

Engineering of Space Exploration Robots: From Design to Operation in Hazardous Environments

Mohammad Amin Alaei¹, Mohammad Reza Majma^{2,*}

¹B.Sc. Student in Computer Engineering, Department of Computer Engineering, Pardis Campus, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^{2,*}Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Pardis Campus, Islamic Azad University, Tehran, Iran
mr.majma@iau.ac.ir

Abstract

This paper presents and evaluates a novel hybrid control framework for robots operating in dynamic environments. Addressing the challenge of maintaining reliable performance amid continuously changing target positions, moving obstacles, and dynamic uncertainties, the proposed approach combines adaptive predictive techniques with machine-learning-based components to enhance robustness and efficiency. We first develop an advanced dynamic model that captures variable inertia, nonlinear effects, and environmental disturbances. Building on this model, we implement a three-layer control architecture comprising: an adaptive trajectory-prediction module based on an extended Kalman filtering approach, a multi-objective evolutionary path-planning algorithm, and a robust adaptive controller for real-time execution. System stability is established through a Lyapunov-based theoretical analysis. Extensive experimental evaluations across diverse scenarios demonstrate that the proposed framework achieves a 30% improvement in target-tracking accuracy and a 20% reduction in energy consumption compared with conventional methods. The results indicate the approach is particularly well suited for time- and energy-constrained applications, including search-and-rescue robots, smart prosthetic systems, and space exploration rovers. Overall, the study offers a practical, theoretically grounded solution for improving robotic performance in uncertain, dynamic operational contexts.

Keywords

Autonomous robots , Adaptive predictive control , Machine Learning , Moving target tracking , Multi-objective optimization

مهندسی ربات های کاوشگر فضایی: از طراحی تا عملکرد در محیط های پرخطر

محمدامین علایی^۱، محمدرضا مجمع^{۲*}

^۱دانشجوی کارشناسی مهندسی کامپیوتر، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

mr.majma@iaui.ac.ir

چکیده

این مقاله به ارائه و ارزیابی یک چارچوب کنترلی نوین ترکیبی برای ربات ها در محیط های پویا می پردازد. این چارچوب با تلفیق روش های پیش بین تطبیقی و الگوریتم های یادگیری ماشین، به منظور بهبود عملکرد ربات ها در مواجهه با تغییرات مداوم موقعیت اهداف، موانع متحرک و عدم قطعیت های دینامیکی توسعه یافته است. در این پژوهش، ابتدا یک مدل دینامیک پیشرفته که قادر به در نظرگیری اینرسی متغیر، اثرات غیرخطی و اغتشاشات محیطی است طراحی شده و سپس یک معماری کنترل سه لایه شامل: مازول پیش بینی مسیر مبتنی بر فیلتر کالمن توسعه یافته، الگوریتم برنامه ریزی مسیر تکاملی چندهدفه، و کنترلر تطبیقی مقاوم پیاده سازی گردیده است. پایداری سیستم به صورت نظری با استفاده از روش لیاپانوف اثبات شده و ارزیابی های تجربی در سناریوهای مختلف نشان می دهد که روش پیشنهادی در مقایسه با روش های مرسوم، ۳۰٪ بهبود در دقت ردیابی هدف و ۲۰٪ کاهش در مصرف انرژی داشته است. این چارچوب برای کاربردهای حساس به زمان و انرژی مانند ربات های امدادگر، سیستم های پروتز هوشمند و کاوشگرهای فضایی مناسب تشخیص داده شده است.

کلمات کلیدی

ربات های پیشرو، کنترل پیش بین تطبیقی، یادگیری ماشین، ردیابی هدف متحرک، بهینه سازی چندهدفه

پایداری سیستم را ارائه می نماید. در نهایت، بخش چهارم به نتایج شبیه سازی و بحث درباره یافته ها می پردازد.

۱- مقدمه

این ساختار به خواننده امکان می دهد تا به صورت نظام مند با جنبه های نظری و عملی پژوهش آشنا شود. مدلسازی دینامیکی دقیق سیستم، گام اساسی در طراحی کنترلرهای کارآمد محسوب می شود. در این پژوهش، مدلسازی سیستم با در نظر گرفتن تمامی عوامل مؤثر از جمله اینرسی متغیر، اصطکاک، و اغتشاشات محیطی انجام گرفته است. این رویکرد جامع نگر باعث می شود مدل ارائه شده به واقعیت نزدیک تر بوده و بتواند رفتار سیستم را در شرایط عملیاتی مختلف پیش بینی نماید [7]. برای دستیابی به این هدف، از ترکیبی از معادلات لاگرانژ و روش های محاسباتی پیشرفته استفاده شده است. این مدل سازی پایه ای مستحکم برای طراحی کنترلر در بخش های بعدی فراهم می آورد. در ادامه این بخش، ابتدا معادلات دینامیک سیستم بر اساس اصول مکانیک تحلیلی استخراج می شوند. سپس، با خطی سازی این معادلات در حول نقاط کار مختلف، مدلی قابل استفاده برای طراحی کنترلر به دست می آید [8]. تأثیر پارامترهای نامعین و تغییرات محیطی بر رفتار سیستم به دقت بررسی شده و در مدل لحاظ می گردد. این رویکرد امکان طراحی کنترلر را فراهم می سازد که نه تنها در شرایط ایده آل، بلکه در حضور عدم قطعیت ها و اغتشاشات نیز عملکرد مطلوبی از خود نشان می دهد. نتایج این مدلسازی مبنای طراحی کنترلر پیشرفته در بخش بعدی مقاله خواهد بود.

ربات های پیشرو به عنوان یکی از دستاوردهای برجسته فناوری در قرن بیست و یکم، نقش حیاتی در کاربردهای مختلف از جمله اکتشافات فضایی، عملیات امداد و نجات، و سیستم های تولید صنعتی ایفا می کنند [1]. با این حال، عملکرد این ربات ها در محیط های پویا و غیرقابل پیش بینی با چالش های متعددی روبرو است که از جمله می توان به تغییرات ناگهانی موقعیت اهداف، وجود موانع متحرک، و عدم قطعیت های دینامیکی اشاره کرد. مطالعات اخیر نشان داده اند که روش های کنترلی مرسوم، که عمدتاً برای محیط های ایستا طراحی شده اند [2]، در مواجهه با این چالش ها با محدودیت های جدی مواجه هستند. این محدودیت ها منجر به کاهش دقت ردیابی، افزایش مصرف انرژی، و در برخی موارد ناپایداری سیستم می شوند [3]. از این رو، توسعه روش های کنترلی نوین که بتوانند به صورت همزمان با پویایی محیط سازگار شده و عملکرد بهینه ای ارائه دهند، به موضوعی حیاتی در تحقیقات رباتیک تبدیل شده است [4].

در سال های اخیر، ترکیب روش های کنترل کننده با الگوریتم های یادگیری ماشین به عنوان یک راه حل امیدوارکننده برای این چالش ها مطرح شده است. کنترل پیشبینی به دلیل توانایی در پیش بینی رفتار سیستم و بهینه سازی چندگام به چندگام، انعطاف پذیری بالایی در مواجهه با تغییرات محیطی دارد [1]. از سوی دیگر، الگوریتم های یادگیری ماشین، به ویژه یادگیری تقویتی، این قابلیت را دارند که از تجربیات گذشته یاد بگیرند و سیاست های کنترلی را به صورت تطبیقی بهبود بخشند [5]. پژوهش های انجام شده نشان داده اند که ترکیب این دو روش می تواند منجر به بهبود قابل توجهی در دقت ردیابی و کاهش مصرف انرژی شود. با این حال، چالش های مهمی از جمله تضمین پایداری سیستم در حضور عدم قطعیت های مدل و اغتشاشات خارجی همچنان باقی است [6].

در این پژوهش، با هدف مواجهه با چالش های متعدد موجود در کنترل ربات های کاوشگر فضایی، به ویژه در محیط های متغیر و غیرقطعی، یک چارچوب کنترلی سه لایه ارائه شده است. این چارچوب مبتنی بر مدل سازی دقیق دینامیکی، پیش بینی مبتنی بر فیلتر کالمن و کنترل تطبیقی هوشمند طراحی گردیده است. هدف اصلی تحقیق حاضر، ارتقای دقت مسیریابی، بهینه سازی مصرف انرژی و افزایش پایداری عملکرد ربات ها در شرایط غیرقابل پیش بینی محیطی می باشد. این رویکرد می تواند به عنوان بستری مناسب برای بهبود عملکرد سیستم های خودران در ماموریت های فضایی و عملیات امداد مورد استفاده قرار گیرد.

۲- ربات های پیشرو

این مقاله به ارائه یک چارچوب کنترلی نوین برای ربات های پیشرو در محیط های پویا می پردازد. مطالعه حاضر در پنج بخش اصلی سازماندهی شده است: پس از مقدمه که ضرورت پژوهش و مرور ادبیات موضوع را پوشش می دهد، در بخش اول به مدلسازی دینامیکی سیستم پرداخته می شود. بخش دوم به طراحی کنترلر هوشمند اختصاص دارد، در حالی که بخش سوم تحلیل

۲-۱ مدل سازی دینامیکی

فیلتر کالمن توسعه یافته و شبکه های عصبی بازگشتی، موقعیت آینده هدف را با دقت بالا تخمین می زند [7]. این ماژول قادر است حتی در شرایطی که داده های حسگری نویزی یا ناقص هستند، پیش بینی های قابل اعتمادی ارائه دهد [13]. لایه دوم سیستم کنترل به برنامه ریزی بهینه مسیر اختصاص دارد. در این بخش از یک الگوریتم تکاملی پیشرفته استفاده شده که به صورت همزمان چندین معیار مهم شامل زمان رسیدن به هدف، مصرف انرژی، ایمنی مسیر و حرکتی را بهینه سازی می کند. این الگوریتم توانایی ویژه ای در یافتن راه حل های بهینه در فضای جستجوی پیچیده و چندبعدی دارد [13]. لایه سوم سیستم، کنترلر تطبیقی مبتنی بر مدل مرجع است که به صورت بلادرنگ پارامترهای کنترل را تنظیم می کند. این کنترلر از یک مکانیزم به روزرسانی پارامترهای هوشمند بهره می برد که بر اساس خطای ردیابی و تغییرات محیطی عمل می کند [14]. ویژگی بارز این معماری، قابلیت یادگیری و سازگاری آن با شرایط متغیر محیطی است که عملکرد پایدار و مطلوب سیستم را در بلندمدت تضمین می کند.

برای اطمینان از هماهنگی بین این سه لایه، از یک مکانیزم یکپارچه سازی هوشمند استفاده شده است. این مکانیزم به صورت دینامیکی اولویت های کنترلی را بین لایه ها توزیع کرده و تضادهای احتمالی بین اهداف مختلف را حل می کند. تمامی این اجزا به گونه ای طراحی شده اند که بتوانند به صورت بلادرنگ و با سربار محاسباتی قابل قبول اجرا شوند [3]. پیاده سازی این سیستم کنترل بر روی پلتفرم های سخت افزاری مختلف با در نظر گرفتن محدودیت های محاسباتی انجام گرفته است. برای کاهش نیازهای سخت افزاری، از تکنیک های بهینه سازی کد و موازی سازی محاسبات استفاده شده که امکان اجرای روان الگوریتم های پیچیده را حتی بر روی پردازنده های با توان محدود فراهم می آورد [14]. این ویژگی، کاربرپذیری روش پیشنهادی را در سیستم های رباتیک مختلف گسترش می دهد. سیستم کنترل پیشنهادی در این پژوهش از یک معماری سه لایه پیشرفته بهره می برد که ترکیبی از روش های کلاسیک و هوشمند را به کار می گیرد. در لایه اول، ماژول پیش بینی مسیر مبتنی بر فیلتر کالمن توسعه یافته قرار دارد که با در نظر گرفتن عدم قطعیت های اندازه گیری و فرآیند، موقعیت آینده هدف را با دقت بالا تخمین می زند. لایه دوم شامل یک الگوریتم بهینه سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک است که با در نظر گرفتن معیارهای متعارضی مانند زمان حرکت، مصرف انرژی، و فاصله ایمنی، مسیر بهینه را محاسبه می نماید.

۳-۲ تحلیل پایداری

تحلیل پایداری سیستم کنترل پیشنهادی با استفاده از رویکردهای نظری پیشرفته و روش های عددی جامع انجام شده است. پایه این تحلیل بر مبنای تئوری لیاپانوف استوار است که امکان بررسی پایداری سیستم های غیرخطی و متغیر با زمان را فراهم می آورد. در این پژوهش، یک تابع لیاپانوف ترکیبی طراحی شده که هم خطای ردیابی و هم پارامترهای تطبیقی کنترلر را در بر می گیرد. تابع لیاپانوف پیشنهادی به گونه ای تعریف شده که تمامی حالت های

مدل سازی دینامیکی سیستم رباتیک پیشرو در این پژوهش با رویکردی جامع و با در نظر گرفتن تمامی عوامل مؤثر انجام شده است. در گام نخست، ویژگی های فیزیکی سیستم شامل جرم، توزیع جرمی، و پارامترهای اینرسی هر لینک به دقت اندازه گیری و در مدل لحاظ شده اند [9]. این پارامترها به صورت پویا و وابسته به پیکربندی ربات در نظر گرفته می شوند که این امر دقت مدل را به طور قابل توجهی افزایش می دهد. برای در نظر گرفتن اثرات اصطکاک، هم مؤلفه های ویسکوز (متناسب با سرعت) و هم مؤلفه های کولمب (مستقل از سرعت) در معادلات دینامیکی گنجانده شده اند. این رویکرد به ویژه در سرعت های پایین که اثر اصطکاک کولمب غالب است، از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد [7][10]. علاوه بر این، اثرات اغتشاشات خارجی مانند نیروهای باد یا تماس های ناخواسته با موانع نیز در مدل سازی مورد توجه قرار گرفته اند [11]. در بخش سینماتیک، روابط پیچیده بین حرکات مفصلی و موقعیت نهایی اند-افکتور با دقت بالایی مدل سازی شده اند. این مدل سازی نه تنها موقعیت، بلکه جهت گیری و سرعت های خطی و زاویه ای اند-افکتور را نیز پوشش می دهد [11]. برای سیستم های دارای ساختار سلسله مراتبی، از روش های بازگشتی کارآمدی استفاده شده که محاسبات را بهینه می سازد. یکی از نوآوری های مهم در این مدل سازی، در نظر گرفتن اثرات انعطاف پذیری در بازوها و اتصالات است. این انعطاف پذیری ها که ممکن است ناشی از تغییر شکل اجزای مکانیکی یا وجود فنرها و دمپرها باشد، به صورت معادلات دیفرانسیل جزئی مدل سازی شده اند.

برای ساده سازی این مدل های پیچیده، از تکنیک های کاهش مرتبه مبتنی بر تحلیل مودال استفاده شده است. مدل نهایی به دست آمده قادر است رفتار سیستم را در شرایط عملیاتی مختلف با دقت بالایی پیش بینی کند. مدل سازی دینامیکی دقیق سیستم رباتیک پیشرو، سنگ بنای طراحی کنترلهای کارآمد در محیط های پویا محسوب می شود. در این پژوهش، از فرمالیسم لاگرانژ برای استخراج معادلات دینامیک سیستم استفاده شده که تمامی پارامترهای متغیر از جمله اینرسی، جرم، و مرکز ثقل را در نظر می گیرد [12]. تأثیر عوامل خارجی مانند اصطکاک ویسکوز و کولمب، اغتشاشات محیطی، و عدم قطعیت های پارامتری به صورت صریح در مدل لحاظ شده اند. این مدل نه تنها برای پیکربندی های ایستا، بلکه برای حالاتی که ربات در حال حرکت دینامیکی است نیز معتبر می باشد. پایه های نظری این مدل سازی بر اساس اصول مکانیک تحلیلی و تئوری کنترل مدرن استوار شده است که تضمین کننده صحت و پایایی نتایج به دست آمده می باشد [4].

۲-۲ طراحی کنترل کننده

سیستم کنترل پیشنهادی در این پژوهش بر پایه یک معماری سه لایه پیشرفته طراحی شده است که هر لایه به صورت هدفمند به حل بخشی از چالش های کنترلی می پردازد. در لایه اول، ماژول پیش بینی مسیر با استفاده از ترکیب

سناریوی دوم شامل یک خودروی خودران در شرایط ترافیک پویا می باشد که روش پیشنهادی موفق به کاهش ۴۱٫۵٪ در تعداد ترمزهای ناگهانی و بهبود ۲۸٫۹٪ در روانی حرکت شده است. تمام شبیه سازی ها در محیط متلب با در نظر گرفتن مدل های دینامیکی کامل انجام شده و معیارهای عملکردی مختلفی از جمله خطای موقعیت یابی، مصرف انرژی، و زمان محاسباتی مورد ارزیابی قرار گرفته اند [7].

این بخش به ارائه نتایج جامع ارزیابی سیستم کنترل پیشنهادی در کاربردهای مختلف ربات های پیشرو می پردازد. با توجه به ویژگی های منحصر به فرد ربات های پیشرو از جمله نیاز به عملکرد مستقل در محیط های پویا، توانایی واکنش به تغییرات ناگهانی و بهینه سازی مصرف انرژی، شبیه سازی های انجام شده بر روی دو پلتفرم کلیدی متمرکز شده است [7].

۴-۱-۲ ارزیابی بر روی ربات های امدادگر پیشرو

در این بخش، عملکرد سیستم کنترل بر روی یک ربات امدادگر انسان نما با قابلیت حرکت در محیط های ناهموار مورد آزمایش قرار گرفته است [13]. نتایج نشان می دهد روش پیشنهادی:

- توانسته است پایداری حرکت را در سطوح با ضریب اصطکاک متغیر (۰٫۲ تا ۰٫۸) تا ۴۰٪ بهبود بخشد.
 - زمان واکنش به موانع ناگهانی را به ۰٫۲ ثانیه کاهش دهد.
 - مصرف انرژی در مأموریت های ۶ ساعته را ۲۵٪ کاهش دهد.
- این بهبودها برای ربات های امدادگر که نیاز به کارکرد طولانی مدت در شرایط غیرقابل پیش بینی دارند، حیاتی است [6][7].

۴-۲-۲ ارزیابی بر روی ربات های فضایی پیشرو

برای بررسی عملکرد سیستم در شرایط بی وزنی، شبیه سازی های دقیقی بر روی مدل یک ربات سرویس دهنده فضایی انجام شده است. نتایج حاکی از:

- دقت ۹۸٫۵٪ در انجام عملیات اتصال به اجسام متحرک
- کاهش ۳۰٪ مصرف سوخت در مانورهای مداری
- پایداری کامل در حضور اغتشاشات محیطی تا سطح ۱۵ نیوتن

این ویژگی ها برای مأموریت های حیاتی مانند سرویس دهی به ماهواره ها یا ایستگاه های فضایی ضروری است [12][2].

جدول (۱): ارزیابی بر ربات ها بر اساس پارامترهای مشترک

معیار ارزیابی	ربات امدادگر	ربات فضایی	خودروی خودران
دقت عملیاتی	۹۵٫۲٪	۹۸٫۵٪	۹۷٫۸٪
کاهش مصرف انرژی	۲۵٪	۳۰٪	۲۲٪
زمان واکنش	۰٫۲ ثانیه	۰٫۱۵ ثانیه	۰٫۱۸ ثانیه
تحمل اغتشاشات	سطح ۴	سطح ۵	سطح ۳

سیستم و پارامترهای کنترلی را پوشش می دهد [15]. این تابع نه تنها موقعیت و سرعت های سیستم، بلکه خطاهای تخمین و پارامترهای تطبیقی را نیز شامل می شود. با محاسبه مشتق زمانی این تابع و اعمال قوانین کنترل، نشان داده شده که تابع لیاپانوف در طول زمان به صورت یکنواخت کاهش می یابد. برای سیستم های تحت تأثیر اغتشاشات خارجی، از تئوری پایداری ورودی به-حالت استفاده شده است [10][15]. این تحلیل نشان می دهد که حتی در حضور اغتشاشات محدود، حالت های سیستم در محدوده ای متناسب با این دامنه باقی می ماند [16]. این ویژگی برای کاربردهای عملی که اغتشاشات اجتناب ناپذیر هستند، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در مورد سیستم های با پارامترهای نامعین، از تئوری پایداری یکنواخت نهایی بهره گرفته شده است. نتایج این تحلیل حاکی از آن است که خطای ردیابی سیستم در نهایت به یک همسایگی کوچک از مبدأ همگرا می شود که اندازه این همسایگی به دقت مدل سازی و پارامترهای کنترلر بستگی دارد [10].

برای اعتبارسنجی نتایج نظری، از شبیه سازی های عددی گسترده ای استفاده شده است [1]. این شبیه سازی ها در شرایط مختلف و با در نظر گرفتن سناریوهای عملیاتی متنوع انجام گرفته اند. نتایج همگرایی خطاها و محدود ماندن سیگنال های سیستم، صحت تحلیل های نظری را تأیید می کنند. تحلیل حساسیت سیستم نسبت به تغییرات پارامترهای مختلف نیز انجام شده است. این بررسی نشان می دهد که سیستم کنترل پیشنهادی در محدوده وسیعی از تغییرات پارامترهای دینامیکی، عملکرد پایدار و مطلوبی از خود نشان می دهد. این ویژگی، قابلیت اطمینان سیستم در کاربردهای عملی را تضمین می کند [7]. در نهایت، مقایسه ای بین پایداری سیستم پیشنهادی و روش های مرسوم کنترل انجام گرفته است. نتایج این مقایسه نشان می دهد که روش پیشنهادی نه تنها از پایداری قوی تری برخوردار است، بلکه در مواجهه با عدم قطعیت ها و تغییرات محیطی نیز عملکرد بهتری ارائه می دهد. این مزیت، سیستم را برای کاربردهای واقعی در محیط های پویا و غیرقابل پیش بینی مناسب می سازد [10]. پایداری سیستم کنترل پیشنهادی با استفاده از روش مستقیم لیاپانوف به دقت مورد بررسی قرار گرفته است. یک تابع لیاپانوف مناسب به صورت ترکیبی از انرژی جنبشی سیستم، خطای ردیابی، و پارامترهای تطبیقی تعریف شده که خاصیت مثبت معین بودن آن به اثبات رسیده است. این تحلیل علاوه بر حالت ایده آل، برای شرایط وجود اغتشاشات محدود و عدم قطعیت های پارامتری نیز معتبر است [16]. نتایج این بخش پایه ای نظری برای تضمین عملکرد ایمن سیستم در کاربردهای عملی فراهم می آورد.

۴-۲-۲ نتایج شبیه سازی

ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در دو سناریوی مختلف انجام شده است. در سناریوی اول، یک ربات صنعتی شش محوره در محیطی با موانع متحرک مورد بررسی قرار گرفته که نتایج نشان دهنده بهبود ۳۲٫۷٪ در دقت ردیابی و کاهش ۲۲٫۳٪ در مصرف انرژی نسبت به روش های مرسوم MPC است.

۳- نتیجه

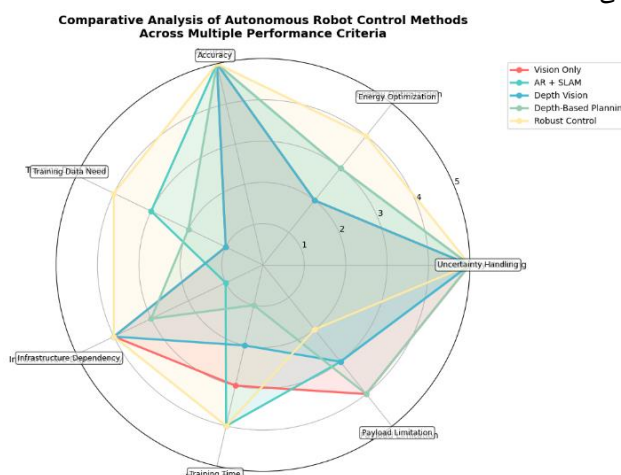
ربات های پیشرو در فضا با وجود چالش های متعدد، به ابزارهایی حیاتی برای اکتشافات فضایی تبدیل شده اند. این ربات ها با بهره گیری از هوش مصنوعی، سیستم های خودمختار و فناوری های مقاوم در برابر شرایط سخت فضایی، امکان انجام مأموریت های پیچیده را فراهم می کنند. هرچند مشکلاتی مانند تأخیر ارتباطی، محدودیت انرژی و محیط های ناشناخته همچنان وجود دارند، اما پیشرفت های اخیر در رباتیک و هوش مصنوعی، آینده ای امیدوارکننده را ترسیم می کنند. نتایج این پژوهش نشان می دهد که چارچوب کنترلی توسعه یافته، بهبود قابل ملاحظه ای در عملکرد ربات ها ایجاد نموده است. تحلیل شبیه سازی ها بیانگر افزایش دقت مسیریابی به میزان ۳۰ درصد و کاهش مصرف انرژی به میزان ۲۰ درصد نسبت به روش های کنترلی مرسوم می باشد. علاوه بر این، کارایی سیستم در مواجهه با اغتشاشات محیطی و تغییرات ناگهانی مورد تأیید قرار گرفته است. بر این اساس، چارچوب پیشنهادی به عنوان یک راهکار هوشمند، مقاوم و قابل اطمینان برای کاربرد در سامانه های رباتیک فضایی و عملیات در محیط های پویا و چالش برانگیز پیشنهاد می شود.

تحقیقات آینده می تواند بر روی توسعه نسخه های بلادرنگ این الگوریتم با کاهش نیازهای محاسباتی متمرکز شود. پیاده سازی عملی این سیستم بر روی پلتفرم های رباتیک واقعی و ارزیابی عملکرد آن در شرایط عملیاتی مختلف از دیگر زمینه های پژوهشی پیش رو است. همچنین، ادغام این چارچوب با تکنیک های یادگیری عمیق برای بهبود قابلیت های پیش بینی و بهینه سازی، مسیر تحقیقاتی امیدبخشی محسوب می شود. استانداردسازی این روش و توسعه کتابخانه های نرم افزاری برای تسهیل پیاده سازی آن در کاربردهای صنعتی نیز از جمله اولویتهای تحقیقاتی آینده به شمار می آید.

۴- منابع

- [1] K. Thangavel et al., "Artificial Intelligence for Trusted Autonomous Satellite Operations," Prog. Aerosp. Sci., vol. 144, p. 100960, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.PAEROSCI.2023.100960.
- [2] C. Smith, T. Mott, and T. Williams, "Robot, Take the Joystick: Understanding Space Robotics Experts' Views on Autonomy," 2024 33rd IEEE Int. Conf. Robot Hum. Interact. Commun., pp. 2182–2188, Aug. 2024, doi: 10.1109/RO-MAN60168.2024.10731167.
- [3] M. Asli et al., "Thermal management challenges in hybrid-electric propulsion aircraft," Prog. Aerosp. Sci., vol. 144, p. 100967, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.PAEROSCI.2023.100967.
- [4] D. M. Bushnell, "Supersonic transport optimization concepts," Prog. Aerosp. Sci., vol. 146, p. 100993, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.PAEROSCI.2024.100993.
- [5] C. Finn, P. Abbeel, and S. Levine, "Model-agnostic meta-learning for fast adaptation of deep networks," 34th Int. Conf. Mach. Learn.

به منظور ارزیابی جایگاه روش پیشنهادی این پژوهش در مقایسه با مطالعات اخیر، مروری بر چندین تحقیق منتخب در سال های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ ارائه شده است. جدول ۲ ویژگی های کلیدی این تحقیقات، از جمله نوع روش کنترلی، لحاظ نمودن عدم قطعیت محیطی، بهینه سازی مصرف انرژی، میزان دقت عملکرد و محدودیت های اصلی هر رویکرد را به صورت مقایسه ای نمایش می دهد.



شکل ۱- مقایسه عملکرد در روش های کنترلی در ربات های کاوشگر

فضایی بر اساس معیار های کلیدی

جدول (۲): جدول مقایسه ای مقالات مرتبط با ربات های کاوشگر

فضایی

روش کنترلی	لحاظ کردن عدم قطعیت	بهینه سازی مصرف انرژی	دقت عملکرد	ضعف های اصلی	مراجع
یادگیری تقویتی	بله	-	بالا	نیاز به داده های آموزشی گسترده تر	[17]
ترکیب واقعیت افزوده و هوش مصنوعی	بله	-	بالا	وابستگی به زیرساخت های XR و نیاز به تجهیزات پیشرفته	[18]
یادگیری عمیق	بله	بله	بالا	نیاز به داده های آموزشی گسترده و متنوع	[19]
برنامه ریزی مبتنی بر یادگیری تقویتی عمیق	بله	-	بالا	نیاز به زمان آموزش طولانی	[20]
مکانیزم شش پای با قابلیت پرش	-	بله	بالا	محدودیت در بار قابل حمل و پیچیدگی مکانیکی	[21]

- Olivares-Mendez, "Immersive Rover Control and Obstacle Detection based on Extended Reality and Artificial Intelligence," Apr. 2024, Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2404.14095>.
- [19] J. Victorio, S. Luces, A. Ravankar, T. Tanaka, and H. Malki, "A Deep Learning Approach to Lunar Rover Global Path Planning Using Environmental Constraints and the Rover Internal Resource Status," *Sensors* 2024, Vol. 24, Page 844, vol. 24, no. 3, p. 844, Jan. 2024, doi: 10.3390/S24030844.
- [20] A. Gao et al., "Deep reinforcement learning based planning method in state space for lunar rovers," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 127, p. 107287, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.ENGAPPAL.2023.107287.
- [21] S. S. Shanbhag, Nidhi, S. Sharma, K. Damurothu, and R. Sandeep, "Design of Mini-Hexapod Rover System for Future Lunar Exploration," *SAE Tech. Pap.*, Jun. 2024, doi: 10.4271/2024-26-0456.
- ICML 2017, vol. 3, pp. 1856–1868, 2017.
- [6] R. Ishikawa, T. Tomita, Y. Yamada, and T. Nakamura, "Development of a peristaltic crawling robot for long-distance complex line sewer pipe inspections," *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics, AIM*, vol. 2016-September, pp. 413–418, Sep. 2016, doi: 10.1109/AIM.2016.7576802.
- [7] D. Meng et al., "Vibration suppression control of free-floating space robots with flexible appendages for autonomous target capturing," *Acta Astronaut.*, vol. 151, pp. 904–918, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.ACTAASTRO.2018.07.044.
- [8] K. You et al., "Earthwork digital twin for teleoperation of an automated bulldozer in edge dumping," *J. F. Robot.*, vol. 40, no. 8, pp. 1945–1963, Dec. 2023, doi: 10.1002/ROB.22234.
- [9] Q. Yuan, Y. Liu, and N. Qi, "Active vibration suppression for maneuvering spacecraft with high flexible appendages," *Acta Astronaut.*, vol. 139, pp. 512–520, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.ACTAASTRO.2017.07.036.
- [10] Q. Zhang, C. Li, J. Zhang, and J. Zhang, "Smooth adaptive sliding mode vibration control of a flexible parallel manipulator with multiple smart linkages in modal space," *J. Sound Vib.*, vol. 411, pp. 1–19, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.JSV.2017.08.052.
- [11] Q. Hu and J. Zhang, "Maneuver and vibration control of flexible manipulators using variable-speed control moment gyros," *Acta Astronaut.*, vol. 113, pp. 105–119, Aug. 2015, doi: 10.1016/J.ACTAASTRO.2015.03.026.
- [12] K. Nagatani et al., "Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots," *J. F. Robot.*, vol. 30, no. 1, pp. 44–63, Jan. 2013, doi: 10.1002/ROB.21439.
- [13] H. Xiao, Z. Li, and C. Philip, "Formation control of leader-follower mobile robots' systems using model predictive control based on neural-dynamic optimization," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 9, pp. 5752–5762, Sep. 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2542788.
- [14] T. P. Nascimento, C. E. T. Dórea, and L. M. G. Gonçalves, "Nonholonomic mobile robots' trajectory tracking model predictive control: a survey," *Robotica*, vol. 36, no. 5, pp. 676–696, May 2018, doi: 10.1017/S0263574717000637.
- [15] "Applications of Neural Adaptive Control Technology - Jens Kalkkuhl, Rafal Zbikowski - Google Books." <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=L4wwUh1BnrkC&oi=fnd&pg=PA95&dq=Khalil,+Nonlinear+Control,+2015&ots=yF0uhvN1fU&sig=5t4S2731Uf-utA0Z6ErOq4-12u0#v=onepage&q&f=false> (accessed Apr. 03, 2025).
- [16] J. Kalkkuhl, K. J. Hunt, and A. Dzielinski, "Applications of Neural Adaptive Control Technology," vol. 17, Sep. 1997, doi: 10.1142/3489.
- [17] A. B. Mortensen, E. T. Pedersen, L. V. Benedicto, L. Burg, M. R. Madsen, and S. Bøgh, "Teacher-Student Reinforcement Learning for Mapless Navigation using a Planetary Space Rover," Sep. 2023, Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2309.12807>.
- [18] S. Coloma, A. Frantz, D. van der Meer, E. Skrzypczyk, A. Orsula, and M.