‌شود، و خروجی سیستم کنترلی نیز θ خواهد بود. برای کنترل جهت ربات‌ماهی ورودی حسی و سیگنال پاداش به صورت روابط ۳۰ و ۳۱ تعریف شده است:

$$SI = k_1 \beta \quad (30)$$

$$REW = k_2 \beta + k_3 \theta. \quad (31)$$

برای تعقیب جسم متحرک، نقاطی که جسم از آن عبور می‌کند به عنوان نقطه‌ی هدف به سیستم کنترل جهت ربات‌ماهی داده می‌شود؛ برای حفظ فاصله تا آن و کنترل فرکانس نیز دو ورودی حسی به صورت روابط ۳۲ و ۳۳ تعریف می‌شود.

$$SI_1 = k'_1 (d - d_{Des}) + k'_2 \int (d - d_{Des}) \quad (32)$$

$$SI_2 = k'_3 (v_t - v_r) \quad (33)$$

سیگنال پاداش به صورت رابطه‌ی ۳۴ در نظر گرفته شده است:

$$REW = k'_4 f + k'_5 (d - d_{Des}) + k'_6 \int (d - d_{Des}) \quad (34)$$

۵. نتایج

در این بخش نتایج مدل‌سازی دینامیکی، کنترل‌کننده‌ی فازی و کنترل‌کننده‌ی BELBIC ارائه خواهد شد. مقادیر نیروهای F_{Du} ، F_{Dv} و τ_{Dr} در این نوشتار، مطابق رابطه‌ی ۳۵ در نظر گرفته شده است: [۳۷]

$$F_{Du} = C_{uu} u^2, \quad F_{Dv} = C_{vv} v |v|, \quad \tau_{Dr} = C_{rr} r |r| \quad (35)$$

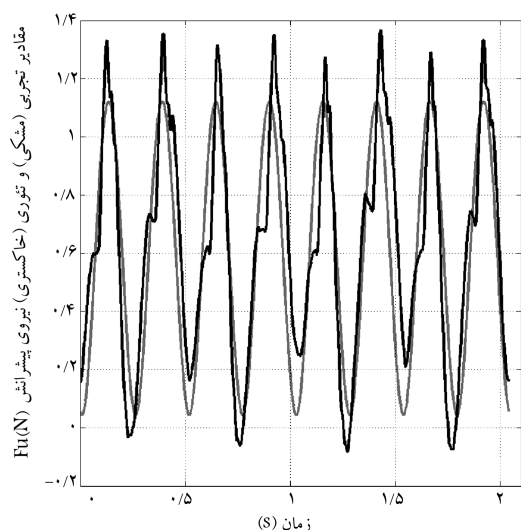
در سال ۱۳۸۸ محققین دانشگاه صنعتی شریف، ربات‌ماهی دولینکی کارانجیفرم را با استفاده از نظریه‌ی لایتهیل با دامنه‌ی حرکت کوچک مدل‌سازی کردند. [۳۷] همچنین در دانشگاه ام‌ای تی، انحنا‌ی دم و زاویه‌ی آن در هر لحظه به صورت تخمینی محاسبه، و با استفاده از رابطه‌ی -- که ساده‌سازی شده‌ی نظریه‌ی لایتهیل است -- نیروی میانگین پیش رانش تخمین زده شد. [۳۸] در هر دو این مراجع ساده‌سازی‌های بسیاری به منظور تخمین نیروی پیش رانش صورت گرفته است. در این نوشتار شکل پروفایل دم در دو لینک یکسان [۳۷] در نظر گرفته شده و از پارامترهای مراجع مربوطه [۳۸، ۳۷] برای شبیه‌سازی ربات استفاده شده است: [۳۷]

$$\begin{aligned} m &= 0.34 \text{ (kg)} & [38] \quad X_u &= Y_v = -1.7, & [38] \\ I_z &= -N_r = 7.5267 \times 10^{-4} & [38] \quad L_b &= 0.2667(m), & [38] \\ C_{uu} &= 17.49 & [38] \quad C_{vv} &= 40.92, & [38] \\ C_{rr} &= 0.409 & [38] \quad A_1 &= 6.396 \times 10^{-2}, & [37] \\ B_1 &= 4.077 \times 10^{-5} & [37] \quad A_2 &= 6.396 \times 10^{-4}, & [37] \\ B_2 &= 4.077 \times 10^{-5} & [37] \quad S_1 &= 6.163 \times 10^{-2}, & [37] \\ r_b &= r_{P_1} = r_{P_2} = 0.5 & [37] \quad S_2 &= 6.163 \times 10^{-2}, & [37] \\ r_{Q_1} &= r_{Q_2} = 0.5 & [37] \quad L_1 &= L_2 = 0.15, & [37] \end{aligned} \quad (36)$$

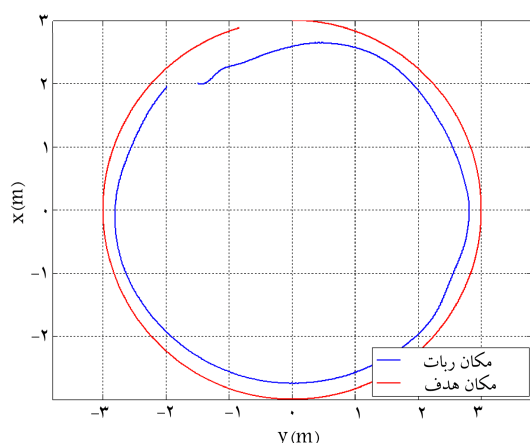
مسیر حرکت ربات در مدت ۱۰ ثانیه با شبیه‌سازی در متلب و قراردادن: $(\theta_{\max})_1 = \pi/12$ ، $(\theta_0)_1 = (\theta_0)_2 = \theta_0 = 0$ ، $f_1 = f_2 = 2\text{Hz}$ و $(\theta_{\max})_2 = \pi/6$ مطابق شکل ۹ و ۱۰ خواهد بود.

همچنین مسیر حرکت ربات به ازاء 1Hz ، $f_1 = f_2 = 1\text{Hz}$ ، $(\theta_0)_1 = (\theta_0)_2 = (\theta_0)_3 = \pi/6$ و $(\theta_{\max})_1 = \pi/12$ ، $(\theta_{\max})_2 = \pi/6$ در مدت ۴۰ ثانیه مطابق شکل ۱۱ است.

اکنون لازم است تا صحت معادلات دینامیکی به دست آمده به گونه‌ی مورد آزمایش قرارگیرد. پیش از این ربات‌ماهی با دم یک‌لینکی مدل‌سازی دینامیکی شده است و با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی صحت نیروهای پیش رانش حاصله



شکل ۱۲. مقدار تجربی و نظری P به ازاء $f_1 = f_2 = 1796 \text{ Hz}$ ، $(\theta_{\max})_1 = 15^\circ$ ، $(\theta_{\max})_2 = 30^\circ$ و $u = 0$ [۸]



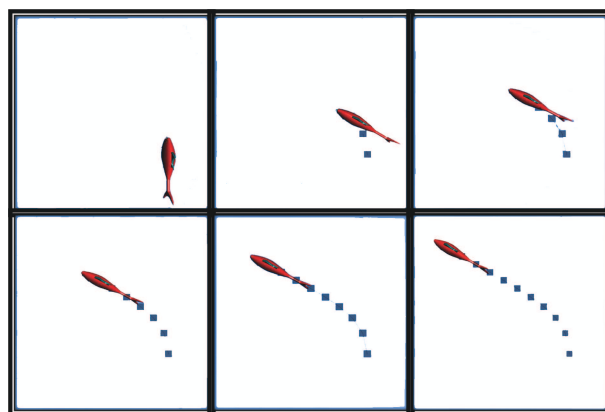
شکل ۱۳. مسیر ربات و هدف روی مسیر دایره‌ای (کنترل کننده‌ی فازی).

در شبیه‌سازی‌های انجام شده زمان نمونه برداری در نرم افزار 0.2° ثانیه، $(\theta_0)_{\max} = 30^\circ$ ، $(\theta_{\max})_1 = 15^\circ$ ، $(\theta_{\max})_2 = 30^\circ$ و $f_{\max} = 2 \text{ Hz}$ در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی تعقیب جسم متحرک بر روی مسیر دایره‌ای بررسی شده است. معادله‌ی حرکت جسم متحرک به صورت رابطه‌ی ۳۷، مکان اولیه‌ی ربات $(2, -1.5)$ ، جهت گیری اولیه 90° و زمان شبیه‌سازی 20° ثانیه در نظر گرفته شده است.

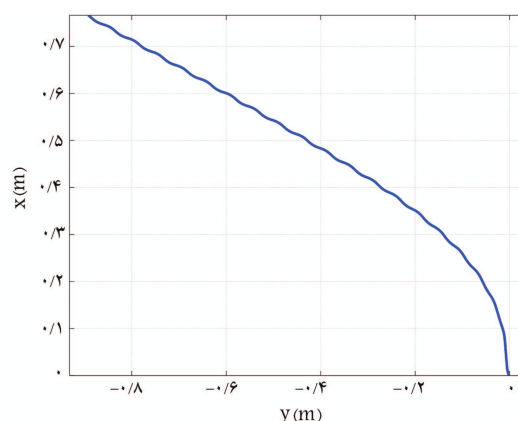
$$x_t = 3 \cos(0.7 \cdot 3t), \quad y_t = 3 \sin(0.7 \cdot 3t) \quad (37)$$

در نهایت مسیر حرکت ربات و هدف مطابق شکل ۱۳، ورودی کنترلی θ مطابق شکل ۱۴، فرکانس مطابق شکل ۱۵ و فاصله‌ی ربات تا هدف مطابق شکل ۱۶ می‌شود. مکان ربات و هدف متحرک در فاصله‌های زمانی ۲۵ ثانیه در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

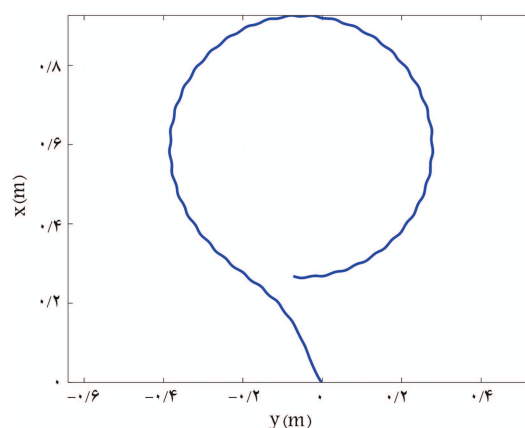
چنان که مشاهده می‌شود به وسیله‌ی کنترل کننده‌ی طراحی شده به روش فازی ربات به خوبی قادر است هدف متحرک را تعقیب و در فاصله‌ی $1/5$ متری از آن قرار گیرد. از آنجا که ممکن است نتوان ضرایب هیدرودینامیکی ربات را به صورت دقیق به دست آورد، باید عملکرد کنترل کننده‌ی طراحی شده برای حالت عدم قطعیت در



شکل ۹. مکان ربات ماهی در زمان‌های 0° ، 2° ، 4° ، 6° ، 8° و 10° به ترتیب از بالا به پایین و از چپ به راست به ازاء $\theta_0 = 0^\circ$.

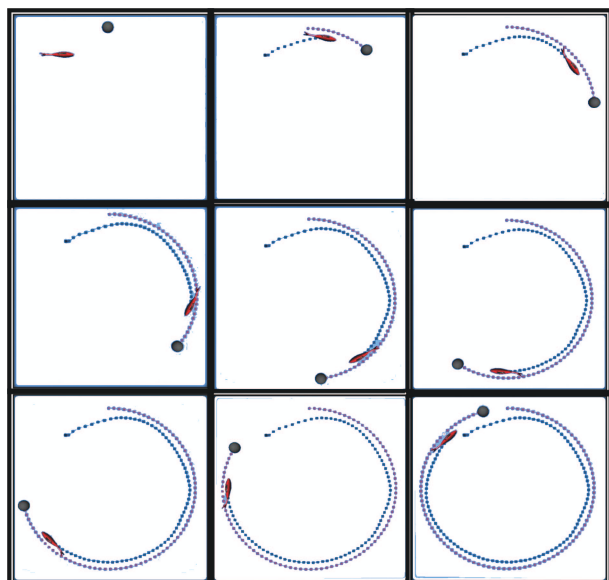


شکل ۱۰. مسیر حرکت ربات در مدت 10° ثانیه به ازاء $\theta_0 = 0^\circ$.

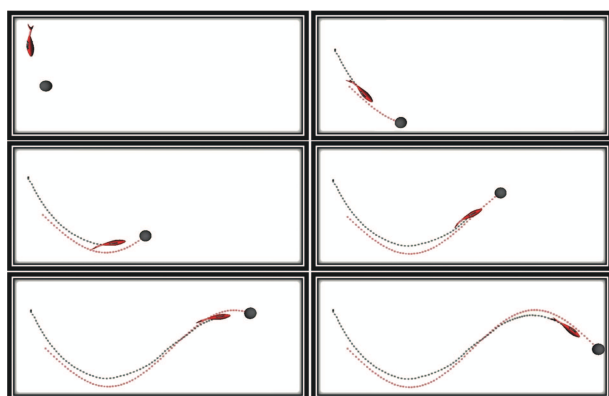


شکل ۱۱. مسیر حرکت ربات در مدت 40° ثانیه به ازاء $\theta_0 = \pi/6$.

مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. [۸] به منظور مقایسه‌ی نتایج حاصله با یک کار تجربی، پروفیل در نظر گرفته شده برای دم در این نوشتار مطابق مطالعات پیشین [۳۷] در نظر گرفته شده است با این تفاوت که دم را در راستای طول دونیم کرده‌ایم تا دولینکی شود. پارامترهای A_1 ، B_1 ، A_2 ، B_2 نیز مطابق پروفیل جدید به دست آمده و فرکانس دو دم یکسان در نظر گرفته می‌شود. براساس شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که نتایج منطبق بر نتایج تجربی به دست آمده برای حالت دم تک‌لینکی است. حال به شبیه‌سازی کنترل فازی طراحی شده در بخش ۳ می‌پردازیم.



شکل ۱۷. مکان ربات و هدف متحرک در فاصله‌های زمانی ۲۵ ثانیه، به ترتیب از چپ به راست و از بالا به پایین (کنترل‌کننده‌ی فازی).



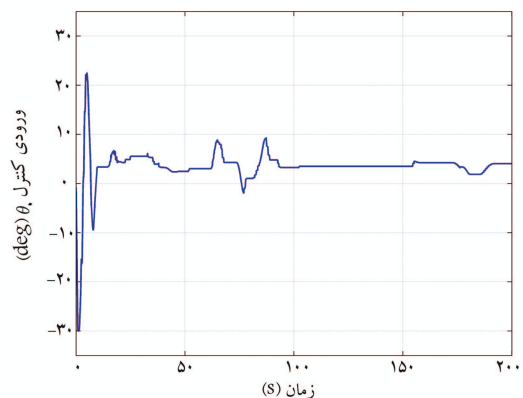
شکل ۱۸. مکان ربات و هدف متحرک در فاصله‌های زمانی ۳۶ ثانیه، به ترتیب از چپ به راست و از بالا به پایین با فرض عدم قطعیت ۱۰۰ درصد در ضرایب هیدرودینامیکی (کنترل‌کننده فازی).

حال عملکرد کنترل‌کننده در حضور نویز و اغتشاشات خارجی بررسی خواهد شد. برای این منظور، ۳ درصد نویز روی β در نظر گرفته می‌شود و اغتشاشات خارجی در راستای x_0 و y_0 به صورت رابطه‌ی ۳۹ در نظر گرفته شده است که به مرکز جرم ربات وارد می‌شود.

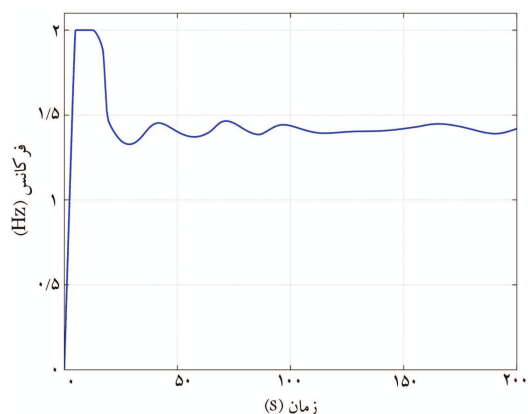
$$\begin{aligned} (Disturbance)_{x_0} &= 0.05 \times \sin(0.75t) \\ (Disturbance)_{y_0} &= 0.05 \times \sin(0.75t) \end{aligned} \quad (39)$$

معادله‌ی حرکت جسم متحرک به صورت رابطه‌ی ۴۰، مکان اولیه‌ی ربات $(-2, -2)$ ، جهت‌گیری اولیه 0° ، و زمان شبیه‌سازی 32° ثانیه در نظر گرفته شده است. در نهایت مکان ربات و هدف در فاصله‌های زمانی 4° ثانیه مطابق شکل ۱۹ خواهد بود.

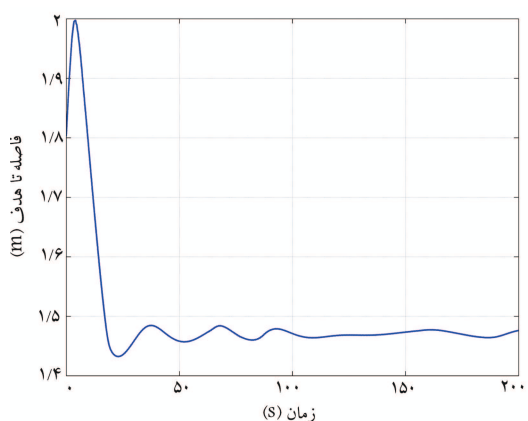
$$\begin{aligned} x &= 4 \times \sin\left(\frac{7\pi}{390}t\right) \times \left(\left(\sin\left(2.5 \times \frac{7\pi}{390}t\right)\right)^2\right. \\ &\quad \left. + \sin\left(\frac{7\pi}{390}t\right)\right) \end{aligned}$$



شکل ۱۴. ورودی کنترلی θ در تعقیب جسم متحرک روی مسیر دایره‌یی (کنترل‌کننده‌ی فازی).



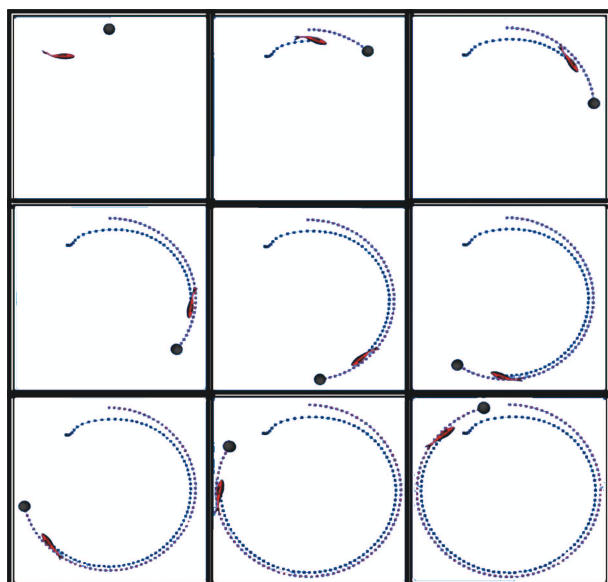
شکل ۱۵. ورودی کنترلی فرکانس در تعقیب جسم متحرک روی مسیر دایره‌یی (کنترل‌کننده فازی).



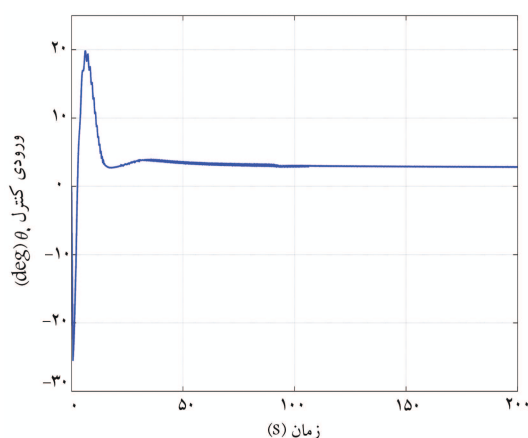
شکل ۱۶. فاصله‌ی بین ربات و هدف در تعقیب جسم متحرک روی مسیر دایره‌یی (کنترل‌کننده‌ی فازی).

ضرایب هیدرودینامیکی مورد آزمایش قرار گیرد. در شکل ۱۸ مسیر حرکت ربات و هدف با فرض عدم قطعیت ۱۰۰ درصد در ضرایب هیدرودینامیکی ربات‌ماهی نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی معادله‌ی حرکت جسم متحرک به صورت رابطه‌ی ۳۸ است.

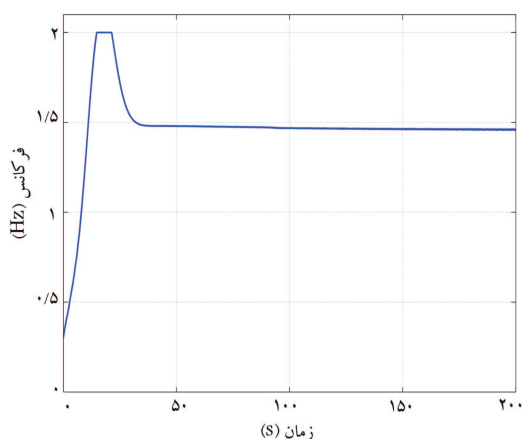
$$x_t = 2 \sin(-\pi + 0.75t), \quad y_t = -2\pi + 0.75t \quad (38)$$



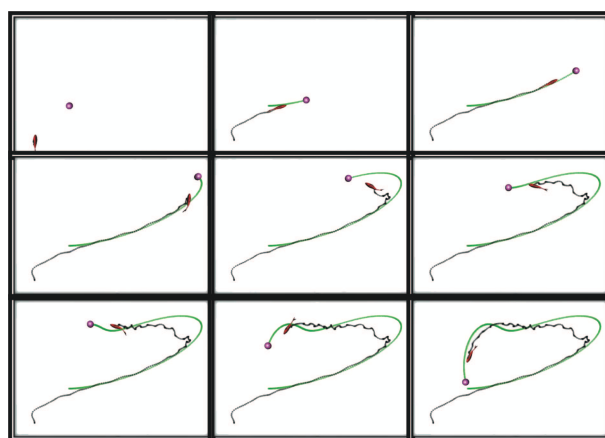
شکل ۲۱. مکان ربات و هدف متحرک در فاصله‌های زمانی ۲۵ ثانیه، به ترتیب از چپ به راست و از بالا به پایین (کنترل کننده BELBIC).



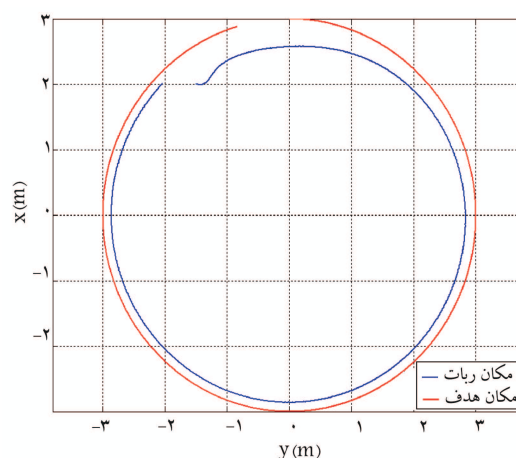
شکل ۲۲. ورودی کنترلی θ در تعقیب جسم متحرک روی مسیر دایره‌ای (کنترل کننده BELBIC).



شکل ۲۳. ورودی کنترلی فرکانس در تعقیب جسم متحرک روی مسیر دایره‌ای (کنترل کننده BELBIC).



شکل ۱۹. تعقیب جسم متحرک بر روی مسیری پیچیده و در حضور نویز و اغتشاش در زمان ۳۲ ثانیه با استفاده از کنترل کننده فازی.



شکل ۲۰. مسیر ربات و هدف روی مسیر دایره‌ای (کنترل کننده BELBIC).

$$y = 6 \times \cos\left(\frac{7\pi}{3900}t\right) \times \left(\sin\left(2.75 \times \frac{7\pi}{3900}t\right)\right)^2 + \sin\left(\frac{7\pi}{3900}t\right) \quad (40)$$

حال عملکرد کنترل کننده BELBIC در تعقیب جسم متحرک سنجیده می شود. در این حالت مسیر حرکت و پارامترهای $f_{\max}, (\theta_{\max})_1, (\theta_{\max})_2, (\theta_{\max})_3, d_{Des}$ در رابطه‌ی ۳۰ و مطابق کنترل کننده فازی در نظر گرفته می شود. ضرایب $[k_1, k_2, k_3]$ با رابطه‌ی ۳۱ و سعی و خطا به صورت $[0.8, 0.2, 0.2]$ در نظر گرفته شده است. همچنین مقادیر $[k'_1, k'_2, k'_3, k'_4, k'_5, k'_6]$ در روابط ۳۲ تا ۳۴ به صورت $[1, 0.005, 1, 2, 1, 1]$ در نظر گرفته شده‌اند. نرخ یادگیری آمیگدالا در کنترل کننده فرکانس برابر با $\alpha_a = 0.0005$ و در کنترل کننده جهت برابر با $\alpha_a = 0.0001$ است؛ نرخ یادگیری قشر حلقوی جلویی نیز در کنترل کننده فرکانس برابر با $\alpha_o = 0.0001$ و در کنترل کننده جهت برابر با $\alpha_o = 0.001$ در نظر گرفته شده است. در نهایت مسیر حرکت ربات و هدف مطابق شکل ۲۰، مکان ربات و هدف در فاصله‌های زمانی ۲۵ ثانیه مطابق شکل ۲۱، ورودی کنترلی θ مطابق شکل ۲۲، ورودی کنترلی فرکانس مطابق شکل ۲۳، و فاصله‌ی ربات تا هدف مطابق شکل ۲۴ می شود.

چنان که مشاهده می شود با کنترل کننده طراحی شده به روش BELBIC ربات به خوبی قادر است هدف متحرک را تعقیب و در فاصله‌ی ۱/۵ متری از آن

به صورت رابطه‌ی 40° ، مکان ربات و هدف در فاصله‌های زمانی 40° ثانیه به شکل ۲۶ می‌شود.

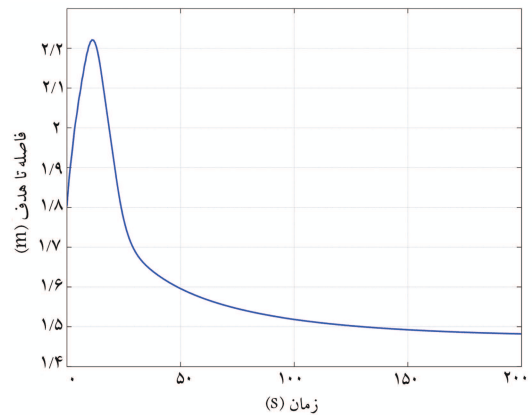
ربات‌ماهی، رباتی با قیود غیر هولونومیک است و محدودیت‌هایی دارد که از آن جمله می‌توان به محدودیت روی شعاع چرخش و بیشینه سرعت اشاره کرد. مسلماً ربات‌ماهی ما نیز قادر نیست هر مسیری را با هرگونه پیچیدگی به‌خوبی دنبال کند. با شبیه‌سازی‌های دینامیکی گرفته شده از سیستم مشخص شد که می‌توان رابطه‌ی 41° را برای تقریب شعاع چرخش در یک θ مشخص به کار برد. در این رابطه θ برحسب درجه و R برحسب متر است. همچنین کم‌ترین شعاع چرخش این ربات‌ماهی برابر با 33.17° است.

$$R = 10.34 \times \theta_0^{-1.002} \quad (41)$$

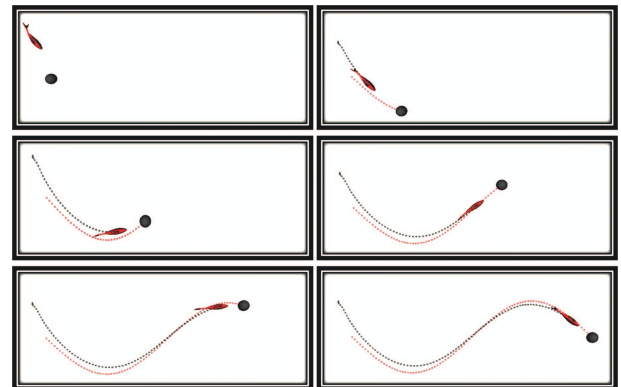
۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه به مدل‌سازی دینامیکی ربات‌ماهی سه‌لینکی و کنترل آن به‌منظور تعقیب اجسام متحرک، به دو روش کنترل فازی و BELBIC پرداخته شد. در ابتدا نیروهای پیش‌رانش ربات‌ماهی سه‌لینکی به‌وسیله‌ی نظریه‌ی جسم کشیده با دامنه‌ی حرکت بزرگ لایتهیل به دست آمد و پس از آن معادلات دینامیکی ربات‌ماهی سه‌لینکی به‌صورت تحلیلی ارائه شد. با توجه به ارائه‌ی معادلات به‌صورت تحلیلی و پارامتریک، این مدل‌سازی را می‌توان برای توصیف حرکت هر نوع ربات‌ماهی سه‌لینکی کارانجیقم به کار برد. چنان که مشاهده می‌شود فرم نیروها و معادلات دینامیکی به دست آمده بسیار پیچیده، طولانی و غیرخطی شده است. معادلات حرکت ربات‌ماهی برای دو حالت شبیه‌سازی شده است. در حالت اول دم ربات‌ماهی بدون داشتن زاویه‌ی اولیه شروع به نوسان کرده و ربات پس از یک انحراف اولیه روی خطی راست حرکت می‌کند. این انحراف نشان‌دهنده‌ی اثرات غیرپایا در لحظه‌ی شروع حرکت و شتاب‌گیری ناگهانی ربات‌ماهی است.

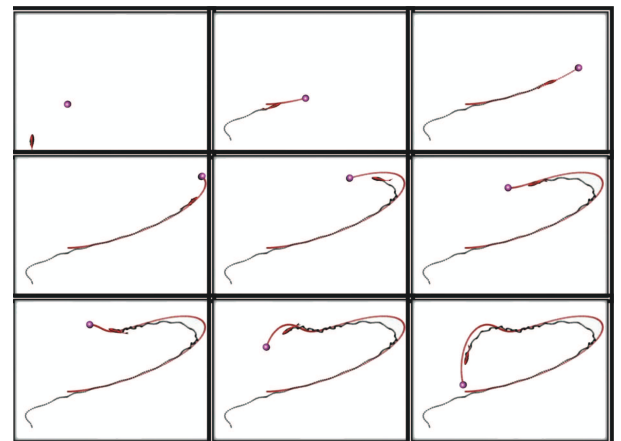
حالت بعدی به‌گونه‌ی شبیه‌سازی شده که در آن هر دو لینک، با انحراف اولیه از بدنه‌ی صلب ربات‌ماهی و در حالی که دامنه‌ی حرکت لینک دوم بیشتر از دامنه‌ی حرکت لینک اول است، با فرکانسی برابر شروع به نوسان می‌کنند. در این حالت ربات پس از یک انحراف اولیه مطابق انتظار روی مسیری دایره‌یی حرکت می‌کند. سپس از کنترل‌کننده‌ی فازی و BELBIC برای تعقیب جسم متحرک استفاده شده است. چنان که مشاهده شد کنترل‌کننده‌ی طراحی شده به‌خوبی قادر است جسم متحرک را تعقیب و در فاصله‌ی 1.5 متری از آن قرار گیرد. همچنین در خصوص عملکرد این کنترل‌کننده در برابر عدم قطعیت هیدرودینامیک مشاهده می‌شود که علی‌رغم در نظر گرفتن عدم قطعیت 100% درصد در پارامترهای هیدرودینامیکی، ربات قادر است به‌خوبی مأموریت خود را انجام دهد. به‌منظور مقایسه‌ی عملکرد دو نوع کنترل‌کننده‌ی فازی و BELBIC می‌توان گفت که تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌ی BELBIC بسیار ساده‌تر از کنترل‌کننده‌ی فازی است؛ هر دو نوع کنترل‌کننده نسبت به عدم قطعیت‌ها عملکردی مطلوب دارند، ورودی‌های کنترلی کنترل‌کننده‌ی BELBIC مطلوب‌تر از کنترل‌کننده‌ی فازی است و کارانداها در کنترل‌کننده‌ی BELBIC استهلاک کم‌تری خواهند داشت؛ خطای حالت پایای فاصله تا هدف در کنترل‌کننده‌ی BELBIC کم‌تر از کنترل‌کننده‌ی فازی است. در کل به نظر می‌رسد به‌دلیل ماهیت تطبیقی کنترل‌کننده‌ی BELBIC این نوع کنترل‌کننده عملکرد مطلوب‌تری از خود نشان می‌دهد.



شکل ۲۴. فاصله‌ی بین ربات و هدف در تعقیب جسم متحرک بر روی مسیر دایره‌یی (کنترل‌کننده‌ی BELBIC).



شکل ۲۵. مکان ربات و هدف متحرک در فاصله‌های زمانی 36° ثانیه، به ترتیب از چپ به راست و از بالا به پایین با فرض عدم قطعیت 100% درصد در ضرایب هیدرودینامیکی (کنترل‌کننده‌ی BELBIC).



شکل ۲۶. تعقیب جسم متحرک بر روی مسیری پیچیده و در حضور نویز و اغتشاش در زمان 300° ثانیه (کنترل‌کننده‌ی BELBIC).

قرار گیرد. در شکل ۲۵ مسیر حرکت ربات و هدف با فرض عدم قطعیت 100% درصد در ضرایب هیدرودینامیکی ربات نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی معادله‌ی حرکت جسم متحرک مطابق رابطه‌ی 38° است. با فرض 3% درصد نویز روی β ، اغتشاشات خارجی به‌صورت رابطه‌ی 39° و معادله‌ی حرکت جسم متحرک

فهرست علائم

- a : فاصله‌ی یک نقطه‌ی دلخواه از انتهای دم‌ماهی
 ψ : زاویه‌ی بدن ربات‌ماهی با محور x
 L_b : طول بدنه‌ی صلب ربات‌ماهی
 L_n : طول لینک n ام دم ربات‌ماهی
 θ_n : زاویه‌ی لینک n ام دم ربات‌ماهی با بدنه‌ی صلب آن
 $(\theta_0)_n$: مقدار متوسط زاویه‌ی لینک n ام دم
 $(\theta_{\max})_n$: دامنه‌ی نوسان لینک n ام دم
 f_n : فرکانس دم زدن لینک n ام دم
 m_n : جرم ظاهری آب مربوط به لینک n ام دم
 s : عمق سطح مقطع دم‌ماهی در یک نقطه‌ی دلخواه
 S : عمق سطح مقطع دم‌ماهی در انتهای دم‌ماهی
 C_{vv}, C_{uu} : ضرایب پسا به ترتیب در راستای x_0 و y_0
 u_n : سرعت نقطه‌ی دلخواه از لینک n ام در راستای مماس بر آن
 v_n : سرعت نقطه‌ی دلخواه از لینک n ام در راستای عمود بر آن

پانوشتها

1. Carangiform
2. Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller (BEL-BIC)
3. Body and/or Caudal tail fin
4. Anguilliform
5. Sub-carangiform
6. Thunniform
7. Amygdala
8. Orbitofrontal cortex
9. Thalamus
10. Sensory cortex

منابع (References)

1. Watts, C.M. "A comparison study of biologically inspired propulsion systems for an autonomous underwater vehicle", PHD Thesis, Glasgow (2009).
2. Liu J. and Hu, H. "Building a 3D simulator for autonomous navigation of robotic fishes", in *Intelligent Robots and Systems, (IROS 2004), Proceedings, IEEE/RSJ International Conference*, Sendai, Japan, pp. 613-618 (2004).
3. Triantafyllou M.S. and Triantafyllou, G.S. "An efficient swimming machine", *Scientific American*, **272**(3), pp. 64-71 (1995).
4. Mason R. and Burdick, J.W. "Construction and modelling of a carangiform robotic fish", in *The Sixth International Symposium on Experimental Robotics VI*, Sydney, Australia, pp. 235-242 (1999).
5. Morgansen, K.A., Duijndam, V., Mason, R.J., Burdick, J.W. and Murray, R.M. "Nonlinear control methods for planar carangiform robot fish locomotion", in *Robotics and Automation, Proceedings 2001 ICRA, IEEE International Conference*, Seoul, Korea, pp. 427-434 (2001).
6. Morgansen, K.A., Triplett, B.I. and Klein, D.J. "Geometric methods for modeling and control of free-swimming fin-actuated underwater vehicles", *IEEE Transactions on Robotics*, **23**, pp. 1184-1199 (2007).
7. Shahi, M. and Meghdari, A. "On the design of robotic fish based on lighthill's small-amplitude elongated body theory", *ASME 2008 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pp. 119-125 (2008).
8. Khaghani, M. "Modeling and control of a carangiform fish robot with experimental validation of the forces obtained by large amplitude elongated body theory of lighthill", M. Sc. Thesis, Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran (2010).
9. Streitlien, K., Triantafyllou, G.S. and Triantafyllou, M.S. "Efficient foil propulsion through vortex control", *AIAA Journal*, **34**, pp. 2315-2319 (1996).
10. Kumph, J. and Triantafyllou, M.S. "A fast-starting and maneuvering vehicle, the Robopike", in *Proceedings of the International Symposium on Seawater Drag Reduction*, Newport, Rhode Island (1998).
11. Morgansen, K.A. "Geometric methods for modeling and control of a free-swimming carangiform fish robot", in *Proceedings of the 13th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible technology*, pp. 290-294 (2003).
12. Liu, J. and Hu, H. "A methodology of modelling fish-like swim patterns for robotic fish", in *Mechatronics and Automation, ICMA 2007, International Conference on Harbin, China*, pp. 1316-1321 (2007).
13. Liu, J., Dukes, I. and Hu, H. "Novel mechatronics design for a robotic fish", in *Intelligent Robots and Systems, (IROS 2005), IEEE/RSJ International Conference*, Edmonton, Canada, pp. 807-812 (2005).
14. Liu, J., Hu, H. and Gu, D. "RL-based optimisation of robotic fish behaviours", in *Intelligent Control and Automation, WCICA 2006, The Sixth World Congress*, Dalian, pp. 3992-3996 (2006).
15. Liu, J. and Hu, H. "Biological inspiration: From carangiform fish to multi-joint robotic fish", *Journal of Bionic Engineering*, **7**, pp. 35-48 (2010).
16. Liu, J. and Hu, H. "Mimicry of sharp turning behaviours in a robotic fish", in *Robotics and Automation, ICRA 2005, Proceedings IEEE International Conference*, Barcelona, pp. 3318-3323 (2005).

17. Hu, H., Liu, J., Dukes, I. and Francis, G. "Design of 3D swim patterns for autonomous robotic fish", in *Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference*, Beijing, pp. 2406-2411 (2006).
18. Liu, J., Hu, H. and Gu, D. "A hybrid control architecture for autonomous robotic fish", in *Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference*, Beijing, pp. 312-317 (2006).
19. Yu, J., Tan, M., Wang, S. and Chen, E. "Development of a biomimetic robotic fish and its control algorithm", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, **34**, pp. 1798-1810 (2004).
20. Barrett, D., Grosenbaugh, M. and Triantafyllou, M. "The optimal control of a flexible hull robotic undersea vehicle propelled by an oscillating foil", in *Autonomous Underwater Vehicle Technology, AUV '96, Proceedings of the 1996 Symposium*, pp. 1-9 (1996).
21. Junzhi, Y. and Long, W. "Parameter optimization of simplified propulsive model for biomimetic robot fish", in *Robotics and Automation, ICRA 2005, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference*, pp. 3306-3311 (2005).
22. Liu, J., Dukes, I., Knight, R. and Hu, H. "Development of fish-like swimming behaviours for an autonomous robotic fish", in *Proceedings of the Control*, id 217 (2004).
23. Kuo, P. and Grierson, D. "Genetic algorithm optimization of escape and normal swimming gaits for a hydrodynamical model of carangiform locomotion", in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, Chicago, USA, pp.170-177 (2003).
24. Hirata, K., Takimoto, T. and Tamura, K. "Study on turning performance of a fish robot", in *First International Symposium on Aqua Bio-Mechanisms*, pp. 287-292 (2000).
25. Shuo, W., Zhigang, Z. and Haiquan, S. "Analysis of velocity control algorithms for biomimetic robot fish", in *Robotics and Biomimetics, ROBIO 2004, IEEE International Conference*, pp. 972-976 (2004).
26. Anderson, J.M. and Chhabra, N.K. "Maneuvering and stability performance of a robotic tuna", *Integrative and Comparative Biology*, **42**, pp. 118-126 (February 2002).
27. Kato, N. "Control performance in the horizontal plane of a fish robot with mechanical pectoral fins", *Oceanic Engineering, IEEE Journal*, **25**, pp. 121-129 (2000).
28. Kato, N. "Application of swimming functions of aquatic animals to autonomous underwater vehicles", in *OCEANS '99 MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century*, **3**, pp. 1418-1424 (1999).
29. Lighthill, J. "Mathematical biofluid dynamics", Society for Industrial and Applied Mathematics publication, Philadelphia, pp.103-116 (1975).
30. Sfakiotakis, M., Lane, D.M. and Davies, J.B.C. "Review of fish swimming modes for aquatic locomotion", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **24**, pp. 237-252 (1999).
31. Fossen, T.I., *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, First ed., Wiley (1994).
32. Mehrabian, A.R., Lucas, C. and Roshanian, J. "Aerospace launch vehicle control: An intelligent adaptive approach", *Aerospace Science and Technology*, **10**, pp. 149-155 (2006).
33. Balkenius, C. and Morén, J. "Emotional learning: A computational model of the amygdala", *Cybernetics and Systems*, **32**, pp. 611-636 (2001).
34. Beheshti, Z. and Hashim, S.Z.M. "A review of emotional learning and it's utilization in control engineering", *International Journal of Advances in Soft Computing and Its Applications*, **2**, pp. 191-208 (2010).
35. Shahmirzadi, D. "Computational modeling of the brain limbic system and its application in control engineering", M. Sc. Thesis, Mechanical Engineering, Texas A&M University (2005).
36. Mohammadi, A. "Design, manufacturing and Intelligent Control of brachiation robot", M. Sc. Thesis, Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran (2007).
37. Meymand, S.Z. "Modeling and control of a fish robotic system using hardware in the loop methodology", M. Sc. Thesis, Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran (2010).
38. Mazumdar, A. "Maneuverability and heading control of compliant biomimetic swimming devices", B.Sc. Thesis, Mechanical Engineering, Massachusetts Institute Of Technology (2007).