



Dynamic Design and Control of a Cable Driven Rehabilitation Robot with 2 Degrees of Freedom in Transverse Plane

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Morovat M.¹ MSc,
Safarabadi Farahani M.^{*1} PhD,
Sadigh Damghani M.¹ PhD,
Mashayekh A.¹ MSc

How to cite this article

Morovat M, Safarabadi Farahani M, Sadigh Damghani M, Mashayekh A. Dynamic Design and Control of a Cable Driven Rehabilitation Robot with 2 Degrees of Freedom in Transverse Plane. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(5):1295-1308.

ABSTRACT

Diseases such as heart and brain attacks, which sometimes lead to movement disorders in people, has raised with an increasing community age. Nowadays, medical scientists replaced rehabilitation robots instead of traditional therapeutic methods. Design and implementation of a low-cost and home-like usable device for a patient was the primary goal of this research. In this study, a robot which consisted of cable and springs for movement in the transverse plane of the human body was introduced. For this purpose, stiffness and free length of springs were achieved by an optimization process, firstly. Afterward, static and dynamic workspace calculated to identify robot mechanical characteristic. At the end, controllability of the system in different paths in two conditions of presence and absence of the patient's hand was investigated and verified by the results obtained by the built device. Dynamic and static workspace indicates that a patient can do exercises with the help of the designed robot. Also, the control results and the obtained results from the implemented device test shows the stability of the control system and its ability to eliminate possible error occurring in the path.

Keywords Cable Robot; Rehabilitation Robot; Dynamic Workspace; Static Workspace; Optimization

¹Mechanical Engineering Faculty, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: College of Engineering, University of Tehran, North Amirabad, Tehran, Iran. Postal code: 1439955961
Phone: +98 (21) 61119959
Fax: +98 (21) 66261024
msafarabadi@ut.ac.ir

Article History

Received: May 04, 2019
Accepted: October 02, 2019
ePublished: May 09, 2020

CITATION LINKS

[1] Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: A systematic review [2] Robotic neurorehabilitation: A computational motor learning perspective [3] Bilateral robots for upper-limb stroke rehabilitation: State of the art and future prospects [4] Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation: State of the art and future prospects [5] RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [6] Robotic assist devices for bimanual physical therapy: Preliminary experiments [7] Robot-assisted movement training for the stroke-impaired arm: Does it matter what the robot does? [8] Cable-driven parallel robots [9] ARMin: A robot for patient-cooperative arm therapy [10] ARMin II - 7 DoF rehabilitation robot: Mechanics and kinematics Proceedings 2007 IEEE [11] Effects of intensive arm training with the rehabilitation robot ARMin II in chronic stroke patients: Four single-cases [12] Design, analysis and realization of tendon-based parallel manipulators [13] Design, implementation and clinical tests of a wire-based robot for neurorehabilitation [14] Design and optimization of a cable driven upper arm exoskeleton [15] On the design of adaptive cable-driven systems [16] Design of a mobile, inexpensive device for upper extremity rehabilitation at home [17] Controllable workspace generation for a cable-driven rehabilitation robot using neural network and based on patient's anthropometric parameters [18] Workspace improvement of two-link cable-driven mechanisms with spring cable [19] Robotic rehabilitation with the elbow stiffness adjustability

طراحی دینامیکی و کنترل ربات دو درجه آزادی کابلی بازتوانی در صفحه عرضی

محمد میلاد مروت MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مجید صفرآبادی فراہانی* PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

محمدجعفر صدیق دامغانی PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

امیرمحمد مشایخ MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

بیماری‌هایی مانند سکت‌های قلبی و مغزی که گاهی منجر به اختلالات حرکتی در افراد می‌شوند با بالارفتن میانگین سنی جامعه، افزایش یافته است. امروزه دانشمندان پزشکی برای درمان این اختلالات استفاده از ربات‌هایی تحت عنوان ربات‌های بازتوانی را جایگزین درمانگرهای سنتی کرده‌اند. هدف اصلی این پژوهش طراحی و ساخت یک ربات بازتوانی با هزینه پایین و با قابلیت استفاده خانگی برای بیمار بود. در این پژوهش رباتی ترکیبی از کابل و فنر برای حرکت در صفحه عرضی بدن انسان معرفی شد. بدین منظور، ابتدا سختی و طول آزاد فنرها، طی یک فرآیند بهینه‌سازی به دست آمده است. سپس ناحیه کاری استاتیکی و دینامیکی برای شناسایی رفتار مکانیکی ربات محاسبه شده است. در پایان، کنترل‌پذیری سیستم در مسیرهای مختلف و در دو حالت حضور و عدم حضور دست بیمار بررسی و با نتایج حاصل از دستگاه ساخته شده صحت‌گذاری شد. نواحی کاری استاتیکی و دینامیکی حاکم از آن است که بیمار به کمک ربات طراحی شده به خوبی می‌تواند تمرین را انجام دهد. همچنین نتایج کنترلی و نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش دستگاه ساخته شده نشان‌دهنده پایداری سیستم کنترلی و توانایی آن در از بین بردن خطاهای به‌وجودآمده احتمالی طی مسیر است.

کلیدواژه‌ها: ربات کابلی، ربات بازتوانی، ناحیه کاری استاتیکی، ناحیه کاری دینامیکی، بهینه‌سازی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۰

*نویسنده مسئول: msfarabadi@ut.ac.ir

۱- مقدمه

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در زمینه استانداردهای زندگی، امید به زندگی به طرز چشمگیری نسبت به گذشته افزایش و به تبع این موضوع، میانگین سنی افراد در بسیاری از نقاط جهان افزایش یافته است. از بیماری‌های شایعی که در سنین بالا اتفاق می‌افتد، می‌توان به سکت‌های قلبی و مغزی اشاره کرد. افراد زیادی در سراسر دنیا در سنین بالا حداقل یک بار تجربه چنین بیماری را داشته‌اند. سکت‌های قلبی و مغزی با انسداد رگ‌های منتهی به این اندام‌ها و عدم خون‌رسانی به آنها اتفاق می‌افتد و باعث عوارضی از جمله فلج شدن فرد بیمار، ناتوانی در صحبت کردن، از دست‌دادن حافظه و یا ناتوانی حرکتی و ضعف عضلانی می‌شود. نقصان حرکتی در اندام بالاتنه یکی از شایع‌ترین عوارض ناشی از

سکت است که افراد مبتلا را در انجام فعالیت‌های روزانه خود با مشکل مواجه می‌سازد. دومین عامل مرگ‌ومیر و همچنین سومین عامل ناتوانی‌های حرکتی در جهان، سکت‌های قلبی و مغزی می‌باشد. با توجه به بالا رفتن میانگین سنی جمعیت ایران و بروز سکت‌های مغزی در سالمندان، کاهش تاثیر این عارضه بر استقلال افراد سالخورده به یکی از اهداف جامعه تبدیل شده است.

پس از بروز سکت، عدم رسیدگی به بیمار ممکن است روز به روز عوارض ناشی از آن را حادث کرده و این آثار به آثاری غیرقابل درمان در فرد تبدیل شود. اما با انجام تمرین مناسب نه تنها می‌توان از تشدید این عوارض جلوگیری کرد بلکه می‌توان فرد بیمار را به مرور به شرایط اولیه بازگرداند. به این نوع از درمان اختلال حرکتی در بیمار با انجام تمرین فیزیکی، بازتوانی می‌گویند.

ظهور ربات‌ها در عرصه بازتوانی

بازتوانی نقش بسیار مهمی در کاهش اختلالات حرکتی دارد. براساس مطالعات عصب‌شناسی، تکرار تمرین در بازه زمانی طولانی مدت پس از بیماری، تاثیرات مطلوبی روی بیماران خواهد گذاشت [1].

در دهه‌های ۷۰ و ۸۰ میلادی بازتوانی به صورت سنتی و توسط افرادی که در رشته فیزیوتراپی تحصیل کرده بودند، انجام می‌شد. با طولانی شدن جلسات درمانی، تمرکز فرد درمانگر کاهش پیدا می‌کرد و خستگی ناشی از آن باعث کاهش پیشرفت روند درمان می‌شد.

ربات‌ها برخلاف انسان می‌توانند بدون خستگی حرکات تکراری را انجام دهند. به همین دلیل می‌توانند نواقصی را که در بازتوانی سنتی وجود داشت، رفع کنند [2]. از این رو در اوایل دهه ۹۰ میلادی رباتیک به علم بازتوانی ورود پیدا کرد و در سه دهه اخیر ربات‌ها در کنار انسان در این روند درمانی حضور داشته‌اند.

دسته‌بندی ربات‌های بازتوانی

یکی از مهم‌ترین مسایل در ساخت ربات‌های بازتوانی نحوه تعامل آنها با بیمار و مکانیزم‌های حرکتی آنها بوده است. بر همین اساس آنها به دو دسته کلی اگزواسکلتون (Exoskeleton) و مجری نهایی (End Effector) تقسیم‌بندی شده‌اند.

ربات‌های مجری نهایی، ربات‌هایی هستند که دست یا ساعد بیمار به یک جرم متمرکز متصل شده و نیروهای لازم از طریق این نقطه به بیمار انتقال داده می‌شود. در این نوع ربات‌ها، مفاصل حرکتی ربات و اندام‌های انسان بر هم منطبق نیست. از مزایای آن می‌توان به ساختار ساده و انعطاف‌پذیری بالا اشاره کرد. عدم توانایی کنترل گشتاور در مفاصل بیمار به صورت مجزا نیز از جمله معایب آن به شمار می‌رود [3] (شکل ۱).

رباتی که محورهای حرکتی آن منطبق بر مفاصل بیمار است را اگزواسکلتون می‌نامند. از مزایای آن می‌توان به توانایی کنترل گشتاور هر مفصل به صورت جداگانه و تعیین وضعیت دقیق بیمار اشاره کرد. همچنین وزن بالای ناشی از لینک‌های فلزی، ساختار

در همان سالیان ابتدایی، دانشمندان با استناد به اینکه تمامی حرکات دست انسان شامل حرکات نیرو ثابت یا حرکات مکان ثابت است، رباتی با دو مجری نهایی طراحی کردند که هر یک به یکی از دست‌های بیمار متصل شده و حرکات دست فقط محدود به خم کردن مچ می‌شد[6].

تمارین فیزیکی‌درمانی در سه مرحله کلی انجام می‌پذیرد که در مرحله اول بیمار تنها با حرکت دادن دست خود، الگوهای حرکتی را بازآموزی می‌کند و در مراحل بعدی به تقویت عضلات خود می‌پردازد[7]. ربات‌های بازتوانی اولیه تنها مرحله اول درمانی را انجام می‌دادند. از این رو برای درمان کامل بیمار، رباتی محدود به خط مستقیم طراحی شد[8] که در این مسیر تمرینات فعال و مقاومتی را روی دست بیمار پیاده‌سازی می‌کرد. نتایج حاصل از عملکرد این ربات بر روی سه بیمار نشان از تاثیر مثبت این ربات در روند بهبودی آنها داشت.

تا اواخر سال ۲۰۰۵ میلادی، دانشمندان ربات‌های زیادی را در این حوزه طراحی کردند که همگی ساختاری مشابه داشتند و تقریباً اشکال پیچیده‌تری از ربات‌های قبلی بودند. از عمده نقایص این نوع ربات‌ها می‌توان به محدودیت‌های حرکتی و عدم توانایی در کنترل دقیق تمامی مفاصل اشاره کرد.

پیدایش ربات‌های آگزواسکلتون

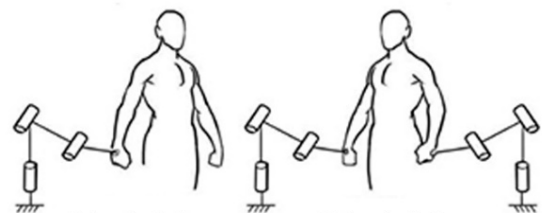
در سال ۲۰۰۷ میلادی با پیشرفت ربات‌های بازتوانی، رباتی با ساختار شبه آگزواسکلتون برای پشتیبانی از حرکات کامل مفصل شانه و همچنین خم کردن مفصل آرنج طراحی شد[9]. هدف از ساخت این ربات که آرمین نام داشت، تعامل مستقیم با اندام بیمار بود. این ربات دارای چهار مرحله کنترلی است. دو مرحله ابتدایی فقط از یک الگوریتم ساده کنترل موقعیت بهره می‌برد. در مراحل سوم و چهارم، ربات، بیمار را برای حرکت در مسیری تعیین شده کمک کرده و یا نیروی مقاوم در برابر حرکت دست او ایجاد می‌کند. در این دو مرحله از کنترل‌کننده‌های هیبریدی نیرو موقعیت استفاده می‌شود. یکی از معایب عمده آرمین، ایمنی نسبتاً پایین و عدم انعطاف آن برای استفاده بیمارانی با اندام‌های متفاوت بود.

سال‌های بعد با برطرف کردن معایب آرمین و همچنین اضافه کردن درجات آزادی برای چرخش ساعد و مچ، نسخه‌های بعدی آن تحت عنوان آرمین ۲ و ۳ به عرصه بازتوانی راه پیدا کرد و بر روی چهار بیمار مورد آزمایش قرار گرفت[10]. این آزمون‌های پزشکی نشان داد که استفاده از این نوع ربات‌ها بر روی بازآموزی حرکتی بیماران تاثیر قابل توجهی دارد[11].

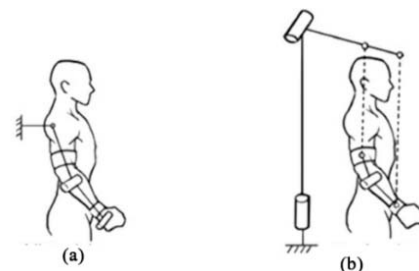
پس از اثبات تاثیرگذاری ربات‌های آگزواسکلتون در بازتوانی، پژوهش‌های فراوانی در این زمینه انجام شد که هدف از آنها بهبود عملکرد ربات آرمین بود. اما مهم‌ترین مشکل این گونه ربات‌ها، عدم ارتباط بیمار با آنها به علت ساختار پیچیده‌شان بود. همچنین استفاده از آنها به علت وزن و هزینه بالا به محیط‌های کلینیکی محدود شده بود. بهترین راه‌کار برای حل این مشکلات حذف

پیچیده و نداشتن انعطاف لازم برای تطبیق با بیماران مختلف از جمله معایب آنها است[4].

ربات‌های آگزواسکلتون همان طور که در شکل ۲ نمایش داده شده است، به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول ربات‌هایی هستند که به صورت کامل بر روی بدن انسان قرار می‌گیرند و موازی تمامی اندام‌ها، حرکات تمرینی را انجام می‌دهند. این نوع از ربات‌ها از لحاظ کنترل گشتاور مفاصل و حرکت آنها از باقی دقیق‌تر هستند ولی وزن بیش از حد و ساختار پیچیده، استفاده از آنها را محدود به محیط‌های کلینیکی کرده است. دسته دوم از ربات‌های آگزواسکلتون برای کاهش وزن به جای لینک‌های فلزی از کابل بهره بردند. استفاده از کابل موجب ایمنی بیشتر، تعامل بهتر ربات با بیمار و همچنین کاهش وزن ربات می‌شود[3].



شکل ۱) ربات‌های مجری نهایی



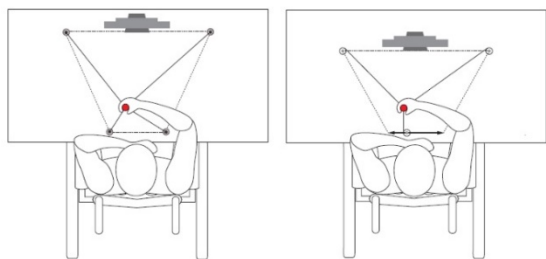
شکل ۲) ربات‌های آگزواسکلتون؛ (a) آگزواسکلتون کابلی

از معایب فیزیکی‌درمانی سنتی که در آن بیمار با کمک فرد متخصص این تمرینات را انجام می‌دهد، عدم تداوم تمرکز متخصص در جلسات طولانی مدت است. همچنین حضور فرد در کنار بیمار در تمام جلسات، از لحاظ مالی مقرون به صرفه نیست. یکی از برتری‌های ربات بر انسان عدم تاثیر کار طولانی مدت بر عملکرد آن است. از همین رو، دانشمندان به ساخت ربات‌های بازتوانی روی آورده‌اند و مقالات بسیاری در این زمینه منتشر شده است.

پیشینه ورود ربات‌ها به عرصه بازتوانی

اولین ربات‌های ساخته شده در عرصه بازتوانی ساختار بسیار ساده‌ای داشتند. از سال ۱۹۹۵ میلادی، زمانی که ام.آی.تی منیوس (MIT Manus) اولین سیستم پیشگام رباتیکی[5] برای بازتوانی ارائه شد، استفاده از ربات به جای درمانگر در بازتوانی مورد توجه قرار گرفت. در این ربات که از سیستم مجری نهایی بهره می‌برد، برای کنترل موقعیت دست، از یک مکانیزم دو میله‌ای به همراه یک کنترل‌کننده موقعیت استفاده می‌شد.

ساده‌سازی و کاهش تعداد کابل‌ها گرفتند. یکی از نیروهای مزاحمی که موجب افزایش تعداد کابل‌ها شده، نیروی وزن دست انسان است. برای از بین بردن این نیرو، در بعضی ربات‌های بازتوانی، دست روی یک سطح قرار می‌گیرد. از جمله معایب این روش آن است که اولاً اکثر این ربات‌ها به صورت مجری نهایی هستند و ثانیاً این ربات‌ها تمرین را فقط به صفحه عرضی بدن انسان محدود کرده‌اند. اما در عین حال ساختار بسیار ساده، کنترل‌پذیری و حمل‌ونقل آسان و وزن بسیار پایین از جمله مزایای نسبی آنها است. به این ربات‌ها اصطلاحاً ربات‌های رومی‌زی می‌گویند. بارزترین نتیجه تحقیقات در حوزه ربات‌های رومی‌زی، طراحی ربات سوفیا (Sophia) بود که در شکل ۳ نمایش داده شده است. طراحی این ربات در دو نسخه ۳ و ۴ صورت گرفت که تفاوت‌های کمی با یکدیگر داشتند [15].



شکل ۳) ربات‌های بازتوانی سوفیا [15]

در سوفیا ۴ هر چهار موتور به کنترل نیروی چهار کابل که یک سر آن به گوشه‌های فریم و سر دیگر آن به جرم متصل بود، اختصاص یافت. اما سوفیا ۳ به سه کابل مجهز شد که دو کابل به گوشه فریم متصل شده و دیگری در یک خط در پایین فریم توانایی حرکت داشت. بنابراین در این ربات، سه موتور به کنترل کشش کابل‌ها و یک موتور به حرکت خطی محل اتصال یکی از کابل‌ها اختصاص یافته بود. آزمون این ربات بر روی بیماران مختلف نشان‌دهنده نتایج مثبت در بهبود آنها بود.

در مجموع می‌توان گفت که هر یک از انواع ربات‌های بازتوانی، نیازهای خاصی از بیماران را رفع می‌کند و همه آنها به نوعی تاثیر مثبت خود را در روند بهبود بیماران به اثبات رسانده‌اند. ربات‌های بازتوانی از لحاظ ساختار فیزیکی به چهار دسته کلی مجری نهایی، آگرواسکلتون، رومی‌زی و کابلی تقسیم می‌شوند. هر یک از این ربات‌ها، در علم بازتوانی کارکرد ویژه‌ای داشته و هیچ یک از عرصه پزشکی یا پس‌نکشیده‌اند. هدفی که این پژوهش دنبال می‌کند، ساخت ربات بازتوانی با ساختاری ساده و قیمت پایین برای استفاده بیماران در منزل است که در سالیان اخیر توجه کمتری به آن شده است.

۲- طراحی ربات و استخراج معادلات

هدف از این پژوهش طراحی رباتی با وزن و هزینه پایین برای بیماران پس از سکته مغزی است، به نحوی که بتوانند از این

قطعات فلزی و جایگزینی آنها با کابل برای انتقال گشتاور و نیروی لازم به مفاصل بیمار بود. ایده استفاده از کابل هر چند به صورت بسیار ساده از همان ابتدا در کنار ساخت ربات‌های بازتوانی وجود داشت، اما در آن زمان، این ایده مورد توجه قرار نگرفت.

۵-۱- ظهور کابل در ربات‌های بازتوانی

همان طور که گفته شد، در سال‌های ابتدایی ظهور ربات‌های بازتوانی، ایده‌ای تحت عنوان استفاده از کابل برای کاهش وزن ربات‌ها پیشنهاد شد، اما به علت کاهش سختی ربات و کنترل‌پذیری نسبتاً دشوار آن، توجه ویژه‌ای به آن نشد. یکی از معایب بزرگ ربات‌های کابلی عدم توانایی ایجاد نیروی فشاری است. از همین رو برای به کنترل درآوردن آن به تعداد موتور بیشتری نیاز است. همین امر باعث به تعویق افتادن طراحی ربات‌های کابلی شده است.

یکی از مباحث حایز اهمیت در ربات‌های کابلی، ناحیه کاری این ربات‌هاست. برای کنترل یک ربات n درجه آزادی کابلی، به $n+1$ موتور نیاز است [12] که این تعداد در ربات‌های غیرکابلی کمتر است. اگر تعداد موتورها از این مقدار کمتر باشد، ربات فقط در نواحی مشخص از فضا کاملاً تحت کنترل قرار می‌گیرد.

پس از تکمیل مطالعات و آزمایشات مقدماتی، ربات نربوت (NeReBot) با استفاده از سه کابل برای کنترل سه درجه آزادی دست بیمار، ساخته شد [13]. در این ربات، کابل‌ها از یک سمت توسط غلاف به دست بیمار و از سمتی دیگر به فریمی قابل حمل متصل می‌شود. این ربات با کنترل طول هر یک از کابل‌ها تمرین بازتوانی را در دو مرحله فعال و مقاومتی انجام می‌دهد.

آزمون‌های کلینیکی بر روی دو دسته دوازده‌تایی بیماران، توسط این ربات انجام شد که نتایج آن حاکی از پیشرفت بیشتر بیماران داشت. محل اتصال کابل‌ها به بدنه اصلی در این ربات ثابت در نظر گرفته شده و محل قرارگیری آنها برای انجام تمرین مختلف توسط درمانگر قابل تنظیم است. این نوع ربات‌ها برای انتقال نیرو، فقط از کابل بهره می‌برند اما در برخی دیگر از ربات‌ها برای بالا بردن دقت ربات و کنترل‌پذیری آن، فقط به کابل بسنده نشده و از قطعات فلزی و یا مکانیزم‌های کمکی نیز در کنار آن استفاده می‌شود.

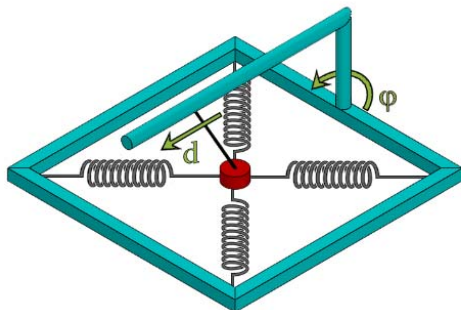
در سال ۲۰۱۱ میلادی یک ربات پنج درجه آزادی برای بازتوانی دست بیماران ناتوانی عضلانی ساخته شد [14]. در این ربات وزن موتورها از روی بدن بیمار برداشته شد تا ربات از طریق پولی و کابل نیروها را به دست وارد کند. این ربات دارای سه قسمت منحنی شکل است که روی شانه، بازو و ساعد بیمار قرار می‌گیرد و ربات از طریق اعمال نیرو به این قسمت‌ها تمرین را انجام می‌دهد.

یکی از معایب ربات‌های کابلی، تداخل بین کابل‌ها در حین انجام تمرین بازتوانی است. به همین دلیل پژوهشگران پس از انجام آزمایش‌هایی موفقیت آمیز بر روی این ربات‌ها تصمیم به

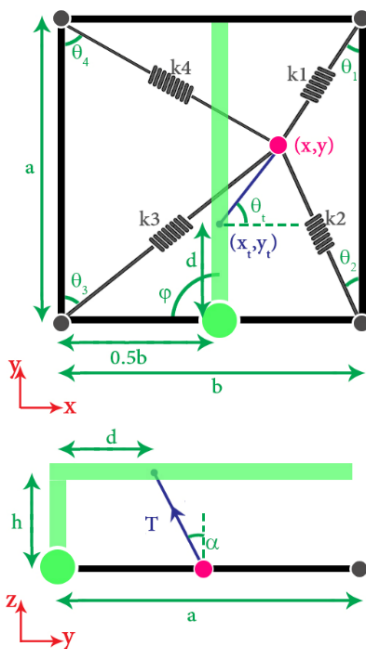
شده تا عملکرد ربات بهبود بخشیده شود. با توجه به نکات یاد شده در بالا، ربات تک کابل مطابق با شکل ۵ طراحی شد. این ربات تک کابل، سه متغیر کنترلی دارد و از یک کابل بهره می برد. این سه متغیر عبارتند از (۱) کشش کابل (۲) زاویه میله بالاسر فریم نسبت به آن (در شکل ۵ با φ نمایش داده شده است) و (۳) فاصله خطی اتصال کابل به میله تا انتهای آن (در شکل ۵ با d نمایش داده شده است).

۲-۲- استخراج معادلات حرکت ربات تک کابل

برای استخراج معادلات حرکت در دستگاه کارتیزین (که در شکل ۶ در دو نما بر روی ربات نشان داده شده است)، فرض شده جرم موثر به صورت نقطه ای و تماس بین تمامی سطوح به صورت ایده آل است. فنرهای مورد استفاده در ربات کششی بوده و در ناحیه فشاری نیرویی وارد نمی کنند.



شکل ۵) شماتیک ربات تک کابل



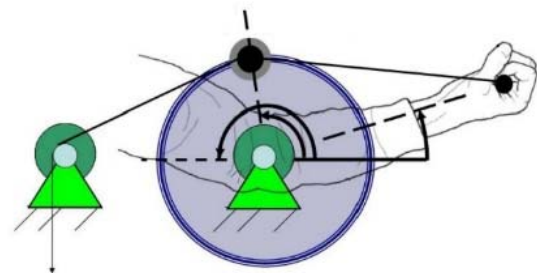
شکل ۶) شماتیک ربات تک کابل در دو نما

برای استخراج معادلات حرکت، فرض می شود ورودی های ربات، کشش کابل (T)، زاویه میله بالاسری فریم (φ) و فاصله محل اتصال کابل به میله بالاسری فریم تا انتهای آن (d) باشد. لذا با

دستگاه بدون نیاز به درمانگر و با آموزش های اولیه در منزل به صورت مرتب استفاده کنند. برای کاهش هزینه و افزایش انعطاف پذیری، بهترین انتخاب ربات های کابلی مجری نهایی است. برای طراحی ربات چهار نکته مورد توجه قرار گرفته است:

(۱) با توجه به سادگی ساختار ربات، برای کنترل n درجه آزادی از n موتور بهره برده می شود.

(۲) در اغلب ربات های کابلی هر یک از موتورها کشش یک کابل را کنترل می کند. یکی از راه های کاهش تعداد کابل جهت جلوگیری از تداخل آنها، کنترل کشش و راستای اعمال نیرو است. به عنوان مثال در ربات ماریونت (MarioNet) که در شکل ۴ نمایش داده شده است، یکی از موتورها کشش کابل و دیگری توسط یک دیسک چرخان جهت اعمال نیرو را کنترل می کند [16].



شکل ۴) شماتیک ربات ماریونت [16]

(۳) یکی از بهترین تمرین برای افراد مسن، آب درمانی است. چرا که وقتی افراد در آب قرار می گیرند، قسمتی از وزن بدنشان خنثی می شود و می توانند حرکات را بهتر انجام دهند. برای شبیه سازی این رفتار می توان از کابلی خارج از صفحه عرضی بدن انسان استفاده کرد تا ربات علاوه بر انجام تمرین بازتوانی، توانایی شبیه سازی خاصیت آب درمانی را نیز داشته باشد.

(۴) برای به دست آوردن فضایی کنترلی پذیر برای انجام تمرین توسط فرد بیمار محل اتصال کابل ها باید مطابق با تمرین از پیش تعریف شده برای این دستگاه باشد [17].

۲-۲- طراحی ربات تک کابل

هدف از طراحی ربات تک کابل، حرکت جسم موثر در صفحه افقی و جبران وزن آن است. بنابراین ربات باید سه درجه آزادی را کنترل کند و برای این کار نیاز به سه موتور دارد. همان طور که در قسمت های پیشین گفته شد در ربات های کابلی معمول هر یک از موتورها به کنترل کشش یک کابل اختصاص دارد. اما در این ربات یک موتور به کنترل کشش کابل و دو موتور دیگر به کنترل راستای اعمال نیروی کابل اختصاص داده می شود.

تقوی و همکاران [18] با اضافه کردن فنر به یک ربات دو لینکی کابلی اثبات کردند که وجود فنر می تواند تا حدودی این نقص را بر طرف کرده و به افزایش ناحیه کاری ربات کمک کند. همچنین در برخی دیگر از پژوهش ها با تاکید بر لزوم استفاده از اجزای انعطاف پذیر در زنجیره قوای محرکه از همین سیستم بهره برده شده است [19]. لذا با استفاده از فنر در طراحی ربات تک کابل سعی

ورودی‌های ربات کشش دوکابل (T_2 و T_1) باشد. لذا معادلات در دو جهت نوشته می‌شود.

$$m\ddot{x} = F_{Kx} + \frac{T_1(b-x)}{\sqrt{(x-b)^2+y^2}} - \frac{T_2x}{\sqrt{x^2+y^2}} \quad (8)$$

$$m\ddot{y} = F_{Ky} - \frac{T_1y}{\sqrt{(x-b)^2+y^2}} + \frac{T_2y}{\sqrt{x^2+y^2}} \quad (9)$$

محدودیت‌های فیزیکی اعمال شده در این ربات مطابق با معادله ۱۰ می‌باشد. پارامترهای فیزیکی را مشابه با جدول ۱ در نظر گرفته و برای به‌دست‌آوردن مشخصات فنرها با همان روش به نتایج مندرج در جدول ۳ می‌رسیم. از آنجا که نقاط مطلوب در این ربات به‌ازای تولید نیروی برآیند ۴۰ نیوتن بسیار کم بود، لذا این مقدار، در این حالت به ۲۰ نیوتن کاهش داده شد.

$$T_{1,2} \in (0,100)N \quad (10)$$

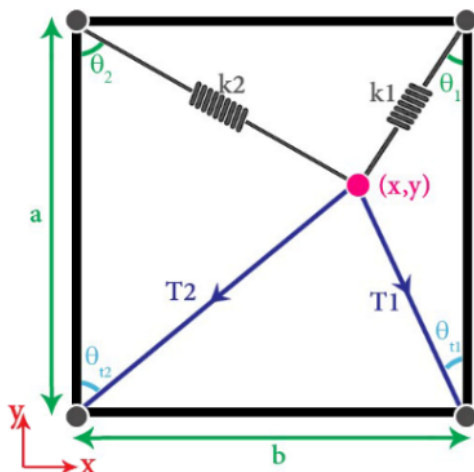
با توجه به اطلاعات مندرج در جدول ۳، فنر با سختی ۳۰ نیوتن بر متر و طول آزاد ۳۰ سانتی‌متری انتخاب می‌شود. از مزایای ربات دوکابلی می‌توان به هزینه پایین ساخت، وزن و حجم کم، قابلیت استفاده در صفحات دوعبدهی مختلف، مناسب برای مصرف خانگی و قابل حمل بودن آن اشاره کرد. در قسمت‌های بعدی به تحلیل استاتیکی و دینامیکی هر دو ربات و مقایسه آنها با یکدیگر پرداخته خواهد شد.

جدول ۱) مشخصات فیزیکی ربات تک‌کابلی

مشخصه	نشانه	واحد	مقدار
جرم موثر	m	kg	۵
عرض فریم	a	m	۱
طول فریم	b	m	۱
ارتفاع میله بالاسری	h	m	۰٫۲

جدول ۲) مشخصات پنج سری فنر در ربات تک‌کابلی

شماره	سختی فنر (N/m)	طول آزاد (cm)	تعداد نقاط مطلوب
۱	۲۰	۳۰	۲۴۲۰
۲	۴۰	۳۰	۱۸۰۴
۳	۶۰	۳۶	۱۲۵۵
۴	۸۰	۳۹	۹۱۳
۵	۱۰۰	۴۴	۷۰۹



شکل ۷) شماتیک ربات دوکابلی

یافتن محل اتصال کابل به میله بالاسری فریم (x_t, y_t) و مشخص‌بودن ارتفاع این میله از سطح فریم (h), راستای نیروی کشش کابل را یافته و معادلات، در سه جهت نوشته می‌شود. با توجه به این که متغیر φ بین صفر تا 180° درجه و متغیر d بین 0 تا a تغییر می‌کند، محل اتصال کابل به میله بالاسری فریم، به صورت معادلات ۱ تا ۳ محاسبه می‌شود.

$$x_t = 0.5b - d \cos \varphi \quad (1)$$

$$y_t = |d \sin \varphi| \quad (2)$$

$$z_t = h \quad (3)$$

با توجه به معین‌بودن محل جرم موثر، راستای اعمال نیروی کشش کابل مشخص است. بنابراین می‌توان معادلات حرکت را با توجه به مشخص‌بودن نیروها و راستای آنها در سه راستا نوشت.

$$\ddot{x} = \frac{F_{Kx}}{m} \times \frac{T \sqrt{(x-(0.5b-d \cos \varphi))^2 + (y-|d \sin \varphi|)^2}}{\sqrt{(x-(0.5b-d \cos \varphi))^2 + (y-|d \sin \varphi|)^2 + h^2}} \times \frac{x-(0.5b-d \cos \varphi)}{\sqrt{(x-(0.5b-d \cos \varphi))^2 + (y-|d \sin \varphi|)^2}} \quad (4)$$

$$\ddot{y} = \frac{F_{Ky}}{m} \times \frac{T \sqrt{(x-(0.5b-d \cos \varphi))^2 + (y-|d \sin \varphi|)^2}}{\sqrt{(x-(0.5b-d \cos \varphi))^2 + (y-|d \sin \varphi|)^2 + h^2}} \times \frac{y-|d \sin \varphi|}{h} \quad (5)$$

$$\ddot{z} = \frac{T}{m} \times \frac{h}{\sqrt{(x-(0.5b-d \cos \varphi))^2 + (y-|d \sin \varphi|)^2 + h^2}} \quad (6)$$

در معادلات ۴ و ۵ منظور از F_{Kx} و F_{Ky} به‌ترتیب برآیند نیروی فنرها در راستای x و y و منظور از g در معادله ۶، شتاب گرانش می‌باشد. در بالا معادلات حرکت، برحسب پارامترهای ربات به‌دست آمد. حال برای محاسبه رفتار استاتیکی و دینامیکی ربات مقادیر عرض و طول فریم (a و b), ارتفاع میله بالاسری (h), و جرم موثر (m) را براساس تمارین بازتوانی جایگذاری می‌شود که این مقادیر در جدول ۱ ارایه شده‌اند.

از فرضیاتی که برای ربات در نظر گرفته می‌شود، محدودیت‌های فیزیکی پارامترهای آن می‌باشد، که در معادله ۵ آورده شده است.

$$T \in (0,100)N, d \in (0,1)m, \varphi \in (0, \pi) \quad (7)$$

از آنجایی که تمارین بازتوانی به‌صورت متقارن انجام می‌شوند، لذا فرض می‌شود، فنرها یکسان است. همچنین ربات باید توانایی اعمال نیرو در تمامی جهات را در بیشتر نقاط صفحه داشته باشد. لذا برای به‌دست‌آوردن مشخصات فنرها از این مفهوم بهره برده می‌شود. مشخصات نهایی فنرها در جدول ۲ آورده شده است.

۳-۲- طراحی ربات دوکابلی

در این قسمت برای ساده‌سازی ربات قبلی برای جبران وزن دست بیمار از یک صفحه زیرین استفاده کرده و یکی از درجات آزادی ربات حذف می‌شود. در این ربات مطابق با شکل ۷، از دو موتور بهره برده می‌شود که هر دوی آنها، به کنترل کشش کابل اختصاص داده می‌شود.

ربات تک‌کابلی علی‌رغم مزایای فراوان، به‌علت بهره‌مندی از مکانیزم‌های حرکت خطی و دورانی ساختاری نسبتاً پیچیده‌تر از ربات دوکابلی دارد. برای استخراج معادلات حرکت، فرض می‌شود

شماره	سختی فنر (N/m)	طول آزاد (cm)	تعداد نقاط مطلوب
۱	۲۰	۳۰	۲۱۰
۲	۳۰	۳۰	۴۸۴
۳	۴۰	۳۸	۴۶۳
۴	۵۰	۴۴	۳۹۳
۵	۷۰	۵۰	۳۱۴

۲-۴-۲- محاسبه ناحیه کاری استاتیکی ربات تک کابلی به روش

تحلیلی

از معادله ۱ و ۲ و ۱۲ و همچنین جایگذاری پارامترهای فیزیکی معلوم می‌توان به معادلات ۱۳-الف و ۱۳-ب دست پیدا کرد.

$$d \sin \varphi = \frac{-F_{Ky}}{250} + y \quad (۱۳-الف)$$

$$d \cos \varphi = \frac{F_{Kx}}{250} - x + 0.5 \quad (۱۳-ب)$$

معادلات ۱۳-الف و ۱۳-ب با متغیر در نظر گرفتن پارامتر φ به صورت ماتریسی $Ax=f$ بازنویسی می‌شود.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \varphi = \begin{bmatrix} \sin^{-1} \left(\left(-\frac{F_{Ky}}{250} + y \right) \times \frac{1}{d} \right) \\ \cos^{-1} \left(\left(\frac{F_{Kx}}{250} + 0.5 - x \right) \times \frac{1}{d} \right) \end{bmatrix} \quad (۱۴)$$

برای اینکه معادله ۱۴ پاسخی یکتا داشته باشد باید دترمینان ماتریس $(A|f)$ برابر با صفر باشد. لذا پاسخ، دسته منحنی‌هایی بر حسب d خواهند بود که در معادله ۱۵، فرمول آنها را مشاهده می‌کنید.

$$\sin^{-1} \left(\frac{-F_{Ky} + 250y}{250d} \right) - \cos^{-1} \left(\frac{F_{Kx} + 125 - 250x}{250d} \right) = 0 \quad (۱۵)$$

با رسم مرزهای دسته منحنی با معادله ۱۵ و همچنین اعمال محدودیت فنرها و رسم خط بیشینه نیروی کابل به صورت عددی، می‌توان ناحیه استاتیکی را برای این ربات به دست آورد.

۳-۴-۲- محاسبه ناحیه کاری استاتیکی ربات دوکابلی به روش

عددی

مانند ربات تک کابلی، برای این ربات نیز دو معادله استاتیکی، با صفر قراردادن شتاب‌ها و جایگذاری پارامترهای فیزیکی ربات در معادلات ۹ و ۱۰ به دست آورده می‌شود و با حل این دو معادله در هر نقطه از صفحه کاری، کشش دو کابل به دست می‌آید. در صورتی که این مقادیر با محدودیت‌های ارایه شده در معادله ۱۰ سازگار بودند، نقطه مورد نظر جزئی از ناحیه کاری استاتیکی است، در غیر این صورت ربات توانایی ایستا نگه داشتن جرم موثر در این نقطه را ندارد.

۴-۴-۲- محاسبه ناحیه کاری استاتیکی ربات دوکابلی به روش

تحلیلی

برای حل تحلیلی نیز مطابق با قسمت ۲-۴، باید ابتدا معادلات استاتیکی با استفاده از معادلات ۸ و ۹ بازنویسی شود. بعد از آن یک بار معادلات، با مجهول فرض کردن T_1 و بار دیگر با مجهول فرض کردن T_2 به صورت $Ax=f$ نوشته می‌شود. برای اینکه دو معادله و یک مجهول به دست آمده پاسخی یکتا داشته باشد باید دترمینان ماتریس $[A|f]$ برابر با صفر شود که معادلات ۱۶ و ۱۷ را نتیجه می‌دهد.

$$\frac{T_1 x y - T_1 y (1-x)}{\sqrt{x^2+y^2} \sqrt{(x-1)^2+y^2}} - \frac{F_{Ky} x + F_{Kx} y}{\sqrt{x^2+y^2}} = 0 \quad (۱۶)$$

$$\frac{-T_2 x y + T_2 y (1-x)}{\sqrt{x^2+y^2} \sqrt{(x-1)^2+y^2}} + \frac{F_{Ky} (1-x) + F_{Kx} y}{\sqrt{(x-1)^2+y^2}} = 0 \quad (۱۷)$$

با رسم مرزهای این دو معادله می‌توان ناحیه مشترک را به عنوان ناحیه کاری استاتیکی قبول کرد.

۴-۲- ناحیه کاری استاتیکی

یکی از زمینه‌های مهم در ربات‌های بازتوانی، ناحیه کاری استاتیکی است. به نقاطی از فضا که در آن نقاط، جرم موثر توانایی ایستادن و ارضاکردن معادلات استاتیکی را دارد، ناحیه کاری استاتیکی گویند. ناحیه کاری استاتیکی به نوعی معرف نقاطی از فضا است که جرم موثر می‌تواند شتاب صفر داشته باشد. به علت پیوستگی معادلات در این نواحی، ربات توانایی اعمال شتاب‌های مثبت و منفی را دارد و این امکان را به جرم موثر می‌دهد تا بتواند حرکات رفت و برگشتی را انجام دهد. اکثر تمارین بازتوانی از همین نوع هستند.

۱-۴-۲- محاسبه ناحیه کاری استاتیکی ربات تک کابلی به روش

عددی

در گام ابتدایی معادلات حرکت بازنویسی شده و با صفر قراردادن شتاب، معادلات استاتیکی استخراج می‌شود.

$$T_x = F_{Kx}, T_y = F_{Ky}, T_z = mg \quad (۱۱)$$

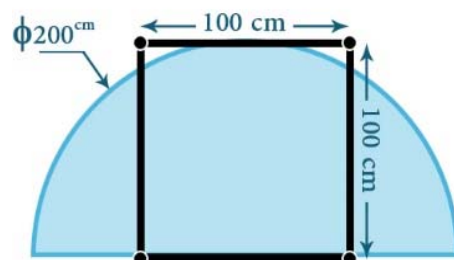
با توجه به اینکه معادلات پیوسته بوده و جواب یکتا دارند، صفحه کاری به ده هزار نقطه تقسیم و در هر نقطه معادلات استاتیکی با معلوم بودن مکان جرم موثر حل شده و به ازای آن پارامترهای کنترلی (محل اتصال کابل به میله بالاسری فریم و کشش کابل) مطابق با معادلات ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$T = \sqrt{T_x^2 + T_y^2 + T_z^2} \quad (۱۲-الف)$$

$$x_t = \frac{T_x}{T_z} \times h + x \quad (۱۲-ب)$$

$$y_t = \frac{T_y}{T_z} \times h + y \quad (۱۲-ج)$$

در صورتی که محل اتصال کابل به میله بالاسری فریم در محدوده مشخص شده در شکل ۸ قرار گیرد و کشش کابل قیود ارایه شده در معادله ۷ را ارضا کند، جواب به دست آمده قابل قبول است.



شکل ۸) محدوده قابل قبول محل اتصال کابل به میله بالاسری فریم مطابق با معادله ۷

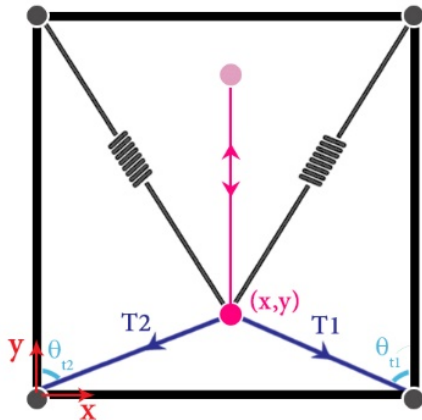
۵-۲- ناحیه کاری دینامیکی

قبول خواهند بود که در آنها نیروی عمود بر مسیر برابر با صفر باشد تا جرم موثر از مسیر خطی خارج نشود.

۲-۵-۲- ناحیه کاری دینامیکی ربات دوکابلی

مانند قسمت قبل در این جا نیز مسیر خطی در میانه صفحه کاری انتخاب می‌شود. با توجه به اینکه ناحیه کاری دینامیکی در این خط برای ربات دوکابلی وسیعتر بوده است، لذا مسیر تعریفی (مطابق با شکل ۱۰) نیز بلندتر در نظر گرفته می‌شود.

$$x = 0.5m, y = [0.1, 0.9]m \quad (۲۱)$$



شکل ۱۰ مسیر خطی در ربات دوکابلی

با توجه به تقارن ربات نسبت به مسیر، زمانی که نیروی دو کابل برابر باشد، جرم موثر در مسیر خطی حرکت خواهد کرد. لذا می‌توان معادلات حرکت این ربات را در هر نقطه از مسیر با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای کشش کابل، حل کرده و نیروی برآیند وارده به جرم موثر را محاسبه کرد.

$$F_x = F_{K_x} + T_1 \sin \theta_{t1} - T_2 \sin \theta_{t2} \quad (۲۲-الف)$$

$$F_y = F_{K_y} - T_1 \cos \theta_{t1} - T_2 \cos \theta_{t2} \quad (۲۲-ب)$$

۶-۲- الگوریتم کنترلی

در این قسمت برای حرکت جرم موثر در مسیری با سرعت اولیه و شتاب مشخص، کنترلی طراحی می‌گردد.

۱-۶-۲- کنترلر ربات تک کابلی

به منظور طراحی کنترلی، تابع خطا به صورت $e = q_d - q$ تعریف می‌شود، که در آن q ماتریس مختصات واقعی جرم موثر و q_d ماتریس مختصات مطلوب برای آن است. همچنین در این قسمت، کنترلر بدون در نظر گرفتن اثر دست بیمار و با قراردادن مکان مجری نهایی به عنوان بردار مختصات تعمیم یافته، طراحی می‌شود. برای طراحی کنترلی، دو مجهول مساله، کشش کابل در دو جهت x و y در نظر گرفته می‌شود. همچنین کشش کابل در جهت z برابر با وزن جرم موثر خواهد بود. لذا معادلات حرکت در این دو جهت بازنویسی می‌شود.

$$m\ddot{x} = F_{K_x} + T_x \quad (۲۳-الف)$$

$$m\ddot{y} = F_{K_y} + T_y \quad (۲۳-ب)$$

سپس برای استفاده از این روش کنترلی که روش گشتاور محاسبه

نحوه اعمال نیرو در طی مسیر طراحی شده، نکته مهم دیگری است که در ربات‌های بازتوانی باید به آن توجه کرد. بنابراین ناحیه کاری دینامیکی برای ربات‌ها در مسیری مشخص تعریف می‌شود. ناحیه دینامیکی، مجموعه‌ای از نیروها است که ربات توانایی تولید آنها را در راستای مماس بر مسیر دارد به صورتی که جرم موثر از مسیر تعریف شده خارج نشود و نیروی عمود بر مسیر برابر با صفر باشد. لذا برای هر یک از ربات‌ها مطابق با فیزیک آنها ابتدا مسیری خطی (مطابق با تمارین بازتوانی خطی) تعریف شده و سپس ناحیه کاری دینامیکی آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۵-۲- ناحیه کاری دینامیکی ربات تک کابلی

مسیر، به صورت متقارن مطابق با معادله ۱۸ تعریف می‌شود.

$$x = 0.5m, y = [0.3, 0.7]m \quad (۱۸)$$

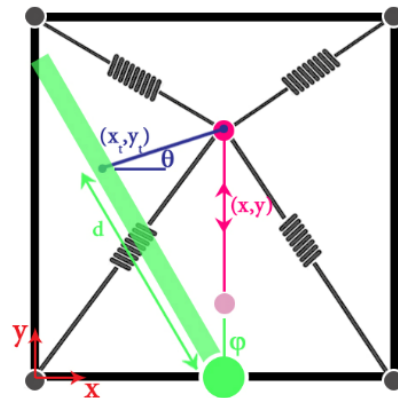
با توجه به رفت و برگشتی بودن تمارین این مسیر به صورتی که در شکل ۹ نمایش داده شده، تعریف شده است. با در نظر گرفتن معادلات حرکتی می‌توان، کشش کابل در هر سه جهت را در این ربات به صورت معادلات ۱۹ به دست آورد.

$$l_t = \sqrt{(x - x_t)^2 + (y - y_t)^2 + 0.2^2} \quad (۱۹-الف)$$

$$T_z = mg \rightarrow T = 50 \times \frac{l_t}{0.2} = 250l_t \quad (۱۹-ب)$$

$$T_x = \frac{T(x_t - x)}{l_t} \quad (۱۹-ج)$$

$$T_y = \frac{T(y_t - y)}{l_t} \quad (۱۹-د)$$



شکل ۹ مسیر خطی در ربات تک کابلی

مطابق با معادلات بالا، با مشخص بودن مکان جرم موثر (x, y) و نقطه اتصال کابل به میله بالاسری (x_t, y_t) ، کشش کابل در سه جهت به دست آمده و نیروی برآیندی که توسط ربات به جرم موثر وارد می‌شود، قابل محاسبه بوده و می‌توان معادلات حرکتی را در دو جهت مماس و عمود بر مسیر تعریف کرد.

$$Normal: T_x + F_x = F \quad (۲۰-الف)$$

$$Tangent: T_y + F_y = F \quad (۲۰-ب)$$

با تقسیم بندی مسیر به نقاطی مشخص، می‌توان در هر نقطه با در نظر گرفتن تمامی حالات ممکن برای محل اتصال کابل به میله بالاسری (x_t, y_t) ، معادلات ۲۰ را حل کرد. دسته جواب‌هایی قابل

خواهیم آورد که کشش کابل ۱۰۰ نیوتن شود.

$$T' = 100N = \sqrt{T_x'^2 + T_y'^2 + T_z'^2} \quad (۳۲-الف)$$

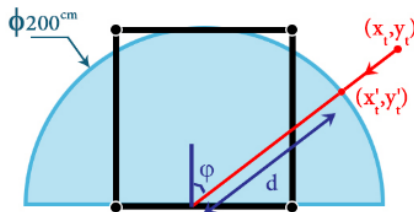
$$\frac{T_x'}{T_x} = \frac{T_y'}{T_y} \quad (۳۲-ب)$$

با دو معادله و دو مجهول ۳۲ می‌توان کشش جدید کابل را محاسبه کرد. اما محل اتصال کابل به میله بالاسری نیز باید در دایره‌ای مطابق با شکل ۶ باشد. در صورتی که جواب‌های به‌دست آمده خارج از این دایره باشد، باید با روشی همانند با شکل ۱۱، که در معادلات ۳۳ به آن اشاره شده است، نقطه را بر روی نیم‌دایره مورد قبول تصویر کرد.

$$if(x_t < 0) or (y_t < 0) \rightarrow x_t = 0 or y_t = 0 \quad (۳۳-الف)$$

$$if((x_t - 0.5)^2 + y_t^2 > 1) \rightarrow \begin{bmatrix} x_t' - 0.5 \\ y_t' \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{x_t - 0.5}{\sqrt{(x_t - 0.5)^2 + y_t^2}} \\ \frac{y_t}{\sqrt{(x_t - 0.5)^2 + y_t^2}} \end{bmatrix} \quad (۳۳-ب)$$



شکل ۱۱) اشباع محل اتصال کابل به میله بالاسری فریم

بعد از نهایی شدن پارامترهای کنترلر، این مقادیر به ربات داده می‌شود تا ربات با توجه به معادلات حرکتی خود (معادله ۲۴)، نقطه بعدی جرم موثر را تعیین کند. برای مشاهده نتایج کنترلر در ربات تک‌کابلی، مسیری خطی برای حرکت جرم موثر بر روی آن تعریف می‌شود.

$$\varphi_d = \cos\left(\frac{\pi}{3}t\right) \quad (۳۴-الف)$$

$$x_d = 0.5, y_d = 0.5 + 0.4 \times \varphi_d \quad (۳۴-ب)$$

۲-۶-۲- کنترلر ربات دوکابلی

در این ربات نیز برای طراحی کنترلر دقیقاً از روشی مطابق با ربات تک‌کابل بهره برده می‌شود. لذا معادلات، به فرم مطلوب بازنویسی می‌شود.

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_{t1} & \sin \theta_{t2} \\ \cos \theta_{t1} & \cos \theta_{t2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{Kx} \\ F_{Ky} \end{bmatrix} \quad (۳۵)$$

زوایای به کار گرفته شده در ماتریس B در شکل ۵ نمایش داده شده است که مطابق با محل قرارگیری جرم موثر در هر زمان قابل محاسبه است. با توجه به معادله ۳۵، می‌توان پارامترهای کنترلر (T₁ و T₂) را با همان معادله ۲۵ محاسبه نمود. همچنین مطابق با روش ارایه شده در قسمت ربات تک‌کابل ثابت می‌شود که این کنترلر عملکردی پایدار دارد. در قسمت پایانی طراحی کنترلر باید محدودیت‌های فیزیکی ربات را به پارامترهای کنترلر اعمال نمود.

شده (Control Torque Method; CTM) نامیده می‌شود، باید معادلات حرکت ربات به صورت فرم $m\ddot{q} = BT + N$ نوشته شود.

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{Kx} \\ F_{Ky} \end{bmatrix} \quad (۲۴)$$

در نتیجه نیروی کشش کابل برای دستیابی به شتاب‌های دلخواه و حرکت بر روی مسیر از پیش طراحی شده مطابق با معادله ۲۵ به‌دست می‌آید.

$$T_c = B^{-1}(N + (m\ddot{q} + u)) \quad (۲۵)$$

در این معادله T_c کشش کابلی است که کنترلر آن را طراحی می‌کند و u تابع کنترل مدار بسته نام دارد که اثر خطاهای ایجاد شده (e) را در نظر می‌گیرد.

$$u = \ddot{q} - \ddot{q}_d = \ddot{e} \quad (۲۶-الف)$$

$$e = \begin{bmatrix} x - x_d \\ y - y_d \end{bmatrix} \quad (۲۶-ب)$$

حال متغیر u را به‌صورتی تعریف می‌کنیم که به صفر میل کند تا خطای اولیه نیز به صفر برسد.

$$u = K_p e + K_d \dot{e} + K_i \int e \quad (۲۷)$$

از آنجایی که در طراحی انجام شده ضریب انتگرال خطا برابر با صفر در نظر گرفته شده، لذا برای اثبات پایداری کنترلر باید معادله ۲۸ برقرار باشد.

$$\ddot{e} + K_p e + K_d \dot{e} = 0 \quad (۲۸)$$

معادله حاکم، به فرم فضای حالت نوشته و معادله مشخصه آن به‌دست می‌آید.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -K_p & -K_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} \quad (۲۹-الف)$$

$$\Delta_c = |s^2 + K_d s + K_p| \quad (۲۹-ب)$$

اگر هر یک از ماتریس‌های K_p و K_d به صورت قطری باشند، می‌توان معادله مشخصه را به صورت معادله ۳۰ نوشت.

$$\Delta_c = \prod_{i=1}^2 (s^2 + K_{di}s + K_{pi}) \quad (۳۰)$$

در صورتی که تمامی پارامترها در معادله ۳۰ مثبت باشند، خطا به سمت صفر میل کرده و کنترلر پایدار خواهد بود. در ادامه با مشخص شدن کشش کابل توسط کنترلر مکان اتصال کابل به میله بالاسری نیز با توجه معادلات حرکت به صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$x_t = \frac{T_x}{mg} \times h + x \quad (۳۱-الف)$$

$$y_t = \frac{T_y}{mg} \times h + y \quad (۳۱-ب)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{x_t - 0.5}{y_t} \right) \quad (۳۱-ج)$$

$$d = \frac{y_t}{\cos \varphi} \quad (۳۱-د)$$

همان طور که در قسمت‌های قبلی نیز به آن اشاره شد در محل اتصال کابل به میله بالاسری و همچنین کشش کابل در این ربات محدودیت‌هایی وجود دارد که باید در روش کنترلر به آنها پرداخته شود. در صورتی که پس از به‌دست‌آمدن T_x و T_y کشش کابل بیش از ۱۰۰ نیوتن شود، باید کشش کنترلر جایگزینی برای آن معرفی شود. در این صورت با فرض داشتن دو معادله ۳۲-الف و ۳۲-ب، مقادیر جدید کشش کابل (T'_x و T'_y) را طوری به‌دست

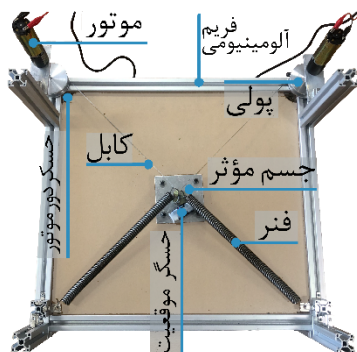
در این معادله همه متغیرها مطابق با همان معادله ۲۴ تعریف می‌شوند. همچنین ماتریس λ ، گشتاورهای مفاصل دست بیمار در آرنج و مچ است که در اینجا تحت عنوان نیروهای داخلی، تعریف می‌شود. ماتریس A_c به صورتی تعریف می‌شود که AA_c برابر با صفر شود. لذا با ضرب ترانزاده این ماتریس از سمت چپ در معادله ۳۹ و حذف عبارت نیروهای داخلی می‌توان به معادله‌ای جایگزین رسید.

$$\dot{M}_{2 \times 4} \ddot{q} + \dot{h}_{2 \times 1} = \dot{B}_{2 \times 2} T \quad (39)$$

با جایگزین کردن این معادله می‌توان مسیر کنترلی را به صورت عادی طی کرده و موقعیت جرم موثر را کنترل کرد. همان طور که در بخش ۱-۶-۲ اثبات شد، در اینجا هم با تعیین ضرایب مثبت برای کنترلر می‌توان به کنترلی پایدار دست پیدا کرد که خطای مسیر را در طی زمان به صفر می‌رساند. از آنجایی که در ربات تک‌کابلی هم متغیرهای مساله کشش کابل در دو راستای در نظر گرفته شده‌اند، لذا بررسی اثر دست بیمار در این ربات هم دقیقاً به صورت ربات دوکابلی است.

۳- ساخت و آزمون دستگاه

دستگاه ساخته شده ماکتی کوچکتر از ربات دوکابلی است که از هشت قسمت اصلی (مطابق با شکل ۱۳) تشکیل شده است.



شکل ۱۳ اجزای ربات ساخته شده

در ساخت این دستگاه از هشت قسمت اصلی استفاده شده است. برای فریم کلی ربات از پروفیل‌های آماده آلومینیومی به همراه پیچ‌های اتصال استفاده کردیم و ابعاد آن، ۵۰*۵۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. دو گوشه پایینی فریم در شکل ۱۳، محلی برای اتصال فنر به بدنه اصلی و دو گوشه بالایی محل تعبیه سیستم انتقال نیرو از موتورهاست. سیستم انتقال نیرو از موتور، پولی و کابل‌ها تشکیل شده است. نیروی محرکه این سیستم از دو موتور دی سی (D.C) همراه با جعبه گیربکسی با نسبت تبدیل ۱:۳۹ تامین شده است. سرعت خروجی این موتورها حداکثر ۷۵ دور بر دقیقه و حداکثر گشتاور تولیدی آنها به یک نیوتن بر متر می‌رسد. همچنین در این سیستم برای تبدیل گشتاور موتور به کشش کابل از دو پولی با قطر ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده شد. انتهای دو کابل و دو فنر به میله‌ای عمودی که روی جرم موثر

لذا در صورتی که پارامترهای به دست آمده در کنترلر بزرگتر از ۱۰۰ نیوتن بود، مقدار آنها، به ۱۰۰ نیوتن کاهش و در صورتی که کوچکتر از صفر نیوتن بود، به صفر نیوتن افزایش می‌یابد.

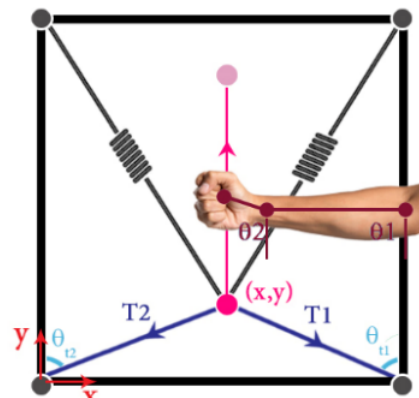
$$\text{if } (T_1 \text{ or } T_2 > 100) \rightarrow T'_1 = 100 \text{ or } T'_2 = 100 \quad (36 \text{ الف})$$

$$\text{if } (T_1 \text{ or } T_2 < 0) \rightarrow T'_1 = 0 \text{ or } T'_2 = 0 \quad (36 \text{ ب})$$

پس از نهایی شدن پارامترهای کنترلر، این مقادیر به ربات داده می‌شود تا ربات با توجه به معادلات حرکتی خود (معادله ۳۴)، نقطه بعدی جرم موثر را تعیین کند. برای مشاهده نتایج کنترلر مسیری خطی برای این ربات مشابه با معادلات ۳۴ تعریف می‌شود. با فرض نقطه $(x=0.4, y=0.8)$ به عنوان نقطه اولیه مسیر، نحوه به صفر رسیدن خطای موجود بررسی می‌شود.

۳-۶-۲ اثر دست بیمار بر روی عملکرد کنترلر

هدف از این قسمت بررسی اثر دست بیمار بر روی عملکرد ربات است. برای این منظور دست بیمار، مطابق با یک مکانیزم دولینکی در نظر گرفته می‌شود که یک نقطه روی فریم (مطابق با شکل ۱۲) نقطه آغازین آن و جرم موثر، نقطه پایانی آن است.



شکل ۱۲ مسیر خطی در ربات دوکابلی با در نظر گرفتن دست بیمار

در معادلات جدید علاوه بر دو معادله پیشین دو قید به صورت معادلات ۳۶-الف و ۳۶-ب به مساله اضافه می‌شود.

$$l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 = x_0 - x \quad (37 \text{ الف})$$

$$l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 = y_0 - y \quad (37 \text{ ب})$$

که در این معادلات l_1 و l_2 به ترتیب طول ساعت و مچ دست بیمار است که برابر با ۰/۴ و ۰/۱ متر در نظر گرفته می‌شود. همچنین x_0 و y_0 نیز محل تکیه‌گاه آرنج بیمار است که در انتهای ربات و میانه فریم آن است. در معادلات با یک بار مشتق‌گیری از قیود، با فرض اینکه متغیرهای مساله (q) برابر با ماتریس $q = [T_x \quad T_y \quad \theta_1 \quad \theta_2]$ به معادله ۳۸ خواهیم رسید.

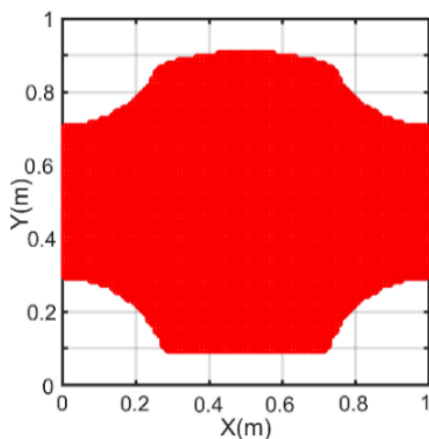
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & l_1 \cos \theta_1 & l_2 \cos \theta_2 \\ 0 & 1 & -l_1 \sin \theta_1 & -l_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \dot{q} = A \dot{q} = 0 \quad (38)$$

با توجه به معادله ۳۸ معادلات مقید را می‌توان همانند معادله ۲۴ به فرم مطلوب رساند.

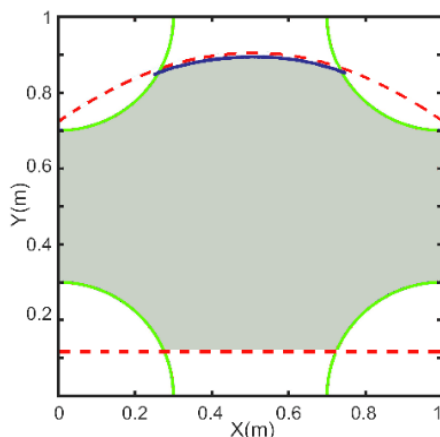
$$M_{4 \times 4} \ddot{q}_{4 \times 1} + N_{4 \times 1} = B_{4 \times 2} T_{2 \times 1} + A_{4 \times 2}^T \lambda_{2 \times 1} \quad (41)$$

حاصل از این دو روش کاملاً بر یکدیگر منطبق هستند و روش تحلیلی نتایج حاصل از روش عددی را صحه‌گذاری می‌کند. همان طور که در نمودار ۳ مشخص شده، خط‌های کم‌رنج محدودیت فنرها، خط‌های پرنج محدودیت کشش کابل و خط چین مرز دسته منحنی‌های معادله ۱۷ را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است از مساحت کل فریم این ربات ۵۵۳۶ سانتی‌مترمربع در محدوده ناحیه‌کاری استاتیکی قرار می‌گیرد. نمودارهای ۴ و ۵ نشان‌دهنده ناحیه‌کاری استاتیکی برای ربات دوکابلی است.

در نمودار ۵ که نشان‌دهنده حل تحلیلی است، پاسخ دسته منحنی‌ها با متغیر در نظر گرفتن T_1 و دسته منحنی‌ها با متغیر در نظر گرفتن T_2 نسبت به خط $x=0.5$ متقارن هستند. دلیل این امر متقارن بودن ربات دوکابلی نسبت به این خط است. همان طور که از مقایسه نمودارهای ۴ و ۵ مشخص است، حل تحلیلی تاییدکننده حل عددی است. مساحت ناحیه‌کاری استاتیکی در این ربات نیز به ۳۸۸۹ سانتی‌مترمربع می‌رسد که نسبت به ربات تک‌کابل کمتر است. همچنین ربات تک‌کابل در قسمت مرکزی صفحه‌کاری نواحی بیشتری را پوشش می‌دهد. در نتیجه ربات تک‌کابل از لحاظ استاتیکی عملکرد بهتری نسبت به ربات دوکابلی دارد.

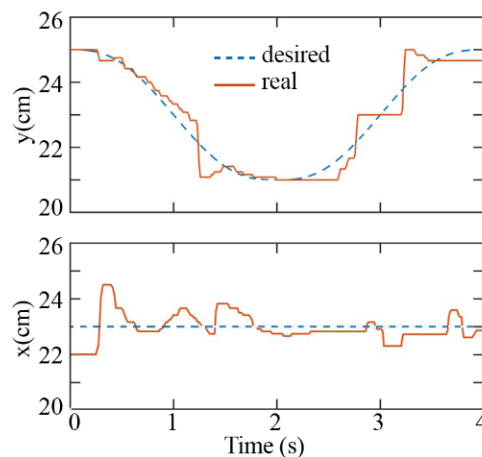


نمودار ۲) ناحیه‌کاری استاتیکی ربات تک‌کابل در روش حل عددی



نمودار ۳) ناحیه‌کاری استاتیکی ربات تک‌کابل در روش حل تحلیلی

(حدوداً یک کیلوگرم) قرار می‌گیرد، متصل می‌شوند. از آنجایی که کنترلر تعریف شده روی دستگاه از نوع حلقه بسته (Close Loop) است، لذا برای کنترل رفتار موتور و همچنین موقعیت مکانی جرم موثر به حسگر نیاز است. برای کنترل دور موتور در انتهای شفت موتور از حسگر دورانی بهره برده شد که دقت آن به ۰/۲۲۵ درجه می‌رسد. همچنین برای کنترل مکان جرم موثر از موشواره‌ای نوری استفاده شد که به زیر جرم موثر متصل است. همچنین برای ارتباط با ربات از دو تجهیز الکترونیکی استفاده شد. اول، درایور موتور Moto Shield L298P که برای کنترل سرعت موتورها، از کنترلر ولتاژ آنها استفاده می‌شود. این درایو تا ۲۴ ولت ورودی را تحمل می‌کند. دوم، تجهیز برای اتصال کامپیوتر به موتورها به نام کیت Arduino Mega2560 که از درگاه‌های ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ آن برای تعیین جهت و سرعت موتورها استفاده کردیم که این درگاه‌ها به درایو موتور متصل شده‌اند. درگاه‌های ۲، ۳، ۱۸ و ۱۹ نیز به حسگرهای دور موتور متصل شده‌اند. برای سنجش کنترلر موقعیت در این ربات مسیری خطی و رفت‌وبرگشتی بر روی فریم ربات بین نقطه A و B تعریف می‌شود. سپس با اعمال خطا در یکی از جهات (جهت X) به میزان یک سانتی‌متر، عملکرد کنترلر، مورد بررسی قرار داده می‌شود. نتایج این آزمون در نمودار ۱ قابل مشاهده است. مطابق با نتایج ارائه شده در نمودار ۱، درستی کنترلر در تعقیب مسیر طراحی شده برای ربات و پایداری آن قابل اثبات است.



نمودار ۱) موقعیت مکانی جرم موثر در دو مسیر طراحی شده و واقعی

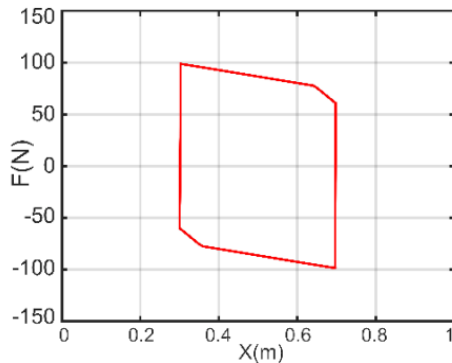
۴- نتایج و بحث

در این قسمت، نتایج به‌ترتیب در سه بخش ناحیه‌کاری استاتیکی، ناحیه‌کاری دینامیکی و طراحی کنترلر ارائه می‌شود و در هر قسمت نتایج حاصل از دو ربات با یکدیگر مقایسه شده و در مورد آنها بحث می‌شود.

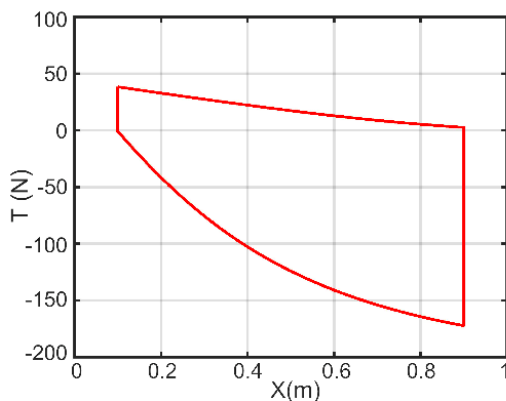
۴-۱- ناحیه‌کاری استاتیکی ربات تک‌کابل و دوکابل

با استفاده از روش‌های ارائه شده ناحیه‌کاری استاتیکی ربات تک‌کابل به دو روش عددی و تحلیلی در نمودارهای ۲ و ۳ ارائه شده است. همان طور که در نمودارها نیز مشخص است، نتایج

کاربرد چندانی ندارند. لذا عملکرد ربات تک‌کابلی جهت انجام تمارین بازتوانی قابل قبول‌تر به نظر می‌رسد.



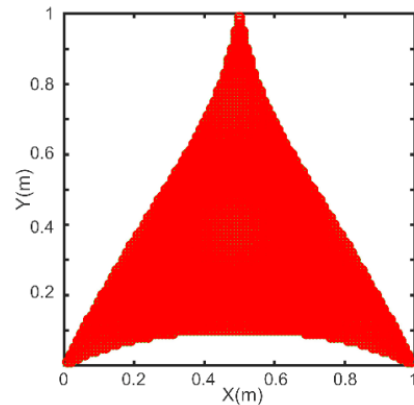
نمودار ۶) ناحیه‌کاری دینامیکی ربات تک‌کابلی



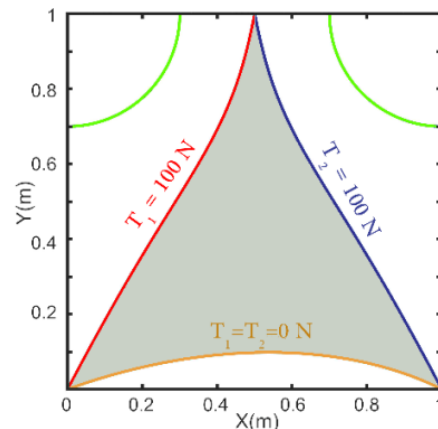
نمودار ۷) ناحیه‌کاری دینامیکی ربات دوکابلی

۳-۴- عملکرد ربات تک‌کابلی و دوکابلی با کنترلر

پس از طراحی کنترلر برای ربات تک‌کابلی با اعمال ۱۰ سانتی‌متر خطای اولیه، مطابق با نمودار ۸، کنترلر به‌صورت پایدار، خطای ایجاد شده را در زمانی کمتر از ۴ ثانیه به صفر خواهد رساند. همچنین در نمودار ۹، پارامترهای کنترلی این ربات برای حرکت صحیح بر روی مسیر خطی طراحی شده ارائه شده است که همگی در محدوده مجاز به‌صورت منطقی تغییر می‌کنند. کنترلر در ربات دوکابلی هم دقیقاً خطاهای به‌وجود آمده را در عرض ۴ ثانیه مطابق با نمودار ۱۰ به صفر می‌رساند. همچنین با توجه به تقارن ربات نسبت به مسیر تعریف شده، در ابتدا کشش دوکابلی برای جبران خطای موقعیت متفاوت است ولی پس از مدت تقریبی ۴ ثانیه، همان‌طور که در نمودار ۱۱ مشخص شده است، کشش هر دوکابلی به مقادیری یکسان می‌رسد. در پایان اثر دست بیمار بر روی کنترلر طراحی شده، مورد بررسی قرار گرفت. کنترلر توانایی از بین بردن خطای ۱۵ سانتی‌متری را دارا است و خطای ایجاد شده در موقعیت اولیه را مطابق با نمودار ۱۲ به صفر می‌رساند. اما در ادامه مسیر به علت کم‌بودن تعداد موتورها نسبت به پارامترهای موجود در مساله (اضافه شدن زاویه



نمودار ۴) ناحیه‌کاری استاتیکی ربات دوکابلی در روش حل عددی



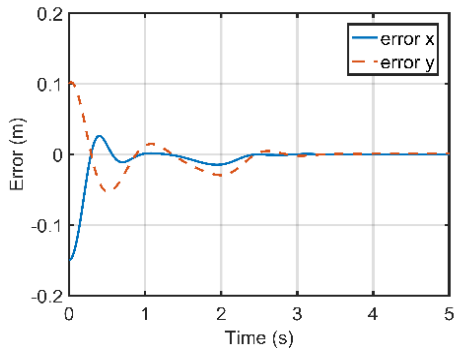
نمودار ۵) ناحیه‌کاری استاتیکی ربات دوکابلی در روش حل تحلیلی

۲-۴- ناحیه‌کاری دینامیکی ربات تک‌کابلی و دوکابلی

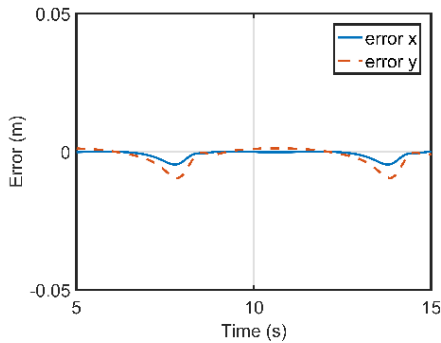
ناحیه‌کاری ربات تک‌کابلی مطابق با نمودار ۶ به‌دست می‌آید. در این ربات در هر نقطه از مسیر تمامی نیروهای برآیند به‌ازای نقاط مختلف محل اتصال کابل مطابق با نمودار ۶ خواهد بود. در شکل فقط حداقل و حداکثر نیروی وارده به جرم موثر مشخص شده، در حالی که تمامی مقادیر بین این دو جزو ناحیه‌کاری دینامیکی به حساب می‌آید.

با توجه به نمودار ۶، ربات می‌تواند در تمام طول این مسیر، جرم موثر را با حداکثر نیروی ۶۰ نیوتن تحت کشش و فشار قرار دهد. همچنین با توجه به اینکه مسیر درون ناحیه کاری استاتیکی تعریف شده، انتظار می‌رفت تا در تمامی نقاط نیروی صفر نیز تولید شود که این اتفاق در نمودار ۶ افتاده است. بر خلاف ربات تک‌کابلی، مطابق نمودار ۷ ربات دوکابلی در طول کل مسیر نمی‌تواند نیروی زیادی برای رفت‌وبرگشت به جرم موثر اعمال کند و این نیرو به ۷ نیوتن کاهش پیدا کرده است.

در مقایسه نمودارهای ۶ و ۷ درمی‌یابیم که یکی از محاسن ربات تک‌کابلی ایجاد نیروهای مثبت و منفی با یک میزان توانایی است. ربات دوکابلی هر چند توانایی ایجاد نیروهای بیشتری را دارد، اما این نیروها تک‌جهت بوده و برای حرکت رفت‌وبرگشتی



نمودار ۱۲) خطای مکانی ربات دوکابلی با کنترلر و در نظرگرفتن دست بیمار



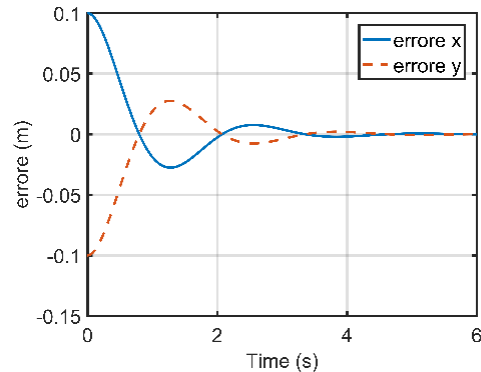
نمودار ۱۳) خطای مکانی ربات دوکابلی با کنترلر و در نظرگرفتن دست بیمار از ثانیه پنجم

۵- نتیجه‌گیری

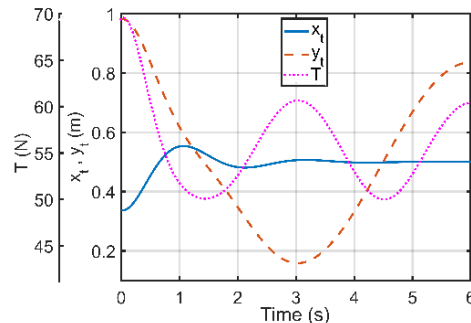
هدف اصلی این پژوهش طراحی رباتی است که ناحیه‌کاری استاتیکی و دینامیکی قابل قبولی داشته باشد. لذا برای نوآوری در طراحی ربات، سعی بر این شده است تا عواملی که در پژوهش‌های پیشین (همانند استفاده از فنر یا استفاده از محرکه برای تغییر راستای نیرو و غیره) در طراحی ربات‌ها به صورت جداگانه در مطالعاتی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، در یک ربات واحد وجود داشته باشد تا اثرگذاری آن موارد بر روی یکدیگر و همچنین بر رفتار دینامیکی و استاتیکی ربات مورد مطالعه قرار بگیرد.

مزیت اصلی استفاده از ربات‌های کابلی، کاهش هزینه‌های ساخت، جرم و حجم ربات است که امکان استفاده بیماران از آن را در منزل، فراهم خواهد کرد. با مقایسه رفتارهای مکانیکی ربات‌های تک و دوکابلی ثابت شد که لزوماً افزایش تعداد کابل و موتور موجب عملکرد بهتر ربات نخواهد بود، بلکه می‌توان با کنترل جهت اعمال نیروی کابل، عملکرد بهتری در ربات مشاهده نمود. در ربات تک‌کابلی کشش کابل در هر نقطه از صفحه‌کاری مشخص بود. لذا در این ربات مشابه ربات دوکابلی، دو پارامتر قابل کنترل وجود داشت. به همین دلیل ربات تک‌کابلی در شرایطی تقریباً یکسان با ربات دوکابلی از لحاظ استاتیکی و دینامیکی، عملکردی کاملاً برتر از خود نشان داده است. تنها مزیت ربات دوکابلی نسبت به تک‌کابلی ساختار ساده‌تر و هزینه پایین‌تر ساخت آن می‌باشد.

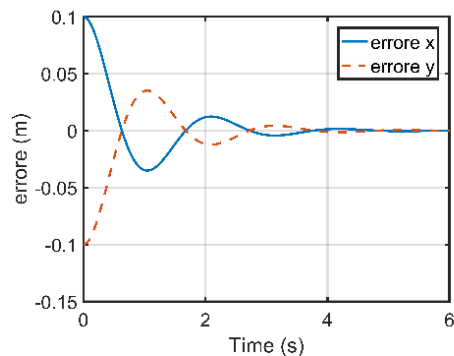
مچ و آرنج بیمار، همان طور که در نمودار ۱۳ نشان داده شده است، خطا روی صفر باقی نمی‌ماند.



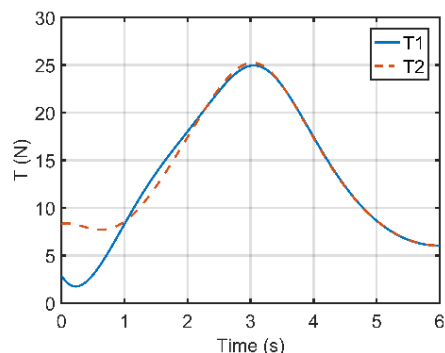
نمودار ۸) خطای مکانی ربات تک‌کابلی با کنترلر CTM



نمودار ۹) پارامترهای کنترلی ربات تک‌کابل برای حرکت روی مسیر خطی



نمودار ۱۰) خطای مکانی ربات دوکابلی با کنترلر CTM



نمودار ۱۱) پارامترهای کنترلی ربات دوکابلی با کنترلر CTM

4- Lo HS, Xie SQ. Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation: State of the art and future prospects. *Medical Engineering Physics*. 2012;34(3):261-268.

5- Pratt GA, Williamson MM. Series Elastic Actuators. RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots, 5-9 Aug. 1995, Pittsburgh, PA, USA. Piscataway: IEEE; 2002.

6- Lum SP, Reinkensmeyer DJ, Lehman SL. Robotic assist devices for bimanual physical therapy: Preliminary experiments. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*. 1993;1(3):185-191.

7- Kahn LE, Lum PS, Rymer WZ, Reinkensmeyer DJ. Robot-assisted movement training for the stroke-impaired arm: Does it matter what the robot does?, *Journal of Rehabilitation Research Development*. 2006;43(5):619-630.

8- Bruckmann T, Pott A, editors. Cable-driven parallel robots. Berlin: Springer Science & Business Media; 2012.

9- Tobias N, Mihelj M, Riemer R. ARMin: A robot for patient-cooperative arm therapy. *Medical & Biological Engineering & Computing*. 2007;45(9):887-900.

10- Mihelj M, Nef T, Riemer R. ARMin II - 7 DoF rehabilitation robot: Mechanics and kinematics *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Roma, Italy: IEEE; 2007.

11- Staubli P, Nef T, Klamroth-Marganska V, Riemer R. Effects of intensive arm training with the rehabilitation robot ARMin II in chronic stroke patients: Four single-cases. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* volume. 2009;6(1):46.

12- Hiller M, Fang S, Mielczarek S, Verhoeven R, Franitza D. Design, analysis and realization of tendon-based parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*. 2005;40(4):429-445.

13- Rosati G, Gallina P, Masiero S. Design, implementation and clinical tests of a wire-based robot for neurorehabilitation. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*. 2007;15(4):560-9.

14- Agrawal SK, Dubey VN, Gangloff JJ, Brackbill E, Mao Y, Sangwan V. Design and optimization of a cable driven upper arm exoskeleton. *Journal of Medical Devices*. 2009;3(3):031004.

15- Rosati G, Zanotto D, Agrawal SK. On the design of adaptive cable-driven systems. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2011;3(2):021004.

16- Sulzer JS, Peshkin MA, Patton JL. Design of a mobile, inexpensive device for upper extremity rehabilitation at home. *IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*. Noordwijk, Netherlands: IEEE; 2007.

17- Miripour Fard B, Padargani T. Controllable workspace generation for a cable-driven rehabilitation robot using neural network and based on patient's anthropometric parameters. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(3):137-145. [Persian]

18- Taghavi A, Behzadipour S, Khalilinasab N, Zohoor H. Workspace improvement of two-link cable-driven mechanisms with spring cable. In: Bruckmann T, Pott A, editos. *Cable-Driven Parallel Robots*. Heidelberg: Springer; 2013.

19- Bamdad M, Zarshenas H. Robotic rehabilitation with the elbow stiffness adjustability. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(11):151-158. [Persian]

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان، تایید می‌نمایند که این مقاله، قبلاً در مجله دیگری منتشر نشده است.

تعارض منافع: نویسندگان، تایید می‌نمایند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص مقاله حاضر وجود ندارد.

سهم نویسندگان: محمدیلا مروت (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناسی/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ مجید صفرآبادی‌فراهانی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناسی/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ محمدجعفر صدیق‌دامغانی (نویسنده سوم)، روش‌شناسی/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۲۵٪)؛ امیرمحمد مشایخ (نویسنده چهارم)، روش‌شناسی/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۲۵٪)

منابع مالی: هیچ‌گونه حمایت مالی در خصوص این پژوهش وجود نداشته است.

۶- فهرست علائم

x_i, y_i, z_i	محل اتصال کابل به میله بالاسری فریم در ربات تک کابل
T	کشش کابل
θ	زاویه میله بالاسری فریم در ربات تک کابل
d	فاصله محل اتصال کابل به میله بالاسری فریم تا انتهای آن
h	ارتفاع میله بالاسری فریم از سطح آن
a, b	طول و عرض فریم ربات
g	شتاب گرانش
F_{Kx}	برآیند نیروهای فنری در راستای x
F_{Ky}	برآیند نیروهای فنری در راستای y
m	جرم مؤثر
k	سختی فنر
l_0	طول آزاد فنر
l_t	طول کابل
θ_t	زاویه کابل نسبت به فریم در ربات دو کابل
q	مختصات واقعی جرم مؤثر
q _d	مختصات طراحی شده جرم مؤثر
e	خطای موقعیت
K_p	ضریب کنترلی تناسبی
K_d	ضریب کنترلی مشتق گیر
K_i	ضریب کنترلی انتگرال گیر
T_c	کشش کابل کنترلی

منابع

1- Kwakkel G, Kollen BJ, Krebs HI. Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: A systematic review. *Neurorehabil Neural Repair*. 2008;22(2):111-121.

2- Huang VS, Krakauer JW. Robotic neurorehabilitation: A computational motor learning perspective. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2009;6(1):1-13.

3- Sheng B, Zhang Y, Meng W, Deng C, Xie S. Bilateral robots for upper-limb stroke rehabilitation: State of the art and future prospects. *Medical Engineering Physics*. 2016;38(7):587-606.