



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 3, No. 2, pp.: 101-114
2024

DOI:
10.22034/jssta.2023.405810.1131

Article Info

Received: 2023-07-06
Accepted: 2024-01-16

Keywords

Intelligent closed-loop
angular trajectory generation
algorithm - Satellite attitude
maneuver - Intelligent
trajectory generation -
Autoencoders - Artificial
neural networks

How to Cite this article

Mana Ghanifar, et al.,
"Development of an
intelligent online closed-
loop trajectory generation
algorithm for a satellite
attitude control system",
*Journal of Space Science,
Technology and
Applications*, vol 3 (2), p.:
101- 114 , 2024.

Development of an intelligent online closed-loop trajectory generation algorithm for a satellite attitude control system

Mana Ghanifar¹, Milad Kamzan^{*2}, AmirAli Nikkhah³, Jafar Roshanian⁴,
Mohammad Teshnehlab⁵

¹ PhD Student, Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology,
Tehran, Iran, managhanifar@email.kntu.ac.ir

^{2*} PhD Student, Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology,
Tehran, Iran, milad.kamzan@email.kntu.ac.ir

³ Associate Professor, Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of
Technology, Tehran, Iran, nikkhah@kntu.ac.ir

⁴ Professor, Faculty of K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran,
roshanian@kntu.ac.ir

⁵ Professor, Faculty of Electrical Engineering, K. N. Toosi University of Technology,
Tehran, Iran, teshnehlab@eetd.kntu.ac.ir

Abstract

In this article, a new closed-loop algorithm is presented to generate an optimal angular trajectory for a given satellite to reach the desired final point. Using the capabilities of artificial neural networks, this algorithm can find the best trajectory to reach the final setpoints based on the dynamic behavior of the system and the preset controller capability by using the desired final values of the trajectory and the values of the system state variables at each simulation time. In the presence of external disturbances, this closed-loop intelligent trajectory generation algorithm shows advanced adaptive performance, which allows it to develop the best alternative trajectory to achieve the final setpoint and return the system to the main trajectory. Despite the fact that this algorithm is able to restore the main trajectory, it is also capable of preventing unreasonable control efforts by considering the control properties of the system. This intelligent algorithm of angular path generation shows high accuracy and effective performance after simulations are performed in the MATLAB software environment with predefined external disturbances.



توسعه یک الگوریتم تولید مسیر زاویه‌ای مطلوب بر خط حلقه-بسته هوشمند برای کنترل وضعیت یک ماهواره

- مانا غنی فر^۱، میلاد کامزن^{۲*}، امیرعلی نیکخواه^۳، جعفر روشنی‌یان^۴، محمد تشنه‌لب^۵
- ۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران،
managhanifar@email.kntu.ac.ir
- ۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران،
milad.kamzan@email.kntu.ac.ir
- ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران،
nikkhah@kntu.ac.ir
- ۴- استاد، پژوهشکده سیستم‌های کنترل هوشمند، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران،
roshanian@kntu.ac.ir
- ۵- استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران،
teshnehlabb@eetd.kntu.ac.ir
- نویسنده مسئول *

چکیده

در این مقاله، یک الگوریتم جدید حلقه-بسته به منظور تولید مسیر مطلوب زاویه‌ای برای یک ماهواره مفروض به‌منظور نیل به مقدار نهایی موردنظر ارائه شده است. این الگوریتم بر پایه بهره‌گیری از توان یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی و نیز قابلیت‌های کدکننده‌های خودکار، قادر است با در دست داشتن مقادیر نهایی مطلوب از مسیر و نیز مقادیر لحظه‌ای متغیرهای وضعیت سیستم، بهترین مسیر نیل به نقاط نهایی مذکور را با توجه به رفتار دینامیکی سیستم و نیز توان کنترلر از پیش تنظیم شده، تعیین نماید. این الگوریتم تولید مسیر هوشمند حلقه بسته، نه تنها می‌تواند در مقابله با اغتشاشات خارجی وارده به سیستم ضمن نشان دادن عملکرد تطبیقی پیشرفته و به صورت برخط، بهترین مسیر جایگزین را برای نیل به هدف نهایی تولید کرده و سیستم را در کمترین زمان منطقی ممکن به مسیر اصلی بازگرداند، بلکه از سوی دیگر قادر است با عنایت به در بر داشتن خواص و توان کنترل کننده سیستم، از ایجاد فرامین کنترلی نامعقول از منظر دامنه تلاش و دیگر خواص نامطلوب کنترلی، جلوگیری بعمل آورد. نتایج حاصل از تشریح شبیه‌سازی‌های صورت پذیرفته در محیط نرم‌افزار MATLAB در حضور اغتشاشات خارجی پیش‌تعریف، دقت بالا و عملکرد مؤثر این الگوریتم هوشمند تولید مسیر زاویه‌ای را نمایش می‌دهد.

دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه
علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال سوم، شماره ۲، صفحه ۱۱۴-۱۰۱
پاییز و زمستان ۱۴۰۲

DOI:
10.22034/jssta.2023.405810.1131

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶

واژه‌های کلیدی

الگوریتم هوشمند حلقه‌بسته تولید
مسیر زاویه‌ای - مانور وضعیت ماهواره
- تولید مسیر هوشمند - کدکننده‌های
خودکار - شبکه‌های عصبی مصنوعی

نحوه استناد به این مقاله

مانا غنی-فر و همکاران، " توسعه یک
الگوریتم تولید مسیر زاویه‌ای مطلوب
برخط حلقه-بسته هوشمند برای
کنترل وضعیت یک ماهواره"،
دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای
فضایی، جلد سوم، شماره دوم، صفحات
۱۰۱-۱۱۴، ۱۴۰۲.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، توسعه الگوریتم‌های تولید مسیر مطلوب دارای خواص مشخص، میان نقاط ابتدایی و انتهایی موردنظر طراح، دستخوش تغییرات فراوانی شده است. امروزه، توسعه الگوریتم‌های تولید مسیر در پژوهش‌های روز که توسعه طیف گسترده‌ای از پروژه‌ها و حوزه‌های عملی را پوشش می‌دهند [۱]، در دامنه وسیعی از تکنیک‌های تحلیلی و بهینه تا الگوریتم‌های هوشمند، گسترده شده‌اند. به عنوان مثال فرآیند تولید مسیر مطلوب برای یک ربات زمینی با فرض تعیین ضرایب چندجمله‌ای با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، در [۲] طی شده است. در این مرجع، نتایج حاصل از اعمال هریک از تکنیک‌های بهینه‌سازی، شامل جستجوی کورکورانه^۱، الگوریتم تپه‌نوردی^۲ و الگوریتم ژنتیک^۳ با یکدیگر مقایسه و نتایج حاصل، ارائه شده است. در [۳] پروسه تولید مسیر ایمن بهینه با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی مربعی^۴ با قیود خطی، برای یک گروه ۲۰ تایی از ربات‌ها، طی شده است. در این مرجع، برخلاف بسیاری از دیگر عناوین، مدل دینامیکی کامل هریک از ربات‌ها، جایگزین فرض مدل سینماتیکی برای این سیستم‌ها، شده است. اگرچه بسیاری از پژوهش‌های اخیر، حوزه کاری خود را به توسعه تکنیک‌های تولید مسیر برای ربات‌های غیرپرنده معطوف می‌کنند، لیکن ارائه الگوریتم‌های نوین تولید مسیر، با هدف بهره‌گیری در ربات‌های پرنده نظیر کوادروتورها نیز با سرعت بالایی دنبال می‌شود [۴]–[۷]. به طور مثال، مرجع [۸] به ارائه یک مدل توسعه مسیر برای یک کوادکوپتر به همراه یک بار آویخته با کابل از طریق برنامه‌ریزی درجه دوم خطی آمیخته با اعداد صحیح^۵ می‌پردازد. در این راستا، مرجع مورد بحث به حل چالش‌های عدم برخورد هر سه قسم کوادروتور، کابل و بار به موانع شناخته شده و نیز امکان‌پذیری اجرای مانور با عنایت به حضور بار آویخته، پرداخته است. در مرجع [۹] به طراحی مسیرهای دینامیکی امکان‌پذیر و کنترل‌کننده‌هایی پرداخته می‌شود که بر مبنای قطعه‌بندی مسیر کلی، قادراند مانورهای تهاجمی و سنگین، مانند پرواز از میان شکاف‌های باریک عمودی و نشست روی سطوح وارونه را با دقت و تکرارپذیری بالا ممکن سازد. علاوه بر

عناوین مزبور، مراجعی نظیر [۱۰] نیز به توسعه و ارائه راهکارهایی برای تولید مسیرهای عملیاتی به منظور هدایت مناسب سیستم‌های پرنده بدون سرنشین، پرداخته‌اند. در حوزه تولید هوشمند و مبتنی بر یادگیری مسیر اما مراجعی نظیر [۱۱] به توسعه تکنیک‌های مبتنی بر یادگیری تقویتی^۶ و یادگیری تقلیدی^۷ برای مدیریت بی‌درنگ، کارآمد و قابل اطمینان کوادکوپتر با تصمیم‌گیری آنلاین می‌پردازند. در حوزه تعیین مسیر زاویه‌ای مطلوب برای کنترل ماهواره‌ها که عموماً با هدف افزایش و بهبود کیفیت تصویربرداری آن‌ها صورت می‌پذیرد، حضور الگوریتم‌های تولید مسیر بهینه از اهمیت ویژه‌ای در میان پژوهش‌های روز برخوردار است. به عنوان مثال در [۱۲] یک الگوریتم بهینه برنامه‌ریزی مسیر زاویه‌ای مطلوب به منظور کاهش سرعت زاویه‌ای در فرآیند مانور وضعیت یک ماهواره مکعبی با هدف بهبود پایداری سیستم و ارضای ظرفیت محدود کنترلی آن معرفی شده است. مسیر تولیدی مورد بحث در این مرجع، مبتنی بر یک چند جمله‌ای از مرتبه پنج، با در نظرگیری سه بخش مسیر شامل افزایش ثبوت و کاهش سرعت بوده و با هدف تأمین بهینگی مسیر مزبور، ضرایب چند جمله‌ای مورد بحث، بواسطه بهره‌گیری از الگوریتم تکاملی تفاضلی^۸ (DE) تعیین شده است. در [۱۳] از یک الگوریتم دو مرحله‌ای مبتنی بر رگرسیون چند جمله‌ای به منظور تعیین مناسب مسیر زاویه‌ای مطلوب، برای کنترل سیستم یک ماهواره تصویربرداری استفاده شده است. در نخستین مرحله از این الگوریتم و بر اساس حالت تصویربرداری مورد نظر، ورودی‌ها اصلی شامل اندازه و زمان مانور در هر محور دریافت می‌شود و مسیر اولیه با توجه به تابع پله واحد تشکیل می‌شود. در مرحله دوم و با در نظرگیری تغییرات ناگهانی در مسیر و به دنبال آن تأثیر بر تلاش کنترلی که در نهایت منجر به تحریک سیستم شده و لرزش ناشی از آن بر کیفیت عملیات تصویربرداری تأثیر می‌گذارد، از یک فیلتر میانگین متحرک برای هموار ساختن مسیر، که تغییرات پله را با یک تابع رمپ تصحیح می‌کند، بهره‌گیری می‌شود. افزون بر موارد فوق و به رغم وجود مراجعی نظیر [۱۴] و [۱۵]، کماکان توسعه حوزه تولید مسیر زاویه‌ای برای ماهواره‌ها با

⁵ Mixed Integer Quadratic Programing⁶ Reinforcement learning⁷ Imitation learning⁸ Differential evolution algorithm¹ Blind search method² Hill climbing method³ Genetic algorithm⁴ Quadratic Programing

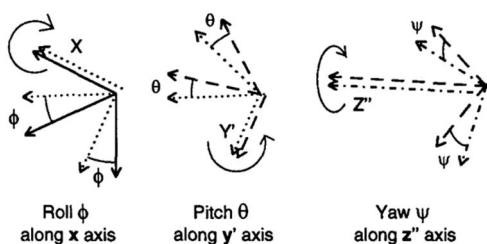
زاویه‌ای میان نقاط اولیه و نهایی مفروض برای سیستم، تشریح و روابط مرتبط با این الگوریتم، استخراج خواهد شد. در نهایت، دو بخش پنجم و ششم این پژوهش، به ترتیب، به ارائه نتایج حاصل از اعمال الگوریتم پیشنهادی به ساختار کلی و بحث و نتیجه‌گیری در خصوص نتایج حاصل، اختصاص خواهد یافت.

۲- مدل‌سازی ریاضی سیستم

در بخش حاضر از گزارش پیش رو، معادلات توصیف‌کننده مدل ریاضیاتی شامل معادلات سینماتیک و دینامیک دورانی سیستم، به استفاده از مکانیک نیوتنی و بر اساس بهره‌گیری از زوایای اوپلر، استخراج می‌شود. در ادامه، معادلات غیرخطی استخراج شده برای توصیف سیستم ماهواره، به منظور شبیه‌سازی رفتار سیستم در سناریوهای پیش‌بینی شده، خطی‌سازی می‌شوند.

۲-۱- سینماتیک دورانی

با هدف مدل‌سازی رفتار دورانی سیستم ماهواره به منظور طراحی کنترلر و نیز تکمیل پیش‌نیازهای لازم برای اجرای شبیه‌سازی‌های آتی، در این بخش به استخراج مدل سینماتیک دورانی سیستم مزبور، پرداخته می‌شود. از همین رو و به منظور استخراج مدل سینماتیک دورانی سیستم ماهواره، در گام نخست به معرفی ماتریس‌های چرخش میان دو دستگاه بدنی و قائم همراه سیستم بر پایه زوایای اوپلر (چنان که در شکل (۱) نمایش داده شده است) پرداخته می‌شود. در نتیجه و با فرض ترتیب چرخش $\psi \rightarrow \theta \rightarrow \phi$ ، روابط (۱) تا (۳) شمای کلی این ماتریس‌های چرخش را نمایش می‌دهد. شایان ذکر است در کلیه معادلات پیش روی، عبارات C_θ ، S_θ ، و T_θ به ترتیب معرف $\cos(\theta)$ ، $\sin(\theta)$ و $\tan(\theta)$ می‌باشند.



شکل ۱- شمای کلی زوایای اوپلر [۱۶].

هدف کاهش اثر اغتشاشات خارجی و بهبود کلی خواص سیستم حلقه-بسته، تلاش بیشتری را از سوی محققین طلب می‌کند. از همین رو و در اثر حاضر، یک الگوریتم هوشمند تولید مسیر زاویه‌ای برای کنترل مناسب وضعیت جهت‌گیری یک ماهواره معرفی می‌شود. الگوریتم پیشنهادی، بر خلاف عمده آثار موجود در این زمینه، قادر است ضمن در نظر گرفتن توان کنترلی سیستم، موضوع مقابله با اغتشاشات خارجی و اصلاح انحرافات ایجاد شده در زوایای سیستم به سبب بروز اغتشاشات مزبور را با تکیه بر توان پردازشی شبکه‌های عصبی و کدکننده‌های خودکار و به شکل کاملاً هوشمند، صورت دهد.

ماهواره‌ها، رسته‌ای از سیستم‌های دینامیکی حساس با قابلیت‌های بی‌شمار محسوب می‌شوند. امروزه از ماهواره‌ها در کاربردهای وسیعی از جمله انتقال سیگنال‌های مخابراتی، تصویربرداری فضایی، مکان‌یابی و نیز بسیاری دیگر از حوزه‌های عملیاتی و پژوهشی، بهره‌برداری بعمل می‌آید. در حوزه تولید مسیر برای کنترل مناسب این سیستم‌ها و ارائه مسیرهای زاویه‌ای برای نیل مناسب به نقاط نهایی متغیرهای حالت، از هر شرط اولیه، وجود الگوریتم‌های هوشمند نه تنها از یک سو می‌تواند کیفیت رفتاری متغیرهای وضعیت سیستم را در حضور اغتشاشات خارجی بهبود بخشد، بلکه از سوی دیگر می‌تواند تلاش‌های کنترلی مورد نیاز برای نیل به اهداف از پیش تعیین شده را مدیریت کند. ماهواره مورد مطالعه در این پژوهش یک ماهواره زمین‌گرایی^۱ کوچک سنجش از راه دور زمین در یک مدار دایره ای ارتفاع پایین^۲ می‌باشد، که دارای کنترل زاویه‌ای سه محوره با عملگرهای چرخ عکس‌العملی^۳ و در حال انجام یک مانور زاویه‌ای محدود در هر سه محور سمت، فراز و غلت می‌باشد.

در بخش آتی از پژوهش پیش‌رو، یک مدل دینامیکی غیرخطی از سیستم ماهواره مورد بحث استخراج و مدل مذکور به منظور ادامه فرآیند شبیه‌سازی، خطی‌سازی می‌شود. در سومین بخش مقاله، روابط و مقادیر مرتبط با کنترلرهای تعبیه شده برای مدیریت عملکرد سیستم در سناریوی عملکردی معرفی خواهد شد. در بخش چهارم، عمده نوآوری‌های صورت پذیرفته در راستای ارائه یک الگوریتم هوشمند حلقه-بسته به منظور تولید یک مسیر

³ Reaction Wheel

¹ Earth Oriented

² LEO

$$\vec{T} = \dot{\vec{h}}_I = \dot{\vec{h}} + \vec{\omega} \times \vec{h} \quad (7)$$

در رابطه فوق، $T=[L \ M \ N]^T$ نمایش‌دهنده مجموع گشتاورهای وارده به ماهواره از سوی چرخ‌های عکس‌عملی می‌باشد. همچنین دو عبارت $\vec{h}_I=[h_{I,x} \ h_{I,y} \ h_{I,z}]^T$ و $\vec{h}=[h_x \ h_y \ h_z]^T$ معرف بردار اندازه حرکت زاویه‌ای سیستم به ترتیب در دستگاه‌های اینرسی و بدنی می‌باشند. از سوی دیگر، معادله بردار اندازه حرکت زاویه‌ای ماهواره در دستگاه بدنی، به شکل رابطه (۸) معرفی می‌شود.

$$\vec{h} = \vec{I} \vec{\omega} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

در این معادله $\vec{I}$ معرف تانسور اینرسی سیستم ماهواره است. همچنین با فرض وجود تقارن محوری در ساختار کلی سیستم (تقارن سیستم نسبت به محورهای X، Y و Z بدنی)، معادله (۸) به شکل رابطه (۹) ساده‌سازی می‌شود.

$$\vec{h} = \vec{I} \vec{\omega} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

با عنایت به مجموعه نکات مطرح شده در این بخش، در نهایت مدل توصیف‌کننده دینامیک دورانی غیرخطی سیستم ماهواره مورد بررسی، با عنایت به روابط (۷) و (۹) و به شکل دسته معادلات نمایش داده شده در رابطه (۱۰) استخراج می‌شود.

$$\dot{\vec{\omega}} = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (qr(I_{yy}-I_{zz})/I_{xx}) + (L/I_{xx}) \\ (pr(I_{zz}-I_{xx})/I_{yy}) + (M/I_{yy}) \\ (qp(I_{xx}-I_{yy})/I_{zz}) + (N/I_{zz}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

۳-۲- خطی‌سازی سیستم

در بخش حاضر، معادلات کلی غیرخطی سیستم با هدف تکمیل مباحث مرتبط با طراحی کنترلر و نیز شبیه‌سازی رفتار سیستم حلقه-بسته در حضور الگوریتم هوشمند تولید مسیر، خطی‌سازی می‌شود. روابط (۱۱) و (۱۲) معادلات فضای حالت خطی سیستم را نمایش می‌دهند.

$$\dot{\vec{x}} = \vec{A}\vec{x} + \vec{B}\vec{u} \quad (11)$$

$$\vec{A}_\phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_\phi & S_\phi \\ 0 & -S_\phi & C_\phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\vec{A}_\theta = \begin{bmatrix} C_\theta & 0 & -S_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ S_\theta & 0 & C_\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\vec{A}_\psi = \begin{bmatrix} C_\psi & S_\psi & 0 \\ -S_\psi & C_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

در معادلات فوق، $\Theta=[\phi \ \theta \ \psi]^T$ نمایشگر زوایای اوایلر است. با عنایت به این ماتریس‌ها و فرض ترتیب چرخش عنوان شده، رابطه (۴) معادلات نمایشگر سینماتیک دورانی سیستم را بر پایه زوایای اوایلر و نرخ‌های چرخش در دستگاه بدنی، نمایش می‌دهد.

$$\vec{\omega} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \vec{A}_\phi \vec{A}_\theta \vec{A}_\psi \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \vec{A}_\phi \vec{A}_\theta \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \vec{A}_\phi \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

در این معادلات، $\vec{\omega}=[p \ q \ r]^T$ نمایانگر نرخ‌های چرخش حول محورهای بدنی ماهواره نسبت به دستگاه مرجع است. با تکمیل عملیات ریاضی در این معادلات، شمای توسعه‌یافته این روابط به صورت دسته روابط (۵) ارائه می‌شود.

$$\vec{\omega}_{BR} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} - \psi S_\theta \\ \dot{\theta} C_\phi + \dot{\psi} C_\theta S_\phi \\ \dot{\psi} C_\theta C_\phi - \dot{\theta} S_\phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

در نهایت و با حل معادلات فوق برای نرخ‌های تغییر زوایای اوایلر $\dot{\Theta}=[\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$ ، قالب کامل مدل سینماتیک دورانی سیستم، به شکل رابطه (۶) استخراج می‌شود.

$$\dot{\Theta} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p + (S_\phi T_\theta)q + (C_\phi T_\theta)r \\ C_\phi q - S_\phi r \\ (S_\phi/C_\theta)q + (C_\phi/C_\theta)r \end{bmatrix} \quad (6)$$

۲-۲- دینامیک دورانی

بر پایه بهره‌گیری از قانون دوم نیوتن و با در نظرگیری فرض ساده‌ساز ثبات اینرسی دورانی سیستم در طول شبیه‌سازی، معادله توصیف‌کننده گشتاورهای مؤثر بر مرکز جرم ماهواره، با استفاده رابطه (۷) توصیف شده است.

$$y=Cx \quad (12)$$

۳- کنترل سیستم

با هدف مدیریت سیستم در نیل به اهداف از پیش تعیین شده مبنی بر تعقیب مسیر تطبیقی تولیدی توسط الگوریتم تولید مسیر هوشمند و نیز با توجه به اینرسی ذاتی سیستم و فرض عدم وجود اغتشاشات بزرگ مداری، در این پژوهش، از سه کنترلر تناسبی-مشتقی (PD) برای کنترل سیستم استفاده شده است. روابط (۱۶) تا (۱۸)، معادلات مفسر این قوانین کنترلی را نمایش می‌دهند.

$$\gamma_{c,\varphi}(k)=k_{p,\varphi}(\varphi_d(k)-\varphi(k))+k_{d,\varphi}(\dot{\varphi}_d(k)-\dot{\varphi}(k)) \quad (16)$$

$$\gamma_{c,\theta}(k)=k_{p,\theta}(\theta_d(k)-\theta(k))+k_{d,\theta}(\dot{\theta}_d(k)-\dot{\theta}(k)) \quad (17)$$

$$\gamma_{c,\psi}(k)=k_{p,\psi}(\psi_d(k)-\psi(k))+k_{d,\psi}(\dot{\psi}_d(k)-\dot{\psi}(k)) \quad (18)$$

در معادلات فوق، عبارت $\Theta_d=[\varphi_d \ \theta_d \ \psi_d]^T$ نمایشگر مسیر زاویه‌ای مطلوب تولیدی توسط الگوریتم هوشمند تولید مسیر بوده و دو عبارت $k_{p,\theta}$ و نیز $k_{d,\theta}$ به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب بخش‌های تناسبی و مشتقی از کنترلر PD مزبور هستند. جدول (۱)، مقادیر عددی مشخصات مکانیکی و نیز ضرایب کنترلی تنظیم شده برای سیستم را نمایش می‌دهد. با عنایت به تکیه مقاله پیش روی بر موضوع تولید مسیر مطلوب جهت کنترل زوایای اوایلر سیستم، ضرایب کنترلی مورد استفاده، بر پایه آزمون و خطا و به شکلی تعیین شده است که پاسخ‌های حاصل از کنترل سیستم، تا حد امکان عاری از فراجش باشد.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی و ضرایب کنترلی سیستم ماهواره

یکا	مقدار عددی	پارامتر
Kg.m ²	۱۰	I _{xx}
Kg.m ²	۱۰	I _{yy}
Kg.m ²	۱۰	I _{zz}
~	[۴۱۷ ۴۱۷ ۴۱۷]	$k_p = [k_{p,\varphi} \ k_{p,\theta} \ k_{p,\psi}]$
~	[۳۰۷ ۳۰۷ ۳۰۷]	$k_d = [k_{d,\varphi} \ k_{d,\theta} \ k_{d,\psi}]$

در این دسته از معادلات، عبارات $x^{6 \times 1}=[\varphi \ \theta \ \psi \ p \ q \ r]^T$ و $u^{3 \times 1}=[L \ M \ N]^T$ نمایشگر متغیرهای وضعیت سیستم و بردار تلاش‌های کنترلی بوده و سه ماتریس ثابت با زمان **A**، **B** و **C** به ترتیب نمایانگر ماتریس‌های سیستم، ورودی و خروجی هستند. در این معادلات، درایه‌های دو ماتریس **A**، **B** با عنایت به روابط (۱۳) و (۱۴) استخراج می‌شود.

$$B=J_u=\frac{\partial f}{\partial x}\bigg|_{u=u_0}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_3}{\partial u_1} & \frac{\partial f_4}{\partial u_1} & \frac{\partial f_5}{\partial u_1} & \frac{\partial f_6}{\partial u_1} \\ \frac{\partial f_1}{\partial u_2} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} & \frac{\partial f_3}{\partial u_2} & \frac{\partial f_4}{\partial u_2} & \frac{\partial f_5}{\partial u_2} & \frac{\partial f_6}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_1}{\partial u_3} & \frac{\partial f_2}{\partial u_3} & \frac{\partial f_3}{\partial u_3} & \frac{\partial f_4}{\partial u_3} & \frac{\partial f_5}{\partial u_3} & \frac{\partial f_6}{\partial u_3} \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

$$A=J_x=\frac{\partial f}{\partial x}\bigg|_{x=x_0}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} & \frac{\partial f_1}{\partial x_5} & \frac{\partial f_1}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} & \frac{\partial f_2}{\partial x_5} & \frac{\partial f_2}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} & \frac{\partial f_3}{\partial x_5} & \frac{\partial f_3}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} & \frac{\partial f_4}{\partial x_5} & \frac{\partial f_4}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_5}{\partial x_1} & \frac{\partial f_5}{\partial x_2} & \frac{\partial f_5}{\partial x_3} & \frac{\partial f_5}{\partial x_4} & \frac{\partial f_5}{\partial x_5} & \frac{\partial f_5}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_6}{\partial x_1} & \frac{\partial f_6}{\partial x_2} & \frac{\partial f_6}{\partial x_3} & \frac{\partial f_6}{\partial x_4} & \frac{\partial f_6}{\partial x_5} & \frac{\partial f_6}{\partial x_6} \end{bmatrix} \quad (14)$$

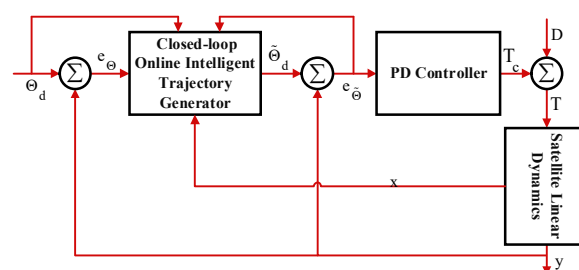
در این معادلات نیز، **J_a** معرف ماتریس ژاکوبین سیستم نسبت به متغیر **a** بوده و $x_0=0^{6 \times 1}$ و $u_0=0^{3 \times 1}$ نمایشگر نقطه کار خطی‌سازی هستند. همچنین عبارت **f** که نمایشگر کلیه معادلات غیرخطی سیستم است، با عنایت به رابطه (۱۵) تعیین می‌شود.

$$f=[\ddot{\theta} \ \ddot{\omega}]^T \quad (15)$$

شایان ذکر است با توجه به اعمال فرض قابل اندازه‌گیری بودن کلیه متغیرهای وضعیت، ماتریس خروجی از نمایش فضای حالت سیستم به صورت $C=I^{6 \times 6}$ تعیین شده است.

۴- توسعه الگوریتم هوشمند تولید مسیر

چنان که پیش‌تر ذکر شد، هدف اصلی این پژوهش، ارائه، شبیه‌سازی رفتار و بررسی عملکرد یک الگوریتم برخط هوشمند تولید مسیر زاویه‌ای در پروسه کنترل و شبیه‌سازی عملکرد یک ماهواره است که به صورت حلقه-بسته در دیاگرام بلوکی سیستم قرار می‌گیرد. این الگوریتم پیشنهادی تولید مسیر زاویه‌ای که از تلفیق یک کدکننده خودکار با یک شبکه عصبی دولایه تشکیل شده، قادر است با در دست داشتن مقادیر لحظه‌ای خروجی و دیگر متغیرهای وضعیت سیستم، به انضمام نقاط نهایی موردنظر طراح سناریوی کنترلی، بهترین مسیر را برای نیل سیستم به مقادیر نهایی مزبور، به صورت برخط و با توجه به توان کنترلی سیستم، تولید نماید. شکل (۲) شمای کیفی این دیاگرام بلوکی را در حضور هر سه جزء سیستم، کنترلر و الگوریتم هوشمند تولید مسیر، نمایش می‌دهد.

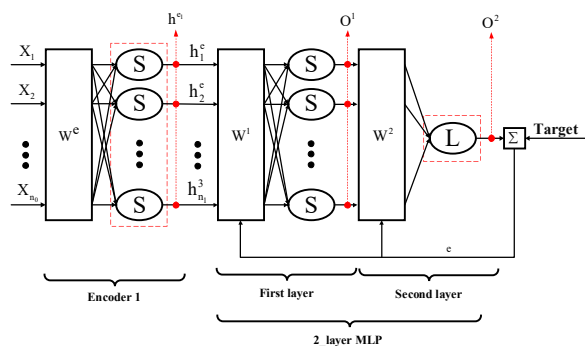


شکل ۲- دیاگرام بلوکی ساختار تجمیعی حلقه-بسته

دیاگرام بلوکی مورد بحث، از سه بلوک اصلی شامل مدل دینامیکی سیستم (معادلات دینامیک و سینماتیک ماهواره مطابق روابط (۱۲) و (۱۳)، معادلات کنترلر PD (روابط (۱۷) تا (۱۸)) و بخش هوشمند تولید مسیر مطلوب حلقه-بسته است. چنان که از ملاحظه این دیاگرام مشخص است، بلوک مفسر مدل دینامیکی سیستم، ضمن دریافت ورودی کنترلی (T) که می‌تواند تحت اثر اغتشاشات خارجی (D) باشد، برای تعقیب مسیر نامی از سوی کنترلر PD، سیگنال‌های حالت (x)، و خروجی (y) را برای فراهم‌آوری بازخورد رفتاری به منظور تغذیه بلوک کنترلر و نیز بلوک تولید مسیر، تأمین می‌نماید. از سوی دیگر، مطابق روال معمول در سیستم‌های کنترلی حلقه بسته، بلوک کنترلر PD، ضمن دریافت بازخورد خروجی سیستم (y) و مقایسه آن با سیگنال مسیر مطلوب تأمین شده از سوی بلوک

تولید مسیر ($\tilde{\Theta}_d$)، سیگنال‌های کنترلی (T_c) را برای تغذیه سیستم، تولید می‌کند. در پایان، بلوک تولید هوشمند مسیر زاویه‌ای، ضمن دریافت مقادیر لحظه‌ای مسیر مرجع (Θ_d)، خروجی سیستم (y)، خطای تعقیب مسیر مرجع (e_Θ)، خطای تعقیب مسیر مطلوب تولیدی ($e_{\tilde{\Theta}}$) و مشتقات خروجی سیستم ($\dot{\Theta}$) و مقادیر مطلوب تولیدی ($\tilde{\Theta}_d$)، سیگنال مسیر مطلوب زاویه‌ای ($\tilde{\Theta}_d$) را در راستای حصول امکان کنترل مناسب سیستم به منظور تعقیب مسیر نامی، فراهم می‌سازد.

لازم به ذکر است، در این ساختار پیشنهادی، بخش کدکننده خودکار، ویژگی‌های کاربردی و جدیدی را با بهره‌گیری از متغیرهای سیستم و نقاط نهایی به نحوی تولید می‌کند که بخش بعد، یعنی شبکه عصبی مصنوعی دو لایه بتواند متغیرهای یک مسیر پیش‌فرض تعبیه شده در این ساختار را، بر پایه خواص مطرح شده، به بهترین شکل ممکن، تعیین نماید. شکل (۳) شمای کیفی ساختار شبکه عصبی هوشمند مذکور را نمایش می‌دهد.



شکل ۳- شمای کیفی ساختار شبکه عصبی هوشمند تولید مسیر

با در نظرگیری نکات مطرح شده در این بخش، رابطه (۱۹) فرم پارامتریک معادله مسیر پیش تعریف انتخابی را نمایش می‌دهد.

$$\Theta_d(k) = a(k)(\tanh(b(k)t + c(k))) + d(k) \quad (19)$$

که در آن، $t = k \cdot dt$ معرف زمان شبیه‌سازی و چهار عبارت a ، b ، c و d معرف مقادیر لحظه‌ای پارامترهای مسیر، می‌باشد. در ادامه، روابط اصلی مفسر تعریف و نحوه کارکرد این الگوریتم پیشنهادی، تشریح می‌شود. بدین منظور، با معرفی متغیرهای مورد استفاده مطابق روابط (۲۰) تا (۲۳):

با توجه به تعاریف ارائه شده، روابط (۲۹) و (۳۰) معادلات مرتبط با تعریف بخش‌های کدکننده و کدگشا از الگوریتم کدکننده خودکار ساختار را نمایش می‌دهند.

$$\text{net}_e(k) = w_e(k) \times \text{input}^T(k)$$

$$\text{w.r.t. } h_1(k) = \text{logsig}(g_e(k). \text{net}_e(k)) \quad (29)$$

$$\text{net}_d(k) = w_d(k).h_1(k)$$

$$\text{w.r.t. } \widehat{\text{input}}(k) = \text{logsig}(g_d(k). \text{net}_d(k)) \quad (30)$$

در این روابط، $w_d(k)$ ، $w_e(k)$ ، $\text{net}_d(k)$ ، $\text{net}_e(k)$ و $h_1(k)$ به ترتیب معرف عبارات شبکه و اوزان یادگیری در لایه‌های کدکننده و کدگشا و نیز خروجی لایه کدکننده، هستند. همچنین دو عبارت $g_d(k)$ و $g_e(k)$ شیب توابع فعال‌ساز در بخش‌های کدکننده و کدگشا هستند که با هدف افزایش انعطاف‌پذیری ساختار، به صورت آموزش‌پذیر در نظر گرفته شده‌اند. با عنایت به روابط و نکات فوق، روابط (۳۱) تا (۳۴) معادلات مرتبط با آموزش اوزان و نیز شیب توابع فعال‌ساز را نشان می‌دهند.

$$\Delta w_d = -\eta_{ae} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial e(k)}{\partial \widehat{\text{input}}(k)} \frac{\partial \widehat{\text{input}}(k)}{\partial \text{net}_d(k)} \frac{\partial \text{net}_d(k)}{\partial w_d(k)} \quad (31)$$

$$\Delta g_d = -\eta_{ae, g_d} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial e(k)}{\partial \widehat{\text{input}}(k)} \frac{\partial \widehat{\text{input}}(k)}{\partial g_d(k)} \quad (32)$$

$$\Delta w_e = -\eta_{ae} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial e(k)}{\partial \widehat{\text{input}}(k)} \frac{\partial \widehat{\text{input}}(k)}{\partial \text{net}_d(k)} \frac{\partial \text{net}_d(k)}{\partial h_1(k)} \frac{\partial h_1(k)}{\partial \text{net}_e(k)} \frac{\partial \text{net}_e(k)}{\partial w_e(k)} \quad (33)$$

$$\Delta g_e = -\eta_{ae, g_e} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial e(k)}{\partial \widehat{\text{input}}(k)} \frac{\partial \widehat{\text{input}}(k)}{\partial \text{net}_d(k)} \frac{\partial \text{net}_d(k)}{\partial h_1(k)} \frac{\partial h_1(k)}{\partial g_e(k)} \quad (34)$$

که در آن η_{AE} معرف نرخ آموزش در لایه‌های کدکننده و کدگشا است. در ادامه، روابط (۳۵) و (۳۶) معادلات مرتبط با

$$y = \Theta(k) \quad (20)$$

$$y_f = \Theta_d \quad (21)$$

$$y_d(k) = \tilde{\Theta}_d(k) \quad (22)$$

$$\dot{y}_d(k) = \dot{\tilde{\Theta}}_d(k) \quad (23)$$

که در آن‌ها عبارات y ، Θ_d ، y_f ، $\tilde{\Theta}_d(k)$ ، $y_d(k)$ و $\dot{\tilde{\Theta}}_d(k)$ به ترتیب معرف زوایای اوایلر سیستم، مقدار نهایی مطلوب زوایا، مقادیر خروجی نهایی سیستم، خروجی الگوریتم تولید مسیر در گام k ام، مقدار مطلوب خروجی در گام k ام و مشتقات خروجی الگوریتم و مسیر مطلوب در این گام است، مقادیر خطا و تابع هزینه بخش شبکه عصبی دولایه از ساختار پیشنهادی، مطابق روابط (۲۴) و (۲۵) معین می‌شود.

$$e_{mlp}(k) = y_f - y(k) \quad (24)$$

$$E_{mlp}(k) = \frac{1}{2} e_{mlp}^2(k) \quad (25)$$

در این معادلات، $e_{mlp}(k)$ و $E_{mlp}(k)$ به ترتیب نمایانگر مقدار خطای بخش شبکه عصبی دولایه و تابع هزینه این شبکه در k امین گام حل می‌باشند. همچنین، روابط (۲۶) و (۲۷) مقادیر خطا و نیز تابع هزینه بخش کدکننده خودکار ساختار پیشنهادی را نمایش می‌دهند.

$$e_{encoder}(k) = \text{input}(k) - \widehat{\text{input}}(k) \quad (26)$$

$$E_{encoder}(k) = \frac{1}{2} e_{encoder}^2(k) \quad (27)$$

به بیان مشابه، در این معادلات نیز $e_{encoder}(k)$ ، $\widehat{\text{input}}(k)$ و $E_{encoder}(k)$ به ترتیب نشانگر مقدار خطای بخش کدکننده خودکار، خروجی کدکننده و تابع هزینه کدکننده خودکار، همگی در k امین گام حل می‌باشند. همچنین در این معادلات، عبارت $\text{input}(k)$ معرف ورودی کدکننده خودکار است که به صورت رابطه (۲۸) انتخاب شده است.

$$\text{input} = [\tilde{\Theta}_d(k) - \Theta(k), \tilde{\Theta}_d(k) - \Theta_d(k), \dots \quad (28)$$

$$\dots \Theta_d(k), \tilde{\Theta}_d(k), \dot{\tilde{\Theta}}_d(k), \Theta(k), \dot{\Theta}(k), \Theta_0]$$

در این روابط η_{mlp} نمایشگر نرخ آموزش شبکه است. جدول (۲)، مقادیر عددی تنظیمات اولیه بخش‌های کدکننده و نیز شبکه عصبی مصنوعی دولایه از ساختار هوشمند پیشنهادی را نمایش می‌دهد.

جدول ۲- تنظیمات اولیه ساختار هوشمند تولید مسیر

بخش کدکننده خودکار	
مقدار عددی	پارامتر
۶	num of neurons
۲۰۰	Max epochs
۰.۱	η_{ae}
۰.۰۰۵	$\eta_{ae,s}$
۰.۰۰۵	$\eta_{ae,q}$
بخش شبکه عصبی دولایه	
مقدار عددی	پارامتر
[۱۰ ۴]	num of neurons
۱۰۰	Max epochs
$10^{-3.0441 \times 10}$	η_{mlp}
$10^{-8.0109 \times 10}$	$\eta_{mlp,g}$
$10^{-8.0109 \times 10}$	$\eta_{mlp,f}$

۵- شبیه‌سازی رفتار سیستم حلقه-بسته

در بخش حاضر از این مقاله، نمودارهای حاصل از اعمال ساختار هوشمند حلقه-بسته تولید مسیر به سیستم ماهواره با مشخصات مکانیکی ارائه شده در جدول ۱، طی ۴۰۰ ثانیه سناریوی عملکردی و در دو حالت حضور یا عدم حضور یک اغتشاش خارجی، نمایش داده می‌شود. شکل (۳) شمای کلی مسیر مرجع نامی را برای هریک از زوایای اوایلر و شکل (۴) نمودار مسیر زاویه‌ای تولیدی توسط الگوریتم پیشنهادی را به همراه مسیر حقیقی طی شده توسط سیستم (به صورت مشترک برای هر سه کانال)، نمایش می‌دهد.

تعریف هریک از دولایه شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده در ساختار پیشنهادی را نمایش می‌دهند.

$$net_1(k) = w_1(k) \times h_1(k)$$

$$w.r.t. \quad o_1(k) = \text{tansig}(g_1(k) \cdot net_1(k)) \quad (35)$$

$$net_2(k) = w_2(k) \times o_1(k)$$

$$o_2(k) = g_2(k) \cdot net_2(k) \quad (36)$$

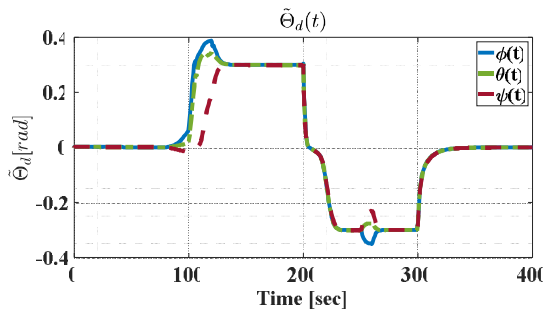
در این روابط نیز، $net_1(k)$ ، $net_2(k)$ ، $w_1(k)$ ، $w_2(k)$ ، $o_1(k)$ و $o_2(k)$ به ترتیب معرف عبارات شبکه و اوزان یادگیری و نیز خروجی لایه‌ها در لایه‌های اول و دوم هستند. مشابه بخش قبل، دو عبارت $g_1(k)$ و $g_2(k)$ معرف شیب توابع فعال‌ساز در هریک از لایه‌ها هستند که با هدف بهبود عملکرد ساختار، به صورت آموزش‌پذیر در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به تعاریف ارائه شده در خصوص لایه‌های این شبکه، روابط (۳۷) تا (۴۰) معادلات مرتبط با آموزش اوزان و نیز شیب توابع فعال‌ساز را نشان می‌دهند.

$$\Delta w_2 = -\eta_{mlp} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial e(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial \Theta(k)} \frac{\partial \Theta(k)}{\partial \tilde{\Theta}_d(k)} \frac{\partial \tilde{\Theta}_d(k)}{\partial o_2(k)} \frac{\partial o_2(k)}{\partial w_2(k)} \quad (37)$$

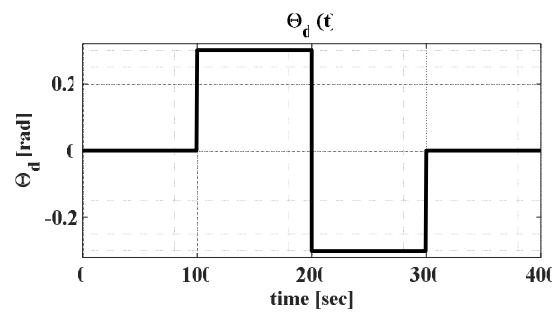
$$\Delta g_2 = -\eta_{mlp,g_2} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial e(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial \Theta(k)} \frac{\partial \Theta(k)}{\partial \tilde{\Theta}_d(k)} \frac{\partial \tilde{\Theta}_d(k)}{\partial o_2(k)} \frac{\partial o_2(k)}{\partial g_2(k)} \quad (38)$$

$$\Delta w_1 = -\eta_{mlp} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial e(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial \Theta(k)} \frac{\partial \Theta(k)}{\partial \tilde{\Theta}_d(k)} \frac{\partial \tilde{\Theta}_d(k)}{\partial o_2(k)} \frac{\partial o_2(k)}{\partial net_2(k)} \frac{\partial net_2(k)}{\partial o_1(k)} \frac{\partial o_1(k)}{\partial w_1(k)} \quad (39)$$

$$\Delta g_1 = -\eta_{mlp,g_1} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial e(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial \Theta(k)} \frac{\partial \Theta(k)}{\partial \tilde{\Theta}_d(k)} \frac{\partial \tilde{\Theta}_d(k)}{\partial o_2(k)} \frac{\partial o_2(k)}{\partial net_2(k)} \frac{\partial net_2(k)}{\partial o_1(k)} \frac{\partial o_1(k)}{\partial g_1(k)} \quad (40)$$

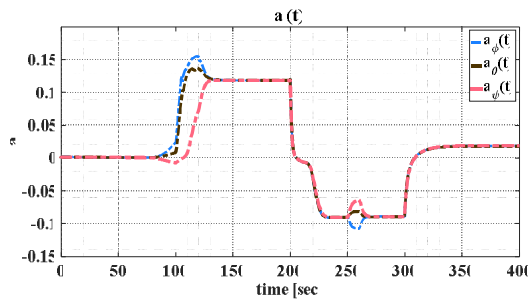


شکل ۶- نمودار تغییرات زمانی مسیر زاویه‌ای مطلوب ($\Theta_d(t)$)

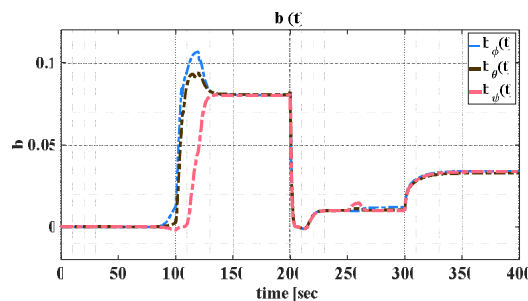


شکل ۳- مقدار مشترک نهایی زوایای اوایل مطلوب در طول شبیه‌سازی

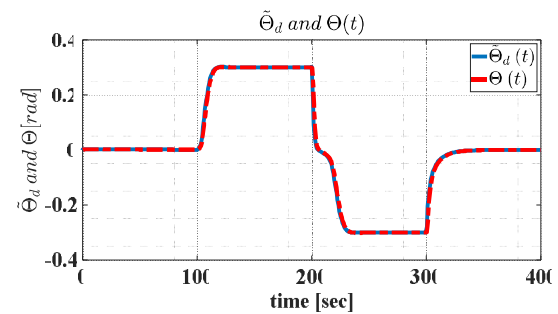
با عنایت به رابطه (۱۹) و حضور تعداد چهار پارامتر در معادله مسیر مطلوب، شکل‌های (۷) تا (۱۰) نمودار تغییرات زمانی هر یک از این پارامترها (منجر به تولید مسیر مطلوب در شکل (۶)) را در حضور اغتشاش وارده به سیستم، نمایش می‌دهد.



شکل ۷- نمودار تغییرات زمانی پارامتر $a(t)$

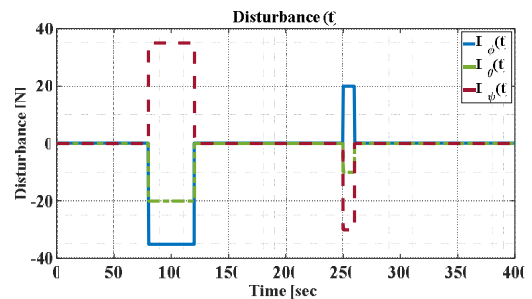


شکل ۸- نمودار تغییرات زمانی پارامتر $b(t)$



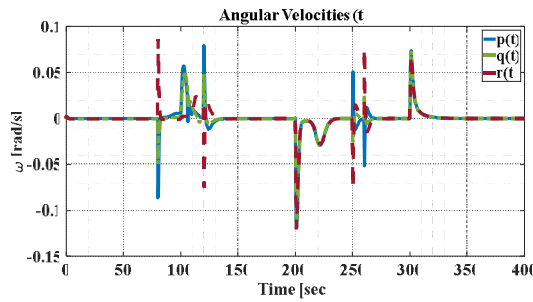
شکل ۴- نمودار تغییرات زمانی مسیر زاویه‌ای پیشنهادی و زوایای اوایل سیستم

شکل (۵)، نمودار تغییرات زمانی یک اغتشاش خارجی بزرگ را که با هدف سنجش عملکرد حلقه-بسته الگوریتم تولید مسیر در طول شبیه‌سازی به سیستم وارده شده است، نمایش می‌دهد.



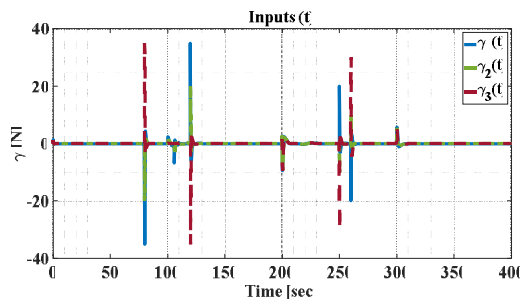
شکل ۵- نمودار تغییرات زمانی اغتشاشات خارجی وارده به سیستم

در ادامه و با عنایت به دو شکل (۳) و (۵)، شکل (۶) نمودار زمانی تغییرات مسیر زاویه‌ای پیشنهادی توسط الگوریتم تولید مسیر را در حضور اغتشاشات وارده به سیستم برای نیل به مقادیر نهایی مطلوب، نمایش می‌دهد.



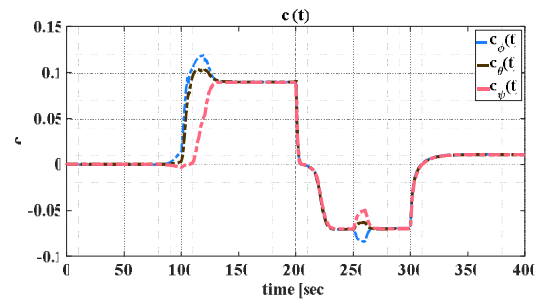
شکل ۱۲- نمودار تغییرات زمانی نرخ‌های چرخش سیستم $(\omega(k))$

چنان که پیش‌تر ذکر شد، یکی از خواص حائز اهمیت ساختار تولید مسیر پیشنهادی مورد بحث در این پژوهش، دارا بودن توان تولید مسیر سازگار با توان کنترلی سیستم حلقه-بسته توسط این الگوریتم به نحوی است که مسیر پیشنهادی اعمالی، سبب تولید ورودی‌های کنترلی نامعقول و بزرگ از سوی کنترل‌کننده سیستم (که معادلات آن پیش‌تر مورد بحث واقع شد) نشود. با عنایت به این مهم، شکل (۱۳) نمودار تغییرات زمانی هریک از نیروهای کنترلی وارده به کانال‌های سه‌گانه سیستم (کانال‌های غلت، فراز و سمت) را نمایش می‌دهد.

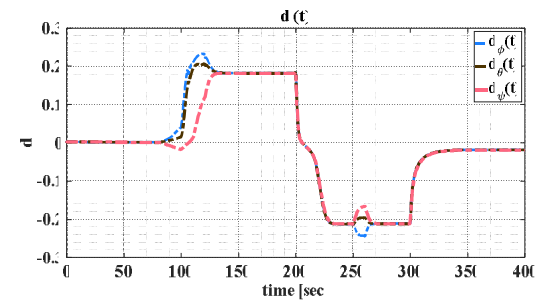


شکل ۱۳- نمودار تغییرات ورودی‌های کنترلی وارده به سیستم $(\tau(k))$

با توجه به توضیحات ارائه شده و از بررسی شکل‌های (۱۱) و (۱۳)، مشخص است الگوریتم پیشنهادی تولید مسیر، توانسته است سیستم مورد بررسی را حتی در شرایط وجود اغتشاشات نسبتاً بزرگ، به صورت حلقه-بسته و با رعایت کشتش کنترلی سیستم، به سمت نقاط نهایی موردنظر (زوایای پایانی)، سوق دهد. در ادامه، نمودارهای مرتبط با یادگیری در ساختار پیشنهادی، به صورتی توابعی از زمان و تکرار، نمایش داده می‌شود. شایان ذکر است با هدف جلوگیری از افزایش غیر ضروری حجم مقاله، در ادامه تنها نمودارهای مرتبط با یادگیری در کانال غلت سیستم

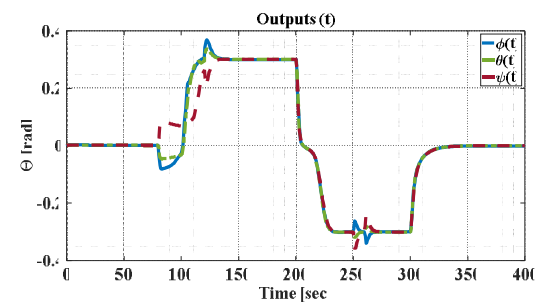


شکل ۹- نمودار تغییرات زمانی پارامتر $c(t)$

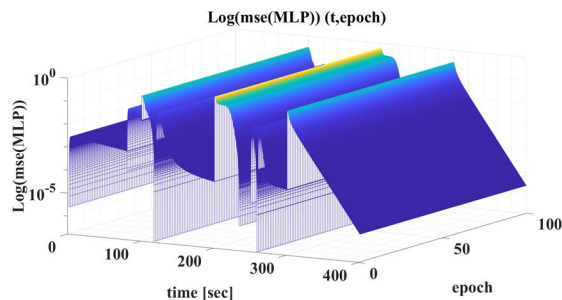


شکل ۱۰- نمودار تغییرات زمانی پارامتر $d(t)$

در ادامه، شکل (۱۱) نمودار تغییرات زمانی زوایای اولیه سیستم و نیز شکل (۱۲) نمودار تغییرات زمانی نرخ‌های چرخش سیستم را در فرآیند شبیه‌سازی تعقیب مسیر مطلوب پیشنهادی در حضور اغتشاش نمایش داده شده در شکل (۵)، نمایش می‌دهد.

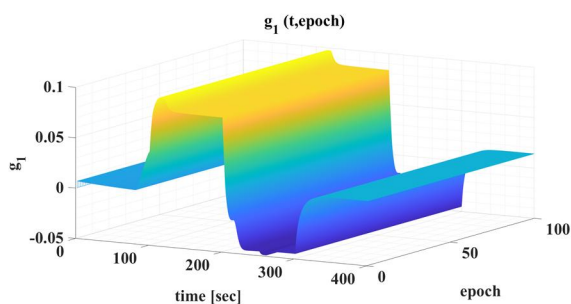


شکل ۱۱- نمودار تغییرات زمانی زوایای اولیه سیستم $(\theta(k))$

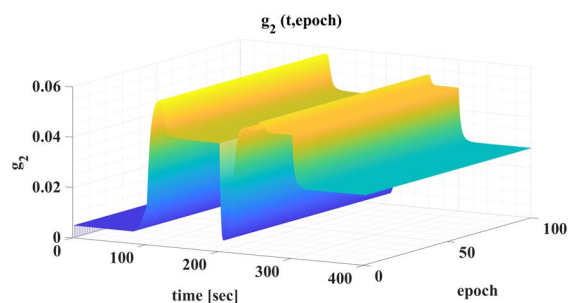


شکل ۱۷- نمودار تغییرات نورم خطای شبکه عصبی دولایه در فضای لگاریتمی کانال ϕ

در پایان نیز دو شکل (۱۸) و (۱۹) نمودارهای تغییرات میانگین شیب توابع فعال‌ساز هریک از دو لایه شبکه را نشان می‌دهد.

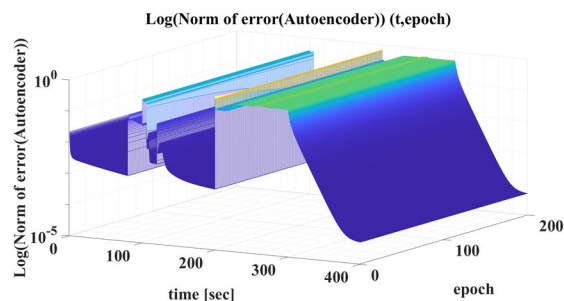


شکل ۱۸- نمودار تغییرات میانگین شیب توابع فعال‌ساز در لایه نخست شبکه عصبی کانال ϕ



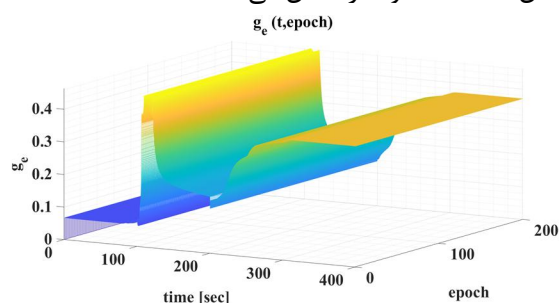
شکل ۱۹- نمودار تغییرات میانگین شیب توابع فعال‌ساز در لایه دوم شبکه عصبی کانال ϕ

(ϕ) نمایش شده‌اند. در این راستا، شکل (۱۴) نمودار تغییرات نورم خطا را در بخش کدکننده از ساختار، در فضای لگاریتمی، نمایش می‌دهد.

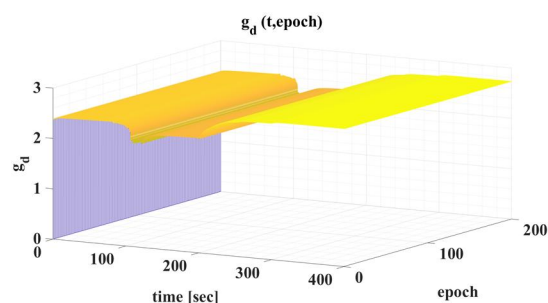


شکل ۱۴- نمودار تغییرات نورم خطای کدکننده خودکار در فضای لگاریتمی کانال ϕ

همچنین دو شکل (۱۵) و (۱۶) نمودار تغییرات میانگین شیب توابع فعال‌ساز را به ترتیب برای لایه‌های کدکننده و کدگشا از بخش کدکننده خودکار، نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- نمودار تغییرات میانگین شیب توابع فعال‌ساز در لایه کدکننده کانال ϕ



شکل ۱۶- نمودار تغییرات میانگین شیب توابع فعال‌ساز در لایه کدگشا کانال ϕ

به صورت مشابه، شکل (۱۷) نمودار تغییرات نورم خطای بخش شبکه عصبی دولایه ساختار را در فضای لگاریتمی نمایش می‌دهد.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در پژوهش پیش‌رو، فرآیند توسعه یک الگوریتم تولید مسیر هوشمند حلقه-بسته، برای تولید مسیر زاویه‌ای مطلوب در نیل به مقادیر نهایی پیش‌بینی شده برای یک ماهواره، مورد بررسی واقع شد. این الگوریتم هوشمند، با بهره‌گیری از توان پردازشی کدکننده‌های خودکار در تولید ویژگی‌های جدید بر پایه مقدار لحظه‌ای کلیه متغیرهای قابل اندازه‌گیری و نیز با استفاده از توان یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی، می‌کوشد پارامترهای تعریف شده در یک معادله غیرخطی پیش‌فرض را به نحوی تعیین نماید که سیستم کنترل شده مورد بررسی (ماهواره) با عنایت به توان کنترلی و نیز ضوابط مفسر دینامیک خود، طی بهترین ترکیب از این پارامترها، به سمت مقدار دقیق نهایی تعریف شده، حرکت نماید. در پایان، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت پذیرفته در محیط نرم‌افزار MATLAB از صحت عملکرد و نیز توان بالای پردازشی حتی در حضور اغتشاشات خارجی وارده به سیستم، حکایت دارد.

تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

مراجع

- [4] C. Richter, A. Bry, and N. Roy, "Polynomial Trajectory Planning for Aggressive Quadrotor Flight in Dense Indoor Environments," 2016, pp. 649–666. doi: 10.1007/978-3-319-28872-7_37.
- [5] S. Tang and V. Kumar, "Mixed Integer Quadratic Program trajectory generation for a quadrotor with a cable-suspended payload," *Proc IEEE Int Conf Robot Autom*, vol. 2015-June, no. June, pp. 2216–2222, Jun. 2015, doi: 10.1109/ICRA.2015.7139492.
- [6] F. Gao, W. Wu, Y. Lin, and S. Shen, "Online Safe Trajectory Generation for Quadrotors Using Fast Marching Method and Bernstein Basis Polynomial," *Proc IEEE Int Conf Robot Autom*, pp. 344–351, Sep. 2018, doi: 10.1109/ICRA.2018.8462878.
- [7] D. Mellinger, N. Michael, and V. Kumar, "Trajectory generation and control for precise aggressive maneuvers with quadrotors," *Int J Rob Res*, vol. 31, no. 5, pp. 664–674, Apr. 2012, doi: 10.1177/0278364911434236.
- [8] M. W. Mueller, M. Hehn, and R. Dandrea, "A Computationally Efficient Motion Primitive for Quadcopter Trajectory Generation," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 6, pp. 1294–1310, Dec. 2015, doi: 10.1109/TRO.2015.2479878.
- [9] S. Liu et al., "Planning Dynamically Feasible Trajectories for Quadrotors Using Safe Flight Corridors in 3-D Complex Environments," *IEEE Robot Autom Lett*, vol. 2, no. 3, pp. 1688–1695, Jul. 2017, doi: 10.1109/LRA.2017.2663526.
- [10] D. Mellinger and V. Kumar, "Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors," in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, May 2011, pp. 2520–2525. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980409.
- [11] H. Hua and Y. Fang, "A Novel Learning-Based Trajectory Generation Strategy for a Quadrotor," *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, pp. 1–12, 2022, doi: 10.1109/TNNLS.2022.3217814.
- [12] X. Zhang, X. Zhang, Z. Lu, and W. Liao, "Optimal Path Planning-Based Finite-Time Control for Agile CubeSat Attitude Maneuver," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 102186–102198, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2927401.

- [1] V. Schneider and F. Holzapfel, "Modular Trajectory Generation Test Platform for Real Flight Systems," in *Advances in Aerospace Guidance, Navigation and Control*, Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 185–202. doi: 10.1007/978-3-319-65283-2_10.
- [2] V. Y. Hernandez Marquez, R. S. Nunez Cruz, J. M. Ibarra Zannatha, and C. Enriquez Ramirez, "Optimal trajectories generation for autonomous navigation tasks in mobile robots," in *2018 15th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, IEEE, Sep. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICEEE.2018.8533936.
- [3] S. Tang and V. Kumar, "Safe and complete trajectory generation for robot teams with higher-order dynamics," *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2016-November, pp. 1894–1901, Nov. 2016, doi: 10.1109/IROS.2016.7759300.

- [13] M. Zarourati, M. Mirshams, and M. Tayefi, "Attitude path design and adaptive robust tracking control of a remote sensing satellite in various imaging modes," *Proc Inst Mech Eng G J Aerosp Eng*, vol. 237, no. 9, pp. 2166–2184, Jul. 2023, doi: 10.1177/09544100221148887.
- [14] C. Guo, K. Kidono, and M. Ogawa, "Learning-based trajectory generation for intelligent vehicles in urban environment," in *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE, Jun. 2016, pp. 1236–1241. doi: 10.1109/IVS.2016.7535548.
- [15] R. Ahmad, S. Tichadou, and J.-Y. Hascoet, "3D safe and intelligent trajectory generation for multi-axis machine tools using machine vision," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 26, no. 4, pp. 365–385, Apr. 2013, doi: 10.1080/0951192X.2012.717720.
- [16] M. J. Sidi, *Spacecraft dynamics and control: a practical engineering approach*. Cambridge university press, 1997.



COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)