



# Joint-Space Position Control of a Deployable Cable Driven Robot in Joint Space Using Force Sensors and Actuator Encoders

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Khalilpour Seyedi S.A.<sup>1</sup> MSc,  
Khorram Bakht R.<sup>1</sup> BSc,  
Bourbour A.<sup>1</sup> BSc,  
Taghirad H.D.\*<sup>1</sup> PhD

### How to cite this article

Khalilpour Seyedi S.A, Khorram Bakht R, Bourbour A, Taghirad H.D. Joint-Space Position Control of a Deployable Cable Driven Robot in Joint Space Using Force Sensors and Actuator Encoders. Modares Mechanical Engineering. 2019;19-(11):2615-2625.

<sup>1</sup>Faculty of Electrical Engineering, K. N. Toosi University of Technology

### \*Correspondence

Address: Seyed-khandan Bridge, Shariati Avenue, Tehran, Iran  
Phone: +98 (21) 8406 2321  
Fax: +98 (21) 8846 2066  
taghirad@kntu.ac.ir

### Article History

Received: November 5, 2018

Accepted: May 21, 2019

ePublished: November 2, 2019

## ABSTRACT

Despite the intense development of cable-driven robot in recent years, they have not yet been vastly utilized in their potential applications because of difficulties in their performing accurate installation and calibration. This paper aims to present a suitable control method, relieving the limitation of accurate calibration and installation requirement in the suspended cable-driven parallel robot. In this paper, kinematics and dynamics uncertainties are investigated and based on their bounds, a robust controller is proposed. The main innovation of this article is providing a new control method to cost reduction by eliminating accurate measurement tools such as a camera in position control of a deployable cable-driven robot. Using this approach, reducing costs in building a robot and increasing the speed of installation and calibration is achieved. Another problem investigated in this paper is the problem of joint space controllers applied to redundant cable-driven parallel robots, namely the loosened redundant cable. To solve this problem, the embedded force sensor and a new sliding surface for the controller is proposed. In fact, in this paper, the conventional joint-space controllers are modified to become applicable to the control of cable-driven robots. Finally, by conducting some experiments using ARAS suspended cable-driven parallel robot, the proposed algorithms are verified and it is shown that there are feasible solutions for stable robot maneuvers.

**Keywords** Suspended Cable-Driven Robot; Deployable Design; Uncertain Jacobian Matrix; Force Control; Robust Control

## CITATION LINKS

[1] Applying evolutionary algorithms in multi objective optimization of planar cable-driven parallel robots [2] Novel devices and interaction techniques for human-scale haptics [3] A portable parallel manipulator for search and rescue at large-scale urban earthquakes And an Identification algorithm for the installation in unstructured environments [4] implementation and clinical tests of a wire-based robot for neurorehabilitation [5] Realization of a virtual sports training system with parallel wire mechanism [6] Marionet, a family of modular wire-driven parallel robots [7] NIMS RD: A rapidly deployable cable based robot [8] A concept for rapidly-deployable cable robot search and rescue systems [9] NIMS-PL: A cable-driven robot with self-calibration capabilities [10] NIMS3D: A novel rapidly deployable robot for 3-dimensional applications [11] Design and analysis of cooperative cable parallel manipulators for multiple mobile cranes [12] Kinematics and error analysis of cooperative cable parallel manipulators for multiple mobile cranes [13] Design, dynamics, and workspace of a hybrid-driven-based cable parallel manipulator [14] Forward kinematics resolution of a deployable cable robot [15] Design and implementation of NIMS3D, a 3-D cabled robot for actuated sensing applications [16] Robust dynamic sliding mode control of a deployable cable driven robot [17] A control lyapunov approach for feedback control of cable-Suspended robots [18] Motion control of a tendon-based parallel manipulator using optimal tension distribution [19] Adaptive terminal sliding mode control of a redundantly-actuated cable-driven parallel manipulator: CoGiRo [20] Rapid computation of optimally safe tension distributions for parallel cable-driven robots. IEEE Transactions on Robotics [21] Calculating force distributions for redundantly actuated tendon-based stewart platforms [22] Feedback control for robotic manipulator with an uncertain Jacobian matrix [23] H/sub /spl infin// tuning for task-space feedback control of robot with uncertain Jacobian matrix [24] Approximate Jacobian control for robots with uncertain kinematics and dynamics [25] Robust PID control of fully-constrained cable driven parallel robots [26] Adaptive robust control of fully-constrained cable driven parallel robots [27] Parallel robots: Mechanics and control [28] Calculation of the end-effector position of the cable robot using cable tension and encoders outputs

## کنترل موقعیت یک ربات کابلی آسان‌نصب در فضای مفصلی با استفاده از حسگرهای انکودر و نیرو

سیداحمد خلیلپورسیدی MSc

دانشکده برق، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

روح الله خرم‌پخت BSc

دانشکده برق، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

علیرضا بورپور BSc

دانشکده برق، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

حمیدرضا تقی‌راد\* PhD

دانشکده برق، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### چکیده

علیرغم آن که ربات‌های کابلی در دهه‌های اخیر توسعه زیادی پیدا کرده‌اند اما به لحاظ ساده‌نبودن فرآیند نصب و راه‌اندازی آنها کاربرد چندانی پیدا نکرده‌اند. موضوع اصلی این پژوهش ارائه روش کنترلی مناسبی است که امکان استفاده از ربات کابلی معلق را بدون نیاز به دقت زیاد در فرآیند نصب پدید آورد. توجه به حضور نامعینی‌های سینماتیکی و دینامیکی در این ربات و ارائه کنترل‌کننده‌ای مقاوم با توجه به کران نامعینی‌ها، از جمله اهداف پژوهشی این مقاله به شمار می‌آید. نوآوری اصلی این مقاله ارائه روش کنترلی جدیدی است که با اعمال آن، بدون استفاده از تجهیزات دقیق و گران‌اندازه‌گیری نظیر دوربین، بتوان موقعیت مجری نهایی را به گونه‌ای مطلوب کنترل کرد. چنین رویکردی، هدف اصلی ساخت ربات آسان یعنی کاهش هزینه‌ها در ساخت ربات و افزایش سرعت در نصب و کالیبراسیون را محقق می‌سازد. علیرغم مزایای فراوان استفاده از ساختارهای کنترلی در فضای مفصلی به منظور کنترل ربات‌های صلب، اغلب در ربات‌های کابلی به دلیل پدیده شل کابل‌ها از این ساختارهای کنترلی استفاده نمی‌شود. در این مقاله سعی شده است با تصحیح الگوریتم‌های کنترلی در فضای مفصلی و بهره‌گیری همزمان از حسگرهای نیرو، این الگوریتم‌ها به منظور استفاده در ربات‌های کابلی توسعه داده شود. در نهایت، در این مقاله الگوریتم‌های پیشنهادی روی ربات کابلی معلق ارس مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت و نشان داده خواهد شد که پاسخ‌های در دسترس برای پایداری ربات وجود خواهد داشت.

**کلیدواژه‌ها:** ربات کابلی معلق، طراحی آسان‌نصب، نامعینی ماتریس ژاکوبین، کنترل نیرو، کنترل مقاوم

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۳۱

\*نویسنده مسئول: taghirad@kntu.ac.ir

### ۱- مقدمه

ربات‌های کابلی، مکانیزم‌هایی هستند که عناصر اصلی تشکیل‌دهنده آنها کابل یا سیم است. در این ربات‌ها معمولاً به جای استفاده از عملگرهای هیدرولیکی و پنوماتیکی از کابل جمع‌کن‌هایی استفاده می‌شود که توسط موتورهای الکتریکی تحریک می‌شوند. در این ربات‌ها عملگرها روی چارچوب ثابت نصب هستند. در این حالت عملگرها تنها نیروهای وارد بر مجری نهایی (End-effector) و وزن ناچیز کابل‌ها را متحمل می‌شوند و وزن قابل توجه عملگرها مهار می‌شود. در نتیجه می‌توان نیروهای بزرگتری به مجری نهایی آن اعمال کرد و سرعت و شتاب‌های بالاتری را انتظار داشت. ربات‌های موازی کابلی به علت دارا بودن ویژگی‌های ممتازی نظیر سرعت و شتاب بالا، وسعت فضای کاری، هزینه کم ساخت، قابلیت حمل بار زیاد نسبت به وزن کم ربات و غیره، کاربردهای فراوانی در مسائل گوناگون پیدا کرده‌اند<sup>[1]</sup>. ویژگی‌های مطلوب و امتیازات فراوان ربات‌های کابلی اشتیاق محققان را برای به‌کارگیری این ربات‌ها در زمینه‌های

مختلفی چون ابزار واسط لاسه‌ای<sup>[2]</sup>، ربات‌های نجات‌بخش<sup>[3]</sup>، بازتوان بخشی<sup>[4]</sup>، آموزش‌های ورزشی<sup>[5]</sup> و نقل و انتقال اجسام سنگین افزایش داده است.

در بسیاری از موارد، کاربرد مورد نظر به نحوی است که محل استفاده از ربات ثابت نمی‌باشد. به عبارت دیگر، باید بتوان ربات را برای استفاده از محلی به محلی دیگر جابه‌جا کرد و پس از آن که ربات وظیفه مورد نظر را انجام داد، آن را به راحتی به مکان دیگر منتقل کرد. کاربردهای امدادگری، صنایع کشاورزی و استفاده از ربات‌ها در زمین‌های زراعی را می‌توان به عنوان نمونه‌هایی از این نوع کاربردها دانست<sup>[6, 7]</sup>. به طور معمول در این نوع کاربردها، فضای کاری که ربات باید پوشش دهد بسیار وسعت دارد. به عنوان مثال، در صنایع کشاورزی، فضای کاری ربات باید در حد چند صد هکتار باشد. در به‌کارگیری ربات‌ها در این گونه موارد، شرط اول آن است که ربات دارای اجزای سبک و قابل حمل بوده تا به سادگی بتوان اجزای آن را از محلی به محل دیگر انتقال داد. داشتن فضای کاری بزرگ، برآورده‌کردن این شرط را برای بسیاری از ربات‌ها مشکل یا ناممکن می‌سازد. زیرا به طور معمول افزایش فضای کاری با افزایش اندازه و ابعاد ربات همراه است. همچنین افزایش حجم ربات افزایش جرم ربات را نتیجه خواهد داد. به طور قطع و یقین، جابه‌جایی و حمل رباتی با ابعاد بزرگ و وزن زیاد، نه تنها کار ساده‌ای نیست، بلکه احتمال آسیب‌زدن به ربات را در حین جابه‌جایی افزایش می‌دهد. اما شرط دوم، آن است که اتصال اجزای ربات و کالیبراسیون مجدد ربات در محیط جدید، فرآیندی پیچیده و زمان‌بر نباشد. تحقق این شرط نیز برای همه ربات‌ها کار ساده‌ای نخواهد بود. زیرا به طور معمول سوارکردن اجزای مکانیکی ربات‌ها، نیازمند محیط‌های کارگاهی است و در هر مکانی این امر امکان‌پذیر نخواهد بود. تطبیق ربات با شرایط محیطی مختلف را می‌توان به عنوان شرط سوم به‌کارگیری ربات‌ها در این گونه کاربردها دانست. رباتی که به منظور کار در یک شرایط محیطی خاص طراحی شده است، ممکن است نتواند کارایی لازم را در شرایط دیگر داشته باشد. به عنوان مثال تغییر در هندسه محیط کاری یا اشیای پیرامون ربات نباید در کارایی ربات خللی وارد سازد.

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ربات‌های کابلی قابلیت نصب سریع آن‌ها در محل مورد استفاده است. این قابلیت مهم از به‌کارگیری اجزای ساده تشکیل‌دهنده این ربات نظیر کابل‌ها ناشی شده است. این ویژگی ربات کابلی در کنار سایر ویژگی‌های مناسب آن نظیر وسعت فضای کاری، استفاده از این ربات را در کاربردهایی توصیف شده، به عنوان یک گزینه بسیار مناسب معرفی می‌کند. اما با وجود ویژگی‌های ذاتی ربات‌های کابلی که منجر به سادگی جابه‌جایی و نصب آسان آنها می‌شود، به منظور استفاده از این ربات‌ها در شرایط مختلف باید تدابیر خاصی را در نظر گرفت تا شروط سه‌گانه مطرح شده هر چه بهتر برآورده گردد. چنین ربات‌هایی، ربات‌های کابلی با قابلیت باز و نصب سریع (آسان‌نصب) (Deployable Cable Driven Robot) نامیده می‌شوند. طرح ربات‌های کابلی آسان‌نصب برای اولین بار در مرجع<sup>[8]</sup> برای کاربردهای امداد و نجات مطرح شده است. در ادامه تعدادی از کاربردهای ربات‌های کابلی با قابلیت باز و نصب سریع که محققان توانسته‌اند به آنها جامه عمل ببوشانند، معرفی می‌گردد<sup>[9]</sup>.

از جمله کاربردهایی که برای ربات‌های کابلی با قابلیت باز و نصب سریع پیشنهاد شده است، ربات امدادگر است که در حوادث طبیعی مانند زلزله می‌تواند بسیار کارآمد باشد<sup>[6]</sup>. در واقع وسعت فضای

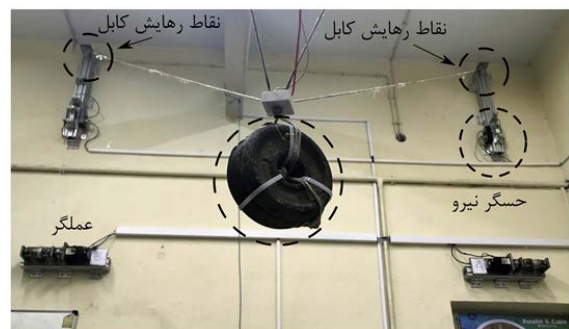
حوزه ربات‌های کابلی آسان‌نصب به تشریح روند کالیبراسیون سریع ربات می‌پردازند و سعی دارند تا روش‌هایی ارائه دهند که با تجهیزات مناسب، فرآیند کالیبراسیون ربات صورت پذیرد<sup>[15]</sup>. در این مقالات سعی شده است با استفاده از روش‌های خودکالیبراسیون (Self-Calibration) و با استفاده از حسگرهای نیرو و موقعیت، ربات را کالیبره کنند. دسته چهارم مقالات مرتبط با ربات‌های کابلی آسان‌نصب، به کنترل این ربات‌ها می‌پردازند<sup>[16]</sup>. طراحی کنترل‌کننده‌ای مقاوم که با وجود نامعینی در پارامترهای طراحی ربات، کارکرد مطلوبی را ارائه نماید. بررسی نویسندگان نشان می‌دهد با وجود اهمیت این حوزه، در مقالات کمتر به این موضوع پرداخت شده است. به عبارت دیگر، در مقالات بیشتر سعی شده است با انجام یک فرآیند کالیبراسیون دقیق، نامعینی‌های سینماتیکی موجود در ربات جبران شود. اما انجام یک کالیبراسیون دقیق نیازمند تجهیزات گران‌قیمت و پیچیده است. از طرف دیگر، فرآیند کالیبراسیون زمان‌بر می‌باشد. بنابراین طراحی کنترل‌کننده‌ای مناسب برای ربات‌های کابلی آسان‌نصب که موضوع اصلی این مقاله است، بسیار لازم و ضروری است.

در بسیاری از مقالات محققان ربات‌های کابلی را ربات‌هایی با رابط‌های صلب فرض کرده‌اند و بنا بر این فرض به ارائه راه‌کارهای کنترلی پرداخته‌اند. به عنوان مثال کنترل‌کننده‌های بر پایه لیاپانوف<sup>[17]</sup> یا کنترل‌کننده‌های تناسبی مشتق‌گیر/انتگرال‌گیر (PD/PID) مقاوم و تطبیقی از جمله این کنترل‌کننده‌ها می‌باشند<sup>[18, 19]</sup>. مهم‌ترین تفاوتی که این مقالات برای ربات‌های کابلی نسبت به سایر ربات‌های با رابط‌های صلب بیان داشته‌اند، عدم توانایی هل‌دادن کابل است<sup>[20]</sup>. در حالتی که تعداد کابل‌ها افزونه است، روش‌های متنوعی برای توزیع نیرو در کابل‌ها اشاره شده است تا کابل‌ها کشیده باقی بمانند<sup>[21]</sup>.

نامعینی در سینماتیک ربات‌ها و کنترل مقاوم ربات با فرض عدم قطعیت ماتریس ژاکوبین در مراجع<sup>[22-24]</sup> برای ربات‌های سری مورد بررسی قرار گرفته است. در این مراجع سعی شده است با توجه به حدود نامعینی‌های ماتریس ژاکوبین، کنترل‌کننده‌ای غیر خطی و مقاوم ارائه گردد. مرجع<sup>[25]</sup> شرایطی را برای قوام کنترل‌کننده تناسبی، مشتق‌گیر، انتگرال‌گیر نسبت به نامعینی‌های سینماتیکی و دینامیکی بیان می‌کند. در این مراجع سعی می‌شود حدود نامعینی‌های ماتریس ژاکوبین به صورت محافظه‌کارانه انتخاب شود تا از کارکرد درست ربات اطمینان حاصل شود که این امر تلاش کنترلی بیشتری را برای عملگرها سبب می‌گردد. بنابراین مرجع<sup>[26]</sup> با ارائه کنترل‌کننده مقاوم تطبیقی سعی می‌کند ابتدا تخمینی از حدود نامعینی‌های ربات ارائه دهد و کنترل‌کننده را با توجه به حدود نامعینی‌های ارائه‌شده، مقاوم سازد. با توجه به آن که در ربات‌های کابلی آسان‌نصب که موضوع این مقاله است، محاسبه ماتریس ژاکوبین و سینماتیک ربات دارای نامعینی است، استفاده از چنین کنترل‌کننده‌هایی که با تخمینی از حدود نامعینی‌های معادلات سینماتیک و دینامیک ربات، کارایی ربات را مقاوم می‌سازند، دارای اهمیت می‌باشد.

در بسیاری مراجع<sup>[25, 26]</sup> کنترل موقعیت ربات کابلی در فضای کاری مورد بررسی قرار می‌گیرد و قانون کنترلی ورودی عملگرها براساس خطای موقعیت مجری نهایی طراحی می‌شود. در این موارد، استفاده از حسگرهای نیرو در حلقه داخلی نیرو می‌تواند در کنترل بهتر ربات موثر واقع شود. یکی از مهم‌ترین مشکلات این طرح، استفاده از سنسورهای موقعیت برای مجری نهایی نظیر ردیاب لیزری یا دوربین و غیره می‌باشد که هم هزینه زیادی به

کاری، قابلیت حمل بار سنگین و نصب سریع این ربات‌ها، ویژگی‌های مناسبی را برای امدادسانی به حادثه‌دیدگان فراهم آورده است. سرعت نصب بالای این ربات می‌تواند در کمک‌رسانی هرچه بهتر به مصدومان حادثه و کاهش تلفات حادثه بسیار موثر باشد. نمونه‌ای دیگر از کاربرد ربات‌های کابلی با قابلیت باز و نصب سریع را می‌توان در فعالیت‌های پایش محیطی به منظور بررسی منابع طبیعی محیط زیست جست‌وجو کرد. اما ربات‌های کابلی با قابلیت باز و نصب سریع در کشاورزی و زمین‌های زراعی نیز کاربرد دارد. استفاده از ربات‌های کابلی تحت عنوان دوربین‌های عنکبوتی به منظور تصویربرداری در استادیوم‌های فوتبال بسیار متداول شده است. در این مقاله، طراحی و ساخت یک ربات کابلی آسان‌نصب به منظور تصویربرداری با نام دوربین عنکبوتی ارس (ARAS-CAM) دنبال می‌شود. شکل ۱ ربات ساخته‌شده در گروه ارس را به تصویر می‌کشد. تفاوت ربات کابلی ساخته‌شده در این طرح با سایر ربات‌های کابلی، قابلیت نصب ساده این ربات در محل می‌باشد که هزینه استفاده از چنین فن‌آوری در حوزه تصویربرداری را به مراتب کاهش می‌دهد. به طوری که پس از استفاده از ربات در محل مورد نظر، بدون آن که هزینه اضافی پرداخت شود، ربات به محل بعدی فیلم‌برداری انتقال می‌یابد. بنابراین به راحتی می‌توان از چنین ربات‌هایی به منظور تصویربرداری از صحنه‌های مختلف سریال‌ها استفاده کرد.



شکل ۱ ربات کابلی معلق و آسان‌نصب با نام دوربین عنکبوتی ارس

همان‌طور که در بخش قبل بیان گردید، عدم قطعیت در بسیاری از پارامترهای طراحی رباتی که در محل‌ها و در شرایط گوناگون استفاده می‌شود، وارد می‌شود. به عبارت دیگر، بسیاری از پارامترهای سینماتیکی و دینامیکی ربات کابلی که دارای قابلیت باز و نصب سریع را دارا می‌باشند، به صورت دقیق مشخص نخواهد بود. همین موضوع چالش‌های زیادی را در برابر طراح قرار می‌دهد و می‌تواند زمینه تحقیقاتی جذابی را برای محققان فراهم آورد. به طور کلی می‌توان مقالات حوزه ربات‌های کابلی آسان‌نصب را به ۴ دسته مختلف تقسیم کرد: بعضی از این مقالات نظیر<sup>[8, 10]</sup> به حوزه طراحی مکانیزم آسان‌نصب می‌پردازند. در این مقالات سازه ربات کابلی طوری طراحی می‌شود که به سادگی جابه‌جا شود. به عنوان مثال، در مرجع<sup>[8]</sup> از چند سازه پایه متحرک نظیر جرتقیل به عنوان نگه‌دارنده موتورها و کابل جمع‌کن‌ها استفاده شده است. همچنین در مقالاتی نظیر<sup>[10]</sup> موتورها و سنسورها در یک جعبه قابل حمل قرار گرفته‌اند تا به راحتی جابه‌جا شوند. بخشی دیگر از مقالات حوزه ربات‌های کابلی آسان‌نصب به تحلیل حساسیت سینماتیکی این ربات‌ها می‌پردازند. با توجه به این که سینماتیک ربات‌های کابلی آسان دارای عدم قطعیت زیادی است، مراجع<sup>[11-14]</sup> به تحلیل حساسیت این ربات‌ها می‌پردازند. برخی دیگر از مقالات

بهره‌گیری کند و از طرف دیگر مشکلات استفاده از آن را به حداقل برساند. در روش پیشنهادی سعی شده است با بهره‌گیری از داده‌های حسگرهای نیرو، علاوه بر ردیابی موقعیت، ردیابی نیرو نیز توسط الگوریتم کنترلی صورت پذیرد تا از شل شدن کابل‌ها در ربات کابلی جلوگیری شود و در نهایت، مجری نهایی حرکت مطلوبی داشته باشد. همان‌طور که پیشتر گفته شد، در الگوریتم‌های کنترلی در فضای کاری، می‌توان با استفاده از ساختار کنترل آبخاری و با بهره‌گیری از حسگرهای نیرو، اثر دینامیک‌های ناشناخته عملگرها را به شدت کاهش داد [25]. اما حضور نویز اندازه‌گیری نیرو باعث می‌شود، استفاده از روش‌های کنترلی با بهره زیاد عملاً امکان‌پذیر نباشد که این موضوع دقت ربات را تحت الشعاع قرار می‌دهد. ساختار الگوریتم کنترلی پیشنهادی در قسمت پیشرو که بر پایه کنترل در فضای کابلی است، این امکان را فراهم می‌آورد که به جای تعامل مستقیم با داده‌های حسگرهای نیرو، از انتگرال این داده‌ها در الگوریتم کنترلی استفاده کنیم. بنابراین تابع انتگرال مانند یک فیلتر پایین‌گذر روی داده‌های نویزی حسگرها عمل کرده و اثرات نویز به شدت کاهش پیدا می‌کند.

در ادامه این مقاله، روابط سینماتیک و دینامیک ربات کابلی آسان‌نصب تبیین می‌گردد. در بخش سوم با فرض صلب بودن کابل‌ها و استفاده از حسگر نیرو، الگوریتم‌های کنترلی ارائه می‌شود که پایداری ربات را تضمین می‌کنند. در ادامه، نتایج پیاده‌سازی این الگوریتم‌های پیشنهادی روی ربات کابلی ارس آورده شده است. در نهایت در بخش پنجم نتایج و جم‌بندی کلی این مقاله ارائه می‌گردد.

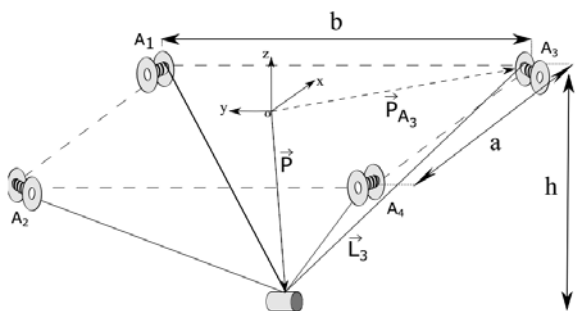
## ۲- استخراج معادلات سینماتیک و دینامیک ربات کابلی

در این بخش معادلات سینماتیک و دینامیک یک ربات کابلی معلق آسان‌نصب مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور، ابتدا معادلات سینماتیک معکوس و ماتریس ژاکوبین استخراج می‌گردند و در ادامه تخمینی از معادلات دینامیک ربات در فضای کابلی ارائه می‌گردد.

### ۲-۱- معادلات سینماتیک ربات

با در نظر گرفتن هر کابل به صورت یک بردار که در فضای سه‌بعدی قرار دارند، می‌توان طول کابل‌ها را با توجه به نقاط اتصال (Attachment Points) ابتدایی (کنج‌های فضای کاری) و نقاط اتصال انتهایی (مکان مجری نهایی) به دست آورد. رابطه حلقه بسته سینماتیکی ربات، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است به صورت زیر خواهد شد.

$$\vec{L}_i = \vec{P} - \vec{P}_{A_i} \quad (1)$$



شکل ۲) تصویر شماتیک از یک ربات کابلی معلق آسان‌نصب

### ۲-۱-۱- حل سینماتیک معکوس

در صورتی که رابطه فوق را به صورت تحلیلی بازنویسی کنیم،

دنبال دارند و هم این که نیازمند کالیبراسیون و نصب دقیق هستند [26]. با توجه به این که یکی از مهم‌ترین اهداف ساخت ربات کابلی آسان‌نصب، کاهش هزینه‌های ساخت و به‌کارگیری ربات و از طرف دیگر نصب سریع و آسان ربات در محل مورد استفاده است، استفاده از چنین حسگرهای گران‌قیمتی در کاربردهایی که دقت‌های حرکتی بسیار بالا مورد نیاز نیست، توجیه اقتصادی ندارد. بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد الگوریتم‌های کنترلی که در فضای کابلی طراحی می‌شوند، نسبت به الگوریتم‌های طراحی‌شده در فضای کاری، کاربرد وسیع‌تری پیدا کنند.

استفاده از الگوریتم‌های کنترلی در فضای مفصلی در ربات‌های سری بسیار متداول است اما در ربات‌های کابلی، به دلایلی کمتر مورد استفاده قرار گرفته است [27]. به خصوص در ربات‌های کاملاً مقید که از کابل‌های افزونه برای افزایش سختی ربات استفاده می‌شود، استفاده از الگوریتم‌های کنترلی پیشنهادی در فضای مفصلی کارایی چندانی ندارند [25]. زیرا در این گونه ربات‌ها سعی می‌شود با استفاده از فضای پوچی ماتریس ژاکوبین، نیروهای کابلی را طوری افزایش داد که بدون تغییر در موقعیت مجری نهایی، سختی ربات افزایش یابد [27]. چنین رویکردی با استفاده از الگوریتم‌های کنترلی پیشنهادی در فضای مفصلی (کابلی) به سادگی امکان‌پذیر نیست و نیازمند تدابیر خاصی است. زیرا به منظور پیاده‌سازی الگوریتم‌ها در فضای کابلی لازم است، ابتدا مسیر حرکت در فضای کاری با استفاده از معادلات سینماتیک وارون به مسیرهای حرکتی در فضای کابلی تبدیل شود و کنترل‌کننده‌های پیشنهادی این مسیرهای جدید را ردیابی نمایند. در این حالت، با فرض ردیابی دقیق موقعیت عملگرها توسط کنترل‌کننده‌های فضای کابلی، مجری نهایی ربات از حرکت مطلوبی برخوردار نخواهد بود و سختی مناسبی نخواهد داشت. زیرا در این روش هیچ نظارتی بر میزان کشش کابل‌ها وجود ندارد و نمی‌توان از مزیت عملگرهای افزونه برای افزایش سختی ربات استفاده کرد. مرجع [28] روشی جدید را به منظور تخمین موقعیت مجری نهایی بدون استفاده از حسگرهای گران‌قیمت موقعیت‌یاب ارائه می‌دهد. در این روش، موقعیت مجری نهایی با تلیق داده‌های انکودر و حسگر نیرو به دست می‌آید. به این منظور، داده‌های انکودر برای تغییرات بزرگ طول کابل و داده‌های حسگر نیرو به منظور تخمین ارتعاشات کابل استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، با در نظر گرفتن تئوری ارتعاشات و با استفاده از حسگرهای نیرو، تغییرات طول کابل که به واسطه کشسانی کابل پدید می‌آیند، تخمین زده می‌شوند. با وجود آن که مرجع [28] روش بسیار مناسبی برای اندازه‌گیری موقعیت مجری نهایی بدون استفاده از تجهیزات گران‌اندازه‌گیری ارائه داده است، اما روشی برای کنترل ربات‌های کابلی مطرح نکرده است.

از طرف دیگر، در صورتی که سینماتیک ربات دارای عدم قطعیت باشد، طراحی مسیر حرکت در فضای کابلی با استفاده از معادلات سینماتیک وارون با مشکل روبه‌رو خواهد بود. زیرا با وجود طراحی دقیق مسیر حرکت مجری نهایی در فضای کاری، نداشتن این حرکت به فضای کابلی و تغییرات طول کابل‌ها به درستی صورت نمی‌پذیرد. بنابراین، با وجود آن که هر عملگر ربات وظیفه خود را به درستی انجام داده است و مسیر طراحی‌شده را به درستی طی کرده است، مجری نهایی حرکت درستی در فضای کاری نخواهد داشت. این موضوع می‌تواند حتی به شل شدن تعدادی از کابل‌های ربات منجر شود.

نوآوری اصلی در این مقاله، پیشنهاد روش کنترلی جدیدی بر پایه کنترل در فضای کابلی است که از مزایای این روش کنترلی

که در آن،  $J^*$  شبه وارون ماتریس ژاکوبین و  $J^t$  شبه وارون ترانزپانده ماتریس ژاکوبین است. در واقع در این حالت می‌توان با استفاده از بردار  $w$  توزیع نیروی عملگرها را تغییر داد. یعنی با وجود آن که موقعیت زاویه‌ای عملگرها تغییر نمی‌کند، گشتاور ورودی عملگرها می‌توانند به صورت متفاوتی توزیع شوند. باید توجه داشت که در این بخش فرض شده است که کابل‌ها خاصیت کشسانی ندارند. در صورتی که این فرض صحیح نباشد، استفاده از توزیع نیرویی متفاوت بدون تغییر در موقعیت زاویه عملگرهای همراه امکان‌پذیر نخواهد بود. در صورتی که دینامیک عملگری را به صورت زیر در نظر بگیریم:

$$I_m \ddot{\theta} + D_m \dot{\theta} + F_s - r\tau = ru \quad (10)$$

دینامیک کلی ربات که شامل دینامیک ساختاری و دینامیک عملگرها است به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$M_{\theta T} \ddot{\theta} + C_{\theta T} \dot{\theta} + G_{\theta T} + rw = ru \quad (11)$$

در عبارت فوق  $w$  بردار پوچی ماتریس ژاکوبین ربات می‌باشد و

$$M_{\theta T} = rM_{\theta} + I_m, C_{\theta T} = rC_{\theta} + D_m, G_{\theta T} = rG_{\theta} + F_s \quad (12)$$

که در آن شعاع درام و  $I_m$  ماتریس اینرسی عملگرها و  $D_m$  ماتریس ناشی از شتاب‌های کریولیس و  $F_s$  بیانگر بردار اصطکاک است.

### ۳- کنترل ربات در فضای کابلی

این بخش به معرفی قانون کنترلی پیشنهادی برای ربات کابلی آسان‌نصب و بررسی پایداری آن اختصاص دارد. به این منظور در بخش نخست، سطوح لغزش طراحی شده معرفی می‌گردد و در ادامه با استفاده از روش نخست لیاپانوف، تحلیل بر پایداری قانون کنترلی پیشنهادی شده، ارائه می‌گردد.

#### ۳-۱- تعریف سطوح لغزش

همان‌طور که پیشتر گفته شد، در این مقاله به منظور کنترل ربات در فضای کابلی، علاوه بر اطلاعات انکودرها که شامل موقعیت عملگرها و طول کابل‌ها است، از حسگرهای کابلی استفاده می‌شود تا از شل‌نشدن کابل‌ها اطمینان حاصل شود. به این منظور سطح لغزشی در این بخش تعریف می‌گردد که بر مبنای موقعیت عملگرها و نیروی کابل‌ها محاسبه می‌شود.

$$s_r = \dot{\theta} - \dot{\theta}_r \quad (13)$$

که در آن  $\theta_r$  به عنوان مرجع نامی برای کنترل حرکت ربات تعریف می‌شود و به صورت زیر طراحی می‌گردد:

$$\dot{\theta}_r = \dot{\theta}_d - \Lambda \bar{\theta} - \gamma \sigma \quad (14)$$

که در آن  $\dot{\theta}_d$  سرعت مطلوب مفصلی و خطای موقعیت مفصلی به صورت  $\bar{\theta} = \theta - \theta_d, \gamma \in R^{m \times m}$  تعریف می‌گردد. همچنین  $\Lambda = \text{diag}(\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_m)$  ماتریس‌های مثبت معین می‌باشند و  $m$  بیان‌کننده تعداد کابل‌ها و عملگرهای ربات است. همچنین در معادله ۱۴ عبارت  $\sigma$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{\sigma} = \tau_1 - \tau \quad (15)$$

در معادله ۱۵ عبارت  $\tau$  معرف نیروهای اندازه‌گیری شده کابلی و  $\tau_1$  نیروهای طراحی شده برای واحد انتگرال‌گیر می‌باشد که به صورت زیر معرفی می‌گردد:

$$-\tau_1 = \bar{M}_{\theta} \ddot{\theta}_1 + \bar{C}_{\theta} \dot{\theta}_1 + \bar{G}_{\theta} - K_I \text{sgn}(s_{\theta}) + \bar{w} \quad (16)$$

در عبارت فوق،  $\bar{M}_{\theta}, \bar{C}_{\theta}$  و  $\bar{G}_{\theta}$  به ترتیب تخمین ماتریس  $M_{\theta}, C_{\theta}$  و  $G_{\theta}$  می‌باشد. همچنین تابع  $\text{sgn}(\cdot)$  بیانگر تابع ناپیوسته علامت

خواهیم داشت:

$$(l_i)^2 = (P - P_{A_i})^2 (P - P_{A_i}) \quad (2)$$

که در رابطه فوق  $l_i$  طول کابل  $A_i$ ، می‌باشد. به عبارت ساده‌تر خواهیم داشت:

$$l_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (3)$$

که در آن  $x, y, z$  نشان‌دهنده مختصات مجری نهایی و  $x_i, y_i, z_i$  بیان‌کننده مختصات نقطه اتصال کابل  $A_i$  می‌باشد.

#### ۲-۱-۲- استخراج ژاکوبین ربات

با مشتق‌گیری از این تابع، رابطه بین سرعت‌های مفصلی و سرعت مجری نهایی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$J_x \dot{x} = J_l \dot{l}, \quad J_x = \frac{\partial f}{\partial x}, \quad J_l = \frac{\partial f}{\partial l} \quad (4)$$

سپس ماتریس ژاکوبین ربات‌های کابلی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{l} = J \dot{x}, \quad J = J_l^{-1} J_x \quad (5)$$

که در رابطه فوق، بردار  $\dot{l}$  تغییرات طول کابل‌ها را بر واحد زمان مشخص می‌کند و بردار  $\dot{x}$  معرف سرعت مجری نهایی در فضای کاری ربات است. برای تحلیل ژاکوبین ربات، با توجه به رابطه حلقه بسته سینماتیکی در معادله ۲ و مشتق‌گیری از آن، رابطه سرعت‌ها در فضای مفصلی و کارترین به دست می‌آید.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{x - x_1}{l_1} & \frac{y - y_1}{l_1} & \frac{z - z_1}{l_1} \\ \frac{x - x_2}{l_2} & \frac{y - y_2}{l_2} & \frac{z - z_2}{l_2} \\ \frac{x - x_3}{l_3} & \frac{y - y_3}{l_3} & \frac{z - z_3}{l_3} \\ \frac{x - x_4}{l_4} & \frac{y - y_4}{l_4} & \frac{z - z_4}{l_4} \end{bmatrix} \quad (6)$$

#### ۲-۲- معادلات دینامیکی ربات

بدون در نظر گرفتن دینامیک کابل‌ها و عملگرها، می‌توان مدل ربات کابلی را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$M(x) \ddot{x} + C(x, \dot{x}) \dot{x} + G = F = -J^T \tau \quad (7)$$

که در آن  $M(x), C(x, \dot{x}), G$  به ترتیب بیانگر ماتریس جرمی، ماتریس کریولیس و بردار گرانش است. همچنین  $F$  به ترتیب نشان‌دهنده مختصات تعمیم‌یافته مجری نهایی و بردار نیروی اعمالی به آن است. در نهایت،  $J$  ماتریس ژاکوبین ربات و  $\tau$  بردار نیروهای کابلی می‌باشد. معادله دینامیک فوق به نام معادله دینامیک ساختاری ربات نامیده می‌شود، زیرا این معادله تنها از ساختار و سینماتیک ربات منشأ می‌گیرد و ارتباطی با عملگرها و سامانه انتقال نیرو ندارد. می‌توان مدل ریاضی معادله ۷ که در فضای کاری بیان شده است را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$M_{\theta} \ddot{\theta} + C_{\theta} \dot{\theta} + G_{\theta} + w = -\tau \quad (8)$$

که در آن  $M_{\theta}, C_{\theta}, G_{\theta}$  به ترتیب بیانگر ماتریس جرمی، ماتریس کریولیس و بردار گرانش در فضای مفصلی (کابلی) است. همچنین  $\theta$  و  $w$  به ترتیب نشان‌دهنده بردار موقعیت زاویه‌ای عملگرها و فضای پوچی ماتریس  $J^T$  می‌باشد. با در نظر گرفتن رابطه  $J \dot{x} = \dot{l}$  می‌توان ارتباط معادلات (۷) و (۸) را استخراج کرد. اما با توجه به افزون بودن عملگرها در ربات کابلی، همان‌طور که پیشتر گفته شد ماتریس ژاکوبین ربات به صورت مربعی نخواهد بود، بنابراین می‌توان تقریبی از عناصر معادله دینامیکی (۸) به صورت زیر ارائه داد:

$$\bar{M}_{\theta} = r J^t M J^*, \quad \bar{C}_{\theta} = r J^t (C - M J^* j), \quad \bar{G}_{\theta} = J^t G \quad (9)$$

می باشد و  $\hat{W}$  نشان دهنده تخمین بردار  $w$  است. به علاوه،  $K_I$  یک ماتریس قطری با عناصر مثبت می باشد. همچنین  $\hat{\theta}_I$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$\hat{\theta}_I = \hat{\theta}_d - \Lambda \hat{\theta} \quad (17)$$

در صورتی که سطح لغزشی دیگر به صورت زیر در نظر بگیریم:

$$s_\theta = \hat{\theta} + \Lambda \hat{\theta} \quad (18)$$

با استفاده از تعریف  $s_r$  می توان رابطه ۱۵ را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\dot{\sigma} = M\dot{s} + cs + K_I \text{sgn}(s) + \rho_\theta \quad (19)$$

که در آن  $\rho_\theta$  از نامعینی های سیستم استخراج می گردد و می توان آن را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\rho_\theta = -\tilde{w} - \tilde{M}_\theta \hat{\theta}_I - \tilde{C}_\theta \hat{\theta}_I - \tilde{G}_\theta \quad (20)$$

در عبارت فوق،  $\tilde{M}_\theta = \hat{M}_\theta - M_\theta$ ،  $\tilde{C}_\theta = \hat{C}_\theta - C_\theta$  و  $\tilde{G}_\theta = \hat{G}_\theta - G_\theta$  می باشد.

برخی از مهمترین ویژگی های معادلات دینامیک استخراج شده به شرح زیر است:

۱- ماتریس  $M_\theta$  به صورت متقارن و مثبت معین است و برای همه  $\theta$  به صورت کران دار می باشد [20].

$$\lambda_m < \|M_\theta\| < \lambda_M \quad (21)$$

که در آن  $\lambda_m$  و  $\lambda_M$  به ترتیب نشان دهنده مقادیر ویژه کمینه و بیشینه ماتریس  $M_\theta$  هستند.

۲- ماتریس  $C_\theta$  و مشتق ماتریس جرمی رابطه زیر را ارضا می کنند:

$$\hat{\theta}^T \left[ \frac{1}{2} \dot{M}_\theta - C_\theta \right] \hat{\theta} = 0 \quad (22)$$

که نشان می دهد با انتخاب مناسب ماتریس  $C_\theta$ ، رابطه  $\frac{1}{2} \dot{M}_\theta - C_\theta$  به صورت پادمتقارن می باشد.

۳- کران بالای ماتریس کریولیس به صورت تابعی از  $\hat{\theta}$  است:

$$\|C_\theta\| < \zeta_c \|s_r\| \quad (23)$$

۴- کران بالای ماتریس گرانش وجود دارد:

$$\|G_\theta\| < \zeta_g \quad (24)$$

### ۳-۲- قانون کنترل پیشنهادی

با توجه به مدل دینامیکی استخراج شده برای ربات، ورودی کنترلی عملگرها در این قسمت به صورت زیر پیشنهاد می شود:

$$u = \hat{M}_{\theta T} \hat{\theta}_r + \hat{C}_{\theta T} \hat{\theta}_r + \hat{G}_{\theta T} - K_r s_r + \hat{w} \quad (25)$$

که در آن،  $\hat{M}_{\theta T}$ ،  $\hat{C}_{\theta T}$  و  $\hat{G}_{\theta T}$  به ترتیب تخمین ماتریس  $M_{\theta T}$ ،  $C_{\theta T}$  و  $G_{\theta T}$  می باشد. همچنین،  $K_r$  یک ماتریس با عناصر مثبت به صورت  $K_r = k_r I_{m \times m}$  است و  $m$  تعداد عملگرهای ربات را نشان می دهد.

### ۳-۳- بررسی پایداری

به منظور بررسی پایداری قانون کنترلی پیشنهادی، تابع نامزد لیاپانوف زیر را در نظر بگیرید:

$$V_r(t) = \frac{1}{2} s_r^T M_\theta s_r \quad (26)$$

با مشتق گیری از تابع  $V(t)$  نسبت به زمان خواهیم داشت:

$$\dot{V}_r(t) = \frac{1}{2} s_r^T \dot{M}_\theta s_r + s_r^T C_\theta s_r \quad (27)$$

حال برای آن که عبارت فوق را ساده کنیم، نیاز است معادل عبارت  $M_\theta \dot{s}_r$  را به دست آوریم:

$$M_\theta \dot{s}_r = -C_\theta s_r - (M_{\theta T} \hat{\theta}_r + C_{\theta T} \hat{\theta}_r + \hat{G}_{\theta T}) + u - w \quad (28)$$

با جای گذاری قانون کنترلی پیشنهادی در رابطه فوق خواهیم

داشت:

$$M_\theta \dot{s}_r = -K_r s_r - C_\theta s_r + ((\hat{M}_{\theta T} - M_{\theta T}) \hat{\theta}_r + (\hat{C}_{\theta T} - C_{\theta T}) \hat{\theta}_r + (\hat{G}_{\theta T} - G_{\theta T}) + \hat{w}) \quad (29)$$

با جای گذاری عبارت ۲۹ در عبارت مشتق تابع لیاپانوف خواهیم داشت:

$$\dot{V}_r(t) = s_r^T (-K_r s_r + \rho_r) \quad (30)$$

که در آن  $\rho_r$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$\rho_r = \tilde{M}_{\theta T} \hat{\theta}_r - \tilde{C}_{\theta T} \hat{\theta}_r - \tilde{G}_{\theta T} + \hat{w} \quad (31)$$

حال در صورتی که پارامتر  $K_r$  به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود، می تواند برای نامعینی های  $\rho_r$  غلبه کند و پایداری  $s_r$  را تضمین نماید. در صورتی که فرض  $|\rho_r| < a_0 + a_1 |s_r|$  که در آن  $a_0$ ،  $a_1$  به ترتیب برداری با عناصر مثبت و ماتریسی قطری با عناصر مثبت هستند، خواهیم داشت:

$$\dot{V}_r(t) < s_r^T (-K_r s_r + a_0 + a_1 |s_r|) \quad (32)$$

با ساده سازی عبارت فوق، خواهیم داشت:

$$\dot{V}_r(t) < (a_1 - K_r) \|s_r\|^2 + a_0 \|s_r\| \quad (33)$$

عبارت فوق نشان می دهد در صورتی که پارامتر  $K_r$  به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود، می تواند برای نامعینی های  $\rho_r$  غلبه کند و پایداری  $s_r$  را تضمین نماید و در این حالت، پایداری UUB برای سطح لغزش  $s_r$  فراهم می شود. بنابراین می توان فرض کرد که  $s_r < \bar{s}_r$  در هر لحظه می باشد و به عبارت دیگر کران بالای  $s_r$  به صورت  $\bar{s}_r$  است.

در ادامه می خواهیم کران بالای  $\dot{s}_r$  را به دست آوریم. با توجه به رابطه ۲۹ خواهیم داشت:

$$\dot{s}_r = M_\theta^{-1} (-K_r s_r - C_\theta s_r + \rho) \quad (34)$$

با در نظر گرفتن کران بالای  $\rho$  خواهیم داشت:

$$\dot{s}_r = M_\theta^{-1} (-K_r s_r - C_\theta s_r + a_0 + a_1 s_r) \quad (35)$$

با در نظر گرفتن رابطه ۳۵ می توان حد بالایی برای  $\dot{s}_r$  به صورت زیر استخراج کرد:

$$|\dot{s}_r| < \lambda_{\max}(M_\theta^{-1}) [-\zeta_c \bar{s}_r + a_0 + a_1 \bar{s}_r] \quad (36)$$

با توجه به رابطه فوق می توان کرانی برای  $\dot{s}_r$  استخراج کرد. از این فرض در ادامه به منظور اثبات پایداری متغیر لغزشی  $s_\theta$  استفاده خواهد شد. حال می خواهیم تابع لیاپانوفی برای  $s_\theta$  تشکیل دهیم و از طریق آن همگرایی  $s_\theta$  را بررسی کنیم:

$$V_\theta(t) = \frac{1}{2} s_\theta^T (I + \gamma M_\theta) s_\theta \quad (37)$$

در صورتی که از تابع لیاپانوف فوق مشتق بگیریم، خواهیم داشت:

$$\dot{V}_\theta(t) = s_\theta^T (I + \gamma M_\theta) \dot{s}_\theta + s_\theta^T \dot{M}_\theta s_\theta \quad (38)$$

با در نظر گرفتن رابطه ۲۳ می توان عبارت فوق را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\dot{V}_\theta(t) = s_\theta^T (I + \gamma M_\theta) \dot{s}_\theta + s_\theta^T (\gamma C_\theta) s_\theta \quad (39)$$

به منظور ساده سازی عبارت فوق، لازم است معادل  $(I + \gamma M_\theta) \dot{s}_\theta$  استخراج شود. با توجه به آن که:

$$\dot{s}_\theta = \dot{s}_r - \gamma \dot{\sigma} = \dot{s}_r - \gamma (M\dot{s} + cs + K_I \text{sgn}(s) + \rho_\theta) \quad (40)$$

می توان نوشت:

$$(I + \gamma M_\theta) \dot{s}_\theta = \dot{s}_r - \gamma C s_\theta - K_I \text{sgn}(s_\theta) + \rho_\theta \quad (41)$$

با جای گذاری عبارت فوق در ۳۹ خواهیم داشت:

$$\dot{V}_\theta(t) = s_\theta^T (\dot{s}_r - \gamma C s_\theta - K_I \text{sgn}(s_\theta) + \rho_\theta) + s_\theta^T \gamma C s_\theta = s_\theta^T (\dot{s}_r - K_I \text{sgn}(s_\theta) + \rho_\theta) \quad (42)$$

با توجه به کران بالایی که برای  $\dot{s}_r$  در قسمت قبل به دست آمد،

طول کابل‌ها، لازم است طول اولیه کابل‌ها در فرآیند کالیبراسیون اندازه‌گیری شود.

جدول ۱) معرفی تجهیزات مورد استفاده در دوربین عکبوتی ارس.

ویژگی‌ها	تجهیزات مورد استفاده
انکودر افزایشی ۲۵۰۰ پالس سروتنک (Servo Tech)	انکودر
رزولوشن ۴۸۰ × ۶۴۰ با ۱۰۰ فریم در ثانیه	دوربین
لودسل ۵۰ کیلو	حسگر نیرو
سرو برق متناوب (ac) با توان ۷۵۰ وات و ۳۰۰۰ دور در دقیقه سروتنک	عملگر
کارت‌های ادونتک مدل ۱۷۲۴ و ۱۷۸۴ و ۱۷۱۰	کارت‌های ورودی و خروجی



شکل ۳) سامانه کابل جمع‌کن و عملگر

#### ۴-۱-۲- حسگرهای نیرو

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، به منظور اندازه‌گیری نیروی کابل، ساختاری با سه پولی و یک لودسل در نظر گرفته شده است. نمونه متداول حسگرهای به‌کاررفته در ربات‌های کابلی [25]، شامل المانی است که در نزدیکی مجری نهایی به کابل‌ها متصل است. مهم‌ترین مشکل این نوع از حسگرهای نیرو، وزن آنها است که منجر به پدیده شکم‌دهی در طول کابل می‌شود. از طرف دیگر، اتصال الکتریکی حسگر در جای ثابتی قرار ندارند و همراه با مجری نهایی جابه‌جا می‌شوند که این امر می‌تواند مشکلات بیشتری ایجاد کند. با توجه به مشکلات اشاره‌شده، در این مقاله سامانه حسگری دیگری پیشنهاد شده است که طراحی منحصر به فرد آن، طوری صورت پذیرفته است که حسگر در جای ثابتی نصب می‌شود و وزن آن بر کابل اعمال نمی‌شود. بنابراین اتصال الکتریکی حسگر به سادگی در ربات نصب می‌شوند و از طرف دیگر، از پدیده شکم‌دهی کابل به واسطه وزن حسگر نیرو اتفاق می‌افتاد، جلوگیری می‌شود.

#### ۴-۱-۲- حسگرهای دوربین

سومین حسگر مورد استفاده در ربات کابلی ارس، حسگر بینایی است که از یک دوربین استریو با رزولوشن ۴۸۰ × ۶۴۰ و با نرخ داده برداری ۱۰۰ هرتز تشکیل شده است. شکل ۵ حسگر طراحی شده برای ربات کابلی ارس را نشان می‌دهد. اساس کار این حسگر بینایی، بدین صورت است که با استفاده از یک لامپ دیود نورانی (LED) که روی مجری نهایی ربات نصب شده است و فیلتر نور مرئی که بر دوربین استریو قرار دارد، موقعیت مجری نهایی در فضای سه‌بعدی توسط نرم‌افزار تشخیص داده می‌شود. به همین

می‌توان با بزرگ در نظر گرفتن  $K_f$ ، منفی بودن مشتق تابع لیاپانوف پیشنهادی را استخراج کرد.

همان‌طور که پیشتر گفته شد، به علت حضور نامعینی‌های سینماتیکی، استفاده از قانون کنترلی در فضای کابلی و بدون استفاده از حسگرهای نیرو نمی‌تواند کارایی مناسبی داشته باشد و نمی‌تواند کشش مناسب کابل‌ها را تضمین نماید. بنابراین در این قسمت سعی شد از داده‌های حسگر نیرو و انتگرال خطای ردیابی نیرو استفاده شود تا این امکان فراهم آید که ضمن حرکت ربات، کابل‌ها از کشش مناسبی برخوردار باشند. اما ردیابی نیرو، هزینه‌ای در بر خواهد داشت که آن، عدم ردیابی دقیق موقعیت مطلوب کابلی است. به عبارت دیگر، با توجه به آن که روابط سینماتیکی ربات، دقیق نیست و از طرف دیگر ربات دارای عملگرهای افزونه است، در صورتی که تنها ردیابی موقعیت مطلوب در فضای کابلی صورت پذیرد، ممکن است کابل‌ها، کشش مناسبی نداشته باشد و در مقابل، در صورتی که ردیابی نیرو در اولویت قرار گیرد، ردیابی موقعیت از دست می‌رود. بنابراین لازم است با انتخاب صحیح بهره‌های کنترلی، مصالحه‌ای بین ردیابی موقعیت و ردیابی نیروی کابل صورت پذیرد.

#### ۴- نتایج آزمایشگاهی

در این بخش نتایج آزمایشگاهی به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌گردد. به این منظور، ابتدا ربات کابلی ارس به عنوان دستگای که قرار است الگوریتم‌های پیشنهادی روی آن اعمال گردد، به تفصیل معرفی می‌گردد و اجزای آن شرح داده می‌شود. سپس نتایج آزمایشگاهی الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با نتایج حاصل از سایر روش‌های کنترلی متداول روی ربات ارس نشان داده می‌شود و کارایی الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

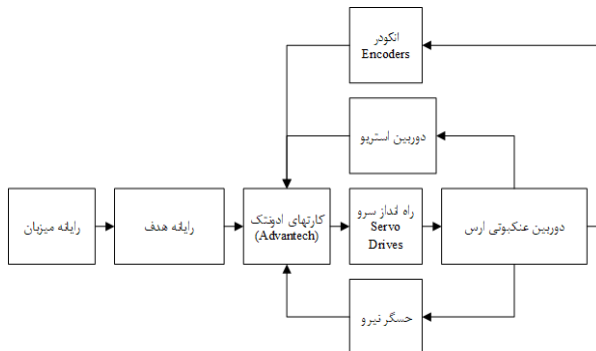
#### ۴-۱-۲- ربات کابلی ارس

ربات کابلی ارس دارای ۳ درجه آزادی با ۴ عملگر است که به وسیله آنها، فضای کاری با ابعاد  $4m^3 \times 8 \times 6$  را پوشش می‌دهد. بنابر آنچه گفته شد، این ربات دارای یک درجه افزونگی در عملگرها است که به واسطه آن، می‌تواند توزیع نیرویی بهتری بین کابل‌های ربات ایجاد کند. همچنین فرآیند نصب و کالیبراسیون ربات بدون استفاده از تجهیزات پیچیده و در عین حال، گران قیمت اندازه‌گیری صورت می‌پذیرد. این امر سبب حضور عدم قطعیت در پارامترهای هندسی ربات می‌شود، به طوری که در این ربات فرض شده است که حدود ۵ درصد خطا در اندازه‌گیری پارامترهای سینماتیکی وجود دارد. در کنار عدم قطعیت‌های سینماتیکی ربات، فرض شده است که جرم مجری نهایی به صورت  $4.5 \pm 0.5 \text{ Kg}$  است. همچنین ربات مجهز به سه نوع حسگر اندازه‌گیری است که موقعیت مجری نهایی و نیروی کابل‌ها را استخراج می‌کند. این تجهیزات اندازه‌گیری که شامل حسگرهای نیرو، انکودر عملگرها و دوربین استریو است به تفصیل در ادامه توضیح داده می‌شود. در جدول ۱ برخی از مشخصات تجهیزات مورد استفاده گردآوری شده است.

#### ۴-۱-۱- سامانه اندازه‌گیری طول کابل

برای جمع‌کردن کابل‌ها توسط موتور، سامانه کابل جمع‌کن به نحوی طراحی شده که هنگام چرخش موتور، درام در راستای محورش به اندازه ضخامت کابل جابه‌جا می‌گردد. شکل ۳ این مکانیزم ابداعی را نشان می‌دهد. با به‌کارگیری این روش، می‌توان از جمع‌شدن کابل‌ها روی هم جلوگیری کرد و به تبع آن، تغییرات طول کابل را با دقت مناسب اندازه‌گیری کرد. با توجه به آن که انکودرهای مورد استفاده در این ربات از نوع افزایشی هستند، به منظور اندازه‌گیری

مربوط به درگاه‌های ورودی و خروجی استفاده شده است.



شکل ۶) سامانه کنترلی زمان حقیقی

#### ۲-۴- نتایج عملی

در این بخش، کارایی ربات در ردیابی یک مسیر دایروی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. باید به این موضوع توجه داشت که ضرایب کنترلی در این تست‌های عملی به نحوی تعیین شده است که پایداری ربات را تضمین نماید. نکته حائز اهمیت دیگر این است که حسگرهای دوربین در حلقه کنترلی قرار ندارد و صرفاً به منظور ارزیابی حرکت ربات از این ادوات استفاده شده است. به عبارت دیگر، موقعیت مجری نهایی در این روش، تنها با استفاده از حسگر نیرو و انکودر کنترل می‌شود.

نمودار ۱ مسیر مطلوب حرکت ربات در کنار مسیری که ربات با استفاده از الگوریتم پیشنهادی طی کرده است را نشان می‌دهد. نمودار ۱ نشان می‌دهد که مسیر طراحی شده، حرکت روی دایره‌ای به شعاع ۲۰ سانتی‌متر در صفحه X-Y است. این مسیر دایروی که ۴ بار توسط ربات طی می‌شود، به دور از مناطق تکین و حاشیه‌های فضای کاری ربات انتخاب شده است. همچنین، نمودار ۲ خطای ردیابی این مسیر مطلوب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودارهای ۱ و ۲ نشان داده شده است ربات مسیر طراحی شده را به خوبی دنبال کرده است و خطای ردیابی در همه درجات آزادی، کمتر از ۲ سانتی‌متر است. با توجه به آن که مسیر طراحی شده توسط روابط سینماتیک معکوس به مسیر مطلوب در حوزه مفاصل تبدیل می‌شود، نمودار ۳ ردیابی این مسیر تبدیل شده را که همان تغییرات طول کابل باشد، نشان می‌دهد. در این شکل، طول کابل مطلوب ربات در کنار طول کابل واقعی ربات نشان داده شده است. با توجه به ماهیت الگوریتم ارائه شده که در آن تلفیقی از ردیابی نیرو و موقعیت وجود دارد، انتظار می‌رود ردیابی در حوزه مفاصل با مقدار خطا روبه‌رو باشد. در واقع در الگوریتم ارائه شده سعی شده است به نحوی ردیابی طول کابل‌ها صورت پذیرد که هم‌زمان نیروی کششی کابل‌ها نیز تضمین شده باشد. نمودار ۴ وضعیت نیروی کابل‌ها را در طی حرکت ربات در یک مسیر دایروی نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار ۴ مشخص است، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، نیروی تمامی کابل‌ها در طی مسیر مثبت بوده و کابل‌ها حالت کششی خود را حفظ کرده‌اند. همچنین نمودار ۴ نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های کنترلی مفصلی متداول که در آنها از حسگرهای نیرو استفاده نمی‌شود، می‌تواند منجر به عدم ردیابی نیرو و در نتیجه، شل شدن کابل‌ها شود. این موضوع در نمودار ۴ به وضوح مشخص است که هنگام ردیابی مسیر مطلوب در بعضی از زمان‌ها، کابل دوم نیروی صفر را تجربه می‌کند و به عبارت دیگر شل می‌شود.

منظور، در نرم‌افزار ایجاد شده، یک حد آستانه برای نور مادون قرمز در نظر گرفته می‌شود و براساس آن نور دیود نوری مورد نظر از نور محیط تفکیک داده می‌شود. سپس با در نظر گرفتن پیکسل‌های روشن در دوربین‌ها و با استفاده از روش‌های پردازش تصویر مربوط به دوربین‌های استریو، موقعیت مجری نهایی به دست می‌آید. استفاده از لامپ مادون قرمز و فیلتر نور مرئی برای دوربین‌ها باعث می‌شود، حجم محاسبات پردازش تصویر به منظور استخراج مجری نهایی به شدت کاهش پیدا کند، به طوری که می‌توان با ادوات پردازشی نسبتاً ضعیفی مانند مینی کامپیوترها نیز عملیات محاسباتی را انجام داد.



شکل ۴) سامانه طراحی شده به منظور اندازه‌گیری نیروی کابل در یک موقعیت ثابت



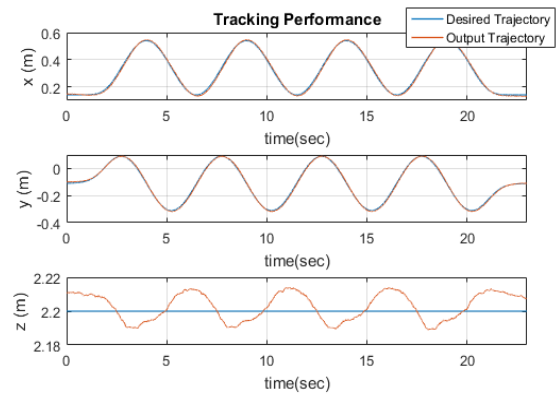
شکل ۵) سامانه حسگر موقعیت با استفاده از دوربین استریو

#### ۲-۱-۴- سامانه کنترلی زمان حقیقی

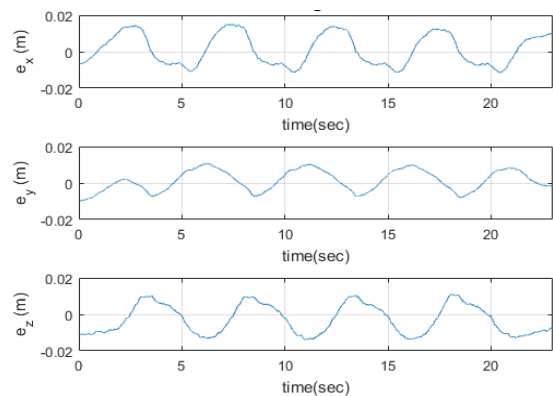
نمایش بلوکی سامانه کنترلی مورد استفاده در ربات کابلی ارس در شکل ۶ آورده شده است. کامپیوتر میزبان در این ساختار به عنوان یک واسط کاربری فعالیت می‌کند و کاربر را قادر می‌سازد تا الگوریتم و پارامترهای کنترلی را تغییر دهد. همچنین، کامپیوتر هدف یک واحد پردازش زمان حقیقی است که روی آن سامانه سیمولینک (Simulink) اجرا می‌گردد. به منظور ارتباط واحد پردازش با حسگرها و عملگرها، از تعدادی کارت‌های الکترونیکی



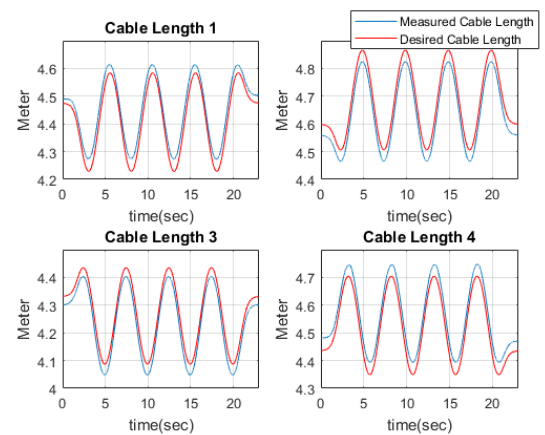
در نهایت، نمودار ۵ ردیابی مسیر دایروی را در صفحه X-Y نشان می‌دهد. همان‌طور که پیشتر گفته شد، این نتایج از دید حسگر دوربین نشان داده شده است. به منظور فهم بهتر قانون کنترلی ارائه‌شده، مسیر طی‌شده توسط ربات با استفاده از داده‌های حسگر انکودر و با استفاده از روابط سینماتیک مستقیم نیز محاسبه شده است و در نمودار ۵ نشان داده شده است. تفاوت مسیر طی‌شده از دید دوربین با آنچه که روابط سینماتیک مستقیم استخراج می‌کند را می‌توان در عدم قطعیت موجود در معادلات سینماتیکی دانست. همچنین نمودار ۵ نشان می‌دهد، در صورتی که از الگوریتم‌های کنترلی فضای مفصلی متداول به منظور کنترل ربات‌های کابلی استفاده شود، به دلیل رخداد پدیده شل‌شدن کابل‌ها، ربات مسیر مطلوب را به درستی ردیابی نمی‌کند. این موضوع ضرورت استفاده از الگوریتم پیشنهادی و به‌کارگیری حسگرهای نیرو به منظور کنترل ربات در فضای مفصلی را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر با توجه به تاثیر به‌سزای عدم قطعیت‌های سینماتیکی در تعیین موقعیت مجری نهایی، استفاده از حسگرهای نیرو به منظور اطمینان از کششی‌بودن کابل‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است. به منظور انجام یک مقایسه کمی و بررسی کارایی الگوریتم ارائه‌شده، نرم خطای ردیابی حاصل از روش‌های مختلف در جدول ۲، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که نرم خطای به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی به مراتب از نرم خطای روش‌هایی که در آنها از حسگر نیرو استفاده نمی‌شود، کمتر است. از طرف دیگر، باید توجه داشت که در این مقاله، حسگر دوربین در حلقه کنترلی قرار نگرفته است و از معادلات سینماتیک مستقیم به عنوان بازخورد موقعیت مجری نهایی ربات استفاده شده است. این موضوع سبب می‌شود، با وجود آن که ربات سعی می‌کند خطای ردیابی ناشی از معادلات سینماتیک مستقیم را کاهش دهد، از دید ناظر بیرونی (در اینجا یعنی دوربین استریو)، ربات ردیابی مناسبی ندارد. زیرا به واسطه حضور نامعینی‌های سینماتیکی ربات، معادلات سینماتیک مستقیم، موقعیت دقیق ربات را گزارش نمی‌دهند.



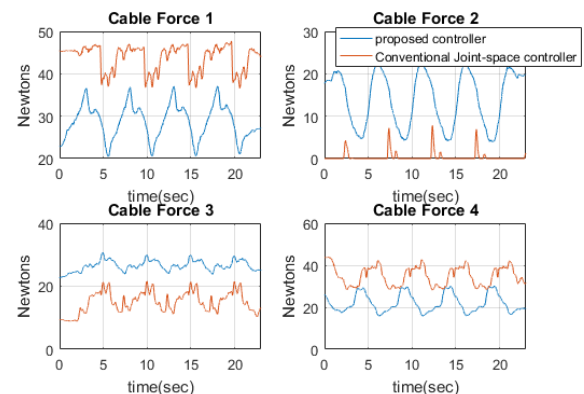
نمودار (۱) کارایی ربات در ردیابی مسیر مطلوب.



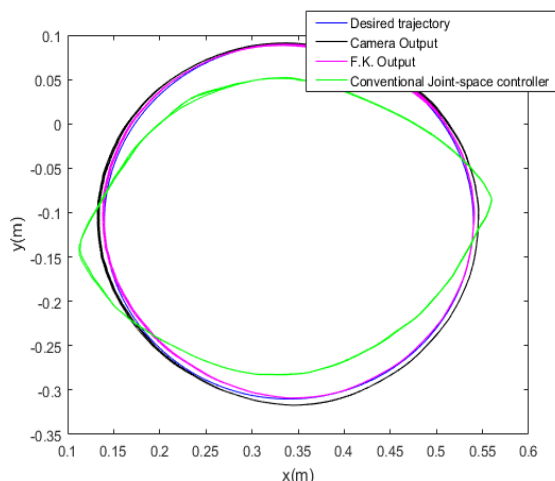
نمودار (۲) خطای ردیابی مسیر مطلوب



نمودار (۳) مقایسه تغییرات طول کابل مطلوب با تغییرات طول کابل اندازه‌گیری شده



نمودار (۴) مقایسه نیروهای اندازه‌گیری شده برای کابل‌ها در دو تست مختلف



نمودار (۵) مقایسه ردیابی مسیر دایروی در صفحه X-Y

جدول ۲) مقایسه خطای ردیابی حاصل از روش‌های مختلف

روش پیشنهادی	نرم خطا از دید دوربین	نرم خطای محاسبه‌شده با سینماتیک مستقیم
روش متداول	۴۷/۴۹	۳۱/۵۴
روش پیشنهادی	۱۵/۵۸	۷/۸۷

**۵- نتیجه‌گیری**

در این مقاله، روش جدید کنترلی به منظور کنترل ربات‌های کابلی در فضای مفصلی ارائه گردید. ایده اصلی این مقاله تعریف سطوح لغزش جدیدی است که بر مبنای خطای موقعیت مجری نهایی و خطای ردیابی نیرو تعریف گردیده است. کنترل مقاوم ربات کابلی بر مبنای چنین سطوح لغزشی، این امکان را فراهم می‌آورد که بدون استفاده از تجهیزات گران، اندازه‌گیری موقعیت و کنترل ربات‌های کابلی آسان‌تر صورت پذیرد. به منظور ارزیابی روش کنترلی ارائه شده، از یک ربات کابلی آسان‌تر نصب که در گروه رباتیک ارس ساخته شده است، استفاده شد و نتایج عملی استفاده از چنین الگوریتمی ارائه گردید. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد با وجود عدم قطعیت‌های سینماتیکی موجود در ربات کابلی آسان‌تر نصب و همچنین عدم استفاده از حسگرهای گران‌قیمت در کنترل ربات، ردیابی مسیر دایروی مورد نظر به نحو مطلوبی صورت پذیرفته است.

**تشکر و قدردانی:** در اینجا لازم است از صندوق حمایت از پژوهشگران و فن‌آوران کشور به واسطه حمایت مالی تشکر شود.

**تأییدیه اخلاقی:** موردی از طرف نویسندگان بیان نشده است.

**تعارض منافع:** موردی از طرف نویسندگان بیان نشده است.

**سهم نویسندگان:** سیداحمد خلیلپورسیدی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۷۵٪)؛ روح‌الله خرم‌بخت (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (۱۵٪)؛ علیرضا بوربور (نویسنده سوم)، تحلیلگر آماری (۵٪)؛ حمیدرضا تقی‌راد (نویسنده چهارم)، روش‌شناس (۵٪)

**منابع مالی:** این پژوهش توسط صندوق حمایت از پژوهشگران و فن‌آوران کشور که تحت عنوان قرارداد ۹۶۰۰۱۸۰۳ صورت پذیرفته است، حمایت مالی شده است.

**منابع**

- 1- Taghirad H, Khalilpour A, Aliyari M, Tale Masouleh M. Applying evolutionary algorithms in multi objective optimization of planar cable-driven parallel robots. *Modares Mechanical Engineering*. 2014;14(5):44-54. [Persian]
- 2- Dominjon L, Perret J, Lécuyer A. Novel devices and interaction techniques for human-scale haptics. *The Visual Computer*. 2007;23(4):257-266.
- 3- Tadokoro S, Verhoeven R, Hiller M, Takamori T. A portable parallel manipulator for search and rescue at large-scale urban earthquakes And an Identification algorithm for the installation in unstructured environments. *Proceedings 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human and Environment Friendly Robots with High Intelligence and Emotional Quotients (Cat. No.99CH36289)*, 17-21 Oct. 1999, Kyongju, South Korea, South Korea. Piscataway: IEEE; 2002. P. 1222-1227.
- 4- Rosati G, Gallina P, Masiero S. Design, implementation and clinical tests of a wire-based robot for neurorehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2007;15(4):560-569.
- 5- Morizono T, Kurahashi K, Kawamura S. Realization of a virtual sports training system with parallel wire mechanism. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, 25-25 April 1997, Albuquerque, NM, USA, USA. Piscataway: IEEE; 2002.
- 6- Merlet JP. Marionet, a family of modular wire-driven parallel robots. In: Lenarcic J, Stanisic M, editors. *Advances in robot kinematics: Motion in man and machine*. Dordrecht: Springer; 2010. pp. 53-61.
- 7- Jordan BL, Batalin MA, Kaiser WJ. NIMS RD: A rapidly deployable cable based robot. *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 10-14 April 2007, Roma, Italy. Piscataway: IEEE; 2007.
- 8- Bosscher P, Williams RL, Tummino M. A concept for rapidly-deployable cable robot search and rescue systems. *ASME Proceedings, 29th Mechanisms and Robotics Conference*. 2005;7:589-598.
- 9- Borgstrom P, Jordan B, Borgstrom BJ, Stealey MJ, Sukhatme GS, Batalin MA, et al. NIMS-PL: A cable-driven robot with self-calibration capabilities. *IEEE Transactions on Robotics*. 2009;25(5):1005-1015.
- 10- Borgstrom PH, Stealey MJ, Batalin MA, Kaiser WJ. NIMS3D: A novel rapidly deployable robot for 3-dimensional applications. *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 9-15 Oct. 2006, Beijing, China. Piscataway: IEEE; 2007.
- 11- Zi B, Qian S, Ding H, Kecskeméthy A. Design and analysis of cooperative cable parallel manipulators for multiple mobile cranes. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2012;9.
- 12- Qian S, Zi B, Zhang D, Zhang L. Kinematics and error analysis of cooperative cable parallel manipulators for multiple mobile cranes. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. 2014;10(4):395-409.
- 13- Zi B, Cao J, Zhu Z, Mitrouchev P. Design, dynamics, and workspace of a hybrid-driven-based cable parallel manipulator. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013;2013:914653.
- 14- Khalilpour SA, Bourbour A, Khorrambakht R, Kariminasab S, Taghirad HD. Forward kinematics resolution of a deployable cable robot. *2017 5th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, 25-27 Oct. 2017, Tehran, Iran. Piscataway: IEEE; 2018.
- 15- Borgstrom PH, Borgstrom NP, Stealey MJ, Jordan B, Sukhatme GS, Batalin M, et al. Design and implementation of NIMS3D, a 3-D cabled robot for actuated sensing applications. *IEEE Transactions on Robotics*. 2009;25(2):325-329.
- 16- Khalilpour SA, Khorrambakht R, Harandi MJ, Taghirad HD, Cardou P. Robust dynamic sliding mode control of a deployable cable driven robot. *Electrical Engineering (ICEE), Iranian Conference on*, 8-10 May 2018, Mashhad, Iran. Piscataway: IEEE; 2018.
- 17- Oh SR, Agrawal SK. A control lyapunov approach for feedback control of cable-Suspended robots. *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 10-14 April 2007, Roma, Italy. Piscataway: IEEE; 2007.
- 18- Fang S, Franitza D, Torlo M, Bekes F, Hiller M. Motion control of a tendon-based parallel manipulator using optimal tension distribution. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2004;9(3):561-568.
- 19- El-Ghazaly G, Gouttefarde M, Creuze V. Adaptive terminal sliding mode control of a redundantly-actuated cable-driven parallel manipulator: CoGiRo. In: Pott A, Bruckmann T, editors. *Cable-driven parallel robots. mechanisms and machine science*. Cham: Springer; 2015.
- 20- Borgstrom PH, Jordan BL, Sukhatme GS, Batalin MA, Kaiser WJ. Rapid computation of optimally safe tension distributions for parallel cable-driven robots. *IEEE*

kinematics and dynamics. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2003;19(4):692-702.

25- Khosravi MA, Taghirad HD. Robust PID control of fully-constrained cable driven parallel robots. Mechatronics. 2014;24(2):87-97.

26- Babaghasabha R, Khosravi MA, Taghirad HD. Adaptive robust control of fully-constrained cable driven parallel robots. Mechatronics. 2015;25:27-36.

27- Taghirad HD. Parallel robots: Mechanics and control. Boca Raton: CRC Press; 2013.

28- Korayem MH, Tajik A, Najafabadi AI, Tourajizadeh H. Calculation of the end-effector position of the cable robot using cable tension and encoders outputs. 3rd International and 12th National Conference on Manufacturing Engineering (ICME), 2012, Tehran, Iran. Unknown City: Unknown Publisher; 2012.[Persian]

Transactions on Robotics. 2009;25(6):1271-1281.

21- Bruckmann T, Pott A, Hiller M. Calculating force distributions for redundantly actuated tendon-based Stewart platforms. In: Lennarčič J, Roth B, editors. Advances in robot kinematics. Dordrecht: Springer; 2006.

22- Cheah CC, Kawamura S, Arimoto S. Feedback control for robotic manipulator with an uncertain Jacobian matrix. Journal of Robotic Systems Banner. 1999;16(2):119-134.

23- Cheah CC, Kawamura S, Arimoto S, Lee K. H/sub /spl infin// tuning for task-space feedback control of robot with uncertain Jacobian matrix. IEEE Transactions on Automatic Control. 2001;46(8):1313-1318.

24- Cheah CC, Hirano M, Kawamura S, Arimoto S. Approximate Jacobian control for robots with uncertain