



حل مساله سینماتیک مستقیم ربات‌های کابلی نامقید با استفاده از شبکه عصبی به منظور 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

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

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 بدون سرنشین 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، در لحظه یا برخظ 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.

۱- مقدمه

با گسترش روزافزون استفاده از ربات‌ها در کاربردهای مختلف، نیاز به ساختارهایی که محدودیت‌های ربات‌های سری و موازی، از جمله فضای کاری 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]. به منظور 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^۲، 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 [۵-۸]. 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 به منظور 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.

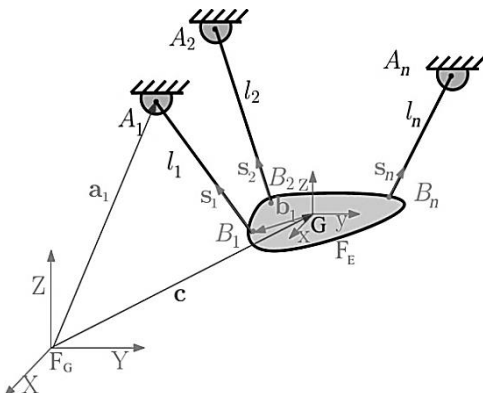


گرفته در راستای کمینه کردن انرژی در پیش گرفته شد. با این تفاوت که محدوده پایین مساله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم شاخه و کران^۸ بدست آمد، که توانایی محاسبه نقطه کمینه کلی^۹ را از مساله بهینه‌سازی دارد و محل مرکز جرم مجری نهایی را بدست می‌آورد [۱۶]. همچنین این اطلاعات برای اطمینان از حرکت بدون برخورد 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 در نظر گرفتن دینامیک کابل‌ها در حالت عمومی دست یافته و به صورت 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 به منظور مشخص نمودن موقعیت نهایی مجری نهایی ربات‌های کابلی است که بتوان از آن با دقت بالا در الگوریتم‌های کنترلی به صورت هم‌زمان استفاده کرد. همانگونه که گفته شد، به منظور 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

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 ربات‌های 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 متغیرها، 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

- 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



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

$${}^{F_G}R_{F_E} = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & c\gamma s\alpha s\beta - c\alpha s\gamma & c\alpha c\gamma s\beta + s\alpha s\gamma \\ c\beta s\gamma & c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & c\alpha s\beta s\gamma - c\gamma s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

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]:

$$\dot{\mathbf{l}} = \mathbf{J}^T \dot{\mathbf{t}} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، بردار جابه‌جایی طول کابل‌ها و بردار سرعت‌های خطی و زاویه‌ای مجری نهایی است. در این معادله ماتریس، ژاکوبین^۲ ربات، از رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_1 & \mathbf{R}\mathbf{b}_1 \times \mathbf{s}_1 \\ \mathbf{s}_2 & \mathbf{R}\mathbf{b}_2 \times \mathbf{s}_2 \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{s}_n & \mathbf{R}\mathbf{b}_n \times \mathbf{s}_n \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

در رابطه (۴) بردار یکه در راستای کابل $\hat{\mathbf{a}}_i$ 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.

شبه‌استاتیکی حرکت ربات در فضای کاری^۱ 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 ($i=1,2,\dots,n$) به ترتیب نقاط اتصال آمین کابل به پایه و مجری نهایی هستند، l_i بردار طول کابل $\hat{\mathbf{a}}_i$ و s_i بردار یکه در راستای آن است. \mathbf{a}_i و \mathbf{b}_i به ترتیب بردار اتصال A_i ‌ها به مرکز مختصات G (مرجع) و بردار اتصال B_i ‌ها 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]:

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

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

نامقید یک مدل شبیه‌سازی با در نظر گرفتن دینامیک ربات و کابل‌ها و جهت حل شبه استاتیکی حرکت ربات در فضای کاری 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^۱ 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 مفصل 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.

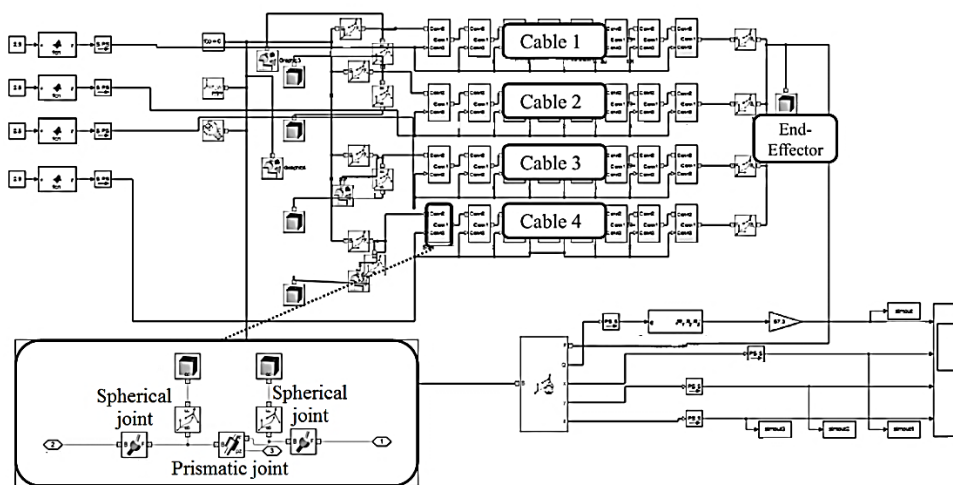
در این بررسی قطر مجری نهایی کوچک ۴ سانتیمتر و مجری نهایی بزرگ ۱۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. با اضافه کردن قیدهای هندسی به ربات مساله بهینه‌سازی توضیح داده شده به یک مساله بهینه‌سازی محدب تبدیل خواهد شد. می‌توان نشان داد که جواب این مساله یکتا و کمینه محلی همان کمینه کلی در فضای کاری قابل دسترس ربات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

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

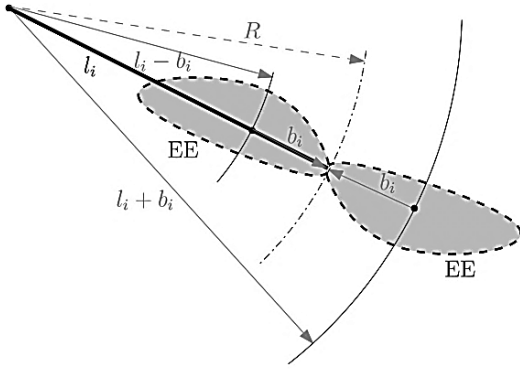
$$\begin{aligned} \text{Find: } \mathbf{v} &= [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T \\ \mathbf{l}_i &= \mathbf{c} + \mathbf{a}_i - {}^F\mathbf{e}\mathbf{R}_{F_E} \times \mathbf{b}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ \min(\arg_z(\text{PE})) & \\ \text{s. t. : } \|\mathbf{l}_i\|^2 &\leq \mathbf{l}_i \\ \mathbf{l}_b \leq [x, y, z] \leq \mathbf{l}_b, \quad -\frac{\pi}{4} \leq [\alpha, \beta, \gamma] \leq \frac{\pi}{4} \end{aligned} \quad (5)$$

در روابط فوق \mathbf{l}_b و \mathbf{u}_b 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

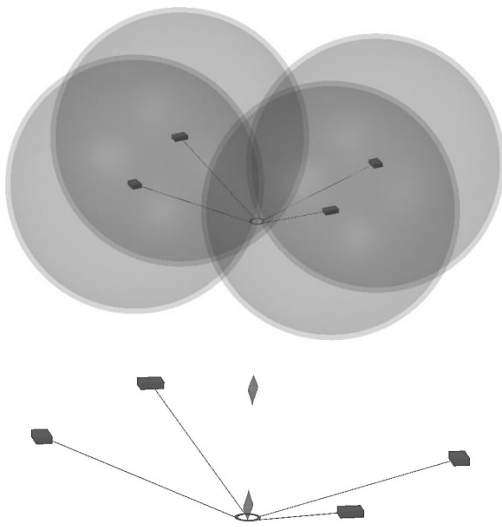


شکل ۲. مدل ربات در محیط شبیه‌سازی مکانیکی نرم افزار متلب
Fig 2. Simulation model of the under study CDPR in Matlab/ SimMechanics

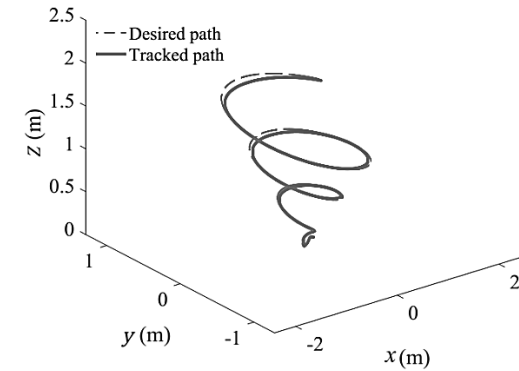
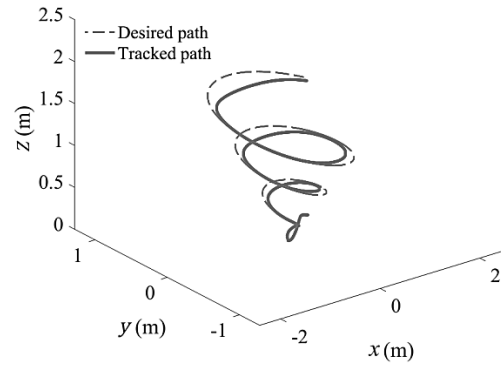


شکل ۴. محدوده فضای کاری کابل دارای کشش.
Fig 4. The workspace of each taut cable.

همچنین به دلیل لزوم کمینه شدن انرژی پتانسیل هر جسم در عالم مادی، مرکز جرم مجری نهایی تمایل به فرار 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 فضای کاری 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.



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 نظر گرفتن 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:

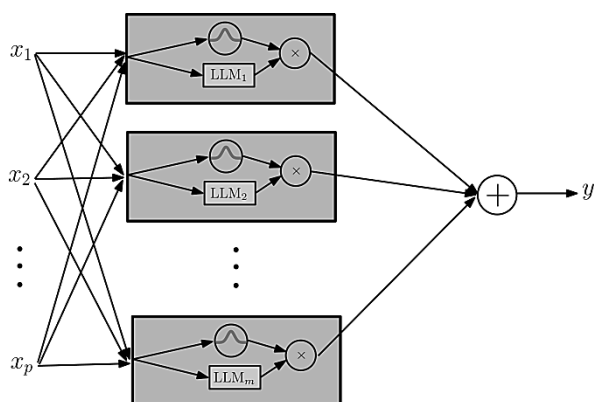
$$(x_i - x_{i0})^2 + (y_i - y_{i0})^2 + (z_i - z_{i0})^2 = R_i^2 \quad (6)$$

$$l_i - b_i \leq R_i \leq l_i + b_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

به همین ترتیب با اضافه شدن تعداد کابل‌ها فضای کاری 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. فضای کاری بدست آمده از برخورد پوسته‌های کروی دارای یک نقطه کمینه کلی می‌باشد. این مساله به سادگی در شکل ۵ قابل مشاهده است.

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^۱ 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^۲ 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.



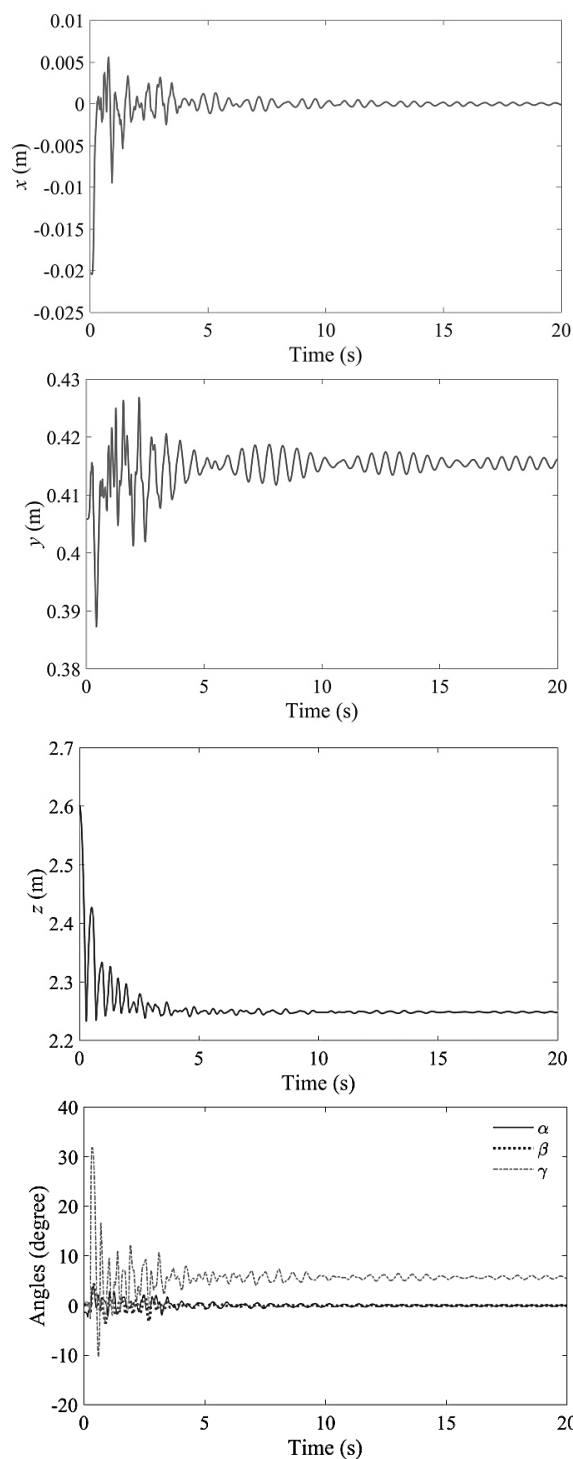
شکل ۷. ساختار شبکه‌ای لولیمات با m نرون و p ورودی.
Fig 7. The structure of a LoLiMot neural network with m neurons and p inputs.

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:

$$\hat{y}_i = \omega_{i0} + \omega_{i1}x_1 + \dots + \omega_{ip}x_p \quad (7)$$

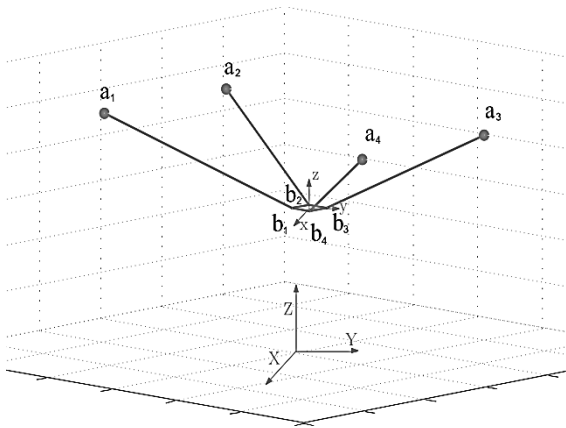
لازم به ذکر است که مسیر مطلوب در تمامی بخش‌های مقاله و در کنترل شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی به صورت ماریج از رابطه زیر است:

$$x = 0.05 * t * \sin(t), \quad y = 0.05 * t * \cos(t), \quad z = 0.05 * t$$



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

1 LoLiMot
2 Neuron



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
$(m \times 10^{-3})a_1$	[-130, 240, 260]
$(m \times 10^{-3})a_2$	[130, -240, 260]
$a_3(m \times 10^{-3})$	[-130, -240, 260]
$(m \times 10^{-3})a_4$	[-130, -240, 260]
$b_1(m \times 10^{-3})$	[-10, 10, 0]
$b_2(m \times 10^{-3})$	[10, 10, 0]
$b_3(m \times 10^{-3})$	[10, -10, 0]
$b_4(m \times 10^{-3})$	[-10, -10, 0]
$m (kg \times 10^{-3})$	600
$I_{xx}(kg.m^2 \times 10^{-3})$	8
$I_{yy}(kg.m^2 \times 10^{-3})$	8
$I_{zz}(kg.m^2 \times 10^{-3})$	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 فضای کاری قابل دسترس ربات^۱ (این فضای کاری 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، فضای کاری با حرکت‌های لایه لایه‌ای و خطی پوشش داده شد، سپس طول کابل‌های بدست آمده از این روش را ورودی مدل

که در آن ω_{ij} پارامتر مربوط به مدل خطی نرون \hat{I} است. در نهایت خروجی حاصل از الگوریتم لولیمات در رابطه (۸) آورده شده است:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^M \hat{y}_i \phi_i(x) \quad (8)$$

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

$$\sum_{i=1}^M \phi_i(x) = 1 \quad (9)$$

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

$$\phi_i(u) = \frac{\mu_i(u)}{\sum_{j=1}^M \phi_j(u)} \quad (10)$$

$$\mu_i(u) = e^{-\frac{(u_1 - c_{i1})^2}{2\sigma_{i1}^2}} \times \dots \times e^{-\frac{(u_p - c_{ip})^2}{2\sigma_{ip}^2}} \quad (11)$$

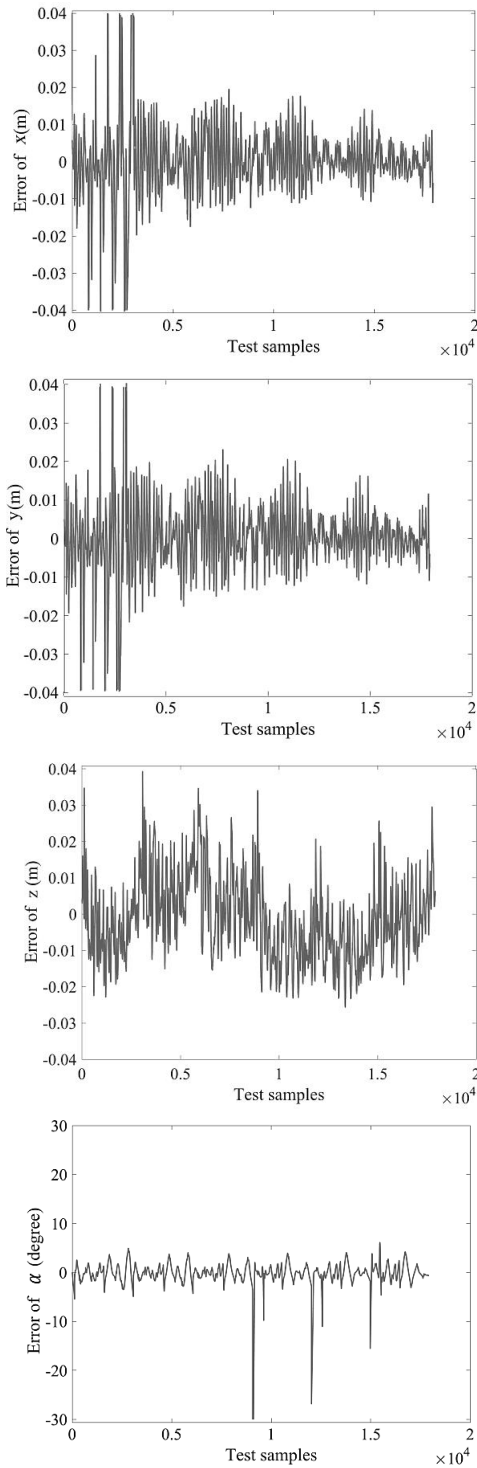
که در آن C_{ij} پارامترهای مرکز هر ناحیه و σ_{ij} انحراف معیار می‌باشد. بنابراین الگوریتم لولیمات دارای دو نوع متغیر شامل متغیرهای مدل خطی محلی (ω_{ij}) و پارامترهای توابع تعلق (σ_{ij} , C_{ij}) است. با استفاده از تکنیک حداقل مربعات متغیرهای مربوط به مدل‌های خطی محلی قابل محاسبه است. برای محاسبه متغیرهای 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 C_{ij} و ابعاد هر یک از نواحی برای متغیر σ_{ij} توابع تعلق، استفاده می‌گردند.

1 Reachable workspace

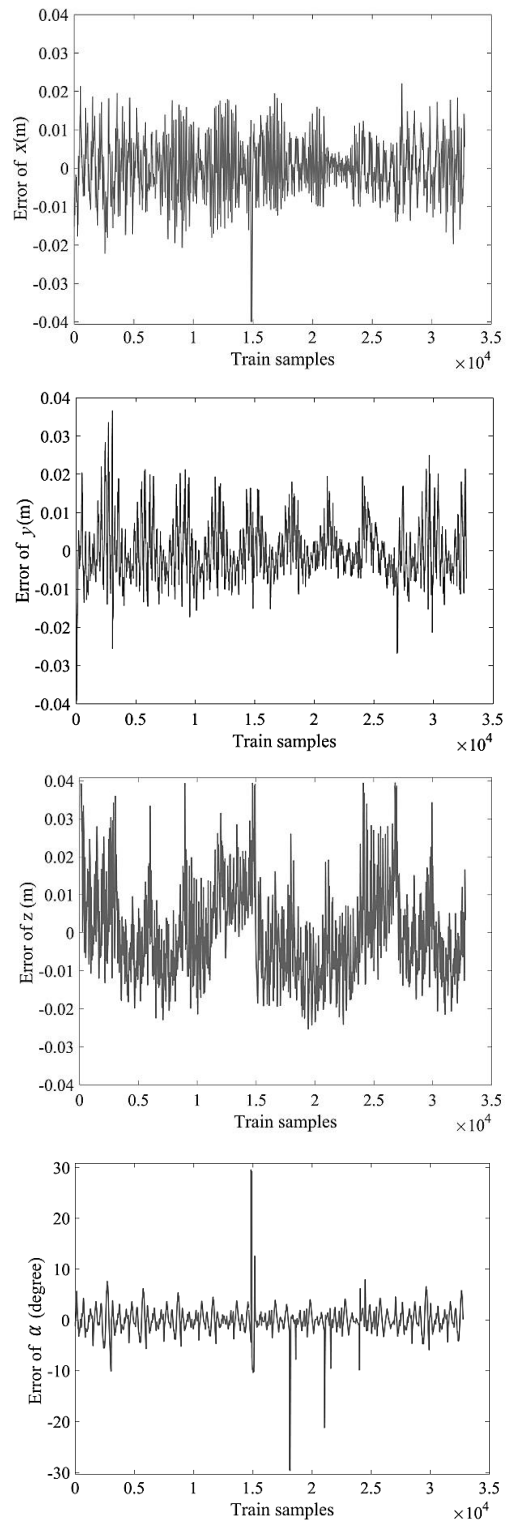
داده برای آموزش شبکه^۱ و حدود ۱۸ هزار داده جهت تست^۲ آموزش صورت گرفته، انتخاب شدند. شایان ذکر است که در شبکه عصبی لولیمات به منظور انجام آموزش برای هر خروجی یکبار شبکه اجرا می‌شود. در نمودارهای شکل‌های ۹ و ۱۰ خطای دنبال کردن هر یک

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 جمع‌آوری شده کمتر از ۳۵ هزار



شکل ۱۰. خطای داده‌های تست شبکه عصبی.

Fig 10. Errors of testing Data in neural network.



شکل ۹. خطای داده‌های آموزش شبکه عصبی.

Fig 9. Errors of training Data in neural network.

- 1 Train samples
- 2 Test samples

خطاهای قابل قبول هستند. همچنین تعداد نورون‌های انتخاب شده طبق نمودار به ترتیب برای محور X ، Y ، Z ، 10 نورون، 10 نورون و زاویه گاما 6 نورون بوده است. این تعداد نورون به روش سعی و خطا و تا زمانی که داده‌های 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 20000 عدد هستند. بدین گونه که از کل خطاهای ایجاد شده قدر مطلق گرفته و سپس میانگین‌گیری روی داده‌های بدست آمده صورت گرفته است.

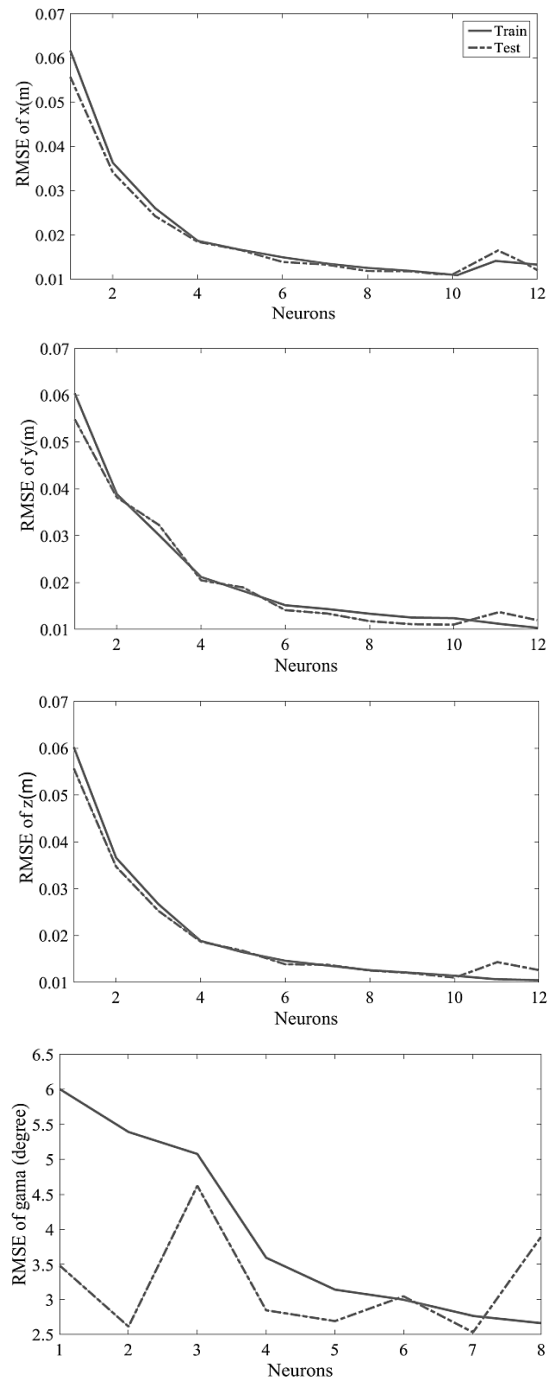
۴- کنترل ربات

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 4 عملگر فقط 4 درجه آزادی ربات قابل کنترل هستند و تنها موقعیت‌ها برای ما مهم هستند. از آنجایی که 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 $6 \times n$ به یک ماتریس $3 \times n$ تبدیل می‌شود که از رابطه (۷) محاسبه خواهد شد:

$$J = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix}^T, \quad e_i = \frac{[c-a_i]^T}{l_i} \quad (7)$$

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^۲ با مقدار ضرایب $k_p = 3/4$ و $k_d = 0/1$ 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 2 سانتیمتر است که با توجه به بزرگی فضای کاری ربات خطای قابل قبولی است. همچنین

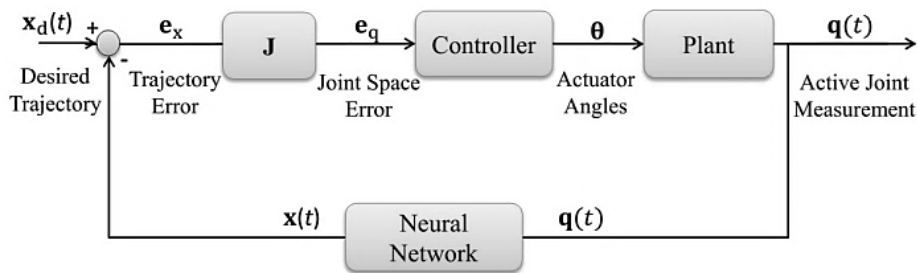
از پارامترهای خروجی برای داده‌های آموزش و تست آورده شده است. همچنین در نمودارهای شکل ۱۱ تعداد نورون‌های اختصاص داده شده جهت آموزش هر یک از خروجی‌ها و میانگین مجموع مربعات خطای دنبال کردن آورده شده است. همانگونه که در این نمودارها مشخص است خطای موقعیت حدود 2 سانتیمتر و خطای زوایا حدود 5 درجه است که با توجه به بزرگی فضای کاری ربات مورد بررسی



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

2 Proportional-Derivative (PD)

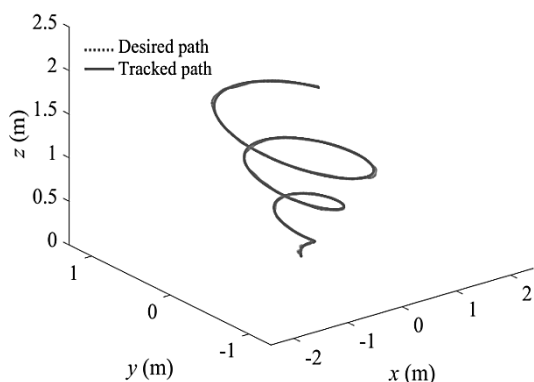
1 Root Mean Square Error (RMSE)



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

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 فضای کاری 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.

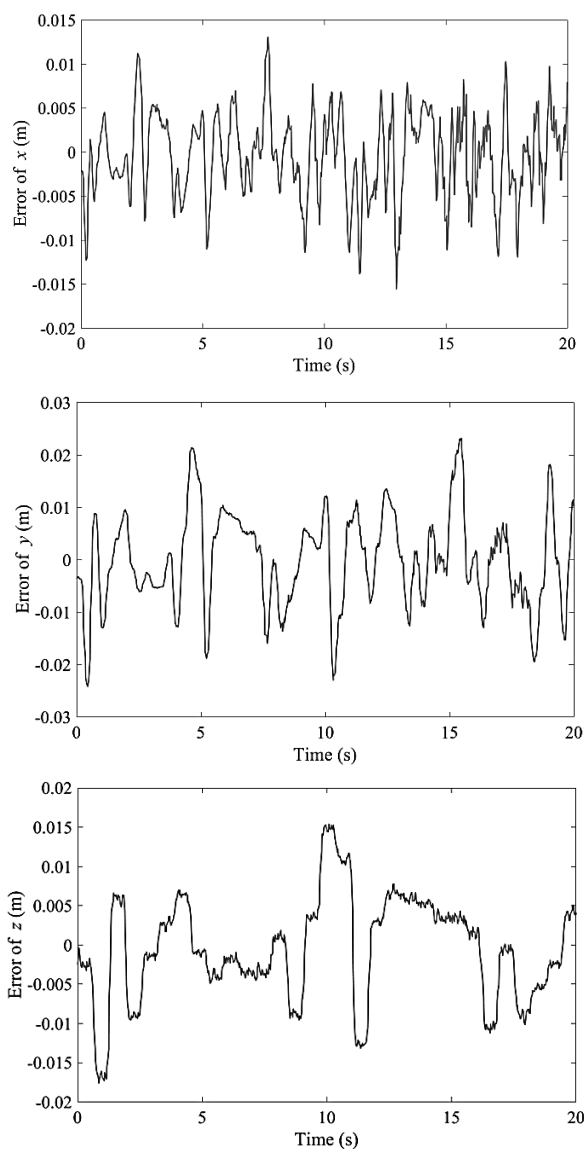


شکل ۱۴. مقایسه مسیر حرکت مجری نهایی با مسیر مطلوب.
Fig 14. Comparison of robot's path and robot's desired path

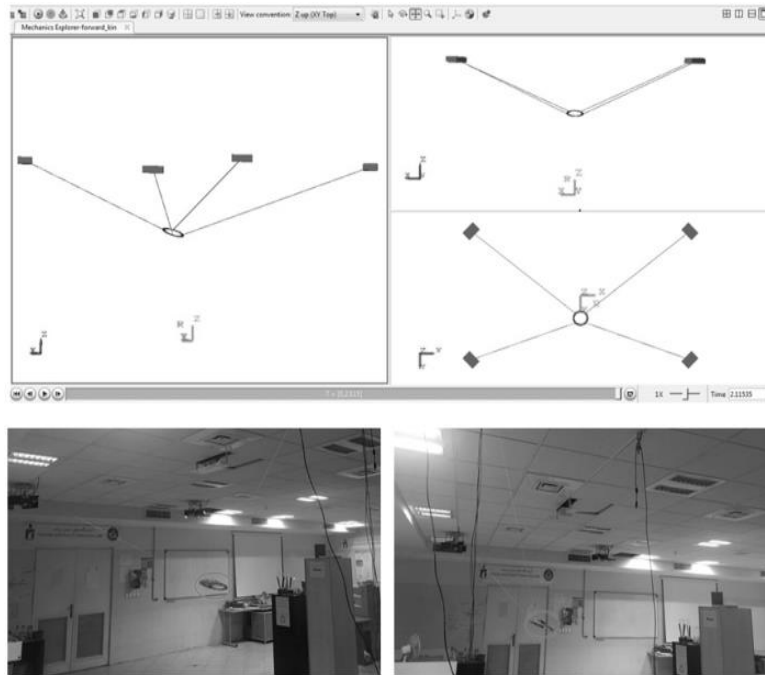
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور پیدا کردن موقعیت مجری نهایی ربات‌های

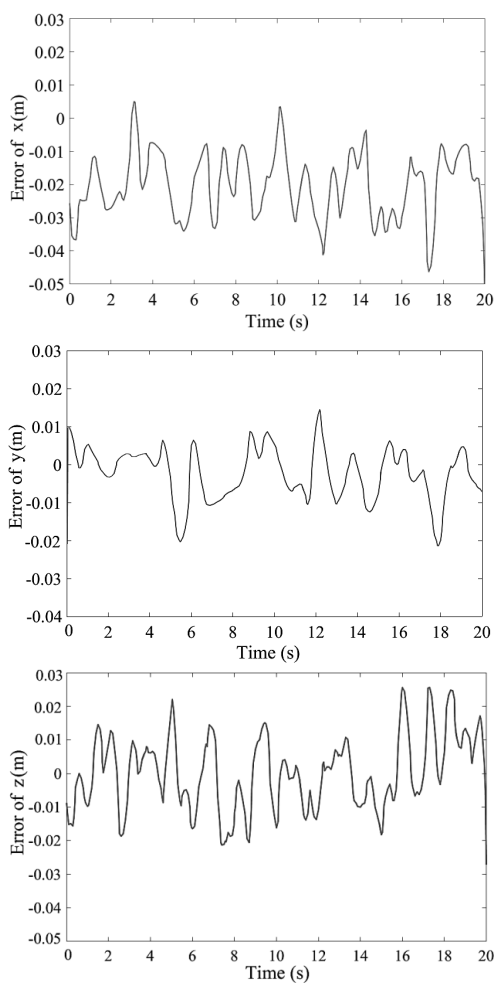
در نمودار شکل ۱۴ مسیر مطلوب و مسیر پیموده شده توسط ربات در یک نمودار ۳ بعدی آورده شده است. از این نمودار عملکرد مطلوب کنترلر به خوبی قابل مشاهده است.



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



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



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

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 فضای کاری 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 ددرس‌های 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 فضای کاری معرفی

- [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 شده ۰/۴ درصد است. با توجه به بزرگی فضای کاری 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.

- 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.
- 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,

