Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(1) (2020) 15-18
DOI: 10.22060/mej.2017.12945.5480

Solving the Forward Kinematic Problem of Under-Constrained Cable Driven Robots for Online Control Purposes

A. Aflakiyan[1], N. Karbasizadeh[1], M. Tale Masouleh[2]*, A. Kalhor[2]

[1] Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
[2] School of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT: In this paper, a method is proposed which allows computing the position of the end-effector based on neural networks approach by taking into account external forces applied to the end-effector. As in under-constrained robots kinematics and statics are intrinsically coupled together, and they simultaneously should be considered, the forward kinematic problem of the robot can be made equivalent to an optimization problem. Solving the optimization problem is time consuming and not suitable for practical purposes. Therefore, in order to solve the forward kinematic problem a SimMechanics model based on the robot geometry and dynamic is designed and presented. By means of this method, the forward kinematic problem is solved offline and is used for online purpose. Moreover, an analysis of workspace is performed which reveals that the solution of the forward kinematic problem of the under-constrained cable robots can be calculated uniquely. By resorting to a neural network method, a position control is performed and the proposed method is validated. The comparison of the operated and desired path is shown for a helical trajectory. Maximum error in the assumed workspace is 0.4 percent. Finally, the proposed method was implemented experimentally and the results confirm the efficiency of the foregoing method.

Review History:

Received: 30 May. 2017
Revised: 24 Oct. 2017
Accepted: 28 Nov. 2017
Available Online: 29 Nov. 2017

Keywords:

Cable driven parallel robots
Under-constrained robots
Forward kinematic problem
Neural networks
Control

1- Introduction

Cable Driven Parallel Robots (CDPR) are similar to parallel actuated robots structurally with the fundamental distinction that cables cannot push the End-Effector (EE) but only pull it. Kinematic analysis is essential for the practical application of CDPRs, which contains three majors, namely, the workspace analysis, the Inverse Kinematic Problem (IKP) and the Forward Kinematic Problem (FKP). For parallel mechanisms, FKP is more challenging and it is worthful because of its practical importance [1]. FKP of a CDPR can be regards as finding the geometrical pose of the EE for a given set of cables lengths. For the over-constrained and fully-constrained robots, all Degree Of Freedoms (DOFs) of end-effector can completely be determined by the lengths of cables. However, for the third category, only some of the DOFs can be exactly determined. For the under-constrained robots, the platform is not stable and some of the DOFs can only be determined [2]. The EE in this group of robots, even with fixed length of cables, continues to preserve some DOFs and the final pose should be determined by the applied forces to the EE. Hence, kinematics and statics simultaneously should be considered which increases the complexity of determining robot pose [3]. Lots of efforts in order to present a simple high precision model of CDPR that could work in an online manner have been done [4-10]. In this paper, the use of neural networks to the end of solving the FKP of under-constrained CDPRs is proposed. The main contribution of this paper, compared to similar researches conducted in the literature, consists in finding the EE's position of under-constrained CDPRs and using in a control algorithm.

*Corresponding author's e-mail: m.t.masouleh@ut.ac.ir

2- Methodology

In this paper, a SimMechanics dynamic model of CDPR under study is designed. The inverse kinematic problem of the robot is solved and the cable lengths are obtained for a set of paths that span the workspace of the robot. Assigned cable lengths are applied to the model and the position of the EE is obtained. A neural network is trained by considering the length of cables as inputs and the position of the EE as outputs. A novel approach based on a neuro-fuzzy algorithm, the so-called "LoLiMoT" algorithm, is used as the neural network. LoLiMoT is a type of neuro-fuzzy algorithm which compared to other neuro-fuzzy networks has proven its efficiency in pattern recognition and learning the nonlinear system. The algorithm divides the input space into local linear models. It needs lower neuron count compared to normal neural networks and has a higher performance in terms of learning a mapping of the input space to one output. Fig. 1 illustrates the structure of a LoLiMot neural network with m neurons and p inputs.

Moreover, an analysis of workspace is performed which reveals that the solution of the forward kinematic problem of the under-constrained cable robots can be calculated uniquely. The workspace of robot for a given set of assigned cable lengths can be obtained by intersecting the workspace of all taut cables. As shown in Fig. 2, the workspace of each taut cable is a spherical shell.

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

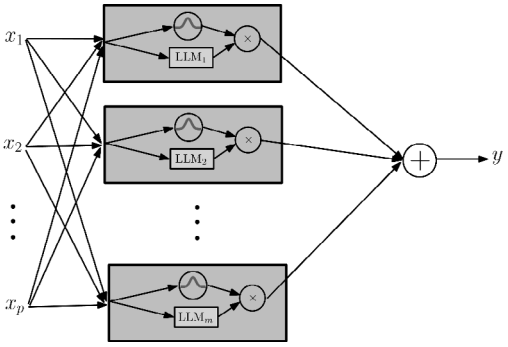


Fig. 1. The structure of a LoLiMot neural network with m neurons and p inputs.

In the latter figure, l_i is the length of the i_{th} cable and b_i is the distance between the EE's center of gravity and the cable's attachment point to the EE. The lower and upper bounds of the radius of sphere, are determined as $l_i + b_i$, when the EE's center of mass point is in line with the unit vector along the ith cable and l_i - b_i, when the EE's center of mass falls on the cable's unit vector.

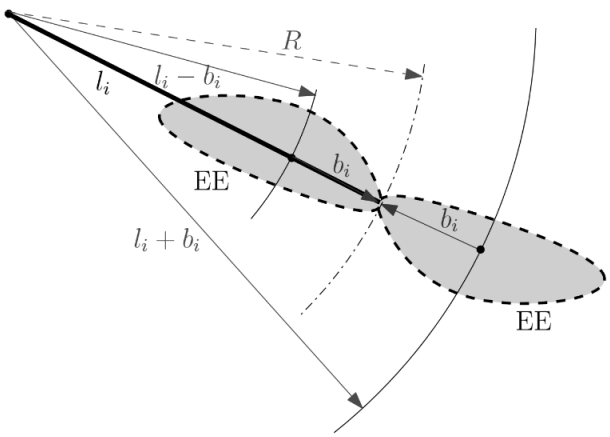


Fig. 2. The workspace of each taut cable

In this paper, a position control approach is performed and validated for the under-study CDPR. In this method, as aforementioned, given a set of cable lengths the pose of the EE is obtained by means of the neural network method. The comparison of operated and desired path is shown for a helical trajectory. Maximum error in the assumed workspace is 0.4 percent and the obtained results confirm the efficiency of the proposed method. The schematic of kinematic control algorithm is shown in Fig. 3.

3- Conclusion

This paper presented a study on the modeling and control of under-constrained CDPRs. Main conclusions of the paper are as follows:

- The kinematics of cable robots was introduced in general form.
- The workspace analysis was performed in order to show the uniqueness and global minimum answer of FKP solution for under-constrained CDPRs.
- The effect of EE's size is studied by using numerical examples.
- In order to solve the FKP of the robot a neural networks method base on the LoLiMoT algorithm is used.
- The data sets are obtained by the designed SimMechanics model of the robot which represents the dynamic and kinematic model of the robot.
- By means of the neural network method a position control is performed and the proposed method is validated
- The comparison of operated and desired path is shown for a helical trajectory and the maximum error is 0.4 percent.

The proposed method was implemented experimentally. The results demonstrated the effectiveness and correctness of the algorithm.

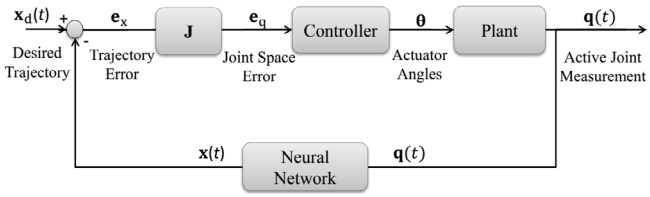


Fig. 3. The schematic of kinematic control algorithm

4- References

[1] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, Robot modeling and control vol. 3: wiley New York, 2006.

[2] J.-P. Merlet, Parallel robots vol. 128: Springer Science & Business Media, 2006.

[3] P. Dewdney, M. Nahon, and B. Veidt, "The large adaptive reflector: a giant radio telescope with an aero twist," Canadian aeronautics and space journal, vol. 48, pp. 239-250, 2002.

[4] R. G. Roberts, T. Graham, and T. Lippitt, "On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable-suspended robots," Journal of Field Robotics, vol. 15, pp. 581-597, 1998.

[5] A. Ming and T. Higuchi, "Study on multiple degree-of-freedom positioning mechanism using wires. I: Concept, design and control," International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, vol. 28, pp. 131-138, 1994.

[6] H. Bayani, M. T. Masouleh, and A. Kalhor, "An experimental study on the vision-based control and identification of planar cable-driven parallel robots," Robotics and Autonomous Systems, vol. 75, pp. 187-202, 2016.

[7] M. Dehghani, M. Ahmadi, A. Khayatian, M. Eghtesad, and M. Farid, "Neural network solution for forward kinematics problem of HEXA parallel robot," in American Control Conference, 2008, 2008, pp. 4214-4219.

[8] N. Michael, J. Fink, and V. Kumar, "Cooperative manipulation and transportation with aerial robots," Autonomous Robots, vol. 30, pp. 73-86, 2011.

[9] J. Fink, N. Michael, S. Kim, and V. Kumar, "Planning and

control for cooperative manipulation and transportation with aerial robots," The International Journal of Robotics Research, vol. 30, pp. 324-334, 2011.

[10] J.-F. Collard and P. Cardou, "Computing the lowest equilibrium pose of a cable-suspended rigid body," Optimization and Engineering, vol. 14, pp. 457-476, 2013.

[11] A. Berti, J.-P. Merlet, and M. Carricato, "Solving the direct geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots by interval analysis," The International Journal of Robotics Research, vol. 35, pp. 723-739, 2016.

[12] A. Aflakiyan, M. Tale Masouleh, H. Bayani, and R. Sadeghian, "Path planning of cable driven parallel robots in the presence of dynamic obstacles via potential field using computed torque control method," Modares Mechanical Engineering, vol. 16, pp. 109-118, 2016.

[13] A. Aflakiyan, H. Bayani, and M. T. Masouleh, "Computed torque control of a cable suspended parallel robot," in Robotics and Mechatronics (ICROM), 2015 3rd RSI International Conference on, 2015, pp. 749-754.

[14] J. Rezaie, B. Moshiri, A. Rafati, and B. N. Araabi, "Modified LOLIMOT algorithm for nonlinear centralized Kalman filtering fusion," in Information Fusion, 2007 10th International Conference on, 2007, pp. 1-8.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۱، سال ۱۳۹۹، صفحات ۴۳ تا ۵۶
DOI: 10.22060/mej.2017.12945.5480

حل مساله سینماتیک مستقیم ربات‌های کابلی نامقید با استفاده از شبکه عصبی به‌منظور استفاده هم‌زمان در الگوریتم‌های کنترلی

علی افلاکیان[۱]، نیما کرباسی زاده[۱]، مهدی طالع ماسوله[۲*]، احمد کلهر[۲]

[۱] دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۲] دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران

خلاصه: در این مقاله به بحث، بررسی و توسعه الگوریتم طراحی مسیر برای مأموریت تعقیب هدف متحرک پرواز گروهی هواپیماهای بدون سرنشین پرداخته می‌شود. مطابق با الزامات هواپیمای بدون‌سرنشین بال ثابت، برای تعقیب هدف متحرک و همچنین مأموریت دوری از موانع در محیط‌های پیچیده، الگوریتم جدیدی از ترکیب الگوریتم میدان برداری لیاپانوف با الگوریتم میدان پتانسیل بهبود یافته ارائه می‌شود. الگوریتم دینامیکی جدید ارائه شده از مزایای الگوریتم پتانسیل بهبود یافته برای دوری از موانع و همچنین از قابلیت الگوریتم میدان برداری لیاپانوف برای تعقیب اهداف متحرک استفاده می‌نماید. از مزایای این الگوریتم، درلحظه یا برخط بودن و پویایی آن برای تعقیب هدف متحرک و در عین حال دوری از موانع و همچنین قابلیت محاسباتی سریع می‌باشد که سبب می‌شود الگوریتم در محیط‌های پیچیده به خوبی عمل نماید. در ادامه الگوریتم ارائه شده برای پرواز گروهی هواپیماهای بدون سرنشین طراحی می‌شود. نتایج ارائه شده به خوبی بیانگر آن است که الگوریتم ترکیبی ارائه شده، قابلیت پیاده‌سازی در محیط‌های پیچیده را دارا می‌باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۰۹
بازنگری: ۱۳۹۶/۰۸/۰۲
پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۰۷
ارائه آنلاین: ۱۳۹۶/۰۹/۰۸

کلمات کلیدی:
ربات کابلی
ربات نامقید
سینماتیک مستقیم
شبکه عصبی
کنترل سینماتیکی

۱- مقدمه

با گسترش روزافزون استفاده از ربات‌ها در کاربردهای مختلف، نیاز به ساختارهایی که محدودیت‌های ربات‌های سری و موازی، از جمله فضای‌کاری کوچک، توانایی حمل بار کم، دقت و شتاب کم و هزینه نصب و نگهداری بالا را نداشته باشند، بیش از پیش احساس شد [۱ و ۲]. به‌منظور حل این مشکلات، کلاس جدیدی از ربات‌های موازی به نام ربات‌های موازی کابلی[۱] معرفی شدند. ربات موازی کابلی مکانیزم حلقه بسته‌ای است که در آن مجری نهایی[۲] ربات توسط کابل‌ها به پایه‌ها متصل‌اند. هریک از کابل‌ها به دور یک استوانه دوار پیچیده و توسط مکانیزم کابل جمع‌کن، به منظور روی هم نرفتن کابل‌ها، به موتور متصل شده‌اند [۳]. این ربات‌ها براساس درجه افزونگی به سه دسته ربات‌های مقید کامل[۳]، ربات‌های بیشینه مقید[۴] و ربات‌های نامقید[۵]، تقسیم‌بندی شده‌اند. تعداد کابل‌ها در گروه اول با درجات آزادی ربات برابر، گروه دوم بیشتر از درجات آزادی و در گروه سوم کمتر از درجات آزادی ربات هستند [۴]. سینماتیک مستقیم[۶] ربات‌های موازی، پیدا کردن موقعیت مجری نهایی با استفاده از طول مشخص مفاصل، نتیجه حل دستگاه معادلات غیرخطی وابسته است. برخلاف ربات‌های سری در حالت کلی جواب یکتایی وجود ندارد. با فرض وجود نیروی کشش درون کابل‌ها، در ربات‌های مقید کامل و بیشینه مقید موقعیت مجری نهایی تنها با توجه به هندسه ربات و طول مشخص کابل‌ها قابل محاسبه است [۸-۵]. در حالی که در ربات‌های کابلی مقید ناقص با توجه به طول ثابت کابل‌ها موقعیت مجری نهایی با تغییر نیروهای اعمالی به آن تغییر می‌کند [۳ و ۹]. الزام در نظر گرفتن همزمان معادلات استاتیکی و سینماتیکی ربات‌های کابلی مقید ناقص پیچیدگی یافتن موقعیت مجری نهایی ربات را افزایش می‌دهد. حل این مساله به طبع بسیار سخت‌تر از مساله مشابه برای ربات‌های موازی با لینک صلب است. در [۱۰] از روش شبکه عصبی به‌منظور حل سینماتیک مستقیم ربات‌های کابلی مقید کامل استفاده شده است. در این مقاله به منظور افزایش سرعت

1 Cable-Driven Parallel Robot (CDPR)
2 End-Effector
3 Fully-constrained
4 Over-constrained
5 Under-constrained
6 Forward kinematic problem

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.t.masouleh@ut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

حل سینماتیک مستقیم روش آنالی بازه‌ای با شبکه عصبی تلفیق شده است. همچنین در [۱۱] روش‌های مختلف شبکه عصبی به منظور حل مساله سینماتیک مستقیم یک ربات کابلی بیشینه مقید با یکدیگر مقایسه شده و نتایج آن‌ها گزارش شده‌اند. در این مقاله روش‌های سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار[۱]، پرسپترون چندلایه[۲]، شبکه تابع پایه‌شعاعی[۳]و شبکه عصبی احتمالی[۴]با یکدیگر مقایسه شده و نتایج حاکی از برتری روش سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار گزارش شده است. در سال ۲۰۰۸ استفاده از شبکه عصبی[۵] برای حل معادلات چند جمله‌ای وابسته ربات های کابلی نامقید پیشنهاد شد [۱۲]. در این مقاله از شبکه عصبی روی اطلاعات بدست آمده از حل سینماتیک معکوس[۶] ربات که بسیار ساده‌تر از سینماتیک مستقیم است و تنها یک جواب دارد، استفاده شد. جواب شبکه عصبی آموزش داده شده با تقریب خوبی مساله سینماتیک مستقیم ربات را در بسیاری از موقعیت‌ها تخمین زد، در حالی که باید در نظر داشت این روش الزام بر دقیق و صحیح بودن موقعیت تخمین زده، به دلیل در نظر نگرفتن معادلات تعادلی ربات (استاتیکی)، نخواهد داشت. همچنین در [۱۳] از روش شبکه عصبی پرسپترون چندلایه آموزش دیده به روش بازگشتی برای حل سینماتیک مستقیم اینگونه ربات‌ها در محیط شبیه‌سازی استفاده شد. در [۱۴] برای حل سینماتیک مستقیم یک ربات ۲ کابلی صفحه‌ای (نامقید) روشی پیشنهاد شد. این راه حل از پیدا کردن تمامی موقعیت‌های تعادلی ربات همانند مورد مشابه ربات صلب چهار میله‌ای است. این امر منجر به یک معادله بهینه‌سازی غیر محدب می‌شود، که مقدار کمینه آن با تغییر حدس اولیه پروسه بهینه‌سازی مشخص می‌شود. در سال ۲۰۱۱ با محدود کردن متغییرها، مساله بهینه‌سازی مشابه به یک مساله بهینه‌سازی محدب[۷] تبدیل شد [۱۵]. مقدار مشاهده شده از مساله بهینه‌سازی به عنوان یک محدوده پایین برای مساله اصلی در نظر گرفته شد. علاوه بر آن نویسنده از قید هندسه ربات کمک گرفته است تا نشان دهد که مقدار کمینه بدست آمده از کار قبلی با مقدار کمینه فعلی در هم آمیخته و یکتا است. در سال ۲۰۱۳ روند مشابهی از کار انجام گرفته در راستای کمینه کردن انرژی در پیش گرفته شد. با این تفاوت که محدوده پایین مساله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم شاخه و کران[۸] بدست آمد، که توانایی محاسبه نقطه کمینه کلی[۹] را از مساله بهینه‌سازی دارد و محل مرکز جرم مجری نهایی را بدست می‌آورد [۱۶]. همچنین این اطلاعات برای اطمینان از حرکت بدون برخورد ربات بر بالای موانع مشخص قابل استفاده است. روش ارائه شده می‌تواند بر روی ربات‌های با تعداد کابل بیشتر یا کمتر نیز مورد استفاده قرار گیرد که آن را متمایز از دیگر راه حل‌ها قرار می‌دهد. در [۱۷]، از آنالیز بازه‌ای[۱۰] به منظور یافتن تمامی نقاط تعادلی مجری نهایی با طول کابل‌های مشخص، با یک روش مقاوم و قابل اطمینان استفاده شده است. همچنین در [۱۸]، نویسندگان به ارائه روشی برای حل سینماتیک مستقیم ربات‌های کابلی نامقید با درنظر گرفتن دینامیک کابل‌ها در حالت عمومی دست یافته و به‌صورت عملی از صحت آن روش اطمینان حاصل کردند. در مقاله [۱۹] نیز به کمک سنسورهایی که زاویه کابل را در محل پایه‌ها مشخص می‌کنند، حلی برای معادله سینماتیک مستقیم ربات‌های کابلی پیشنهاد شده است.

هدف از تمامی تلاش‌های صورت گرفته در این راستا، ارائه یک مدل ساده به‌منظور مشخص نمودن موقعیت نهایی مجری نهایی ربات‌های کابلی است که بتوان از آن با دقت بالا در الگوریتم‌های کنترلی به‌صورت هم‌زمان استفاده کرد. همانگونه که گفته شد، به‌منظور پیدا کردن موقعیت ربات می‌توان سینماتیک مستقیم ربات را به یک مساله تعادلی بهینه‌سازی تبدیل کرد، که هدف آن کمینه کردن انرژی پتانسیل مجری نهایی ربات (پیدا کردن کمترین ارتفاع مرکز جرم مجری نهایی ربات با طول کابل‌های مشخص) و در تعادل بودن نیروها در هر لحظه است. این مساله را می‌توان با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چون الگوریتم ژنتیک[۱۱] یا ضمن در نظر گرفتن محدوده تغییرات متغیرها با استفاده از بهینه‌سازی محدب آنالیز بازه‌ای و ... انجام داد. این در حالی است که روش‌های ارائه شده زمانبر بوده و برای کاربردهای عملی مناسب نیست. در این مقاله در راستای حل سینماتیک مستقیم ربات‌های کابلی فضایی یک مدل شبیه‌سازی با در نظر گرفتن دینامیک ربات و رفتار کابل‌ها، قابل تغییر برای هر نوع ربات کابلی با هر تعداد کابل، طراحی گردید. و از آن جهت حل

1 Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)
2 Multi-Layer Perceptron (MLP)
3 Radial Basis Function (RBF)
4 Probabilistic Neural Network (PNN)
5 Neural network
6 Inverse kinematic
7 Convex optimization
8 Branch and bound
9 Global minimum
10 Interval analysis
11 Genetic algorithm

شبه‌استاتیکی حرکت ربات در فضای کاری[1] مورد نظر و همچنین در نظر گرفتن اثر نیروی جاذبه و هر نیروی خارجی دیگر، روی حرکت ربات طراحی شد. در این فضای کاری اطلاعات سینماتیک مستقیم از این مدل شبیه‌سازی جمع آوری شده و با آموزش شبکه عصبی موقعیت ربات با داشتن طول کابل‌ها در هر لحظه بدست خواهد آمد. همچنین تحلیل فضای کاری به منظور نشان دادن کمینه کلی بودن جواب بدست آمده انجام گرفته و در انتها روش کنترلی ارائه شده به صورت عملی بر روی ربات کابلی فضایی ساخته شده در آزمایشگاه تعامل انسان و ربات دانشگاه تهران پیاده‌سازی شده است. روند مقاله به این صورت است که ابتدا سینماتیک ربات‌های کابلی در حالت کلی و پس آن به طور اختصاصی برای ربات‌های کابلی نامقید بررسی خواهد شد. مدل شبیه‌سازی طراحی شده معرفی و به کمک آن تأثیر ابعاد مجری نهایی روی موقعیت انتظار رفته از ربات و موقعیت پیموده شده توسط آن برای یک ربات چهار کابلی فضایی بررسی می‌شود. سپس به منظور نشان دادن کمینه کلی بودن جواب مساله سینماتیک مستقیم تحلیل فضای کاری انجام می‌شود. در نهایت به منظور اطمینان از روش انجام گرفته از اطلاعات شبکه عصبی آموزش دیده شده در یک الگوریتم کنترلی برای کنترل موقعیت ربات استفاده و نتایج حاصل از مسیریابی برای ربات ۴ کابلی فضایی موجود در آزمایشگاه تارلب در محیط شبیه سازی و در پیاده‌سازی عملی آورده شده است.

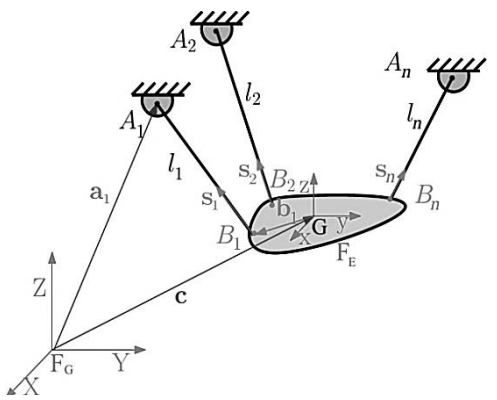
۲- سینماتیک ربات‌های کابلی

در شکل ۱ مدل سینماتیکی یک ربات کابلی آورده شده است. A_i و B_i (i=۱,۲,...,n) به ترتیب نقاط اتصال iامین کابل به پایه و مجری نهایی هستند، l_i بردار طول کابل iام و s_i بردار یکه در راستای آن است. a_i و b_i به ترتیب بردار اتصال A_iها به مرکز مختصات G (مرجع) و بردار اتصال B_iها به مرکز مختصات E (متصل به مجری نهایی) هستند. با توجه به شکل ۱ موقعیت مجری نهایی در مختصات G از رابطه (۱) بدست می‌آید [۲۰]:

$$\mathbf{c} = -\mathbf{l}_i + \mathbf{a}_i - {}^{F_G}\mathbf{R}_{F_E} \times \mathbf{b}_i\,, \quad (i = 1,2,\dots,n) \qquad (۱)$$

دررابطه (۱)، c بردار موقعیت ربات در فضای دو بعدی و R، ماتریس دوران از مختصات به ، از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

1 Workspace



شکل ۱. مدل سینماتیکی یک ربات کابلی فضایی با n کابل
Fig 1. Kinematic modeling of a CDPR with n cables

$$ {}^{F_G}R_{F_E} = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & c\gamma s\alpha s\beta - c\alpha s\gamma & c\alpha c\gamma s\beta + s\alpha s\gamma \\ c\beta s\gamma & c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & c\alpha s\beta s\gamma - c\gamma s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) c بیانگر cos و s بیانگر sin است. همچنین α، β و γ به ترتیب زوایای دوران حول محورهای x، y و z هستند. با مشتق‌گیری از رابطه (۱) رابطه بین سرعت مفاصل و سرعت مجری نهایی از رابطه (۳) بدست می‌آید [۲۱]:

$$\dot{\mathbf{L}} = \mathbf{J}^{\mathrm{T}}\mathbf{t} \qquad (۳)$$

دررابطه (۳)، بردار جابه‌جایی طول کابل‌ها و بردار سرعت‌های خطی و زاویه‌ای مجری نهایی است. در این معادله ماتریس ، ژاکوبین[2] ربات، از رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_1 & \mathbf{R}\mathbf{b}_1 \times \mathbf{s}_1 \\ \mathbf{s}_2 & \mathbf{R}\mathbf{b}_2 \times \mathbf{s}_2 \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{s}_n & \mathbf{R}\mathbf{b}_n \times \mathbf{s}_n \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴) بردار یکه در راستای کابل iام است.

۲-۱- حل مساله سینماتیک مستقیم ربات‌های نامقید

همانگونه که در مقدمه نیز گفته شد، در راستای پیدا کردن موقعیت ربات‌های نامقید؛ می‌توان سینماتیک مستقیم ربات را به یک مساله تعادلی بهینه‌سازی، با هدف کمینه کردن انرژی پتانسیل مجری نهایی ربات و در تعادل بودن نیروها در هر لحظه، تبدیل کرد.

2 Jacobian

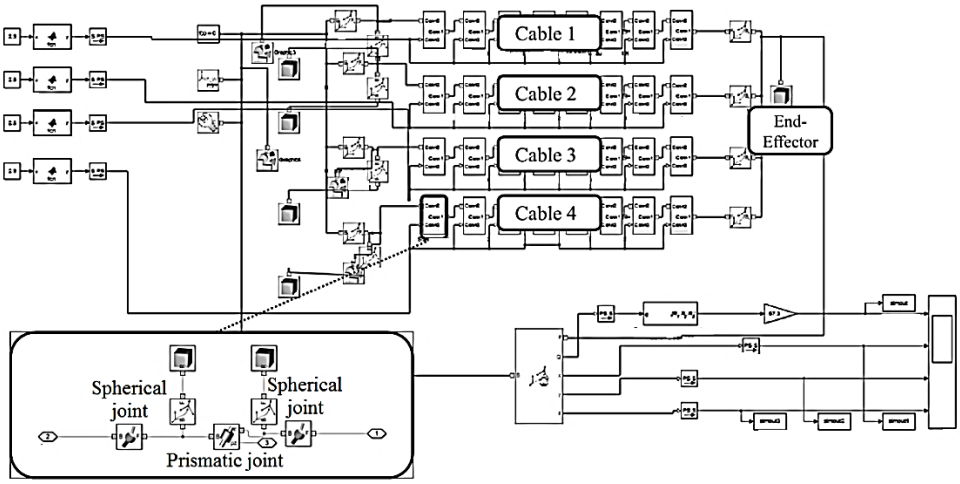
در رابطه (۵) این مساله بهینه‌سازی به صورت ریاضی نمایش داده شده است:

$$\begin{aligned}&\text{Find: } \mathbf{v} = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^{\mathrm{T}}\\&\mathbf{l}_i = \mathbf{c} + \mathbf{a}_i - {}^{\mathrm{F_G}}\mathbf{R}_{\mathrm{F_E}} \times \mathbf{b}_i,\ \ i = 1, 2, \dots, \mathrm{n}\\&\min\left(\arg_z(\mathrm{PE})\right)\\&\text{s.t.: } \|\mathbf{l}_i\|^2 \le \mathbf{l}_i\\&\mathbf{lb} \le [x, y, z] \le \mathbf{ub}, \qquad -\frac{\pi}{4} \le [\alpha, \beta, \gamma] \le \frac{\pi}{4}\end{aligned} \tag{۵}$$

در روابط فوق lb و ub به ترتیب حد پایین و حد بالای موقعیت ربات و PE انرژی پتانسیل ربات هستند. شرط برقرار بودن رابطه فوق همواره در کشش بودن کابل‌ها است. به منظور تسهیل فهم این مساله با در نظر گرفتن جسمی متصل به یک طناب آویزان از یک نقطه ثابت و همچنین با فرض همواره در کشش بودن این طناب، با یک طول مشخص این جسم می‌تواند روی کره‌ای به شعاع طول طناب حرکت کند. با رها کردن جسم مشاهده خواهد شد که تمایل جسم به قرار گرفتن در پایین‌ترین نقطه به سمت جاذبه زمین (کمترین میزان انرژی پتانسیل) است.

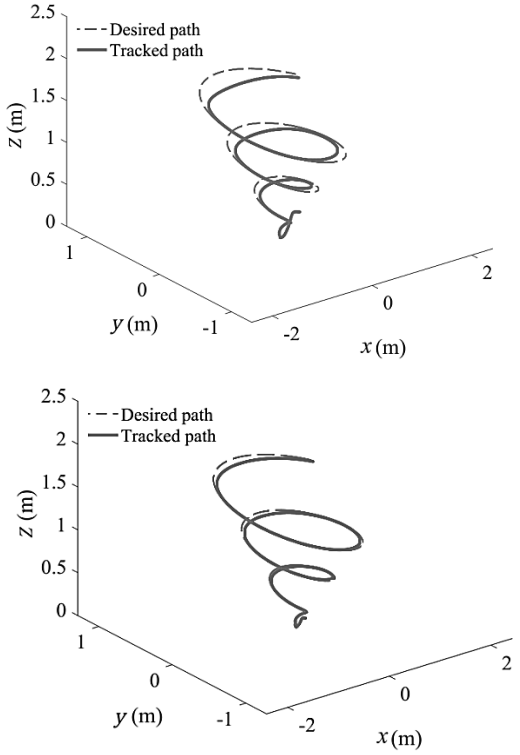
پس از گذشت مدت زمانی از نوسان آن حول این نقطه (از دست دادن انرژی) جسم به سکون در کمینه نقطه انرژی پتانسیل خود خواهد رسید. این مساله را می‌توان با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چون الگوریتم ژنتیک یا ضمن در نظر گرفتن محدوده تغییرات متغیرها با استفاده از بهینه‌سازی محدب، آنالیز بازه‌ای و ... انجام داد. روش‌های فوق زمانبر بوده و برای کاربردهای عملی مناسب نیستند. در این مقاله در راستای حل سینماتیک مستقیم ربات‌های کابلی نامقید یک مدل شبیه‌سازی با در نظر گرفتن دینامیک ربات و کابل‌ها و جهت حل شبه استاتیکی حرکت ربات در فضای‌کاری مورد نظر طراحی شد. مدل شبیه‌سازی طراحی شده دارای رفتار هندسی و دینامیکی بسیار نزدیک به رفتار ربات با قابلیت گسترش برای هر نوع ربات کابلی با هر تعداد کابل و در نظر گرفتن هر نوع نیروی خارجی وارد شده بر ربات ، را دارد. همچنین در این مدل با تقسیم هر کابل به المان‌های دارای جرم، جرم کابل و دینامیک آن در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ محیط شبیه‌سازی مکانیکی نرم افزار متلب[1] برای یک ربات ۴ کابلی فضایی آورده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است هر کابل از مجموع چندین مفصل سیلندری که با مفصل‌های کروی به یکدیگر متصل هستند، ساخته شده است. تعداد مفاصل سیلندری با توجه به طول کابل در هر حرکت متغیر خواهد بود. توجه به این نکته الزامی است؛ که با کوچک کردن مجری نهایی اختلاف بین مکان مورد انتظار و موقعیت‌گیری مجری نهایی ناشی از جرم آن کاهش خواهد یافت. در شکل ۳ این مساله برای مجری نهایی بزرگ و کوچک به خوبی نشان داده شده است.

در این بررسی قطر مجری نهایی کوچک ۴ سانتیمتر و مجری نهایی بزرگ ۱۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. با اضافه کردن قیدهای هندسی به ربات مساله بهینه‌سازی توضیح داده شده به یک مساله بهینه‌سازی محدب تبدیل خواهد شد. می‌توان نشان داد که جواب این مساله یکتا و کمینه محلی همان کمینه کلی در فضای‌کاری قابل دسترس ربات با طول کابل‌های مشخص است [۱۶] . در این مقاله این قضیه به صورت هندسی و به کمک مدل شبیه‌سازی



شکل ۲. مدل ربات در محیط شبیه‌سازی مکانیکی نرم افزار متلب
.Fig 2. Simulation model of the under study CDPR in Matlab/ SimMechanics

1 SimMechanics/Matlab

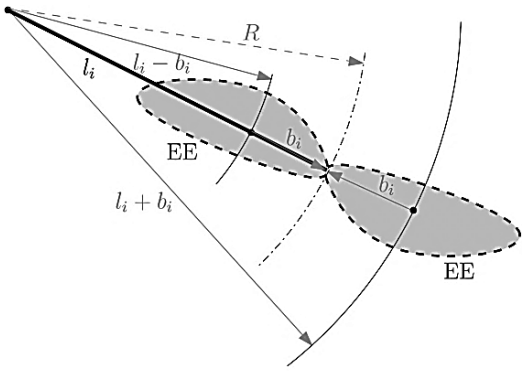


شکل ۳. مقایسه مسیر حرکت مجری نهایی بزرگ (شکل بالا) و مجری نهایی کوچک (شکل پایین) با مسیر مطلوب.
Fig 3. Comparison of robot's path with desired path while using small and large EE.

نشان داده شده است. اگر مجری نهایی ربات تنها به یک کابل متصل باشد با در نظرگرفتن فاصله مرکز جرم مجری نهایی تا کابل، b و طول کابل l ، فضای کاری قابل حصول برای این سیستم با فرض در کشش بودن کابل، به صورت یک پوسته کروی با بیشترین شعاع l+b، هنگامیکه مجری نهایی در راستای کابل قرار بگیرد، و کمترین شعاع l-b، هنگامی که مجری نهایی روی کابل قرار گیرد، خواهد بود. این فضای کاری در شکل ۴ نمایش داده شده و نمایش ریاضی آن در رابطه (۶) آورده شده است:

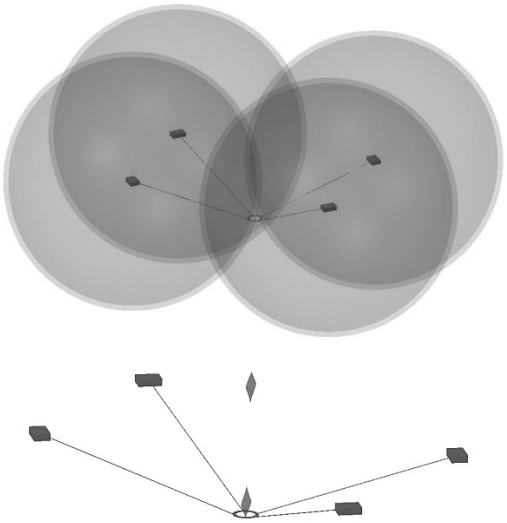
$$(x_i - x_{i0})^2 + (y_i - y_{i0})^2 + (z_i - z_{i0})^2 = R_i^2$$
$$l_i - b_i \le R_i \le l_i + b_i, \quad i = 1,2,\dots,n \qquad (۶)$$

به همین ترتیب با اضافه شدن تعداد کابل‌ها فضای‌کاری کلی حجم بدست آمده از فصل مشترک تمامی کره‌ها خواهد بود. شایان ذکر است، سینماتیک مستقیم در صورتی دارای جواب خواهد بود که تمامی کره‌ها دارای فصل مشترک باشند. فضای‌کاری بدست آمده از برخورد پوسته‌های کروی دارای یک نقطه کمینه کلی می‌باشد. این مساله به سادگی در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل ۴. محدوده فضای کاری کابل دارای کشش.
Fig 4. The workspace of each taut cable.

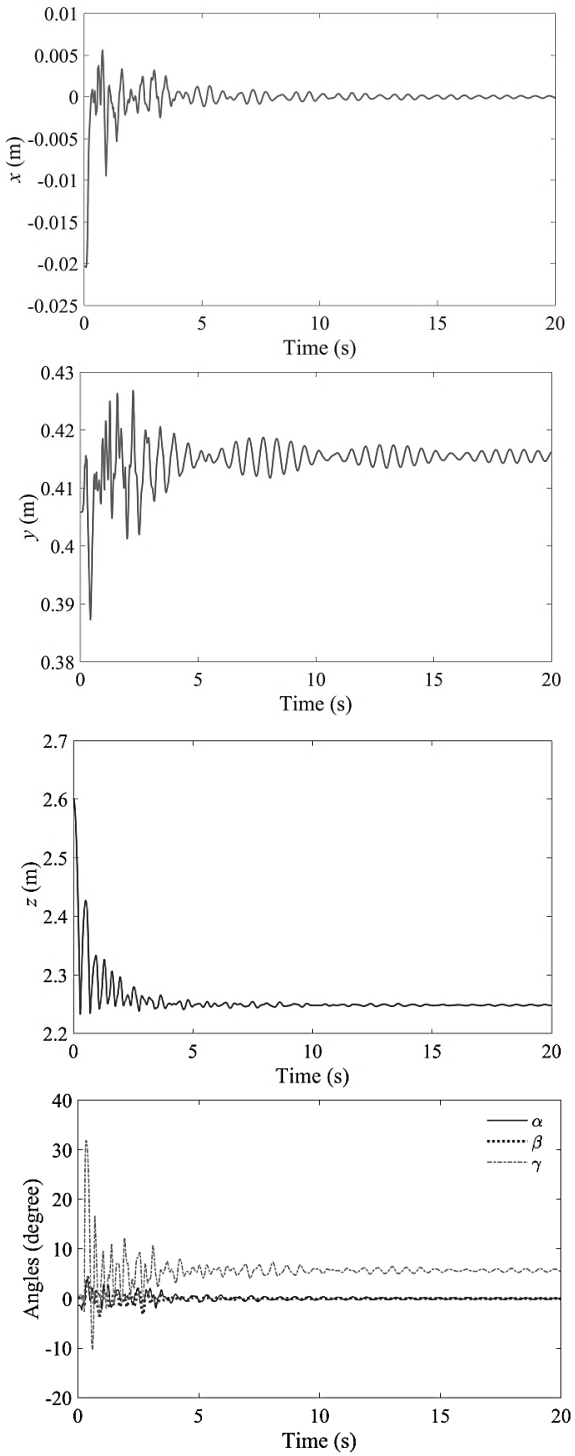
همچنین به دلیل لزوم کمینه شدن انرژی پتانسیل هر جسم در عالم مادی، مرکز جرم مجری نهایی تمایل به قرار گرفتن در این نقطه کمینه را دارد (با توجه به قانون انرژی پتانسیل،$U=mgh$، این نقطه مکانی است که مرکز جرم مجری نهایی دارای کمترین ارتفاع است. (این مساله با در نظر گرفتن نتایج محیط شبیه‌سازی در شکل ۵ به وضوح قابل مشاهده است. با رها کردن مجری نهایی درون فضای‌کاری در محیط شبیه‌سازی و اضافه کردن مولفه‌های اتلاف انرژی در آن محیط همانگونه که در نمودارهای شکل ۶ مشاهده می‌شود، مجری نهایی به سمت نقطه دارای کمترین انرژی پتانسیل حرکت خواهد کرد تا موقعیت آن به سکون برسد.



شکل ۵ .فضای کاری ربات برای طول کابل‌های مشخص
Fig 5. Workspace of robot for assigned cables' length.

لازم به ذکر است که مسیر مطلوب در تمامی بخش‌های مقاله و در کنترل شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی به صورت مارپیچ از رابطه زیر است:

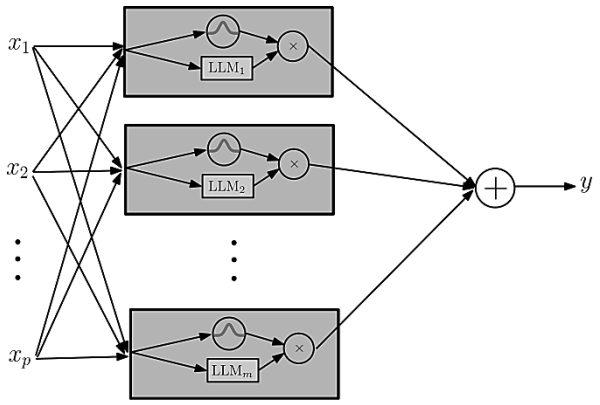
$$x = 0.05 * t * \sin(t),\ \ y = 0.05 * \mathrm{t} * \cos(t),\ \ z = 0.05 * \mathrm{t}$$



شکل ۶. حرکت مجری نهایی ربات به سمت کمترین انرژی پتانسیل آن
Fig 6. Robot's EE path considering minimum potential energy.

۳- شبکه عصبی

در این مقاله با استفاده از یک شبکه عصبی از پیش آموزش دیده موقعیت و زوایای مجری نهایی با خطای قابل قبولی محاسبه می‌شوند. یکی از الگوریتم‌های مفید و پر کاربرد برای تبدیل مدل‌های پیچیده به مدل‌های کوچکتر و خطی به اسم لولیمات[1] شناخته می‌شود. مدل حاصل از این راهکار از تکه‌هایی از مدل‌های خطی تشکیل می‌شود که فضای ورودی را با استفاده از یک ساختار درختی به فرامکعب‌های مستطیلی تقسیم‌بندی می‌نماید. هر یک از فرامکعب‌ها با استفاده از یک مدل خطی محلی مدل‌سازی می‌گردد. در نتیجه این الگوریتم با تقسیم‌بندی فضای ورودی به مدل‌های خطی محلی که دارای دقت و کارایی بیشتری هستند، در مقایسه با شبکه‌های عصبی معمول به تعداد نرون[2] کمتری نیاز دارد [۲۳]. لازم به ذکر است، با توجه به رفتار غیر خطی شدید ربات، روش‌های مرسوم شبکه عصبی از جمله پرسپترون چندلایه و تابع پایه‌شعاعی قدرت آموزش ضعیفی از خود نشان داده و مورد استفاده قرار نگرفتند.



شکل ۷. ساختار شبکه‌ای لولیمات با m نرون و p ورودی.
Fig 7. The structure of a LoLiMot neural network with *m* neurons and *p* inputs.

در شکل ۷ ساختار شبکه‌ای یک مدل خطی محلی نشان داده شده است. هر نرون حاوی یک مدل خطی محلی همراه با یک تابع تعلق که ناحیه‌ی اعتبار مدل خطی محلی را مشخص می‌کند، است.

رابطه هر یک از مدل‌های خطی محلی در رابطه (۷) آورده شده است:

$$\hat{y}_i = \omega_{i0} + \omega_{i1}x_1 + \cdots + \omega_{ip}x_p \qquad (۷)$$

1 LoLiMot
2 Neuron

که در آن ωij پارامتر مربوط به مدل خطی نرون i است. در نهایت خروجی حاصل از الگوریتم لولیمات در رابطه (۸) آورده شده است:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^{M} \hat{y}_i \emptyset_i(x) \tag{۸}$$

$\emptyset_i$که نمایانگر تابع تعلق است اغلب تابع گوسی نرمالیزه شده فرض می‌شود و دارای ویژگی نشان داده شده در رابطه (۹) است:

$$\sum_{i=1}^{M} \emptyset_i(x) = 1 \tag{۹}$$

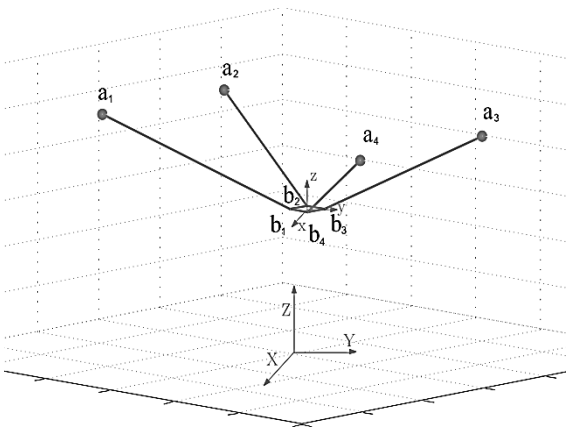
تابع تعلق هر نرون با استفاده از معادلات نوشته شده در رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) بدست می‌آید:

$$\emptyset_i(u) = \frac{\mu_i(u)}{\sum_{j=1}^{M} \emptyset_j(u)} \tag{۱۰}$$

$$\mu_i(u) = e^{\frac{(u_1 - c_{i1})^2}{-2\sigma_{i1}^2}} \times \ldots \times e^{\frac{(u_p - c_{ip})^2}{-2\sigma_{ip}^2}} \tag{۱۱}$$

که در آن Cij پارامترهای مرکز هر ناحیه و σij انحراف معیار می‌باشد. بنابراین الگوریتم لولیمات دارای دو نوع متغیر شامل متغیرهای مدل خطی محلی (ωij) و پارامترهای توابع تعلق (cij, σij) است. با استفاده از تکنیک حداقل مربعات متغیرهای مربوط به مدل‌های خطی محلی قابل محاسبه است. برای محاسبه متغیرهای توابع تعلق از یک روش خوشه‌ای استفاده می‌گردد. بر این اساس سه مرحله تکرار شونده برای الگوریتم لولیمات تعریف شده است:

ابتدا بدترین مدل خطی محلی با استفاده از توابع خطا انتخاب گردد. این مدل خطی محلی انتخاب شده به دو مدل خطی جدید تقسیم خواهد شد. در مرحله دوم همه تقسیمات ممکن بر فضای ورودی مدل انتخاب شده صورت می‌گیرد و خطای تمامی تقسیمات صورت گرفته بررسی می‌شود. در مرحله آخر بهترین تقسیمی که خطای مدل خطی محلی کمتری ایجاد کند، انتخاب شده و بر اساس آن یک نرون به شبکه عصبی اضافه می‌شود. در واقع با تقسیم فضای ورودی به تعداد نرون‌های به کار رفته در شبکه عصبی، مراکز هندسی هر یک از ناحیه‌های ایجاد شده را برای متغیر cij و ابعاد هر یک از نواحی برای متغیر σij توابع تعلق، استفاده می‌گردند.



شکل ۸. ساختار یک ربات ۴ کابلی فضایی
Fig 8. The structure of 4 cable spherical robot.

در این مقاله برای یک ربات ۴ کابلی فضایی با مشخصات هندسی و فیزیکی نشان داده شده در شکل ۸ و جدول ۱ (برگرفته از ربات کابلی ساخته شده در آزمایشگاه تعامل انسان و ربات دانشگاه تهران) مدل شبیه‌سازی طراحی شد.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و هندسی ربات کابلی مورد بررسی
Table 1. Geometrical and physical characteristics of the understudy cable robot.

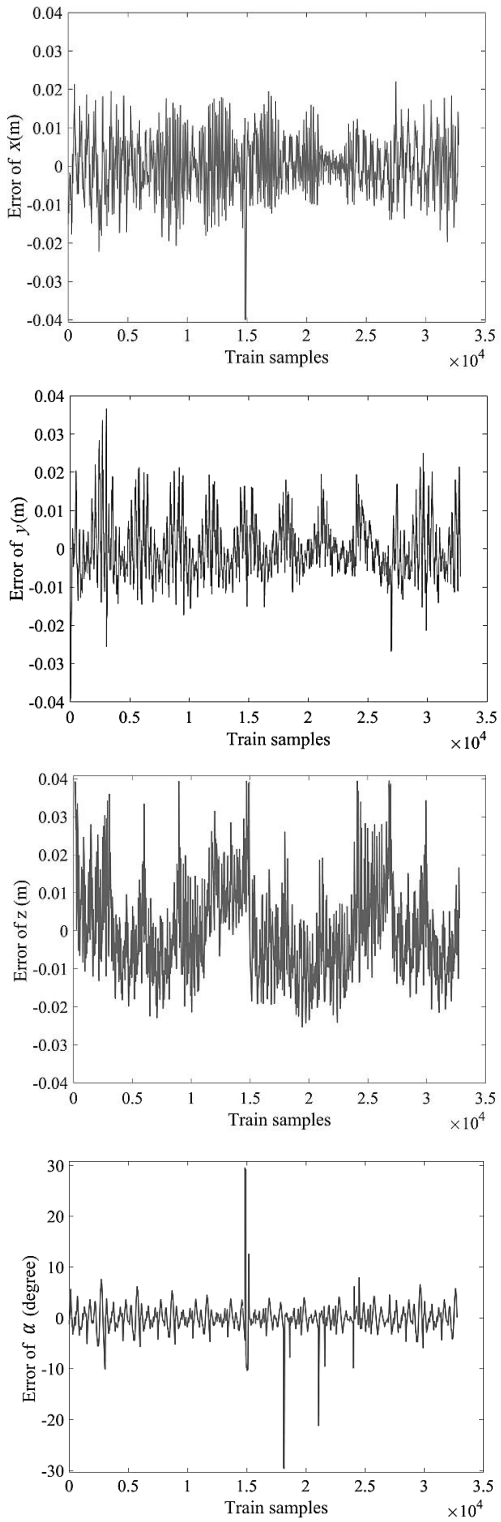
پارامتر/ بردار	مقدار
$(\mathbf{m}\times 10^{-3})\boldsymbol{a_1}$	[-130, 240, 260]
$(\mathbf{m}\times 10^{-3})\boldsymbol{a_2}$	[130, -240, 260]
$\boldsymbol{a_3}(\mathbf{m}\times 10^{-3})$	[-130, -240, 260]
$(\mathbf{m}\times 10^{-3})\boldsymbol{a_4}$	[-130, -240, 260]
$\boldsymbol{b_1}(\mathbf{m}\times 10^{-3})$	[-10, 10, 0]
$\boldsymbol{b_2}(\mathbf{m}\times 10^{-3})$	[10, 10, 0]
$\boldsymbol{b_3}(\mathbf{m}\times 10^{-3})$	[10, -10, 0]
$\boldsymbol{b_4}(\mathbf{m}\times 10^{-3})$	[-10, -10, 0]
$\boldsymbol{m}\ (\mathbf{kg}\times 10^{-3})$	600
$\boldsymbol{I_{xx}}(\mathbf{kg.m^2}\times 10^{-3})$	8
$\boldsymbol{I_{yy}}(\mathbf{kg.m^2}\times 10^{-3})$	8
$\boldsymbol{I_{zz}}(\mathbf{kg.m^2}\times 10^{-3})$	5

لازم به ذکر است که در جدول ۱ بردارهای a در مختصات کلی و بردارهای b در مختصات متحرک متصل به مجری نهایی گزارش شده‌اند.

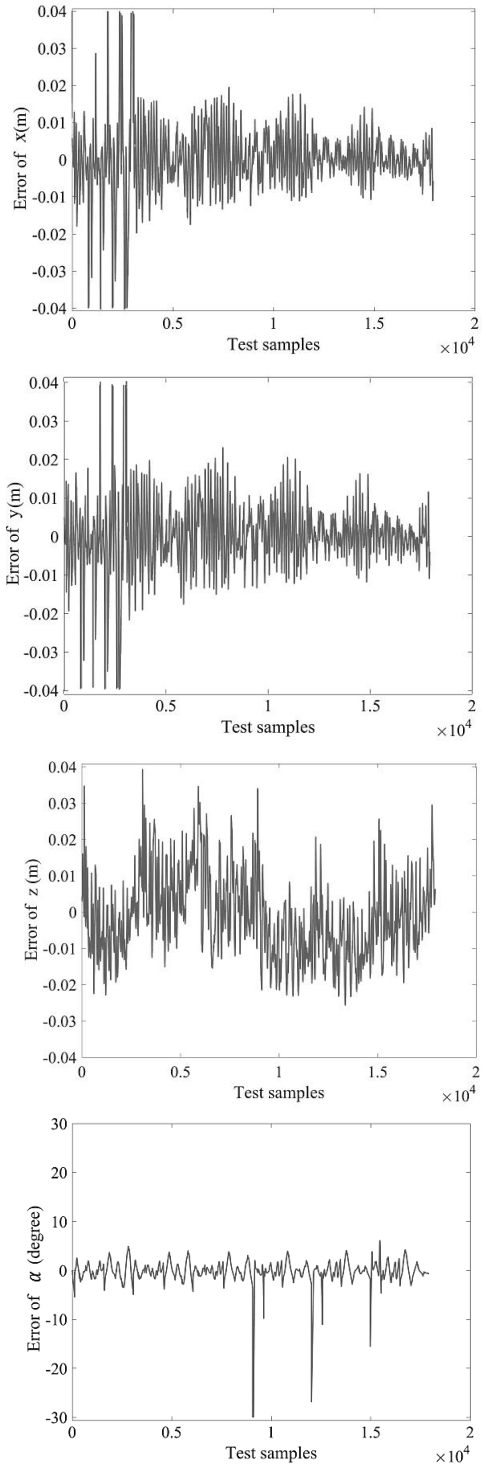
حدود ۵۰ هزار داده از فضای‌کاری قابل دسترس ربات[1] (این فضای‌کاری از محدود کردن زوایای ربات به گونه‌ای که هیچ یک از زوایا بیشتر از ۴۵ درجه نشود بدست آمده است) جمع‌آوری گردید. بدین روش که ابتدا با فرض صحیح بودن سینماتیک معکوس ربات کابلی، فضای‌کاری با حرکت‌های لایه لایه‌ای و خطی پوشش داده شد، سپس طول کابل‌های بدست آمده از این روش را ورودی مدل

1 Reachable workspace

مجازی ربات قرار داده و موقعیت‌ها و زوایا جمع‌آوری شدند. با در نظر گرفتن طول کابل‌ها به عنوان ورودی شبکه عصبی و شش درجه آزادی ربات شامل موقعیت‌ها و زوایا به عنوان خروجی آن، شبکه آموزش داده شد. از ۵۰ هزار داده جمع آوری شده کمتر از ۳۵ هزار داده برای آموزش شبکه[1] و حدود ۱۸ هزار داده جهت تست[2] آموزش صورت گرفته، انتخاب شدند. شایان ذکر است که در شبکه عصبی لولیمات به منظور انجام آموزش برای هر خروجی یکبار شبکه اجرا می‌شود. در نمودارهای شکل‌های ۹ و ۱۰ خطای دنبال کردن هر یک



شکل ۹. خطای داده‌های آموزش شبکه عصبی.
Fig 9. Errors of training Data in neural network.

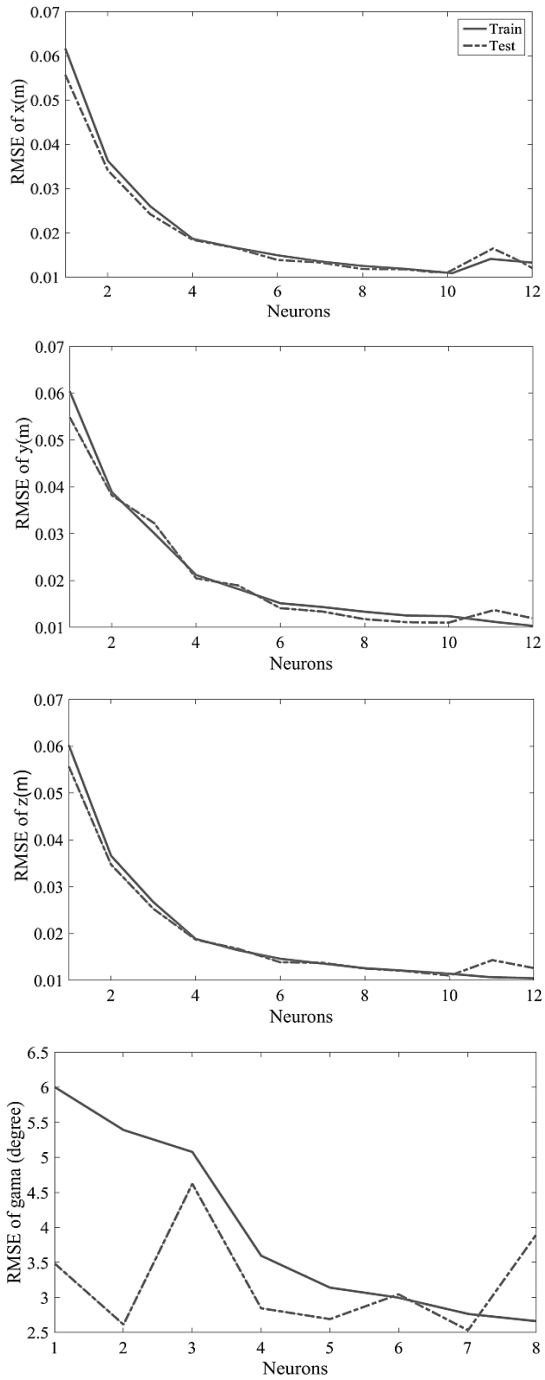


شکل ۱۰. خطای داده‌های تست شبکه عصبی.
Fig 10. Errors of testing Data in neural network.

1 Train samples
2 Test samples

از پارامترهای خروجی برای داده‌های آموزش و تست آورده شده است.

همچنین در نمودارهای شکل ۱۱ تعداد نورون‌های اختصاص داده شده جهت آموزش هریک از خروجی‌ها و میانگین مجموع مربعات خطای[1] دنبال کردن آورده شده است. همانگونه که در این نمودارها مشخص است خطای موقعیت حدود ۲ سانتیمتر و خطای زوایا حدود ۵ درجه است که با توجه به بزرگی فضای‌کاری ربات مورد بررسی



شکل ۱۱. میانگین مربع خطا تست و آموزش شبکه عصبی.
Fig 11. RMSE of test and train samples of neural network.

1 Root Mean Square Error (RMSE)

خطاهای قابل قبول هستند. همچنین تعداد نورون‌های انتخاب شده طبق نمودار به ترتیب برای محور x، ۱۰ نورون، y، ۱۰ نورون، z، ۱۰ نورون و زاویه گاما ۶ نورون بوده است. این تعداد نورون به روش سعی و خطا و تا زمانی که داده های آموزش و تست ما کمترین خطا و فاصله را از یکدیگر دارند مشخص شده‌اند. اعداد خطا از گزارش میانگین قدر مطلق خطا داده‌های تست که مستقل از داده‌های آموزش هستند، گزارش شده است. این تعداد داده برای تست حدود ۲۰۰۰۰ عدد هستند. بدین گونه که از کل خطاهای ایجاد شده قدر مطلق گرفته و سپس میانگین‌گیری روی داده‌های بدست آمده صورت گرفته است.

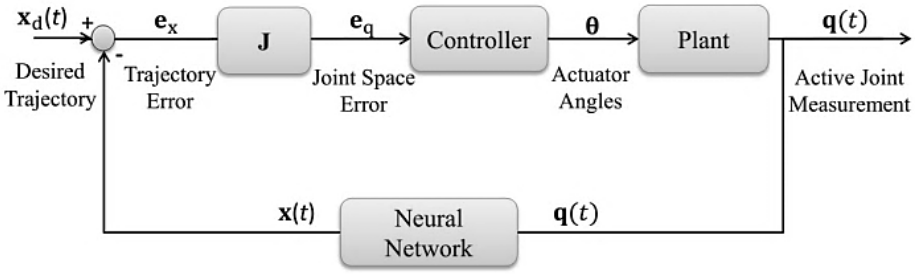
۴- کنترل ربات

الگوریتم کنترلی مورد استفاده در این بخش مقاله در شکل ۱۲ آورده شده است. ورودی مطلوب در این الگوریتم **x** ، **y** و **z** است زیرا به دلیل وجود ۴ عملگر فقط ۴ درجه آزادی ربات قابل کنترل هستند و تنها موقعیت‌ها برای ما مهم هستند. ازآنجایی‌که با پسخور کردن موقعیت ربات بدست آمده از سینماتیک مستقیم خطای موقعیت جبران می‌شود، می‌توان با فرض خوبی مجری نهایی ربات را به صورت یک نقطه متمرکز دارای جرم در نظر گرفت. در نتیجه معادلات سینماتیک وارون تنها به موقعیت‌ها (و نه زوایا) ربات وابسته خواهند شد. با این فرض در رابطه (۱)، b صفر خواهد شد همچنین ماتریس ژاکوبین ربات از یک ماتریس $\mathbf{n}\times۶$ به یک ماتریس $\mathbf{n}\times۳$ تبدیل می‌شود که از رابطه (۷) محاسبه خواهد شد:

$$\mathbf{J}=\begin{bmatrix}\mathbf{e}_1\\ \mathbf{e}_2\\ \vdots\\ \mathbf{e}_n\end{bmatrix}^{\mathrm{T}},\quad \mathbf{e}_i=\frac{[\mathbf{c}-\mathbf{a}_i]^{\mathrm{T}}}{\mathbf{l}_i} \tag{۷}$$

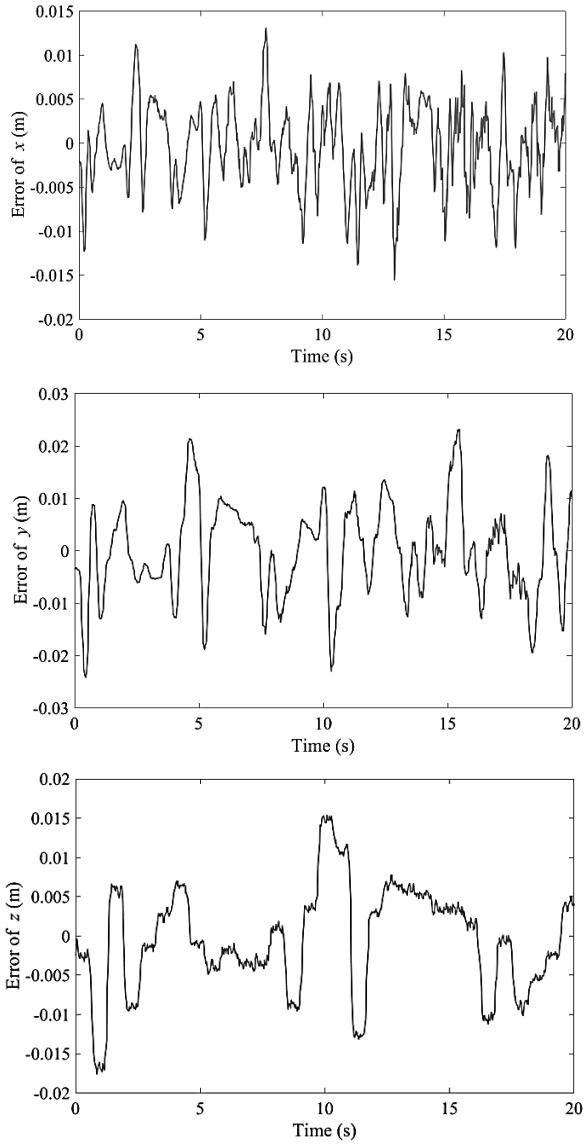
موقعیت نهایی ربات به کمک شبکه عصبی بدست آمده و به صورت حلقه بسته با مقدار مطلوب مقایسه می‌شود. تلاش برای از بین بردن خطای بدست آمده توسط کنترلر تناسبی مشتق‌گیر[2] با مقدار ضرایب k_p =۳/۴ و k_d = ۰/۱ انجام می‌شود. الگوریتم کنترلی اشاره شده در محیط شبیه‌سازی نرم‌افزار متلب صورت گرفت. همانگونه که در نمودارهای شکل ۱۳ آورده شده است خطای دنبال کردن برای یک مسیر مارپیچ، در بدترین حالت حدود ۲ سانتیمتر است که با توجه به بزرگی فضای‌کاری ربات خطای قابل قبولی است. همچنین

2 Proportional-Derivative (PD)



شکل ۱۲. الگوریتم کنترلی پیشنهادی برای کنترل موقعیت ربات.
Fig 12. The proposed block diagram structure of kinematic control.

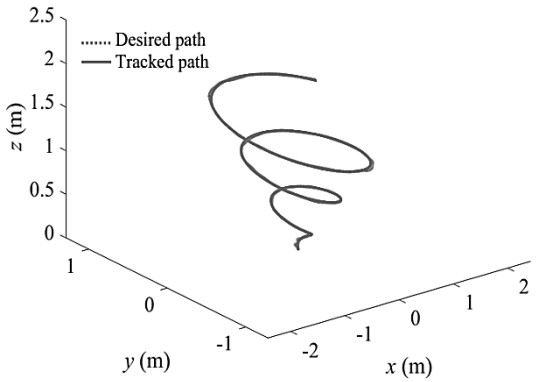
در نمودار شکل ۱۴ مسیر مطلوب و مسیر پیموده شده توسط ربات در یک نمودار ۳ بعدی آورده شده است. از این نمودار عملکرد مطلوب کنترلر به خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۱۳. خطای دنبال کردن مسیر مارپیچ
Fig 13. Tracking errors of spiral path.

۵- پیاده‌سازی عملی

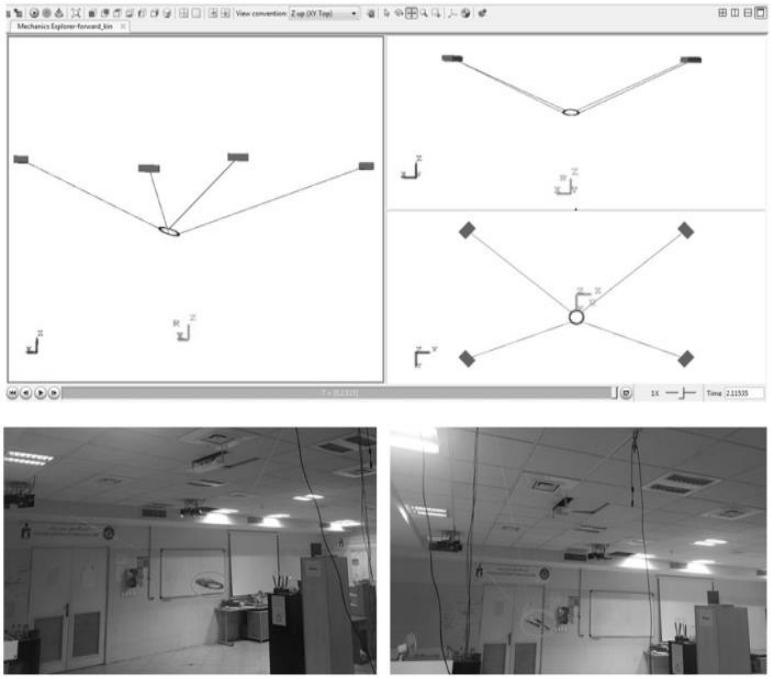
به منظور اطمینان از صحت عملکرد روش کنترلی ارائه شده در عمل، این الگوریتم به صورت عملی روی ربات موجود در آزمایشگاه تعامل انسان و ربات دانشگاه تهران پیاده‌سازی شده است. همانگونه که در قبل توضیح داده شد، موقعیت ربات از نتایج آموزش شبکه عصبی لولیمات روی دیتاهای گرفته شده از محیط شبیه‌سازی که به خوبی مشخصات دینامیکی و هندسی ربات را در بر گرفته است، بدست آمده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، در قسمت‌های مختلف فضای‌کاری ربات نتایج محیط شبیه‌سازی برای طول کابل‌های مشخص با مکان ربات در عمل مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است که طول کابل‌ها از دیتاهای گزارش شده از انکودر موتورها و با توجه به طول اولیه آنها در نقطه مرجع ربات در هر لحظه بدست می‌آیند. نتایج مسیریابی حاصل از این پیاده‌سازی در شکل قابل مشاهده است.



شکل ۱۴. مقایسه مسیر حرکت مجری نهایی با مسیر مطلوب.
Fig 14. Comparison of robot's path and robot's desired path

۶- نتیجه‌گیری

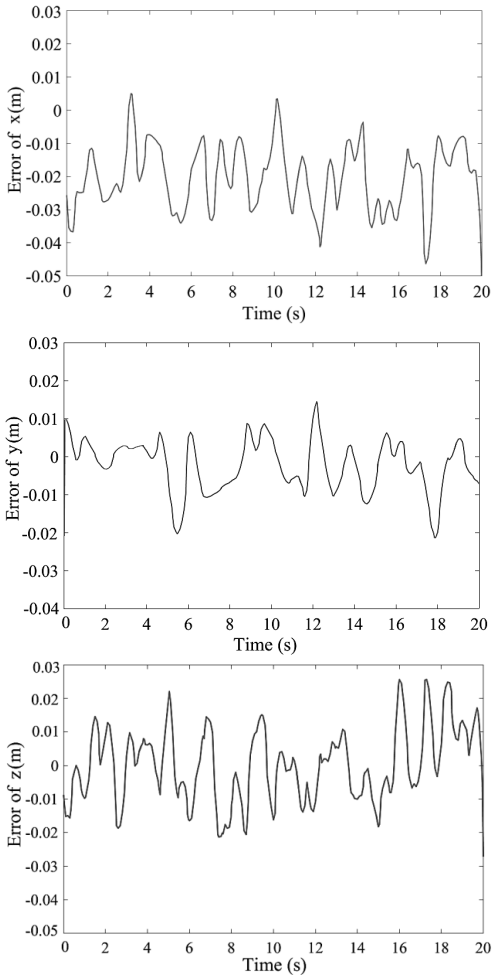
در این مقاله به منظور پیدا کردن موقعیت مجری نهایی ربات‌های



شکل ۱۵. مقایسه نتیجه مدل شبیه‌سازی با مکان قرارگیری ربات.
Fig 15. Comparison of robot's position in simulation and real environment.

کابلی نامقید در هر لحظه و استفاده از آن در الگوریتم‌های کنترلی روشی بر مبنای شبکه عصبی پیشنهاد شد. به دلیل لزوم در نظر گرفتن همزمان هندسه و استاتیک ربات‌های نامقید، مساله سینماتیک مستقیم به یک مساله بهینه‌سازی جهت کمینه کردن انرژی پتانسیل ربات، تبدیل شد. با توجه به زمانبر و وابسته به مقدار اولیه بودن حل این مساله بهینه‌سازی، این روش برای کاربردهای عملی مناسب نمی‌باشد. لذا جهت حل این مشکل، با استفاده از شبکه عصبی لولیمات روی داده‌های حاصل از محیط شبیه‌سازی روند آموزش انجام شده و از نتایج آن به صورت هم‌زمان در الگوریتم کنترلی استفاده شد. خطای شبکه در فضای‌کاری ربات، ۰/۴ درصد در موقعیت‌ها و حدود ۴ درصد برای زوایا بدست آمد. مدل شبیه‌سازی طراحی شده بسیار دقیق بوده و قابلیت در نظر گرفتن دینامیک ربات و کابل برای هر نوع ربات کابلی با هر تعداد کابل را دارد. همچنین علاوه بر لحاظ کردن اثر نیروهای خارجی وارد بر ربات، دیگر نیازی به استفاده از سنسورهای گران قیمت و دردسرهای ناشی از کالیبره کردن آن‌ها جهت بدست آوردن موقعیت ربات نخواهد بود. جهت نشان دادن یکتا و کمینه کلی بودن جواب بدست آمده تحلیل فضای کاری صورت گرفت.

با استفاده از اطلاعات شبکه عصبی آموزش داده شده الگوریتم کنترلی طراحی و در محیط شبیه‌سازی متلب پیاده‌سازی شد. مشاهده شد که حداکثر خطای مسیریابی در فضای‌کاری معرفی



شکل ۱۶. خطای دنبال کردن مسیر مارپیچ در پیاده سازی عملی.
Fig 16. Tracking errors of spiral path in practical test.

شده ۰/۴ درصد است. با توجه به بزرگی فضای‌کاری ربات مورد بررسی خطای بدست آمده بسیار خوب و قابل قبولی است. همچنین پیاده‌سازی عملی روش کنترلی ارائه شده و استفاده از نتایج شبکه عصبی آموزش دیده بر روی ربات کابلی فضایی غیرمقید موجود در آزمایشگاه تعامل انسان و ربات دانشگاه تهران انجام گرفت و نتایج این مسیریابی که حاکی از صحت عملکرد الگوریتم کنترلی پیشنهاد شده هستند، گزارش شدند.

مراجع

[1] J.-P. Merlet, Parallel robots: Springer Science & Business Media, 2006.

[2] P. Dewdney, M. Nahon, B. Veidt, The large adaptive reflector: a giant radio telescope with an aero twist, Canadian aeronautics and space journal, Vol. 48, No. 4, pp. 239-250, 2002.

[3] R. G. Roberts, T. Graham, T. Lippitt, On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable-suspended robots, Journal of Field Robotics, Vol. 15, No. 10, pp. 581-597, 1998.

[4] A. Ming, T. Higuchi, Study on multiple degree-of-freedom positioning mechanism using wires. I: Concept, design and control, International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 28, No. 2, pp. 131-138, 1994.

[5] H. Bayani, M. Tale Masouleh, A. Kalhor, Practical Performance Comparison of Pole placement and Sliding Mode Controller for Position Control of Cable-driven Parallel Robots Using Visual Servoing, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 12, pp. 63-74, 2015.

[6] H. D. Taghirad, M. Nahon, Kinematic analysis of a macro–micro redundantly actuated parallel manipulator, Advanced Robotics, Vol. 22, No. 6-7, pp. 657-687, 2008.

[7] A. Pott, An algorithm for real-time forward kinematics of cable-driven parallel robots, Advances in Robot Kinematics: Motion in Man and Machine, pp. 529-538, 2010.

[8] R. Babaghasabha, M. A. Khosravi, H. D. Taghirad, Adaptive control of KNTU planar cable-driven parallel robot with uncertainties in dynamic and kinematic parameters, in: Cable-Driven Parallel Robots, Eds., pp. 145-159: Springer, 2015.

[9] M. Carricato, J.-P. Merlet, Geometrico-static analysis of under-constrained cable-driven parallel robots, Advances in Robot Kinematics: Motion in Man and Machine, pp. 309-319, 2010.

[10] V. Schmidt, B. Müller, A. Pott, Solving the forward kinematics of cable-driven parallel robots with neural networks and interval arithmetic, in: Computational Kinematics, Eds., pp. 103-110: Springer, 2014.

[11] H. Sadjadian, H. Taghirad, A. Fatehi, Neural networks approaches for computing the forward kinematics of a redundant parallel manipulator, International Journal of Computational Intelligence, Vol. 2, No. 1, pp. 40-47, 2005.

[12] M. Dehghani, M. Ahmadi, A. Khayatian, M. Eghtesad, M. Farid, Neural network solution for forward kinematics problem of HEXA parallel robot, in Proceeding of, IEEE, pp. 4214-4219.

[13] A. Ghasemi, M. Eghtesad, M. Farid, Neural network solution for forward kinematics problem of cable robots, Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol. 60, No. 2, pp. 201-215, 2010.

[14] N. Michael, J. Fink, V. Kumar, Cooperative manipulation and transportation with aerial robots, Autonomous Robots, Vol. 30, No. 1, pp. 73-86, 2011.

[15] J. Fink, N. Michael, S. Kim, V. Kumar, Planning and control for cooperative manipulation and transportation with aerial robots, The International Journal of Robotics Research, Vol. 30, No. 3, pp. 324-334, 2011.

[16] J.-F. Collard, P. Cardou, Computing the lowest equilibrium pose of a cable-suspended rigid body, Optimization and Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 457-476, 2013.

[17] A. Berti, J.-P. Merlet, M. Carricato, Solving the direct geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots by interval analysis, The International Journal of Robotics Research, Vol. 35, No. 6, pp. 723-739, 2016.

[18] J.-P. Merlet, Preliminaries of a New Approach for the Direct Kinematics of Suspended Cable-Driven Parallel Robot with Deformable Cables, in: New Trends in Mechanism and Machine Science, Eds., pp. 355-362: Springer, 2017.

[19] J.-P. Merlet, Direct Kinematics of CDPR with Extra

Cable Orientation Sensors: The 2 and 3 Cables Case with Perfect Measurement and Ideal or Elastic Cables, in: Cable-Driven Parallel Robots, Eds., pp. 180-191: Springer, 2018.

[20] A. Aflakiyan, M. Tale Masouleh, H. Bayani, R. Sadeghian, Path planning of cable driven parallel robots in the presence of dynamic obstacles via potential field using computed torque control method, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 109-118, 2016.

[21] A. Aflakiyan, H. Bayani, M. T. Masouleh, Computed torque control of a cable suspended parallel robot, in Proceeding of, IEEE, pp. 749-754.

[22] M. A. Khosravi, H. D. Taghirad, Robust PID control of fully-constrained cable driven parallel robots, Mechatronics, Vol. 24, No. 2, pp. 87-97, 2014.

[23] J. Rezaie, B. Moshiri, A. Rafati, B. N. Araabi, Modified LOLIMOT algorithm for nonlinear centralized Kalman filtering fusion, in Proceeding of, IEEE, pp. 1-8.

این صفحه عمداً خالی است