



## مدل سازی دینامیکی و کنترل مستقل سرعت خطی و زاویه ای ربات ماهی

فرناز دهکردی<sup>1</sup>، مجید ساده دل<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 111-14115، majid.sadedel@modares.ac.ir

## اطلاعات مقاله

## چکیده

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 7 مهر 1399

داوری اولیه: 12 آذر 1399

پذیرش: 7 دی 1399

## کلیدواژه‌گان:

دینامیک ربات‌های زیردریایی

ربات‌های با تحریک دم

ربات ماهی

کنترل حرکت ربات ماهی

ربات‌های خودکار زیردریایی، در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. زیرا می‌توانند جایگزین انسان برای انجام کارهای خطرناک زیرآبی شوند. موقعیت یابی ربات، کلیدی برای تضمین موثر بودن ربات‌های زیر آب است که می‌توانند وظیفه خود را انجام دهند. هدف از این مقاله کنترل سرعت خطی و زاویه ای ربات، تبدیل مدل ربات به مدل عمومی ربات‌های متحرک است، که در صورت انجام پیاده‌سازی الگوریتم موقعیت‌یابی روی ربات ماهی امکان‌پذیر می‌شود. مدل دینامیکی مناسب برای این ربات به صورت مدل دو بعدی ربات ماهی ساده‌سازی شده است. از میان انواع مختلف، ربات ماهی با تحریک دم (BCF) در نظر گرفته شده است. همچنین از مدل میانگین ربات برای پیاده‌سازی کنترلر استفاده شده و ضرایب مربوط به مدل میانگین اصلاح شده‌اند. پارامترهای دم زدن ربات شامل بایاس، دامنه دم زدن و فرکانس است. فرکانس دم زدن ربات همواره مقدار ثابت در نظر گرفته شده است ولی بایاس و دامنه متغیر و قابل کنترل هستند. پس از شبیه‌سازی مدل دینامیکی ربات، ارتباط پارامترهای دم زدن با سرعت خطی و سرعت زاویه ای ربات ماهی بررسی شده است. در نتیجه این بررسی‌ها سرعت روبه جلو خطی و سرعت زاویه ای به‌طور هم‌زمان و مستقل از هم قابل کنترل هستند. این کنترل حرکت، برای رفتار چرخش ملایم با سرعت خطی ثابت کاربرد دارد، ولی برای رفتارهای دیگر ربات هم می‌توان آن را تعمیم داد. سرانجام با کنترل دامنه و بایاس دم زدن به ترتیب سرعت روبه جلو با کنترلر PI و با خطای 1/67% و سرعت زاویه ای با کنترلر PID و با خطای 2/5% کنترل می‌شود.

## Dynamic modeling and decoupled control of linear and angular velocity for robotic fish

Farnaz Dehkordi, Majid Sadedel\*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, majid.sadedel@modares.ac.ir

## Article Information

Original Research Paper

Received: 29 September 2020

First Decision: 3 December 2020

Accepted: 28 December 2020

## Keywords:

Dynamics of marine robotics

Tail-actuated robots

Robotic fish

Robotic fish motion control

## Abstract

Autonomous submarine robots are significant over the last decades. Since they can replace humans for performing dangerous underwater works. Positioning navigation is the key to guaranteeing that underwater robots can complete their task. The purpose of this paper is to control the linear and angular velocity of fish robot, to convert the robot model to unicycle model for mobile robots, which is make it possible to implement the navigation algorithm on robot. The appropriate dynamic model was simplified as a two dimensions model of robotic fish. Among different types of actuators, the tail-actuated robotic fish or BCF was considered. Also the average model of robotic fish was considered to control and its coefficient was corrected. The parameters of tail-actuating are defined as bias, amplitude and frequency. The frequency of tail-actuating was assumed to be constant but, bias, and amplitude are variable and controllable. After simulation the relations between tail-actuating parameters and rigid body linear and angular velocities was investigated. With this significance linear forward velocity and angular velocity could be controlled simultaneously and independently. This motion control applied on smooth rotation behavior with the constant speed, but it could be generalized for the others robot's behavior. Eventually, through the amplitude, and the bias control respectively, the linear forward velocity is controlled with PI controller and 1.67% error and angular velocity is controlled with PID controller and 2.5% error.

## 1- مقدمه

مورد توجه قرار گرفته‌اند. ربات‌های زیردریایی می‌توانند عملیاتی مانند مشاهده، ردیابی و بهره برداری از معادن زیردریایی، عملیات نجات، تشخیص نشتی در لوله‌های نفت و گاز، نظارت بر کیفیت آب و عملیات نظامی را انجام دهند. این ربات‌ها نه تنها

با پیشرفت فناوری رایانه‌ای، فناوری حسگر و هوش مصنوعی، به تدریج از ربات‌ها در زمینه‌های مختلف استفاده شده است. به طور خاص، ربات‌های خودکار زیردریایی، در دهه‌های اخیر بسیار

Please cite this article using:

F. Dehkordi, M. Sadedel, Dynamic modeling and decoupled control of linear and angular velocity for robotic fish, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 35- 45, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

طراحی شد که سرعت آن به 11.6 طول بدنه می‌رسد و دارای بیشترین سرعت در میان ربات‌های مشابه است [8]. بیش از 85% پژوهش‌های انجام شده روی ربات ماهی، از نوع BCF یعنی با تحریک دم است [3].

پس از طراحی، پژوهش‌هایی در زمینه مدلسازی ربات ماهی انجام شده‌است. از انواع روش‌های مدلسازی دینامیکی می‌توان به روش نیوتن-اویلر، لاگرانژ و تئوری لایت هیل اشاره کرد. از جمله آن‌ها می‌توان مدلسازی دینامیکی ربات ماهی توسط وانگ<sup>3</sup> [9] در سال 2013 با روش نیوتن-اویلر و همچنین مدلسازی دم ربات با استفاده از تئوری لایت هیل در سال 2015 را نام برد [10]. همچنین در پژوهش [11] با استفاده از روش هندسی روابط دینامیکی ربات با باله و دم مدلسازی شده است. در سال 2019 مقاله [12] از CPG<sup>4</sup> برای مدلسازی و کنترل حرکت موزون شنای ماهی و نزدیک شدن به شنای واقعی ماهی استفاده کردند.

برای دستیابی به حرکات بیولوژیکی مشابه با کارایی و عملکرد بالاتر، مهم است که یک ربات بیونیک به اندازه یک ارگان طبیعی بدن نرم طراحی شود. ساختارهای شبیه ماهیچه برای تقلید از حرکت واقعی ماهی در ربات ضروری است. ماهیچه‌های ماهی هنگام شنا عملیات مختلفی انجام می‌دهند، که پیاده‌سازی همه این عملکردها در ربات ماهی چالش برانگیز است. نوع محرک‌های مورد استفاده در ماهی‌های ربات به طور معمول در هر یک از سه دسته زیر قرار دارند. 1) محرک‌های الکتریکی (2) محرک‌های هوشمند (3) محرک‌های نرم. محرک‌های الکتریکی به طور گسترده‌ای در بسیاری از وسایل نقلیه زیر آب استفاده می‌شوند و از نظر طراحی ساده، سرعت کار بالا و به راحتی در بازار موجود هستند. موتورهای DC و سرو موتورها دو نوع اصلی هستند که در این گروه استفاده می‌شوند. پژوهش‌های [9] و [10] از این عملگر استفاده شده است. محققان همچنین بر روی محرک‌های هوشمند تمرکز کرده‌اند که توانایی انجام حرکات پیچیده مشابه گونه‌های بیولوژیکی را دارند. این مکانیسم پیوسته، ساده و مقاوم تر از حرکات گسسته و سختی است که در محرک‌های الکتریکی وجود دارد. محرک‌های هوشمند با ناهمگنی مواد ساخته می‌شوند. بنابراین، پاسخ پویای آن حرکات بدنی مورد نظر را تقلید می‌کند. این نوع عملگرها بر اساس جنس مواد سازنده آن‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند [3]. استراتژی‌های کنترلی در ربات ماهی را می‌توان به پنج دسته

می‌توانند جایگزین کارهای خطرناک زیرآبی شوند که معمولاً توسط انسان انجام می‌شود بلکه می‌توانند اکتشافات زیردریایی را انجام دهند که با استفاده از فناوری غواصی معمولی نمی‌توان به آن‌ها دست یافت. ربات‌های زیر آب می‌توانند ابزاری مهم برای مطالعه دریاها و اقیانوس‌ها باشند [1]. در سال 1994، اولین ربات ماهی توسط دانشگاه MIT ساخته شد و از آن پس تحقیقات گسترده‌ای روی آن انجام شده است [2]. این تحقیقات از نظر الگوی حرکت ماهی، طراحی نوع تحریک برای شنا کردن، روش استفاده شده برای مدلسازی دینامیکی، نوع و جنس عملگر و استراتژی کنترلی مورد استفاده در ربات، دسته‌بندی می‌شوند [3]. در زمینه الگوی حرکت ماهی، در سال 2004 لی و همکاران [4] روشی برای تجزیه حرکات ماهی در سه رفتار اصلی پیشنهاد کردند. این سه رفتار شامل موارد زیر می‌شوند: حرکت مستقیم با سرعت معین، چرخش ملایم با سرعت خطی ثابت و چرخش کوتاه و سریع با بیشترین سرعت زاویه‌ای که در موارد خاص مثلاً جلوگیری از برخورد با مانع کاربرد دارد. در سال 2006 هو و همکاران [5] ربات ماهی خودکاری را که می‌تواند سه حرکت اصلی یاده شده را در محیط سه بعدی غیر ساختاریافته انجام دهد، طراحی و شبیه‌سازی کردند. در زمینه طراحی نوع تحریک برای شنا کردن، تاکنون مکانیزم‌های بسیاری برای تحریک ربات ماهی طراحی شده‌است. یکی از طرح‌های اولیه شامل چندین لینک است که به صورت مجزا یا بهم پیوسته حرکت می‌کنند و موجب تغییر شکل بدنه ربات می‌شوند. این روش نیازمند استفاده از چندین عملگر مختلف، یا استفاده از مکانیزم انتقال قدرت پیچیده‌ای است که مطلوب نمی‌باشد [6]. طراحی‌های دیگر ربات ماهی به دو دسته BCF<sup>1</sup> و MPF<sup>2</sup> تقسیم می‌شود. در ربات‌های MPF از یک یا تعدادی باله نوسانگر در پهلوهای بدنه ربات برای ایجاد نیروی محرکه لازم برای شنا استفاده می‌شود. این دسته از ربات‌ها کندتر هستند ولی قابلیت کنترل‌پذیری بیشتری دارند. دسته دیگر، ربات‌های BCF هستند که در آن‌ها حرکت ماهی با تحریک و نوسان کردن یک دم در انتهای ربات انجام می‌شود. این ربات‌ها به دلیل درک آسان‌تر اهمیت ویژه‌ای دارند همچنین قابلیت شنا با سرعت بیشتر و گردش سریع‌تری نسبت به دسته قبل دارند [7]. سرعت ربات‌های ماهی با توجه به طول بدنه ربات محاسبه می‌شود. برای ربات‌های معمولی این نسبت حدود 0/6 طول بدنه در نظر گرفته می‌شود. در سال 2015 ربات Splash-II از نوع BCF به گونه‌ای

<sup>3</sup> Wang<sup>4</sup> Central Pattern Generator<sup>1</sup>Body and/or Caudal Fin<sup>2</sup>Median and/or Paired Fin

که قابلیت تحریک و نوسان دارد، تشکیل شده است. حرکت بدنه ربات ماهی توسط نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه صلب و تأثیر حرکت جرم اضافه (دم) روی بدنه، تولید می‌شود [10].

### 1-2- دینامیک بدنه صلب

شکل 1 تصویر از بالای یک ربات ماهی را نشان می‌دهد که شامل بدنه و دم ماهی است.  $[X, Y, Z]$  محورهای دستگاه مختصات اصلی و  $[x, y, z]$  محورهای دستگاه مختصات روی ربات را نشان می‌دهند. همچنین بردار یکه موازی و عمود بر دم، به ترتیب با بردارهای  $\hat{m}$  و  $\hat{n}$  مشخص شده است. فرض می‌شود بدنه و دم ماهی کاملاً شناور هستند و مرکز ثقل بدنه ربات همان مرکز هندسی آن در نقطه C است.

سرعت خطی در نقطه C، در جهت محورهای مختصات بدنه ربات به صورت  $V_c = [V_{cx} \ V_{cy} \ V_{cz}]^T$  و سرعت زاویه‌ای به صورت  $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$  بیان می‌شود. تغییر زاویه یا انحراف دم از جهت خلاف محور x با  $\alpha$  و زاویه حمله بدنه که در جهت  $V_c$  است با  $\beta$  نشان داده می‌شود. و در آخر  $\psi$  زاویه بین محور x (روی ربات) با محور X (دستگاه مختصات اصلی) است [9]. همچنین فرض می‌شود بدنه ربات در صفحه XZ متقارن است و دم در صفحه XY حرکت می‌کند. با توجه به این فرضیات سرعت‌های  $V_{cx}$ ،  $\omega_x$  و  $V_{cy}$ ،  $\omega_y$  همگی برابر صفر هستند. در این شرایط با سیستم سه درجه آزادی روبه‌رو هستیم که در جهت  $V_{cx}$ ،  $V_{cy}$  و  $\omega_z$  می‌تواند حرکت کند، که به ترتیب سرعت روبه‌جلو<sup>9</sup> و سرعت عرضی<sup>10</sup> و سرعت زاویه‌ای حول محور Z<sup>11</sup> هستند [9].

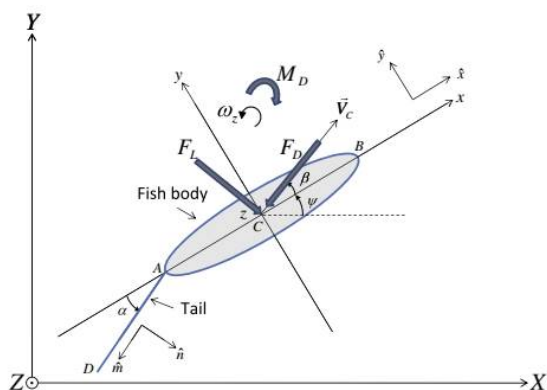


Fig. 1 Top view of tail-actuated robotic fish

شکل 1 تصویر از بالای یک ربات ماهی با تحریک دم [10]

تقسیم کرد: 1) کنترل جهت (2) کنترل عمق (3) کنترل سرعت (4) پایداری و کنترل جهت. در سال 2002 کنترل حلقه بسته برای پایداری کنترل مسیر، با کنترل نوسان دم پیشنهاد شد [13]. در پژوهش [14] با ربات ماهی با استفاده از باله هوشمند بیولوژیکی طراحی مدلسازی شده است. در این، پژوهش‌هایی نظیر [11] در زمینه کنترل مسیر<sup>1</sup> ربات ماهی و در [15] کنترل حرکت رو به جلو صورت با استفاده از PID<sup>2</sup> و کنترل چرخش ربات با استفاده از روش فازی<sup>3</sup> صورت گرفته است. در سال 2017، مدل عمومی حرکت باله ماهی برای تعقیب مسیر در مقاله [16] ارائه شد، در این مقاله ربات ماهی با قابلیت تحریک دم (BCF) در نظر گرفته شده است. هدف کنترل سرعت خطی و زاویه‌ای ربات، برای تبدیل مدل ربات به مدل عمومی<sup>4</sup> ربات‌های متحرک است. در ادامه این مقاله ابتدا روابط دینامیکی به ربات ماهی در پژوهش [14] با ربات ماهی با استفاده از باله هوشمند بیولوژیکی طراحی مدلسازی شده است. در این، پژوهش‌هایی نظیر [11] در زمینه کنترل مسیر<sup>5</sup> ربات ماهی و در [15] کنترل حرکت رو به جلو صورت با استفاده از PID<sup>6</sup> و کنترل چرخش ربات با استفاده از روش فازی<sup>7</sup> صورت گرفته است. در ادامه این مقاله ربات ماهی با قابلیت تحریک دم، در نظر گرفته شده است. ابتدا روابط دینامیکی به روش نیوتن-اویلر به‌طور خلاصه آورده شده است. سپس رابطه میان پارامترهای مدل و تأثیر هرکدام در حرکت و سرعت ماهی بررسی شده است و بر این اساس یک کنترلر PID برای کنترل حرکت ماهی پیشنهاد شده است. با توجه به این که موقعیت یابی ربات، کلیدی برای تضمین موثر بودن ربات‌های زیر آب است که می‌توانند وظیفه خود را انجام دهند، هدف از کنترل سرعت خطی و زاویه‌ای ربات، تبدیل مدل ربات به مدل عمومی<sup>8</sup> ربات‌های متحرک است، که در صورت انجام پیاده‌سازی الگوریتم موقعیت‌یابی روی ربات ماهی امکان‌پذیر می‌شود.

### 2- معادلات دینامیکی حاکم بر ربات ماهی

در این قسمت، روابط دینامیکی ربات ماهی، بر اساس پژوهش‌های سابق به‌طور خلاصه بیان می‌شوند. فرض می‌شود که ربات از دو قسمت بدنه صلب و ثابت و یک دم در انتهای بدنه

<sup>9</sup> Surge  
<sup>10</sup> Sway  
<sup>11</sup> Yaw

<sup>1</sup> Path trajectory  
<sup>2</sup> proportional-integral-derivative  
<sup>3</sup> Fuzzy  
<sup>4</sup> Unicycle Model  
<sup>5</sup> Path trajectory  
<sup>6</sup> proportional-integral-derivative  
<sup>7</sup> Fuzzy  
<sup>8</sup> Unicycle Model

می‌دهد. به این صورت که  $\tau = 0$  جلوی ربات و  $\tau = L$  انتهای ربات را مشخص می‌کند [18].

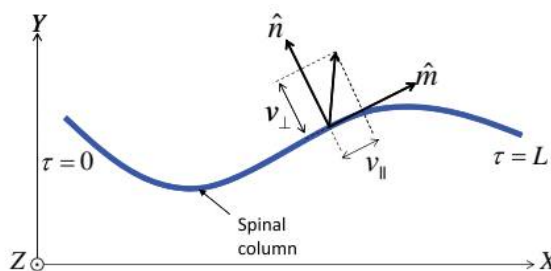


Fig. 2 Illustration of coordinate system for the spinal column of elongated body

شکل 2 نمایش جهت محورها روی ستون فقرات بدن ماهی [9]

برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی ایجاد شده توسط دم توسط تئوری لایت هیل، هر نقطه روی دم را به صورت  $X(\tau, t)$ ،  $Y(\tau, t)$  تعریف می‌شود، که  $0 \leq \tau \leq L$  نمایانگر تغییرات  $\tau$  در زمان  $t$  است. سرعت در هر نقطه روی این مسیر که به صورت  $\vec{v} = (\partial x / \partial t, \partial y / \partial t)^T$  که می‌توان آن را در جهت  $\hat{m}$  و  $\hat{n}$  به صورت روابط (8) و (9) نوشت [18].

$$v_{||} = \langle \vec{v}, \hat{m} \rangle = \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial x}{\partial \tau} + \frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial y}{\partial \tau} \quad (8)$$

$$V_{\perp} = \langle \vec{v}, \hat{n} \rangle = -\frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial y}{\partial \tau} + \frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial x}{\partial \tau} \quad (9)$$

$\langle \cdot, \cdot \rangle$  نشان دهنده ضرب داخلی دو بردار است. فرض دیگر این است که پهنای دم در مقابل ضخامت آن قابل صرفه‌نظر باشد. در انتهای دم (نقطه  $\tau = L$ ) نیروی ناشی از حرکت دم به صورت زیر خواهد بود [9].

$$F_L = \begin{pmatrix} F_{Lx} \\ F_{Ly} \end{pmatrix} = \left[ -\frac{1}{2} m_{\omega} v_{\perp}^2 \hat{m} + m_{\omega} v_{\perp} v_{||} \hat{n} \right]_{\tau=L} \quad (10)$$

در فرمول بالا  $m_{\omega}$  جرم مجازی سیالی که با حرکت دم جابجا می‌شود در واحد طول را نشان می‌دهد. مقدار آن را می‌توان بطور تقریبی برابر  $\frac{1}{4} \rho d^2$  در نظر گرفت. که  $\rho$  برابر چگالی سیال (آب) و  $d$  برابر ارتفاع جابجایی دم هنگام حرکت در نقطه مورد نظر است [9].

علاوه بر این نیروی ناشی از دم زدن ماهی، نیروی دراگ و لیفت بر بدنه ماهی نیز وارد می‌شوند که محاسبات آن در معادلات (11) تا (13) آمده است [9].

$$F_D = \frac{1}{2} \rho |V_C|^2 S C_D \quad (11)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho |V_C|^2 S C_L \beta \quad (12)$$

$$M_D = -K_D \omega_z^2 \text{sgn}(\omega_z) \quad (13)$$

## 2-2- بررسی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه ربات

روابط مومنتوم خطی  $P$  و مومنتوم زاویه‌ای  $H$  وارد بر بدنه صلب ربات به صورت روابط (1) و (2) تعریف می‌شوند [7].

$$P = M V_c + D^T \omega \quad (1)$$

$$H = D V_c + J \omega \quad (2)$$

در این روابط  $D$  ماتریس شتاب کریولیس و گریز از مرکز است.  $M$  بیانگر جرم و  $J$  ماتریس اینرسی است.  $V_c$  بردار سرعت خطی و  $\omega$  بردار سرعت زاویه‌ای است. فرض می‌شود که تأثیر برهمکنش سرعت در جهت‌های مختلف قابل صرفه‌نظر باشد، پس ماتریس  $D$  صفر است. هم‌چنین ویسکوزیته سیالی که ربات در آن شناور است ناچیز در نظر گرفته می‌شود. برای بدنه صلب معادلات حرکت کرشلف به صورت روابط (3) و (4) نوشته می‌شود [17].

$$\dot{P} = P \times \omega + F \quad (3)$$

$$\dot{H} = H \times \omega + P \times V_c + M \quad (4)$$

در این روابط  $F = [F_x \ F_y \ F_z]^T$  و  $M = [M_x \ M_y \ M_z]^T$  نیرو و گشتاور خارجی را در دستگاه مختصات ربات نشان می‌دهند [17]. برای ربات در حالت شناور این نیرو و گشتاورها تنها به صورت هیدرودینامیکی و ناشی از برهم‌کنش ربات و سیال خواهند بود. در نتیجه معادله (3) و معادله (4) به صورت زیر ساده می‌شوند.

$$(m_b - m_x) \dot{V}_{cx} = (m_b - m_y) V_{cy} \omega_z + F_x \quad (5)$$

$$(m_b - m_y) \dot{V}_{cy} = (m_b - m_x) V_{cx} \omega_z + F_y \quad (6)$$

$$(J_b - J_z) \dot{\omega}_z = (m_y - m_x) V_{cx} V_{cy} + M_z \quad (7)$$

در این معادلات  $m_b$  و  $J_b$  به ترتیب جرم و اینرسی بدنه حول محور  $z$  هستند.  $m_x$ ،  $m_y$  و  $J_z$  تأثیر هیدرودینامیکی جرم اضافه (دم) روی بدنه ربات به صورت جرم و اینرسی هستند. حال لازم است نیروهای  $F_x$ ،  $F_y$  و گشتاور  $M_z$  نیز تعیین شوند تا مدل دینامیکی ارائه شده تکمیل گردد. این نیروها توسط حرکت دم و اثر متقابل بدنه با سیال به وجود آمده‌اند. برای تعیین نیروهای وارد شده بر دم و تأثیر آن روی بدنه ربات از تئوری لایت هیل برای اجسام طویل استفاده می‌شود. تئوری لایت هیل به‌طور خلاصه در ادامه آورده شده است [9].

**تئوری لایت هیل<sup>1</sup>:** همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده است، ستون فقرات بدن ماهی با توجه به آناتومی ماهی واقعی آورده شده است و فرض می‌شود سیال در اطراف آن ساکن باشد. با توجه به شکل  $\tau$  فاصله تا جلوی ربات را نشان

<sup>1</sup> Light hill theory

تخمین زده و در معادلات آورده شود.

جدول 1 تعریف و مقداردهی پارامترها

Table 1 Definition and quantification of parameters

پارامتر	تعریف	واحد
$m_b = 0.311$	جرم بدنه	kg
$m_x = -0.0621$	اثر هیدرودینامیکی جرم اضافه روی بدنه در راستای x	kg
$m_y = -0.2299$	اثر هیدرودینامیکی جرم اضافه روی بدنه در راستای y	kg
$J_b = 5.0797 \times 10^{-4}$	اینرسی بدنه ماهی در راستای z	kg.m <sup>2</sup>
$J_z = 1.0413 \times 10^{-4}$	اثر اینرسی اضافه در راستای z	kg.m <sup>2</sup>
$d = 0.025$	ارتفاع حرکت دم	m
$c = 0.07$	فاصله مرکز ثقل تا دم	m
$\rho = 1 \times 10^3$	چگالی آب	kg/m <sup>3</sup>
$S = 0.0108$	ضریب سطح مرجع برای بدنه ماهی	m <sup>2</sup>
$C_D = 0.386$	ضریب نیروی دراگ	kg.m <sup>2</sup>
$C_L = 4.5$	ضریب نیروی لیفت	kg.m <sup>2</sup>
$K_D = 7.82 \times 10^{-4}$	ضریب گشتاور	kg.m <sup>2</sup>

حرکت دم را می توان به صورت یک تابع سینوسی متناوب در نظر گرفت. در نتیجه معادله حرکت دم به صورت آورده شده در معادله (18) خواهد بود [10].

$$\alpha(t) = b_0 + a \sin(\omega_a t) \quad (18)$$

که  $b_0$ ،  $a$  و  $\omega_a$  به ترتیب برابر بایاس، دامنه و فرکانس دم زدن می باشد. محدودیت های فیزیکی ربات برای پارامترهای دم زدن با توجه به مقاله [19] به صورت زیر است.

$$-0.7 < b_0 < 0.7$$

$$0 < a < 0.5$$

هدف از شبیه سازی مدل به دست آوردن رابطه ای بین پارامترهای دم زدن و حرکت بدنه ربات است. که برای طراحی کنترلر و در نهایت تبدیل مدل ربات به مدل Unicycle استفاده می شود. همچنین این شبیه سازی دید بهتری نسبت حرکت ربات ماهی و محدودیت های آن به ما می دهد. بر اساس این اطلاعات می توان کنترلر مناسب برای کنترل سرعت یا موقعیت ربات را طراحی نمود.

### 3-1- شبیه سازی مدل اصلی ربات

در شکل های 3 تا 5، به ترتیب نمودارهای سرعت در جهت محور x ربات ( $u$ )، سرعت در جهت y ربات ( $v$ ) و سرعت زاویه ای ( $\omega$ ) نشان داده شده است. در این شکل پارامترهای دم زدن به صورت  $b_0 = 0.4 \text{ rad}$ ،  $a = 0.3 \text{ rad}$  و  $\omega_a = 2.4\pi$  در نظر گرفته شده است.

در این روابط،  $F_D$  نیروی دراگ،  $F_L$  نیروی لیفت و  $M_D$  گشتاور است. همچنین  $S$  ضریب ثابت سطح برای بدنه ربات است،  $C_D$ ،  $C_L$  و  $K_D$  به ترتیب ضرایب نیروی دراگ، نیروی لیفت و گشتاور هستند.  $\rho$  چگالی سیال (آب) و  $\beta$  زاویه حمله و  $\text{sgn}()$  تابع علامت است [9].

### 3-2- معادلات دینامیکی بدنه ربات ماهی

با جمع بندی معادلات بالا و با توجه به معادلات (5) تا (7) که دینامیک بدنه ربات را مشخص می کنند، نیرو گشتاورهای  $F_x$ ،  $F_y$  و  $M_z$  محاسبه شدند. حال می توان معادلات دینامیکی ربات را کامل کرد [10].

$$\ddot{u} = f_1(u, v, \omega) + f_4(t) \quad (14)$$

$$\ddot{v} = f_2(u, v, \omega) + f_5(t) \quad (15)$$

$$\ddot{\omega} = f_3(u, v, \omega) + f_6(t) \quad (16)$$

در این روابط  $[u, v, \omega]$  به ترتیب متناظر  $[V_{cx}, V_{cy}, \omega_z]$  هستند.  $f_{1-6}$  در معادله (17) تعریف شده اند [10].

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(u, v, \omega) = \frac{m_2}{m_1} v \omega - \frac{c_1}{m_1} u \sqrt{u^2 + v^2} \\ \quad + \frac{c_2}{m_1} v \sqrt{u^2 + v^2} \arctan\left(\frac{v}{u}\right) \\ f_2(u, v, \omega) = -\frac{m_1}{m_2} u \omega - \frac{c_1}{m_2} v \sqrt{u^2 + v^2} \\ \quad - \frac{c_2}{m_2} u \sqrt{u^2 + v^2} \arctan\left(\frac{v}{u}\right) \\ f_3(u, v, \omega) = (m_1 - m_2) uv - c_4 \omega^2 \text{sgn}(\omega) \\ f_4(t) = -\frac{c_3}{m_1} \ddot{\alpha} \sin(\alpha) \\ f_5(t) = +\frac{c_3}{m_2} \ddot{\alpha} \cos(\alpha) \\ f_6(t) = -c_5 \ddot{\alpha} \cos(\alpha) - c_6 \ddot{\alpha} \end{array} \right. \quad (17)$$

در معادله (17) ضرایب  $C_{1-6}$  ضریب ثابت و مربوط به ویژگی های بدنه ربات و سیال هستند. هر کدام به صورت زیر تعریف می شوند.  $c_2 = 1/2 \rho S C_L$ ،  $c_1 = 1/2 \rho S C_D$ ،  $c_5 = L^2 m_{\omega} C/2J_{b_z}$ ،  $c_4 = K_D / J_{b_z}$ ،  $c_3 = 1/2 m_{\omega} L^2$ ،  $c_6 = L^3 m_{\omega} / 2J_{b_z}$ .

همچنین  $J_{b_z} = J_b - J_z$ ،  $m_2 = m_b - m_y$ ،  $m_1 = m_b - m_x$  مقادیر پارامترهای ربات طبق نمونه استفاده شده در پژوهش های پیشین در جدول 1 آورده شده است [10].

### 3- شبیه سازی مدل دینامیکی

پس از به دست آوردن مدل دینامیکی ربات ماهی می توان آن را با استفاده از نرم افزار متلب شبیه سازی کرد. عملگر تحریک شونده ربات مورد بررسی، دم ربات است، پس لازم است حرکت دم نیز

صرف نظر کردن است. بنابراین سرعت روبه جلو ( $u$ ) و سرعت زاویه‌ای ( $\omega$ ) ربات مورد بررسی‌های بعدی برای طراحی کنترلر قرار می‌گیرد.

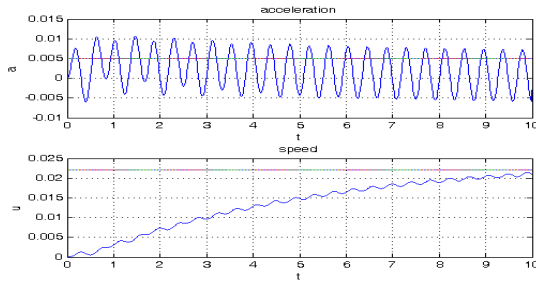


Fig. 6 Simulated velocity and acceleration diagram in x-axis

شکل 6 نمودار شتاب و سرعت روبه جلوی شبیه‌سازی شده

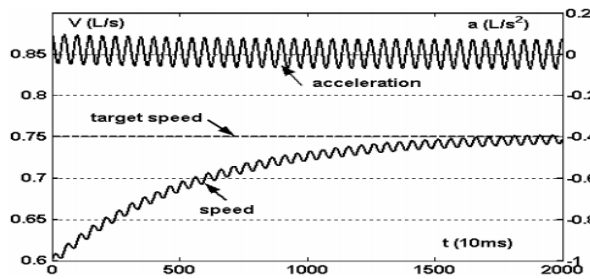


Fig. 7 Velocity and acceleration diagram according to [4]

شکل 7 نمودار شتاب و سرعت روبه جلو مطابق مقاله [4]

### 3-2- شبیه‌سازی مدل میانگین ربات

نوسانی بودن مدل به دست آمده از هندسه مساله برای طراحی کنترلر می‌تواند پیچیده باشد. تئوری استفاده از مدل میانگین [20] یک روش موثر برای شبیه‌سازی و کنترل سیستم‌های نوسانی و با ورودی متناوب است [21]. به همین دلیل از مدل میانگین برای طراحی و پیاده‌سازی کنترلر استفاده می‌کنیم. برای دستیابی به مدل میانگین توابع  $f_4$ ،  $f_5$  و  $f_6$  در "معادله 17" با استفاده از بسط تیلور درجه دوم برای سینوس و کسینوس به صورت معادله (19) ساده می‌شوند [19].

$$\begin{cases} \bar{f}_4(t) = \frac{m_\omega L^2}{12 m_1} \omega_a^2 a \left( 3 - \frac{3}{2} b_0^2 - \frac{3}{8} a^2 \right) \\ \bar{f}_5(t) = \frac{m_\omega L^2}{4 m_2} \omega_a^2 a^2 b_0 \\ \bar{f}_6(t) = -\frac{c m_\omega L^2}{4 J_3} \omega_a^2 a^2 b_0 \end{cases} \quad (19)$$

و معادلات حرکت به صورت روابط (20)، (21) و (22) خواهد شد. ضرایب  $K_r(a, b_0)$  و  $K_m(a, b_0)$  به عنوان ضرایب اصلاحی که به تغییرات دامنه و بایاس دم زدن حساس هستند، به معادله اضافه شده‌اند. دامنه و بایاس دم زدن باید به رادیان در

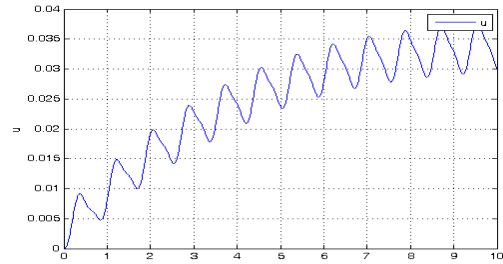


Fig. 3 Linear velocity diagram in x axis

شکل 3 نمودار سرعت-زمان سرعت خطی در جهت محور x

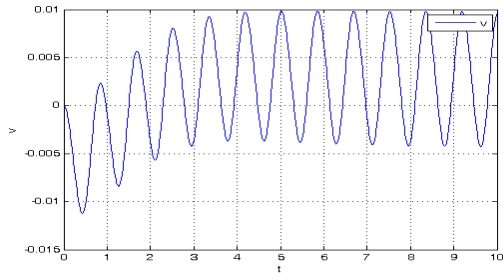


Fig. 4 Linear velocity diagram in y axis

شکل 4 نمودار سرعت-زمان سرعت خطی در جهت محور y

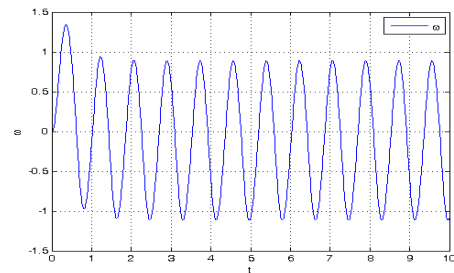


Fig. 5 Angular velocity diagram

شکل 5 نمودار سرعت-زمان سرعت زاویه‌ای

با توجه به این نمودارها در این حالت سرعت متوسط  $w = -0.05 \text{ rad/s}$  و  $v = 0.0027 \text{ m/s}$ ،  $u = 0.0345 \text{ m/s}$  است. برای بررسی درستی مدل‌سازی، نمودار شتاب و سرعت روبه جلوی ربات به دست آمده از این شبیه‌سازی با مقاله [4] مقایسه شده است. نتیجه این مقایسه در شکل‌های 6 و 7 نشان داده شده است. شکل 6 نمودار سرعت و شتاب بدست آمده از شبیه‌سازی و شکل 7 نتایج مقاله مورد نظر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند هر دو نمودار شباهت زیادی دارد. و نشان می‌دهد که شبیه‌سازی به درستی انجام شده است. تفاوت در اندازه‌های نهایی سرعت و شتاب در دو نمودار به دلیل تفاوت ابعاد ربات مورد بررسی در این پژوهش و ربات مقاله مورد نظر است. با توجه به نمودار سرعت در جهت محور y ربات ( $v$ ) و بررسی بیشتر حرکت ربات در حالت‌های مختلف دم زدن، نتیجه می‌شود که این سرعت در همه حالات بسیار ناچیز و قابل

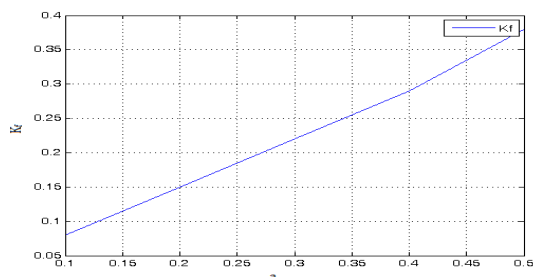


Fig. 8  $K_f$  changes with variant amplitude

شکل 8 تغییرات  $K_f$  نسبت به دامنه دم زدن

برای بررسی کارآمدی معادله ساده شده به همراه ضرایب  $K_f$  و  $K_m$  سرعت‌های  $u, v$  و  $\omega$  در  $b_0 = 0.4 \text{ rad}$  و  $a = 0.3 \text{ rad}$  و  $\omega_a = 2.4\pi$  از هر دو معادلات محاسبه شده و نمودار آن‌ها به ترتیب در شکل‌های 9 تا 11 آورده شده است. در شکل 9 سرعت نهایی  $u$  برای مدل اصلی برابر  $u = 0.0345 \text{ m/s}$  و مدل میانگین  $u = 0.0347 \text{ m/s}$  است. با توجه به یکسان قرار دادن پارامترهای دم زدن، با پارامترهای جدول موجود در مقاله [10]، اندازه سرعت در این مقاله  $u = 0.036 \text{ m/s}$  گزارش شده است، که نشان می‌دهد که مقدار نهایی سرعت در شبیه‌سازی مدل اصلی و مدل میانگین، بسیار نزدیک به مقدار سرعت ذکر شده در مقاله مورد نظر است و شبیه‌سازی با دقت خوبی انجام گرفته است. همچنین اصلاح انجام شده روی ضرایب مدل میانگین را تأیید می‌کند.

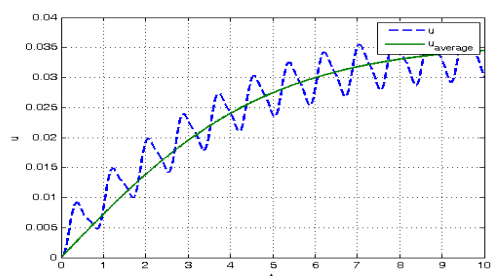


Fig. 9 “ $u$ ” in original model and average model

شکل 9 مقایسه سرعت  $u$  در مدل اصلی و مدل میانگین

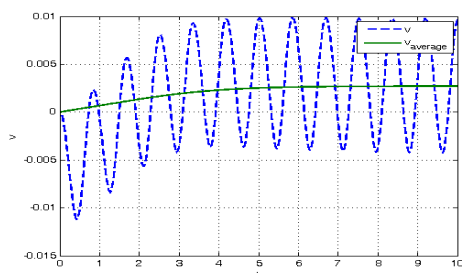


Fig. 10 “ $v$ ” in original model and average model

شکل 10 مقایسه سرعت  $v$  در معادله اصلی و معادله ساده شده

معادلات قرار گیرند [19].

$$\dot{u} = f_1(u, v, \omega) + K_f \cdot \bar{f}_4(t) \quad (20)$$

$$\dot{v} = f_2(u, v, \omega) + K_f \cdot \bar{f}_5(t) \quad (21)$$

$$\dot{\omega} = f_3(u, v, \omega) + K_m \cdot \bar{f}_6(t) \quad (22)$$

با ارزیابی مدل جدید و مقایسه با مدل اصلی ربات ضرایب  $K_f$  و  $K_m$  تعیین می‌شوند. با توجه به مقاله [10] ضریب  $K_m$  به صورت خطی با بایاس رابطه مستقیم دارد و تغییرات آن نسبت دامنه دم زدن اندک است. معادله  $K_m$  به صورت معادله (23) بیان می‌شود.

$$K_m = 0.48 b_0 - 0.0074 \quad (23)$$

ضریب  $K_f$  در مقالات قبلی ثابت در نظر گرفته شده است که نتایج حاصل از آن با خطا همراه است. در نتیجه ضریب  $K_f$  متغیر و وابستگی آن به دامنه و بایاس دم زدن به ترتیب در جدول‌های 2 و 3 آورده شده است. تغییرات دامنه و بایاس با توجه به محدودیت فیزیکی ذکر شده برای آن‌ها در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج حاصل از جدول‌ها، مشخص است که تغییرات  $K_f$  نسبت به بایاس ناچیز است ولی با دامنه رابطه مستقیم دارد. با رسم نمودار  $K_f$  نسبت به دامنه که در شکل 8 آورده شده است مشخص است که این تغییرات تقریباً خطی است و در نهایت معادله  $K_f$  به صورت معادله (24) بیان می‌شود.

$$K_f = 0.74 a + 0.002 \quad (24)$$

جدول 2 تغییرات  $K_f$  نسبت به دامنه ( $b_0 = 0.4 \text{ rad}$ )

Table 2  $K_f$  changes with variant amplitude

$a$ (رادیان)	$K_f$
0/1	0/08
0/2	0/15
0/3	0/22
0/4	0/29
0/5	0/38

جدول 3 تغییرات  $K_f$  نسبت به بایاس ( $a = 0.3 \text{ rad}$ )

Table 3  $K_f$  changes with variant bias

$b_0$ (رادیان)	$K_f$
0/1	0/210
0/2	0/212
0/3	0/215
0/4	0/220
0/5	0/225
0/6	0/235
0/7	0/245

15 که تغییرات  $u$  نسبت به بایاس را نشان می‌دهد، به وضوح قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودارها تقریباً ثابت هستند، و سرعت خطی  $u$  با تغییرات بایاس، تغییر نمی‌کند. این موضوع در کنترل سرعت  $u$  اهمیت دارد. با توجه به این تغییرات می‌توان نتیجه گرفت، با کنترل دامنه دم زدن می‌توان سرعت  $u$  را به‌طور مستقل کنترل کرد.

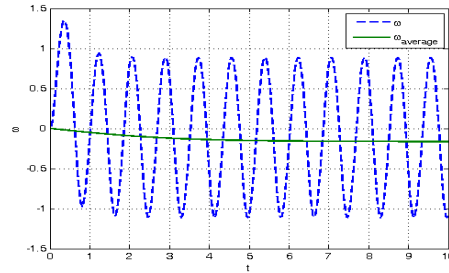


Fig. 11 “ $\omega$ ” in original model and average model

شکل 11 مقایسه سرعت  $\omega$  در معادله اصلی و معادله ساده شده

در هر سه شکل، نمودار معادلات ساده شده میانگین نمودار معادله اصلی است. در نتیجه می‌توان از این معادلات به دلیل سادگی در طراحی کنترلر استفاده کرد.

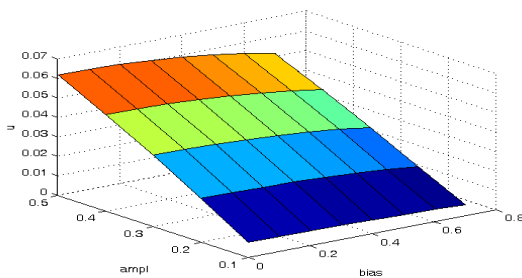


Fig. 12 Forward velocity changes with variant amplitude and bias

شکل 12 تغییر سرعت  $u$  با تغییر دامنه و بایاس

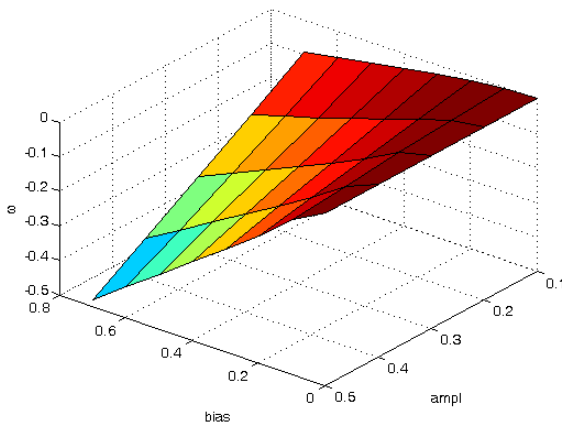


Fig. 13 Angular velocity changes with variant amplitude and bias

شکل 13 تغییر سرعت  $\omega$  با تغییر دامنه و بایاس

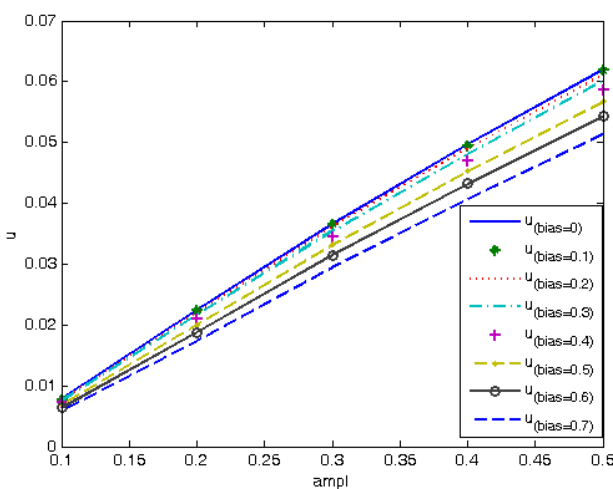


Fig. 14 Forward velocity changes with variant amplitude

شکل 14 تغییر سرعت  $u$  با تغییر دامنه

#### 4- طراحی و پیاده‌سازی کنترلر

هدف از این قسمت طراحی کنترلر مناسب برای کنترل سرعت‌های  $u$  و  $\omega$  با استفاده از پارامترهای دم زدن (دامنه و بایاس) است. با انجام این کار در نهایت مدل ربات ماهی به مدل Unicycle تبدیل می‌شود و می‌توان با روش‌های موجود الگوریتم جهت‌یابی را روی آن پیاده‌سازی کرد. در قدم اول برای طراحی کنترلر، لازم است ارتباط بین تغییرات دامنه و بایاس با تغییرات  $u$  و  $\omega$  بررسی شود.

#### 4-1- بررسی ارتباط پارامترهای دم زدن با سرعت ربات

به منظور بررسی ارتباط هرکدام از سرعت‌های  $u$  و  $\omega$  با تغییرات دامنه و بایاس، از مدل میانگین استفاده می‌کنیم. در شکل‌های 12 و 13 به ترتیب نمودار سرعت خطی  $u$  و سرعت زاویه‌ای  $\omega$  را با تغییرات دامنه و بایاس نشان می‌دهد. در محدوده  $[0.1, 0.5]$  برای دامنه و  $[0, 0.7]$  برای بایاس در نظر گرفته شده است و سرعت‌ها با فاصله  $0/1$  rad رسم شده است. برای بررسی دقیقتر تأثیر هرکدام از پارامترها، نمودار جداگانه تغییرات  $u$  در بایاس‌های مختلف نسبت به دامنه در شکل 14 و تغییرات  $\omega$  در دامنه‌های مختلف نسبت به بایاس در شکل 15 نشان داده شده است، با توجه به نمودارهای شکل 14 می‌توان دریافت که تغییرات  $u$  نسبت به دامنه خطی است. دسته نمودارها تقریباً موازی با هم تغییر می‌کنند. اما شیب نمودارها با افزایش بایاس اندکی کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد با افزایش بایاس نسبت تغییرات  $u$  به تغییرات دامنه به طور جزئی کاهش می‌یابد. البته نزدیک بودن دسته نمودارها به یکدیگر نشان می‌دهد که تأثیر بایاس روی تغییرات  $u$  ناچیز است. این موضوع در نمودار شکل



ثابت و چرخش کوتاه و سریع با بیشترین سرعت زاویه‌ای است. کنترل ربات برای رفتار دوم یعنی کنترل هم‌زمان  $\omega$  و  $u$ ، به دلیل جامع بودن، پیاده‌سازی می‌شود.

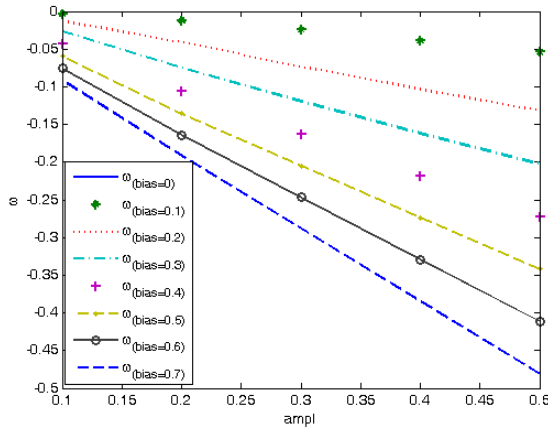


Fig. 16 Angular velocity changes with variant amplitude

شکل 16 تغییر سرعت  $\omega$  با تغییر دامنه

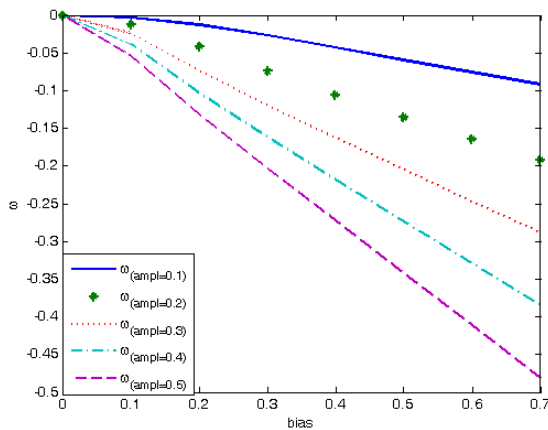


Fig. 17 Angular velocity changes with variant bias

شکل 17 تغییر سرعت  $\omega$  با تغییر بایاس

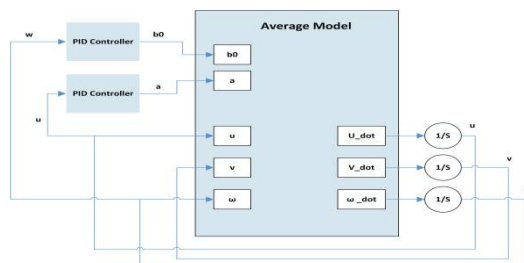


Fig. 18 Control system block diagram for robotic fish

شکل 18 بلوک دیاگرام سیستم کنترل ربات ماهی

برای کنترل سرعت  $u$  کنترلر مربوط به دامنه به صورت PI استفاده شده است و کنترلر مربوط به بایاس در این حالت تأثیرگذار نیست. برای کنترل  $\omega$  با توجه به اینکه از هر دو کنترلر

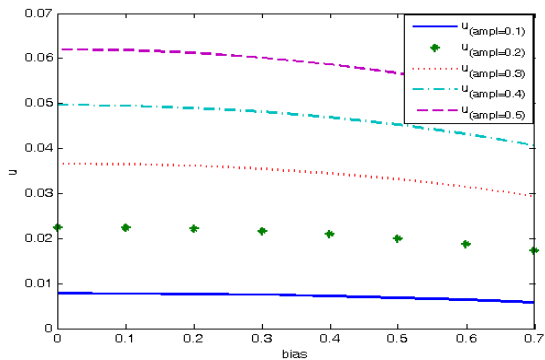


Fig. 15 Forward velocity changes with variant bias

شکل 15 تغییر سرعت  $u$  با تغییر بایاس

مانند سرعت خطی، برای سرعت زاویه‌ای  $\omega$  نیز می‌توان این تغییرات را بررسی کرد. در شکل‌های 16 و 17 به ترتیب تغییرات سرعت  $\omega$  در بایاس‌های مختلف، نسبت به دامنه و نشان تغییرات سرعت  $\omega$  در دامنه‌های مختلف نسبت به بایاس، مشاهده شده‌است. در شکل 16 مشاهده می‌شود که نمودارها به صورت خطی و با شیب‌های متفاوت تغییر می‌کنند، علت تفاوت در شیب‌ها تأثیر تغییرات بایاس روی سرعت  $\omega$  است. این تغییرات در شکل 17 قابل مشاهده است، که خطی بودن نمودارها نشان از خطی بودن تغییرات  $\omega$  با تغییرات بایاس است. با مقایسه شیب تغییرات در هر دو شکل 16 و 17 مشاهده می‌شود که تأثیر تغییرات بایاس بیشتر از تغییرات دامنه است. به طور خلاصه در این قسمت نشان داده شد که تغییرات سرعت زاویه‌ای  $\omega$  نسبت به هم دامنه و هم بایاس تقریباً خطی است و برای کنترل از هر دو آن‌ها تأثیر می‌پذیرد، هرچند، تأثیر تغییرات بایاس بیشتر از دامنه است.

#### 2-4- طراحی کنترلر

با توجه به اطلاعات به‌دست آمده از قسمت قبل در مورد حرکت ربات و تغییرات پارامترها نسبت به هم، با کنترل بایاس و دامنه دم زدن  $(a$  و  $b_0)$  سرعت ربات کنترل می‌شود. به این منظور از کنترلر PID برای کنترل هر کدام از پارامترها استفاده می‌شود.

در واقع ارتباط بین سرعت و پارامترهای دم زدن این امکان را می‌دهد که مسأله به دو بخش ساده‌تر جدا شود. به این صورت که سرعت  $u$  توسط پارامتر  $a$  و سرعت زاویه‌ای  $\omega$  توسط  $b_0$  قابل کنترل است. در شکل 18 شمای کلی سیستم کنترلی برای ربات نشان داده شده است. پیاده‌سازی این کنترلر در محیط سیمولینک متلب انجام داده شده است.

با توجه به سه رفتار اصلی حرکت ربات ماهی که شامل حرکت مستقیم با سرعت معین، چرخش ملایم با سرعت خطی

است. ضرایب مدل میانگین به گونه‌ای اصلاح شده‌اند که حرکت ربات را به خوبی دنبال می‌کنند. کنترل سرعت توسط دو پارامتر دامنه و بایاس دم زدن انجام می‌گیرد. به این منظور با توجه به ارتباط بین پارامترها، و از دو کنترلر PID به صورت جداگانه روی دامنه و بایاس دم زدن استفاده شده است که به ترتیب سرعت روبه جلو و سرعت زاویه‌ای ربات را کنترل می‌کند. کنترل حرکت ماهی برای حالتی انتخاب شده است که هم‌زمان  $\omega$  و  $u$  باید کنترل شوند. با کنترل این حالت، کنترل دو رفتار دیگر حرکت مستقیم ربات و چرخش سریع که نیاز به کنترل غیر هم‌زمان  $u$  و  $\omega$  دارند نیز امکان‌پذیر است.

## 6- مراجع

- [1] Wu, Y., et al., *Survey of underwater robot positioning navigation*. Applied Ocean Research, 2019. **90**: p. 101845.
- [2] Zhang, S., et al., *Modeling and Dynamic Control of a Class of Semibiomimetic Robotic Fish*. Complexity, 2018. **2018**.
- [3] Duraisamy, P., R.K. Sidharthan, and M.N. Santhanakrishnan, *Design, Modeling, and Control of Biomimetic Fish Robot: A Review*. Journal of Bionic Engineering, 2019. **16**(6): p. 967-993.
- [4] Liu, J., et al., *Development of fish-like swimming behaviours for an autonomous robotic fish*. Proceedings of the Control, 2004. **4**: p. 49.
- [5] Hu, H., et al. *Design of 3D swim patterns for autonomous robotic fish*. in 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2006. IEEE.
- [6] Wang, J., P.K. McKinley, and X. Tan, *Dynamic modeling of robotic fish with a base-actuated flexible tail*. Journal of dynamic systems, measurement, and control, 2015. **137**(1).
- [7] Wahab, A.J., *A framework for design, modeling, and identification of compliant biomimetic swimmers*. 2008, Massachusetts Institute of Technology.
- [8] Clapham, R.J. and H. Hu, *iSplash: Realizing fast carangiform swimming to outperform a real fish*, in *Robot Fish*. 2015, Springer. p. 193-218.
- [9] Wang, J. and X. Tan, *A dynamic model for tail-actuated robotic fish with drag coefficient adaptation*. Mechatronics, 2013. **23**(6): p. 659-668.
- [10] Wang, J. and X. Tan, *Averaging tail-actuated robotic fish dynamics through force and moment scaling*. IEEE Transactions on Robotics, 2015. **31**(4): p. 906-917.
- [11] Morgansen, K.A., B.I. Triplett, and D.J. Klein, *Geometric methods for modeling and control of free-swimming fin-actuated underwater vehicles*. IEEE Transactions on Robotics, 2007. **23**(6): p. 1184-1199.
- [12] Wang, M., et al., *Control and Optimization of a Bionic Robotic Fish Through a Combination of CPG model and PSO*. Neurocomputing, 2019. **337**: p.

تأثیر می‌گیرد، ضریب  $I$  در کنترلر مربوط به بایاس نقش کلیدی دارد. به‌عنوان مثال در شکل‌های 19 و 20 کنترل سرعت روی  $\omega = 0.2 \text{ rad/s}$  و  $u = 0.03 \text{ m/s}$  قابل مشاهده است. در این حالت سرعت نهایی  $u$  برابر  $0.0295 \text{ m/s}$  و سرعت نهایی  $\omega$  برابر  $0.195 \text{ rad/s}$  رسیده است. درصد خطای نسبی کنترلر برای  $u$   $1.67\%$  و برای  $\omega$   $2.5\%$  درصد است که نشان می‌دهد کنترل روی سرعت ربات به خوبی انجام گرفته است. نکته قابل در کنترل سرعت آن است که باید سرعت داده شده به ربات در محدوده سرعت قابل قبول با توجه به اندازه و فیزیک ربات باشد. محدوده سرعت  $u$  و  $\omega$  قابل قبول برای ربات ماهی با طول بدنه  $0.14 \text{ m}$  به صورت زیر است:

$$u < 0.6 L \rightarrow u < 0.084 \text{ m/s}$$

$$|\omega| < 0.5 \text{ rad/s}$$

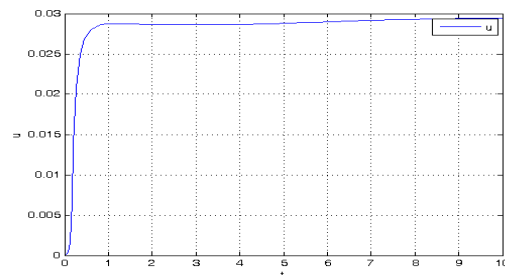


Fig. 19 Linear velocity setting on 0.03m/s

شکل 19 کنترل سرعت خطی روی  $u = 0.03 \text{ m/s}$

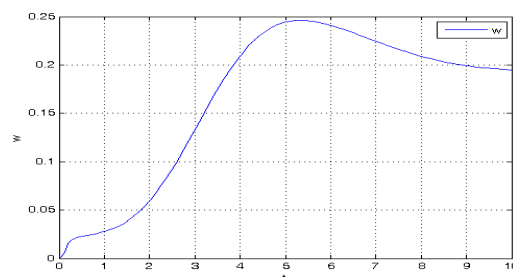


Fig. 20 Angular velocity setting on 0.2rad/s

شکل 20 کنترل سرعت زاویه‌ای روی  $\omega = 0.2 \text{ rad/s}$

## 5- جمع‌بندی

در این تحقیق سعی شده است با بررسی بیشتر حرکت ربات ماهی، بتوان سرعت خطی و زاویه‌ای ربات ماهی را کنترل کرد. هدف از کنترل سرعت تبدیل مدل ربات به مدل عمومی ربات‌های متحرک و در ادامه امکان پیاده‌سازی الگوریتم جهت‌یابی روی ربات است. به این منظور برای ساده‌سازی مسأله و امکان پیاده‌سازی کنترلر از مدل میانگین ربات استفاده شده

- validation. in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2011. IEEE.
- [18] Lighthill, M.J., *Large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion*. Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences, 1971. **179**(1055): p. 125-138.
- [19] Castaño, M.L. and X. Tan, *Model Predictive Control-Based Path-Following for Tail-Actuated Robotic Fish*. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2019. **141**(7).
- [20] Vela, P.A., *Averaging and control of nonlinear systems*. 2003, California Institute of Technology.
- [21] Chen, S., J. Wang, and X. Tan. *Backstepping-based hybrid target tracking control for a carangiform robotic fish*. in *Dynamic Systems and Control Conference*. 2013. American Society of Mechanical Engineers.
- 144-152.
- [13] Morgansen, K.A., P.A. Vela, and J.W. Burdick. *Trajectory stabilization for a planar carangiform robot fish*. in *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292)*. 2002. IEEE.
- [14] Chen, Z., S. Shatara, and X. Tan, *Modeling of biomimetic robotic fish propelled by an ionic polymer-metal composite caudal fin*. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2009. **15**(3): p. 448-459.
- [15] Yu, J., et al., *Development of a biomimetic robotic fish and its control algorithm*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2004. **34**(4): p. 1798-1810.
- [16] Makrodimitris, M., K. Nanos, and E. Papadopoulos. *A novel trajectory planning method for a robotic fish*. in *2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. 2017. IEEE.
- [17] Wang, J., F. Alequin-Ramos, and X. Tan. *Dynamic modeling of robotic fish and its experimental*