



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

علی نصر<sup>1</sup>، سید علی‌اکبر موسویان<sup>2\*</sup>

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکترونیک، 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 کاملاً 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 کاهش یافته 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 استفاده شده است.

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

Ali Nasr<sup>1</sup>, Seyed Ali Akbar Moosavian<sup>2\*</sup>

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

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

با پیشرفت صنعت و نیاز به ربات‌هایی با دقت، شتاب و توانایی ترابری بار انبوه در کاربردهای گوناگون، بازوان رباتیک سری از رده خارج شده‌اند. از این‌رو

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

این ربات‌های ترکیبی توانایی جهت‌گیری و چابکی مؤثرتری [11] و رفع موانع [12] نسبت به هر کدام از ربات‌ها به‌صورت جداگانه را دارند.

کارایی، ساخت و استفاده از این‌گونه 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. قبلاً بهینه‌سازی ساختار ربات موازی-کابلی صفحه‌ای در [13-15] بررسی‌شده است؛ اما بهینه‌سازی ربات موازی-کابلی سه‌بعدی کاملاً 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<sup>5</sup> 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 صحنه‌گذاری 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  $\{B\}$

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؛ در نتیجه 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<sup>1</sup> بود که شامل دو سکو به شکل مثلث متساوی‌الاضلاع با 6 کابل به شکل ربات موازی استوارت-گت<sup>2</sup> بود؛ با این تفاوت که به‌جای عملگرهای هیدرولیکی از کابل کنترل‌شونده توسط موتور الکتریکی استفاده می‌کرد. همچنین برخلاف جرثقیل‌های معمول، دارای امکان کنترل حرکات انتقالی و هم‌دورانی بود [3]. کاربرد ربات‌های کابلی در زمینه‌های فراوانی از جمله انتقال اجسام سنگین [4]، بازتوان‌بخشی معلولان [5]، آموزش ورزشی [6]، واسطه 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<sup>3</sup> و معلق<sup>4</sup> 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 دریا، آزاد، ساخت‌وساز ساختمان‌های بلند، بزرگراه‌ها، پل‌ها، تونل‌ها، مونتاز 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

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

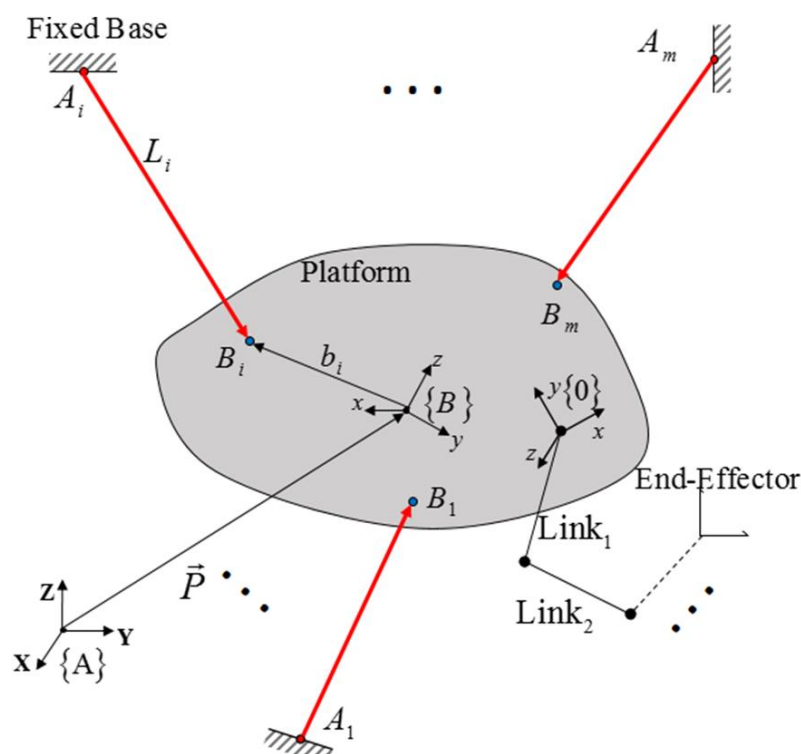


Fig. 2 Kinematics model of the hybrid parallel-serial robot

شکل 2 الگوی سینماتیکی ربات ترکیبی موازی کابلی-سری

می شود.

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

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

$$\begin{bmatrix} {}^A R_E & {}^A \vec{P}_E \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A R_B & {}^A \vec{P}_B \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B R_0 & {}^B \vec{P}_0 \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} {}^0T_E \quad (\text{پ-3})$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3- مدل سازی دینامیک

نیرو و گشتاور اینرسی برای بند  $i: 0 \rightarrow h$  به صورت (6) محاسبه می شود.

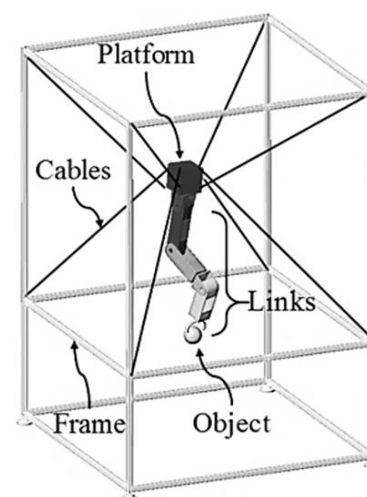


Fig. 1 Structure of the hybrid robot

شکل 1 ساختار کلی ربات ترکیبی

متصل به سکوی متحرک فرض می شود. موقعیت نقاط اتصال ابتدای هر کابل بر روی پایه نسبت به مرکز چارچوب  $\{A\}$ ، با بردار  $\vec{a}_i$  و موقعیت نقاط اتصال انتهایی هر کابل بر روی سکوی متحرک نسبت به مرکز چارچوب  $\{B\}$ ، با بردار  $\vec{b}_i$  مشخص می شود. طول هر کدام با  $l_i$  و امتداد آن‌ها با بردار واحد  $\hat{S}_i$  از نقطه  $A_i$  به  $B_i$  مشخص می شوند. موقعیت مرکز  $\{B\}$  با  ${}^A\vec{P}_B = [p_x, p_y, p_z]^T$  و جهت گیری  $\{B\}$  با ماتریس دوران  ${}^A R_B$  بیان می شود.

معادله حلقه بسته برای هر کابل، به صورت (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 به صورت (1-ب) خواهد بود. با مشتق گیری از رابطه (1-الف) نسبت به زمان و با ضرب داخلی دو طرف آن در  $\hat{S}_i^A$ ، معادله (1-ب) استخراج می شود که به صورت صریح سرعت متغیرهای فضای مفاصل را ارائه می کند.  $q_{W,i}$  تغییر زاویه ای کابل جمع کن به شعاع  $r_{W,i}$  باعث ایجاد  $\Delta L$  (تغییر طول کابل ناشی از تغذیه یا تجمیع آن) مطابق (1-ت) خواهد شد.

$$\begin{aligned} \vec{A_i B_i} &= l_i \hat{S}_i = {}^A\vec{P}_B + {}^A R_B {}^B\vec{b}_i - {}^A\vec{a}_i \quad (\text{الف-1}) \\ l_i^2 &= {}^A\vec{P}_B^T {}^A\vec{P}_B + {}^B\vec{b}_i^T {}^B\vec{b}_i + {}^A\vec{a}_i^T {}^A\vec{a}_i - 2 {}^A\vec{P}_B^T {}^A\vec{a}_i \\ &\quad + 2 {}^A\vec{P}_B^T [{}^A R_B {}^B\vec{b}_i] - 2 [{}^A R_B {}^B\vec{b}_i]^T {}^A\vec{a}_i \quad (\text{ب-1}) \\ \dot{l}_i &= {}^A\hat{S}_i^T \cdot {}^A\vec{v}_B + ({}^A\vec{b}_i \times {}^A\hat{S}_i)^T {}^A\vec{\omega}_B \quad (\text{پ-1}) \\ q_{W,i} &= r_{W,i}^{-1} \Delta L_i \quad (\text{ت-1}) \end{aligned}$$

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

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

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

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

متغیرهای سینماتیکی بازوی رباتیک با استفاده از قرارداد دنویت-هارتنبرگ اصلاح شده معرفی می شوند [20]. با استفاده از این متغیرها  $(\theta_i, d_i, \alpha_{i-1}, a_{i-1})$  و (3-الف) ماتریس‌های همگن تبدیل چارچوب‌ها محاسبه می شود. همچنین با استفاده از پس ضرب این ماتریس‌ها در یکدیگر به صورت (3-ب) ماتریس همگن پنجه نسبت به پایه محاسبه می گردد. با توجه به شکل 2 ژست پنجه بازوی رباتیک سری در چارچوب  $\{A\}$  با (3-پ) محاسبه



$$\vec{F}_D = \begin{bmatrix} \vec{f}_D \\ \vec{\tau}_D \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (12-ث)$$

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

در (12)، متغیرهای  $\vec{f}_D$ ،  $\vec{\tau}_D$ ،  $f_i$ ،  $\vec{f}_0$  و  ${}^A \vec{t}_0$  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 بیان شده در  $\{A\}$ ، محل اتصال بازوی رباتیک به آن و موقعیت مرکز جرم آن نسبت به مرکز  $O_B$  بیان شده در  $\{B\}$  است.

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

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

#### 4- تجزیه و تحلیل ساختارهای موازی

عملکرد ربات ترکیبی بسیار وابسته به ساختار ربات موازی-کابلی است. ربات های موازی-کابلی علیرغم هزینه اندک ساخت، دارای چالش های بسیاری هستند؛ که از این جمله می توان به برخورد کابل ها با یکدیگر و سکوی متحرک، حساسیت و سختی اندک به علت عدم انتخاب ساختار مناسب، نیاز به نیروی کنترلی بیش از حد به علت تکینگی در ماتریس ژاکوبین و ... اشاره کرد. تجزیه و تحلیل سینماتیک ربات ها به هندسه و شکل آن ها وابسته است و نتایج آن ها در محاسبه فضای کاری، نقاط تکین، دینامیک و ... استفاده می شود؛ لذا قبل از ساخت این چنین ربات هایی نیاز است که ساختارشان ابتدا تجزیه و تحلیل گردد تا ویژگی های اصلی آن ها شناسایی شوند. سپس نسبت به نیاز و کارایی مورد انتظار بهینه گردند. این بخش به معرفی معیارهای بررسی ربات های موازی-کابلی می پردازد. این معیارها شامل حجم فضای

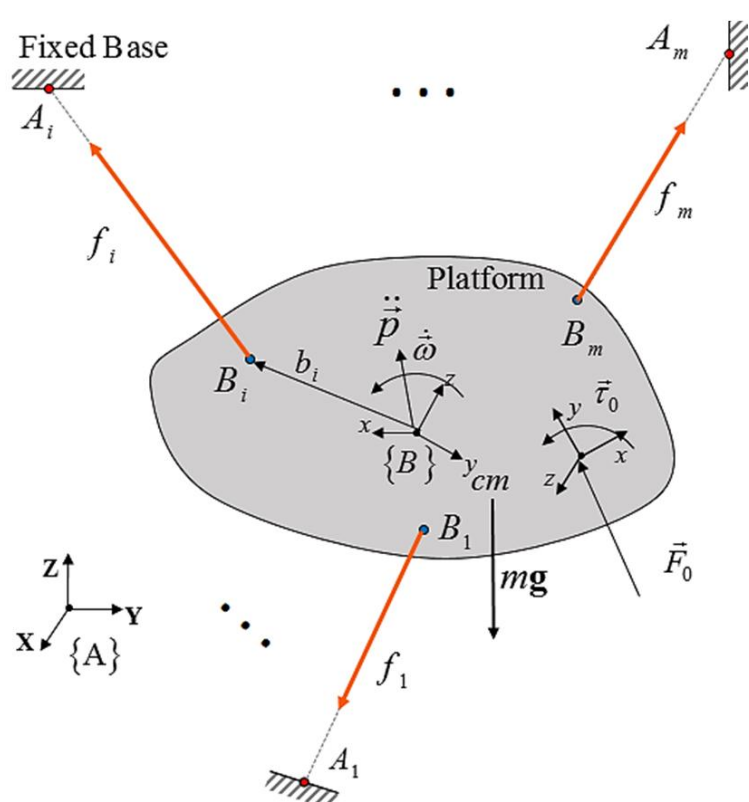


Fig. 3 Dynamics parameter of the hybrid robot

شکل 3 طرحواره پارامترهای دینامیکی ربات ترکیبی

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

$${}^{i+1} \vec{N}_{i+1} = {}^{i+1} I_{i+1} {}^{i+1} \vec{\omega}_{i+1} + {}^{i+1} \vec{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1} I_{i+1} {}^{i+1} \vec{\omega}_{i+1} \quad (6-ب)$$

نیرو و گشتاورهای بین بندها و گشتاورهای عملگرهای مفاصل، به صورت معادلات (7) برای  $i: h \rightarrow 1$  محاسبه می شوند.

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

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

$$\tau_i = {}^i \vec{n}_i^T {}^i \vec{Z}_i \quad (7-پ)$$

$$\begin{aligned} \text{تأثر بردار گرانش را می توان با قرار دادن } {}^0 \vec{v}_0 \text{ به صورت (8) اعمال کرد.} \\ {}^0 \vec{v}_0 = {}^0 R_A [{}^A \vec{\omega}_B \times ({}^A R_B {}^B \vec{P}_0) + {}^A \vec{\omega}_B \times [{}^A \vec{\omega}_B \times ({}^A R_B {}^B \vec{P}_0)] \\ + {}^A \vec{v}_B - \vec{g}] \end{aligned} \quad (8)$$

همچنین، نیرو و گشتاور وارد شده به سکوی متحرک ربات موازی ناشی از دینامیک و استاتیک بازوی رباتیک سری به صورت (9) محاسبه می شود.

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

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

در نهایت با ساده سازی و مرتب کردن معادلات نیوتن-اولر، معادله حرکت بازوی رباتیک سری به صورت (10) ارائه می شود؛ که در آن  $\vec{q}_M$  بردار متغیرهای تعمیم یافته 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،  $\vec{N}_M(\vec{q}_P, \vec{q}_M, \vec{q}_P, \vec{q}_M)$  بردار نیروهای کوریولیس، گریز از مرکز و گرانش زمین و  $\vec{Q}_M$  برداری متشکل از گشتاورهای مؤثر محرک های بازوی رباتیک سری است. همچنین  $\vec{f}_E$  بردار نیرو و  $\vec{\tau}_E$  گشتاور عکس العمل وارد بر پنجه بازوی رباتیک سری و  $J_M$  ماتریس ژاکوبین بازوی رباتیک سری است.

$$\begin{aligned} \vec{Q}_M = M_M(\vec{q}_P, \vec{q}_M) [\vec{\ddot{q}}_P^T, \vec{\ddot{q}}_M^T]^T + \vec{N}_M(\vec{q}_P, \vec{q}_M, \vec{q}_P, \vec{q}_M) \\ + J_M^T [{}^A \vec{f}_E^T, {}^A \vec{\tau}_E^T]^T \end{aligned} \quad (10)$$

با توجه به جرم اندک کابل در مقابل جرم سکوی متحرک و نیروی وارد بر کابل ها، فرض می شود که کابل کاملاً تحت کشش بوده؛ شکم ندارد و دینامیک ناچیزی دارد. علاوه بر این فرض می شود که محل تغذیه کابل نقطه ای ثابت است. با توجه به شکل 3 در زمانی که همه کابل ها تحت کشش (ماتریس ژاکوبین غیر تکین بوده) باشند معادلات حرکت بر اساس قانون نیوتن-اولر به فرم ماتریسی (11) محاسبه و ارائه می شود.

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

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

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

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

$$\vec{G}(\vec{q}_P) = \begin{bmatrix} m_P {}^A \vec{g} \\ ({}^A R_B {}^B \vec{P}_{c,m}) \times (m_P {}^A \vec{g}) \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (12-پ)$$

$$\vec{F}_M = \begin{bmatrix} {}^A \vec{f}_0 \\ ({}^A R_B {}^B \vec{P}_0) \times {}^A \vec{f}_0 + {}^A \vec{\tau}_0 \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (12-ت)$$

در صورتی که کمینه فاصله‌های محاسبه شده ( $d$ )، کمتر از حد مجاز یا همان حداکثر قطر کابل‌ها ( $d_c$ )، بود برخورد بین کابل‌ها اتفاق افتاده است. فاصله المان‌ها به گونه‌ای 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. در صورتی که بعضی از نقاط اتصال کابل‌ها به سکوی متحرک در یک نقطه باشند؛ بنابراین این فاصله المان‌ها برابر قطر کابل‌ها انتخاب می‌شوند. الگوریتم این بررسی به صورت 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 به طور مفصل در مرجع [21] بررسی شده است (شکل 6).

در نهایت، 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 سه بعدی غیرممکن و اشتباه است. همچنین در مرجع [15] برای کابل‌ها محدوده‌هایی به صورتی دستی تعیین شده 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.

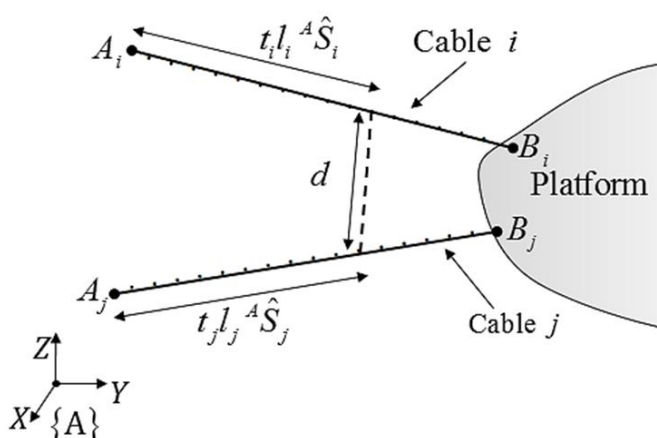


Fig. 4 Distance detection between two elements of cables

شکل 4 بررسی فاصله بین دو المان از دو کابل مختلف

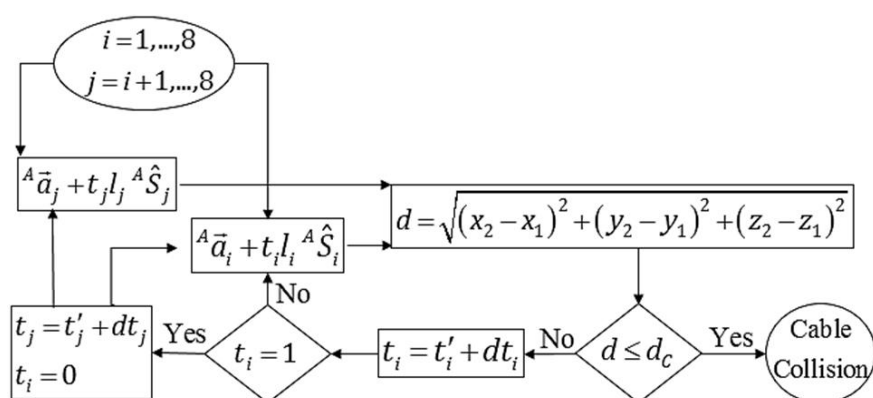


Fig. 5 Cables collision detection algorithm

شکل 5 الگوریتم بررسی برخورد کابل‌ها

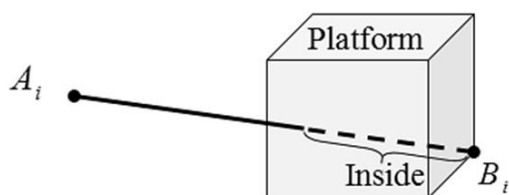


Fig. 6 Collision detection between cable and platform

شکل 6 بررسی برخورد بین کابل و سکوی متحرک

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 به عنوان معیارهای بهینه‌سازی چندهدفه ربات‌های موازی-کابلی نیز استفاده می‌شوند.

#### 1-4- حجم فضای کاری

حجمی از فضا که ربات می‌تواند به راحتی 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 به طور مشخص ساختار مورد استفاده به گونه‌ای باشد که حجم فضای کاری به آن گونه که انتظار می‌رود نباشد. به طور 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 کنترل پذیر بودن و عدم وجود نقاط تکین مورد بحث قرار می‌گیرد.

#### 1-1-4- 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 سه بعدی معقول نیست و نمی‌توان از تنها معیارهای سینماتیکی برای طراحی ربات‌های موازی-کابلی سه بعدی (بیش از 3 درجه آزادی) استفاده کرد؛ لذا در این مقاله سعی می‌شود از برخورد کابل‌ها در فضای کاری مورد نیاز جلوگیری شود. جهت طراحی ساختاری که در آن برخورد کابل‌ها با محیط در فضای کاری مورد نیاز 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 استفاده شده است. به این معنی که فاصله هر جز کابل با محیط مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل 4).

فضای کاری ربات در زمان عدم وجود مانع در آن مورد بررسی 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 مورد بررسی 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 ( $A_i + t_i l_i S_i$ ) با المان‌های دیگر ( $A_j + t_j l_j S_j$ ) کابل‌ها بررسی می‌شود.

## 4-1-2- کنترل پذیری

همان طور که قبلاً ذکر شد، به دست آوردن فضای کاری منوط به امکان تأمین نیروی کششی کابل‌ها و یا تأمین گشتاور کابل جمع‌کن‌ها است. همان طور که ذکر شد ماتریس ژاکوبین ربات موازی مطابق (2-ب) نیرو و گشتاور کارترین 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.

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

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 قابل دسترس 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 قابل تحمل کابل قبل از پاره شدن و حداکثر گشتاور قابل تحمل 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) مورد نظر 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 مورد نیاز در محاسبه اعمال می‌شود. برای بررسی هر نقطه از فضا حداکثر نیرویی که مورد نیاز 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 بگرایند؛ 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 به کارگیری 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 به راحتی 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 بیش از حد 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 به حساب 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.

$$\det(J_P^T J_P) = 0 \quad (15)$$

نقاطی از فضای کاری که شرط (15) را ارضا 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 در نتیجه این تعامل با محیط اهمیت داشته باشد و مورد بررسی قرار گیرد. این انحراف ایجاد شده تابعی از نیرو-گشتاورهای اعمال شده به محیط، سختی ساختاری اجزاء، 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)،  $K$  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 به صورت (16-ب) مرتبط سازد. با جایگزینی معادلات (2-ب) و (16-ب) در معادله (16-الف) می‌توان به نتیجه (16-پ) به عنوان رابطه عمومی سختی سکوی متحرک رسید. در این معادله  $K$  ماتریس متقارن، مثبت معین سختی است که به منظور تحلیل سختی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در این ربات‌های موازی-کابلی از عملگرها و کابل‌های مشابه استفاده شده است؛ لذا ماتریس سختی به صورت (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.

$$\vec{F}_C = K \Delta \vec{q}_C \quad (16-الف)$$

$$\Delta \vec{q}_C = J_P \Delta \vec{q}_P \quad (16-ب)$$

$$\vec{F}_P = J_P^T K J_P \Delta \vec{q}_P \xrightarrow{K=J_P^T K J_P} \vec{F}_P = K \cdot \Delta \vec{q}_P \quad (16-پ)$$

$$K = J_P^T K J_P \xrightarrow{k_C=k_1=\dots=k_m} K = k_C J_P^T J_P \quad (16-ت)$$

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

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 می توان کشش مثبت کابل ها را تعیین کرد.

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

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

$$(J_P^T)^\dagger = [J_P J_P^T]^{-1} J_P \quad (17-پ)$$

$$J_P^T (J_P^T)^* = 0 \quad (17-ت)$$

همچنین در نظر داشته باشید با توجه به اینکه تعداد انتخاب ضریب  $c$  یکتا نیست می توان این ضریب را به گونه ای انتخاب کرد که کشش کابل ها در محدوده حد پایین و بالا قابل ایجاد برای کابل باشد. حال مسئله ای که در اینجا حل نشده است این است که این میزان کشش کابل های محاسبه شده بهینه است یا خیر. به این معنی که آیا کابل ها می توانند کشش کمتری داشته باشند و نیروی وارد بر سکوی متحرک را تأمین کنند. در اینجا الگوریتم شکل 7 پیشنهاد می شود. در این الگوریتم مقدار کشش کابل ها با قید کمینه بودن نرم 2 کشش کابل ها محاسبه می شود.

از آنجایی که این الگوریتم ممکن است زمان بر باشد؛ امکان استفاده از آن در حلقه کنترل نیست؛ لذا می توان آن را برای نقاط مختلف فضای کاری و نیروهای مختلف وارد بر سکوی متحرک اجرا کرد و با استفاده از اطلاعات به دست آمده 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 با قدرت پردازش بالایی استفاده می شود لذا از همان الگوریتم شکل 7 استفاده می شود. در اکثر مقالات امکان مثبت بودن کشش کابل ها بررسی شده است؛ در این مقاله به بهینه سازی این کشش به علت وجود افزونگی پرداخته می شود که به عملی تر کردن نتیجه ساخت و کارایی ربات کمک می کند و پرداختن به این عمل یکی از مزایای این مقاله است.

## 6- بهینه سازی ربات موازی-کابلی مقید و معلق

جهت طراحی و ساخت یک ربات ترکیبی موازی-سری نیاز است ساختار بهینه ای 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 اشاره شده انتخاب تعداد کابل، محل قرارگیری اتصالات کابل ها، 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 عکس العمل بازوی رباتیک در سه بعد لذا سکوی متحرک باید دارای 6 درجه آزادی باشد. همان طور که بیان شد به دلیل ویژگی کابل افزونگی نیاز ذاتی این گونه ربات ها است؛ لذا حداقل باید از 7 کابل استفاده کرد. همچنین با استفاده از تعداد کابل های بیشتر می توان از کابل جمع کن هایی با گشتاور کمتر استفاده کرد؛ لذا بر اساس پژوهش انجام شده در [26] ربات موازی-کابلی مورد نظر دارای 8 کابل است.

نقاط اتصال کابل از اهمیت زیادی برخوردار است. نقاط اتصال کابل ها بر اساس تابع هزینه (18) بهینه سازی می شود. این تابع هزینه از 3 بخش تشکیل شده است. این بخش ها شامل معکوس حجم فضای کاری (عاری از برخورد کابل، نقاط تکین و کنترل پذیر)، معکوس نرم 2 معکوس عدد وضعیت ماتریس ژاکوبین و معکوس نرم 2 معکوس عدد وضعیت ماتریس سختی است. این معیار در کل فضای مورد بررسی از  $i = 1$  تا آخرین سلول  $LC$  محاسبه می شود. در واقع فضای مورد بررسی به تعداد زیادی سلول تقسیم می شوند. در [27,16] معیارها با یکدیگر جمع شده اند که می تواند باعث کم

کابل های پایینی دارای کشش متفاوت با کابل های بالایی است و در امر بهینه سازی این معیار متفاوت از معیار حساسیت می گردد. عیب بزرگ ربات های موازی-کابلی سختی کم آن ها است که می توان تا حدودی با تغییر نقاط اتصال کابل ها، این عیب را رفع کرد؛ لذا استفاده از این معیار در کنار معیارهای دیگر یکی از نوآوری های این مقاله است که در [23,15,13] بررسی شده است.

## 4-3- حساسیت

همان طور که در [25] بیان شده است بررسی این معیار در طراحی ربات های موازی از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به اینکه تعداد نقاطی که دقیقاً باعث برقراری معادله (15) می شود معین و محدود است؛ لذا وضعیت ماتریس ژاکوبین در پیکربندی های مختلف بررسی می شود و نقاطی که ربات در آن ها مشخصاً تکین نیست اما تا حدی دارای خاصیت های مضر آن است بررسی می شود. معیار بررسی در ربات های موازی، معکوس عدد وضعیت ماتریس ژاکوبین است. عدد وضعیت ماتریس ژاکوبین، به نسبت مقدار ویژه بزرگ ماتریس  $(\lambda_{\max})$  به مقدار ویژه کوچک ماتریس  $(\lambda_{\min})$ ، گفته می شود؛ که در صورت نزدیکی به نقاط تکین، این معیار خیلی کوچک می شود و باید از این ناحیه پرهیز شود. در (17)، متغیر  $\sigma$  مقدار تکین ماتریس است.

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

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 کابل ها اصلاً 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 (به طور مثال در مورد برخورد کابل ها).

## 5- تعیین نیروی کششی کابل ها در ربات های افزونه

چون کابل تنها تحمل نیروی کششی را دارد یکی از چالش های کنترل ربات های موازی-کابلی محاسبه کشش کابل ها است. در دسته ای از ربات های موازی از تعداد کابل های بیشتری نسبت به درجات آزادی ربات موازی استفاده می شود تا تمام کابل ها را تحت کشش قرار دهند. همچنین جهت بهره گیری از مزایای افزونگی نظیر کاهش نیرو-گشتاور مورد نیاز در عملگرها، افزایش دقت و حساسیت و ... از تعداد کابل های بیشتری استفاده می شود. در این حالت ماتریس ژاکوبین غیر مربعی خواهد بود؛ لذا جهت محاسبه نیروی کششی کابل ها با استفاده از معادله (2-ب) جواب یکتایی وجود ندارد. در کل جهت محاسبه نیروی کابل ها بر اساس نیروی وارد بر سکوی متحرک به صورت (17-الف) برای ربات های غیر افزونه و معادله (17-ب) در مورد ربات های موازی-کابلی افزونه است. در ربات های افزونه که معکوس سازی ماتریس غیر مربعی  $J_P^T$  به راحتی امکان پذیر نیست و از شبه معکوس به صورت (17-پ) استفاده می شود. در معادله (17-ب)؛  $(J_P^T)^*$  بردار پوچی ماتریس ترانهاده ژاکوبین است که از رابطه (17-ت) محاسبه می شود. همچنین در صورتی که در معادله (17-ب) ضریب  $c$  برابر صفر باشد و از بردار پوچی آن استفاده نشده باشد کمترین مقدار نیروهای کابلی محاسبه می شود؛ اما نمی توان تضمین کرد که نیروهای محاسبه شده مثبت باشند (کابل ها تحت کشش باشند)؛ لذا بردار پوچی آن در صورتی که دارای عناصر مثبت باشد می توان با تعیین ضریب  $c$  مناسب کشش مثبت کابل ها را محاسبه کرد و نیروی منفی محاسبه شده را



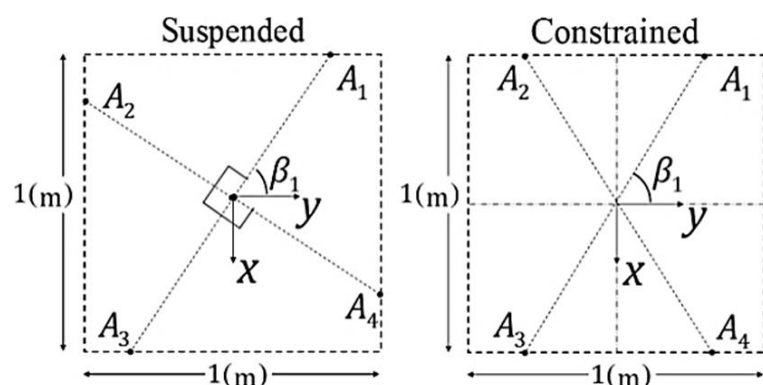


Fig. 8 Lifestyle of feeder pulley connection of robots

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

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

جدول 2 پارامترهای چهارگانه دنویت-هارتنبگ اصلاح‌شده

Table 2 Modified Denavit-Hartenberg parameters

پارامتر	$\theta_i$	$d_i (m)$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1} (m)$
مفصل 1	$\theta_1$	0	0	0
مفصل 2	$\theta_2$	0	$-90^\circ$	0
مفصل 3	$\theta_3 + 90^\circ$	0	0	0.19
مفصل 4	$\theta_4$	0.21	$-90^\circ$	0
مفصل 5	$\theta_5$	0	$90^\circ$	0
مفصل 6	$\theta_6$	0	$-90^\circ$	0

جدول 3 مشخصات اینرسی و موقعیت مرکز جرم اجزاء ربات

Table 3 Inertial and mass center position of robots parts

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

است و بخش اندکی به دیگر بخش‌های 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

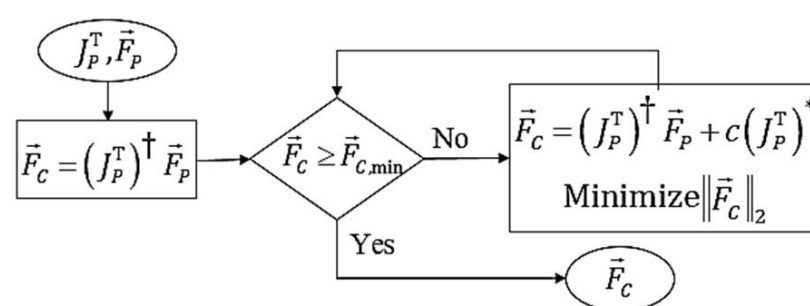


Fig. 7 Optimization of cables tension

شکل 7 الگوریتم بهینه‌سازی کشش کابل‌ها

شدن تأثیر یکی از معیارها و زمان بهینه‌سازی 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.

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

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

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

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  $1 \times 1 \times 1 (m^3)$  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  $90^\circ$  دارند؛ بنابراین موقعیت 4 کابل اول با زاویه  $\beta_1$  و 4 کابل دیگر با زاویه  $\beta_2$  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 تجزیه و تحلیل ربات‌های موازی مقایسه می‌شوند. بازوی رباتیک سری 6 درجه آزادی با متغیرهای دنویت-هارتنبگ جدول 2 است. همچنین مشخصات اینرسی و موقعیت مرکز اجزای ربات ترکیبی به‌صورت جدول 3 است. بردار موقعیت مرکز چارچوب  $\{0\}$  برابر  ${}^B \vec{P}_0 = [32, 0, -134]^T (mm)$  و جهت‌گیری آن با استفاده از روش بیان محور پیچواره به‌صورت  $\{\hat{S} = [1, 0, 0]^T, \pi\}$  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



تعداد توابع هدف (فضای کاری عاری از برخورد کابل و ...) و نوع الگوریتم بهینه‌سازی است. جهت شروع بهینه‌سازی فضای یک مترمکعب به تعداد یک میلیون سلول تقسیم‌بندی می‌شود. سپس متغیرهای طراحی  $\beta_1$  و  $\beta_2$  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 ژم‌آ با تغییر متغیرهای طراحی جهت به دست آمدن کمینه‌ترین پاسخ برای توابع هدف، سعی می‌کند. پس از 23 روز پردازش، نتایج بهینه‌سازی به صورت 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 به دست آمده 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 ساخته شده در دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی (روبوکاب<sup>2</sup>) ارائه شده است که به دلیل محدودیت‌های ساخت نمی‌توان نقاط اتصال را همانند نتیجه بهینه‌سازی قرارداد. به‌غیراز فضای کاری، میزان سختی و حساسیت این ربات ساخته شده مناسب ارزیابی می‌شود.

فضای کاری کنترل‌پذیر، بدون برخورد کابل‌ها و نقاط تکین هرکدام از ساختارها به صورت شکل 12 است. ساختار مقید دارای فضای کاری به حجم  $0.7246(m^3)$  و معلق  $0.665(m^3)$  است؛ که نشان می‌دهد ساختار مقید فضای کاری بزرگ‌تر و مناسب‌تری جهت حمل یک بازوی رباتیک را دارد. کشش بهینه کابل‌های هرکدام از ساختارها به صورت شکل 13 است. در این نمودار تمام کابل‌ها دارای کشش مثبت و کمینه هستند. بر اساس شکل 14 توان مکانیکی مصرفی ساختار مقید برابر  $67.705(W)$  و ساختار معلق

جدول 4 نقاط مشخص شده در جبهه پرتو و نتایج بهینه‌سازی

Table 4 Pareto front point and optimized result

$F_3$	$F_2$	$F_1$	$\beta_2(\text{rad})$	$\beta_1(\text{rad})$	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

دیگر دینامیک معکوس بازوی رباتیک متصل به سکوی متحرک، محدوده نیرو و گشتاور وارد بر این سکوی و دینامیک خود آن بین  $\vec{F}_{P,\max} = [4, 4, -20, 3, 3, 1]^T$  و  $\vec{F}_{P,\min} = -[4, 4, 21, 3, 3, 1]^T$  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  $f_{\max} = 23(N)$  است.

ضریب سختی چهار کابل فوقانی،  $k_1 = \dots = k_4 = 1000(N/m)$  و چهار کابل پایینی،  $k_5 = \dots = k_8 = 100(N/m)$  جهت محاسبه میزان سختی سینماتیکی ربات استفاده شده است. زاویه مجاز چرخش حول هر سه محور  $[-10^\circ, 10^\circ]$  در نظر گرفته شده است. روش بهینه‌سازی چندهدفه به کاررفته الگوریتم ژم‌آ<sup>1</sup> است که جبهه پرتوی توابع هدف ربات را تعیین می‌کند [28]. متغیرهای طراحی  $\beta_1$  و  $\beta_2$  به گونه‌ای برگزیده می‌شوند که مصالحه‌ای بین توابع هدف  $F_1$ ،  $F_2$  و  $F_3$  صورت گیرد. آنچه این مقاله را از کار ارائه شده در [22, 16, 14] متمایز می‌سازد نوع ربات موردنظر (فضایی)، نوع و

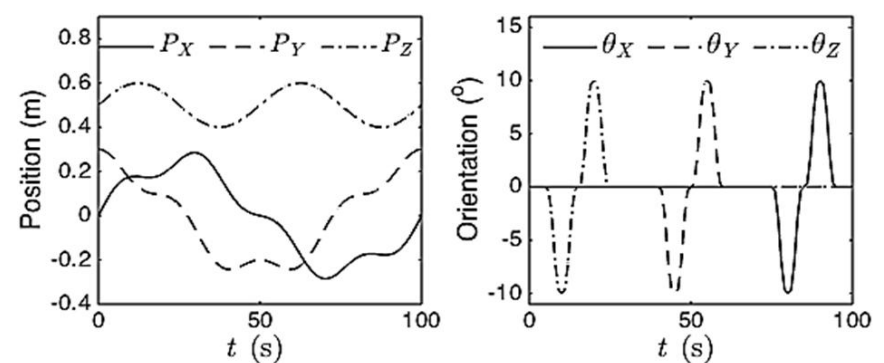


Fig. 9 General trajectory of moving platform

شکل 9 نمودار یک مسیر زمانی عمومی حرکت سکوی متحرک

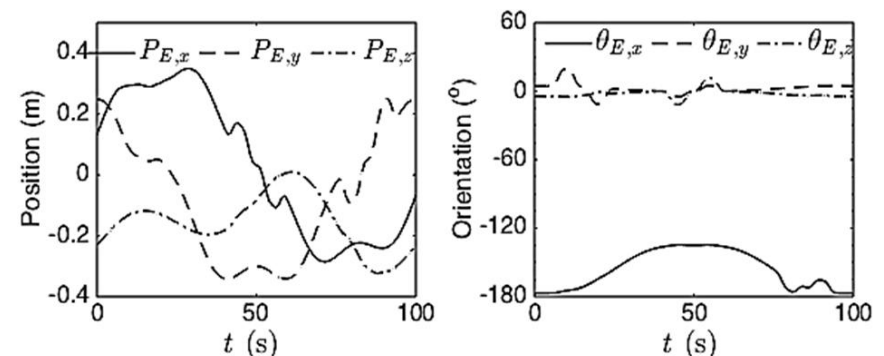


Fig. 10 General trajectory of serial manipulator end-effector

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

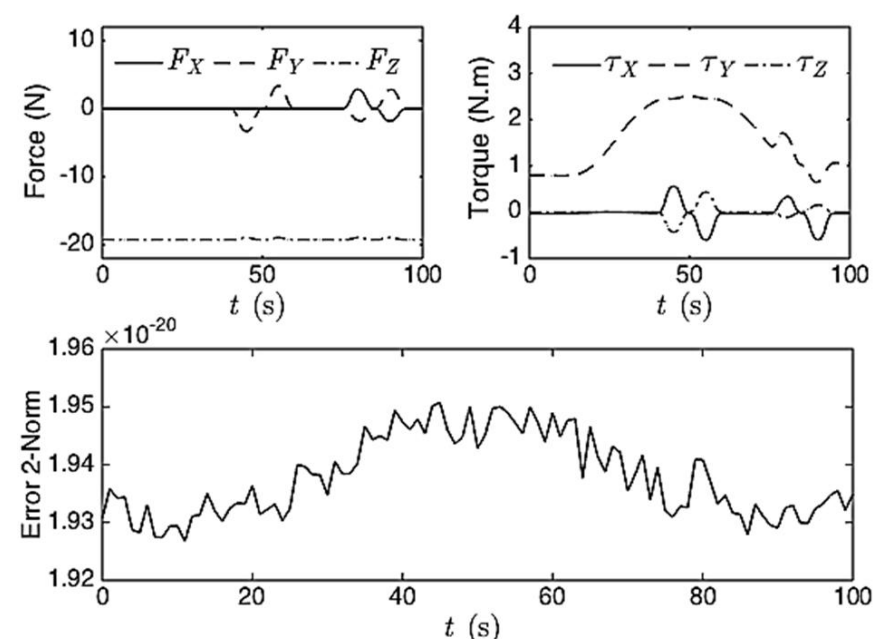


Fig. 11 Wrench of the manipulator base reaction on the moving platform and 2-norm error of modeling

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

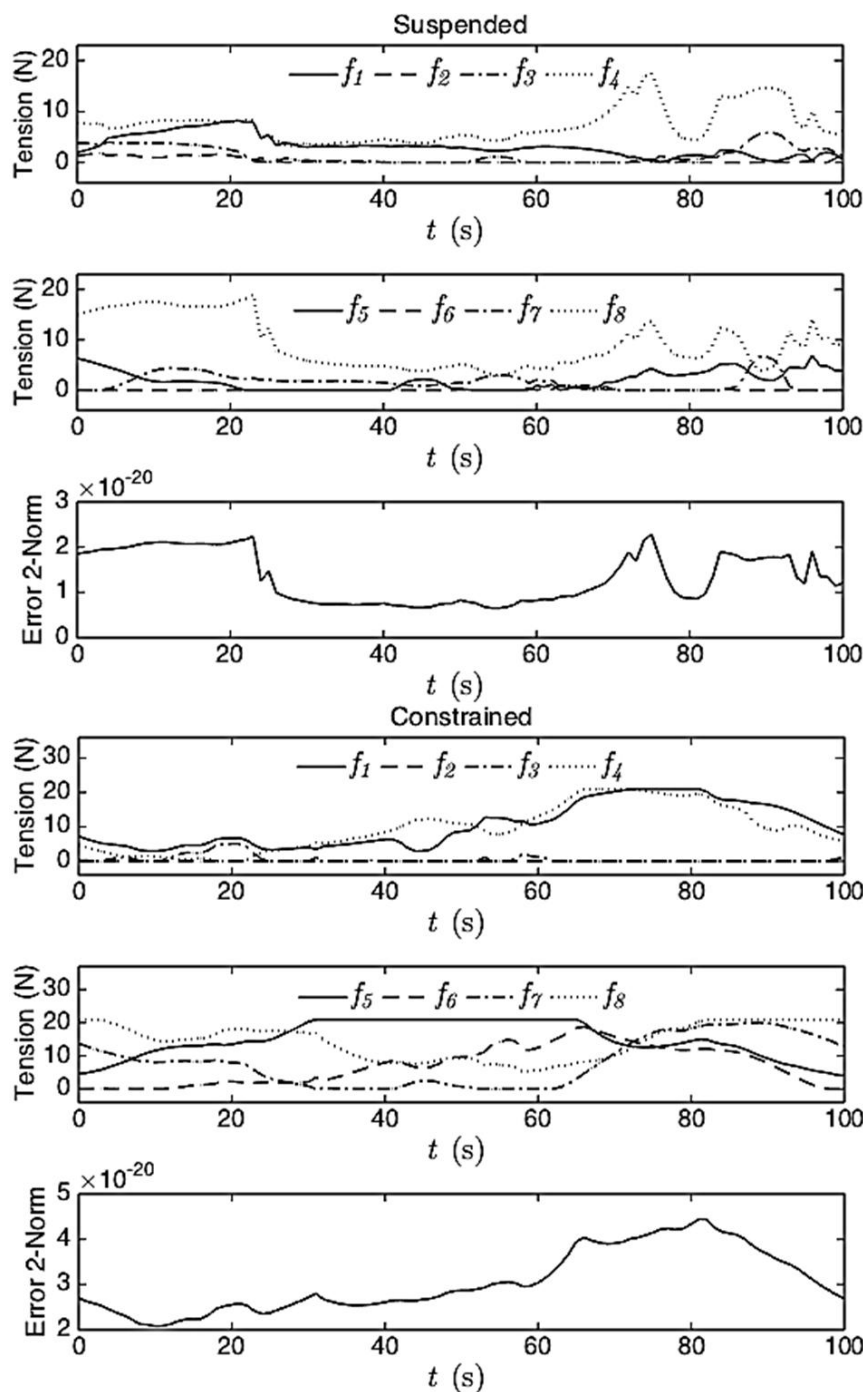


Fig. 13 Optimal cables tension of suspended and constrained robot and 2-norm error of modeling

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

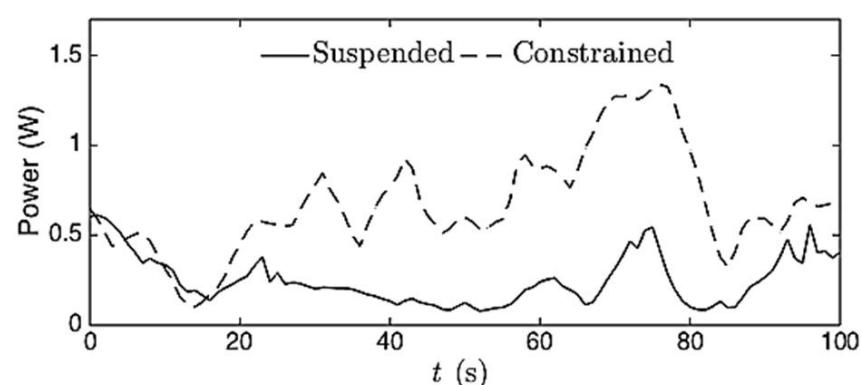


Fig. 14 Mechanical power of suspended and constrained robot

شکل 14 توان مکانیکی مصرفی ربات‌های معلق و مقید

جدول 5 مقایسه بین ربات‌های موازی-کابلی معلق و مقید

Table 5 Comparing between suspended and constrained robot

مقایسه	مشخصه
مقید < معلق	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

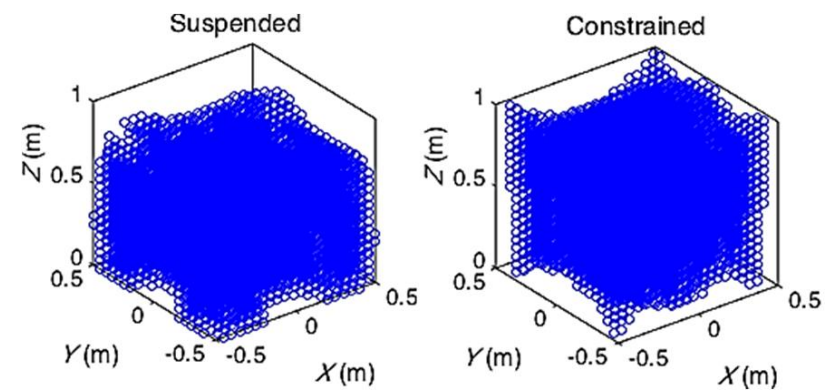


Fig. 12 Workspace of constrained and suspended robot

شکل 12 فضای کاری دو ربات مقید و معلق

برابر 25.128(W) است که نشان‌دهنده برتری ساختار معلق در شرایط کاملاً یکسان است؛ اما دلیل این تفاوت را می‌توان به سهم نیروی عمودی وارد بر سکوی متحرک دانست. به گونه‌ای در ربات معلق 8 کابل همزمان وظیفه تأمین این نیرو را دارند؛ ولی در ربات مقید 4 کابل این وظیفه را بر عهده دارند و 4 کابل دیگر در تغییرات زاویه‌ای سکوی متحرک نقش مؤثر را دارند؛ اما با مطالعه مسیر حرکتی می‌توان مشاهده کرد که شتاب سکو بسیار کم است و در این حدود ربات معلق از عهده حمل بازوی رباتیک برمی‌آید؛ در صورتی که 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 ساخته شده در دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی به صورت شکل 15 است. کابل جمع‌کن‌های این ربات می‌تواند 24(N) 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 ارائه شده 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 کاملاً عمومی برای این گونه 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 به اندازه 62% برای یک مسیر

$\hat{S}_i$	بردار واحد امتداد طول کابل‌ها
$T_i^{i-1}$	ماتریس تبدیل همگن $i$ نسبت به $i-1$
$\vec{v}$	بردار سرعت خطی ( $m.s^{-1}$ )

## علائم یونانی

$\alpha_{i-1}$	زاویه بین محورهای $Z_{i-1}$ و $Z_i$ اندازه‌گیری شده حول محور $X_i$
$\beta_i$	زاویه محل قرارگیری قرقره تغذیه نسبت به محور $Y$ در صفحه $XY$
$\theta_i$	زاویه بین محورهای $X_{i-1}$ و $X_i$ اندازه‌گیری شده حول $Z_i$
$\theta$	زاویه دوران (rad)
$\vec{\omega}$	بردار سرعت زاویه‌ای ( $rad.s^{-1}$ )
$\vec{\tau}$	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. Dagalak, 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)
- [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 robot using neural network and based on patient's anthropometric parameters, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 137-145, 2015. (in Persian)
- [14] S. A. Khalilpour, H. R. Taghirad, M. A. Shoorehdeli, M. T. Masouleh, Applying evolutionary algorithms in multiobjective optimization of planar cable-driven parallel robots, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 44-54, 2014. (in Persian)
- [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.

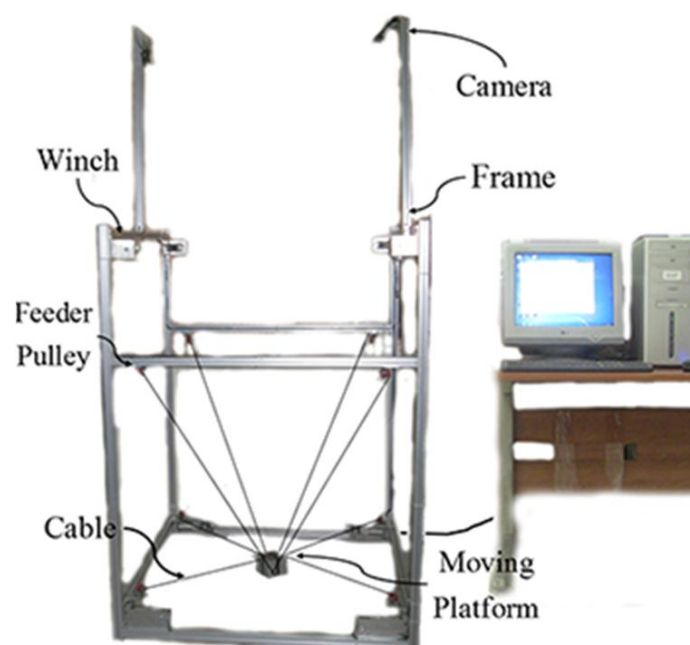


Fig. 15 Manufactured cable-driven parallel robot (RoboCab)

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 $Z_{i-1}$ و $Z_i$ 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
${}^cI$	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

- [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.
- [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.