مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دوره 16، شماره 1، ص‌ص 29-40

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

طراحی بهینه چندهدفه ربات موازی-کابلی سه‌بعدی مجهز به بازوی رباتیک سری

علی نصر[1]، سید علی‌اکبر موسویان[2*]

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکاترونیک، قطب رباتیک و کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، قطب رباتیک و کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 1999-19395، moosavian@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 مهر 1394

پذیرش: 19 آبان 1394

ارائه در سایت: 24 آذر 1394

کلید واژگان:

ربات ترکیبی کابلی-سری

ربات موازی-کابلی فضایی

طراحی بهینه چندهدفه

فضای کاری بدون برخورد

چکیده

ربات‌های موازی-کابلی دارای مزایای زیادی هستند؛ اما مشکلاتی نظیر برخورد کابل‌ها با یکدیگر و محیط، عدم استفاده از ساختار مناسب و نیاز به تحت کشش بودن کابل‌ها از گسترش آن‌ها جلوگیری می‌کند. لذا اتصال یک بازوی رباتیک سری به سکوی متحرک آن‌ها، موجب هم‌افزایی در قابلیت جابه‌جایی اجسام می‌گردد. این مقاله به طراحی بهینه چندهدفه، و بررسی مقایسه‌ای دو ساختار مقید و معلق از ربات موازی-کابلی سه‌بعدی می‌پردازد تا با نصب یک بازوی سری قابلیت‌های کاری یک ربات هیبرید کامل را دارا باشد. جهت بهینه‌سازی از سه دسته معیار فضای کاری، سختی سینماتیکی و حساسیت استفاده می‌شود. فضای کاری از روش نوینی محاسبه می‌گردد که حاصل ترکیب قیدهای جلوگیری از برخورد کابل‌ها با یکدیگر، برخورد کابل‌ها با سکوی متحرک، کنترل ناپذیری و تکین بودن ربات است. ابتدا به بررسی تقریبی نیرو و گشتاور عکس‌العمل بازوی رباتیک سری به سکوی متحرک پرداخته می‌شود. سپس به بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی ژنتیک جهت دستیابی به جبهه پرتو مناسب پرداخته می‌شود. جبهه پرتو با تقابل و مصالحه سه دسته معیار اصلی به دست می‌آید. دو ساختار مقید و معلق در شرایط کاملا یکسان و با یک هدف واحد بهینه‌سازی و مقایسه می‌شوند. نتایج حاصل از این بهینه‌سازی نشان می‌دهد در ساختار معلق، انرژی مصرفی جهت حمل مجموعه به‌طور قابل‌توجهی نسبت به ساختار مقید کاهش‌یافته است. همچنین طبق نتایج شبیه‌سازی ساختار مقید، فضای کاری و مهارت بیشتری در مقایسه با ساختار معلق دارد. از این نتایج در ساخت و توسعه یک نمونه آزمایشگاهی ربات موازی-کابلی سه‌بعدی استفاده‌شده است.

Multi-objective optimization design of spatial cable-driven parallel robot equipped with a serial manipulator

Ali Nasr[1], Seyed Ali Akbar Moosavian[2*]

1- Department of Electrical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
* P.O.B. 19395-1999, Tehran, Iran, moosavian@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 October 2015
Accepted 10 November 2015
Available Online 15 December 2015

Keywords:
Hybrid Parallel Serial Robot
Spatial Cable-Driven Parallel Robot
Multi-Objective Optimization Design
Non-Collision Workspace

ABSTRACT

Cable-Driven Parallel Robot has many advantages. However, the problems of cable collision between each other and environment, the lack of proper structure and non-positive cable tension prevent the spread of them. Therefore, connecting a serial manipulator to mobile platform improves the ability of object manipulation. This paper investigates the multi-objective optimization structure design and comparative study of spatial constrained and suspended cable-driven parallel robot. Installed serial manipulators possess a full hybrid robot's features. The workspace volume, kinematic stiffness and sensitivity are three sets of optimization criteria. The workspace volume is calculated by a novel approach of combination constraints to prevent cables colliding with each other, cable collision with moving platform, uncontrollability and singularity of the robot. First, the range of forces and torque reaction of the serial manipulator to moving platform is examined. Then, the evolutionary optimization genetic algorithm is used for the multi-objective optimization of constrained and suspended spatial cable-driven parallel robot structure to achieve proper Pareto front confrontation. The Pareto front reconciliation of these three criteria will be discussed. The constrained and suspended optimized by the same criteria will be compared in the same conditions. It is confirmed that the constrained structure significantly reduced actuation energy to manipulate a serial robot, supply greater workspace and manipulability. The result of this study used for manufacturing and development of a prototype spatial cable-driven parallel robot (RoboCab).

1- مقدمه

با پیشرفت صنعت و نیاز به ربات‌هایی با دقت، شتاب و توانایی ترابری بار انبوه در کاربردهای گوناگون، بازوان رباتیک سری از رده خارج‌شده‌اند. ازاین‌رو بهره‌گیری از زنجیره سینماتیکی حلقه بسته را می‌توان پاسخ به این نیاز دانست. ربات موازی، سازوکاری است که سکوی متحرک را با چند زنجیره سینماتیکی حلقه بسته به پایه متصل کند [1]. ربات‌های موازی مزایای

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Nasr, S. A. A. Moosavian, Multi-objective optimization design of spatial cable-driven parallel robot equipped with a serial manipulator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 29-40, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.13.6]

زیادی نظیر سرعت و شتاب زیاد، دقت بالا، نسبت بار به جرم متوسط و ... را دارند؛ اما دارای نواقصی نظیر وسعت کم فضای کاری، پیچیدگی محاسبات، از دست دادن سختی در نقاط تکین و هزینه ساخت زیاد هستند. باهدف کاهش هزینه طراحی، ساخت و افزایش فضای کاری، کابل جایگزین بازوهای صلب شد؛ درنتیجه دستیابی به‌شتاب، سرعت، بازده بیشتر و مصرف انرژی کم‌تر به علت کاهش اینرسی بازوها امکان‌پذیر است [2]. کابل‌ها توسط یک استوانه دوار نصب‌شده بر روی پایه صلب (کابل جمع‌کن)، جمع می‌شوند. یکی از اولین ربات‌های کابلی، ربات جرثقیلی[1] بود که شامل دو سکو به شکل مثلث متساوی‌الاضلاع با 6 کابل به شکل ربات موازی استوارت-گث[2] بود؛ با این تفاوت که به‌جای عملگرهای هیدرولیکی از کابل کنترل شونده توسط موتور الکتریکی استفاده می‌کرد. همچنین برخلاف جرثقیل‌های معمول، دارای امکان کنترل حرکات انتقالی و هم دورانی بود [3]. کاربرد ربات‌های کابلی در زمینه‌های فراوانی ازجمله انتقال اجسام سنگین [4]، بازتوان‌بخشی معلولان [5]، آموزش ورزشی [6]، واسط لامسه‌ای [7] و ... وجود دارد.

در این ربات‌ها سکوی متحرک با استفاده از تغییر طول کابل‌ها جابه‌جا می‌شوند. همچنین به علت اینکه کابل نمی‌تواند نیروی فشاری و گشتاور را تحمل کند و تنها تحمل نیروی کششی را دارد؛ لذا نمی‌توان بدون تغییری در ساختار ربات‌های موازی معمول از کابل به‌جای بند استفاده کرد؛ بنابراین باید حداقل یک محرک کابلی افزون بر تعداد درجات آزادی ربات (مقید کامل) و یا از یک نیروی منفعل خارجی نظیر نیروی گرانش مثل یک اغتشاش خارجی بر سکوی متحرک ربات (معلق) جهت ایجاد کشش در جهات مختلف فضای کاری در تمام کابل‌ها استفاده شود؛ لذا ربات‌های موازی به دودسته مقید[3] و معلق[4] تقسیم می‌شوند [8]. در ربات موازی-کابلی مقید، ژست ربات به‌صورت کامل با قیدهای سینماتیکی یک‌جانبه معین‌شده توسط کشش کابل، تعیین می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، در این ربات‌ها، تعداد عملگرها از تعداد درجات آزادی بیشتر است و ماتریس ژاکوبین غیر مربعی می‌گردد. علاوه بر افزونگی در تعداد کابل‌ها، چالش مهم دیگر برخورد کابل‌ها باهم، با بدنه و اشیاء پیرامون ربات است که با تعیین مناسب مکان اتصال کابل‌ها قابل‌رفع است.

با استفاده از ترکیب ربات موازی-کابلی با بازوی رباتیک به‌صورت شکل 1 می‌توان کاربردهای زیادی با فضای کاری بزرگ بدون برخورد کابل با محیط از آن انتظار داشت [9]؛ زیرا بازوی رباتیک متصل به آن قابلیت آن را دارد که به منافذ موجود وارد شود؛ که با متصل بودن بازوی رباتیک به سکوی متحرک ربات موازی می‌توان از این قابلیت بازوی رباتیک در فضای کاری بزرگ‌تری استفاده کرد. برای اولین بار، به ربات جرثقیلی یک بازوی رباتیک متصل شده و تحقیقات بر روی آن‌ها شروع شد. کاربردهایی که می‌توان برای ربات ترکیبی ارائه‌شده بیان کرد به‌صورت ذیل است: انتقال ساختارهای انعطاف‌پذیر، اجسام سنگین، ابزار نجات انسان و جابه‌جایی تجهیزات در هوا، لوله‌کشی در زیردریا، حفاری، نجات، جوشکاری، بلند کردن اجسام و بازیافت اجسام از منابع آبی پایدار و ناپایدار، جمع‌آوری زباله‌های رادیواکتیو و سمی، مدیریت سایت زباله‌های زیرآبی، تأسیسات بندرها نظیر جابه‌جایی بار، انتقال بار از کشتی به کشتی در دریاهای آزاد، ساخت‌وساز ساختمان‌های بلند، بزرگراه‌ها، پل‌ها، تونل‌ها، مونتاژ تیرها، دسترسی به بدنه کشتی، تعمیرات کشتی و نسخه سبک‌وزن آن قابلیت مانور در فضا را نیز دارد. در [10] به تحلیل حرکتی و استاتیکی یک مدل صفحه‌ای پرداخته‌شده است. همچنین این ربات‌های ترکیبی توانایی جهت‌گیری و چابکی مؤثرتری [11] و رفع موانع [12] نسبت به هرکدام از ربات‌ها به‌صورت جداگانه را دارند.

کارایی، ساخت و استفاده ازاین‌گونه ربات ترکیبی بسیار وابسته به نوع و ساختار ربات موازی-کابلی است. در این مقاله با تمرکز بر روی مدل ربات موازی-کابلی فضایی به بهبود طراحی آن پرداخته می‌شود. در [9-12] تنها به بررسی یک ساختار از پیش تعیین‌شده پرداخته‌شده است و هیچ دلیلی بر انتخاب ساختار معلق یا مقید ارائه نشده است. هیچ‌کدام از ربات‌های موازی-کابلی بررسی‌شده، بهینه نبودند و با توجه به تأثیر این ساختار بر روی عملکرد کلی ربات ترکیبی نتیجه‌گیری بر اساس آن ناقص است؛ لذا هدف اصلی و نوآوری این مقاله انتخاب بهترین ساختار ربات موازی-کابلی برای استفاده در ربات ترکیبی است. قبلا بهینه‌سازی ساختار ربات موازی-کابلی صفحه‌ای در [13-15] بررسی‌شده است؛ اما بهینه‌سازی ربات موازی-کابلی سه‌بعدی کاملا متفاوت است. در این راستا نقاط اتصال کابل‌ها به چارچوب ثابت جهت افزایش فضای کاری عاری از برخورد کابل‌ها، کنترل‌پذیر و غیر تکین و افزایش سختی و حساسیت تغییر داده می‌شود. استفاده از این معیارها به‌صورت همزمان در بهینه‌سازی چندهدفه از مزایای این مقاله نسبت به ادبیات مشابه است. در بهینه‌سازی ساختار موازی-کابلی میزان و حدود نیرو و گشتاور عکس‌العمل بازوی رباتیک سری بر روی سکوی متحرک جهت محاسبه فضای کاری کنترل‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. همچنین قید کمینه و بیشینه کشش قابل‌تحمل در بررسی فضای کاری کنترل‌پذیر برخلاف دیگر ادبیات لحاظ می‌شود که از نوآوری‌ها و اعمال شرایط واقعی در بهینه‌سازی جهت ساخت ربات است. در بهینه‌سازی چندهدفه به محاسبه جبهه پرتو[5] پرداخته می‌شود و از وزن دهی معیارهای بهینه‌سازی برخلاف [16] اجتناب می‌شود تا تقابل و مصالحه بین سه معیار پاسخ بهینه را تعیین کند؛ عدم وزن دهی به معیارها و استفاده از جبهه پرتو یکی از مزایای این بهینه‌سازی است.

در این مقاله ابتدا سینماتیک و دینامیک یک ربات موازی-کابلی حمل‌کننده بازوی رباتیک کلی ارائه می‌شود؛ که می‌توان از آن برای این‌گونه ربات‌ها با تعداد درجات آزادی استفاده کرد. صحت این معادلات با استفاده از مدل مجازی صحه‌گذاری شده است. جهت مقایسه منصفانه دو ساختار مقید و معلق و اهمیت نوع ساختار، نیاز است هر دو ساختار برای یک کاربرد مشخص با معیارهای یکسان بهینه‌سازی شود. سه معیار فضای کاری، سختی سینماتیکی و حساسیت جهت بهینه‌سازی این ربات موازی-کابلی در نظر گرفته می‌شود. فضای کاری از روش نوینی که حاصل ترکیب قیدهای جلوگیری از برخورد کابل‌ها با یکدیگر، برخورد کابل‌ها با سکوی متحرک، کنترل ناپذیری و تکین بودن ربات است، محاسبه می‌گردد. لذا با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی روش دینامیک معکوس بازوی رباتیک سری و این سه معیارها دو ساختار معلق و مقید بهینه‌سازی می‌شود. بهینه‌سازی چندهدفه به‌گونه‌ای انجام می‌گیرد؛ که مصالحه‌ای بین این سه معیار برقرار باشد. درنهایت با مقایسه نتایج انرژی مصرفی، حجم فضای کاری و ... هر دو ساختار، به بررسی ساختار مناسب پرداخته می‌شود.

2- مدل‌سازی سینماتیک

حرکت فضایی سکوی متحرک n درجه آزادی با m کابل تحت کشش، که در نقطه A_I به پایه (قرقره تغذیه) و در نقطه B_i به سکوی متحرک متصل است صورت می‌گیرد (شکل 2). چارچوب {A} متصل به پایه ثابت و چارچوب {B}

1- RoboCrane
2- Stewart-Gough
3- Constrained
4- Suspended

5- Pareto Front

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.13.6]

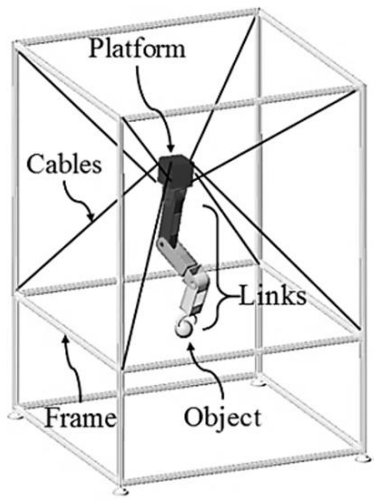

Fig. 1 Structure of the hybrid robot

شکل 1 ساختار کلی ربات ترکیبی

متصل به سکوی متحرک فرض می‌شود. موقعیت نقاط اتصال ابتدای هر کابل بر روی پایه نسبت به مرکز چارچوب {A}، با بردار $\vec{a}_i$ و موقعیت نقاط اتصال انتهای هر کابل بر روی سکوی متحرک نسبت به مرکز چارچوب {B}، با بردار $\vec{b}_i$ مشخص می‌شود. طول هرکدام با l_i و امتداد آن‌ها با بردار واحد $\hat{S}_i$ از نقطه A_i به B_i مشخص می‌شوند. موقعیت مرکز {B} با $^A\vec{P}_B = [p_x, p_y, p_z]^T$ و جهت‌گیری {B} با ماتریس دوران $^A R_B$ بیان می‌شود. معادله حلقه بسته برای هر کابل، به‌صورت (1-الف) است؛ لذا برای محاسبه طول هر کابل l_i (که همواره مقدار مثبت، حقیقی و یکتا برای نقاط داخل فضای کاری [17] است) کافی است هر طرف (1-الف) در خودش ضرب داخلی شود که نتیجه به‌صورت (1-ب) خواهد بود. با مشتق‌گیری از رابطه (1-الف) نسبت به زمان و با ضرب داخلی دو طرف آن در $^A\hat{S}_i$، معادله (1-پ) استخراج می‌شود که به‌صورت صریح سرعت متغیرهای فضای مفاصل را ارائه می‌کند. $q_{W,i}$، تغییر زاویه‌ای کابل جمع‌کن به شعاع $r_{W,i}$ باعث ایجاد ΔL (تغییر طول کابل ناشی از تغذیه یا تجمیع آن) مطابق (1-ت) خواهد شد.

$$\overrightarrow{A_iB_i} = l_i\,^A\hat{S}_i = {}^A\vec{P}_B + {}^A R_B\,{}^B\vec{b}_i - {}^A\vec{a}_i \quad \text{(1-الف)}$$

$$l_i^2 = {}^A\vec{P}_B^{\mathrm{T}}\,{}^A\vec{P}_B + {}^B\vec{b}_i^{\mathrm{T}}\,{}^B\vec{b}_i + {}^A\vec{a}_i^{\mathrm{T}}\,{}^A\vec{a}_i - 2\,{}^A\vec{P}_B^{\mathrm{T}}\,{}^A\vec{a}_i + 2\,{}^A\vec{P}_B^{\mathrm{T}}\left[{}^A R_B\,{}^B\vec{b}_i\right] - 2\left[{}^A R_B\,{}^B\vec{b}_i\right]^{\mathrm{T}}\,{}^A\vec{a}_i \quad \text{(1-ب)}$$

$$\dot{l}_i = {}^A\hat{S}_i.\,{}^A\vec{v}_B + \left({}^A\vec{b}_i \times {}^A\hat{S}_i\right){}^A\vec{\omega}_B \quad \text{(1-پ)}$$

$$q_{W,i} = r_{W,i}^{-1}\Delta L_i \quad \text{(1-ت)}$$

ماتریس ژاکوبین ربات‌ها، سرعت‌های متغیرهای فضای مفاصل $\dot{L}$ را به سرعت سکوی متحرک طبق (2-الف) مرتبط می‌سازد و همچنین نیروهای وارده بر سکوی متحرک $\vec{F}_P$ را به نیروهای مفاصل فعال (کشش کابل‌ها) $\vec{F}_C$، مطابق (2-ب) مرتبط می‌سازد [18]. بر اساس (1-پ) ماتریس ژاکوبین J_P (غالبا غیر مربعی) به‌صورت (2-پ) به دست می‌آید [19].

$$\dot{L} = J_P\left[{}^A\vec{v}_B^{\mathrm{T}}, {}^A\vec{\omega}_B^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}} \quad \text{(2-الف)}$$

$$\vec{F}_P = J_P^{\mathrm{T}}\vec{F}_C \quad \text{(2-ب)}$$

$$J_P = \begin{bmatrix} {}^A\hat{S}_1^{\mathrm{T}} & \left({}^A\vec{b}_1 \times {}^A\hat{S}_1\right)^{\mathrm{T}} \\ \vdots & \vdots \\ {}^A\hat{S}_m^{\mathrm{T}} & \left({}^A\vec{b}_m \times {}^A\hat{S}_m\right)^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}_{m\times n} \quad \text{(2-پ)}$$

متغیرهای سینماتیکی بازوی رباتیک با استفاده از قرارداد دنویت-هارتنبرگ اصلاح‌شده معرفی می‌شوند [20]. با استفاده از این متغیرها (θ_i، d_i، α_{i-1} و a_{i-1}) و (3-الف) ماتریس‌های همگن تبدیل چارچوب‌ها محاسبه می‌شود. همچنین با استفاده از پس ضرب این ماتریس‌ها در یکدیگر به‌صورت (3-ب) ماتریس همگن پنجه نسبت به پایه محاسبه می‌گردد. با توجه به شکل 2 ژست پنجه بازوی رباتیک سری در چارچوب {A} با (3-پ) محاسبه

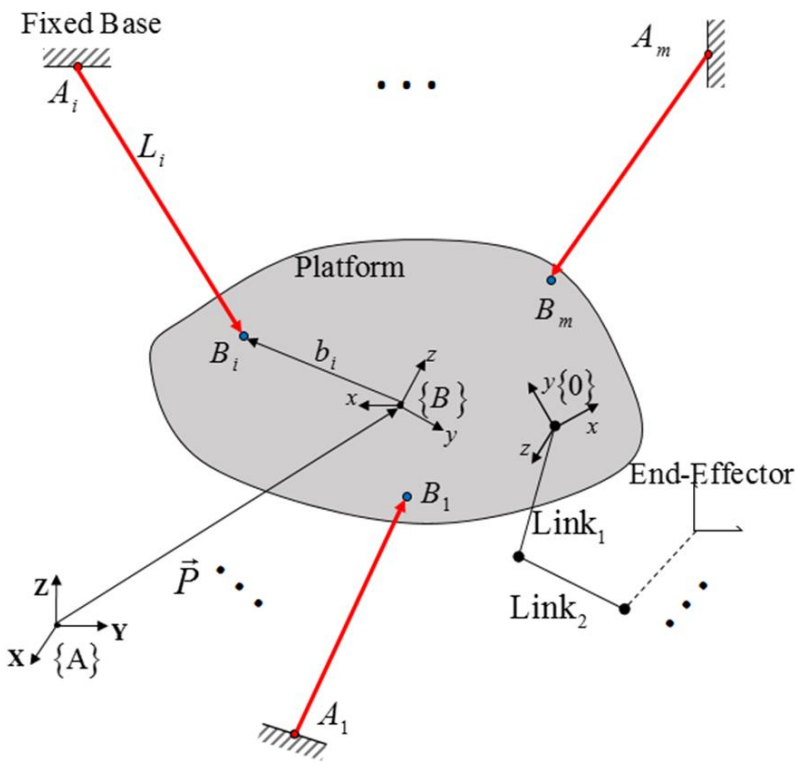

Fig. 2 Kinematics model of the hybrid parallel-serial robot

شکل 2 الگوی سینماتیکی ربات ترکیبی موازی کابلی-سری

می‌شود.

$$^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(3-الف)}$$

$$^0T_E = {}^0T_1\,{}^1T_2 \ldots {}^5T_6 = \begin{bmatrix} {}^0R_E & {}^0\vec{P}_E \\ 0_{1\times3} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(3-ب)}$$

$$\begin{bmatrix} {}^AR_E & {}^A\vec{P}_E \\ \vec{0}_{1\times3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^AR_B & {}^A\vec{P}_B \\ \vec{0}_{1\times3} & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} {}^BR_0 & {}^B\vec{P}_0 \\ \vec{0}_{1\times3} & 1 \end{bmatrix}{}^0T_E \quad \text{(3-پ)}$$

اشاعه سرعت دورانی، سرعت خطی، شتاب زاویه‌ای، شتاب خطی و شتاب خطی مرکز جرم هر بند به‌صورت تکراری از بندی به بند دیگر برای مفصل چرخشی $i+1$ به ترتیب در (4) ارائه‌شده است؛ که در آن، $^{i+1}R_i$ ماتریس دوران مفصل i به $i+1$، $^i\vec{P}_{i+1}$ بردار موقعیت مرکز مفصل $i+1$ به i، $^{i+1}\vec{P}_{C_{i+1}}$ بردار موقعیت مرکز جرم بازوی i بیان‌شده در چهارچوب $i+1$ و $^{i+1}\hat{Z}_{i+1} = [0,0,1]^{\mathrm{T}}$ است.

$$^{i+1}\vec{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}R_i\,{}^i\vec{\omega}_i + \dot{\theta}_{i+1}\,{}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad \text{(4-الف)}$$

$$^{i+1}\vec{v}_{i+1} = {}^{i+1}R_i\left({}^i\vec{v}_i + {}^i\vec{\omega}_i \times {}^i\vec{P}_{i+1}\right) \quad \text{(4-ب)}$$

$$^{i+1}\dot{\vec{\omega}}_{i+1} = {}^{i+1}R_i\left({}^i\dot{\vec{\omega}}_i + {}^i\vec{\omega}_i \times \dot{\theta}_{i+1}\,{}^{i+1}\hat{Z}_{i+1}\right) + \ddot{\theta}_{i+1}\,{}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad \text{(4-پ)}$$

$$^{i+1}\dot{\vec{v}}_{i+1} = {}^{i+1}R_i\left[{}^i\dot{\vec{v}}_i + {}^i\vec{\omega}_i \times \left({}^i\vec{\omega}_i \times {}^i\vec{P}_{i+1}\right) + {}^i\dot{\vec{\omega}}_i \times {}^i\vec{P}_{i+1}\right] \quad \text{(4-ت)}$$

$$^{i+1}\dot{\vec{v}}_{C_{i+1}} = {}^{i+1}\dot{\vec{\omega}}_{i+1} \times {}^{i+1}\vec{P}_{C_{i+1}} + {}^{i+1}\dot{\vec{v}}_{i+1} + {}^{i+1}\vec{\omega}_{i+1} \times \left({}^{i+1}\vec{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}\vec{P}_{C_{i+1}}\right) \quad \text{(4-ث)}$$

سرعت، شتاب خطی و دورانی پایه بازوی رباتیک به‌صورت (5) است.

$$^0\vec{\omega}_0 = {}^0R_A\,{}^A\vec{\omega}_B \quad \text{(5-الف)}$$

$$^0\vec{v}_0 = {}^0R_A\left[{}^A\vec{v}_B + {}^A\vec{\omega}_B \times \left({}^AR_B\,{}^B\vec{P}_0\right)\right] \quad \text{(5-ب)}$$

$$^0\dot{\vec{\omega}}_0 = {}^0R_A\,{}^A\dot{\vec{\omega}}_B \quad \text{(5-پ)}$$

$$^0\dot{\vec{v}}_0 = {}^0R_A\{{}^A\dot{\vec{\omega}}_B \times [{}^A\vec{\omega}_B \times ({}^AR_B\,{}^B\vec{P}_0) + {}^A\dot{\vec{\omega}}_B \times ({}^AR_B\,{}^B\vec{P}_0)] + {}^A\dot{\vec{v}}_B\} \quad \text{(5-ت)}$$

3- مدل‌سازی دینامیک

نیرو و گشتاور اینرسی برای بند $i: 0 \to h$ به‌صورت (6) محاسبه می‌شود.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.13.6]

$$ {}^{i+1}\vec{F}_{i+1} = m_{i+1}\,{}^{i+1}\dot{\vec{v}}_{C_{i+1}} \qquad (6\text{-الف}) $$

$$ {}^{i+1}\vec{N}_{i+1} = {}^{C_{i+1}}I_{i+1}\,{}^{i+1}\dot{\vec{\omega}}_{i+1} + {}^{i+1}\vec{\omega}_{i+1} \times {}^{C_{i+1}}I_{i+1}\,{}^{i+1}\vec{\omega}_{i+1} \qquad (6\text{-ب}) $$

نیرو و گشتاورهای بین بندها و گشتاورهای عملگرهای مفاصل، به‌صورت معادلات (7) برای $i: h \to 1$ محاسبه می‌شوند.

$$ {}^{i}\vec{f}_i = {}^{i}R_{i+1}\,{}^{i+1}\vec{f}_{i+1} + {}^{i}\vec{F}_i \qquad (7\text{-الف}) $$

$$ {}^{i}\vec{n}_i = {}^{i}R_{i+1}\,{}^{i+1}\vec{n}_{i+1} + {}^{i}\vec{P}_{c_i} \times {}^{i}\vec{F}_i + {}^{i}\vec{P}_{i+1} \times {}^{i}R_{i+1}\,{}^{i+1}\vec{f}_{i+1} + {}^{i}\vec{N}_i \qquad (7\text{-ب}) $$

$$ \tau_i = {}^{i}\vec{n}_i^{\mathrm{T}}\,{}^{i}\hat{Z}_i \qquad (7\text{-پ}) $$

تأثر بردار گرانش را می‌توان با قرار دادن ${}^{0}\dot{\vec{v}}_0$ به‌صورت (8) اعمال کرد.

$$ {}^{0}\dot{\vec{v}}_0 = {}^{0}R_A[{}^{A}\dot{\vec{\omega}}_B \times ({}^{A}R_B\,{}^{B}\vec{P}_0) + {}^{A}\vec{\omega}_B \times [{}^{A}\vec{\omega}_B \times ({}^{A}R_B\,{}^{B}\vec{P}_0)] + {}^{A}\dot{\vec{v}}_B - \vec{g}] \qquad (8) $$

همچنین، نیرو و گشتاور واردشده به سکوی متحرک ربات موازی ناشی از دینامیک و استاتیک بازوی رباتیک سری به‌صورت (9) محاسبه می‌شود.

$$ {}^{A}\vec{F}_0 = -{}^{A}R_0\,{}^{1}\vec{f}_1 \qquad (9\text{-الف}) $$

$$ {}^{A}\vec{\tau}_0 = -{}^{A}R_0\,{}^{1}\vec{n}_1 \qquad (9\text{-ب}) $$

درنهایت با ساده‌سازی و مرتب کردن معادلات نیوتن-اویلر، معادله حرکت بازوی رباتیک سری به‌صورت (10) ارائه می‌شود؛ که در آن $\vec{q}_M$ بردار متغیرهای تعمیم‌یافته بازوی رباتیک سری و $\vec{q}_P$ بردار متغیرهای فضای کاری ربات موازی-کابلی، $M_M(\vec{q}_P, \vec{q}_M)$ ماتریس مثبت معین اینرسی سامانه، $\vec{N}_M(\vec{q}_P, \vec{q}_M, \dot{\vec{q}}_P, \dot{\vec{q}}_M)$ بردار نیروهای کوریولیس، گریز از مرکز و گرانش زمین و $\vec{Q}_M$ برداری متشکل از گشتاورهای مؤثر محرک‌های بازوی رباتیک سری است. همچنین $\vec{f}_E$ بردار نیرو و $\vec{\tau}_E$ گشتاور عکس‌العمل وارد بر پنجه بازوی رباتیک سری و J_M ماتریس ژاکوبین بازوی رباتیک سری است.

$$ \vec{Q}_M = M_M(\vec{q}_P, \vec{q}_M)\left[\ddot{\vec{q}}_P^{\mathrm{T}}, \ddot{\vec{q}}_M^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}} + \vec{N}_M(\vec{q}_P, \vec{q}_M, \dot{\vec{q}}_P, \dot{\vec{q}}_M) + J_M^{\mathrm{T}}[{}^{A}\vec{f}_E^{\mathrm{T}}, {}^{A}\vec{\tau}_E^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} \qquad (10) $$

با توجه به جرم اندک کابل در مقابل جرم سکوی متحرک و نیروی وارد بر کابل‌ها، فرض می‌شود که کابل کاملا تحت کشش بوده؛ شکم ندارد و دینامیک ناچیزی دارد. علاوه بر این فرض می‌شود که محل تغذیه کابل نقطه‌ای ثابت است. با توجه به شکل 3 درزمانی که همه کابل‌ها تحت کشش (ماتریس ژاکوبین غیر تکین بوده) باشند معادلات حرکت بر اساس قانون نیوتن-اویلر به فرم ماتریسی (11) محاسبه و ارائه می‌شود.

$$ \vec{Q}_C = M(\vec{q}_P)\ddot{\vec{q}}_P + C(\vec{q}_P, \dot{\vec{q}}_P)\dot{\vec{q}}_P + \vec{G}(\vec{q}_P) - \vec{F}_M - \vec{F}_D \qquad (11) $$

در (11)، متغیر $\vec{q}_P = [p_x, p_y, p_z, \theta s_x, \theta s_y, \theta s_z]^{\mathrm{T}}$ بردار مختصات تعمیم‌یافته (θ زاویه دوران و بردار یکه $\hat{S}$ محور دوران پیچواره)، $M(\vec{q}_P)$ ماتریس مثبت معین اینرسی، $C(\vec{q}_P, \dot{\vec{q}}_P)$ ماتریس کوریولیس و گریز از مرکز، $\vec{G}(\vec{q}_P)$ بردار نیرو-گشتاور ناشی از گرانش زمین، $\vec{F}_M$ بردار نیرو-گشتاور ناشی از بازوی رباتیک سری، $\vec{F}_D$ بردار نیرو-گشتاور اغتشاشات و $\vec{Q}_C$ بردار نیرو-گشتاور تعمیم‌یافته مؤثر است که در (12) تعریف‌شده است.

$$ M(\vec{q}_P) = \begin{bmatrix} m_P 1_{3\times3} & 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} & I_P \end{bmatrix}_{6\times6} \qquad (12\text{-الف}) $$

$$ C(\vec{q}_P, \dot{\vec{q}}_P) = \begin{bmatrix} 0_{3\times3} & 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} & {}^{A}\vec{\omega} \times I_P \end{bmatrix}_{6\times6} \qquad (12\text{-ب}) $$

$$ \vec{G}(\vec{q}_P) = \begin{bmatrix} m_P\,{}^{A}\vec{g} \\ ({}^{A}R_B\,{}^{B}\vec{P}_{c.m}) \times (m_P\,{}^{A}\vec{g}) \end{bmatrix}_{6\times1} \qquad (12\text{-پ}) $$

$$ \vec{F}_M = \begin{bmatrix} {}^{A}\vec{f}_0 \\ ({}^{A}R_B\,{}^{B}\vec{P}_0) \times {}^{A}\vec{f}_0 + {}^{A}\vec{\tau}_0 \end{bmatrix}_{6\times1} \qquad (12\text{-ت}) $$

$$ \vec{F}_D = \begin{bmatrix} \vec{f}_D \\ \vec{\tau}_D \end{bmatrix}_{6\times1} \qquad (12\text{-ث}) $$

$$ \vec{Q}_C = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{m} f_i\,{}^{A}\hat{S}_i \\ \sum_{i=1}^{m} f_i({}^{A}\vec{b}_i \times {}^{A}\hat{S}_i) \end{bmatrix}_{6\times1} \qquad (12\text{-ج}) $$

در (12)، متغیرهای $\vec{f}_D$، $\vec{\tau}_D$، f_i، ${}^{A}\vec{f}_0$ و ${}^{A}\vec{\tau}_0$ به ترتیب بردار نیرو، گشتاور اغتشاشی وارد بر سکوی متحرک، نیروی کششی هر کابل، بردار نیرو و گشتاور ناشی از بازوی رباتیک متصل به آن است. همچنین m_P و I_P به ترتیب جرم و ماتریس ممان اینرسی سکوی متحرک نسبت به {B} است.

علاوه بر این، ${}^{A}\vec{b}_i$، ${}^{B}\vec{P}_0$ و ${}^{B}\vec{P}_{c.m}$ بردار موقعیت محل اتصال کابل به آن بیان‌شده در {A}، محل اتصال بازوی رباتیک به آن و موقعیت مرکز جرم آن نسبت به مرکز O_B بیان‌شده در {B} است.

معادله دینامیکی هر یک از کابل جمع‌کن‌ها نیز به فرم (13) است؛ که در آن I_W ممان اینرسی آن حول محور دوران، D_W ضریب اصطکاک ویسکوز چرخشی آن، $\tau_{W,i}$ مقدار گشتاور خروجی موتور محرک و f_i مقدار نیروی کششی کابل‌ها است.

$$ \tau_{W,i} = I_{W,i}\ddot{q}_{W,i} + D_{W,i}\dot{q}_{W,i} - r_{W,i}f_i; \quad f_i \geq 0 \qquad (13) $$

4- تجزیه‌وتحلیل ساختارهای موازی

عملکرد ربات ترکیبی بسیار وابسته به ساختار ربات موازی-کابلی است. ربات‌های موازی-کابلی علیرغم هزینه اندک ساخت، دارای چالش‌های بسیاری هستند؛ که از این جمله می‌توان به برخورد کابل‌ها با یکدیگر و سکوی متحرک، حساسیت و سختی اندک به علت عدم انتخاب ساختار مناسب، نیاز به نیروی کنترلی بیش‌ازحد به علت تکینگی در ماتریس ژاکوبین و ... اشاره کرد. تجزیه و تحلیل سینماتیک ربات‌ها به هندسه و شکل آن‌ها وابسته است و نتایج آن‌ها در محاسبه فضای کاری، نقاط تکین، دینامیک و ... استفاده می‌شود؛ لذا قبل از ساخت این‌چنین ربات‌هایی نیاز است که ساختارشان ابتدا تجزیه و تحلیل گردد تا ویژگی‌های اصلی آن‌ها شناسایی شوند. سپس نسبت به نیاز و کارایی مورد انتظار بهینه گردند. این بخش به معرفی معیارهای بررسی ربات‌های موازی-کابلی می‌پردازد. این معیارها شامل حجم فضای

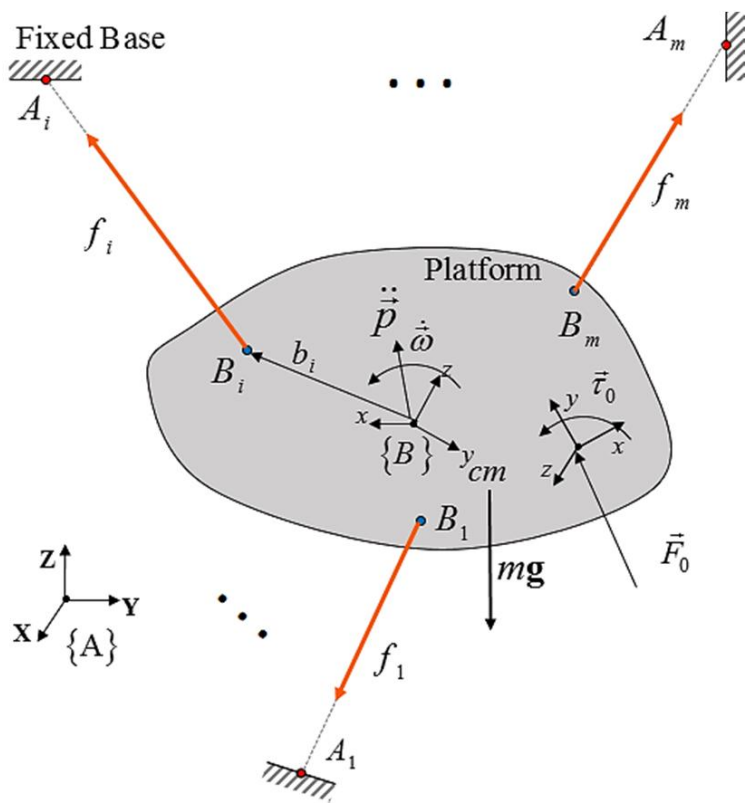

Fig. 3 Dynamics parameter of the hybrid robot

شکل 3 طرح‌واره پارامترهای دینامیکی ربات ترکیبی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.13.6]

کاری (با قیدهای عدم برخورد کابل‌ها با یکدیگر، امکان کنترل و عدم وجود تکینگی) و شاخص‌های بررسی سختی، حساسیت و مهارت عملکردی است. شاخص‌ها و معیارهایی که در این بخش مطرح می‌شوند به‌عنوان معیارهای بهینه‌سازی چندهدفه ربات‌های موازی-کابلی نیز استفاده می‌شوند.

4-1- حجم فضای کاری

حجمی از فضا که ربات می‌تواند به‌راحتی و بدون مشکل در آن مانور دهد و پنجه ربات آن را پوشش دهد فضای کاری ربات گویند. یکی از مزایای ربات‌های موازی-کابلی برخلاف ربات‌های موازی متداول داشتن فضای کاری وسیع است. همچنین این ربات‌ها برخلاف ربات‌های سری به علت اینرسی اندک بندها (کابل‌ها) نیرو کمتری جهت حرکت لازم دارند؛ لذا با استفاده از هزینه ساخت برابر در مورد بازوان سری و ربات موازی-کابلی، جهت داشتن فضای کاری بسیار بزرگ، ربات موازی-کابلی برتری آشکاری دارد؛ اما ممکن است نوع چیدمان کابل‌ها یا به‌طور مشخص ساختار مورداستفاده به‌گونه‌ای باشد که حجم فضای کاری به آن‌گونه که انتظار می‌رود نباشد. به‌طور مثال به علت برخورد کابل‌ها باهم، امکان حرکت در بخشی از فضا وجود ندارد. همچنین ممکن است در شرایطی امکان تأمین آن نیروی کششی کابل‌ها وجود نداشته باشد؛ که می‌تواند به علت ضعیف بودن کابل جمع‌کن‌ها باشد و یا اینکه ربات در نقطه‌ای تکین قرار داشته باشد. بررسی فضای کاری ربات‌های موازی و نحوه محاسبه آن با در نظر گرفتن عدم امکان برخورد کابل‌ها و کنترل‌پذیر بودن و عدم وجود نقاط تکین موردبحث قرار می‌گیرد.

4-1-1- عدم برخورد کابل‌ها

با توجه به اینکه جابه‌جایی سکوی متحرک از طریق اعمال نیروی کششی کابل‌ها به آن میسر است و در مدل‌سازی و الگوریتم کنترلی فرض می‌شود که کابل کشیده و صاف است؛ لذا باید از شکست مسیر کابل جلوگیری شود؛ به این معنی که از برخورد کابل با محیط (کابل‌های دیگر، سکوی متحرک و یا بدنه ربات) جلوگیری شود. چالش جلوگیری از برخورد کابل‌ها از مهم‌ترین مباحث است. در اکثر ادبیات مربوط به ربات‌های موازی-کابلی صفحه‌ای فرض شده است که کابل‌ها با یکدیگر برخورد ندارند؛ اما این فرض در ربات‌های سه‌بعدی معقول نیست و نمی‌توان از تنها معیارهای سینماتیکی برای طراحی ربات‌های موازی-کابلی سه‌بعدی (بیش از 3 درجه آزادی) استفاده کرد؛ لذا در این مقاله سعی می‌شود از برخورد کابل‌ها در فضای کاری موردنیاز جلوگیری شود. جهت طراحی ساختاری که در آن برخورد کابل‌ها با محیط در فضای کاری موردنیاز اتفاق نیفتد ابتدا نیاز است. امکان برخورد سنجیده شود. سپس سعی شود با تغییراتی که در ربات داده می‌شود این اتفاق نیفتد. در این مقاله از مفهوم کمینه فاصله استفاده‌شده است. به این معنی که فاصله هر جز کابل با محیط موردبررسی قرار می‌گیرد (شکل 4).

فضای کاری ربات در زمان عدم وجود مانع در آن موردبررسی قرار می‌گیرد و فرض می‌شود هیچ مانعی در فضای کاری قرار ندارد؛ لذا در این پژوهش برخورد کابل‌ها با کابل‌های دیگر و با سکوی متحرک مدنظر است؛ که در دو بخش موردبررسی قرار می‌گیرد. بخش اول مربوط به برخورد کابل‌ها با یکدیگر است و بخش دیگر مربوط به برخورد کابل با سکوی متحرک است.

جهت بررسی برخورد کابل با کابل‌های دیگر، کافی است کمینه فاصله هر جزء کابل با کابل‌های دیگر بررسی گردد. برای این کار ابتدا هر کابل به تعداد n المان با فاصله (dt) تقسیم می‌شود. فاصله مرکز هر المان $({}^{A}\vec{a}_i + t_i l_i\, {}^{A}\hat{S}_i)$ با المان‌های دیگر $({}^{A}\vec{a}_j + t_j l_j\, {}^{A}\hat{S}_j)$ کابل‌ها بررسی می‌شود. درصورتی‌که کمینه فاصله‌های محاسبه‌شده (d)، کمتر از حد مجاز یا همان حداکثر قطر کابل‌ها (d_C)، بود برخورد بین کابل‌ها اتفاق افتاده است. فاصله المان‌ها به‌گونه‌ای باید انتخاب شود که از فاصله نقاط اتصال به سکوی متحرک کمتر باشد و با توجه به نتایج تجربی بهتر است برابر نصف این فاصله باشد. درصورتی‌که بعضی از نقاط اتصال کابل‌ها به سکوی متحرک در یک نقطه باشند؛ بنابراین این فاصله المان‌ها برابر قطر کابل‌ها انتخاب می‌شوند. الگوریتم این بررسی به‌صورت شکل 5 است. آن ژست سکوی متحرک که در آن برخورد بین کابل‌ها اتفاق افتاده است از فضای کاری حذف می‌شود.

در بررسی برخورد کابل‌ها با سکوی متحرک، کافی است امکان وجود المان نزدیک نقطه اتصال کابل به سکوی متحرک را در داخل حجم سکوی متحرک بررسی شود. بررسی وجود یک نقطه در داخل نقاط یک چندضلعی به‌طور مفصل در مرجع [21] بررسی‌شده است (شکل 6).

درنهایت، سعی می‌شود ژست سکوی متحرک که این دو نوع برخورد در آن اتفاق افتاده است از فضای کاری حذف شود. در بررسی ربات موازی-کابلی صفحه‌ای، می‌توان با در نظر گرفتن کابل‌ها در صفحات مختلف، مشکل برخورد کابل‌ها با یکدیگر را نادیده گرفت [14,13]؛ اما این فرض در ربات‌های موازی-کابلی سه‌بعدی غیرممکن و اشتباه است. همچنین در مرجع [15] برای کابل‌ها محدوده‌هایی به صورتی دستی تعیین‌شده است که از برخورد کابل‌ها جلوگیری شود؛ لذا یکی از نوآوری‌های این مقاله بررسی احتمال برخورد کابل‌ها و حذف این شرایط از فضای کاری و به دست آوردن ساختار بهینه بدون برخورد کابل‌ها است.

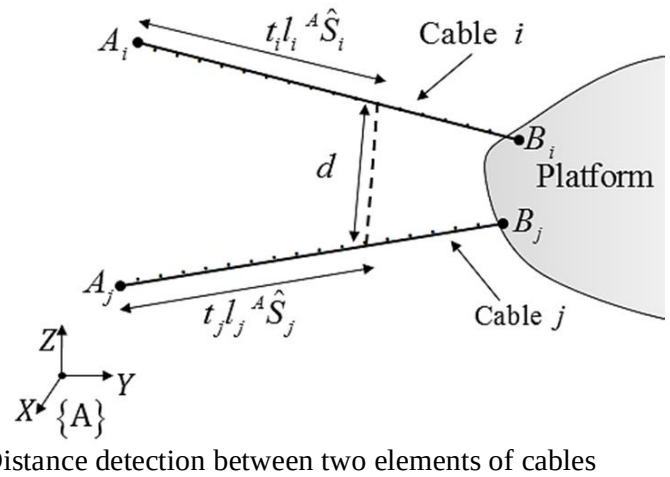

Fig. 4 Distance detection between two elements of cables

شکل 4 بررسی فاصله بین دو المان از دو کابل مختلف

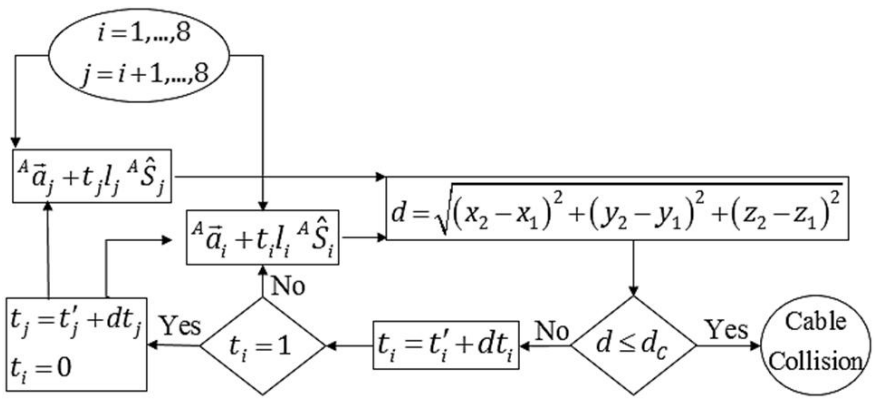

Fig. 5 Cables collision detection algorithm

شکل 5 الگوریتم بررسی برخورد کابل‌ها

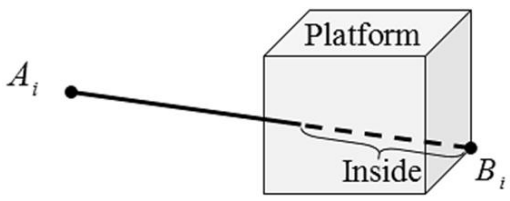

Fig. 6 Collision detection between cable and platform

شکل 6 بررسی برخورد بین کابل و سکوی متحرک

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.13.6]

4-1-2- کنترل‌پذیری

همان‌طور که قبلا ذکر شد، به دست آوردن فضای کاری منوط به امکان تأمین نیروی کششی کابل‌ها و یا تأمین گشتاور کابل جمع‌کن‌ها است. همان‌طور که ذکر شد ماتریس ژاکوبین ربات موازی مطابق (2-ب) نیرو و گشتاور کارتزین وارد بر سکوی متحرک را به نیروی عملگرها (کشش کابل‌ها) نگاشت می‌دهد؛ اما در ربات‌های کابلی این نگاشت باید به همراه قید تحت کشش بودن کابل‌ها همراه باشد لذا باید (14) همیشه برقرار باشد.

$$\left\{\vec{q}_P = [p_x, p_y, p_z, \theta s_x, \theta s_y, \theta s_z]^{\mathrm{T}} | \vec{F}_P = J_P^{\mathrm{T}} \vec{F}_C \quad \forall \begin{matrix} f_i \geq 0 \\ f_{\max} > f_i \end{matrix}\right\} \tag{14}$$

نقاطی از فضا و حالاتی که در شرط (14) صدق می‌کنند دارای کابل‌های کشیده هستند به این معنی که نیروی امتداد طول کابل مثبت است؛ اما ممکن است میزان کشش کابل‌ها قابل‌دسترس نباشد؛ یعنی در آن شرایط نیروی کششی فوق‌العاده زیادی لازم باشد؛ لذا علاوه بر شرط (14) باید حد بالا و پایین قابل تأمین نیروی کششی کابل و یا گشتاور عملگر کابل جمع‌کن را در نظر گرفت و با توجه به محدودیت‌های ساخت (حداکثر نیروی قابل‌تحمل کابل قبل از پاره شدن و حداکثر گشتاور قابل‌تحمل موتور الکتریکی بدون آسیب دیدن) را در نظر گرفت. در نظر داشته باشید که حد پایین جهت جلوگیری از شل شدن کابل و شکم دادن آن و برخورد با دیگر کابل‌ها در نظر گرفته می‌شود. همچنین قبل از ساخت نیز باید ضریب ایمنی این حدود را نیز لحاظ کرد. نیروی وارد بر سکوی متحرک ($\vec{F}_P$) را می‌توان در دو جنبه مورد ارزیابی قرارداد. تحمل نیروهای وارد بر سکوی متحرک در حالتی که ربات حرکت ندارد (استاتیک) و همچنین نیرویی که سکو باید برای داشتن شتاب‌هایی در جهات مختلف تحمل کند (دینامیک) موردنظر است. در نظر داشته باشید که در هر جنبه باید نیروی عکس‌العمل بازوی رباتیک متصل به سکوی متحرک را لحاظ کرد. این دو جنبه را می‌توان از یکدیگر جدا در نظر رفت؛ ولی ماهیت نیرو و کارایی ربات در هر دو، این تفکیک را بی‌معنا می‌انگارد؛ لذا در فضای کاری، حالت استاتیک و دینامیک جدایی از هم نیستند و مجموع حداکثر نیرو-گشتاور موردنیاز در محاسبه اعمال می‌شود. برای بررسی هر نقطه از فضا حداکثر نیرویی که موردنیاز است تا سکوی متحرک تحمل کند را باید حساب کرد و به سکوی متحرک وارد کرد. در این شرایط با محاسبه نیروی کششی کابل‌ها و بررسی حدود بالا، وجود آن نقطه در فضای کاری بررسی می‌شود.

بهینه‌سازی در [13] بدون در نظر گرفتن «فضای کاری کنترل‌پذیر با اعمال محدودیت عملگرها» انجام گرفته است. همچنین تا به حال به وجود جواب کشش مثبت کابل‌ها اهمیت داده شده است [23,22,14]؛ اما در مواردی ممکن است به علت شرایط ماتریس ژاکوبین، نیروهای کششی یک الی چند کابل به بی‌نهایت بگراید؛ بنابراین یکی از دلایل بیان این معیار بهینه‌سازی، ساخت رباتی است که توانایی ایجاد کشش معین و غیر بی‌نهایت کابل را داشته باشد. درواقع نوآوری اصلی این بخش به‌کارگیری محدودیت‌های واقعی ساخت در بهینه‌سازی ساختار ربات موازی-کابلی است.

جهت محاسبه نیروی کششی کابل‌ها ($\vec{F}_C$) با داشتن نیرو-گشتاور وارد بر سکوی متحرک ($\vec{F}_P$) نیاز به محاسبه معکوس ماتریس J_P^{T} است؛ اما به دلیل افزونگی در برخی از ربات‌های کابلی این مهم به‌راحتی امکان‌پذیر نیست و جواب یکتایی وجود ندارد؛ لذا پس از معیارهای تجزیه و تحلیل ربات‌های موازی به بیان راه‌حل مناسب پرداخته می‌شود.

4-1-3- نقاط تکین

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های ربات‌های موازی مواجهه با پیکربندی تکین در فضای کاری است که باعث از دست دادن یک یا چند درجه آزادی، سختی و کنترل‌پذیری می‌شود. در این شرایط نیرو/گشتاور عملگرها باید بیش‌ازحد گردد که امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین دوری از این نقاط تکین در فضای کاری مهم است. همچنین توجه داشته باشید که نقاط مرز فضای کاری نیز جزء مجموعه نقاط منفرد به‌حساب می‌آیند. ربات موازی-کابلی، تکینگی در سینماتیک معکوس ندارد؛ اما به علت کاهش مرتبه ماتریس ژاکوبین، تکینگی در سینماتیک مستقیم پیدا می‌کند. توجه گردد که به علت افزونگی عملگرهای ماتریس ژاکوبین، زمانی پیکربندی تکین را تجربه می‌کند که معادله (15) برقرار گردد.

$$\det\left(J_P^{\mathrm{T}} J_P\right) = 0 \tag{15}$$

نقاطی از فضای کاری که شرط (15) را ارضاء می‌کنند نیز از فضای کاری حذف می‌شود و حجم فضای کاری بدون احتساب این نقاط به دست می‌آید. این امر باعث می‌شود که ربات با احتساب حذف نقاط تکین از فضای کاری آن بهینه گردد و در نظر گرفتن این شرط جهت محاسبه فضای کاری یکی از نقاط قوت این مقاله است.

4-2- سختی

تعامل نیروی سکوی متحرک ربات موازی با محیط سخت سبب می‌شود که میزان انحراف سکوی متحرک درنتیجه این تعامل با محیط اهمیت داشته باشد و موردبررسی قرار گیرد. این انحراف ایجادشده تابعی از نیرو-گشتاورهای اعمال‌شده به محیط، سختی ساختاری اجزا، ساختار سینماتیکی ربات و ... است. رابطه نیروی عملگرهای مفاصل فعال و تغییرات طولی کابل (عملگر) ربات با معادله (16-الف) بیان می‌شود. در معادله (16-الف)، κ ماتریس قطری سختی کابل‌ها و $\Delta\vec{q}_C$ تغییرات کوچک طولی کابل است. توجه داشته باشید که ماتریس ژاکوبین نیز می‌تواند جابه‌جایی بی‌نهایت کوچک در عملگرها $\Delta\vec{q}_C$ را به سکوی متحرک $\Delta\vec{q}_P$ (بردار جابه‌جایی خطی و دورانی بی‌نهایت کوچک) را به‌صورت (16-ب) مرتبط سازد. با جایگزینی معادلات (2-ب) و (16-ب) در معادله (16-الف) می‌توان به نتیجه (16-پ) به‌عنوان رابطه عمومی سختی سکوی متحرک رسید. در این معادله K ماتریس متقارن، مثبت معین سختی است که به‌منظور تحلیل سختی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در این ربات‌های موازی-کابلی از عملگرها و کابل‌های مشابه استفاده‌شده است؛ لذا ماتریس سختی به‌صورت (16-ت) ساده می‌گردد. توجه گردد که معکوس‌پذیری ماتریس سختی این ربات در نقاط تکین امکان‌پذیر نیست و به این معنی است که سختی ربات در نقاط تکین با از دست رفتن یک یا چند درجه آزادی از دست می‌رود. همچنین می‌توان از عدد وضعیت ماتریس سختی جهت نمایش میزان سختی ربات استفاده کرد.

$$\vec{F}_C = \kappa \Delta\vec{q}_C \tag{16-الف}$$

$$\Delta\vec{q}_C = J_P \Delta\vec{q}_P \tag{16-ب}$$

$$\vec{F}_P = J_P^{\mathrm{T}} \kappa J_P \Delta\vec{q}_P \xrightarrow{K = J_P^{\mathrm{T}} \kappa J_P} \vec{F}_P = K \cdot \Delta\vec{q}_P \tag{16-پ}$$

$$K = J_P^{\mathrm{T}} \kappa J_P \xrightarrow{k_C = k_1 = \cdots = k_m} K = k_C J_P^{\mathrm{T}} J_P \tag{16-ت}$$

با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته و به علت عدم دقت در حسگرهای کشش و تأخیر کنترل کننده کابل‌های پایینی متصل به سکوی متحرک شل می‌شود؛ لذا با استفاده از فنر کششی همانند [24] در نقطه اتصال کابل به سکوی متحرک از شل شدن آن‌ها جلوگیری می‌شود؛ که در این موارد

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.13.6]

کابل‌های پایینی دارای کشش متفاوت با کابل‌های بالایی است و در امر بهینه‌سازی این معیار متفاوت از معیار حساسیت می‌گردد. عیب بزرگ ربات‌های موازی-کابلی سختی کم آن‌ها است که می‌توان تا حدودی با تغییر نقاط اتصال کابل‌ها، این عیب را رفع کرد؛ لذا استفاده از این معیار در کنار معیارهای دیگر یکی از نوآوری‌های این مقاله است که در [23,15,13] بررسی نشده است.

3-4- حساسیت

همان‌طور که در [25] بیان‌شده است بررسی این معیار در طراحی ربات‌های موازی از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به اینکه تعداد نقاطی که دقیقا باعث برقراری معادله (15) می‌شود معین و محدود است؛ لذا وضعیت ماتریس ژاکوبین در پیکربندی‌های مختلف بررسی می‌شود و نقاطی که ربات در آن‌ها مشخصا تکین نیست اما تا حدی دارای خاصیت‌های مضر آن است بررسی می‌شود. معیار بررسی در ربات‌های موازی، معکوس عدد وضعیت ماتریس ژاکوبین است. عدد وضعیت ماتریس ژاکوبین، به نسبت مقدار ویژه بزرگ ماتریس ($\lambda_{\max}$) به مقدار ویژه کوچک ماتریس ($\lambda_{\max}$)، گفته می‌شود؛ که در صورت نزدیکی به نقاط تکین، این معیار خیلی کوچک می‌شود و باید از این ناحیه پرهیز شود. در (17)، متغیر σ مقدار تکین ماتریس است.

$$\mathrm{cond}(J_P) = \left|\frac{\lambda_{\max}(J_P)}{\lambda_{\min}(J_P)}\right| = \frac{\sigma_{\max}(J_P)}{\sigma_{\min}(J_P)} \tag{17}$$

بررسی این معیار در کنار دیگر معیارها دارای اهمیت زیادی است. شاید یک ساختار دارای حساسیت مناسبی باشد اما دارای سختی کم باشد و یا اینکه به علت برخورد کابل‌ها اصلا دارای فضای کاری کوچکی باشد؛ لذا بررسی این معیارها در کنار یکدیگر نوآوری و برتری این مقاله نسبت به کارهای گذشته است و هیچ فرضی در رابطه با این معیارها نشده است (به‌طور مثال در مورد برخورد کابل‌ها).

5- تعیین نیروی کششی کابل‌ها در ربات‌های افزونه

چون کابل تنها تحمل نیروی کششی را دارد یکی از چالش‌های کنترل ربات‌های موازی-کابلی محاسبه کشش کابل‌ها است. در دسته‌ای از ربات‌های موازی از تعداد کابل‌های بیشتری نسبت به درجات آزادی ربات موازی استفاده می‌شود تا تمام کابل‌ها را تحت کشش قرار دهند. همچنین جهت بهره‌گیری از مزایای افزونگی نظیر کاهش نیرو-گشتاور موردنیاز در عملگرها، افزایش دقت و حساسیت و ... از تعداد کابل‌های بیشتری استفاده می‌شود. در این حالت ماتریس ژاکوبین غیر مربعی خواهد بود؛ لذا جهت محاسبه نیروی کششی کابل‌ها با استفاده از معادله (2-ب) جواب یکتایی وجود ندارد. در کل جهت محاسبه نیروی کابل‌ها بر اساس نیروی وارد بر سکوی متحرک به‌صورت (17-الف) برای ربات‌های غیر افزونه و معادله (17-ب) در مورد ربات‌های موازی-کابلی افزونه است. در ربات‌های افزونه که معکوس سازی ماتریس غیر مربعی J_P^{T} به‌راحتی امکان‌پذیر نیست و از شبه معکوس به‌صورت (17-پ) استفاده می‌شود. در معادله (17-ب)؛ $\left(J_P^{\mathrm{T}}\right)^*$ بردار پوچی ماتریس ترانهاده ژاکوبین است که از رابطه (17-ت) محاسبه می‌شود. همچنین درصورتی‌که در معادله (17-ب) ضریب c برابر صفر باشد و از بردار پوچی آن استفاده‌نشده باشد کمترین مقدار نیروهای کابلی محاسبه می‌شود؛ اما نمی‌توان تضمین کرد که نیروهای محاسبه‌شده مثبت باشند (کابل‌ها تحت کشش باشند)؛ لذا بردار پوچی آن درصورتی‌که دارای عناصر مثبت باشد می‌توان با تعیین ضریب c مناسب کشش مثبت کابل‌ها را محاسبه کرد و نیروی منفی محاسبه‌شده را جبران کرد. اگر و تنها اگر ماتریس ترانهاده ژاکوبین مرتبه کامل بوده و فضای پوچی آن دارای برداری با عناصر هم علامت و مخالف صفر باشد می‌توان کشش مثبت کابل‌ها را تعیین کرد.

$$\vec{F}_C = \left(J_P^{\mathrm{T}}\right)^{-1}\vec{F}_P;(m=n) \tag{17-الف}$$

$$\vec{F}_C = \left(J_P^{\mathrm{T}}\right)^{\dagger}\vec{F}_P + c\left(J_P^{\mathrm{T}}\right)^{*};(m>n) \tag{17-ب}$$

$$\left(J_P^{\mathrm{T}}\right)^{\dagger} = \left[J_P J_P^{\mathrm{T}}\right]^{-1} J_P \tag{17-پ}$$

$$J_P^{\mathrm{T}}\left(J_P^{\mathrm{T}}\right)^{*} = 0 \tag{17-ت}$$

همچنین در نظر داشته باشید با توجه به اینکه تعداد انتخاب ضریب c یکتا نیست می‌توان این ضریب را به‌گونه‌ای انتخاب کرد که کشش کابل‌ها در محدوده حد پایین و بالا قابل ایجاد برای کابل باشد. حال مسئله‌ای که در اینجا حل‌نشده است این است که این میزان کشش کابل‌های محاسبه‌شده بهینه است یا خیر. به این معنی که آیا کابل‌ها می‌توانند کشش کمتری داشته باشند و نیروی وارد بر سکوی متحرک را تأمین کنند. در اینجا الگوریتم شکل 7 پیشنهاد می‌شود. در این الگوریتم مقدار کشش کابل‌ها با قید کمینه بودن نرم 2 کشش کابل‌ها محاسبه می‌شود.

ازآنجایی‌که این الگوریتم ممکن است زمان‌بر باشد؛ امکان استفاده از آن در حلقه کنترل نیست؛ لذا می‌توان آن را برای نقاط مختلف فضای کاری و نیروهای مختلف وارد بر سکوی متحرک اجرا کرد و با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده یک شبکه عصبی آموزش داد تا بتوان از آن در حلقه کنترلی استفاده کرد. به دلیل اینکه در اینجا کنترل ربات واقعی در دستور کار نیست و از رایانه باقدرت پردازش بالایی استفاده می‌شود لذا از همان الگوریتم شکل 7 استفاده می‌شود. در اکثر مقالات امکان مثبت بودن کشش کابل‌ها بررسی‌شده است؛ در این مقاله به بهینه‌سازی این کشش به علت وجود افزونگی پرداخته می‌شود که به عملی‌تر کردن نتیجه ساخت و کارایی ربات کمک می‌کند و پرداختن به این عمل یکی از مزایای این مقاله است.

6- بهینه‌سازی ربات موازی-کابلی مقید و معلق

جهت طراحی و ساخت یک ربات ترکیبی موازی-سری نیاز است ساختار بهینه‌ای برای بخش موازی-کابلی انتخاب شود. این ساختار ربات موازی-کابلی باید جهت حمل یک بازوی رباتیک سری بهینه گردد؛ لذا در طول فرآیند طراحی علاوه بر مباحث اشاره‌شده انتخاب تعداد کابل، محل قرارگیری اتصالات کابل‌ها، هندسه بدنه ربات و ... هوشمندانه و بهینه باشد. هندسه سکوی متحرک وابسته به پایه بازوی رباتیک سری است. همچنین به دلیل نیاز به تحمل نیرو و گشتاور عکس‌العمل بازوی رباتیک در سه بعد لذا سکوی متحرک باید دارای 6 درجه آزادی باشد. همان‌طور که بیان شد به دلیل ویژگی کابل افزونگی نیاز ذاتی این‌گونه ربات‌ها است؛ لذا حداقل باید از 7 کابل استفاده کرد. همچنین با استفاده از تعداد کابل‌های بیشتر می‌توان از کابل جمع‌کن‌هایی با گشتاور کمتر استفاده کرد؛ لذا بر اساس پژوهش انجام‌شده در [26] ربات موازی-کابلی موردنظر دارای 8 کابل است.

نقاط اتصال کابل از اهمیت زیادی برخوردار است. نقاط اتصال کابل‌ها بر اساس تابع هزینه (18) بهینه‌سازی می‌شود. این تابع هزینه از 3 بخش تشکیل‌شده است. این بخش‌ها شامل معکوس حجم فضای کاری (عاری از برخورد کابل، نقاط تکین و کنترل‌پذیر)، معکوس نرم 2 معکوس عدد وضعیت ماتریس ژاکوبین و معکوس نرم 2 معکوس عدد وضعیت ماتریس سختی است.

این معیار در کل فضای موردبررسی از $i = 1$ تا آخرین سلول LC محاسبه می‌شود. در واقع فضای مورد بررسی به تعداد زیادی سلول تقسیم می‌شوند. در [27,16] معیارها با یکدیگر جمع شده‌اند که می‌تواند باعث کم

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.13.6]

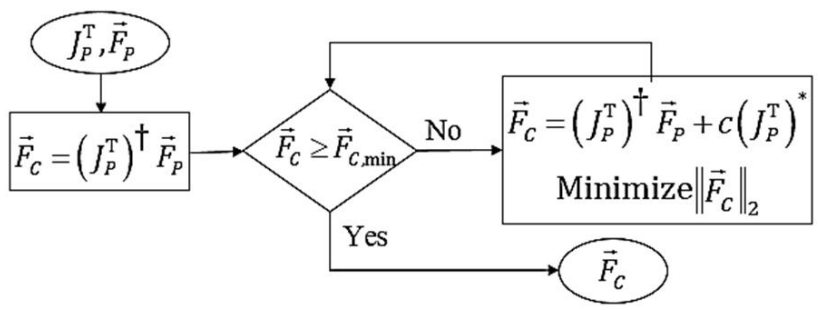

Fig. 7 Optimization of cables tension

شکل 7 الگوریتم بهینه‌سازی کشش کابل‌ها

شدن تأثیر یکی از معیارها و زمان بهینه سازی شود ولی نمی‌توان تضمین کرد که همه معیارها همزمان بهینه‌شده است. همچنین انتخاب ضریب وزنی مناسب یکی از چالش‌های این روش است؛ لذا استفاده از چند تابع هزینه و بهینه‌سازی چندهدفه یکی از برتری‌های این مقاله است.

$$F_1(\beta_1,\beta_2) = \left[\sum_{i=1}^{LC} dV_i\right]^{-1} \quad \text{(18-الف)}$$

$$F_2(\beta_1,\beta_2) = \left[\sqrt{\sum_{i=1}^{LC}\left|\frac{1}{\mathrm{cond}(K)}\right|^2}\right]^{-1} \quad \text{(18-ب)}$$

$$F_3(\beta_1,\beta_2) = \left[\sqrt{\sum_{i=1}^{LC}\left|\frac{1}{\mathrm{cond}(J_p)}\right|^2}\right]^{-1} \quad \text{(18-پ)}$$

محدوده قرارگیری قرقره تغذیه به‌عنوان قید بهینه‌سازی محسوب می‌شود؛ به این معنی که در ربات موازی-کابلی مقید، قرقره‌های تغذیه بر روی چارچوب خارجی و در دو سطح (بالا و پایین) قرار دارد. همچنین در ربات موازی-کابلی معلق، قرقره‌های تغذیه بر روی چارچوب خارجی و در سطح بالایی قرار دارد. فضای مورد بررسی، مکعبی با ابعاد $1 \times 1 \times 1(\mathrm{m}^3)$ است که مرکز سطح پایین آن بر مبدأ مختصات منطبق است.

برای ساده‌تر شدن مسئله بهینه‌سازی، این نقاط در ساختار ربات موازی-کابلی مقید در هر سطح (هر 4 کابل در یک سطح قرار دارند) نسبت به محورهای x و y متقارن انتخاب‌شده‌اند؛ به این صورت که، با معلوم بودن محل اتصال قرقره 1، قرقره‌های دیگر نیز با تقارن به دست می‌آید. همچنین موقعیت قرقره‌های تغذیه کابل‌های 1 تا 4 و 5 تا 8 در ساختار ربات موازی-کابلی معلق نسبت به هم زاویه 90° دارند؛ بنابراین موقعیت 4 کابل اول با زاویه β_1 و 4 کابل دیگر با زاویه β_2 بیان می‌شوند (شکل 8). در ضمن، موقعیت اتصال کابل به سکوی متحرک به‌صورت جدول 1 است.

7- بررسی و انتخاب ساختار ربات موازی-کابلی

در این بخش بهینه‌سازی، شبیه‌سازی و بررسی دو ربات موازی-کابلی مقید و معلق که هرکدام یک بازوی رباتیک سری را حمل می‌کنند انجام می‌گیرد. همچنین با توجه به معیارهای تجزیه‌وتحلیل ربات‌های موازی مقایسه می‌شوند. بازوی رباتیک سری 6 درجه آزادی با متغیرهای دنویت-هارتنبرگ جدول 2 است. همچنین مشخصات اینرسی و موقعیت مرکز اجزای ربات ترکیبی به‌صورت جدول 3 است. بردار موقعیت مرکز چارچوب {0} برابر $^{B}\vec{P}_0 = [32,0,-134]^{\mathrm{T}}(\mathrm{mm})$ و جهت‌گیری آن با استفاده از روش بیان محور پیچواره به‌صورت $\{\hat{S} = [1,0,0]^{\mathrm{T}}, \pi\}$ است.

نمودار مسیر زمانی حرکت سکوی متحرک و پنجه بازوی رباتیک سری به‌صورت شکل‌های 9 و 10 انتخاب‌شده است؛ که این مسیرها دارای انواع مانورها است. نیرو-گشتاورهای وارد بر سکوی متحرک با استفاده از (9) نیز به‌صورت شکل 11 است؛ که اکثر بخش‌های آن ناشی از بردار نیروی گرانش

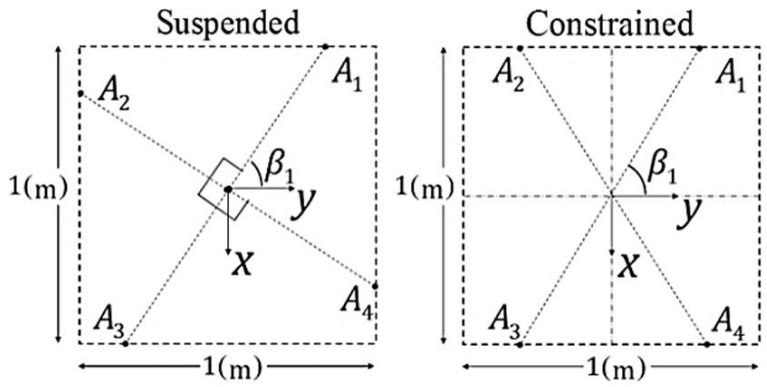

Fig. 8 Lifestyle of feeder pulley connection of robots

شکل 8 شیوه اتصال قرقره‌های کابل جمع‌کن در ربات مقید و معلق

جدول 1 موقعیت اتصال کابل‌ها به سکوی متحرک دو ربات

Table 1 Platform cables attachment points of two robots

اتصال	مقید $^{B}B_i = [x,y,z]^{\mathrm{T}}(\mathrm{m})$	معلق $^{B}B_i = [x,y,z]^{\mathrm{T}}(\mathrm{m})$
کابل 1	$[+0.00,+0.07,-0.05]^{\mathrm{T}}$	$[+0.05,+0.05,+0.05]^{\mathrm{T}}$
کابل 2	$[+0.00,+0.07,-0.05]^{\mathrm{T}}$	$[-0.05,+0.05,+0.05]^{\mathrm{T}}$
کابل 3	$[+0.00,-0.07,-0.05]^{\mathrm{T}}$	$[-0.05,-0.05,+0.05]^{\mathrm{T}}$
کابل 4	$[+0.00,-0.07,-0.05]^{\mathrm{T}}$	$[+0.05,-0.05,+0.05]^{\mathrm{T}}$
کابل 5	$[+0.07,+0.00,+0.05]^{\mathrm{T}}$	$[+0.05,+0.05,-0.05]^{\mathrm{T}}$
کابل 6	$[-0.07,+0.00,+0.05]^{\mathrm{T}}$	$[-0.05,+0.05,-0.05]^{\mathrm{T}}$
کابل 7	$[-0.07,+0.00,+0.05]^{\mathrm{T}}$	$[-0.05,-0.05,-0.05]^{\mathrm{T}}$
کابل 8	$[+0.07,+0.00,+0.05]^{\mathrm{T}}$	$[+0.05,-0.05,-0.05]^{\mathrm{T}}$

جدول 2 پارامترهای چهارگانه دنویت-هارتنبرگ اصلاح‌شده

Table 2 Modified Denavit-Hartenberg parameters

پارامتر	θ_i	$d_i(\mathrm{m})$	α_{i-1}	$a_{i-1}(\mathrm{m})$
مفصل 1	θ_1	0	0	0
مفصل 2	θ_2	0	-90°	0
مفصل 3	$\theta_3 + 90^\circ$	0	0	0.19
مفصل 4	θ_4	0.21	-90°	0
مفصل 5	θ_5	0	90°	0
مفصل 6	θ_6	0	-90°	0

جدول 3 مشخصات اینرسی و موقعیت مرکز جرم اجزاء ربات

Table 3 Inertial and mass center position of robots parts

قطعه	$^{c_i}I_i(\mathrm{kg.mm})$ $[I_{xx},I_{yy},I_{zz},I_{xy},I_{xz},I_{yz}]$	$^{i}P_{C,i}(\mathrm{mm})$ $[x,y,z]^{\mathrm{T}}$	m_i (gr)
سکو	[111,947,1256,36,84,28]	$[0,0,0]^{\mathrm{T}}$	374
بند 1	[611,549,279,2,−33,−29]	$[3,1,-57]^{\mathrm{T}}$	370
بند 2	[549,2491,2788,−657,232,81]	$[80,10,0]^{\mathrm{T}}$	353
بند 3	$[10^4,363,919,-29,-16,-284]$	$[95,4,0]^{\mathrm{T}}$	385
بند 4	[121,157,116,−1,9,5]	$[-26,11,1]^{\mathrm{T}}$	176
بند 5	[762,299,493,48,69,51]	$[74,4,0]^{\mathrm{T}}$	378
بند 6	[121,157,116,−1,9,5]	$[0,0,100]^{\mathrm{T}}$	200

است و بخش اندکی به دیگر بخش های معادله (10) مربوط می‌شود. همچنین نرم دو اختلاف نیرو-گشتاور عکس‌العمل پایه بازوی رباتیک سری بر روی سکوی متحرک با اطلاعات به‌دست‌آمده از مدل مجازی ساخته‌شده در جعبه‌ابزار سیم-مکانیک نرم‌افزار متلب به‌صورت شکل 11 است و نشان می‌دهد که محاسبات دقت بالایی دارد. با توجه به شکل 11 و شبیه‌سازی‌های

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.13.6]

دیگر دینامیک معکوس بازوی رباتیک متصل به سکوی متحرک، محدوده نیرو و گشتاور وارد بر این سکوی و دینامیک خود آن بین $\vec{F}_{P,\max} = [4,4,-20,3,3,1]^{\mathrm{T}}$ و $\vec{F}_{P,\min} = -[4,4,21,3,3,1]^{\mathrm{T}}$ است. این دو جهت محاسبه فضای کاری کنترل‌پذیر بر اساس (14) استفاده می‌شود. توجه گردد که حداکثر نیروی کشش کابل که کابل جمع‌کن می‌تواند ایجاد کند برابر $f_{\max} = 23(\mathrm{N})$ است.

ضریب سختی چهار کابل فوقانی، $k_1 = \cdots = k_4 = 1000(\mathrm{N/m})$ و چهار کابل پایینی، $k_5 = \cdots = k_8 = 100(\mathrm{N/m})$ جهت محاسبه میزان سختی سینماتیکی ربات استفاده‌شده است. زاویه مجاز چرخش حول هر سه محور $[-10^{\circ}, 10^{\circ}]$ در نظر گرفته‌شده است. روش بهینه‌سازی چندهدفه به‌کاررفته الگوریتم ژماآ[1] است که جبهه پرتوی توابع هدف ربات را تعیین می‌کند [28]. متغیرهای طراحی β_1 و β_2 به‌گونه‌ای برگزیده می‌شوند که مصالحه‌ای بین توابع هدف F_1، F_2 و F_3 صورت گیرد. آنچه این مقاله را از کار ارائه‌شده در [22,16,14] متمایز می‌سازد نوع ربات موردنظر (فضایی)، نوع و

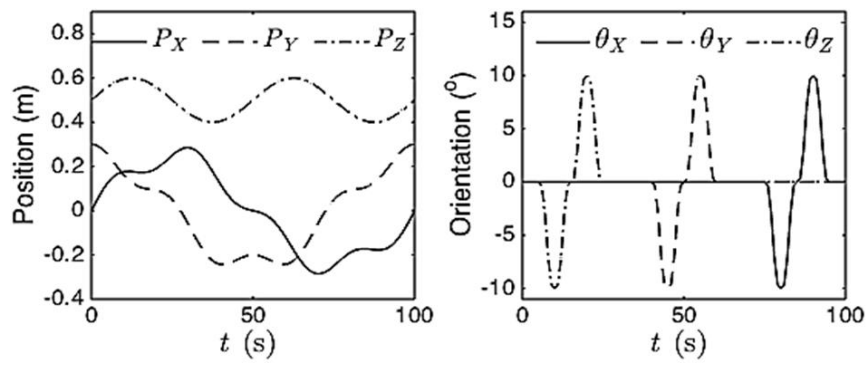

Fig. 9 General trajectory of moving platform

شکل 9 نمودار یک مسیر زمانی عمومی حرکت سکوی متحرک

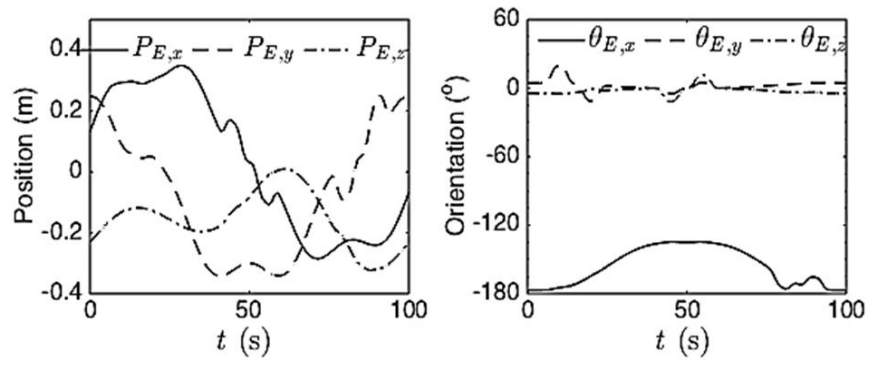

Fig. 10 General trajectory of serial manipulator end-effector

شکل 10 نمودار یک مسیر زمانی عمومی حرکت پنجه بازوی رباتیک سری

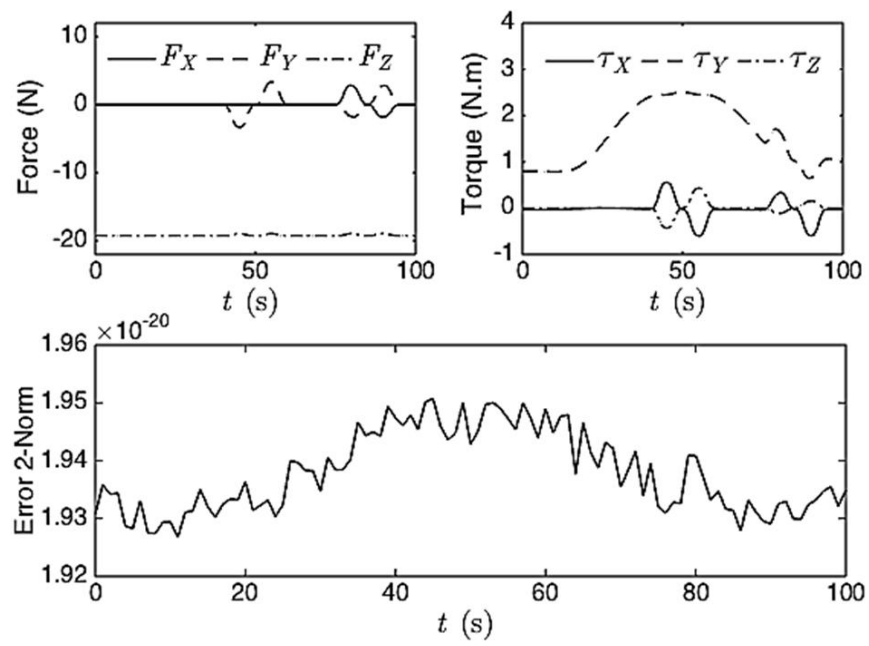

Fig. 11 Wrench of the manipulator base reaction on the moving platform and 2-norm error of modeling

شکل 11 نیرو-گشتاور عکس‌العمل وارد بر سکوی متحرک و نرم 2 خطای مدل‌سازی

1- Genetic Multiobjective Optimization Algorithm

تعداد توابع هدف (فضای کاری عاری از برخورد کابل و ...) و نوع الگوریتم بهینه‌سازی است. جهت شروع بهینه‌سازی فضای یک مترمکعب به تعداد یک‌میلیون سلول تقسیم‌بندی می‌شود. سپس متغیرهای طراحی β_1 و β_2 حدس زده ساختار ربات را تشکیل می‌دهند. سپس سینماتیک معکوس ربات سری برای هر سلول حل می‌گردد. برای تمام سلول‌های فضا توابع F_1، F_2 و F_3 محاسبه می‌شوند. حال الگوریتم ژماآ با تغییر متغیرهای طراحی جهت به دست آمدن کمینه‌ترین پاسخ برای توابع هدف، سعی می‌کند. پس از 23 روز پردازش، نتایج بهینه‌سازی به‌صورت جدول 4 به دست آمد.

با توجه به جدول 4، اتصال مقید 1 دارای F_2 کمینه است اما اتصال مقید 2 دارای F_3 کمینه است. در اتصال مقید 3 و 4 معکوس حجم فضای کاری کمینه است. درواقع هر نوع اتصال به‌دست‌آمده دارای ویژگی‌های خاص خود است و با توجه به کاربرد آن انتخاب می‌شود. در جابه‌جایی اجسام سختی ربات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است لذا بیشینه‌سازی معیار سختی و یا همان کمینه‌سازی تابع هدف F_2 بر بقیه توابع مقدم است؛ بنابراین برای ساخت ربات، ساختار اتصال مقید 1 پیشنهاد می‌شود. در مورد ساختار معلق نیز می‌توان به این نکته اشاره کرد که تمام پاسخ‌های بهینه دارای حجم فضای کاری کم‌تری نسبت به ساختار مقید است. همان‌طور که بیان شد سختی سینماتیکی در حمل بازوی رباتیک سری از اهمیت بالایی برخوردار است. این معیار در ربات موازی-کابلی معلق برعکس ساختار مقید شرایط مناسبی ندارد. حساسیت اتصال معلق 3 و 4 مناسب‌تر از اتصالات دیگر ساختارهای معلق است؛ اما در کل بدتر از ساختار مقید است. در جدول 4، اطلاعات مربوط به ربات موازی-کابلی مقید ساخته‌شده در دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی (ربوکاب[2]) ارائه‌شده است که به دلیل محدودیت‌های ساخت نمی‌توان نقاط اتصال را همانند نتیجه بهینه‌سازی قرارداد. به‌غیراز فضای کاری، میزان سختی و حساسیت این ربات ساخته‌شده مناسب ارزیابی می‌شود.

فضای کاری کنترل‌پذیر، بدون برخورد کابل‌ها و نقاط تکین هرکدام از ساختارها به‌صورت شکل 12 است. ساختار مقید دارای فضای کاری به حجم $0.7246(\mathrm{m}^3)$ و معلق $0.665(\mathrm{m}^3)$ است؛ که نشان می‌دهد ساختار مقید فضای کاری بزرگ‌تر و مناسب‌تری جهت حمل یک بازوی رباتیک را دارد.

کشش بهینه کابل‌های هرکدام از ساختارها به‌صورت شکل 13 است. در این نمودار تمام کابل‌ها دارای کشش مثبت و کمینه هستند. بر اساس شکل 14 توان مکانیکی مصرفی ساختار مقید برابر $67.705(\mathrm{W})$ و ساختار معلق

جدول 4 نقاط مشخص‌شده در جبهه پرتو و نتایج بهینه‌سازی

Table 4 Pareto front point and optimized result

F_3	F_2	F_1	β_2(rad)	β_1(rad)	نوع اتصال
1.640	3.781	1.380	0.8937	0.7366	اتصال مقید 1
1.639	3.782	1.380	0.8938	0.7366	اتصال مقید 2
1.641	3.782	1.379	0.8942	0.7365	اتصال مقید 3
1.640	3.783	1.379	0.8941	0.7365	اتصال مقید 4
2.154	7.254	1.506	5.5727	5.7478	اتصال معلق 1
3.292	13.071	1.500	0.4039	5.7516	اتصال معلق 2
1.854	6.232	1.504	5.5729	5.7510	اتصال معلق 3
1.855	6.231	1.502	5.5730	5.7542	اتصال معلق 4
1.460	3.460	1.459	0.8900	0.7300	روبوکاب

2- Robotic Manipulator Careered by cable-driven parallel robot (RoboCab)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.13.6]

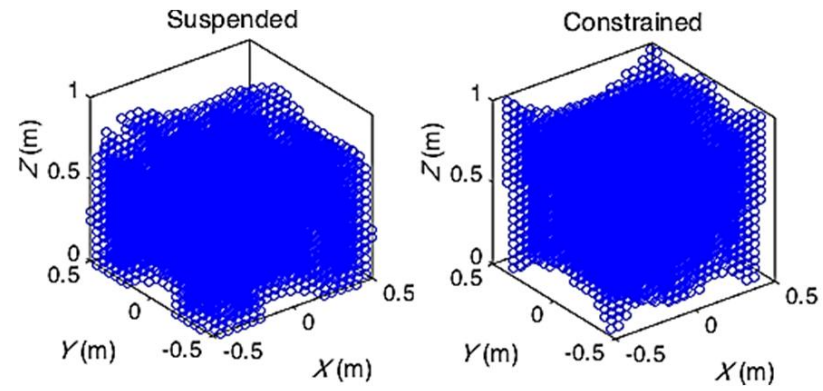

Fig. 12 Workspace of constrained and suspended robot

شکل 12 فضای کاری دو ربات مقید و معلق

برابر (W)25.128 است که نشان‌دهنده برتری ساختار معلق در شرایط کاملا یکسان است؛ اما دلیل این تفاوت را می‌توان به سهم نیروی عمودی وارد بر سکوی متحرک دانست. به‌گونه‌ای در ربات معلق 8 کابل همزمان وظیفه تأمین این نیرو را دارند؛ ولی در ربات مقید 4 کابل این وظیفه را بر عهده‌دارند و 4 کابل دیگر در تغییرات زاویه‌ای سکوی متحرک نقش مؤثر را دارند؛ اما بامطالعه مسیر حرکتی می‌توان مشاهده کرد که شتاب سکو بسیار کم است و در این حدود ربات معلق از عهده حمل بازوی رباتیک برمی‌آید؛ درصورتی‌که شتاب‌ها بسیار زیاد باشد ربات معلق به مشکل برمی‌خورد. یکی از کاربردهایی که نیاز به چنین شتاب‌هایی است شبیه‌سازها است. با توجه به این جمع‌بندی و باهدف آزمایش رباتی با سختی بالا، ربات موازی-کابلی مقید ساخته‌شده در دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی به‌صورت شکل 15 است. کابل‌جمع‌کن‌های این ربات می‌تواند (N)24 کشش در کابل‌ها ایجاد کنند. این ربات قابلیت حمل یک بازوی رباتیک با مشخصات اینرسی جدول 3 را دارد. مشخصات عملی طرح که در [27] آمده است، به منزله تاییدی بر نتایج توابع هدف ذکر شده در این مقاله است. با مقایسه نمودار شکل 14 و جدول 4 می‌توان به این نتیجه رسید که جابه‌جایی سکوی متحرک بدون هیچ اغتشاش خارجی و با شتاب بسیار کم، ساختار معلق مناسب ارزیابی می‌شود؛ اما با مقایسه و بررسی معیارهای حساسیت و مهارت ربات‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که ربات مقید ساختار مناسبی جهت کنترل دارد. همچنین فضای کاری ربات مقید در نزدیک نقاط تغذیه کامل‌تر از ربات معلق است؛ تنها با استفاده از ربات معلق می‌توان از برخورد کابل با پایین فضای کاری جلوگیری کرد. این مقایسه در جدول 5 ارائه‌شده است.

8- نتیجه‌گیری

در این مقاله دو ربات موازی-کابلی مقید و معلق جهت حمل بازوی رباتیک سری با یکدیگر در شرایط یکسان مقایسه عادلانه شده‌اند. ابتدا مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی کاملا عمومی برای این‌گونه ربات‌های ترکیبی ارائه شد. جهت بهینه‌سازی از سه دسته معیار حجم فضای کاری، سختی سینماتیکی و حساسیت که در بررسی ربات‌های موازی-کابلی بسیار مهم هستند استفاده شد. فضای کاری از روش نوینی که حاصل ترکیب قیدهای جلوگیری از برخورد کابل‌ها با یکدیگر، برخورد کابل‌ها با سکوی متحرک، کنترل ناپذیری و تکین بودن ربات است، محاسبه گردید. محل قرقره‌های تغذیه متغیر بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی ژنتیک بر اساس این سه معیار هر دو ساختار بهینه گردیدند تا امکان مقایسه عادلانه این دو فراهم شد. با مقایسه معیارهایی نظیر حجم فضای کاری، سختی سینماتیکی و حساسیت، ساختار مقید برتری آشکاری بر ساختار معلق دارد؛ اما با بررسی توان مصرفی این دو ساختار می‌توان به این نتیجه رسید که ساختار معلق به‌اندازه 62% برای یک مسیر

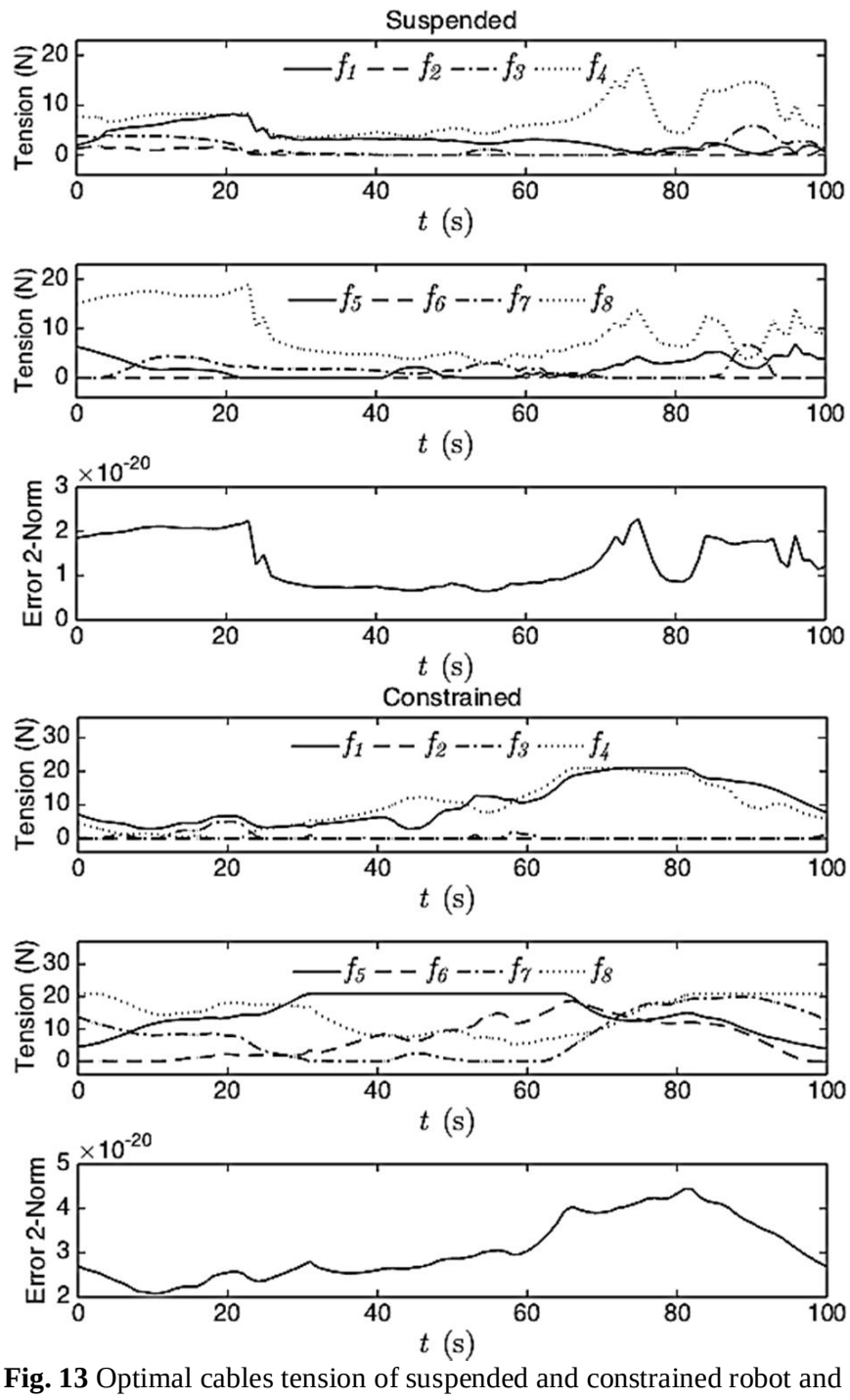

Fig. 13 Optimal cables tension of suspended and constrained robot and 2-norm error of modeling

شکل 13 کشش بهینه کابل‌های ربات‌های معلق و مقید و نرم 2 خطای مدل‌سازی

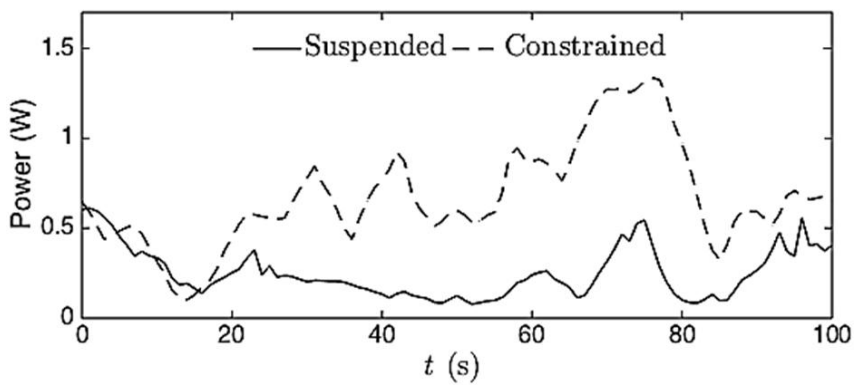

Fig. 14 Mechanical power of suspended and constrained robot

شکل 14 توان مکانیکی مصرفی ربات‌های مقید و معلق

جدول 5 مقایسه بین ربات‌های موازی-کابلی معلق و مقید

Table 5 Comparing between suspended and constrained robot

مشخصه	مقایسه
فضای کاری در شرایط مساوی	مقید > معلق
برخورد کابل‌ها با یکدیگر	مقید > معلق
برخورد کابل‌ها با محیط	مقید > معلق
انرژی مصرفی	مقید > معلق
سختی	مقید > معلق
کنترل‌پذیری	مقید > معلق
تکینگی	مقید < معلق

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.13.6]

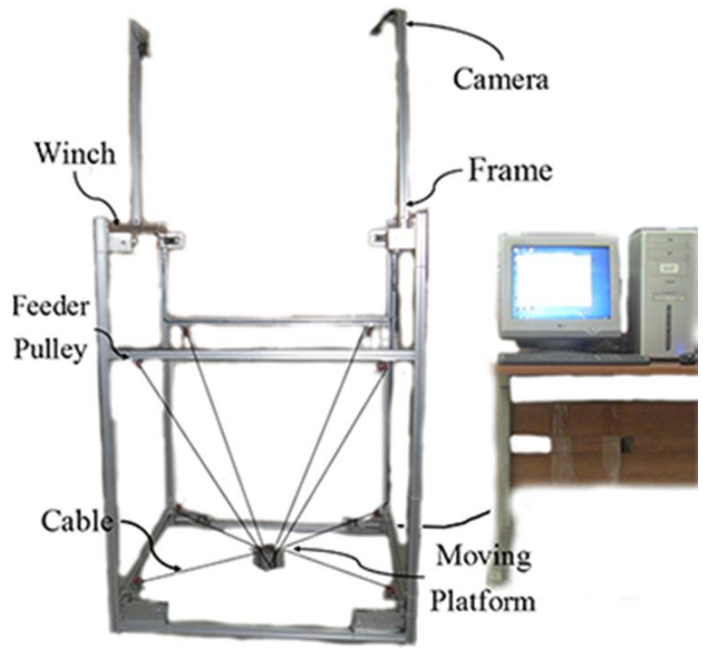

Fig. 15 Manufactured cable-driven parallel robot (RoboCab)

شکل 15 ربات موازی-کابلی فضایی ساخته شده (روبوکاب)

زمانی عمومی مشابه در حمل بازوی رباتیک توان کمتری نسبت به ساختار مقید لازم دارد. در کاربردهایی که شتاب‌های جانبی وارد بر سکوی متحرک زیاد است و سختی ربات اهمیت دارد ساختار مقید توصیه می‌شود؛ اما در جابه‌جایی یک جسم توسط بازوی رباتیک در صورت محدودیت انرژی، ساختار معلق توصیه می‌شود.

9- فهرست علائم

A_i	نقطه اتصال کابل به قرقره تغذیه چارچوب
$\{A\}$	چارچوب متصل به پایه ثابت
$\vec{a}_i$	موقعیت نقاط اتصال ابتدای هر کابل بر روی پایه (m)
a_{i-1}	فاصله بین محورهای z_i و z_{i-1}، اندازه‌گیری شده در راستای x_i
B_i	نقطه اتصال کابل به سکوی متحرک
$\{B\}$	چارچوب متصل به سکوی متحرک
$\vec{b}_i$	موقعیت نقاط اتصال انتهای هر کابل بر روی سکوی متحرک (m)
C	ماتریس پادمتقارن کوریولیس
d_i	فاصله بین محورهای x_{i-1} و x_i اندازه‌گیری شده در راستای z_i
F_i	تابع هدف بهینه‌سازی
$\vec{f}$	بردار نیرو (N)
$\vec{G}$	بردار نیرو/گشتاور ناشی از گرانش زمین
${}^{A}\vec{g}$	بردار شتاب گرانش
h	تعداد بند بازوی رباتیک سری
${}^{c}I$	ممان اینرسی حول مرکز جرم
J	ماتریس ژاکوبین
l_i	طول هر کابل (m)
M	ماتریس مثبت معین اینرسی ربات
m	تعداد کل کابل‌ها
m_i	جرم عضو i، (kg)
$\vec{N}$	بردار نیروهای کوریولیس، گریز از مرکز و گرانش زمین
$\vec{P}$	بردار موقعیت (m)
$\vec{Q}$	بردار نیرو/گشتاور تعمیم‌یافته (N) یا (N.m)
$\vec{q}$	بردار متغیرهای فضای مفاصل (m) یا (rad)
R	جهت‌گیری چارچوب متصل به سکوی متحرک با ماتریس دوران
$\hat{S}$	بردار واحد محور پیچواره
$\hat{S}_i$	بردار واحد امتداد طول کابل‌ها
${}^{i-1}T_i$	ماتریس تبدیل همگن i نسبت به $i-1$
$\vec{v}$	بردار سرعت خطی $(\mathrm{m.s^{-1}})$

علائم یونانی

α_{i-1}	زاویه بین محورهای z_i و z_{i-1} اندازه‌گیری شده حول محور x_i
β_i	زاویه محل قرارگیری قرقره تغذیه نسبت به محور y در صفحه xy
θ_i	زاویه بین محورهای x_{i-1} و x_i اندازه‌گیری شده حول z_i
θ	زاویه دوران (rad)
$\vec{\omega}$	بردار سرعت زاویه‌ای $(\mathrm{rad.s^{-1}})$
$\vec{\tau}$	بردار گشتاور (N.m)

بالانویس‌ها

$\dagger$	شبه معکوس
$*$	بردار پوچی

زیرنویس‌ها

C	کابل
E	پنجه بازوی رباتیک
M	بازوی رباتیک
P	سکوی متحرک
W	کابل جمع‌کن

10- مراجع

[1] J. P. Merlet, *Parallel robots*, pp. 12-13, The Netherlands: Springer, 2010.
[2] J. Pusey, A. Fattah, S. Agrawal, E. Messina, Design and workspace analysis of a 6–6 cable-suspended parallel robot, *Mechanism and machine theory*, Vol. 39, No. 7, pp. 761-778, 2004.
[3] J. Albus, R. Bostelman, N. Dagalakis, The nist robocrane, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 10, No.1, pp. 709–724, 1993.
[4] G. El-Ghazaly, M. Gouttefarde, V. Creuze, Adaptive terminal sliding mode control of a redundantly-actuated cable-driven parallel manipulator: cogiro, *Cable-Driven Parallel Robots*, pp. 179-200, Switzerland: Springer, 2015.
[5] G. Rosati, P. Gallina, S. Masiero, Design, implementation and clinical tests of a wire-based robot for neurorehabilitation, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 560-569, 2007.
[6] T. Morizono, K. Kurahashi, S. Kawamura, Realization of a virtual sports training system with parallel wire mechanism, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3025-3030, 1997.
[7] L. Dominjon, J. Perret, A. Lécuyer, Novel devices and interaction techniques for human-scale haptics, *The Visual Computer*, Vol. 23, No. 4, pp. 257-266, 2007.
[8] R. G. Roberts, T. Graham, T. Lippitt, On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable - suspended robots, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 15, No. 10, pp. 581-597, 1998.
[9] M. Bamdad, F. Taheri, Improvement of end-effector orientability capability in a serial-parallel cable robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 336-344, 2015. (in Persian فارسی)
[10] A. Fattah, S. K. Agrawal, On the design of cable-suspended planar parallel robots, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 127, No. 5, pp. 1021-1028, 2005.
[11] X.-J. Liu, I. A. Bonev, Orientation capability, error analysis, and dimensional optimization of two articulated tool heads with parallel kinematics, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 130, No. 1, pp. 11-15, 2008.
[12] H. Osumi, Y. Utsugi, M. Koshikawa, Development of a manipulator suspended by parallel wire structure, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 498-503, 2000.
[13] B. M. Fard, T. Padargani, Controllable workspace generation for cable-driven rehabilitation robotusing neural network and based on patient's anthropometric parameters, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 137-145, 2015. (in Persian فارسی)
[14] S. A. Khalilpour, H. R. Taghirad, M. A. Shoorehdeli, M. T. Masouleh, Applying evolutionary algorithms in multiobjective optimization of planar cabledriven parallel robots, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 44-54, 2014. (in Persian فارسی)
[15] R. Yao, X. Tang, J. Wang, P. Huang, Dimensional optimization design of the four-cable-driven parallel manipulator in fast, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 15, No. 6, pp. 932-941, 2010.
[16] M. M. Aref, H. D. Taghirad, S. Barissi, Optimal design of dexterous cable driven parallel manipulators, *International Journal of Robotics*, Vol. 1, No. 1, pp. 29-47, 2009.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.13.6]

[17] M. M. Aref, H. D. Taghirad, Geometrical workspace analysis of a cable-driven redundant parallel manipulator: kntu cdrpm, *Proceeding of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1958-1963, 2008.
[18] G. Barrette, C. M. Gosselin, Determination of the dynamic workspace of cable-driven planar parallel mechanisms, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 127, No. 2, pp. 242-248, 2005.
[19] G. J. Chogan, M. H. Ghasemi, M. Dardel, Jacobian analysis, dynamic modeling and adaptive control of cable robot with six degrees of freedom and six cables, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 391-400, 2015. (in Persian فارسی)
[20] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, pp. 62-69, Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall, 2005.
[21] M. I. Shamos, D. Hoey, Closest-point problems, *Proceeding of IEEE 16th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, pp. 151-162, 1975.
[22] S. Bouchard, C. M. Gosselin, Workspace optimization of a very large cable-driven parallel mechanism for a radiotelescope application, *Proceeding of American Society of Mechanical Engineers*, pp. 963-970, 2007.
[23] G. Yang, C. B. Pham, S. H. Yeo, Workspace performance optimization of fully restrained cable-driven parallel manipulators, *Proceeding of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 85-90, 2006.
[24] H. Liu, C. Gosselin, T. Laliberté, Conceptual design and static analysis of novel planar spring-loaded cable-loop-driven parallel mechanisms, *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 4, No. 2, pp. 10-21, 2012.
[25] N. Jaafarzadeh, M. Mahboubkhah, Design and analysis of workspace and singularity of a 4 degree of freedom parallel robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 28-36, 2014. (in Persian فارسی)
[26] M. Michelin, C. Baradat, D. Q. Nguyen, M. Gouttefarde, Simulation and control with xde and matlab/simulink of a cable-driven parallel robot (cogiro), *Cable-Driven Parallel Robots*, pp. 71-83, Switzerland: Springer, 2015.
[27] A. Nasr, S. A. A. Moosavian, Multi-criteria design of 6-dof fully-constrained cable driven redundant parallel manipulator, *Third RSI International Conference on Robotics and Mechatronics*, Tehran, Iran, 2015.
[28] K. Deb, *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, pp. 15-19, New York: John Wiley & Sons, 2001.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.13.6]