



کنترل مدل مرجع تطبیقی با جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی ربات زیرآبی خودکار ۶ درجه آزادی

مهدی یاقوتی^۱ و ابولفتح نیکرانجبار^{۲*}^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۸/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱/۱۲

چکیده

طراحی کنترل کننده خودتنظیم ربات‌های زیرآبی بدلیل محیط پر اغتشاش، دینامیک غیرخطی و ناقص عملگر، بسیار چالش برانگیز است. در این مقاله، کنترل مدل مرجع تطبیقی با جبران‌ساز شبکه عصبی برای کنترل ربات زیرآبی خودکار ۶ درجه آزادی ارائه شده است. دینامیک غیرخطی ناقص عملگر ۴ ورودی - ۶ خروجی ربات به چهار زیرسیستم و خطی سازی هر زیر سیستم، با استفاده از روش خطی سازی فیدبک جزئی و یا دینامیک معکوس و روش دینامیک جفت شده، تفکیک شده است. در هر دو رویکرد دینامیک جفت نشده و یکپارچه، پایداری زیر سیستم‌ها و فرآیند کل با استفاده از روش پایداری لیاپانف تضمین شده است. به علت عملکرد سیستم در محیط همراه با ورودی‌های نامطلوب دائمی، با هدف مقاوم سازی سیستم علاوه بر کنترل کننده مدل مرجع تطبیقی، از جبران‌ساز اضافی شبکه عصبی با تطبیق برخط وزن‌ها و بایاس‌های در هر زیرسیستم و نیز سیستم یکپارچه استفاده شده است. نتایج شبیه سازی‌های کنترل کننده ترکیبی مدل مرجع تطبیقی با جبران‌ساز شبکه عصبی، بوضوح نشان از عملکرد چشمگیر کنترل کننده بهره‌مند از جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی در مقاوم سازی فرآیند و بهبود عملکرد ربات در ردیابی مسیر مطلوب با دقت قابل توجه در حضور ورودی‌های نامطلوب دائمی در هر دو رویکرد را دارد.

کلمات کلیدی: کنترل ربات زیرآبی خودکار؛ کنترل مدل مرجع تطبیقی؛ جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی؛ دینامیک ناقص عملگر؛ خطی سازی فیدبک جزئی.

Model Reference Adaptive Control with Artificial Neural Network Compensator of 6 DOF Autonomous Underwater Vehicle

M. Yaghoti¹, A. Nikranjbar^{2,*}¹ MSc, Department of Mechanical Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.² Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

Abstract

The noisy environment of the underwater nonlinear under-actuated dynamic system of the Autonomous Underwater Vehicle (AUV) turns out the design of the self-tuning controller, more challenging. In this paper, the Model Reference Adaptive Control (MRAC) along with the Artificial Neural Network (ANN) compensator of the 6 Degree of Freedom (DOF) AUV is illustrated. 4 Input-6 Output (4I6O) nonlinear under-actuated dynamic system is divided into first, 4 subsystems and the partial or inverse linearization technique and the coupled linearized model are employed for each one. The stability of the closed-loop subsystems, and hence the complete controlled model is insured according to the Lyapounve's stability theory. To increase the robustness of the closed loop system, an ANN compensator benefiting online backpropagation learning algorithm to tune the network's parameters is incorporated with each controllers. The results of the simulations of the hybrid MRAC along with ANN compensator in Matlab Simulink environment, clearly indicates the outperformance of the ANN compensated control method versus its non-ANN compensated counterpart in terms of increasing the robustness as well as more accurate trajectory tracking performance of the control system subjected to the continual applied noises for both coupled and decoupled dynamical systems.

Keywords: Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Control; Model Reference Adaptive Control (MRAC); Artificial Neural Network (ANN) Compensator; Under-Actuated Dynamic; Partial Feedback Linearization.

۱- مقدمه

نقش بی‌بدیل منابع و صنایع دریایی در زندگی انسان‌ها، زمینه‌ساز مطالعات گسترده‌ای در حوزه مسائل مهندسی، زیست‌شناسی، تجاری و نظامی مرتبط با دریا شده است. در سال‌های اخیر استفاده از تجهیزات و ابزارهای مهندسی قابل استفاده در بستر دریا، گسترش قابل توجهی یافته‌اند [۱]. در بسیاری از حوزه‌های فنی و تحقیقاتی، استفاده از فن‌آوری‌های خودکار بدون دخالت مستقیم انسان گسترش یافته، در بسیاری از موارد به جزء جدانشدنی صنایع تبدیل شده‌اند، بطوریکه بسیاری از پروژه‌های مهندسی و تحقیقات بدون این ابزارها قابل اجرا نیستند. ربات‌های زیرآبی خودکار^۱ پیشرفت جدیدی در زمینه تجهیزات زیرآبی محسوب می‌شوند و در فعالیت‌ها و تحقیقات متنوعی مانند، بازرسی اعماق و کف دریا، نقشه برداری‌های مرتبط با اقیانوس شناسی، کارگذاری و بازرسی خطوط لوله‌های انتقال مواد و کابل‌های کف دریا، اکتشافات منابع زیرآبی، اهداف نظامی دریایی و غیره به کار گرفته می‌شوند [۲]. این وسایل کاملاً خودکار بوده، نیازی به استفاده از ارتباط کابلی جهت اتصال به واحد کنترل و هدایت ناظر انسانی ندارند. همچنین به علت بهره‌مندی از تجهیزات پیشرفته تصویربرداری، پردازش و هدایت هوشمند، قادر به انجام وظایف محوله با کمترین خطا در شرایط حاد محیطی هستند.

ویژگی‌های برجسته ذکر شده ربات‌های زیرآبی خودکار، موجب مطالعات قابل توجهی در ارائه رویکردهای کنترل‌کننده کارآمد و موثر شده است. گفتنی است، کنترل ربات‌های زیرآبی خودکار به علت دینامیک پیچیده متغیر با زمان جفت شده^۲ و در معرض اغتشاشات ناخواسته خارجی مانند، امواج دریا و دشواری تخمین تاثیرات هیدرودینامیک جریان سیال، بسیار چالش برانگیز است.

مشکل دیگر در طراحی کنترل‌کننده، در ارتباط با ذات دینامیک ربات زیرآبی خودکار است که در تقسیم‌بندی، جزء سیستم‌های ناقص عملگر^۳ دسته‌بندی می‌شود. سیستم‌های مکانیکی کامل عملگر^۴، سیستم‌های دارای ورودی‌های

کنترلی برابر با تعداد درجات آزادی سیستم هستند. صورت خطی این سیستم‌ها با استفاده از روش‌های دینامیک معکوس^۵، خطی‌سازی فیدبک ورودی-خروجی^۶ و ورودی-حالت^۷ حاصل و امر کنترل به علت کنترل پذیری حالت فرآیند، چالش برانگیز نخواهد بود؛ در حالی که کنترل یک سیستم ناقص عملگر. بدلیل محدودیت‌های کنترلی، برخلاف سیستم‌های کامل عملگر به علت تعداد ورودی‌های کنترلی کمتر از تعداد درجات آزادی سیستم، دشوارتر است [۳]. بهره‌گیری از روش خطی‌سازی فیدبک مرسوم در استخراج مدل خطی این نوع سیستم‌ها، نیازمند بازنگری لازم بوده، توسعه این روش‌ها منجر به ارائه روش خطی‌سازی فیدبک جزئی^۸ در خطی‌سازی چنین سیستم‌هایی شده است.

کنترل‌کننده‌های متداول خطی، بخصوص هنگام تغییر شرایط محیطی کار ربات، عملکرد کاملاً قابل قبولی نداشته، تنظیم مجدد پارامترهای کنترلی در زیر آب تقریباً غیر ممکن است؛ بنابراین، کنترل‌کننده‌ای برای ربات زیرآبی خودکار مورد نظر است که قابلیت خودتنظیم بودن هنگام دگرگون شدن شرایط محیط عملیاتی را داشته باشد [۴].

در زبان روزمره کلمه تطبیق به معنای تغییر رفتار برای وفق یافتن با وضع جدید است. کنترل‌کننده تطبیقی^۹، کنترل‌کننده‌ای با پارامترهای قابل تنظیم به همراه راهکاری برای تنظیم پارامترها است که می‌تواند رفتار خود را در پاسخ به تغییر دینامیک فرآیند و اغتشاش‌ها تغییر دهد. کنترل مدل مرجع تطبیقی^{۱۰}، یکی از رهیافت‌های اصلی کنترل تطبیقی است. مدل مرجع^{۱۱} باید به گونه‌ای انتخاب شود تا ورودی مرجع^{۱۲} را به خوبی دنبال کند. خروجی مدل مرجع H_m با خروجی فرآیند H در هر لحظه مقایسه می‌شود. هدف اصلی این کنترل‌کننده، تنظیم پارامترها به گونه‌ای است که تمام سیگنال‌ها در فرآیند حلقه بسته محدود شوند و خطای ردیابی اختلاف خروجی‌ها، $e \triangleq H - H_m$ ، به حداقل برسد؛ بگونه‌ای که خروجی‌های فرآیند و مدل مرجع H, H_m با

⁵ Inverse Dynamic Linearization

⁶ Input-Output Feedback Linearization

⁷ Input-State Feedback Linearization

⁸ Partial Feedback Linearization

⁹ Adaptive Controller

¹⁰ Model Reference Adaptive Control (MRAC)

¹¹ Reference Model

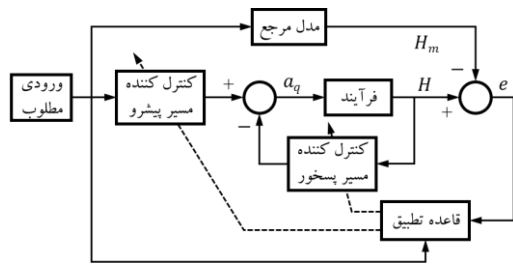
¹² Reference Input

¹ Autonomous Underwater Vehicles (AUVs)

² Coupled

³ Under-Actuated

⁴ Fully-Actuated



شکل ۱- ساختار کنترل کننده مدل مرجع تطبیقی

ربات پیشرو قرار گیرند. بدین منظور، کنترل کننده شبکه عصبی مورد نظر در تلاش است که در هر لحظه خطای فاصله میان ربات‌ها را به حداقل برساند. در دو رویکرد حرکتی، حرکت در مسیر مستقیم و انحنادار، ربات‌های پیشرو به خوبی ربات پیرو را تعقیب می‌کنند [۹]. اسکی و یلدیریم، یک کنترل کننده شبکه عصبی یک لایه را به منظور کنترل عمق ربات زیرآبی خودکار، شناسایی سیستم و کاهش اغتشاشات زیرآب را طراحی کرده‌اند. کنترل کننده مورد نظر با کنترل کننده استاندارد تناسبی-انتگرال-مشتقگیر مقایسه شده است. نتایج هر دو سیستم کنترلی، نشانگر آن است که استفاده از سیستم کنترل فیدبک عصبی مقاوم نسبت به تناسبی-انتگرال-مشتقگیر، دارای پایداری بیشتری است [۱۰]. ساهو و سوپودهی با استفاده از یک ماتریس رگرسیون دینامیک ربات ۴ درجه آزادی را خطی کرده‌اند و سپس با بکارگیری یک کنترل کننده تطبیقی ربات را ملزم به پیروی از مسیر دلخواه کرده‌اند. دینامیک این ربات، از نوع کاملاً فعال بوده، نتایج حاصله دقت مناسب ردیابی مسیر دلخواه توسط کنترل کننده تطبیقی را نشان می‌دهد [۱۱]. کوی و همکاران، جهت ساده‌سازی محاسبات عددی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، مدل دینامیکی ربات ۳ درجه آزادی را از حالت پیوسته به حالت گسسته تبدیل کرده‌اند. دو کنترل کننده شبکه عصبی بر مبنای روش پایه شعاعی^۹ جهت تخمین پارامترهای غیرخطی نامشخص و دیگری جهت بهبود سیگنال‌های پسخور در ردیابی بکارگرفته شده‌اند [۱۲]. رستمی و همکاران، نتایج تحقیقات در خصوص هدایت و کنترل ربات زیرآبی با استفاده از سیستم کنترل فازی عصبی با استفاده از روش بهینه‌سازی تکاملی ممتیک را در مرجع

نزدیکترین حالت ممکن یکدیگر را ردیابی کنند [۵]. ساختار مرسوم این رویکرد، در شکل ۱ نشان داده شده است.

سیستم متشکل از یک حلقه یا پسخور مرسوم و کنترل کننده مسیر پیشرو و مدل مرجع است. بهره‌های کنترل کننده‌ها توسط قاعده تطبیق^۱ با دریافت سیگنال خطا e ، که تفاوت بین خروجی سیستم H و خروجی مدل مرجع H_m و ورودی مرجع است، به نحوی به روزرسانی می‌شوند که خروجی فرآیند مطابق خروجی مدل مرجع شود. گفتنی است که در این رویکرد کنترلی، از دو روش: ۱-گرادیان (یا قاعده \dot{m} آی تی)^۲ - نظریه پایداری (لیاپانف)^۳ در تنظیم پارامترهای کنترل کننده استفاده می‌شود. مطابق قاعده \dot{m} آی تی، این روش پایداری سیستم حلقه بسته را تضمین نمی‌کند [۵]. همچنین زمان نشست یا رسیدن به پاسخ مطلوب در روش لیاپانوف، نسبت به روش \dot{m} آی تی کمتر است [۶].

شبکه‌های عصبی مصنوعی،^۴ از مشاهدات و تحقیقات سیستم‌های بیولوژیکی الهام گرفته شده‌اند و در واقع یک نگاهت از ورودی به یک خروجی دلخواه می‌باشند. توانایی شبکه عصبی در تخمین توابع، حذف نامعینی‌ها و تغییرات پارامترها، این شبکه‌ها را به عنوان انتخاب مناسبی در کنترل ربات‌های زیرآبی خودکار تبدیل کرده است [۷].

مطابق مطالعات میدانی، مجموعه‌ای از کنترل کننده‌های متنوع اعم از تطبیقی، مد لغزش^۵، شبکه عصبی، فازی^۶، تناسبی - مشتق گیر - انتگرال‌گیر^۷ و یا ترکیبی در کنترل ربات‌های زیرآبی خودکار مشاهده می‌شود. اسماییل و موخار، برای حفظ ربات در بین دو مرز، از توابع پتانسیل و کنترل کننده ترکیبی فازی - مد لغزشی استفاده کرده‌اند. ضعف اصلی روش مد لغزشی، تاثیرات لرزش^۸ است؛ بنابراین آنان برای تنظیم بهره‌ها و حذف تاثیرات لرزش استفاده از کنترل کننده فازی در سیستم کنترلی را پیشنهاد کرده‌اند [۸]. پارک به بررسی کنترل مجموعه‌ای از ربات‌های زیرآبی پرداخته است. دو ربات پیرو باید در فاصله و زاویه معینی از

¹ Adaptation Law

² MIT Rule

³ Lyapunov

⁴ Artificial Neural Network (ANN)

⁵ Sliding Mode

⁶ Fuzzy

⁷ Proportional Integral Derivative (PID)

⁸ Chattering

⁹ Radial Basis

۲- سینماتیک و دینامیک ربات زیرآبی خودکار

به منظور بدست آوردن سینماتیک و دینامیک ربات، دو سیستم مختصات زمین - ثابت^۵ و بدنه - ثابت^۶ تعریف می-شود. سیستم مختصات بدنه - ثابت برای اندازه‌گیری سرعت-های ربات در هر لحظه، به مرکز شناوری ربات متصل شده است؛ همچنین سرعت و موقعیت ربات نسبت به سیستم مختصات زمین-ثابت تعریف می‌شود. حالت کلی این سیستم‌های مختصات، در شکل ۲ نشان داده شده است.

حرکت کلی ربات ۶ درجه آزادی، توسط بردارهای (۱-۹) توصیف می‌شود:

$$\eta_1 = [x \quad y \quad z]^T \quad (1)$$

$$\eta_2 = [\phi \quad \theta \quad \psi]^T \quad (2)$$

$$\eta = [\eta_1^T \quad \eta_2^T]^T \quad (3)$$

$$v_1 = [u \quad v \quad w]^T \quad (4)$$

$$v_2 = [p \quad q \quad r]^T \quad (5)$$

$$v = [v_1^T \quad v_2^T]^T \quad (6)$$

$$\tau_1 = [X \quad Y \quad Z]^T \quad (7)$$

$$\tau_2 = [K \quad M \quad N]^T \quad (8)$$

$$\tau = [\tau_1^T \quad \tau_2^T]^T \quad (9)$$

که در آنها x ، y و z (بر حسب m)، مختصات ربات نسبت به سیستم مختصات زمین-ثابت هستند. برای توصیف جهت گیری ربات، از قرارداد زوایای اوپلر ϕ ، θ و ψ (بر حسب rad) با نام‌های زاویه غلتش^۷، فراز^۸ و سمت^۹ به ترتیب دوران حول محورهای x ، y و z در سیستم مختصات زمین-ثابت استفاده شده است؛ همچنین u ، v و w به ترتیب، سرعت‌های خطی (بر حسب m/s)، p ، q و r سرعت‌های دورانی (بر حسب rad/s)، X ، Y و Z مجموع نیروهای خطی (بر حسب N) و K ، M و N (بر حسب $N.m$)، مجموع گشتاورهای وارد به ربات نسبت به سیستم مختصات بدنه-ثابت هستند. بردار η شامل، مکان و جهت‌گیری ربات و بردار v شامل، سرعت-های انتقالی و دورانی نسبت به مختصات زمین ثابت، بردار τ

[۱۳] منتشر نموده‌اند. در رویکرد اشاره شده، از روش تطبیقی در تنظیم پارامترهای اثرگذار بر جمعیت در تنظیم مناسبتر پارامترهای ساختار فازی عصبی استفاده شده است. نتایج حاصل از پژوهش در مقایسه با رویکرد استفاده از بهینه ساز مرسوم آگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری نشان می‌دهد. فروزان تبار و همکاران، مدل دینامیک ربات زیرآبی خودکار بدلیل نیروهای مقاوم هیدرودینامیک سیال^۱، میرا کننده^۲، بالابرنده^۳، کریولیس و نیروهای جانب مرکز، گرانش، نیروهای شناوری و نیروهای ناشی از موتور را غیرخطی توصیف کرده‌اند و برای حل این مشکل و جهت تخمین نامعینی‌های غیرخطی دینامیک ربات زیرآبی خودکار، از یک کنترل کننده شبکه عصبی تک لایه استفاده کرده‌اند. به منظور رسیدن ربات به سرعت‌های دلخواه، وزن‌های شبکه عصبی توسط قوانین تطبیق به صورت برخط^۴ تخمین زده شده‌اند [۷].

مطالعات صورت گرفته در زمینه رویکردهای کنترلی ربات‌های خودکار زیرآبی، نشان از تمایل محققان در استفاده از روش‌های کنترل تطبیقی، با توجه به قابلیت‌های اثبات شده این روش‌ها در مواجهه با ناپیچنی‌ها دینامیکی و اغتشاشات محیطی است. اگر چه به علت پیچیدگی‌های محرز مدل دینامیکی فرآیند مورد توجه این مقاله و در هم تنیدگی دینامیک سیستم، پژوهش‌های منتشر شده اغلب محدود به گستره کوچکی از عملکرد سیستم نظیر، کنترل عمق بوده است. بدیهی است، بررسی عملکرد واقعی سیستم حلقه بسته، نیازمند مطالعه دینامیک یک پارچه فرآیند با رویکردهای کنترلی کارآمد و قابل اتکا است. در این مقاله، تلاش شده است تا با استخراج دقیق مدل دینامیکی سیستم و کاربرد روش‌های خطی‌سازی ویژه سیستم‌های ناقص عملگر و بهره‌گیری از کنترل کننده ترکیبی مدل مرجع تطبیقی بر مبنای روش لیاپانف به‌مراه جبرانساز شبکه عصبی مصنوعی برخط، روشی قاعده‌مند و کارآمدی در کنترل یک‌پارچه ربات زیرآبی زیر فعال ۴ ورودی-۶ خروجی ارائه گردد.

⁵ Earth-fixed coordinate system

⁶ Body-fixed coordinate system

⁷ Roll angle

⁸ Pitch angle

⁹ Yaw angle

¹ Drag Force

² Damping Force

³ Lifting force

⁴ Online

بطوریکه $\dot{\eta}$ و $\ddot{\eta}$ به ترتیب، بردار شتاب و سرعت ربات در سیستم مختصات زمین-ثابت هستند و ماتریس تبدیل به صورت روابط (۱۳-۲۴) تعریف می‌شود:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_{13 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_{23 \times 3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$J_1(\eta) = \begin{bmatrix} J_{111} & J_{112} & J_{113} \\ J_{121} & J_{122} & J_{123} \\ J_{131} & J_{132} & J_{133} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$J_{111} = \cos\psi\cos\theta \quad (15)$$

$$J_{112} = -\sin\psi\cos\phi + \cos\psi\sin\theta\sin\phi \quad (16)$$

$$J_{113} = \sin\psi\sin\phi + \cos\psi\sin\theta\cos\phi \quad (17)$$

$$J_{121} = \sin\psi\cos\theta \quad (18)$$

$$J_{122} = \cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi \quad (19)$$

$$J_{123} = -\cos\psi\sin\phi + \sin\psi\sin\theta\cos\phi \quad (20)$$

$$J_{131} = -\sin\theta \quad (21)$$

$$J_{132} = \cos\theta\sin\phi \quad (22)$$

$$J_{133} = \cos\theta\cos\phi \quad (23)$$

$$J_2(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix} \quad (24)$$

معادله کلی دینامیک ربات، رابطه (۱۰)، با استفاده از ماتریس تبدیل J قابل تعریف در سیستم مختصات زمین-ثابت می‌باشد [۱۴]:

$$M_{\eta}(\eta)\ddot{\eta} + C_{\eta}(v, \eta)\dot{\eta} + D_{\eta}(v, \eta)\dot{\eta} + g_{\eta}(\eta) = \tau_{\eta} \quad (25)$$

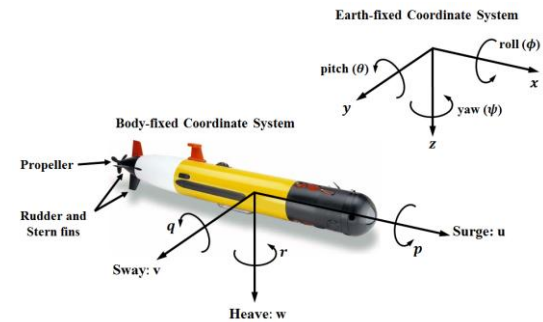
در این مقاله از پارامترهای فیزیکی و هیدرودینامیکی ربات زیرآبی خودکار تجاری به نام رموس^۲ استفاده شده است [۱۶]. یک جفت باله افقی به نام استرن^۳ (با تغییرات زاویه‌ای $(\delta_s \text{ rad})$ ، عمق ربات را با تغییر زاویه‌ی فراز θ کنترل می‌کند؛ همچنین، یک جفت باله عمودی به نام رادر^۴ (با تغییرات زاویه‌ی $(\delta_r \text{ rad})$ حرکات ربات را در صفحه X-y با تغییر در زاویه سمت ψ کنترل می‌کند. این باله‌ها مطابق شکل ۲ در انتهای ربات نصب شده‌اند. ورودی کنترلی دیگر رموس، پروانه‌نصب شده در انتهای ربات است که نیروی قابل کنترل تراست^۵ X_{prop} (N) و گشتاور دورانی K_{prop} (N.m)

شامل، مجموع نیروها و گشتاورهای وارد شده به ربات می‌باشند [۱۴ و ۱۵].

سیستم دینامیکی در مختصات بدنه - ثابت در مرجع [۱۶] توسط پرسترو معرفی شده است. در حالت کلی، معادله دینامیکی ربات در سیستم مختصات بدنه - ثابت، مطابق رابطه (۱۰) بیان می‌شود:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (10)$$

که در آن M ماتریس اینرسی، $C(v)v$ ماتریس کریولیس و نیروهای گریز از مرکز، $D(v)v$ ماتریس نیروهای میرا کننده، $g(\eta)$ بردار نیروها و گشتاورهای گرانشی و τ بردار نیروهای کنترلی هستند. ماتریس‌های کریولیس و گریز از مرکز شامل، جرم‌های اضافه شده^۱ هستند.



شکل ۲- قرارداد سیستم‌های مختصات زمین - ثابت و بدنه - ثابت

جرم اضافه شده، مقدار جرمی از آب اطراف ربات است که به هنگام شتاب‌گیری ربات، به همراه آن حرکت می‌کند. ماتریس تبدیل J سرعت‌های ربات را از سیستم مختصات بدنه - ثابت به سیستم مختصات زمین - ثابت انتقال می‌دهد [۱۵]:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \Leftrightarrow v = J^{-1}(\eta)\dot{\eta} \quad (11)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۱۱)، رابطه بین شتاب‌ها در دو سیستم مختصات حاصل می‌شود:

$$\ddot{\eta} = J(\eta)\dot{v} + \dot{J}(\eta)v \Leftrightarrow \dot{v} = J^{-1}(\eta)[\ddot{\eta} - \dot{J}(\eta)J^{-1}(\eta)\dot{\eta}] \quad (12)$$

² REMUS
³ Stern
⁴ Rudder
⁵ Thrust

¹ Added Masses

که در آن H_1 خروجی فرآیند در زیرسیستم اول است. همچنین با تغییر در متغیرهای $\dot{\phi}_1 = \phi_2 = \dot{\phi}$ و $\dot{\phi}_2 = \xi_2$ رابطه (۴-۱) در فرم فضای حالت نوشته می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xi_2 \quad (28)$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

که H_2 خروجی فرآیند در زیرسیستم دوم است. همچنین معادلات دینامیکی خطی‌سازی شده با روش خطی-ساز جزئی، معادلات (۲-۳۷) و (۲-۳۸) و همچنین معادلات (۲-۵۵) و (۲-۵۶)، از ضمیمه ۷-۲، به ترتیب در قالب فضای حالت به صورت روابط (۳۰-۳۳) بازنویسی می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xi_3 \quad (30)$$

$$H_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xi_4 \quad (32)$$

$$H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

بطوریکه H_3 و H_4 بترتیب خروجی‌های فرآیند در زیر سیستم‌های سوم و چهارم می‌باشند.

روابط دینامیکی بدست آمده در هر زیر سیستم (روابط (۲۶) تا (۳۳) برای دینامیک جفت نشده^۱ می‌باشند. به منظور بررسی اثر تداخل کانال‌ها، این روابط خطی‌سازی شده را می‌توان در قالب جفت شده به صورت روابط (۳۴-۳۵) بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{8 \times 1} &= A_{8 \times 1} X_{8 \times 1} + B_{8 \times 4} \xi_{4 \times 1} \\ &= \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix}_{8 \times 1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{8 \times 8} \\ &\quad \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \phi_1 \\ \phi_2 \\ y_1 \\ y_2 \\ z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}_{8 \times 1} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{8 \times 4} \times \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_1 \\ \xi_1 \\ \xi_1 \end{bmatrix}_{4 \times 1} \quad (34) \end{aligned}$$

¹ Decoupled

را تامین می‌کند. دینامیک ربات زیرآبی خودکار رموس، دارای ۴ ورودی کنترلی و ۶ خروجی (شامل مکان‌ها و جهت‌گیری-ها) است، بنابراین دینامیک این ربات در حالت کلی، از نوع ناقص عملگر است. دینامیک ناقص عملگر رموس، از نوع جفت شده در ورودی‌ها است. این موضوع بدلیل اینکه سیگنال کنترلی δ_r بین حرکات ربات در جهت Y و زاویه سمت ψ و همچنین سیگنال کنترلی δ_s بین حرکات ربات در جهت Z و زاویه فراز θ مشترک هستند، ایجاد می‌شود.

در مقاله حاضر به منظور طراحی کنترل‌کننده مدل مرجع تطبیقی همراه با جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی، بیان سیستم دینامیکی در سیستم مختصات زمین-ثابت لازم است که جزئیات معادلات دینامیکی در سیستم مختصات زمین-ثابت و قالب خطی‌سازی شده آنها به ترتیب در ضمایم ۷-۱ و ۷-۲ ارائه شده‌اند. با توجه به امکان تفکیک مدل دینامیکی خطی‌سازی شده به زیر سیستم‌های مجزا که موجب تسهیل برپایی مدل‌های کنترلی می‌شود، در مقاله حاضر از دو رویکرد کنترلی براساس سیستم دینامیکی کلی خطی‌سازی شده در چارچوب زمین ثابت و رویکرد تفکیک سیستم دینامیکی خطی‌سازی شده در مختصات زمین - ثابت به چهار زیر سیستم استفاده و نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده است. در زیر سیستم اول و دوم دینامیک ربات زیرآبی خودکار در حرکات طولی x و زاویه غلتش ϕ به طور جداگانه با استفاده از روش خطی‌سازی دینامیک معکوس، براساس منبع [۱۷]، خطی‌سازی شده‌اند. در زیرسیستم سوم، دینامیک ربات زیرآبی خودکار در جهت‌های Y و زاویه سمت ψ توسط روش خطی‌سازی جزئی به صورت خطی در آمده‌اند و نهایتاً در زیر سیستم چهارم دینامیک ربات در جهت‌های Z و زاویه فراز θ نیز، توسط روش خطی‌سازی جزئی خطی شده‌اند.

به منظور طراحی کنترل‌کننده مدل مرجع تطبیقی، بازنویسی سیستم دینامیکی خطی‌سازی شده بصورت مدل فضای حالت ضرورت دارد؛ بنابراین با تغییر متغیرهای $\dot{x}_1 = x_2 = \dot{x}$ و $\dot{x}_2 = \xi_1$ ، رابطه (۱-۱) از ضمیمه ۷-۱ پس از خطی‌سازی به روش دینامیک معکوس به شکل فضای حالت بازنویسی می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xi_1 \quad (26)$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$e_2 = H_2 - H_{m2} \quad (45)$$

$$e_3 = H_3 - H_{m3} \quad (46)$$

$$e_4 = H_4 - H_{m4} \quad (47)$$

قانون کنترل جهت تولید هر کدام از سیگنال‌های کنترلی $a_{q1}, a_{q2}, a_{q3}, a_{q4}$ در کنترل‌کننده مدل مرجع تطبیقی، براساس مرجع [۱۸]، به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$a_{q1} = -[K_{1,1,1} \quad K_{1,1,2}] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + L_1 r_1 \quad (48)$$

$$a_{q2} = -[K_{2,1,1} \quad K_{2,1,2}] \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} + L_2 r_2 \quad (49)$$

$$a_{q3} = -[K_{3,1,1} \quad K_{3,1,2}] \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + L_3 r_3 \quad (50)$$

$$a_{q4} = -[K_{4,1,1} \quad K_{4,1,2}] \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + L_4 r_4 \quad (51)$$

قواعد تطبیق، برای تخمین بهره‌های کنترل‌کننده $(K_1, K_2, K_3, K_4, L_1, L_2, L_3, L_4)$ به صورت روابط (۵۲-۵۹) حاصل می‌شوند [۱۸]:

$$\begin{bmatrix} \dot{K}_{1,1,1} & \dot{K}_{1,1,2} \end{bmatrix} = B_{m1(1 \times 2)}^T P_1(2 \times 2) e_{1(2 \times 1)} [x_1 \quad x_2] \text{sgn}(l_1) \quad (52)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{K}_{2,1,1} & \dot{K}_{2,1,2} \end{bmatrix} = B_{m2(1 \times 2)}^T P_2(2 \times 2) e_{2(2 \times 1)} [\phi_1 \quad \phi_2] \text{sgn}(l_2) \quad (53)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{K}_{3,1,1} & \dot{K}_{3,1,2} \end{bmatrix} = B_{m3(1 \times 2)}^T P_3(2 \times 2) e_{3(2 \times 1)} [y_1 \quad y_2] \text{sgn}(l_3) \quad (54)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{K}_{4,1,1} & \dot{K}_{4,1,2} \end{bmatrix} = B_{m4(1 \times 2)}^T P_4(2 \times 2) e_{4(2 \times 1)} [z_1 \quad z_2] \text{sgn}(l_4) \quad (55)$$

$$\dot{L}_1 = -B_{m1(1 \times 2)}^T P_1(2 \times 2) e_{1(2 \times 1)} r_{1(1 \times 1)}^T \text{sgn}(l_1) \quad (56)$$

$$\dot{L}_2 = -B_{m2(1 \times 2)}^T P_2(2 \times 2) e_{2(2 \times 1)} r_{2(1 \times 1)}^T \text{sgn}(l_2) \quad (57)$$

$$\dot{L}_3 = -B_{m3(1 \times 2)}^T P_3(2 \times 2) e_{3(2 \times 1)} r_{3(1 \times 1)}^T \text{sgn}(l_3) \quad (58)$$

$$\dot{L}_4 = -B_{m4(1 \times 2)}^T P_4(2 \times 2) e_{4(2 \times 1)} r_{4(1 \times 1)}^T \text{sgn}(l_4) \quad (59)$$

روابط (۳۶) تا (۵۹) برای سیستم دینامیکی جفت نشده و برای هر زیرسیستم به طور مجزا حاصل شده‌اند. به منظور طراحی سیستم کنترلی جفت شده و یکپارچه مدل مرجع، قوانین تطبیق و خطاها مطابق روابط (۶۰) الی (۶۵) بازنویسی شده‌اند:

$$H_{8 \times 1} = C_{8 \times 8} \times X_{8 \times 1} \quad (35)$$

$$C_{8 \times 8} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{8 \times 8}$$

که در روابط بالا $X_{8 \times 1}$ بردار کلی متغیرهای حالت و $H_{8 \times 1}$ بردار خروجی کلی از فرآیند است.

۳- طراحی کنترل‌کننده

۳-۱- کنترل‌کننده مدل مرجع تطبیقی

جزئیات کنترل مدل مرجع تطبیقی به همراه اثبات پایداری لیاپانف آن در منبع [۱۸] ارائه شده است. برای کنترل ربات زیرآبی خودکار ۶ درجه آزادی در فضای ۳ بعدی، سیگنال‌های کنترلی ورودی به هر یک از چهار زیرسیستم توسط چهار کنترل‌کننده مدل مرجع تطبیقی به طور جداگانه برپا می‌شوند. مدل‌های مرجع باید پاسخ مناسبی در برابر ورودی مرجع داشته باشند. ساختار مدل مرجع برای هر سیستم در روابط (۳۶-۴۳) نشان داده شده است:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{m1} \\ \dot{x}_{m2} \end{bmatrix} = A_{m1} \begin{bmatrix} x_{m1} \\ x_{m2} \end{bmatrix} + B_{m1} r_1 \quad (36)$$

$$H_{m1} = C_{m1} \begin{bmatrix} x_{m1} \\ x_{m2} \end{bmatrix} + D_{m1} r_1 \quad (37)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_{m1} \\ \dot{\phi}_{m2} \end{bmatrix} = A_{m2} \begin{bmatrix} \phi_{m1} \\ \phi_{m2} \end{bmatrix} + B_{m2} r_2 \quad (38)$$

$$H_{m2} = C_{m2} \begin{bmatrix} \phi_{m1} \\ \phi_{m2} \end{bmatrix} + D_{m2} r_2 \quad (39)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_{m1} \\ \dot{y}_{m2} \end{bmatrix} = A_{m3} \begin{bmatrix} y_{m1} \\ y_{m2} \end{bmatrix} + B_{m3} r_3 \quad (40)$$

$$H_{m3} = C_{m3} \begin{bmatrix} y_{m1} \\ y_{m2} \end{bmatrix} + D_{m3} r_3 \quad (41)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_{m1} \\ \dot{z}_{m2} \end{bmatrix} = A_{m4} \begin{bmatrix} z_{m1} \\ z_{m2} \end{bmatrix} + B_{m4} r_4 \quad (42)$$

$$H_{m4} = C_{m4} \begin{bmatrix} z_{m1} \\ z_{m2} \end{bmatrix} + D_{m4} r_4 \quad (43)$$

که $H_{m1}, H_{m2}, H_{m3}, H_{m4}$ خروجی‌های مدل مرجع در هر زیرسیستم می‌باشند. r_1, r_3, r_4 ورودی‌های مرجع یا دلخواه هستند که در فضای سه بعدی مسیری دلخواه را ساخته و ربات ملزم به ردیابی آن است؛ همچنین r_2 زاویه غلتش دلخواه را تعیین می‌کند. $A_{m1, \dots, 4}, B_{m1, \dots, 4}, C_{m1, \dots, 4}, D_{m1, \dots, 4}$ ماتریس‌های ثابت می‌باشند.

خطای بین خروجی فرآیند و خروجی مدل مرجع در هر زیرسیستم به صورت روابط (۴۴-۴۷) حاصل می‌شوند:

$$e_1 = H_1 - H_{m1} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_{m8 \times 1} &= A_{m8 \times 1} X_{m8 \times 1} + B_{m8 \times 4} r_{4 \times 1} \\ &= \begin{bmatrix} \dot{x}_{m1} \\ \dot{x}_{m2} \\ \dot{\phi}_{m1} \\ \dot{\phi}_{m2} \\ \dot{y}_{m1} \\ \dot{y}_{m2} \\ \dot{z}_{m1} \\ \dot{z}_{m2} \end{bmatrix}_{8 \times 1} = \begin{bmatrix} A_{m12 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & A_{m22 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & A_{m32 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & A_{m42 \times 2} \end{bmatrix}_{8 \times 8} \\ &\times \begin{bmatrix} x_{m1} \\ x_{m2} \\ \phi_{m1} \\ \phi_{m2} \\ y_{m1} \\ y_{m2} \\ z_{m1} \\ z_{m2} \end{bmatrix}_{8 \times 1} + \begin{bmatrix} B_{m12 \times 1} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} & B_{m22 \times 1} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} & B_{m32 \times 1} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} & B_{m42 \times 1} \end{bmatrix}_{8 \times 4} \times \begin{bmatrix} r_1 \\ r_1 \\ r_1 \\ r_1 \end{bmatrix}_{4 \times 1} \quad (60) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{m8 \times 1} &= C_{m8 \times 8} \times X_{m8 \times 1} + D_{m8 \times 4} \times r_{4 \times 1} \\ C_{m8 \times 8} &= \begin{bmatrix} C_{m12 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & C_{m22 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & C_{m32 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & C_{m42 \times 2} \end{bmatrix}_{8 \times 8} \\ D_{m8 \times 4} &= \begin{bmatrix} D_{m12 \times 1} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} & D_{m22 \times 1} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} & D_{m32 \times 1} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} & D_{m42 \times 1} \end{bmatrix}_{8 \times 4} \quad (61) \end{aligned}$$

کنترلی مدل مرجع تطبیقی $(a_{q_1, \dots, 4})$ جمع شده، نهایتاً ورودی کنترلی به فرآیند $(\xi_{1, \dots, 4})$ ساخته می‌شود. در این قسمت ساختار جبرانساز شبکه عصبی مصنوعی برای یک زیر سیستم فرمول نویسی شده است، بطوریکه این روابط قابل بسط دادن به دیگر زیر سیستم‌ها می‌باشند.

روش پس انتشار خطا، به صورت برخط برای آموزش یک شبکه عصبی دو لایه ۱-۲-۱ مورد استفاده قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، این شبکه از یک تابع تبدیل سیگموئیدی در لایه اول و از یک تابع تبدیل خطی در لایه دوم استفاده می‌کند. الگوریتم پس انتشار خطا، پارامترهای شبکه را به منظور کاهش حداقل مربعات خطا تنظیم می‌کند [۱۸].

با در نظر گرفتن r به عنوان ورودی اولیه شبکه عصبی، ورودی‌ها در طول شبکه و رو به جلو انتشار داده می‌شوند. خروجی هر لایه ورودی لایه بعدی را می‌سازد. رابطه خروجی هر لایه در زیر فرمول بندی شده است:

که $H_{m8 \times 1}$ بردار خروجی کلی از مدل مرجع است.

$$\begin{aligned} \dot{K}_{(4 \times 8)} &= B_{m(8 \times 4)}^T \times P_{(8 \times 8)} \\ &\times e_{(8 \times 1)} \times X_{(8 \times 1)}^T \quad (62) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{L}_{(4 \times 8)} &= B_{m(8 \times 4)}^T \times P_{(8 \times 8)} \\ &\times e_{(8 \times 1)} \times r_{(4 \times 1)}^T \quad (63) \end{aligned}$$

که در آن بردار خطا برابر است با:

$$e_{(8 \times 1)} = X_{m8 \times 1} - X_{8 \times 1} \quad (64)$$

در روابط ۶۲ و ۶۳ ماتریس $P_{8 \times 8}$ از حل معادله (۶۵) با روش لیاپانف حاصل می‌شود:

$$P_{8 \times 8} \times A_{m8 \times 8} + A_{m8 \times 8}^T P_{8 \times 8} = -Q_{8 \times 8} \quad (65)$$

که $Q_{8 \times 8}$ و $P_{8 \times 8}$ ماتریسی مثبت معین می‌باشند.

۳-۲- جبرانساز شبکه عصبی مصنوعی

جبرانساز شبکه عصبی مصنوعی برای هر چهار کنترل‌کننده مدل مرجع تطبیقی به طور جداگانه طراحی شده است. سیگنال کنترلی جبرانساز در هر زیر سیستم با سیگنال

برای $m = 1, 2, \dots, k = 0, 1, 2, \dots$ و ω نرخ آموزش است [۱۶]. ساختار کلی کنترل کننده مدل مرجع تطبیقی به همراه جبران ساز شبکه عصبی مصنوعی برای زیر سیستمها در شکل های ۴ الی ۷ نشان داده شده اند. مطابق شکل دو زیر سیستم حالت طولی (شکل ۴) و زاویه غلتش (شکل ۵) مدل بصورت دینامیک کامل و برای زیر سیستم حالت عرض (شکل ۶) و حالت عمق (شکل ۷) مدل بصورت دینامیک جزئی خطی سازی شده است.

۴- شبیه سازی

مدل های چهارگانه فوق در محیط متلب سیمولینک بر پا گردیده و شبیه سازی سیستم های حلقه بسته به منظور بررسی عملکرد و اثبات مقاومت و دقت کنترل کننده ترکیبی مدل مرجع تطبیقی پیشنهادی به همراه جبران ساز شبکه عصبی مصنوعی برای ربات زیرآبی خودکار ۶ درجه آزادی مطابق روال ذیل انجام شده است. شبیه سازی های جداگانه برای حالت های مختلف به ترتیب شامل: (۱) کنترل مدل مرجع تطبیقی بدون جبران ساز شبکه عصبی مصنوعی و (۲) کنترل مدل مرجع تطبیقی به همراه جبران ساز شبکه عصبی مصنوعی می باشند. بطور مشخص به منظور کنترل ربات زیرآبی خودکار در جهت های x, y, z و زاویه غلتش ϕ ، چهار کنترل کننده مدل مرجع تطبیقی به همراه جبران ساز شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده اند. زوایای فراز θ و سمت ψ به طور مستقیم قابل کنترل نیستند (بدلیل اینکه این زوایا در خطی سازی جزئی غیرخطی باقی مانده اند). همچنین تغییرات زوایای فراز θ و سمت ψ در محدوده فیزیکی قابل قبول به ترتیب $(Rad) \pm 0.17$ و $(Rad) \pm 0.17$ (درجه) و $(Rad) \pm 0.17$ (درجه) محدود شده اند. مسیر دلخواه در فضای سه بعدی $x-y-z$ ، که توسط ورودی های مرجع r_1, r_3, r_4 ساخته می شود، به صورت تابع مارپیچ^۳ در نظر گرفته شده است:

$$r_1 = \cos(0.2t) \quad (75)$$

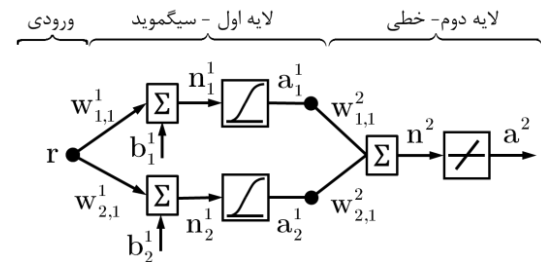
$$r_3 = \sin(0.2t) \quad (76)$$

$$r_4 = 0.06t \quad (77)$$

$$a^0 = r \quad (66)$$

$$a^1 = f^1(W^1 a^0 + b^1) = \text{logsig}(W^1 a^0 + b^1) \quad (67)$$

$$a = a^2 = f^2(W^2 a^1 + b^2) = \text{purelin}(W^2 a^1 + b^2) \quad (68)$$



شکل ۳- ساختار جبران ساز شبکه عصبی مصنوعی با روش پس انتشار خطا

بطوریکه W^1, W^2 وزن ها، b^1, b^2 بایاس ها و f^1, f^2 توابع تبدیل در هر لایه شبکه هستند، a^1 خروجی لایه اول و $a = a^2$ خروجی لایه دوم یا خروجی شبکه است. پس از مشتق گیری از توابع تحریک:

$$f^1(n) = \frac{d}{dn} \left(\frac{1}{1 + e^{-n}} \right) = \frac{e^{-n}}{(1 + e^{-n})^2} = \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-n}} \right) \left(\frac{1}{1 + e^{-n}} \right) = (1 - a^1) \quad (69)$$

$$f^2(n) = \frac{d}{dn} (n) = 1 \quad (70)$$

حساسیت ها^۱ در جهت رو به عقب شبکه به ترتیب از لایه دوم به لایه اول $s^1 \rightarrow s^2$ به صورت زیر پس انتشار داده می شوند:

$$s^2 = -2f^2(n^2)e_{network} = -2e_{network} \quad (71)$$

$$s^1 = f^1(n^1)(W^2)^T s^2 = \begin{bmatrix} (1 - a_1^1)a_1^1 & 0 \\ 0 & (1 - a_2^1)a_2^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{1,1}^2 \\ W_{1,1}^2 \end{bmatrix} s^2 \quad (72)$$

خطای شبکه $e_{network} = H_m - a$ بوده و پارامترهای شبکه عصبی (وزن ها و بایاس ها) توسط روش بیشترین نزول^۲ تخمین زده می شوند:

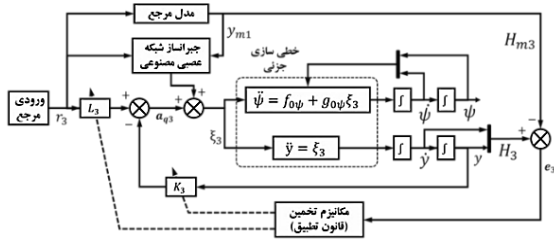
$$W^m(k + 1) = W^m(k) - \omega s^m (a^{m-1})^T \quad (73)$$

$$b^m(k + 1) = b^m(k) - \omega s^m \quad (74)$$

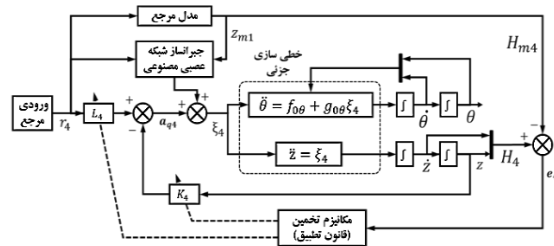
³ Helix Function

¹ Sensitivity

² Steepest Descent



شکل ۳- زیر سیستم ۳- ساختار کنترل کننده مدل مرجع تطبیقی به همراه جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی برای کنترل حرکت عرضی ربات زیرآبی خودکار

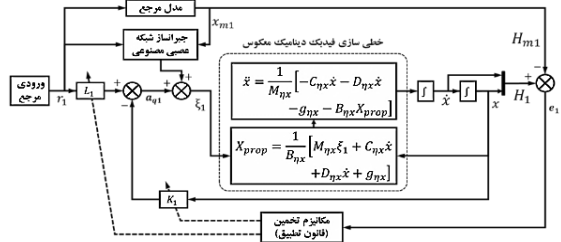


شکل ۴- زیر سیستم ۴- ساختار کنترل کننده مدل مرجع تطبیقی به همراه جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی برای کنترل عمق ربات زیرآبی خودکار

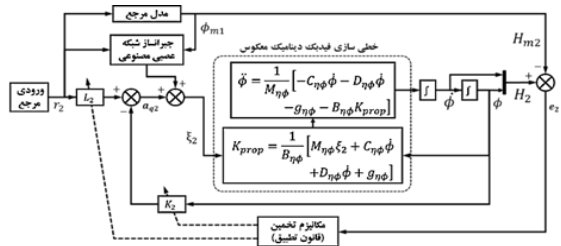
همچنین برای بررسی مقاومت کنترل کننده در برابر اغتشاشات، سیگنال نویز از ثانیه ۱۰ تا انتهای شبیه سازی به سیستم اعمال می‌شود. تمامی سیگنال‌های کنترلی محدود شده هستند و نتایج به صورت زیر حاصل شده‌اند:

نتیجه حاصل از بکارگیری کنترل کننده مدل مرجع تطبیقی بدون جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی به منظور کنترل ربات در فضای سه بعدی x-y-z در شکل ۸ نشان داده شده است. ربات از نقطه $[0 \ 0 \ 0]^T$ شروع به حرکت کرده تا به نقطه شروع مسیر مرجع $[1 \ 0 \ 0]^T$ برسد و آن را دنبال کند. وجود و استمرار نویز در سیستم، ربات را از مسیر مرجع خارج کرده و ربات قادر به ردیابی مسیر مرجع نمی‌باشد؛ بنابراین برای حذف تاثیرات نویز در سیستم، جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی به سیستم کنترلی افزوده می‌شود.

همانطور که از شکل ۹ مشخص است، افزودن جبران‌ساز شبکه عصبی باعث افزایش مقاومت و پایداری کنترل کننده مدل مرجع تطبیقی می‌شود، بطوریکه ربات با تقریب عالی



شکل ۱- زیر سیستم ۱- ساختار کنترل کننده مدل مرجع تطبیقی به همراه جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی برای کنترل حرکت طولی ربات زیرآبی خودکار



شکل ۲- زیر سیستم ۲- ساختار کنترل کننده مدل مرجع تطبیقی به همراه جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی برای کنترل زاویه غلتش ربات زیرآبی خودکار

که در آن t بر حسب ثانیه زمان شبیه سازی است؛ همچنین زاویه غلتش دلخواه برای ورود به زیر سیستم دوم را فراهم می‌کند؛ بطوریکه سیستم کنترلی ربات زیر آبی خودکار باید از آن زاویه پیروی کند. در این شبیه سازی ورودی مرجع r_2 به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$r_2 = 0 \quad (۷۸)$$

مدل‌های مرجع و نرخ آموزش در زیر سیستم‌ها به صورت زیر انتخاب شده‌اند:

$$A_{m1} = A_{m2} = A_{m3} = A_{m4} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -25 & -9 \end{bmatrix} \quad (۷۹)$$

$$B_{m1} = B_{m2} = B_{m3} = B_{m4} = \begin{bmatrix} 0 \\ 25 \end{bmatrix} \quad (۸۰)$$

$$C_{m1} = C_{m2} = C_{m3} = C_{m4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۸۱)$$

$$D_{m1} = D_{m2} = D_{m3} = D_{m4} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۸۳)$$

$$\omega_1 = 1 \quad (۸۴)$$

$$\omega_2 = 0.01 \quad (۸۵)$$

$$\omega_3 = 0.4 \quad (۸۶)$$

$$\omega_4 = 0.1 \quad (۸۷)$$

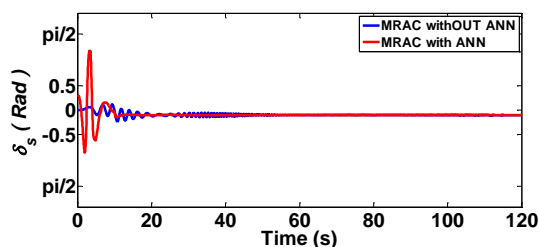
مرجع تطبیقی همراه/ بدون جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی در حضور ورودی ناخواسته خارجی دائمی

تغییرات زاویه باله عمودی δ_r در شکل ۱۰ نشان داده شده است. به منظور نزدیک کردن شبیه سازی به واقعیت، این سیگنال کنترلی بین $\pm \pi/2$ (Rad) محدود شده است. تغییرات این سیگنال برای کنترل‌کننده مدل مرجع به حد تعیین شده نمی‌رسد، در صورتیکه این محدودیت مانع افزایش این سیگنال هنگام افزودن جبران‌ساز به سیستم کنترلی می‌شود.

تغییرات زاویه باله افقی δ_s که به عنوان سیگنال کنترلی به منظور کنترل ربات وارد دینامیک ربات در جهت‌های θ و z می‌شود، برای کنترل‌کننده مدل مرجع تطبیقی با وجود عدم وجود جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این سیگنال کنترلی نیز بین $\pm \pi/2$ (Rad) محدود شده است.

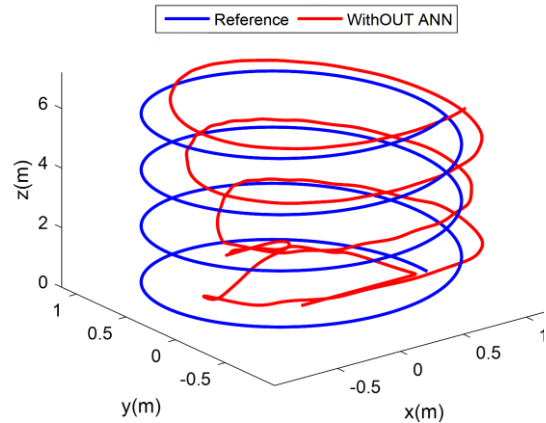
در شکل ۱۲ تغییرات سیگنال کنترلی K_{prop} با حضور و عدم حضور جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی در سیستم کنترلی مدل مرجع تطبیقی نشان داده شده است. این سیگنال کنترلی بین ± 8 (N.m) محدود شده است. تغییرات سیگنال کنترلی X_{prop} برای هر دو حالت وجود و عدم وجود جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این سیگنال کنترلی نیز بین ± 10 (N) محدود شده است.

زاویه غلتش دلخواه برابر صفر (Rad) انتخاب شده است. همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، پس از اعمال نویز در ثانیه ۱۰ شبیه سازی کنترل مدل مرجع تطبیقی به تنهایی نمی‌تواند ربات را به زاویه غلتش دلخواه برگرداند. افزودن جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی مقاومت سیستم کنترلی را در برابر نویزها بالا برده و ربات پس از مدت کوتاهی به زاویه غلتش دلخواه باز می‌گردد.

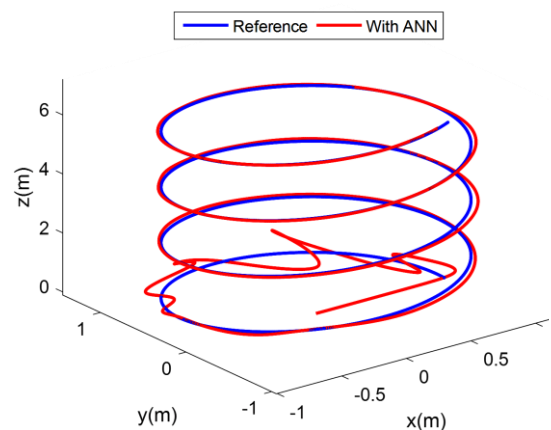


شکل ۱۱- تغییرات زاویه باله افقی δ_s با کنترل‌کننده مدل

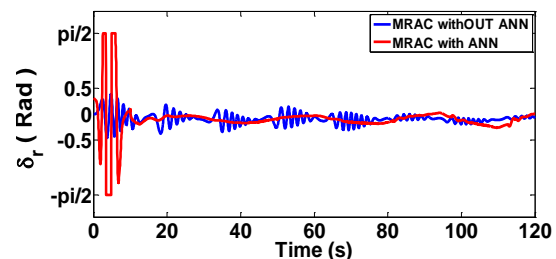
مسیر مرجع را، حتی با وجود نویزهای دائمی در سیستم، دنبال می‌کند.



شکل ۸- مسیر حرکت ربات نسبت به مسیر دلخواه با کنترل‌کننده مدل مرجع تطبیقی بدون جبران‌ساز شبکه عصبی در معرض ورودی ناخواسته خارجی دائمی

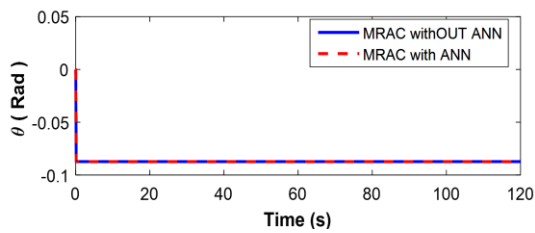


شکل ۹- مسیر حرکت ربات نسبت به مسیر دلخواه با کنترل‌کننده مدل مرجع تطبیقی با جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی در معرض ورودی ناخواسته خارجی دائمی

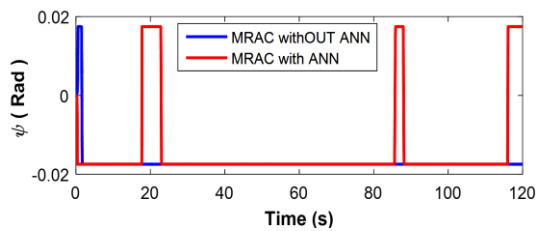


شکل ۱۰- تغییرات زاویه باله عمودی δ_r با کنترل‌کننده مدل

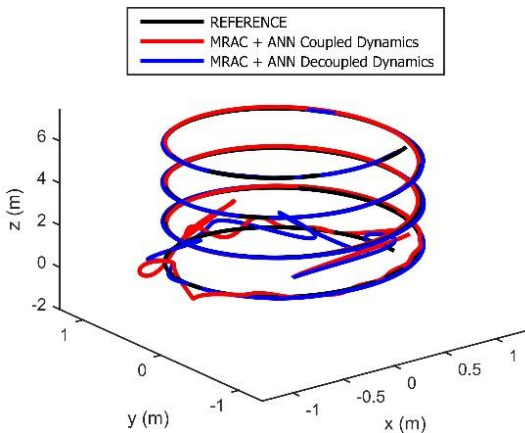
استوانه‌ای برای هر دو رویکرد همراه با مسیر ورودی مرجع در شکل ۱۷ ترسیم شده‌اند. نتایج حاصل از هر دو رویکرد در ردیابی مسیر مورد نظر رفتار کاملاً یکسانی در حضور ورودی خارجی دائم را نشان می‌دهد که نشان از موثر بودن روش مورد اشاره این مقاله است. لازم به ذکر است که در سایر منحنی‌ها نظیر، منحنی تلاش کنترلی و غیره نیز اختلاف مشخصی مشاهده نگردید.



شکل ۱۵- تغییرات زاویه فراز θ با کنترل‌کننده مدل مرجع تطبیقی به همراه/بدون جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی در حضور ورودی مزاحم

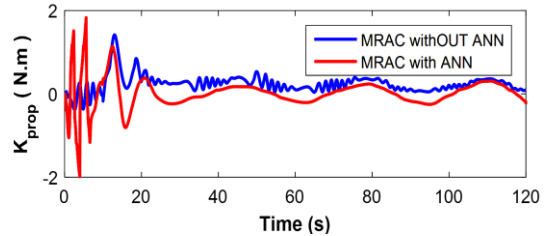


شکل ۱۶- تغییرات زاویه سمت ψ با کنترل‌کننده مدل مرجع تطبیقی همراه/بدون جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی در حضور ورودی ناخواسته خارجی دائمی

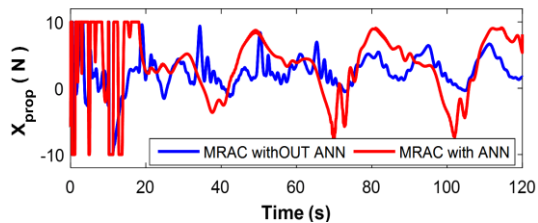


شکل ۱۷- مسیر ربات با دینامیک و سیستم کنترلی جفت

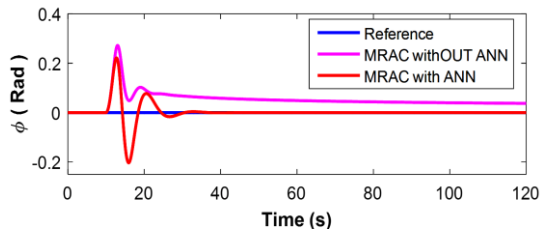
مرجع تطبیقی همراه/بدون جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی در حضور ورودی ناخواسته خارجی دائمی



شکل ۱۲- تغییرات ورودی کنترلی K_{prop} با کنترل‌کننده مدل مرجع تطبیقی همراه/بدون جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی در حضور ورودی ناخواسته خارجی دائمی



شکل ۱۳- تغییرات ورودی کنترلی X_{prop} با کنترل‌کننده مدل مرجع تطبیقی همراه/بدون جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی در حضور ورودی ناخواسته خارجی دائمی



شکل ۱۴- تغییرات زاویه غلتش ϕ با کنترل‌کننده مدل مرجع تطبیقی به همراه/بدون جبران‌ساز شبکه عصبی مصنوعی در حضور ورودی ناخواسته خارجی دائمی

تغییرات زاویه فراز θ بین $(Rad) \pm 0.087$ (۵ درجه) و تغییرات زاویه سمت ψ بین $(Rad) \pm 0.174$ (۱ درجه) محدود شده است. تغییرات این زوایا برای هر دو حالت شبیه سازی به ترتیب در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. جهت مقایسه عملکرد رویکرد پیشنهادی در حالت دینامیک سیستم یکپارچه یا جفت شده با مجموعه سیستم‌های جفت نشده، پاسخ سیستم به ورودی مرجع سه بعدی مارپیچ

شده و جفت نشده نسبت به مسیر دلخواه در حضور ورودی ناخواسته خارجی دائمی

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، کنترل کننده مدل مرجع تطبیقی به همراه جبران ساز شبکه عصبی مصنوعی برای کنترل ربات زیرآبی خودکار ۶ درجه آزادی برای هر دو حالت دینامیک خطی شده جفت شده و جفت نشده ارائه گردید. دینامیک ناقص عملگر ربات توسط روش های خطی سازی جزئی پسخور و خطی سازی دینامیک معکوس به فرم خطی تبدیل شده و از روش پایداری لیاپانوف جهت تضمین پایداری کنترل کننده مورد نظر استفاده شده است. نتایج شبیه سازی ها کنترل کننده ترکیبی مدل مرجع تطبیقی به همراه جبران ساز شبکه عصبی مصنوعی در شرایط ورود مزاحم خارجی به فرآیند و استمرار آن، نشان دهنده عملکرد کاملا برتر کنترل کننده ترکیبی مورد نظر در مقابل سیستم کنترلی بدون استفاده از جبران ساز شبکه عصبی برای هر دو رویکرد دینامیک یکپارچه یا منفصل شده سیستم است. به طور خلاصه، افزودن جبران ساز شبکه عصبی مصنوعی به سیستم کنترل به وضوح موجب مقاوم سازی سیستم همراه با افزایش چشمگیر دقت و توانایی کنترل کننده مدل مرجع تطبیقی در ردیابی مسیر مطلوب در حضور ورودی های نامطلوب خارجی با بکارگیری بسیار مناسب از عملگرها در محدوده فیزیکی در دسترس، می باشد.

۶- فهرست علائم

ترم های تانسور اینرسی ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) $I_{xx}, I_{xy}, I_{xz}, I_{yx}, I_{yy}, I_{yz}, I_{zx}, I_{zy}, I_{zz}$
ضرایب نیرو مقاومت سیال ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{rad}^2$) $K_{p|p|}, N_{r|r|}, Y_{r|r|}, Z_{q|q|}$

ضرایب نیرو مقاومت سیال (kg) $N_{v|v|}, M_{w|w|}$

ضرایب نیرو مقاومت سیال (kg/m) $X_{u|u|}, Y_{v|v|}, Z_{w|w|}$

ضرایب جرم اضافه شده ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{rad}$) $K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}} N_{\dot{r}}$

ضرایب جرم اضافه شده (kg) $M_{\dot{w}}, N_{\dot{v}}$

ضرایب جرم اضافه شده (kg) $X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}$

ضرایب جرم اضافه شده ($\text{kg} \cdot \text{m} / \text{rad}$) $Y_{\dot{r}}, Z_{\dot{q}}$

ورودی کنترلی نیروی دورانی پروانه (N.m) K_{prop}

ضرایب نیروی بالابرنده وارد شده بر بدنه ربات (kg) M_{uwl}, N_{uwl}

ضرایب نیروی بالابرنده وارد شده بر بدنه ربات (kg/m) Y_{uwl}, Z_{uwl}

ضرایب نیروی بالابرنده وارد شده بر باله ها ($\text{kg} \cdot \text{m} / \text{rad}$) M_{uqf}, N_{urf}

ضرایب نیروی بالابرنده وارد شده بر باله ها (kg) M_{uwf}, N_{uwf}

ضرایب نیروی بالابرنده وارد شده بر باله ها (kg/rad) $M_{uu\delta s}, N_{uu\delta r}, Y_{urf}, Z_{uqf}$

ضرایب نیروی بالابرنده وارد شده بر باله ها (kg/m) Y_{uwf}, Z_{uwf}

ضرایب نیروی بالابرنده وارد شده بر باله ها ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{rad}$) $Y_{uu\delta r}, Z_{uu\delta s}$

نیروی وزن ربات (N) W

ورودی کنترلی نیروی تراست پروانه (N) X_{prop}

جرم ربات زیرآبی خودکار (kg) m

مختصات مرکز شناوری در سیستم مختصات زمین - ثابت (m) x_b, y_b, z_b

مختصات مرکز جرم در سیستم مختصات زمین - ثابت (m) x_g, y_g, z_g

تغییرات زاویه باله عمودی (rad) δ_r

تغییرات زاویه باله افقی (rad) δ_s

۷- ضمایم

۷-۱- دینامیک ربات زیرآبی خودکار در سیستم مختصات زمین-ثابت

دینامیک ربات ۶ درجه آزادی در سیستم مختصات بدنه - ثابت توسط پرسترو [۱۶] تعریف شده است. با استفاده از رابطه ژاکوبین، رابطه (۱۲)، روابط بین شتابها و سرعتها در سیستم مختصات بدنه-ثابت و زمین-ثابت را بدست آورده و با جایگذاری آنها در معادلات دینامیکی بدنه-ثابت، معادلات دینامیکی زمین-ثابت به صورت زیر بدست می آیند:

$$\begin{aligned}
 & (m - X_{\ddot{u}}) \left((\cos\psi\cos\theta)(\ddot{x} - (n_{11}\dot{x} + n_{12}\dot{y} + n_{13}\dot{z})) \right. \\
 & \quad + (\cos\theta\sin\psi)(\ddot{y} - (n_{21}\dot{x} + n_{22}\dot{y} + n_{23}\dot{z})) + (-\sin\theta)(\ddot{z} - (n_{31}\dot{x} + n_{32}\dot{y} + n_{33}\dot{z})) \left. \right) \\
 & \quad + mz_g \left((\cos\phi) \left(\ddot{\theta} - (n_{55}\dot{\theta} + n_{56}\dot{\psi}) \right) + (\cos\theta\sin\phi) \left(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}) \right) \right) \\
 & \quad - my_g \left((-\sin\phi) \left(\ddot{\theta} - (n_{55}\dot{\theta} + n_{56}\dot{\psi}) \right) + (\cos\phi\cos\theta) \left(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}) \right) \right) \\
 & \quad + m(y_g q + z_g r)p + (-m(x_g q - w) - Z_w w - Z_q q)q + (-m(x_g r + v) + Y_v v + Y_r r) \\
 & \quad - X_{u|u}|u|u + (W - B)\sin\theta = X_{prop} \tag{۱-۱}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (m - Y_{\ddot{v}}) \left((-\cos\phi\sin\psi - \cos\psi\sin\theta\sin\phi)(\ddot{x} - (n_{11}\dot{x} + n_{12}\dot{y} + n_{13}\dot{z})) \right. \\
 & \quad + (\cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi)(\ddot{y} - (n_{21}\dot{x} + n_{22}\dot{y} + n_{23}\dot{z})) \\
 & \quad + (\cos\theta\sin\phi)(\ddot{z} - (n_{31}\dot{x} + n_{32}\dot{y} + n_{33}\dot{z})) \left. \right) \\
 & \quad - mz_g \left((\ddot{\phi} - (n_{45}\dot{\theta} + n_{46}\dot{\psi})) + (-\cos\phi\tan\theta) \left(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}) \right) \right) \\
 & \quad + (mx_g - Y_r) \left((-\sin\phi) \left(\ddot{\theta} - (n_{55}\dot{\theta} + n_{56}\dot{\psi}) \right) + (\cos\phi\cos\theta) \left(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}) \right) \right) \\
 & \quad + (-m(y_g p + w) + Z_w w + Z_q q)p + (m(z_g r + x_g p))q + (-m(y_g r - u) - X_{\ddot{u}}u)r \\
 & \quad - (Y_{v|v}|v| + Y_{uv}u + Y_{uvf}v) - (Y_{r|r}|r| + Y_{urf}u)r - (W - B)\cos\theta\sin\phi = Y_{uu\delta r}u^2\delta_r \tag{۲-۱}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (m - Z_{\ddot{w}}) \left((\sin\phi\sin\psi + \cos\psi\cos\phi\sin\theta)(\ddot{x} - (n_{11}\dot{x} + n_{12}\dot{y} + n_{13}\dot{z})) \right. \\
 & \quad + (-\cos\theta\sin\phi - \cos\phi\sin\psi\sin\theta)(\ddot{y} - (n_{21}\dot{x} + n_{22}\dot{y} + n_{23}\dot{z})) \\
 & \quad + (\cos\phi\cos\theta)(\ddot{z} - (n_{31}\dot{x} + n_{32}\dot{y} + n_{33}\dot{z})) \left. \right) \\
 & \quad + my_g \left((\ddot{\phi} - (n_{45}\dot{\theta} + n_{46}\dot{\psi})) + (-\cos\phi\tan\theta) \left(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}) \right) \right) \\
 & \quad - (mx_g + Z_q) \left((\cos\phi) \left(\ddot{\theta} - (n_{55}\dot{\theta} + n_{56}\dot{\psi}) \right) + (\cos\theta\sin\phi) \left(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}) \right) \right) \\
 & \quad + (-m(z_g p - v) - Y_v v - Y_r r)p + (-m(z_g q + u) + X_{\ddot{u}}u)q + (m(x_g p + y_g q))r \\
 & \quad - (Z_{w|w}|w| + Z_{uw}u + Z_{uwf}u)w - (Z_{q|q}|q| + Z_{uqf}u)q - (W - B)\cos\theta\cos\phi = Z_{uu\delta s}u^2\delta_s \tag{۳-۱}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -mz_g \left((-\cos\phi\sin\psi - \cos\psi\sin\theta\sin\phi)(\ddot{x} - (n_{11}\dot{x} + n_{12}\dot{y} + n_{13}\dot{z})) \right. \\
 & \quad + (\cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi)(\ddot{y} - (n_{21}\dot{x} + n_{22}\dot{y} + n_{23}\dot{z})) \\
 & \quad + (\cos\theta\sin\phi)(\ddot{z} - (n_{31}\dot{x} + n_{32}\dot{y} + n_{33}\dot{z})) \left. \right) \\
 & \quad + my_g \left((\sin\phi\sin\psi + \cos\psi\cos\phi\sin\theta)(\ddot{x} - (n_{11}\dot{x} + n_{12}\dot{y} + n_{13}\dot{z})) \right. \\
 & \quad + (-\cos\theta\sin\phi - \cos\phi\sin\psi\sin\theta)(\ddot{y} - (n_{21}\dot{x} + n_{22}\dot{y} + n_{23}\dot{z})) \\
 & \quad + (\cos\phi\cos\theta)(\ddot{z} - (n_{31}\dot{x} + n_{32}\dot{y} + n_{33}\dot{z})) \left. \right) \\
 & \quad + (I_{xx} - K_p) \left((\ddot{\phi} - (n_{45}\dot{\theta} + n_{46}\dot{\psi})) + (-\cos\phi\tan\theta) \left(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}) \right) \right) \\
 & \quad - I_{xy} \left((\cos\phi) \left(\ddot{\theta} - (n_{55}\dot{\theta} + n_{56}\dot{\psi}) \right) + (\cos\theta\sin\phi) \left(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}) \right) \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -I_{xz}((- \sin\phi)(\ddot{\theta} - (n_{55}\dot{\theta} + n_{56}\dot{\psi})) + (\cos\phi\cos\theta)(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}))) \\
 & + (-m(y_g q + z_g r))u + (m(y_g p + w))v + (m(z_g p - v))w + (-I_{yz}q - I_{xz}p + I_z r)q \\
 & + (I_{yz}r + I_{xy}p - I_y q)r - K_{p|p}|p|p \\
 & + ((y_g W - y_b B)\cos\theta\cos\phi + (z_g W - z_b B)\cos\theta\sin\phi) = K_{prop} \tag{۴-۱} \\
 m z_g ((\cos\psi\cos\theta)(\ddot{x} - (n_{11}\dot{x} + n_{12}\dot{y} + n_{13}\dot{z})) + (\cos\theta\sin\psi)(\ddot{y} - (n_{21}\dot{x} + n_{22}\dot{y} + n_{23}\dot{z}))) \\
 & + (-\sin\theta)(\ddot{z} - (n_{31}\dot{x} + n_{32}\dot{y} + n_{33}\dot{z}))) \\
 & + (-m(x_g + M_w))((\sin\phi\sin\psi + \cos\psi\cos\phi\sin\theta)(\ddot{x} - (n_{11}\dot{x} + n_{12}\dot{y} + n_{13}\dot{z}))) \\
 & + (-\cos\theta\sin\phi - \cos\phi\sin\psi\sin\theta)(\ddot{y} - (n_{21}\dot{x} + n_{22}\dot{y} + n_{23}\dot{z}))) \\
 & + (\cos\phi\cos\theta)(\ddot{z} - (n_{31}\dot{x} + n_{32}\dot{y} + n_{33}\dot{z}))) \\
 & -I_{yx}((\ddot{\phi} - (n_{45}\dot{\theta} + n_{46}\dot{\psi})) + (-\cos\phi\tan\theta)(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}))) \\
 & + (I_{yy} - M_{\dot{q}})((\cos\phi)(\ddot{\theta} - (n_{55}\dot{\theta} + n_{56}\dot{\psi})) + (\cos\theta\sin\phi)(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}))) \\
 & + (-I_{yz})((-\sin\phi)(\ddot{\theta} - (n_{55}\dot{\theta} + n_{56}\dot{\psi})) + (\cos\phi\cos\theta)(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}))) \\
 & + (m(x_g q - w) + Z_w w + Z_{\dot{q}} q)u + (-m(z_g r + x_g p))v + (m(z_g q + u) - X_{\dot{u}} u)w \\
 & + (I_{yz}q + I_{xz}p - I_z r + N_r r + N_{\dot{v}} v)p + (-I_{xz}r - I_{xy}q + I_x p - K_p p)r \\
 & - (M_{w|w}|w| + M_{uw}u + M_{uwf}u)w - (M_{q|q}|q| + M_{uqf}u)q + (z_g W - z_b B)\sin\theta \\
 & + (x_g W - x_b B)\cos\theta\cos\phi = M_{uu\delta_s}u^2\delta_s \tag{۵-۱} \\
 -m y_g ((\cos\psi\cos\theta)(\ddot{x} - (n_{11}\dot{x} + n_{12}\dot{y} + n_{13}\dot{z}))) \\
 & + (\cos\theta\sin\psi)(\ddot{y} - (n_{21}\dot{x} + n_{22}\dot{y} + n_{23}\dot{z})) + (-\sin\theta)(\ddot{z} - (n_{31}\dot{x} + n_{32}\dot{y} + n_{33}\dot{z}))) \\
 & + (m(x_g - N_{\dot{v}}))((- \cos\phi\sin\psi - \cos\psi\sin\theta\sin\phi)(\ddot{x} - (n_{11}\dot{x} + n_{12}\dot{y} + n_{13}\dot{z}))) \\
 & + (\cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi)(\ddot{y} - (n_{21}\dot{x} + n_{22}\dot{y} + n_{23}\dot{z}))) \\
 & + (\cos\theta\sin\phi)(\ddot{z} - (n_{31}\dot{x} + n_{32}\dot{y} + n_{33}\dot{z}))) \\
 & -I_{zx}((\ddot{\phi} - (n_{45}\dot{\theta} + n_{46}\dot{\psi})) + (-\cos\phi\tan\theta)(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}))) \\
 & -I_{zy}((\cos\phi)(\ddot{\theta} - (n_{55}\dot{\theta} + n_{56}\dot{\psi})) + (\cos\theta\sin\phi)(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}))) \\
 & + (I_{zz} - N_r)((-\sin\phi)(\ddot{\theta} - (n_{55}\dot{\theta} + n_{56}\dot{\psi})) + (\cos\phi\cos\theta)(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}))) \\
 & + (m(x_g r + v) - Y_{\dot{v}} v - Y_r r)u + (m(y_g r - u) + X_{\dot{u}} u)v + (-m(x_g p + y_g q))w \\
 & + (-I_{yz}r - I_{xy}p + I_y q - M_{\dot{q}} q - M_w w)p + (I_{xz}r + I_{xy}q - I_x p + K_p p)q \\
 & - (N_{v|v}|v| + N_{uv}u + N_{uvf}u)v - (N_{r|r}|r| + N_{urf}u)r + (x_g W - x_b B)\cos\theta\sin\phi \\
 & + (y_g W - y_b B)\sin\theta = N_{uu\delta_r}u^2\delta_r \tag{۶-۱}
 \end{aligned}$$

که در معادلات دینامیکی بالا، پارامترهای زیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

$$n_{11} = (-\dot{\psi}\sin\psi\cos\theta - \dot{\theta}\cos\psi\sin\theta)\cos\psi\cos\theta + (-\dot{\psi}\cos\psi\cos\phi + \dot{\phi}\sin\psi\sin\phi - \dot{\psi}\sin\psi\sin\theta\sin\phi + \dot{\theta}\cos\psi\cos\theta\sin\phi + \dot{\phi}\cos\psi\sin\theta\cos\phi) - (\cos\phi\sin\psi - \cos\psi\sin\theta\sin\phi) + (\dot{\psi}\cos\psi\sin\phi + \dot{\phi}\sin\psi\cos\phi - \dot{\psi}\sin\psi\sin\theta\cos\phi + \dot{\theta}\cos\psi\cos\theta\cos\phi - \dot{\phi}\cos\psi\sin\theta\sin\phi)(\sin\phi\sin\psi + \cos\psi\cos\phi\sin\theta) \quad (7-1)$$

$$n_{12} = (-\dot{\psi}\sin\psi\cos\theta - \dot{\theta}\cos\psi\sin\theta)(\cos\theta\sin\psi) + (-\dot{\psi}\cos\psi\cos\phi + \dot{\phi}\sin\psi\sin\phi - \dot{\psi}\sin\psi\sin\theta\sin\phi + \dot{\theta}\cos\psi\cos\theta\sin\phi + \dot{\phi}\cos\psi\sin\theta\cos\phi)(\cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi) + (\dot{\psi}\cos\psi\sin\phi + \dot{\phi}\sin\psi\cos\phi - \dot{\psi}\sin\psi\sin\theta\cos\phi + \dot{\theta}\cos\psi\cos\theta\cos\phi - \dot{\phi}\cos\psi\sin\theta\sin\phi)(-\cos\theta\sin\phi - \cos\phi\sin\psi\sin\theta) \quad (8-1)$$

$$n_{13} = (-\dot{\psi}\sin\psi\cos\theta - \dot{\theta}\cos\psi\sin\theta)(-\sin\theta) + (-\dot{\psi}\cos\psi\cos\phi + \dot{\phi}\sin\psi\sin\phi - \dot{\psi}\sin\psi\sin\theta\sin\phi + \dot{\theta}\cos\psi\cos\theta\sin\phi + \dot{\phi}\cos\psi\sin\theta\cos\phi)(\cos\theta\sin\phi) + (\dot{\psi}\cos\psi\sin\phi + \dot{\phi}\sin\psi\cos\phi - \dot{\psi}\sin\psi\sin\theta\cos\phi + \dot{\theta}\cos\psi\cos\theta\cos\phi - \dot{\phi}\cos\psi\sin\theta\sin\phi)(\cos\phi\cos\theta) \quad (9-1)$$

$$n_{21} = (\dot{\psi}\cos\psi\cos\theta - \dot{\theta}\sin\psi\sin\theta)(\cos\psi\cos\theta) + (-\dot{\psi}\sin\psi\cos\phi - \dot{\phi}\cos\psi\sin\phi + \dot{\psi}\cos\psi\sin\theta\sin\phi + \dot{\theta}\sin\psi\cos\theta\sin\phi + \dot{\phi}\sin\psi\sin\theta\cos\phi)(-\cos\phi\sin\psi - \cos\psi\sin\theta\sin\phi) + (\dot{\psi}\sin\psi\sin\phi - \dot{\phi}\cos\psi\cos\phi + \dot{\psi}\cos\psi\sin\theta\cos\phi + \dot{\theta}\sin\psi\cos\theta\cos\phi - \dot{\phi}\sin\psi\sin\theta\sin\phi)(\sin\phi\sin\psi + \cos\psi\cos\phi\sin\theta) \quad (10-1)$$

$$n_{22} = (\dot{\psi}\cos\psi\cos\theta - \dot{\theta}\sin\psi\sin\theta)(\cos\theta\sin\psi) + (-\dot{\psi}\sin\psi\cos\phi - \dot{\phi}\cos\psi\sin\phi + \dot{\psi}\cos\psi\sin\theta\sin\phi + \dot{\theta}\sin\psi\cos\theta\sin\phi + \dot{\phi}\sin\psi\sin\theta\cos\phi)(\cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi) + (\dot{\psi}\sin\psi\sin\phi - \dot{\phi}\cos\psi\cos\phi + \dot{\psi}\cos\psi\sin\theta\cos\phi + \dot{\theta}\sin\psi\cos\theta\cos\phi - \dot{\phi}\sin\psi\sin\theta\sin\phi)(-\cos\theta\sin\phi - \cos\phi\sin\psi\sin\theta) \quad (11-1)$$

$$n_{23} = (\dot{\psi}\cos\psi\cos\theta - \dot{\theta}\sin\psi\sin\theta)(-\sin\theta) + (-\dot{\psi}\sin\psi\cos\phi - \dot{\phi}\cos\psi\sin\phi + \dot{\psi}\cos\psi\sin\theta\sin\phi + \dot{\theta}\sin\psi\cos\theta\sin\phi + \dot{\phi}\sin\psi\sin\theta\cos\phi)(\cos\theta\sin\phi) + (\dot{\psi}\sin\psi\sin\phi - \dot{\phi}\cos\psi\cos\phi + \dot{\psi}\cos\psi\sin\theta\cos\phi + \dot{\theta}\sin\psi\cos\theta\cos\phi - \dot{\phi}\sin\psi\sin\theta\sin\phi)(\cos\phi\cos\theta) \quad (12-1)$$

$$n_{31} = (-\dot{\theta}\cos\theta)(\cos\psi\cos\theta) + (-\dot{\theta}\sin\theta\sin\phi + \dot{\phi}\cos\theta\cos\phi)(-\cos\phi\sin\psi - \cos\psi\sin\theta\sin\phi) + (-\dot{\theta}\sin\theta\cos\phi - \dot{\phi}\cos\theta\sin\phi)(\sin\phi\sin\psi + \cos\psi\cos\phi\sin\theta) \quad (13-1)$$

$$n_{32} = (-\dot{\theta}\cos\theta)(\cos\theta\sin\psi) + (-\dot{\theta}\sin\theta\sin\phi + \dot{\phi}\cos\theta\cos\phi)(\cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi) + (-\dot{\theta}\sin\theta\cos\phi - \dot{\phi}\cos\theta\sin\phi)(-\cos\theta\sin\phi - \cos\phi\sin\psi\sin\theta) \quad (14-1)$$

$$n_{33} = (-\dot{\theta}\cos\theta)(-\sin\theta) + (-\dot{\theta}\sin\theta\sin\phi + \dot{\phi}\cos\theta\cos\phi)(\cos\theta\sin\phi) + (-\dot{\theta}\sin\theta\cos\phi - \dot{\phi}\cos\theta\sin\phi)(\cos\phi\cos\theta) \quad (15-1)$$

$$n_{45} = (\dot{\phi}\cos\phi\tan\theta + \dot{\theta}\sin\phi(1 + \tan^2\theta))(\cos\phi) + (-\dot{\phi}\sin\phi\tan\theta + \dot{\theta}\cos\phi(1 + \tan^2\theta))(-\sin\phi) \quad (16-1)$$

$$n_{46} = (\dot{\phi}\cos\phi\tan\theta + \dot{\theta}\sin\phi(1 + \tan^2\theta))(\cos\theta\sin\phi) + (-\dot{\phi}\sin\phi\tan\theta + \dot{\theta}\cos\phi(1 + \tan^2\theta))(\cos\phi\cos\theta) \quad (17-1)$$

$$n_{55} = (-\dot{\phi}\sin\phi)(\cos\phi) + (-\dot{\phi}\cos\phi)(-\sin\phi) \quad (18-1)$$

$$n_{56} = (-\dot{\phi}\sin\phi)(\cos\theta\sin\phi) + (-\dot{\phi}\cos\phi)(\cos\phi\cos\theta) \quad (19-1)$$

$$n_{65} = \left(\frac{\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta + \dot{\theta} \sin \theta \sin \phi}{\cos^2 \theta} \right) (\cos \phi) + \left(\frac{-\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta + \dot{\theta} \sin \theta \cos \phi}{\cos^2 \theta} \right) (-\sin \phi) \quad (20-1)$$

$$n_{66} = \left(\frac{\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta + \dot{\theta} \sin \theta \sin \phi}{\cos^2 \theta} \right) (\cos \theta \sin \phi) + \left(\frac{-\dot{\phi} \sin \phi \cos \theta + \dot{\theta} \sin \theta \cos \phi}{\cos^2 \theta} \right) (\cos \phi \cos \theta) \quad (21-1)$$

$$f_0(\eta, p) = m_{11}^{-1}(\eta) [F_1(\eta) \beta(\eta, \dot{\eta}) - h_1(\eta, \dot{\eta})] \quad (10-2)$$

$$g_0(\eta) = m_{11}^{-1}(\eta) [F_1(\eta) \alpha(\eta) - m_{12}(\eta)] \quad (11-2)$$

اثبات

بر اساس معادله اول ماتریس (۱-۲) داریم:

$$\ddot{\eta}_1 = -m_{11}^{-1} m_{12} \ddot{\eta}_2 - m_{11}^{-1} h_1 + m_{11}^{-1} F_1 \tau_{\eta H} \quad (12-2)$$

با قرار دادن این معادله در دومین معادله ماتریس (۱-۲) و با

اعمال قانون کنترلی $\tau_{\eta H} = \alpha(\eta) \xi + \beta(\eta, \dot{\eta})$ داریم:

$$\begin{aligned} (m_{22} - m_{21} m_{11}^{-1} m_{12}) \ddot{\eta}_2 + h_2 - m_{21} m_{11}^{-1} h_1 \\ = (F_2 - m_{21} m_{11}^{-1} F_1) \tau_{\eta H} = \Lambda(\eta) \tau_{\eta H} \\ = \Lambda(\eta) \alpha(\eta) \xi + \Lambda(\eta) \beta(\eta, \dot{\eta}) \end{aligned} \quad (13-2)$$

از تساوی بالا روابط زیر حاصل می‌شود:

$$\Lambda(\eta) \alpha(\eta) = (m_{22} - m_{21} m_{11}^{-1} m_{12}) \quad (14-2)$$

$$\Lambda(\eta) \beta(\eta, \dot{\eta}) = h_2 - m_{21} m_{11}^{-1} h_1 \quad (15-2)$$

$$\xi = \ddot{\eta}_2 \quad (16-2)$$

که مقادیر $\alpha(\eta)$ و $\beta(\eta, \dot{\eta})$ از معادلات (۱۴-۲) و (۱۵-۲) مطابق زیر حاصل می‌شوند:

$$\alpha(\eta) = \Lambda^{-1}(\eta) (m_{22} - m_{21} m_{11}^{-1} m_{12}) \quad (17-2)$$

$$\beta(\eta, \dot{\eta}) = \Lambda^{-1}(\eta) (h_2 - m_{21} m_{11}^{-1} h_1) \quad (18-2)$$

با اعمال قاعده کنترل کننده $\tau_{\eta H} = \alpha(\eta) \xi + \beta(\eta, \dot{\eta})$ همچنین جایگذاری معادله (۱۶-۲) در معادله (۱۲-۲):

$$\begin{aligned} \ddot{\eta}_1 = -m_{11}^{-1} m_{12} \xi - m_{11}^{-1} h_1 \\ + m_{11}^{-1} F_1 (\alpha(\eta) \xi + \beta(\eta, \dot{\eta})) \\ = f_0(\eta, p) + g_0(\eta) \xi \end{aligned} \quad (19-2)$$

که از معادله بالا مقادیر $f_0(\eta, p)$ و $g_0(\eta)$ حاصل می‌شود:

$$f_0(\eta, p) = m_{11}^{-1}(\eta) [F_1(\eta) \beta(\eta, \dot{\eta}) - h_1(\eta, \dot{\eta})] \quad (20-2)$$

$$g_0(\eta) = m_{11}^{-1}(\eta) [F_1(\eta) \alpha(\eta) - m_{12}(\eta)] \quad (21-2)$$

فرم خطی سازی شده معادله (۱۶-۲) و (۱۹-۲) توسط روش خطی سازی فیدبک جزئی پس از تغییر در متغیرها به صورت زیر حاصل می‌شود:

۷-۲- خطی سازی فیدبک دینامیک معکوس

خطی سازی فیدبک جزئی شرح داده شده در این قسمت، برای زیرسیستم‌های ناقص عملگری که ورودی کنترلی آنها جفت شده هستند به کار گرفته می‌شود.

سیستم ناقص عملگر زیر با ورودی کنترلی جفت شده در نظر است [۲۰]:

$$\begin{bmatrix} m_{11}(\eta) & m_{12}(\eta) \\ m_{21}(\eta) & m_{22}(\eta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\eta}_1 \\ \ddot{\eta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1(\eta, \dot{\eta}) \\ h_2(\eta, \dot{\eta}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(\eta) \\ F_2(\eta) \end{bmatrix} \tau_{\eta H} \quad (1-2)$$

بطوریکه $\eta \in \mathbb{R}^n$ بردار حالت متغیرها و $\tau_{\eta H} \in \mathbb{R}^m$ ورودی کنترلی جفت شده است. $F_2(\eta)$ یک ماتریس $m \times m$ معکوس پذیر و دترمینان $\det(F_2(\eta)) \neq 0$ برای تمام η ها مخالف صفر و $F_1 \neq 0$ می‌باشد. همانطور که در (۱-۲) مشخص است ورودی در سیستم دینامیکی ناقص عملگر در بین معادلات مشترک و حالت جفت شدگی دارد.

فرض می‌شود که ماتریس زیر برای تمام η ها معکوس پذیر باشد:

$$\Lambda(\eta) = F_2(\eta) - m_{21}(\eta) m_{11}^{-1}(\eta) F_1(\eta) \quad (2-2)$$

همچنین با تغییر در ورودی کنترلی به فرم زیر داریم:

$$\tau_{\eta H} = \alpha(\eta) \xi + \beta(\eta, \dot{\eta}) \quad (3-2)$$

بطوریکه

$$\alpha(\eta) = \Lambda^{-1}(\eta) [m_{22}(\eta) - m_{21}(\eta) m_{11}^{-1}(\eta) m_{12}(\eta)] \quad (4-2)$$

$$\beta(\eta, \dot{\eta}) = \Lambda^{-1}(\eta) [h_2(\eta, \dot{\eta}) - m_{21}(\eta) m_{11}^{-1}(\eta) h_1(\eta, \dot{\eta})] \quad (5-2)$$

که نهایتاً پس از جایگذاری ورودی کنترلی (۳-۲) در (۱-۲) فرم خطی سازی شده جزئی رابطه (۱-۲) به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{\eta}_1 = p_1 \quad (6-2)$$

$$\dot{p}_1 = f_0(\eta, p) + g_0(\eta) \xi \quad (7-2)$$

$$\dot{\eta}_2 = p_1 \quad (8-2)$$

$$\dot{p}_2 = \xi \quad (9-2)$$

بطوریکه ξ سیگنال کنترلی جدیدی بوده و مقادیر $f_0(\eta, p)$ و $g_0(\eta)$ به صورت زیر حاصل می‌شوند:

$$\begin{aligned} \delta_r \text{ معادلات دینامیکی (۲-۱) و (۶-۱) در سیگنال کنترلی } \delta_r & \quad \dot{\eta}_1 = p_1 \quad (۲۲-۲) \\ \text{مشترک هستند. در قدم اول معادله دینامیکی در این جهت‌ها} & \quad \dot{p}_1 = f_0(\eta, p) + g_0(\eta)\xi \quad (۲۳-۲) \\ \text{باید به فرم استاندارد (۱-۲) بازنویسی شوند:} & \quad \dot{\eta}_2 = p_1 \quad (۲۴-۲) \\ \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\gamma} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \delta_r \quad (۲۶-۲) & \quad \dot{p}_2 = \xi \quad (۲۵-۲) \end{aligned}$$

بطوریکه ترم‌های معادله بالا به صورت زیر تعریف شده‌اند:

۷-۳- خطی سازی فیدبک جزئی برای ربات زیرآبی

خودکار

$$\begin{aligned} m_{11} &= -I_{zx}(-\cos\phi\tan\theta) - I_{zy}(\cos\theta\sin\phi) + (I_{zz} - N_r)(\cos\phi\cos\theta) \quad (۲۷-۲) \\ m_{12} &= -m_{y_g}(\cos\theta\sin\psi) + (m_{x_g} - N_v)(\cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi) \quad (۲۸-۲) \\ m_{21} &= -m_{z_g}(-\cos\phi\tan\theta) + (m_{x_g} - Y_r)(\cos\phi\cos\theta) \quad (۲۹-۲) \\ m_{22} &= (m - Y_v)(\cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi) \quad (۳۰-۲) \\ h_1 &= -m_{y_g}((\cos\psi\cos\theta)(\ddot{x} - (n_{11}\dot{x} + n_{12}\dot{y} + n_{13}\dot{z})) + (\cos\theta\sin\psi)(-(n_{21}\dot{x} + n_{22}\dot{y} + n_{23}\dot{z})) \\ & \quad + (-\sin\theta)(\ddot{z} - (n_{31}\dot{x} + n_{32}\dot{y} + n_{33}\dot{z}))) \\ & \quad + (m_{x_g} - N_v)((-\cos\phi\sin\psi - \cos\psi\sin\theta\sin\phi)(\ddot{x} - (n_{11}\dot{x} + n_{12}\dot{y} + n_{13}\dot{z})) \\ & \quad + (\cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi)(-(n_{21}\dot{x} + n_{22}\dot{y} + n_{23}\dot{z})) \\ & \quad + (\cos\theta\sin\phi)(\ddot{z} - (n_{31}\dot{x} + n_{32}\dot{y} + n_{33}\dot{z}))) \\ & \quad - I_{zx}((\ddot{\phi} - (n_{45}\dot{\theta} + n_{46}\dot{\psi})) + (-\cos\phi\tan\theta)(-(n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}))) \\ & \quad - I_{zy}((\cos\phi)(\ddot{\theta} - (n_{55}\dot{\theta} + n_{56}\dot{\psi})) + (\cos\theta\sin\phi)(-(n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}))) \\ & \quad + (I_{zz} - N_r)((-\sin\phi)(\ddot{\theta} - (n_{55}\dot{\theta} + n_{56}\dot{\psi})) + (\cos\phi\cos\theta)(-(n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}))) \\ & \quad + (m(x_g r + v) - Y_v v - Y_r r)u + (m(y_g r - u) + X_u u)v + (-m(x_g p + y_g q))w \\ & \quad + (-I_{yz}r - I_{xy}p + I_y q - M_q q - M_w w)p + (I_{xz}r + I_{xy}q - I_x p + K_p p)q \\ & \quad - (N_{v|v}|v| + N_{uv}u + N_{uvf}u)v - (N_{r|r}|r| + N_{urf}u)r + (x_g W - x_b B)\cos\theta\sin\phi \\ & \quad + (y_g W - y_b B)\sin\theta \quad (۳۱-۲) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_2 &= (m - Y_v)((-\cos\phi\sin\psi - \cos\psi\sin\theta\sin\phi)(\ddot{x} - (n_{11}\dot{x} + n_{12}\dot{y} + n_{13}\dot{z})) \\ & \quad + (\cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi)(-(n_{21}\dot{x} + n_{22}\dot{y} + n_{23}\dot{z})) \\ & \quad + (\cos\theta\sin\phi)(\ddot{z} - (n_{31}\dot{x} + n_{32}\dot{y} + n_{33}\dot{z}))) \\ & \quad - m_{z_g}((\ddot{\phi} - (n_{45}\dot{\theta} + n_{46}\dot{\psi})) + (-\cos\phi\tan\theta)(-(n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}))) \\ & \quad + (m_{x_g} - Y_r)((-\sin\phi)(\ddot{\theta} - (n_{55}\dot{\theta} + n_{56}\dot{\psi})) + (\cos\phi\cos\theta)(-(n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}))) \\ & \quad + (-m(y_g p + w) + Z_w w + Z_q q)p + (m(z_g r + x_g p))q + (-m(y_g r - u) - X_u u)r \\ & \quad - (Y_{v|v}|v| + Y_{uv}u + Y_{uvf}u)v - (Y_{r|r}|r| + Y_{urf}u)r - (W - B)\cos\theta\sin\phi \quad (۳۲-۲) \end{aligned}$$

$$F_1 = N_{uu}\delta_r((\cos\psi\cos\theta)(\dot{x}) + (\cos\theta\sin\psi)(\dot{y}) + (-\sin\theta)(\dot{z}))^2 \quad (۳۳-۲)$$

$$F_2 = Y_{uu}\delta_r((\cos\psi\cos\theta)(\dot{x}) + (\cos\theta\sin\psi)(\dot{y}) + (-\sin\theta)(\dot{z}))^2 \quad (۳۴-۲)$$

مطابق با معادلات (۶-۲) تا (۹-۲)، معادله (۲۶-۲) به صورت جزئی خطی سازی می‌شود:

$$\dot{\psi} = d_1 \quad (۳۵-۲)$$

$$\dot{d}_1 = f_0\psi + g_0\psi\xi_3 \quad (۳۶-۲)$$

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1 = y_2 \quad (۳۷-۲)$$

$$\dot{\gamma}_2 = \xi_3 \quad (۳۸-۲)$$

$$f_0\psi = m_{11}^{-1}[F_1\beta_1 - h_1] \quad (۳۹-۲)$$

$$g_0\psi = m_{11}^{-1}[F_1\alpha_1 - m_{12}] \quad (۴۰-۲)$$

بطوریکه ترم‌های معادله بالا به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$m_{31} = (I_{yy} - M_q)(\cos\phi) + (-I_{yz})(-\sin\phi) \quad (۴۵-۲)$$

$$m_{32} = mz_g(-\sin\theta) - (mx_g + M_w)(\cos\phi\cos\theta) \quad (۴۶-۲)$$

$$m_{41} = -(mx_g + Z_q)(\cos\phi) \quad (۴۷-۲)$$

$$m_{42} = (m - Z_w)(\cos\phi\cos\theta) \quad (۴۸-۲)$$

$$\Lambda_1 = F_2 - m_{21}m_{11}^{-1}F_1 \quad (۴۱-۲)$$

$$\alpha_1 = \Lambda_1^{-1}[m_{22} - m_{21}m_{11}^{-1}m_{12}] \quad (۴۲-۲)$$

$$\beta_1 = \Lambda_1^{-1}[h_2 - m_{21}m_{11}^{-1}h_1] \quad (۴۳-۲)$$

همچنین معادله دینامیکی (۳-۱) و (۵-۱) سیگنال کنترلی δ_s مشترکی دارند. بنابراین با بازنویسی معادلات در فرم استاندارد (۱-۲) داریم:

$$\begin{bmatrix} m_{31} & m_{32} \\ m_{41} & m_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_3 \\ h_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} \delta_s \quad (۴۴-۲)$$

$$h_3 = mz_g((\cos\psi\cos\theta)(\ddot{x} - (n_{11}\dot{x} + n_{12}\dot{y} + n_{13}\dot{z})) + (\cos\theta\sin\psi)(\ddot{y} - (n_{21}\dot{x} + n_{22}\dot{y} + n_{23}\dot{z})) + (-\sin\theta)(-(n_{31}\dot{x} + n_{32}\dot{y} + n_{33}\dot{z}))) + (-mx_g + M_w)((\sin\phi\sin\psi + \cos\psi\cos\phi\sin\theta)(\ddot{x} - (n_{11}\dot{x} + n_{12}\dot{y} + n_{13}\dot{z})) + (-\cos\theta\sin\phi - \cos\phi\sin\psi\sin\theta)(\ddot{y} - (n_{21}\dot{x} + n_{22}\dot{y} + n_{23}\dot{z})) + (\cos\phi\cos\theta)(-(n_{31}\dot{x} + n_{32}\dot{y} + n_{33}\dot{z}))) - I_{yx}(\ddot{\phi} - (n_{45}\dot{\theta} + n_{46}\dot{\psi})) + (-\cos\phi\tan\theta)(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi})) + (I_{yy} - M_q)((\cos\phi)(-(n_{55}\dot{\theta} + n_{56}\dot{\psi})) + (\cos\theta\sin\phi)(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}))) + (-I_{yz})((-\sin\phi)(-(n_{55}\dot{\theta} + n_{56}\dot{\psi})) + (\cos\phi\cos\theta)(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}))) + (m(x_gq - w) + Z_w w + Z_q q)u + (-m(z_g r + x_g p))v + (m(z_g q + u) - X_u u)w + (I_{yz}q + I_{xz}p - I_z r + N_r r + N_v v)p + (-I_{xz}r - I_{xy}q + I_x p - K_p p)r - (M_w|w| + M_{uw}u + M_{uwf}u)w - (M_q|q| + M_{uqf}u)q + (z_g W - z_b B)\sin\theta + (x_g W - x_b B)\cos\theta\cos\phi \quad (۴۹-۲)$$

$$h_4 = (m - Z_w)((\sin\phi\sin\psi + \cos\psi\cos\phi\sin\theta)(\ddot{x} - (n_{11}\dot{x} + n_{12}\dot{y} + n_{13}\dot{z})) + (-\cos\theta\sin\phi - \cos\phi\sin\psi\sin\theta)(\ddot{y} - (n_{21}\dot{x} + n_{22}\dot{y} + n_{23}\dot{z})) + (\cos\phi\cos\theta)(-(n_{31}\dot{x} + n_{32}\dot{y} + n_{33}\dot{z}))) + my_g(\ddot{\phi} - (n_{45}\dot{\theta} + n_{46}\dot{\psi})) + (-\cos\phi\tan\theta)(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi})) - (mx_g + Z_q)((\cos\phi)(-(n_{55}\dot{\theta} + n_{56}\dot{\psi})) + (\cos\theta\sin\phi)(\ddot{\psi} - (n_{65}\dot{\theta} + n_{66}\dot{\psi}))) + (-m(z_g p - v) - Y_v v - Y_r r)p + (-m(z_g q + u) + X_u u)q + (m(x_g p + y_g q))r - (Z_w|w| + Z_{uw}u + Z_{uwf}u)w - (Z_q|q| + Z_{uqf}u)q - (W - B)\cos\theta\cos\phi \quad (۵۰-۲)$$

$$F_3 = M_{uu}\delta_s((\cos\psi\cos\theta)(\dot{x}) + (\cos\theta\sin\psi)(\dot{y}) + (-\sin\theta)(\dot{z}))^2 \quad (۵۱-۲)$$

$$F_4 = Z_{uu}\delta_s((\cos\psi\cos\theta)(\dot{x}) + (\cos\theta\sin\psi)(\dot{y}) + (-\sin\theta)(\dot{z}))^2 \quad (۵۲-۲)$$

فرم خطی سازی شده جزئی معادله (۴۸-۲) نهایتاً به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\dot{\theta} = d_2 \quad (۵۳-۲)$$

$$d_2 = f_{0\theta} + g_{0\theta}\xi_4 \quad (۵۴-۲)$$

$$\dot{z} = \dot{z}_1 = z_2 \quad (۵۵-۲)$$

$$\dot{z}_2 = \xi_4 \quad (۵۶-۲)$$

$$f_{0\theta} = m_{31}^{-1}[F_3\beta_2 - h_3] \quad (۵۷-۲)$$

$$g_{0\theta} = m_{31}^{-1}[F_3\alpha_2 - m_{32}] \quad (۵۸-۲)$$

- [10] Eski İ, Yıldırım S (2014) Design of neural network control system for controlling trajectory of autonomous underwater vehicles. IJARS 11.
- [11] Sahu BK, Subudhi B (2014) Adaptive tracking control of an autonomous underwater vehicle. IJAC 11(3): 299-307.
- [12] Cui R, Yang C, Li Y (2014) Neural network based reinforcement learning control of autonomous underwater vehicles with control input saturation. Control UKACC International Conference on IEEE.
- [۱۳] رستمی م، جوادی مقدم ج و باقری ا (۱۳۹۲) هدایت و کنترل ربات زیرآبی با استفاده از سیستم ANFIS. مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۴۶-۳۳: ۳(۴).
- [14] Fossen TI (1994) Guidance and control of ocean vehicles. Wiley, New York.
- [15] Chow B (2009) Assigning closely spaced targets to multiple autonomous underwater vehicle. M.Sc Thesis, Dept. Mech, Eng, Univ. Waterloo.
- [16] Pretero TTJ (2001) Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. M.Sc Thesis, Dept. Mech, Eng, Univ. Massachusetts Institute of Technology.
- [17] Spong M W, Hutchinson S, Vidyasagar M (2006) Robot modeling and control. Wiley.
- [18] Ioannou P, Fidan B (2006) Adaptive Control Tutorial. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Philadelphia.
- [19] Hagan MT, Demuth H, Beale M, De Jesus O (1996) Neural network design. Pws Pub.
- [20] Olfati-Saber R (2000) Nonlinear control of underactuated mechanical systems with application to robotics and aerospace vehicles. PHD Thesis, Massachusetts Institute of Technology.

$$\Lambda_2 = F_4 - m_{41}m_{31}^{-1}F_3 \quad (۵۹-۲)$$

$$\alpha_2 = \Lambda_2^{-1}[m_{42} - m_{41}m_{31}^{-1}m_{32}] \quad (۶۰-۲)$$

$$\beta_2 = \Lambda_2^{-1}[h_4 - m_{41}m_{31}^{-1}h_3] \quad (۶۱-۲)$$

۸- مراجع

- [۱] لوئیپور م (۱۳۸۹) رویکردها و ملزومات کسب و توسعه دانش و فناوری ربات های هوشمند زیرآبی. دوازدهمین همایش صنایع دریایی، ایران - زیباکنار.
- [2] Lakhekar GV (2013) A new approach to the design of an adaptive fuzzy sliding mode controller. IJOSE 3(2): 50-60.
- [3] Choukchou-Braham A, Cherki B, Djemai M, Busawon K (2013) Analysis and control of underactuated mechanical systems. Springer Science & Business Media.
- [4] Zhao S, Yuh J (2005) Experimental study on advanced underwater robot control. Robotics IEEE Transactions 21(4): 695-703.
- [5] Åström KJ, Wittenmark B (2013) Adaptive Control. 3rd edn. Dover Publications.
- [6] Pankaj S, Kumar JS, Nema R (2011) Comparative analysis of MIT rule and Lyapunov rule in model reference adaptive control scheme. ISDE 2(4): 154-162.
- [7] Forouzantabar A, Gholami B, Azadi M (2012) Adaptive neural network control of autonomous underwater vehicles. WASET 67: 304-309.
- [8] Mokhar MBM, Ismail ZH (2015) Fuzzy sliding mode with region tracking control for autonomous underwater vehicle. Jurnal Teknologi 72(2): 97-101.
- [9] Park BS (2015) Adaptive formation control of underactuated autonomous underwater vehicles. Ocean Eng 96: 1-7.