مجله کنترل
ISSN 2008-8345
جلد ۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۳، صفحه ۱۱۷-۸۷

ربات‌های موازی کابلی: سینماتیک، دینامیک و کنترل

حمید رضا تقی راد[۱]، آزاده ظریف لولویی[۲]، محمد اعظم خسروی[۳]

[۱] استاد دانشکده مهندسی برق، قطب علمی کنترل صنعتی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، taghirad@kntu.ac.ir

[۲] استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پردیس، پردیس، تهران، ایران، azadeh.zarif@gmail.com

[۳] استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، m.a.khosravi@aut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۳/۴/۷، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۳/۹/۲)

چکیده: ربات‌های کابلی دسته‌ای از ربات‌های موازی می‌باشند که در آن‌ها کابل‌ها جایگزین بازوهای صلب معمول گردیده‌اند. جایگزینی کابل بجای بازوهای صلب در ربات‌های موازی، این دسته از ربات‌ها را جایگزینی مناسب برای مقابله با کاستی‌های ذاتی و ساختاری ربات‌های معمول سری و موازی می‌سازد. اما این موضوع چالش‌ها و افق‌های جدیدی را پیش‌روی محققین پدیدار می‌سازد. در این مقاله یک مطالعه مروری بر روی تحقیقات انجام شده در زمینه با تاکید بر نوع مقید کامل آن انجام شده است، ضمن اینکه مسائل چالش‌برانگیز در این حوزه را نیز بررسی می‌کند. با این توصیف، در این مقاله بررسی اجمالی کاربردها و موضوعات نظری مطرح شده در حوزه ربات‌های کابلی مانند فضای کاری، دینامیک و کنترل صورت می‌پذیرد. علیرغم اینکه با توجه به پیشینه تحقیقات مختلف انجام شده در این زمینه به نظر می‌رسد که تحقیقات وسیعی در این زمینه صورت گرفته است، در این مقاله موضوعات نظری و کاربردی گوناگونی عنوان می گردد که هنوز به عنوان مسائل چالش‌برانگیز باز تحقیقات در این موضوع اشاره دارند

کلمات کلیدی: ربات موازی، ربات کابلی، مقاله مروری، سینماتیک، دینامیک، حل افزونگی، فضای کاری، کنترل.

Cable Driven Parallel Robots: Kinematics, Dynamics and Control

Hamid D. Taghirad, Azadeh Zarif Loloei, Mohammad A. Khosravi

Abstract: Cable-driven robots are a class of parallel robots in which the rigid links are replaced by cables. Using cables instead of rigid links in parallel robots makes them a suitable choice to remedy some of the traditional shortcoming of the conventional robots. However, this introduces new challenges in the study of cable-driven robots. This paper presents a survey of cable-driven robots and addresses numerous challenging open problems in this field. The paper consists of an overview of both applications and theoretical issues of cable-driven robots such as workspace, dynamics and control, and furthermore some open challenging issues in this field of research.

Keywords: Parallel robots, cable driven robots, kinematics, dynamics, control, redundancy resolution, workspace.

۱- مقدمه

پیشرفت روزافزون علم رباتیک سبب شده که این مکانیزم‌ها فراتر از صنایع و در بسیاری از فرآیندهای پزشکی، خدماتی و غیره به فعالیت بپردازند [۱]. با توجه به گسترش روزافزون استفاده از ربات‌ها در کاربردهای مختلف، امروزه بسیاری از ربات‌های متداول صنعتی قادر به پاسخ‌گویی به تمامی نیازها نیستند. این موضوع سبب شده ساختارهای جدیدی از ربات‌ها طراحی و ساخته شوند تا بتواند پاسخ‌گوی نیازهای گسترده‌ی بشری باشد.

ربات‌ها را می‌توان از دیدگاه‌های متفاوتی از جمله درجات آزادی، نوع عملگرها و غیره تقسیم‌بندی کرد. یکی از این تقسیم‌بندی‌ها، طبقه‌بندی ربات‌ها از نقطه نظر ساختار زنجیره‌های سینماتیکی است. از این منظر ربات‌ها به سه دسته‌ی سری، موازی و ربات‌های سیار طبقه‌بندی می‌شوند [۲]. ربات‌های سری، مکانیزم‌های با زنجیره‌های سینماتیکی باز بوده که مجری نهایی توسط مجموعه‌ای

از بازوها[۱] که به صورت سری نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند به پایه متصل شده است. مزایای اصلی این مکانیزم‌ها فضای‌کاری نسبتاً وسیع، قابلیت انعطاف و مانور زیاد است. با این حال شکل قرارگیری مفاصل به صورت متوالی سبب بوجود آمدن معایب قابل توجهی از جمله سختی[۲] کم، دقت پایین و خطای انباشتگی شده است. همچنین قابلیت حمل بار موثر در این نوع ربات‌ها به دلیل حمل وزن بازوها، موتورها و سایر اجزای خود به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد [۲].

در دهه‌های اخیر با گسترش کاربرد ربات‌ها، محققان با نگاهی تازه به طبیعت به ساختارهای زنجیره‌ی سینماتیکی بسته با ویژگی‌هایی نظیر دقت بالا، شتاب زیاد و قابلیت حمل بار دست یافتند [۳]. همان‌گونه که انسان برای حمل اشیای سنگین از هر دو دست استفاده می‌کند و یا برای انجام کارهایی مثل نوشتن یا گرفتن اجسام چند انگشت خود را به کار می‌برد، استفاده از زنجیره‌های بسته‌ی سینماتیکی راه کار مناسبی برای رفع مشکلات بازوهای سری است [۵،۴]. با توجه به این درک شهودی، به کارگیری زنجیره‌های سینماتیکی بسته رو به افزایش بوده و جهت‌گیری تحقیقات و توسعه‌ی فناوری در زمینه‌ی ربات‌های موازی گسترش یافته است [۶].

در بازوهای موازی به طور معمول تعداد بازوها با درجات آزادی ربات برابر بوده و هر بازو توسط یک عملگر کنترل شده است. عملگرها معمولاً نزدیک پایه یا روی آن نصب می‌شوند و منجر به سبکی بازوها و کاهش ابعاد موتورها می‌گردند. بدین ترتیب بازوها در ساختار موازی معمولاً بار عملگرها را به دوش نمی‌کشند و لذا سبک‌تر از بازوهای ساختار سری مشابه قابل طراحی است. از طرف دیگر به دلیل وجود بازوهای موازی هر بازو تحمل بخشی از بار را عهده‌دار است و در نتیجه می‌توان نیروهای بزرگتری را به آن اعمال کرد و سرعت و شتاب‌های بالاتری را انتظار داشت [۷]. هر چند مکانیزم‌های موازی معایب ربات‌های سری را پوشش داده‌اند ولی فضای‌کاری محدود و وجود موقعیت‌های تکین[۳] داخل فضای‌کاری موجب محدودیت در کاربردهای این مکانیزم‌ها شده‌است. علاوه بر این در ربات‌های موازی پیچیدگی محاسباتی در سینماتیک مستقیم و به کارگیری آن در سیستم کنترلی ربات بر ضعف‌های این نوع مکانیزم‌ها افزوده است.

علیرغم ضعف‌های بیان شده، دو گونه از این نوع ربات‌ها در صنعت از اقبال خوبی برخوردارند. یکی از آنها، ربات استوارت-گو[۴] است که از مشهورترین مکانیزم‌های موازی بوده و مطالعات گسترده‌ای بر روی آن صورت گرفته است. این مکانیزم توسط گو برای سیستم تست تایر در سال ۱۹۴۷ معرفی شد [۸]. در سال ۱۹۶۵ نیز استوارت به ارائه طرح دیگری از این ساختار پرداخت [۹]. آنچه به عنوان ربات استوارت-گو امروزه شناخته می‌شود، یک مکانیزم شش درجه آزادی است که در دستگاه‌های شبیه‌ساز پرواز و به کارگیری آن در ماشین‌کاری دقیق است [۹]. علیرغم کاربردهای بیان شده، این مکانیزم از ضعف محدودیت فضای‌کاری در ربات‌های موازی رنج می‌برد. ربات دلتا[۵] یک نمونه‌ی پرکاربرد دیگر از مکانیزم‌های موازی در صنعت است [۱۰]. این ربات از سه بازوی متوازی‌الاضلاعی تشکیل شده که توسط مفاصل چرخنده به پایه متصل است. مهم‌ترین ویژگی این مکانیزم سرعت و دقت بالای آن در برداشتن و گذاشتن اجسام سبک در صنایع بسته‌بندی، بهداشتی و دارویی است[۱۱]. ربات کواترو[۶] نیز مکانیزمی اقتباس شده از ربات دلتا است که با افزودن یک بازوی بیشتر دارای چهار درجه آزادی است [۱۲].

هر چند جهت‌گیری در تحقیقات و توسعه فن‌آوری در زمینه‌ی رباتیک به سمت ربات‌های موازی پیش رفته است، به دلیل محدودیت فضای‌کاری و مشکلات ساخت، این نوع ربات‌ها نسبت به نوع متداول سری از گستردگی کمتری در کاربردهای صنعتی برخوردارند. از حدود سه دهه گذشته و برای غلبه بر ضعف‌های هر دو مکانیزم سری و موازی نگرش جدیدی در طراحی ربات‌های موازی مطرح گردید [۱۳]. این نگرش مبتنی بر به کارگیری بازوهای کابلی به جای بازوهای صلب است و با طراحی یک بازوی ماهر که تنها از نیروی کششی کابل استفاده کند، بکار گرفته می‌شود. با استفاده از این رویکرد جدید می‌توان ربات‌های موازی طراحی کرد که از نظر وزن به مراتب سبک‌تر از مکانیزم‌هایی با بازوی صلب می‌باشند [۱۴]. به این ترتیب جرم متحرک ربات بسیار کاهش می‌یابد و در نتیجه با نیروی یکسان، سرعت و شتاب بیشتری را می‌توان در مجری نهایی به دست آورد و بار بیشتری را نیز حمل کرد [۱۵]. در ادامه به معرفی این نوع مکانیزم‌ها پرداخته می‌شود.

[۱] Link
[۲] Stiffness
[۳] Singular
[۴] Stewart-Gough
[۵] Delta
[۶] Quattro

۱,۱- ربات‌های موازی کابلی

ربات موازی کابلی، مکانیزمی با حلقه‌های سینماتیکی بسته است که قسمت متحرک آن توسط کابل‌ها به پایه متصل شده است. این مکانیزم‌ها از دیدگاه مصرف انرژی بسیار پربازده بوده و به کارگیری آنها در حمل و انتقال بارهای سنگین شبیه به ربوجرثقیل‌ها[۱] انتخاب مناسبی است [۱۶]. از منظر فضای‌کاری نیز به دلیل نبود محدودیت در انتخاب طول کابل، این نوع ربات‌ها می‌توانند در کاربردهای با فضای‌کاری‌های بسیار بزرگ مانند تصویربرداری از استادیوم‌ها [۱۷] و یا تلسکوپ‌های رادیویی [۱۸] مورد استفاده قرار گیرند.

در ربات‌های کابلی موقعیت مجری نهایی با تغییر طول کابل تنظیم می‌شود و کابل‌ها فقط می‌توانند نیروی کششی اعمال کنند و قادر به اعمال نیروی فشاری و یا گشتاور نیستند. با توجه به این موضوع، ربات‌های موازی کابلی نیاز به حداقل یک محرک افزون‌تر بر درجات آزادی یا نیروی ایستا دارند تا کابل‌ها را در تمام جهت‌های فضای‌کاری در حال کشش نگه دارند. از این نقطه‌نظر مکانیزم‌های کابلی به دو دسته کلی مقید کامل[۲] و مقید ناقص[۳] تقسیم می‌شوند [۱۹]. ربات‌های کابلی مقید کامل با افزونگی در محرک‌ها طراحی می‌شوند و درجات آزادی سیستم به وسیله کابل‌ها محدود می‌شود. در این نوع تعداد کابل‌های فعال از تعداد درجه آزادی سیستم بیشتر است [۱۹]. در مکانیزم‌هایی که به صورت ناقص مقید می‌باشند کشش کابل‌ها توسط یک نیروی منفعل شبیه به جاذبه تامین می‌شود. این بدان معنی است که در این نوع از ربات‌های کابلی موقعیت مجری نهایی بیشتر تحت تاثیر اغتشاش قرار می‌گیرد.

با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد مکانیزم‌های کابلی، کاربرد آن‌ها روز به روز در حال افزایش است. طیف وسیع کاربردهای جدید آن در صنایع گوناگون از حمل و نقل اشیا سنگین تا کاربردهای توانبخشی و فضایی گسترده است. ربات ربوجرثقیل از مکانیزم‌های پرکاربرد کابلی مقید ناقص است که در حمل و نقل اجسام با هدف افزایش ایمنی و کنترل‌پذیری نسبت به جرثقیل‌های معمولی بکار می‌رود [۲۰]. این نمونه در سال ۱۹۸۵ ساخته شده است که بیشترین استفاده از آنها در حمل کانتینرها و بنادر است [۲۱، ۲۲]. نمونه بهبود یافته آن در جنگ خلیج‌فارس برای اطفای حریق چاه‌های نفت کویت [۱۹] و کاربردهای مربوط به بازیافت پس‌ماندهای هسته ای و سمی[۲۳] به‌کار گرفته شده است. این سیستم در موسسه ملی استاندارد و فناوری[۴] با هدف طراحی و ساخت یک ربات کابلی مجسمه ساز توسعه داده شده‌است. در این مکانیزم از شش پتانسیومترخطی کابلی پسیو به منظور اندازه‌گیری موقعیت مجری نهایی استفاده می‌شود. در IPA نیز پات[۵] با تمرکز بر کاربردی کردن ربات‌های کابلی دو نمونه ربات کابلی IPANema و IPANema2 را معرفی کرده است [۲۴]. به لحاظ نظری در این پروژه الگوریتم‌هایی برای تحلیل سریع فضای کاری ربات توسعه داده شده‌اند[۲۵]. در شکل ۱(الف)، نمونه‌ای از ربوجرثقیل‌ها نمایش داده شده است.

(الف)

(ب)

شکل ۱: (الف) ربات کابلی ربوجرثقیل [۲۰]، (ب) ربات موازی SkyCam در تصویربرداری از یک استادیوم ورزشی [۱۷]

تصویربرداری هوایی از استادیوم‌ها یکی دیگر از کاربردهای قابل درک این مکانیزم‌ها برای عموم مردم در سطح جهان است. یک نمونه عملی از این ربات، ربات SkyCam است که برای فیلم برداری در محدودهٔ وسیع فضای استادیوم‌ها از آن استفاده می‌شود.

[۱] RoboCrane
[۲] Fully Constrained
[۳] Under Constrained
[۴] NIST
[۵] Pott

شکل ۱(ب) نمونه‌ای از این ربات را که در یک استادیوم فوتبال نصب شده است نشان می‌دهد [۱۷]. شایان ذکر است که در این ربات وزن دوربین همان نیروی انفعالی موردنیاز برای همواره در کشش قرار دادن کابل‌ها می‌باشد.

در پروژه لار[1] با نگاهی تازه کاربرد دیگری از مکانیزم‌های کابلی معرفی گردیده است. در این پروژه به منظور ساخت تلسکوپ‌های غول‌پیکر رادیویی بین‌المللی از یک بالن سبک جهت اطمینان از تحت کشش بودن کابل‌ها استفاده شده است [۲۶]. این بالون به مجری نهایی متصل‌بوده و با اوج گرفتن در هوا و بالا رفتن، نیروی کششی کابل‌ها را که یک سر آنها به زمین و سر دیگر آنها به مجری‌نهایی وصل است، تامین می‌کند.

جرم بسیار کم مکانیزم‌های کابلی، توجه پژوهشگران را در بکارگیری این‌گونه ربات‌ها در کاربردهای فضایی به خود جلب کرده است. ربات کابلی شارلوت[2] از مشهورترین مکانیزم‌های کابلی مقید کامل است که برای انجام آزمایشات در هاب فضایی[3] به کار می‌رود [۲۷]. این مکانیزم دارای هشت کابل بوده و یک مکانیزم مقید کامل بشمار می‌آید. از جمله ویژگی‌های منحصر به فرد آن می‌توان به فضای‌کاری گسترده‌اش اشاره نمود. علاوه بر این به دلیل وزن پایین این مکانیزم قابلیت حمل و نقل آن به سادگی امکان‌پذیر است.

به دلیل سادگی مونتاژ و حمل و نقل ربات‌های کابلی، ردپای آن در کاربردهای بازتوانبخشی نیز دیده می‌شود. در شکل ۲ (الف) نمونه‌ای از این ربات نشان داده شده است. جرم ناچیز کابل‌ها و مجری نهایی در این ربات، آن را ایمن ساخته و مصرف انرژی را بسیار پایین آورده است [۲۸]. علاوه بر این ساختار مکانیکی ساده ربات که روی هم سوار شده و یا از هم جدا می‌شوند و همین مزیت نگهداری و حمل و نقل آن‌ها را آسان‌تر می‌کند، می‌تواند بکارگیری این دسته از ربات‌ها را در این نوع از کاربردها گسترش دهد. همچنین امکان اصلاح و توسعه‌ی عملکرد ربات با اضافه نمودن ماژول‌های بیشتر همانند نمونه‌ی ربات ارائه شده در [۲۹] وجود دارد و تعمیر و پیکربندی مجدد این ربات‌ها را تسهیل می‌کند [۳۰].

یکی دیگر از کاربردهای مکانیزم‌های کابلی در عملیات امداد و نجات ناشی از بلایا مانند زلزله است. در واقع باز هم ویژگی‌های فضای‌کاری گسترده و قابلیت حمل بار بالا و نقل و انتقال و نصب سریع این ربات‌ها، نگاه پژوهش‌گران را در مسایل امداد و نجات به خود معطوف ساخته است [۳۱].

(الف)

(ب)

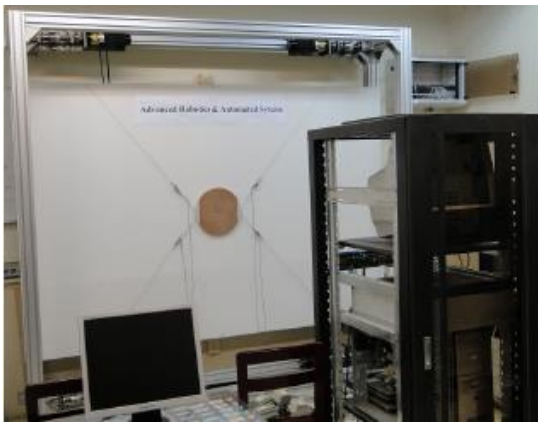
شکل ۲: (الف) ربات کابلی مورد استفاده در بازتوانبخشی [۲۸]، (ب)ربات کابلی امدادگر [۳۱].

استفاده از شتاب‌های بالا در سیستم‌های شبیه‌سازی و واقعیت مجازی موجب شده است تا بخشی از کاربردهای ربات‌های موازی کابلی در توسعه این کاربرد معطوف گردد. مکانیزم وارپ[4] یکی از مکانیزم‌های شش درجه آزادی با هشت عملگر کابلی است که با تاکید بر بهینه‌سازی فضای‌کاری طراحی شده است [۳۲]. در این راستا مکانیزم‌های دیگری مانند فالکن[5] [۳۳] با هدف کاربرد در سرعت‌های خیلی بالا نیز پیشنهاد شده‌است. . این مکانیزم که از هفت عملگر کابلی سود می‌برد، می‌تواند سرعت‌های خیلی بالایی را داشته و با استفاده از هفت موتور 60W شتاب‌های تا 40g را بدست دهد.

با عنایت به پتانسیل گسترده استفاده از ربات‌های کابلی در صنعت و قابلیت‌های بالقوه علمی در گروه رباتیک ارس، این گروه طراحی و ساخت صنعتی ربات موازی کابلی را در دستور کار خود قرار داده است. هدف از این پروژه طراحی، ساخت و تولید

[1] LAR (Large Adaptive Reflector)
[2] Charlotte
[3] Space-Hub
[4] WARP (Wirepuller Arm driven Redundant Parallel)
[5] Falcon

فن‌آوری یک ربات موازی افزونه کابلی است که در عین دارا بودن سرعت، شتاب و سختی بالا، حداقل محدودیت‌های فضای‌کاری را داشته و بتواند کارکرد دقیق و مناسبی را برای کاربردهای صنعتی به ارمغان آورد. در این پروژه جدیدترین نظریه‌های علمی در زمینه‌های طراحی، ساخت و کنترل ربات افزونه کابلی در کنار استفاده صنعتی از این نظریه‌ها مد نظر قرار گرفته است. هدف از تعریف این پروژه طراحی و ساخت سامانه رباتیکی است که بتواند با استفاده از لیزر، عملیات جوش و برش را با دقت‌های مناسب انجام دهد. طراحی این ربات در دو فاز صفحه‌ای و فضایی پیش‌بینی شده است. در فاز اول هدف ساخت یک ربات موازی افزونه کابلی در صفحه بوده است که سه درجه آزادی لازم برای حرکت در صفحه را برای مجری نهایی فراهم می‌کند. این مکانیزم که هم اکنون در دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی ساخته شده و با عنوان ربات موازی کابلی صفحه‌ای نصیر معرفی می‌گردد، یک مکانیزم سه درجه آزادی با دو درجه آزادی حرکت انتقالی در راستاهای x و y و یک درجه چرخشی حول محور z است که در شکل ۳ نشان داده شده است [۳۴]. در فاز دوم طراحی و ساخت یک مکانیزم فضایی شش درجه آزادی تعقیب می‌شود که مطالعات تکمیلی بر روی آن در حال انجام است.



شکل ۳: ربات موازی کابلی صفحه‌ای ساخته شده در گروه رباتیک ارس دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی [۳۴].

۱،۲- چالش‌های ربات‌های موازی کابلی

علیرغم عمر کوتاه ربات‌های کابلی ویژگی‌های مطلوب آن توانسته است اشتیاق محققان را برای به کارگیری این مکانیزم‌ها در زمینه‌های مختلف افزایش دهد. اما به منظور توسعه این فن‌آوری در سطح گسترده، چالش‌ها و موانع فراوانی وجود دارد که در ادامه به توضیح آنها پرداخته می‌شود.

مساله سینماتیک مستقیم در این نوع ربات همانند مکانیزم موازی دیگر، مشکل و پیچیده است. افزونگی یکی از راهکارهای مناسب در فرار از پیچیدگی سینماتیک مستقیم می‌باشد. تحلیل فضای‌کاری یکی دیگر از مهم‌ترین بخش‌ها در طراحی ربات‌ها است و وجود یک روش تحلیلی مناسب دیدگاه موثری در گام طراحی برای طراح به وجود می‌آورد. در حوزه ربات‌های کابلی به دلیل قید کششی بودن کابل تحلیل فضای‌کاری بسیار پیچیده‌تر از ربات‌های متداول سری و موازی است. در این راستا این موضوع به عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در حوزه ربات‌های کابلی تا کنون مطرح است. در ربات‌های کابلی امکان برخورد کابل‌ها به یکدیگر و به بدنه ربات وجود دارد و این امر منجر به یک قید در طراحی بهینه ربات می‌شود.

در طراحی بهینه مکانیزم علاوه بر توجه به افزایش فضای‌کاری مکانیزم، ساختار هندسی نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در طول فرایند طراحی، انتخاب تعداد کابل، هندسه بدنه ربات، محل قرارگیری اتصالات کابل و ... دارای اهمیت فراوانی در تحلیل عملکرد ربات از جمله: تکینگی، پایداری، فضای‌کاری، مهارت ربات در فضای‌کاری سیستم است. یک مساله پایه در ساختار فیزیکی کابل این است که هرگز نمی‌تواند نیروی فشاری و یا هر نیروی دیگری بجز نیروی محوری کششی تولید کند. همین مساله در طراحی، کنترل و توزیع نیروها در این دسته از ربات‌ها به مساله‌های باز متعددی تبدیل می‌شود. این خاصیت ذاتی کابل، همان دلیلی است که هرگز یک ربات موازی کابلی ماهر نمی‌تواند جدای از افزونگی باشد. یعنی طراحی کنترل‌کننده به تنهایی نمی‌تواند این مساله را حل کند و ابزار دیگری در کنار خود نیاز دارد که حل افزونگی در توزیع نیروها بین عملگرهای کابلی ربات است.

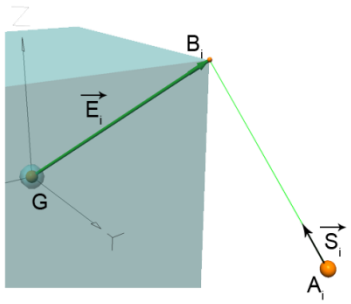
در مکانیزم‌های کابلی به دلیل وجود زنجیره سینماتیکی حلقه بسته، دارای دینامیک پیچیده‌تری نسبت به مکانیزم‌های سری است. این مسئله هنگامی که دینامیک کابل نیز در نظر گرفته شود بغرنج‌تر و پیچیده‌تر خواهد بود. با توجه به غیر محدب بودن فضای کاری قابل کنترل در این ربات‌ها حتی حرکت نقطه به نقطه نیز در این فضای کاری نیاز به یک الگوریتم پیچیده دارد تا بتواند منحنی مورد نیازی را بیابد که در فضای کاری قابل کنترل بوده و زمان یا انرژی را کمینه کند. به دلیل ویژگی یکتای کابل که فقط می‌تواند نیروی کششی اعمال کند، بسیاری از الگوریتم‌های کنترلی که

تاکنون برای ربات‌های سری و موازی پیشنهاد شده‌اند، نمی‌توانند بدون تغییر در کنترل این ربات‌ها مورد استفاده قرار گیرند. در همه الگوریتم‌های کنترلی سابق، محرک‌ها می‌توانند در هر دو جهت مثبت و منفی اعمال تحریک کنند اما در این ربات‌ها محرک‌ها فقط باید در یک جهت عمل کنند به همین دلیل از نقطه نظر کنترلی، افزونگی در این ربات‌ها یک نیاز اساسی است تا سیستم بتواند نقص اعمال یک جهته تحریک را به نحوی جبران کند. در مقایسه با حجم زیاد پژوهش‌های انجام شده در زمینه کنترل ربات‌های سری و موازی بحث کنترل ربات‌های کابلی چندان مورد توجه محققین قرار نگرفته است. البته باید توجه داشت در این ربات‌ها تنها طراحی کنترل‌کننده کافی نیست و باید به گونه‌ای مسئله حل افزونگی که به نحوی با توزیع نیروها در کابل‌ها در ارتباط است، مد نظر قرار گیرد.

۲- سینماتیک مکانیزم‌های موازی کابلی

تحلیل سینماتیکی ربات‌ها از پایه‌ای‌ترین مسایل مورد بررسی در علم رباتیک است. در تحلیل سینماتیکی، هندسه‌ی حرکت اجزاء مختلف ربات و رابطه آنها (صرف‌نظر از نیروهای به‌وجود آورنده حرکت‌ها) بررسی می‌شوند. در ربات‌های موازی برخلاف ربات‌های سری، تحلیل سینماتیکی وارون ساده‌تر است و عموماً، روابط مستقلی بین هر یک از پارامترهای مفصلی و موقعیت مجری نهایی به دست می‌آید [۳۵]. سینماتیک وارون ربات‌های موازی از پیچیدگی خاصی برخوردار نیست و به راحتی قابل حصول است اما سینماتیک مستقیم در این مکانیزم‌ها از جمله مسائل باز[1] محسوب می‌شود [۳۶]. ربات موازی کابلی نیز چنین خواصی را از خانواده ربات‌های موازی به ارث برده‌است.

با در نظر گرفتن شماتیک کلی مکانیزم موازی کابلی در شکل ۴، موقعیت مجری نهایی و فریم ثابت نسبت به مرکز مختصات G به صورت برداری قابل تعریف است. در این شکل $\hat{s}_i$ بردار یکه در امتداد طول کابل از A_i به B_i است که A_i و B_i نقاط اتصال iامین کابل به پایه و مجری نهایی است. همچنین E_i برداری در امتداد خط واصل بین B_i و G است. با توجه به بردارهای معرفی شده به بررسی تحلیل سینماتیکی مکانیزم‌های کابلی پرداخته می‌شود.



شکل ۴: بردارهای فرضی سینماتیکی بر روی ربات موازی کابلی.

۲,۱- سینماتیک وارون

آنچه که سینماتیک وارون ربات نامیده می‌شود، رابطه‌ای است که متغیرهای فضای مفاصل را برحسب متغیرهای فضای کاری بیان کند. یا به عبارت دیگر، بیان طول بازوها (کابل‌ها) در ربات موازی بر اساس موقعیت قرارگیری سکوی متحرک[2] است.

با توجه به اینکه طول کابل همواره مقدار مثبت و حقیقی دارد، جواب فوق یکتاست [۳۷]. برای تحلیل معادلات سینماتیک وارون ربات فرض می‌کنیم که با یک سنسور موقعیت صفحه متحرک را به دست می‌آوریم و در هر لحظه مختصات نقطه G را در فضا در اختیار داریم که دارای حداکثر ۶ پارامتر شامل موقعیت در مختصات کارتزین و موقعیت در جهت گیری است که همگی نسبت به مختصات ساکن A اندازه‌گیری می‌شوند. در واقع طول هر بازو با طول بردار $\overrightarrow{A_iB_i}$ برابر است.

۲,۲- ژاکوبین و حالت های تکینگی

آنالیز ماتریس ژاکوبین نقش اساسی در تحلیل و مطالعات ربات‌ها بازی می‌کند. این ماتریس مختصات فضای مفصلی را به مختصات فضای کاری مرتبط کرده ضمن این که بین نیروهای فضای کاری و گشتاورهای عملگرها ارتباط برقرار می‌کند. هرگاه بردار متغیرهای عملگرهای ربات $\boldsymbol{L}$ و بردار موقعیت سکوی متحرک $\boldsymbol{x}$ در نظر گرفته شود، معادلات سینماتیکی ربات به صورت یک تابع ضمنی $\boldsymbol{f(L,x)=0}$ به دست می‌آید و با مشتق‌گیری از این تابع رابطه بین سرعت مجری نهایی و نرخ تغییرات ورودی یافت می‌شود و ماتریس ژاکوبین کلی ($\boldsymbol{J}$) ربات موازی از رابطه زیر به دست می‌آید:

[1] Open Problems

[2] Moving Platform

$$\boldsymbol{J} = \boldsymbol{J_L^{-1}} \boldsymbol{J_x} \ , \dot{\boldsymbol{L}} = \boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{x}} \qquad (۱)$$

دراین رابطه پارامترهای $\boldsymbol{J_x}$ و $\boldsymbol{J_L}$ از روابط زیر پیروی می‌کنند:

$$\boldsymbol{J_x} = +\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{x}} \ , \ \boldsymbol{J_L} = -\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{L}} \qquad (۲)$$

همچنین با آنالیز ماتریس ژاکوبین می‌توان به نقاط تکین دست پیدا کرده و روش مناسبی برای به دست آوردن فضای کاری ربات و مهارت ربات در این فضا هم به حساب می‌آید. همین موضوع‌ها باعث شده تا آنالیز ژاکوبین یکی از موارد مهم در مطالعه ربات‌ها باشد. در بیشتر بازوهای مکانیکی، به ازای مقادیری از متغیرها ماتریس ژاکوبین تکین می‌شود. در ربات‌های سری، ربات یکی از درجات آزادی خود را از دست می‌دهد. در چنین وضعیتی راستایی وجود دارد که به ازای اعمال نیرو توسط عملگرهای مفاصل، حرکتی در آن راستا انجام نمی‌پذیرد. به این حالت، *تکینگی سری* گفته می‌شود.

ربات‌های موازی علاوه بر تکینگی مزبور تکینگی دیگری تحت عنوان *تکینگی موازی* دارند. در این حالت سرعت‌های غیر صفر برای مجری نهایی در حالی‌که عملگرها ساکن هستند، امکان‌پذیر می‌شود. ربات در این حالت یک درجه آزادی به‌دست می‌آورد که عملگری برای کنترل آن ندارد. بخش دیگری از تکینگی ربات‌های موازی در مطالعه رابطهٔ بین سرعت‌های مفاصل منفعل با سرعت‌های مفاصل فعال یا مجری نهایی حاصل می‌شود. تکینگی ژاکوبین تبدیل این مفاصل موجب بروز تکینگی مفاصل منفعل می‌شود. در ربات‌های کابلی با جایگزینی کابل و خصوصیت کششی بودن آن، برداشت‌های متعارفی که از ماهر بودن و فضای‌کاری مطرح بوده، تغییر یافته است. همچنین با بهره‌گیری از مفاهیم موجود با افزودن قید کششی بودن کابل رویکردهای جدیدی در تحلیل ژاکوبین و فضای‌کاری ربات به وجود آمده است. با عنایت به نو بودن بحث ربات‌های کابلی در حوزه رباتیک این موضوعات هم اکنون به عنوان مسائل باز مطرح است.

۲،۳- سینماتیک مستقیم

استخراج مختصات مجری نهایی در صورت معلوم بودن طول کابل‌ها در سینماتیک مستقیم[1] ربات بررسی می‌شود. پیچیدگی این مسئله در اکثریت قریب به اتفاق ربات‌های موازی مشاهده می‌شود [۳۸]. این پیچیدگی در رباتی که جاسلین و همکار ایشان بر اساس سادگی حل سینماتیک مستقیم پیشنهاد کرده‌است، وجود ندارد [۳۹]. این ساختار ربات موازی نیازی به حل سینماتیک پیچیده‌ی معمول ربات‌های موازی ندارد. مخترعین این نوع از ربات‌های موازی ساختارهای جایگزین برای هر درجه آزادی از ربات‌های موازی پیشنهاد کرده اند که بر اساس مقید کردن مفاصل ربات به نحوی است که حرکت ربات تنها در جهت حرکت‌های کارتزین امکان‌پذیر باشد [۴۰]. اما به علت وجود قیود خاص در عملگرهای صلب بکار رفته، چنان ساختاری را نمی‌توان در مورد ربات کابلی بکار بست.

سینماتیک مستقیم ربات‌های موازی توسط روش‌های مختلف عددی و تحلیلی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. مطابق مطالعات انجام یافته از روش‌های مختلف، آنچه که مشهود است عدم یکتایی حل این مسئله و وجود جواب‌های مختلف برای آن است. به عنوان مثال برای ربات استوارت-گو جواب سینماتیک مستقیم نه تنها الزاماً یکتا نیست بلکه وجود ۴۰ جواب برای موقعیت مجری نهایی ربات گزارش شده است [۴۱]. از میان روش‌های مختلف حل این مسئله برخی از محققان از اندازه‌گیری متغیرهای مفاصل غیر فعال برای حل مسئله سینماتیک وارون سود برده‌اند [۴۲]. اکثر این روش‌های حل منحصر به تعداد درجات آزادی ربات نیست. در یکی از این روش‌ها معادلات سینماتیک مستقیم با استفاده از روابط بین مختصات نقاط اتصال و سینماتیک وارون، ساده می‌شود. بدین ترتیب یک حل بصورت بسته[2] از معادلات بدست می‌آید [۴۳]. البته می‌توان این حل حلقه بسته را با داده‌های یک سنسور خطی آمیخت تا حل سینماتیک مستقیم بهتر شود [۴۴]. در مطالعه دیگری نیز، این روش بصورت تجزیهٔ معادلات غیر خطی حاصله به دو دسته مسئله خطی و ماتریسی انجام یافته است [۴۵]. در کارهای جدیدتر، به جای حل معادله‌ی مثلثاتی بر حسب مختصات مجری نهایی، از حل معادلات جبری چند جمله ای برای نقاط اتصال استفاده شده است [۴۶]. علاوه بر روش‌های فوق، برخی نیز با استفاده از راهبردهای غیر کلاسیک سعی در حل این مسئله داشته‌اند. الگوریتم ژنتیک[3] از روش‌هایی است که با تبدیل سینماتیک مستقیم به یک مسئله بهینه‌سازی قابل استفاده است [۴۷]. یکی از روش‌های بکار رفته دیگر در این زمینه، شبکه عصبی مصنوعی[4] است. بدین ترتیب که وزن‌های شبکه عصبی در

[1] Forward Kinematics

[2] Closed Form Solution
[3] Genetic Algorithm
[4] Artificial Neural Network

آموزش با سینماتیک وارون آموزش می‌بینند و به هنگام اجرا عکسِ کاری را می‌کنند که در سینماتیک وارون انجام می‌گیرد [۴۸]. نگارندگان این مقاله در تحقیق دیگری [۴۹] نتیجه گرفته اند که شبکه عصبی جوابگوی استفاده در سینماتیک مستقیم نیست.

۳- تحلیل فضای‌کاری ربات‌های موازی کابلی

عوامل مختلفی حرکت‌های مکانیزم‌های موازی را محدود می‌نمایند. از آن جمله می‌توان محدودیت‌های مکانیکی مفاصل غیرفعال، تداخل و برخورد سایر اعضا، محدودیت‌های محرک‌ها و تکینگی‌هایی که فضای‌کاری مکانیزم را به چند قسمت جدا می‌نمایند، برشمرد. به همین دلیل در این ربات‌ها که در مقایسه با مکانیزم‌های سری به داشتن فضای‌کاری محدود مشهورند، حجم قابل توجهی از تحقیقات بر روی الگوریتم‌های مختلف یافتن فضای‌کاری آن تمرکز دارند [۵۰، ۵۱ و ۵۲].

در تحلیل فضای‌کاری این مکانیزم‌ها، مشکل اصلی در به تصویر کشیدن فضای‌کاری آن‌ها و ارتباط و وابستگی درجات آزادی به یکدیگراست. به همین علت فضای‌کاری مکانیزم‌هایی که بیش از سه درجه آزادی دارند را نمی‌توان به تصویر کشید. برای مکانیزم‌هایی که بیش از سه درجه آزادی دارند $n > 3$، لازم است که $n-3$ تا از درجات آزادی را ثابت نگه داریم. با توجه به درجات آزادی که برای مکانیزم ثابت نگه می‌داریم، فضای‌کاری‌های گوناگونی برای مکانیزم به دست آورده است.

فضای‌کاری دوران ثابت[۱] یکی از انواع فضاهای‌کاری است که در آن زاویه‌های دوران ثابت فرض می‌شود و با تغییر موقعیت‌های ربات فضای‌کاری محاسبه می‌شود. یکی دیگر از فضاهای‌کاری، فضای‌کاری موقعیت ثابت[۲] است که به تمام جهت‌گیری‌هایی از ربات اطلاق می‌شود که با در نظر گرفتن موقعیت ثابت، مجری نهایی می‌تواند به آن دست یابد. نیز تمام موقعیت‌هایی از ربات است که با در نظر گرفتن محدوده معینی از جهت‌گیری، مجری نهایی می‌تواند به آن دست یابد. علاوه بر این فضاهای‌کاری دیگری مانند فضای‌کاری دوران تام[۳]، فضای‌کاری دوران فراگیر[۴] و فضای‌کاری دوران تام کاهش یافته[۵] در تحلیل فضای‌کاری ربات‌های موازی تعریف شده‌اند [۲].

در مطالعه‌ی فضای‌کاری ربات‌های موازی کابلی علاوه بر بررسی مسایلی که در تحلیل فضای‌کاری ربات‌های موازی مورد توجه قرار می‌گیرند، باید مسأله کششی بودن نیروی کابل‌ها نیز به عنوان یک ویژگی ذاتی مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. از اینرو محققان چندین نوع فضای‌کاری جدید را با در نظر گرفتن خصوصیت کششی بودن نیروی کابل معرفی نموده و آنها را مورد تحلیل قرار داده‌اند [۵۳، ۵۴]. این محققان معتقدند فضای‌کاری متعارف در ربات‌های موازی لزوماً در فضای‌کاری ربات‌های موازی کابلی معتبر نبوده و این عدم اعتبار ناشی از نیاز به کششی بودن نیروی کابل‌ها است [۵۴]. اثر نیروی کابل‌ها و رابطه بین نیروی عملگر و نیروی اعمال شده به مجری نهایی با توجه به اصل کار مجازی به صورت رابطه زیر بیان می‌گردد [۵۳]:

$$\boldsymbol{A}_{n\times m}\boldsymbol{f}_{m\times 1}=\boldsymbol{w}_{n\times 1}\ ,\qquad \boldsymbol{A}=-\boldsymbol{J}^{T} \tag{۳}$$

در رابطه فوق ماتریس $\boldsymbol{A}$، *ماتریس ساختار*[۶] نامیده می‌شود [۵۵].

همان‌گونه که بیان گردید، تحلیل فضای‌کاری مکانیزم‌های کابلی علاوه بر وابستگی به تحلیل تکینگی در فضای ربات، به آنالیز کششی بودن نیروی کابلی نیز وابسته است. در تحلیل کششی بودن نیروی کابل‌ها، لازم است در هر وضعیت از فضای ربات، رابطه (۳) با شرط مثبت بودن بردار نیروی کابل حداقل دارای یک جواب حقیقی باشد. در واقع تمام موقعیت‌هایی از ربات که منجر به وجود پاسخی مثبت در رابطه (۳) گردد، در فضای‌کاری مکانیزم کابلی قرار می‌گیرد.

$$\begin{aligned} workspace:\{X|\ \forall\, \boldsymbol{w}\in \boldsymbol{w_t}\ \ & \boldsymbol{A}_{n\times m}\boldsymbol{f}_{m\times 1} \\ & =\boldsymbol{w}_{n\times 1}\,,\boldsymbol{0}\le \boldsymbol{f_0}\le \boldsymbol{f} \\ & \le \boldsymbol{f_1}\ \} \end{aligned} \tag{۴}$$

در این رابطه $\boldsymbol{w_t}$ مجموعه‌ای از نیروهای خارجی اعمال شده به مجری نهایی است. بردارهای $\boldsymbol{f_0}$ و $\boldsymbol{f_1}$ کران بالا و پایین نیروهای کششی کابل هستند. با این تعریف کلی و تعیین کران‌های بردار نیروی کابلی و مجموعه نیروی خارجی $\boldsymbol{w_t}$ فضاهای‌کاری مختلفی در حوزه مکانیزم‌های کابلی تعریف می‌شود. علاوه بر این یکی از شروط لازم برای وجود جواب در رابطه فوق، برآورده شدن قید کامل بودن مرتبه ماتریس ساختار ($\boldsymbol{A}$) است. از این حیث بررسی تکین بودن ماتریس ژاکوبین در تحلیل فضای‌کاری مکانیزم‌های کابلی همواره به عنوان یک شرط لازم مورد توجه است.

[۱] Constant Orientation Workspace (COW)
[۲] Constant Position Workspace (CPW)
[۳] Total Orientation Workspace (TOW)
[۴] Inclusive orientation workspace
[۵] Reduced total Orientation workspace
[۶] Structure matrix

۳،۱- انواع فضای‌کاری ربات‌های کابلی افزونه

فضاهای‌کاری تعریف شده در حوزه ربات‌های موازی کابلی را می‌توان به چهار گروه اصلی فضای‌کاری قابل دسترس، فضای‌کاری استاتیکی، فضای‌کاری دینامیکی و فضای‌کاری کنترل‌پذیر تقسیم نمود [۵۶]. فضای‌کاری قابل دسترس با درنظر گرفتن خواسته‌های واقعی و فیزیکی موجود در ربات از جمله محدودیت کمینه و بیشینه در نیروی کابل‌ها و یا اعمال یک مجموعه مشخص از نیروهای خارجی به مجری نهایی مکانیزم به دست می‌آید که در نوع خود حایز اهمیت و درخور توجه است. برخی از محققان این نوع فضای‌کاری را با نام‌های فضای‌کاری چرخش-شدنی[۱]، فضای‌کاری نیرو-شدنی[۲] و یا فضای‌کاری قابل قبول[۳] معرفی نموده‌اند [۵۸،۵۷]. یکی از روش‌های مطرح در تحلیل این نوع فضا، به کارگیری تحلیل بازه‌ای [۵۹] در تعیین محدوده‌ی آن است. در این دیدگاه محدودیت‌های عملی در نظر گرفته شده است و می‌تواند در طراحی یک مکانیزم خاص با عملکرد مشخص کارآمد باشد. اما به علت آنکه این محدودیت‌ها مسأله به مسأله متفاوت بوده و مقدار مشخصی ندارند در مسأله بهینه‌سازی در حالت کلی قابل استفاده نمی‌باشد. فضای‌کاری قابل دسترس استاتیکی، نیروی جاذبه زمین را به عنوان یکی از عوامل مقید کننده ربات در نظر می‌گیرد. در واقع این نوع فضا در ربات‌های مقید ناقص مطرح است که نیروی جاذبه، نقش یکی از کابل‌های افزونه را دارد [۶۰]. این نوع فضا با نام‌های فضای‌کاری تعادلی استاتیکی [۶۱] و ناحیه نیروی کابلی [۶۲] نیز تعریف شده است.

دیگر فضای‌کاری تعریف شده، فضای‌کاری دینامیکی است که در آن شتاب‌های خطی و زاویه‌ای مجری نهایی مکانیزم در آن مورد توجه است [۶۳]. در واقع این نوع فضا زیر مجموعه‌ای از فضای‌کاری قابل دسترس است که نیروی خارجی، ناشی از شتاب‌های تعیین شده است. محققان این نوع فضای‌کاری را برای ربات‌های صفحه‌ای بررسی نموده‌اند و ادعا کرده‌اند که قابل تعمیم به ربات‌های فضایی نیز می‌باشد [۶۳]. این نوع فضا نیز مانند دو فضای‌کاری دیگر وابسته به خصوصیات کاربردی یک مکانیزم است و تعبیر آن در مسائل متفاوت نیز متغیر است.

یکی از عمومی‌ترین فضاهای‌کاری مطرح شده در مکانیزم‌های کابلی، فضای‌کاری کنترل‌پذیر است [۶۴] که با نام‌های فضای‌کاری بستار چرخش[۴] [۵۳] و بستار نیرو[۵] [۶۵] نیز شناخته شده است. در این فضای‌کاری، بردارهای نیروی خارجی مجموعه‌ای از تمام بردارهای نیرو در هر جهت و با هر اندازه است. همچنین کران بردار نیروی کابلی نیز در محدوده مثبت محور حقیقی قرار دارد. در واقع در رابطه (۴) کران پایین بردار نیرو صفر و کران بالای آن بینهایت است. یکی از نکات حایز اهمیت در این نوع فضا، الزام قید افزونگی کابلی در مکانیزم است و در مکانیزم‌های مقید کامل قابل بررسی است [۶۶]. از آنجایی که هیچ محدودیتی به غیر از مثبت بودن نیروی کابلی در این نوع نگرش وجود ندارد، این فضای‌کاری فقط وابسته به هندسه ربات و نحوه قرار گرفتن نقاط اتصال به قاب ساکن و متحرک در ربات است [۵۳]. از این منظر فضای‌کاری کنترل‌پذیر در مسأله‌ی طراحی مکانیزم کابلی مقید کامل بسیار حایز اهمیت است. به این علت، تحقیقات نسبتاً گسترده‌تری در این نوع فضای‌کاری نسبت به دیگر فضاهای کاری انجام شده است.

یکی از مهم‌ترین قضایای مطرح در تحلیل فضای‌کاری کنترل‌پذیر بررسی فضای پوچی ماتریس ساختار است. بر مبنای خصوصیت فضای پوچی، موقعیت ربات در فضای‌کاری کنترل‌پذیر قرار می‌گیرد اگر و تنها اگر ماتریس ساختار ربات مرتبه کامل بوده و فضای پوچی آن شامل برداری با عناصر مثبت (یا هم‌علامت و مخالف صفر) باشد[۶۷، ۶۸].

در یک مکانیزم افزونه در موقعیت‌های غیرتکین تعداد بردارهای مستقل پوچی با تعداد درجه افزونگی ربات برابر است. در نتیجه در یک ربات کابلی یک درجه افزونه یافتن این بردار و تعیین علامت آن نسبتاً سهل و ساده است. با افزایش درجات آزادی تعداد بردارهای مستقل فضای پوچی افزایش یافته و دست‌یابی به برداری اکیداً مثبت در این دسته از بردارها پیچیدگی مسأله را چند برابر می‌کند. از این منظر برای مکانیزم‌های با بیش از یک درجه افزونگی تحلیل‌های مختلفی ارائه گردیده است. الگوریتم بازگشتی کاهش ابعاد[۶]، یکی از روش‌هایی است که برای تعیین فضای‌کاری کنترل‌پذیر پیشنهاد شده است [۷۰،۶۹]. در این روش فضای‌کاری کنترل‌پذیر با نام فضای‌کاری بستار نیرو معرفی شده است. این روش مبتنی بر تحلیل پوسته محدب[۷] [۷۱] بوده و یک روش سیستماتیک عددی است. این روش برای آنکه نشان دهد

[1] Wrench Feasible Worksapce (WFW)
[2] Force Feasible Workspace (FFW)
[3] Acceptable Workspace

[4] Wrench Closure Workspace (WCW)
[5] Force Closure Workspace (FCW)
[6] Recursive dimention reduction algorithm
[7] Convex Hull

الگوریتم ارائه شده تمام فضای کنترل‌پذیر را می‌پوشاند، فاقد یک بیان مستدل است. همچنین با به کارگیری این روش تنها با شبکه‌بندی فضای مکانیزم می‌توان فضای‌کاری کنترل‌پذیر را به دست آورد و توانایی تعیین مرز فضای‌کاری مکانیزم وجود ندارد.

تعیین تحلیلی مرز فضای‌کاری کنترل‌پذیر مکانیزم، یکی دیگر از رویکردهای مورد مطالعه است. در این نگرش منحنی‌های مرز فضای‌کاری به صورت یک معادله چندجمله‌ای معرفی می‌گردد و ادعا شده است تمامی موقعیت‌های درون مرز مشخص شده، در فضای‌کاری کنترل‌پذیر قرار دارد. در [۷۲] طبق روش ارائه شده معادلات مرز فضای‌کاری برای ربات‌های با یک درجه افزونگی استخراج گردیده است و ادعا شده که این روش قابل تعمیم برای مکانیزم‌های با بیش از یک درجه نیز می‌باشد، هر چند که این ادعا به اثبات نرسیده است. در [۷۳] نیز با ارائه یک روش موثر به بررسی فضای‌کاری کنترل‌پذیر پرداخته شده است. در این روش نحوه‌ی قرارگیری بردارهای ستونی ماتریس ساختار یک مکانیزم صفحه‌ای نسبت به یکدیگر مورد مطالعه قرار گرفته و مرزهای فضای‌کاری کنترل‌پذیر ربات صفحه‌ای به صورت معادلات چندجمله‌ای بیان شده‌اند. تعمیم همین روش به مکانیزم‌های فضایی نیز در [۵۳] ارائه گردیده است. هر چند این روش در مکانیزم صفحه‌ای بطور مستدل بیان شده است ولی در بیان تعمیم این روش به مکانیزم‌های فضایی استدلال روشنی در آن دیده نمی‌شود. مهم‌ترین علت فقدان بیان مستدل در هر یک از روش‌های بیان شده در [۵۳، ۷۲] این است که اگر تمام موقعیت‌های درون مرز فضای‌کاری با روش‌های بیان شده بررسی گردند نقاطی درون فضای‌کاری وجود دارد که در الگوریتم‌های بیان شده به اشتباه به عنوان فضای کاری کنترل پذیر شناخته نمی‌شوند.

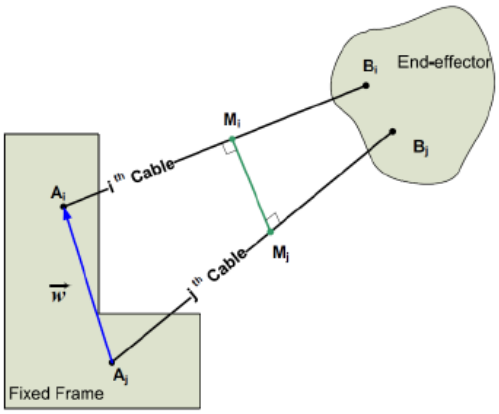
یکی از عمومی‌ترین روش‌های تحلیل این فضای‌کاری، تحلیل بردارهای فضای پوچی است که با چالش‌هایی همچون پیچیدگی شدید محاسبات با افزایش درجه آزادی و درجه افزونگی ربات همراه است. همچنین روش‌های بیان شده فاقد یک توصیف فیزیکی از فضای‌کاری کنترل‌پذیر است و نمی‌توانند تمام این فضا را پوشش دهد. در نتیجه ارائه یک روش حل تحلیلی برای ربات‌های فضایی با بیش از یک درجه افزونگی مرز دانش در این زمینه را گسترش خواهد داد.

ظریف لولویی و تقی راد در [۷۴] با ارائه یک مجموعه جدید از نیروهای خارجی موسوم به نیروهای بنیادی توانسته‌اند از پیچیدگی‌های محاسباتی روش‌های پیشین بکاهند و تحلیل فضای‌کاری کنترل‌پذیر را معطوف به حل یک گروه محدود از معادلات نمایند. از طرف دیگر با ارائه و اثبات قضایای مهمی در این زمینه نواقص روش‌های گذشته مرتفع شده است. با روش ارائه شده علاوه بر اینکه تمامی مرزهای فضای‌کاری بدست می‌آیند، می‌توان با قطعیت اثبات نمود که فضای درون این مرزها فضای‌کاری کنترل‌پذیر را تشکیل می‌دهند و هیچ موقعیتی خارج از این محدوده، جزو فضای‌کاری کنترل‌پذیر نمی‌باشد. با تعمق بیشتر بر روی ربات‌های کابلی و به منظور توصیف فیزیکی فضای کاری، آنها به یک مجموعه نیروی بنیادی دست یافتند به گونه‌ای که در هر موقعیت ربات، هرگاه با اعمال این مجموعه نیرو کابل‌ها در کشش قرار گیرند، حتماً به ازای تمامی نیروهای خارجی دیگر نیز کشیده باقی خواهند ماند.

۳،۲- برخورد کابل ها

یکی از مشکلاتی که فضای‌کاری ربات‌های کابلی را بسیار محدود می‌کند، پدیده برخورد کابل‌ها است. اهمیت این شاخص به خصوص در ربات‌های کابلی فضایی به حدی زیاد است که معیارهایی نظیر کنترل‌پذیری و یا مهارت ربات را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. در [۷۵] الگوریتم‌هایی بیان شده است که در موقعیت‌های مختلف ربات، امکان برخورد کابل با کابل و یا مجری نهایی و قطعه‌کار را آشکار می‌کند.

در صورتی که دو کابل ربات کابلی حین حرکت مجری نهایی به یکدیگر برخورد کنند، حرکت مختل شده و ربات مهارت خود را از دست می‌دهد. برای آشکارسازی برخورد دو کابل، روش‌های متعددی ارائه شده است که روش ارایه شده در [۷۵] یکی از ساده ترین و درعین حال کاراترین الگوریتم‌های آشکارسازی برخورد کابل ها است.



شکل ۵: قرار گرفتن دو کابل و فاصله بین آنها [۷۵].

در این روش ابتدا عمود مشترک بین دو برداری که در راستای دو کابل (M_iM_j در شکل ۵) قرار می‌گیرد را به دست آورده و طول آن را محاسبه می‌کنند. هرگاه مقدار این طول کمتر از مقداری مانند ε باشد در آن شرایط برخورد حادث شده است. مقدار ε بستگی به ضخامت کابل‌های بکار رفته در مکانیزم دارد و یک معیار عملی است. در [۷۵] همچنین به شرایط برخورد کابل با مجری نهایی و قطعه‌کار نیز توجه گردیده و الگوریتمی موثر در این راستا نیز ارایه شده است. در این روش با بررسی کابل در نزدیکی قطعه‌کار شرایط برخورد مورد توجه قرار گرفته است. هر چند الگوریتم ارایه شده در نحوه برخورد کابل با قطعه‌کار روشی کارا و موثر است ولی در آن قطعه‌کار صرفا با هندسه مکعبی در نظر گرفته شده است. البته شایان ذکر است که هر قطعه‌کار و مجری نهایی را می‌توان در یک مکعب محاط نمود و سپس از روش ارایه شده در برخورد کابل و مجری نهایی استفاده کرد.

هر چند مطالعات قابل توجهی در مورد فضای‌کاری مکانیزم‌های کابلی صورت پذیرفته است، اما همچنان این موضوع یکی از موضوعات چالشی در این نوع مکانیزم‌ها است.

۴- معیارهای مهارت

محاسبه فاصله از نقاط تکین کار پیچیده‌ایست و هیچ بررسی کاملی برای محاسبه فاصله‌ی بین یک موقعیت از مکانیزم از نزدیکترین موقعیت تکین آن انجام نگرفته است. برای ایجاد کمیتی که فاصله تکینگی را نمایش دهد با کمی اغماض می‌توان شاخص‌های سینماتیکی-استاتیکی را در نظر گرفت. یکی از مفروضات در بررسی عملکرد سینماتیکی محدود در نظر گرفتن نرم خطای اندازه‌گیری است [۷۶] منجر به بیان رابطه‌ی شبه-کره‌ی[1] خطا در فضای مفصلی و بیضی‌گون خطا در فضای‌کاری مکانیزم می‌شود. در ادبیات فضای‌کاری معمولاً این حجم، بیضی‌گون مهارت[2] نامیده می‌شود، که شکل و حجم آن مشخصه‌ای از مهارت مکانیزم است.

یکی از مشهورترین شاخص‌های مهارت، شاخص یوشیکاوا[3] [۷۷] است. مقدار این شاخص متناسب با حجم بیضی‌گون مهارت است.

از دیگر شاخص‌های پرکاربرد در مکانیزم‌های موازی معیار عدد وضعیت[4] است که متناسب با نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک بیضی‌گون مهارت خواهد بود [۷۸]. هر چند عدد وضعیت به دلیل سادگی محاسبات و بیان مهارت ربات از اقبال بسیار خوبی برخوردار است ولی در حضور توأمان درجات آزادی دورانی و انتقالی همگن نبوده و دارای واحدهای فیزیکی یکسانی نیست. [۷۹، ۸۰، ۸۱ و ۸۲]. در سال‌های اخیر برای برطرف کردن مشکلات شاخص‌های سینماتیکی، دو شاخص متمایز با نام حساسیت سینماتیکی دورانی و حساسیت سینماتیکی انتقالی تعریف گردیده است [۸۳].

شاخص‌های حساسیت سینماتیکی دورانی و حساسیت سینماتیکی انتقالی کران بالای خطای دورانی و انتقالی مکانیزم هستند که این خطاها ناشی از خطای با نرم واحد در فضای مفصلی است [۸۴]. از آنجا که این دو شاخص خطای درجات آزادی دورانی و انتقالی را به طور جداگانه در نظر می‌گیرند، از نظر واحد سازگار هستند. اما این شاخص تفسیری از میزان نزدیکی به تکینگی ارائه نمی‌دهد [۸۵]. چنان‌که ممکن است در موقعیتی خاص، حساسیت سینماتیکی ربات بسیار مطلوب باشد، اما ربات به مرز تکینگی نیز نزدیک باشد.

۴،۱- معیارهای مهارت مکانیزم‌های موازی کابلی

در مکانیزم‌های موازی معیارهای متعددی در تعیین عملکرد سینماتیکی بیان گردیده است و این معیارها در ربات‌های کابلی نیز بکار می‌رود. اما بدلیل کششی بودن نیرو در کابل‌ها به کارگیری معیارهای مهارت بیان شده در ربات‌های مرسوم به تنهایی کارایی مناسبی ندارد. زیرا ممکن است در وضعیتی معیار مهارت مناسب باشد ولی نیروی کششی کابل قابل دسترس نباشد. از این حیث تعریف یک معیار مهارت جدید در ربات‌های کابلی مرز دانش را در این زمینه گسترش می‌دهد. در این‌گونه ربات‌ها یکی از معدود شاخص‌های موجود، معیار مهارت یک‌جهته[5] برای ربات‌های کابلی با یک درجه افزونگی [۸۶] است.

این معیار به خوبی توانسته است هم اثر نیروی داخلی که ناشی از بردار پوچی است را درنظر بگیرد و هم اثر ژاکوبین را مطرح سازد. این معیار هرچند برای مکانیزم‌های یک درجه افزونه می‌تواند به عنوان یک معیار مناسب انتخاب گردد و فضای‌کاری کنترل‌پذیر

[1] hyper-sphere
[2] manipulability ellipsoid
[3] Yoshikawa's manipulability index
[4] Condition number
[5] Unilateral Dexterity

را نیز مشخص می‌کند، ولی یکی از مشکلاتی که به کارگیری این معیار برای ربات‌های با بیش از یک درجه افزونگی ایجاد می‌کند، به دست آوردن یک بردار پوچی منحصر به فرد است. زیرا با افزایش درجه افزونگی ابعاد بردار پوچی افزوده می‌شود و در صورت قرار گرفتن موقعیت مکانیزم در فضای کنترل‌پذیر به تعداد درجات آزادی بردار پوچی مثبت وجود دارد. در نتیجه انتخاب بردارهای پوچی با عناصر مثبت متفاوت منجر به مقادیر متفاوتی در این معیار می‌شود. از این منظر، خلاء بیان یک معیار مهارت که بیان کننده تاثیر ژاکوبین و نیروی داخلی به صورت همزمان باشد برای ربات‌های موازی کابلی با بیش از یک درجه افزونگی در ادبیات موضوع مشاهده می‌شود.

ظریف لولویی و تقی‌راد در [۸۷] معیار حساسیت نیرویی[1] را پیشنهاد داده‌اند، این معیار هر چند از مفاهیم حساسیت سینماتیکی بهره جسته است، ولی در عمل مفهومی فیزیکی از دقت ربات در توزیع نیروی کابلی در مکانیزم‌های افزونه ارائه داده است. در این معیار به جای نگاه بر تغییرات موقعیتی مکانیزم نسبت به طول کابل، به نحوه تغییرات نیروی کابل در برابر اعمال نیروی خارجی به مجری نهایی توجه شده است. از این حیث با محدود فرض کردن بردار نیروی خارجی تغییرات نیروی کابل بررسی شده است. در این معیار کران بالای نرم بردار نیروی کابل محاسبه می‌گردد که این مقدار ناشی از اعمال نیروی خارجی با نرم واحد به مکانیزم بوده است.

معیار حساسیت نیرویی به عنوان معیاری منحصر به فرد در حوزه مکانیزم‌های کابلی بوده است. بر اساس این معیار که بر پایه ایده نیروهای بنیادی استوار است، نسبت تغییرات نیروی کابلی به تغییرات نیروی خارجی سنجیده می‌شود. این معیار علاوه بر اینکه رویکرد مناسبی در نقاط تکین یا کنترل‌ناپذیر دارد و در این نقاط مقدار صفر را به خود اختصاص داده است، در نزدیکی مرزهای کنترل‌پذیری نیز به صفر میل می‌کند.

۵- تحلیل افزونگی و توزیع نیروها

ایجاد افزونگی در عملگرهای بازوی روبات موضوعی است که از مدت‌ها قبل توسط طراحان، چه سری و چه موازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حقیقت به خاطر خصوصیات متعددی که در اثر افزونه بودن عملگرها حاصل می‌شود این موضوع همواره مورد توجه طراحان روبات در دنیا بوده است. از جمله این مزایا می‌توان به گسترش فضای‌کاری و دوری از تکینگی، کم شدن نقاط تکین، افزایش مهارت روبات،بهبود در نحوه حرکت ربات موازی و داشتن درجه آزادی برای طراحی کنترل‌کننده مناسب اشاره نمود. همه موارد فوق در ربات‌های متداول غیرکابلی یک قید ضروری نیست و منجر به بهبود عملکرد ربات می‌شود. در حالی‌که در ربات‌های کابلی، افزونگی نه یک امکان بلکه یک ضرورت است. محدودیت ذاتی کابل‌ها در اعمال نیروی محوری تنها در جهت کشش، وارد کردن نیرو در دو جهت مخالف را غیر ممکن می‌سازد. بدین ترتیب افزونگی در عملگر و جایگذاری مناسب آن در طراحی موجب می‌شود که سیستم کنترلی اختیار توزیع بهینه نیروها جهت حرکت را داشته باشد. این توزیع بهینه که به کششی بودن نیروها مقید است در حل افزونگی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

بر اساس آنچه بیان شد، در ربات‌های موازیی که عملگرهای صلب با کابل جایگزین شده‌اند به دلیل کاهش چشمگیر وزن عملگرها، شتاب‌های بزرگی را می‌توانند تولید کنند و در کاربردهای سرعت بالا جایگاه ویژه‌ای پیدا کنند. اما عملگر کابلی تنها نیروی کششی تولید می‌کند. از سال ۱۹۹۰به بعد تا کنون، ربات‌های کابلی زیادی به دنیا معرفی شده‌اند و برای هر کدام به نحوی مسئله تضمین کشش کابل‌ها حل شده است، در بعضی با اضافه کردن کابل افزونه و در مواردی نیز از طریق یک المان فنری [۸۸] و یا یک سیلندر نیوماتیکی [۸۹]. در [۸۸] یک فنر برای تحت کشش نگه داشتن کابل در ساختار روبات طراحی شده است. در [۹۰] یک نمونه اولیه از روبات با عملگرهای ترکیبی کابل و سیلندر پیستون مورد توجه قرار گرفته است.

در [۹۱] یک روش تحلیلی برای توزیع بهینه نیروی کابلی ارائه گردیده است و در آن مجموع نیروهای کششی کابل در هر موقعیت بهینه می‌گردد. روش ارائه شده هر چند تحلیلی است ولی برای روبات‌های با بیش از یک درجه افزونگی کاربردی ندارد. همچنین در [۹۲] یک الگوریتم تکرار شونده برای یافتن مقدار کمینه نیروی کابلی ارائه داده است. این الگوریتم یک روش تصویر کردن عددی تکرارشونده و همگرا می‌باشد. سپس برای یافتن مقدار کمینه از یک الگوریتم تکراری دیگر استفاده نموده است. این روش به مساله هموار بودن مجموعه جواب نیروی کششی و همچنین بازه کمینه و بیشینه نیرو در یک مسیر توجهی نداشته است.

[1] Force Sensitivity Index

تقی‌راد و بابازاده بدوستانی در [۹۳] با استفاده از قضیه‌های موجود در تئوری برنامه‌ریزی غیرخطی [۹۴] و قضیه کروش-کان-تاکر[1] به حل مساله افزونگی در مکانیزم‌های کابلی پرداخته‌اند. در این روش مساله افزونگی به حل مساله کمینه‌سازی نیروها در فضای بازوها با در نظر گرفتن قیدها برای نیروها (کششی بودن نیروها در کابل‌ها) تقلیل پیدا کرده و با به دست آوردن معادلات لاگرانژ یک روش شبه-تحلیلی کارامد برای حل مساله ارائه شده است.

۶- بهینه‌سازی فضای‌کاری ربات‌های موازی کابلی

تقاضای روز افزون برای ربات‌هایی پر شتاب، با بازده انرژی بالا و فضای‌کاری وسیع نیازمند طراحی بهینه بر اساس محدودیت منابع است. مسأله‌ی طراحی بهینه عبارت است از تعیین بهینه مجموعه‌ای از پارامترهای طراحی که اهداف طراحی[2] را بر اساس معیارهای[3] مختلف به صورت همزمان برآورده سازد. پیچیدگی ساختار و فراوانی پارامترها، محدودیت‌ها و هدف‌های بهینه‌سازی موجب می‌شود فرآیند طراحی بهینه برای ربات‌های سری و با شدت بیشتر برای ربات‌های موازی مشکل شود [۲]. در حالیکه تحقیقات بسیاری بر روی طراحی بهینه ربات‌ها انجام شده است، بر روی طراحی ربات‌های موازی کابلی مطالعات کمتری انجام یافته‌است [۹۵] که در تمامی این مطالعات تنها به فضای‌کاری با نیروی کششی تمرکز شده است.

روش‌های بسیاری برای طراحی بهینه‌ی ربات‌های سری و موازی استفاده شده‌است. روش‌های ترکیب‌بندی تحلیلی[4]، گرچه بسیار مفهومی و کم اشتباه به نظر می‌رسند اما برای ربات‌هایی با درجات آزادی بیشتر از سه غالباً بسیار پیچیده و اکثراً غیرقابل حل هستند. به عنوان یک راه‌حل جایگزین، تعریف یک شاخص بهینگی[5] و سعی در کمینه ساختن آن به صورت فراگیر پیشنهاد شده‌است [۹۶، ۹۷]. بدین منظور شاخص‌های مختلفی در مقالات معرفی و مقایسه شده‌اند. گرچه در تحقیقات مختلف بر روی یک ربات خاص این شاخص‌ها جوابگو هستند، اما به دلیل وابستگی به مقیاس[6] غالباً برای مقایسه ربات‌های مختلف قابل بهره‌برداری نمی‌باشند [۹۸، ۹۹].

این روش‌های ریاضی نمی‌توانند یک تصویر شفاف از وابستگی معیارهای طراحی به پارامترها، نواحی بهینگی و تحدب[7] آنها در طراح ایجاد کند. به همین دلیل، برخی ابزارهای گرافیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند تا به وضوح دید طراحی بیافزایند. برای مثال، مرجع [۱۰۰] وابستگی معیار بهینگی را در موقعیت‌های مختلف برای ربات‌های سری توسط بیضی‌گون نمایش می‌دهد و مرجع [۱۰۱] برای ربات موازی کابلی کشش کابل را به همان طریق نشان می‌دهد.

کارایی‌های مطلوب در یک ربات در حالت کلی می‌تواند شامل دسترسی به فضای‌کاری، مهارت ربات، سختی و یا مسیر مورد نظر باشد [۱۰۲، ۱۰۳ و ۱۰۴]. در بهینه‌یابی چندهدفه دو نگاه عمده وجود دارد، در نگاه اول که مبتنی بر ارجحیت است بر اساس اطلاعات سطح بالاتر یک بردار ارجحیت وزنی انتخاب گردیده و سپس با تشکیل یک تابع مرکب، مسأله تبدیل به یک بهینه‌یابی تک هدفه می‌شود. معمولاً این نوع نگرش در بهینه‌یابی‌های کلاسیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از عمده‌ترین مشکلات به کارگیری این نوع روش‌ها یافتن بردار وزنی است. در نگرش دوم، مجموعه جواب‌های بهینه موسوم به پرتو مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اینصورت می‌توان بر اساس ترجیحات متفاوت کاربر، با توجه به منحنی پرتو به دست آمده مصالحه‌های متفاوتی را در جواب‌های بهینه به دست آورد. این نوع نگاه قاعده‌مندتر و عینی‌تر از روش اول است [۱۰۵].

در نگاه اول مسأله طراحی بهینه تعریف یک تابع معیار **T** شامل مجموع وزن‌دهی شده شاخص‌های مطلوب C_i است، که هر کدام از این شاخص‌ها تابعی از پارامترهای طراحی (ρ) می‌باشند [۱۰۶].

$$T = \sum_i w_i C_i(\rho) \qquad (۵)$$

که در رابطه فوق w_i وزن‌های تعریف شده طراح برای شاخص‌ها می‌باشد. روش‌های عددی برای یافتن مجموعه ρ_m بطوری که تابع معیار T را کمینه کند، به کار می‌رود. معمولاً این روش‌ها با یک حدس مقدار اولیه ρ_0 شروع شده و مجموعه بهینه ρ_m را پس از چند تکرار به دست می‌آورد و ρ_m به عنوان پاسخ طراحی بهینه محسوب می‌گردد.

اما این روش دارای چندین چالش است؛ اول اینکه فرض بر آن است که شاخص‌های مطلوب قابل تعریف باشند و بتوانند بطور

[1] Karush-Kuhn-Tucker
[2] Design Objective
[3] Criterion
[4] Analytical Synthesis Methods
[5] Optimality Index
[6] Scale Dependency
[7] Convexity

سریع و موثری در رویه[1] عددی بهینه‌سازی محاسبه گردند. دومین مسأله همگرایی تابع معیار تعریف شده در رویه بهینه‌سازی است، که ممکن است در روند الگوریتم بهینه‌سازی در یک کمینه محلی[2] قرار گیرد و به حل بهینه طراحی همگرا نشود. علاوه بر این انتخاب مقدار توابع وزنی نیز دیگر مشکل مهم در انتخاب تابع معیار است و کمترین تغییر در هر یک از وزن‌ها ممکن است باعث تغییر مقدار بهینه گردد. در بهینه‌سازی چندهدفه اگر هدف‌ها را نتوان از روش‌هایی مانند جبهه پرتو[3] به هم مربوط ساخت، ناگزیر از یک تابع هزینه کلی استفاده می‌گردد. در بسیاری از طراحی‌ها محققان با توجه به این مشکل تنها یک معیار را در بهینه‌سازی در نظر می‌گیرند [۱۰۷].

در مکانیزم‌های کابلی روش‌های مختلفی در بهینه‌سازی مکانیزم به کار رفته است. یکی از روش‌های مطرح در ربات‌ها روش‌های گسسته‌سازی است که به صورت گسترده‌ای در طراحی ربات‌های کابلی به کار رفته است [۱۰۸، ۱۰۹، ۱۱۰]. در این روش‌ها به دلیل گسسته‌سازی پارامترها و بررسی تاثیر آنها در کل فضای‌کاری فرض شده ربات، هزینه محاسباتی زیادی به طراح تحمیل می‌شود و از طرفی تعیین فاصله بین مقادیر گسسته نیز در تعیین پارامترهای طراحی بسیار موثر است. همچنین در این روش‌ها هیچ ضمانتی برای به دست آمدن طراحی بهینه وجود ندارد.

در [۱۱۱] نیز تابع معیار با ترکیب وزن‌دار از فضای‌کاری کنترل‌پذیر، فضای‌کاری در دسترس استاتیکی و فضای عاری از برخورد کابل‌ها به یکدیگر ارائه شده است. با تغییر مسأله بهینه‌سازی چند هدفه به یک مسأله تک هدفه و با گسسته‌سازی پارامترهای طراحی در بازه‌های مفروض با استفاده از یک الگوریتم ترتیبی[4] مقادیر بهینه پارامترها به دست آمده است. با توجه به اینکه ممکن است جواب بهینه به یک حل بهینه فراگیر همگرا نشود، از الگوریتم ژنتیک برای تایید آن استفاده می‌شود. در این روش در صورتی که الگوریتم ژنتیک منجر به پاسخ بهتری نگردد، پارامترهای تعیین شده در مرحله اول به عنوان پاسخ بهینه در نظر گرفته می شود. در این الگوریتم راهکار مناسبی در ارزش‌دهی توابع وزنی ارائه نشده است و با اعتماد بر تبحر طراح این وزن‌دهی بایستی انجام پذیرد.

به کارگیری نمودارهای بازبینی نظارتی[5] یکی دیگر از روش‌هایی است که برای وزن‌دهی توابع هدف در مسأله بهینه‌سازی تک هدفه با یک تابع هزینه‌ی کلی مطرح شده است [۱۱۲]. با بررسی وابستگی هر هدف به متغیرهای طراحی، طراح با درک اثر هر متغیر بر روی توابع، وزن مناسب را پیشنهاد می‌دهد و سپس با انتخاب یک تابع هدف کلی وزن‌دهی شده پارامترهای طراحی محاسبه می‌گردند. آنچه در تمامی روش‌های بهینه‌سازی ارائه شده قابل مشاهده است به کارگیری یک تابع هدف کلی در روند بهینه‌سازی است.

با توجه به آنچه در روش‌های مورد مطالعه دیده می‌شود وجود چند هدف در بهینه‌سازی ربات کابلی امری اجتناب‌ناپذیر است. در [۸۵] و [۸۷] به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر جبهه پرتو پیشنهاد گردیده است. سپس طرح بهینه یک مکانیزم کابلی فضایی با استفاده از روش‌های الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات و با توابع هدف انتخابی فضای‌کاری کنترل‌پذیر، حساسیت سینماتیکی و عدد وضعیت، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این روش امکان انتخاب نقاط بهینه با توجه به اهمیت معیارهای طراحی در شرایط گوناگون توسط طراح فراهم است.

۷- دینامیک ربات‌های موازی کابلی

بر خلاف بازوهای مکانیکی ماهر سری، مدل‌سازی دینامیکی بازوهای مکانیکی موازی بسیار پیچیده است. بر خلاف تحقیقات زیادی که در زمینه سینماتیک ربات‌های موازی انجام پذیرفته، کارهای انجام شده در زمینه دینامیک این ربات‌ها محدود می‌باشد. رایج ترین روش برای بدست آوردن معادلات دینامیکی حرکت در ربات‌های موازی استفاده از روش نیوتون اولر است. با این روش می‌توان به درک شهودی بهتری از فیزیک مساله دست یافت زیرا همه نیروهای داخلی، قیود و ... در این روش دیده می‌شوند اما پیچیدگی معادلات و حجم زیاد آنها باعث می‌شود حتی برای مسائل ساده نتوان به شکل دلخواه معادلات دست یافت. جاسلین[6] در [۱۱۳] از این روش برای تحلیل دینامیکی ربات‌های موازی صفحه‌ای و فضایی استفاده کرده‌است. داسگوپتا[7] نیز برای بدست آوردن معادلات دینامیکی حرکت ربات استوارت-گو که

[1] Procedure
[2] Local minimum
[3] Pareto
[4] Sequential Algorithm
[5] Inspection Visualization
[6] Gosselin
[7] Dasgupta

مشهورترین مکانیزم موازی است از روش نیوتون اولر استفاده کرده‌است. برای اینکار وی معادلات حرکت همه شاخه‌ها و سکوی متحرک را با در نظر گرفتن نیروهای قیود بدست آورده که حجم این معادلات بالاست [۱۱۴]. فتاح نیز در [۱۱۵] برای بدست آوردن معادلات دینامیکی حرکت مکانیزم موازی با سه درجه آزادی مستقل از روش نیوتون اولر استفاده کرده‌است.

روش لاگرانژ که دینامیک سیستم را با استفاده از مفاهیم کار و انرژی توصیف می‌کند نیز در مدل‌سازی ربات‌های موازی به کار رفته است. از آنجا که نیروهای قیدی در این روش حذف شده و دیده نمی‌شوند، این روش از نقطه نظر محاسباتی کارآمدتر از روش نیوتون اولر می‌باشد. در [۱۱۶] از این روش برای مدل‌سازی یک مکانیزم موازی شش درجه آزادی استفاده شده و معادلات دینامیکی حرکت به فرم بسته بدست آمده است. آنها در این مدل‌سازی شاخه‌ها را به صورت جرم های نقطه ای در نظر گرفته‌اند. لبره[1] در [۱۱۷] نیز از روش لاگرانژ برای مدل‌سازی مکانیزم استوارت سود برده است. البته باید دقت داشت که در این روش بدلیل وجود حلقه‌های سینماتیکی متعدد بدست آوردن معادلات صریح حرکت بر حسب مختصات مستقل تعمیم یافته بسیار مشکل است.

از دیگر روش‌های مورد استفاده در مدل‌سازی دینامیکی ربات‌های موازی می‌توان از روش کار مجازی نام برد [۱۱۸]. در این روش با استفاده از شتاب‌های خطی و زاویه‌ای هر جسم، نیروها و گشتاورهای اینرسی محاسبه می‌شوند و نیازی به محاسبه نیروهای قیدی نیست. از دیگر روش‌های معمول برای بدست آوردن معادلات دینامیکی سیستم‌های با حلقه‌های سینماتیکی بسته استفاده از سیستم کاهش‌یافته[2] است [۱۱۹] و [۱۲۰]. این ایده اولین بار توسط ویتنبرگ[3] در مطالعه دینامیک مکانیزم‌های با حلقه‌های سینماتیکی بسته ارائه شد [۱۲۱]. در این روش ابتدا مکانیزم با حلقه بسته سینماتیکی به یک مکانیزم حلقه باز با ساختار درختی تبدیل می‌شود و فرض می‌شود که همه مفاصل تحریک نشده در ساختار درختی نیز محرک‌های مجازی می‌باشند. سپس همه گشتاورهای مفاصل مکانیزم با ساختار باز درختی بر مبنای همان حرکت دلخواه مکانیزم حلقه بسته محاسبه می‌شوند و در نهایت گشتاورهای مفاصل تحریک شده سیستم اصلی از گشتاورهای محاسبه شده برای سیستم حلقه باز با در نظر گرفتن قیود بدست می‌آید.

دینامیک سیستم درختی (کاهش‌یافته) که به صورت یک مکانیزم حلقه باز است به صورت گسترده ای توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۵]، [۱۲۲]. ناکامورا و قدوسی در [۱۲۰] از این ایده برای بدست آوردن معادلات دینامیکی ربات‌های موازی استفاده کرده‌اند. آنها با اعمال اصل دالامبر-لاگرانژ به سیستم و در نظر گرفتن تاثیر قیود توسط یک ماتریس ژاکوبین که زاویه مفاصل پسیو را به زاویه مفاصل تحریک شده مربوط می‌کند، دینامیک وارون مکانیزم‌های دارای حلقه بسته سینماتیکی را بدست آورده‌اند. چنگ[4] نیز در [۱۲۳] مسئله دینامیک ربات‌های موازی افزونه را مورد توجه قرار داده‌است. وی با اعمال اصل دالامبر-لاگرانژ و استفاده از سیستم کاهش‌یافته معادلات دینامیکی حرکت مکانیزم با حلقه‌های سینماتیکی بسته را بدست آورده است. در این تحقیق نیز چگونگی تاثیر قیود در معادلات دینامیکی سیستم با ماتریس‌های ژاکوبینی که سرعت‌های مفاصل را بر حسب مختصات تعمیم یافته بیان می‌کنند، توصیف می‌شود.

استفاده از کابل به جای بازوهای صلب معمول در ربات‌های موازی کابلی، علیرغم سادگی در طرح و هزینه، چالش‌های جدیدی را بویژه در حوزه دینامیک و کنترل پیش روی محققین قرار می‌دهد. علاوه بر این به دلیل ماهیت ذاتی کابل که فقط قادر به اعمال نیروهای کششی است، در طراحی دینامیکی این ربات‌ها باید چگونگی اعمال و توزیع نیروها را نیز به صورت مناسبی در نظر گرفت. علیرغم اینکه رفتار کابل‌ها از زمان‌های طولانی مورد مطالعه قرار گرفته است، کاربرد آن‌ها در ربات‌های موازی بجای بازوهای صلب با آنچه در مهندسی عمران مورد استفاده قرار گرفته است، متفاوت است. در کاربردهای مهندسی عمران معمولا کابل بسیار سنگین بوده و عملا تحلیل استاتیکی آن به منظور پایداری سازه مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۲۴]،[۱۲۵]. در حالی که در کاربردهای مبتنی بر ربات‌های موازی تغییر طول کابل به عنوان یک متغیر کنترلی مطرح بوده و کابل‌های مورد استفاده سبک می‌باشند. در مطالعاتی که تاکنون در این زمینه به منظور لحاظ کردن تغییر شکل کابل و بحث سینماتیک ربات‌های کابلی انجام پذیرفته، مدل‌های متفاوتی که اکثر آنها در [۱۲۶] جمع‌آوری گردیده‌اند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در بسیاری از ربات‌های کابلی از جرم کابل‌ها صرف نظر گردیده و کابل به عنوان یک المان صلب بدون جرم در نظر گرفته می‌شود [۱۲۷]، [۱۲۸] و [۱۲۹]. این فرض ساده‌کننده در کاربردهای با

[1] Lebret
[2] Reduced System
[3] Wittenburg
[4] Cheng

فضای کاری بزرگ شبیه تلسکوپ های غول آسا بدلیل عدم توصیف مناسب رفتار دینامیکی کابل نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و باید به نحوی با مسئله خمش و کشیدگی کابل رودررو شده و راهکارهای مناسبی برای برخورد با این مسئله ارائه داد. با فرض قابل ملاحظه بودن جرم کابل، خمش ناشی از کابل قابل توجه است پس باید از نقطه نظر استاتیکی کابل را به خوبی شناخت. کژک[1] با در نظر گرفتن جرم کابل، یک مدل استاتیکی از کابل بر مبنای یکی از مدل‌های پیشنهادی در [۱۳۰] بدست آورده است. وی نشان داده‌است که خمش کابل تاثیر زیادی در مسئله سینماتیک و سختی سیستم دارد. ژی[2] نیز با فرض سرعت پایین برای ربات به گونه‌ای که بتوان آن را با حالت ایستا تخمین زد، یک مدل ریاضی از کابل با در نظر گرفتن خمش پیشنهاد داده‌است و بر مبنای این مدل با در نظر گرفتن نیروهای اعمالی، جابه‌جایی استاتیکی کابل را بدست آورده است [۱۳۱].

وقتی که نیرویی بر نقطه انتهایی یک بازوی مکانیکی اعمال می‌شود این نقطه انتهایی با مقداری که بستگی به مقاومت بازو و نیروی اعمال شده دارد، تغییر شکل می‌دهد. سختی نقطه انتهایی بازو مقاومت بازوی مکانیکی و از همه مهم‌تر دقت موقعیتی در برابر بارها و نیروهای اعمالی را تعیین می‌کند. از آنجا که ربات‌های موازی کابلی با عنایت به ماهیت ساختاری کابل‌ها در معرض ارتعاشات قرار دارند، پس تعیین سختی سیستم می‌تواند به عنوان یک پارامتر مهم در طراحی، تحلیل و کنترل این ربات‌ها تلقی گردد. به همین دلیل یکی از چالش‌هایی که در ربات‌های کابلی با آن مواجهیم، سختی کم این ربات‌ها در مقایسه با همتایان صلب خود می‌باشد. سختی کم، صلبیت پایین را نتیجه داده و در نهایت به عدم دقت مکانی در سیستم منجر می‌شود.

در بسیاری از ربات‌های کابلی ریشه انعطاف، مدول الاستیک کابل می‌باشد که باید مدل گردد اما برای سیستم‌هایی که خمش کاملا قابل توجه است یک نوع دیگر از انعطاف که وابسته به انرژی جاذبه کابل‌هاست، نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. کژک نشان داده‌است که خمش ناشی از جرم کابل‌ها می‌تواند تاثیر بسیار زیادی بر سختی سیستم به ویژه در ربات‌های کابلی با مقیاس بزرگ بگذارد. وی برای نشان دادن این مطلب از معیار فرکانس طبیعی سیستم استفاده کرده‌است. با توجه به ارتباط مستقیمی که بین فرکانس‌های طبیعی و سختی سیستم وجود دارد وی برای دو سیستم نمونه نشان داده‌است که بزرگترین فرکانس طبیعی سیستم با در نظر گرفتن خمش در کابل‌ها به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می یابد [۱۳۰]. بهزادی پور نیز با معرفی یک مدل چهار فنره برای کابل، شرایط لازم و کافی برای پایداری ربات در یک موقعیت خاص را بر پایه مثبت معین بودن ماتریس سختی سیستم بدست آورده است [۱۳۲]،[۱۳۳].

همان گونه که تاکنون ملاحظه شد اکثر مدل‌هایی از کابل که مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، مدل‌های استاتیکی هستند که در تحلیل سینماتیکی و ماتریس سختی سیستم کاربرد دارند. از نقطه نظر دینامیکی برای مدل‌سازی کابل در مکانیزم‌های موازی کابلی مدل‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در اکثریت قریب به اتفاق این تحقیقات کابل‌ها به صورت المان‌های صلب بدون جرم در نظر گرفته شده‌اند [۱۲۷]، [۱۲۸]، [۱۲۹]. با این فرض ساده کننده دینامیک ربات به مشخصه‌های دینامیکی مجری نهایی وابسته خواهد بود. اما در کاربردهای با دقت و سرعت بالا دیگر نمی‌توان این فرض ساده کننده را به کار برد و باید از مدل‌های دقیق‌تری سود برد. نیهان[3] از روش کلوین–ویت[4] برای مدل‌سازی دینامیکی کابل استفاده کرده‌است [۱۳۴]. آگراوال[5] نیز برای مدل‌سازی ارتعاشات منتجه از انعطاف‌پذیری کابل با فرض اینکه کابل بدون جرم و طول آن ثابت است، نشان داده‌است که می‌توان از معادله موج برای مدل‌سازی کمک گرفت [۱۳۵]. فرض طول ثابت در کاربردهای مبتنی بر ربات‌های کابلی فرض درستی نیست. برای رفع این مشکل فرض بر این قرار گرفته که ابتدا حرکت‌های بزرگ مجری نهایی که مستلزم تغییرات بزرگ در طول کابل‌هاست، با در نظر گرفتن همان مدل سنتی ربات انجام گرفته است و مجری نهایی به محل مطلوب رسیده است اما به دلیل انعطاف‌پذیری کابل سیستم حول این نقطه ارتعاش دارد. حال برای تضعیف این ارتعاشات از مدل ذکر شده‌استفاده گردیده و کنترل مناسب بر این مبنا طراحی می‌گردد. ژنگ[6] نیز به مدل‌سازی و کنترل یک سیستم نقاله ساده دو کابله پرداخته و معادلات حرکت را برای این سیستم ساده با طول کابل متغیر بدست آورده است. معادلات بدست آمده بسیار حجیم و پیچیده بوده و عملا برای استفاده از آنها مجبور به ساده‌سازی هستیم [۱۳۶].

در اکثریت قریب به اتفاق مطالعاتی که در زمینه کنترل ربات‌های

[1] Kozak
[2] Zi
[3] Nahon
[4] Kelvin-Voigt
[5] Agrawal
[6] Zhang

کابلی صورت پذیرفته، برای سادگی و فرار از پیچیدگی‌های موجود از مدل ایده‌آل کابل (یک رشته صلب بدون جرم) استفاده شده‌است [۱۲۷]، [۱۲۸]، [۱۲۹]. استفاده از این مدل در کاربردهای با سرعت و دقت بالا، بدلیل در نظر نگرفتن انعطاف ذاتی کابل مناسب نبوده و راه به جایی نمی‌برد علاوه بر این استفاده از این مدل در فرآیند طراحی الگوریتم کنترلی ممکن است منجر به نتایج ناگوار در عملکرد حلقه بسته سیستم و حتی ناپایداری مکانیزم گردد. به همین دلیل باید در این کاربردها تاثیرات انعطاف کابل را به گونه‌ای لحاظ کرد. اتاویانو[1] و کاستلی[2] در [۱۳۷] و [۱۳۸] بر اساس نتایج شبیه‌سازی و عملی نشان داده‌اند در صورتی که جرم مجری نهایی خیلی بزرگتر از جرم کابل‌ها باشد می‌توان از جرم کابل‌ها صرف نظر کرد و دینامیک غالب کابل را فقط انعطاف طولی در امتداد کابل در نظر گرفت. دیائو[3] و ما[4] در [۱۳۹] با رویکرد استفاده از فرکانس‌های طبیعی ربات به همین نتیجه رسیده اند. آنها نشان داده‌اند که در ربات‌های کابلی مقید کامل ارتعاشات ربات که ناشی از نوسانات عرضی کابل‌هاست در مقایسه با تاثیر ارتعاشات طولی کابل‌ها ناچیز بوده و می‌توانند نادیده گرفته شوند. این مطالعات می‌تواند به این نتیجه منجر شود که در ربات‌های کابلی مقید کامل مدل فنر خطی در امتداد کابل بخوبی می‌تواند تاثیرات دینامیکی غالب کابل را در این کلاس از ربات‌ها توصیف کند. کاوامورا نیز با استفاده از مفهوم سختی به همین نتیجه رسیده است [۳۳]. با توجه به آنچه گفته شد، خسروی و تقی‌راد در [۱۴۰] با در نظرگرفتن مدل فنر با سختی ثابت برای توصیف تاثیرات دینامیکی غالب کابل، معادلات دینامیکی سیستم را با در نظرگرفتن انعطاف بدست آورده‌اند. این نحوه نمایش معادلات که رفتار دینامیکی غالب کابل را نیز در بر دارد از شکل مناسبی برای بهره بردن از نظریه‌های مختلف کنترلی برخوردار است. معادلات بدست آمده ربات موازی کابلی را به عنوان یک سیستم غیرخطی و کوپل‌شده نشان می‌دهند. با توجه به این معادلات برخلاف آنچه در ربات‌های معمول داریم، معادلات دینامیکی به صورت کوپل‌شده در هر دو فضای کاری کارتزین و فضای طولی کابل‌ها نوشته شده‌اند و توسط ماتریس ژاکوبین مکانیزم که ارتباط مستقیمی با تحلیل سینماتیکی ربات و فضای کاری آن دارد، به هم مربوط می‌شوند. این شکل نمایش شامل زیر سیستم‌های کند و تند و برهم کنش آن‌ها با یکدیگر است. به سادگی می‌توان نشان داد که مدل ربات کابلی با کابل‌های کشسان می‌تواند به مدل ربات کابلی با کابل‌های ایده‌آل کاهش یابد اگر سختی کابل‌ها به بی نهایت میل کند [۱۴۱]. این نوع نگرش در مدل‌سازی ربات‌های کابلی با درنظرگرفتن دینامیک‌های غالب این امکان را فراهم می‌سازد تا بتوان از نظریه انحرافات تکین در مدل‌سازی و کنترل این دسته از ربات‌ها استفاده کرد. در [۱۴۲] مدل فنر با سختی متغیر برای توصیف تاثیرات دینامیکی غالب کابل توسط همین نویسندگان مورد استفاده قرار گرفته و اصلاح لازم در دینامیک سیستم صورت پذیرفته است.

۷,۱- دینامیک ربات‌های کابلی با کابل‌های ایده‌آل

همان گونه که گفته شد، از آنجا که در کاربردهای عملی جرم کابل در قیاس با سایر قطعات مکانیکی به ویژه مجری نهایی ناچیز است در بسیاری از کاربردها می‌توان از جرم کابل چشم پوشی نموده و آن را شبیه به یک رشته صلب بدون جرم در نظر گرفت [۱۲۷]، [۱۲۸] و [۱۲۹]. با این فرض ساده‌کننده معادلات دینامیکی حاکم بر ربات را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۴۳]:

$$M(x)x + N(x,\dot{x}) = -J^T\boldsymbol{\tau}$$
$$N(x,\dot{x}) = C(x,\dot{x})\dot{x} + G(x) + F_d\dot{x} + F_s(x) + T_d \qquad (۶)$$

که در آن x بردار مختصات تعمیم یافته، $\boldsymbol{\tau}$ بردار نیروی کابل ها، F_d ماتریس ضرایب اصطکاک ویسکوز و F_s بردار اصطکاک کولمب می باشند. $M(x)$ ماتریس جرم، $C(x,\dot{x})$ ماتریس کوریولیس/سانتریفوژ و $G(x)$ بردار جاذبه می باشند که بسط آن ها در [۱۴۳] به تفضیل آمده است. J ماتریس *ژاکوبین* بوده و T_d بردار اغتشاش در سیستم می *باشد* که می تواند نمایانگر هر گونه نامعینی در دینامیک سیستم باشد. توجه به این نکته ضروری است که معادلات دینامیکی بالا در صورتی صادق هستند که ماتریس ژاکوبین J غیرتکین بوده و همه کابل ها تحت کشش باشند ($\boldsymbol{\tau} \geq 0$). از طرف دیگر دینامیک محرک ها را نیز می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$I_m\ddot{q} + D\dot{q} - r\tau = u \qquad (۷)$$

در این معادله r شعاع درام، I_m ماتریس لختی موتورها، D

[1] Ottaviano
[2] Castelli
[3] Diao
[4] Ma

ماتریس استهلاک و q زاویه شفت موتور است. با این فرض که وقتی ربات در موقعیت صفر قرار دارد، چرخش مثبت q مقدار تغییر طول ΔL را در کابل ها باعث خواهد شد، داریم:

$$rq = \Delta L = L - L_0 \Rightarrow q = r^{-1}(L - L_0) \qquad (۸)$$

با ترکیب معادلات بالا و توجه به این نکته که $\dot{L} = J\dot{x}$ خواهیم داشت:

$$M_{eq}(x)\ddot{x} + N_{eq}(x,\dot{x}) = J^T u \qquad (۹)$$

که در آن

$$M_{eq} = rM(x) + r^{-1}J^T I_m J$$
$$N_{eq} = rN(x,\dot{x}) + r^{-1}J^T I_m \dot{J}\dot{x} + r^{-1}J^T DJ\dot{x} \qquad (۱۰)$$

همان گونه که می بینیم دینامیک محرک ها با تبدیل ژاکوبین که یک نگاشت از فضای مفصلی به فضای کارتزین است، به فضای کارتزین منتقل شده اند.

۷,۲- مدل‌سازی ربات‌های کابلی با در نظرگرفتن انعطاف در کابل‌ها

در ربات‌های موازی کابلی هنگامی که انعطاف در کابل را نیز در نظر بگیریم، موقعیت محرک مستقیماً به موقعیت مجری نهایی مرتبط نیست. بنابراین در مدل‌سازی این ربات‌ها، باید هم موقعیت محرک و هم موقعیت مجری نهایی را به عنوان بردار حالت سیستم در نظرگرفت [۱۴۰]، [۱۴۴]، [۱۴۵]. در مدل‌سازی ربات کابلی می‌توان از مدل فنر طولی برای توصیف رفتار دینامیکی کابل سود برد. برای مدل‌سازی یک ربات موازی با n کابل فرض می کنیم که L_{1i}: $i = 1,2,\cdots,n$ نشان دهنده طول i امین کابل تحت کشش بوده و L_{2i}: $i = 1,2,\cdots,n$ نشان دهنده طول i امین کابل بدون کشش باشد. اگر سیستم کاملا صلب باشد خواهیم داشت: $L_{1i} = L_{2i}$. با اعمال نماد برداری :

$$L = (L_{11}, L_{12}, \cdots, L_{1n}, L_{21}, L_{22}, \cdots, L_{2n})^{\mathrm{T}} = (L_1^T, L_2^T)^{\mathrm{T}} \qquad (۶)$$

انرژی جنبشی سیستم عبارت است از:

$$K = \frac{1}{2}\dot{x}^T M(x)\dot{x} + \frac{1}{2}\dot{q}^T I_m \dot{q} \qquad (۷)$$

که در آن: x بردار مختصات تعمیم یافته در فضای کارتزین (که رابطه سینماتیکی با L_1 دارد)، q زاویه شفت موتور (متناسب با L_2)، $M(x)$ ماتریس جرم ربات صلب و I_m ماتریس اینرسی موتورها می باشد. مجموع انرژی پتانسیل سیستم را نیز می توان به این صورت نوشت:

$$P = P_0 + P_1 \qquad (۸)$$

در این معادله P_0 انرژی پتانسیل ربات صلب بوده و ترم دوم با فرض مدل فنر خطی برای کابل عبارت است از:

$$P_1 = \frac{1}{2}(L_1 - L_2)^T K (L_1 - L_2) \qquad (۹)$$

که K ماتریس سختی کابل ها می باشد. با تشکیل لاگرانژین سیستم به صورت:

$$\mathcal{L} = K - P = \frac{1}{2}\dot{x}^T M(x)\dot{x} + \frac{1}{2}\dot{q}^T I_m \dot{q} - P_0 - \frac{1}{2}(L_1 - L_2)^T K (L_1 - L_2) \qquad (۱۰)$$

و اعمال معادله لاگرانژ به فرم

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{y}_i}\right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial y_i} = Q_i \qquad (۱۱)$$

می توان معادلات دینامیکی کامل سیستم را پس از پاره ای محاسبات و ساده سازی معادلات بدست آورد [۱۴۰]، [۱۴۵]:

$$M(x)\ddot{x} + N(x,\dot{x}) = J^T K(L_2 - L_1)$$
$$I_m\ddot{q} + rK(L_2 - L_1) + D\dot{q} = u \qquad (۱۲)$$

در این معادله رابطه $\dot{L}_1 = J\dot{x}$ که J ماتریس ژاکوبین است، بین فضای مفصلی و کارتزین برقرار است و داریم:

$$N(x,\dot{x}) = C(x,\dot{x})\dot{x} + G(x)$$
$$L_2 - L_0 = rq \qquad (۱۳)$$

در این معادلات x بردار شش بعدی موقعیت، q بردار زاویه ای محرک ها و K ماتریس قطری سختی کابل هاست. بقیه پارامترها نیز شبیه به قبل تعریف می شوند. وجود ترم سختی فنر K که ارتباط دهنده معادلات بوده و مقدار بزرگی را نیز دارا می باشد، ما را قادر می سازد تا این معادلات را به فرم تئوری انحرافات تکین بیان نماییم. با فرض اینکه همه ثابت فنرها دارای یک مقدار باشند (این فرض از عمومیت مسئله نمی کاهد زیرا با مقیاس کردن z می توان به این نتیجه رسید)، می توان نیروی الاستیک در کابل ها را بدین صورت نوشت:

$$z = k(L_1 - L_2) \quad , \quad K = kI \qquad (۱۴)$$

با این فرض می توان نوشت:

$$\ddot{x} = -M^{-1}(x)N(x,\dot{x}) - M^{-1}(x)J^T(x)\,z \qquad (۱۵)$$

از آنجا که نظریه انحرافات تکین معمولا برای ترم های کوچک بیان می‌شود تا ترم های بزرگ، ε را به صورت $\varepsilon = \frac{1}{k}$ تعریف می کنیم بنابر این $\varepsilon \to 0$ وقتی $k \to \infty$ ، از طرف دیگر می دانیم که: $\dot{L}_1 = J\dot{x}$, $rq = L_2 - L_0$ بنابراین

$$\begin{aligned} \dot{q} &= r^{-1}\dot{L}_2 = -r^{-1}(\varepsilon\dot{z} - J\dot{x}) \\ \ddot{q} &= -r^{-1}\left(\varepsilon\ddot{z} - J\ddot{x} - \dot{J}\dot{x}\right) \end{aligned} \qquad (۱۶)$$

با جایگذاری این روابط در معادله دینامیکی مربوط به محرک‌ها و پاره‌ای محاسبات خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \varepsilon\ddot{z} = -JM^{-1}N + \dot{J}\dot{x} - \varepsilon I_m^{-1}D\dot{z} + I_m^{-1}DJ\dot{x} \\ - (r^2 I_m^{-1} + JM^{-1}J^T)z \\ - rI_m^{-1}u \end{aligned} \qquad (۱۷)$$

بدین ترتیب معادلات کلی سیستم که به فرم استاندارد نظریه انحرافات استثنایی درآمده اند را می توان به صورت زیر خلاصه کرد [۱۴۱]:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= a_1(x,\dot{x}) + A_1(x)z \\ \varepsilon\dot{z} &= a_2(x,\dot{x},\varepsilon\dot{z}) + A_2(x)z + B_2u \end{aligned} \qquad (۱۸)$$

که در آن

$$\begin{aligned} a_1(x,\dot{x}) &= -M^{-1}(x)N(x,\dot{x}) \\ A_1(x) &= -M^{-1}(x)J^T(x) \\ a_2(x,\dot{x},\varepsilon\dot{z}) &= -JM^{-1}N + \dot{J}\dot{x} - \varepsilon I_m^{-1}D\dot{z} \\ &\quad + I_m^{-1}DJ\dot{x} \\ A_2(x) &= -(r^2 I_m^{-1} + JM^{-1}J^T) \\ B_2 &= -rI_m^{-1} \end{aligned} \qquad (۱۹)$$

۸- کنترل ربات‌های موازی کابلی

از اوایل دهه هفتاد که مهندسین کنترل وارد عرصه کنترل حلقه بسته ربات‌ها شدند، روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی برای کنترل ربات‌ها پیشنهاد شده‌اند به طوری که هم اکنون می‌توان گفت مسئله کنترل ربات‌های سری به خوبی فهمیده شده‌است. از جمله این روش‌های کنترلی می‌توان به کنترل PID، روش‌های غیرخطی نظیر گشتاور محاسبه شده، مقاوم، تطبیقی و روش‌های هوشمند اشاره کرد[۳۵]، [۳۶]. کنترل سیستم‌های با حلقه‌های بسته سینماتیکی به دلیل پیچیده بودن معادلات دینامیکی و وجود قیود سینماتیکی در متغیرهای مفصلی از دیرباز مورد توجه محققین قرار گرفته است. بسیاری از روش‌های کنترلی که برای ربات‌های سری پیشنهاد شده‌اند برای استفاده در این ربات‌ها تطبیق داده شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به کنترل خطی، ساده و غیر متمرکز PID که عملی ترین روش کنترلی در ربات‌های سری است، اشاره کرد [۱۲۳]. روش گشتاور محاسبه شده یا کنترل دینامیک وارون نیز از جمله روش‌های غیر خطی است که در کنترل این ربات‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲۳]، [۱۴۶].

بدلیل ویژگی یکتای کابل که فقط می‌تواند نیروی کششی اعمال کند، بسیاری از الگوریتم‌های کنترلی که تاکنون برای ربات‌های معمول پیشنهاد شده‌اند، نمی‌توانند بدون تغییر در کنترل این ربات‌ها مورد استفاده قرار گیرند. در همه الگوریتم‌های کنترلی سابق، محرک‌ها می‌توانند در هر دو جهت مثبت و منفی اعمال تحریک کنند اما در این ربات‌ها محرک‌ها فقط باید در یک جهت عمل کنند به همین دلیل از نقطه نظر کنترلی، افزونگی در این ربات‌ها یک نیاز اساسی است تا سیستم بتواند نقص اعمال یک جهته تحریک را به نحوی جبران کند. علاوه بر این الگوریتم کنترلی باید به گونه‌ای طراحی شود که فرض کششی بودن نیروی کابل‌ها را در تمام مانورهای حرکتی ارضا کند.

۸,۱- اندازه‌گیری موقعیت و جهت‌گیری مجری نهایی در ربات‌های کابلی

اولین مرحله در طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم حلقه بسته کنترل، اندازه‌گیری صحیح و دقیق هدف کنترلی است. بدون یک اندازه‌گیری درست حتی پیشرفته‌ترین کنترل‌کننده‌ها نیز از کنترل دقیق باز خواهند ماند. اندازه‌گیری موقعیت و جهت‌گیری ربات‌های موازی کابلی در حالت کلی می‌تواند به دو صورت مستقیم و غیر مستقیم انجام گردد. در روش غیر مستقیم طول هر کدام از کابل‌ها توسط انکودرهای متصل شده به شفت موتورها اندازه‌گیری شده و سپس با حل مسئله سینماتیک مستقیم مکان مجری نهایی ربات بدست می‌آید. از این روش در [۱۴۳]، [۱۴۷] به عنوان روش اندازه‌گیری استفاده شده است. از مزایای این روش پیاده‌سازی آسان آن با هزینه‌ای اندک است. اما در کاربردهایی از ربات‌های کابلی که به دقت و سرعت بالایی نیاز است طول کابل اندازه‌گیری شده در این روش به علت کشسانی ذاتی کابل قابل اطمینان نیست. علاوه بر این حل مسئله سینماتیک مستقیم به علت پیچیدگی و دارابودن جواب‌های متعدد، دقت و سرعت اندازه‌گیری را محدود خواهد کرد.

به منظور کاهش تاثیر کشسانی کابل‌ها بر اندازه‌گیری می‌توان از

مبدل‌های موقعیت کابلی[1] استفاده کرد [۱۴۸]. در این صورت کابل غیرفعال خروجی از این مبدل‌ها به موازات هر کابل قرار گرفته و به علت این که تحت بارگذاری نیست طول دقیق هر کابل را بدست خواهد داد. اما باید دقت داشت که دقت در این مبدل‌ها بر حسب درصدی از کل بازه اندازه‌گیری بیان شده و با افزایش بازه اندازه‌گیری دقت مبدل کاهش می‌یابد. علاوه بر این با توجه به این که اندازه‌گیری با این روش یک روش تماسی محسوب می‌شود ممکن است بر حرکت مجری نهایی تاثیر داشته باشد. از دیگر معایب این مبدل‌ها قیمت بالای این تجهیزات اندازه‌گیری است. علاوه بر این مسئله سینماتیک مستقیم و پیچیدگی‌های مربوط به آن همچنان به قوت خود باقی است. با عنایت به این دلایل بهتر است که موقعیت و جهت‌گیری مجری نهایی ربات در کاربردهای دقیق و سرعت بالا با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری مستقیم انجام شود. اما باید توجه داشت که اندازه‌گیری مستقیم در مقایسه با روش‌های اندازه‌گیری غیرمستقیم پیچیده‌تر بوده و به تجهیزات پیشرفته و سنسورهای گران‌قیمتی مانند مسافت‌سنج‌های لیزری یا ترکیبی از جی‌پی‌اس‌ها، شتاب‌سنج‌ها و ژیروسکوپ‌ها و یا چند دوربین با وضوح و سرعت نمونه‌برداری بالا نیاز دارد. به همین دلیل تحقیقات کمی در حوزه پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های فضای کاری که از اندازه‌گیری‌های مستقیم سود می‌برند، انجام شده است. در [۱۳۱]، [۱۴۹]، [۱۵۰] از مسافت‌سنج‌های لیزری برای اندازه‌گیری مستقیم مکان ربات کابل ۶ درجه آزادی استفاده شده است. در [۱۵۱] موقعیت مجری نهایی به صورت مستقیم با استفاده از GPS های تفاضلی و جهت‌گیری مجری نهایی به کمک ژیروسکوپ‌های متصل به مجری نهایی اندازه‌گیری شده است. در [۱۵۲]، [۱۵۳] و[۱۵۴] از دوربین و روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری دیداری برای اندازه‌گیری مستقیم مکان ربات‌های کابلی استفاده شده است. روش‌های دیداری از جمله روش‌های اندازه‌گیری غیرتماسی هستند که قابلیت استفاده در ربات‌های کابلی با فضاهای کاری بزرگ را نیز دارا می‌باشند. با استفاده از این روش می‌توان مکان مجری نهایی ربات را با دقت بالا و به صورت مستقیم اندازه‌گیری کرد. این کار معمولا با نصب یک نشانه بر روی مجری نهایی و ردیابی ویژگی‌های مربوط به آن انجام می‌شود.

[1] Cable Position Transducer

۸,۲- کنترل کلاسیک ربات‌های موازی کابلی با کابل‌های ایده‌آل

در مقایسه با حجم زیاد پژوهش‌های انجام شده که در زمینه کنترل ربات‌های سری و موازی معمول به انجام رسیده، متاسفانه تعداد محدودی به بحث کنترل ربات‌های کابلی پرداخته‌اند که در بسیاری از آن‌ها الگوریتم‌های کنترلی که برای ربات‌های سری و موازی توسعه داده شده‌اند برای استفاده در ربات‌های موازی کابلی تطبیق داده شده‌اند. البته باید توجه داشت در این ربات‌ها تنها طراحی کنترل‌کننده کافی نیست و باید به گونه‌ای مسئله حل افزونگی که به نحوی با توزیع نیروها در کابل‌ها در ارتباط است، مد نظر قرار گیرد. از جمله این روش ها می توان به روش های مبتنی بر قضیه لیاپانوف [۳۳]، [۱۵۵]، گشتاور محاسبه شده [۱۲۸]، [۱۵۶]، کنترل PID [۱۴۳] و روش سطوح لغزشی [۱۵۷] اشاره کرد.

الگوریتم‌های کنترل موقعیت ربات‌های کابلی را می‌توان بر مبنای معیارهای متفاوتی دسته‌بندی کرد. یکی از این معیارها، دستگاه مختصاتی است که کنترل‌کننده در آن طراحی می‌شود. بر مبنای این معیار، الگوریتم‌های کنترلی را می‌توان به دو دسته کنترل در فضای کابل و کنترل ربات در فضای کاری تقسیم‌بندی کرد. در فضای طول کابل ابتدا مسیرهای مطلوب که در فضای کاری طراحی می‌شوند با استفاده از سینماتیک وارون ربات به فضای طولی کابل نگاشته می‌شوند و سپس از کنترل‌کننده‌های غیرمتمرکز به منظور کنترل طول هر کدام از بازوهای کابلی استفاده می‌شود. در این دسته برای پرهیز از حل مسئله سینماتیک مستقیم که بسیار پیچیده است و یا عدم استفاده از سنسورهای شش بعدی موقعیت که بسیار گران قیمت هستند، طراحی کنترل‌کننده در فضای طول کابل‌ها انجام می‌پذیرد. بدین معنی که طول هر کدام از کابل‌ها به راحتی توسط انکودرهای متصل به شفت موتورها اندازه‌گیری شده و به عنوان فیدبک در ساختار کنترل‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۳]، [۱۲۷]. اما همان گونه که گفته شد در کاربردهایی که به سرعت و دقت بالایی نیاز است استفاده از فیدبک طول کابل در ساختار کنترل‌کننده قابل اطمینان نیست. علاوه بر این نامعینی‌های موجود در سینماتیک ربات بر نگاشت صحیح مسیرهای زمانی به فضای طول کابل تاثیر منفی گذاشته و عملکرد کلی سیستم را تحت‌الشعاع قرار خواهد داد. با عنایت به این مسائل می‌توان گفت که با وجود ساختار

ساده، کم هزینه و عملی کنترل‌کننده در فضای طول کابل، کنترل ربات‌های کابلی در این فضا چندان قابل اطمینان نیست و بهتر است به منظور بهبود عملکرد کنترل‌کننده در ردیابی مسیر مطلوب تعریف شده در فضای کاری، خطای مکانی ربات به صورت مستقیم و بدون بهره بردن از تبدیلات سینماتیکی مورد استفاده قرار گیرد.

در دسته دیگر طراحی کنترل‌کننده در فضای کاری کارتزین صورت پذیرفته [۳۳]، [۱۲۸]، [۱۳۱]، [۱۴۷] و سپس با حل مسئله افزونگی توزیع نیروها در کابل‌ها بدست می‌آید. در این فضا می‌توان کنترل‌کننده را به دو صورت طراحی کرد. در روش اول درست است که کنترل‌کننده با توجه به خطای مکانی مجری نهایی طراحی می‌شود، اما به منظور پرهیز از اندازه‌گیری مستقیم موقعیت و جهت‌گیری مجری نهایی، تغییر طول کابل به وسیله انکودرهای اندازه‌گیری شده و با حل سینماتیک مستقیم برای ربات، موقعیت و جهت‌گیری ربات تخمین زده می‌شود. اما همان گونه که گفته شد اندازه‌گیری طول کابل به دلیل نامعینی‌های سینماتیکی و دینامیکی، قابل اطمینان نبوده ضمن اینکه حل بهنگام مسئله سینماتیک مستقیم ربات در حلقه فیدبک به علت پیچیدگی و وجود جواب‌های متعدد علاوه بر کاهش دقت اندازه‌گیری پهنای باند حلقه کنترل را نیز محدود خواهد کرد. در روش دوم مکان مجری نهایی ربات به صورت مستقیم اندازه‌گیری شده و به صورت مستقیم در حلقه فیدبک کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳۱]، [۱۵۱]. اما همان طور که گفته شد اندازه‌گیری مستقیم موقعیت و جهت‌گیری مجری نهایی در مقایسه با اندازه‌گیری طول کابل پیچیده‌تر و چالش‌برانگیزتر بوده و به تجهیزات پیشرفته و گرانقیمتی نیاز دارد [۱۳۱]، [۱۵۱]، [۱۵۸].

یکی دیگر از معیارهای دسته‌بندی الگوریتم‌های کنترل موقعیت ربات‌های کابلی روش طراحی الگوریتم است. مطابق این معیار کنترل‌کننده‌ها را می‌توان به دو دسته کنترل‌کننده‌های کلاسیک و کنترل‌کننده‌های غیرخطی دسته‌بندی کرد. کنترل‌کننده‌های کلاسیک مانند کنترل‌کننده‌های PID ساختاری ساده داشته و به مدل دقیق دینامیکی ربات نیازی ندارند [۱۴۳]. علاوه بر این به سادگی قابل پیاده‌سازی بوده و هزینه‌های سنگیم محاسباتی در بر ندارند. اما لحاظ نکردن تاثیرات دینامیکی ربات در ساختار کنترل‌کننده عملکرد آن را در ردیابی مسیرهای مطلوب زمانی محدود خواهد کرد. کنترل‌کننده‌های غیرخطی مانند کنترل‌کننده‌های دینامیک وارون [۱۴۷]، [۱۵۶]، کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روش لیاپانوف [۱۴۲] و یا کنترل‌کننده‌های مد لغزشی [۱۵۷] می‌توانند با بهره بردن از دینامیک ربات عملکرد ردیابی کنترل‌کننده را در تعقیب مسیرهای زمانی بهبود بخشند. اما باید توجه داشت که برای پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها به مدل سینماتیکی و دینامیکی دقیقی از ربات نیاز است که در اکثر موارد این چنین مدل‌هایی در دسترس نیست. وجود این مشکل عملکرد کنترل‌کننده‌های غیرخطی مبتنی بر مدل را در ردیابی مسیرهای زمانی دلخواه محدود خواهد کرد. همان گونه که گفته شد کابل‌ها باید در حین اجرای مانورهای حرکتی توسط ربات تحت کشش باقی بمانند. به همین دلیل در ربات‌های موازی کابلی مقید کامل از مفهوم نیروهای داخلی برای اطمینان از تحت کشش ماندن کابل‌ها در تمام فضای کاری ربات استفاده می‌شود [۱۴۳]. این نیروها فضای پوچی ماتریس ژاکوبین ربا را اسپن می‌کنند. این بدان معنی است که این نیروها در حالت ایده‌آل هیچ تاثیری در حرکت مجری نهایی ربات ندارند.

با این مقدمه و با در نظرگرفتن مدل ایده‌آل برای کابل، کاوامورا و دیگران در [۳۳] از الگوریتم کنترلی PD به همراه جبران سازی جاذبه برای کنترل ربات کابلی در فضای کابل استفاده کرده اند. در این الگوریتم برای اینکه کابل ها همیشه در حالت کشش باقی بمانند از بردار نیروی داخلی استفاده شده است. این بردار که به منظور اطمینان از تحت کشش بودن کابل ها به خروجی کنترلر اضافه می شود، تاثیری در حرکت مجری نهایی نداشته و در فضای پوچی ماتریس ژاکوبین مکانیزم قرار دارد. آلپ و آگراوال در [۱۲۸] از روش خطی سازی با فیدبک برای طراحی کنترلر سود می برند. در این روش ابتدا با استفاده از دینامیک مکانیزم، سیستم خطی شده و سپس از یک کنترلر خطی برای دستیابی به مشخصات مطلوب استفاده می شود. این روش کنترلی در فضای کاری کارتزین شکل می گیرد و با توجه به وابسته بودن آن به مدل سیستم در مقابل خطاهای مدل سازی و تغییر پارامترهای سیستم مقاوم نیست. در [۱۳۴] از ایده کنترل سری برای کنترل LAR که یک ربات کابلی با فضای کاری بزرگ است، استفاده شده است. در این ایده از دو حلقه کنترلی داخلی و خارجی استفاده شده است. در [۱۵۷] نیز از کنترل مد لغزشی برای کنترل یک ربات کابلی صفحه‌ای استفاده شده است. روش‌های کنترل تطبیقی نیز در کنترل این ربات‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۵۲]، [۳۳]. در [۱۵۲] برای کنترل یک ربات کابلی با درجات آزادی انتقالی x و y از یک کنترل‌کننده PD به علاوه یک ترم

اصلاحی تطبیقی به منظور شناسایی مقادیر پارامترهای سینماتیکی و قوام بخشیدن هر چه بیشتر به سیستم کنترلی در مقابل نامعینی‌ها استفاده شده است. علاوه بر این در این تحقیق نشان داده شده است که با اندازه‌گیری همزمان طول کابل‌ها و مکان مجری نهایی می‌توان نیروهای داخلی را بر حسب یک ماتریس رگرسور و یک بردار شامل پارامترهای سینماتیکی نوشت. باباقصابها و دیگران نیز در [۱۵۹] به منظور برطرف کردن مشکلات ناشی از وجود نامعینی‌های پارامتری، الگوریتم کنترلی تطبیقی را در فضای کاری پیشنهاد داده‌اند که در این الگوریتم پارامترهای سینماتیکی و تطبیقی به صورت همزمان تطبیق داده می‌شوند. همین نویسندگان در [۱۶۰] به منظور افزایش قوام کنترل‌کننده پیشنهادی تطبیقی در مقابل اغتشاشات خارجی و نامعینی‌های ساختاریافته مدل سینماتیکی و دینامیکی ربات به طراحی کنترل‌کننده مقاوم تطبیقی پرداخته و با اعمال این الگوریتم به ربات موازی کابلی نصیر به بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی در عمل پرداخته‌اند.

اما در این روشهای کنترلی، ساختار روش کنترلی پیچیده بوده و در اکثر این روش ها تحلیل پایداری مقاوم سیستم حلقه بسته در مقابل نامعینی های ساختاریافته و غیر ساختار یافته انجام نشده است. بنابر این پیاده سازی این روش ها با عنایت به دسترس نبودن اطلاعات کامل از دینامیک سیستم و پیچیدگی ساختار کنترلی غیر عملی است. با عنایت به این محدودیت ها و با توجه به محبوبیت کنترل ساده PID در صنعت واکثریت قریب به اتفاق کاربردهای عملی رباتیک، در [۱۴۳] چهار چوب نظری لازم برای استفاده از این کنترلر در ربات های موازی کابلی تبیین گردیده و پایداری مقاوم آن در مقابل نامعینی های ساختاریافته و غیر ساختار یافته بررسی می گردد. در این تحقیق برای اطمینان از تحت کشش بودن کابل ها در تمامی فضای کاری مفهوم نیروی داخلی که فضای پوچی ماتریس ژاکوبین مکانیزم را پوشش می دهد، معرفی شده و در ساختار کنترلی پیشنهادی مورد استفاده قرار می گیرد. ضمن اینکه در تحلیل پایداری سیستم حلقه بسته فرض بر این قرار می گیرد که همه پارامترهای دینامیکی و ژاکوبین مکانیزم نامعین بوده و تنها کران آن ها در دسترس می باشد.

۸,۳- کنترل ربات‌های موازی کابلی با کابل‌های انعطاف پذیر

برای کاربردهایی که دقت و سرعت بالایی مورد نیاز است، باید مدل دقیقی از کابل که تاثیر انعطاف‌پذیری کابل را در خود لحاظ کند، مورد استفاده قرار داد و سیستم کنترلی را با توجه به آن طراحی نمود. در غیر این صورت ارتعاشات نتیجه شده از کابل دقت مکانی سیستم را تحت تاثیر قرار خواهد داد. ضمنا این نکته را باید مورد توجه قرار داد که مدل‌سازی دقیق دینامیکی کابل‌ها در مکانیزم‌های موازی کابلی، بسیار پیچیده است. علاوه براین از آنجا که مدل بدست آمده در طراحی الگوریتم کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد، باید حتی الامکان با ساده‌سازی آن را به یک شکل مناسب برای اعمال الگوریتم‌های مختلف کنترلی تبدیل کرد. به همین دلیل در عمل فقط دینامیک‌های غالب کابل در مدل‌سازی نهایی مورد توجه قرار می‌گیرند. همان گونه که در بخش قبل نشان داده‌شد، در ربات‌های مقید کامل مدل فنر طولی در امتداد کابل می‌تواند به خوبی بیانگر تاثیرات غالب دینامیکی کابل در تحلیل دینامیکی سیستم باشد.

وارد کردن ویژگی‌های دینامیکی کابل در مدل‌سازی ربات‌های کابلی منجر به پیچیده‌تر شدن الگوریتم‌های کنترلی شده و مطالعات در این زمینه بسیار محدود و هنوز در مراحل ابتدایی است. از آنجا که توانایی ربات‌های کابلی در برآوردن دقت‌ها و سرعت‌های مورد نظر حرکتی و نیز ارتعاشات حرکتی ربات وابستگی مستقیمی به الگوریتم کنترلی پیشنهادی برای این دسته از ربات‌ها دارد، بنابراین مطالعه عمیق کنترل ربات‌های کابلی و تحلیل پایداری آنها با توجه به انعطاف‌پذیری ذاتی کابل‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و باید به نحوی این مفاهیم را در طراحی الگوریتم کنترلی در نظر گرفت.

میونیر و همکاران در [۱۳۴] از طرح کنترلی دوحلقه‌ای برای کنترل ربات کابلی LAR استفاده کرده‌اند. در این طرح حلقه داخلی که از تکنیک زمان بندی بهره[1] برای تطبیق طول کابل با کنترل H_∞ بهره می‌برد با مدل در نظرگرفته شده برای کابل تعامل دارد. ضمن اینکه حلقه خارجی که حلقه کنترل موقعیت است از الگوریتم کنترلی گشتاور محاسبه شده با یک کنترل‌کننده PID بهره می‌برد. متاسفانه در این تحقیق توجهی به پایداری سیستم حلقه بسته نگردیده و تحلیل پایداری مکانیزم با الگوریتم کنترلی پیشنهادی مغفول مانده است. در [۱۳۷] از مدل فنر طولی بدون جرم در امتداد کابل به عنوان مدل کابل استفاده شده و بر مبنای این مدل یک الگوریتم کنترلی برای کنترل ربات موازی کابلی پیشنهاد شده است. این الگوریتم کنترلی که در فضای طول کابل شکل گرفته

[1] Gain Schedualing

از مفهوم نیروهای داخلی به منظور تحت کشش نگه داشتن کابل‌ها و یک ترم اصلاحی به منظور تضعیف ارتعاشات کابل‌ها سود می‌برد. همچنین در این تحقیق آنالیز پایداری سیستم حلقه بسته از طریق روش دوم لیاپانوف مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله از شبیه‌سازی ارائه شده است. اما همان گونه که گفته شد با وجود ساختار ساده، کم‌هزینه و عملی کنترل‌کننده‌های طراحی شده در فضای طول کابل، کنترل در این فضا بدلیل نامعینی‌های سینماتیکی و خصوصیات ذاتی کابل از جمله کشسانی موجود چندان قابل اطمینان نبوده و عملکرد ربات را در تعقیب مناسب مسیرهای زمانی مطلوب محدود خواهد کرد.

به منظور برطرف کردن این مشکل، خسروی و تقی‌راد در [۱۶۱] با استفاده از مدل فنر طولی بدون جرم در امتداد کابل به عنوان رفتار دینامیکی غالب کابل، از یک الگوریتم کنترلی ترکیبی که در فضای کاری طراحی شده و از یک ترم اصلاحی میرایی در فضای طول کابل سود می‌برد، استفاده کرده‌اند. این الگوریتم کنترلی ترکیبی که با سود بردن از نظریه تئوری انحرافات تکین طراحی شده شامل یک کنترل‌کننده مقاوم PID، ترم نیروهای داخلی و یک ترم اصلاحی برای میرا نمودن ارتعاشات کابل‌هاست. در این تحقیق با بکارگیری تئوری انحرافات تکین، مدل ربات به دو زیر سیستم کند و تند تجزیه شده و در آنالیز پایداری سیستم کامل حلقه بسته مورد استفاده قرار گرفته است. همان طور که گفته شد اگر چه کنترل‌کننده PID برای طراحی ساختاری ساده داشته و به مدل دقیق دینامیکی ربات نیازی ندارد اما لحاظ نکردن تاثیرات دینامیکی ربات در ساختار کنترل‌کننده عملکرد آن را در ردیابی مسیرهای زمانی مطلوب تحت‌الشعاع قرار خواهد داد. برای رفع این مشکل و به منظور بهبود عملکرد ربات در تعقیب مسیرهای زمانی مطلوب در [۱۴۲] نیز همانند [۱۶۱] از یک الگوریتم کنترلی ترکیبی استفاده شده است با این تفاوت که در این تحقیق دینامیک ربات در ساختار الگوریتم پیشنهادی کنترل بکار گرفته شده است. آنالیز پایداری سیستم نیز با استفاده از نظریه انحرافات تکین صورت گرفته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی بر روی یک مدل ۶ درجه آزادی با ۸ کابل موید این نکته است که این الگوریتم پیشنهادی قادر به ردیابی مطلوب مسیرهای زمانی حتی با درنظر گرفتن کشسانی کابل‌هاست.

۹- نتیجه گیری

ربات‌های موازی کابلی به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان از جمله فضای کاری بزرگ، نسبت بار به وزن ربات بالا و دارابودن سرعت و شتاب‌های بالا از حدود سه دهه پیش مورد توجه قرار گرفته و کاربردهای متعددی پیدا کرده‌اند. نگرش اساسی در این گونه ربات‌ها استفاده از کابل به جای بازوهای صلب معمول در ربات‌های موازی است. استفاده از کابل به جای بازوهای صلب، پیچیدگی ساختار مکانیکی و هزینه‌های زیاد ساخت را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد، اما چالش‌های جدیدی را نیز پیش روی محققین پدیدار می‌سازد. از آنجا که کابل‌ها تنها قادر به اعمال نیروی کششی بوده و توانایی اعمال نیروی فشاری و یا گشتاور نیستند پس نمی‌توان مستقیما و بدون هیچ تغییری از مکانیزم‌های موازی معمول استفاده کرد و باید این نقص اعمال تحریک یک‌طرفه نیرو را بگونه‌ای جبران نمود.

تحلیل فضای کاری ربات یکی از مهمترین بخش‌ها در فرایند طراحی ربات است و وجود یک روش مناسب برای تعیین فضای کاری ربات می‌تواند طراح را در جهت بهینه کردن این فضا با توجه به مشخصات عملکردی مطلوب یاری کند. در حوزه ربات‌های کابلی بدلیل قید کششی بودن کابل‌ها تحلیل فضای کاری بسیار پیچیده‌تر از ربات‌های متداول سری و موازی است و بر این مبنا و با این قید، تعریف و تحلیل فضای کاری و تکینگی‌های آن متفاوت با روش‌های معمول بوده و نیاز به تعریف دقیق و متفاوت فضای کاری و تکنیک‌های مختلف جهت تحلیل آن بیش از پیش احساس می‌شود. معیارهای کمی و کیفی که در مقایسه و بهینه‌سازی فضای کاری ربات مورد استفاده قرار می‌گیرند نیز از سایر مسایل مهمی هستند که در چند سال اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند.

دینامیک مکانیزم‌های با حلقه‌های سینماتیکی بسته از جمله ربات‌های موازی کابلی از دیگر مسایل چالش برانگیزی است که توجه زیادی را به خود جلب نموده است. دینامیک این سیستم‌ها بسیار پیچیده‌تر از سیستم‌های سری می‌باشد. اصلی‌ترین چالش در این مکانیزم‌ها وابستگی متغیرهای مفصلی به یکدیگر می‌باشند. این وابستگی با قیود سینماتیکی که می‌توانند بسیار پیچیده باشند، بیان می‌شود. در اغلب اوقات انتخاب و شناسایی یک مجموعه مستقل و ناوابسته از متغیرهای موقعیت بسیار مشکل و غیرکاربردی است. در ربات‌های کابلی شرایط از این نیز بغرنج‌تر است زیرا کابل یک المان منعطف بوده و انعطاف ذاتی کابل‌ها تاثیرات اساسی در همه موضوعات مربوط به مدل‌سازی، سینماتیک، طراحی بهینه، کنترل و دقت ربات به جای می‌گذارد و باید به گونه‌ای با این موضوع برخورد کرد. با توجه به پیچیدگی موضوع متاسفانه پژوهش‌های

مربوط به تاثیرات ویژگی‌های ذاتی کابل در موضوعات مختلف طراحی این دسته از ربات‌ها نظیر فضای کاری، دینامیک و ... اندک می‌باشد.

در حوزه کنترل ربات‌های موازی کابلی نیز شرایط با آنچه در ربات‌های سری و موازی است، متفاوت است. بدلیل ویژگی کابل که فقط می‌تواند نیروی کششی اعمال کند، بسیاری از الگوریتم‌های کنترلی که تاکنون برای ربات‌های سری و موازی پیشنهاد شده‌اند، نمی‌توانند بدون تغییر در کنترل این دسته از ربات‌ها مورد استفاده قرار گیرند. در همه الگوریتم‌های کنترلی معمول محرک‌ها می‌توانند در هر دو جهت مثبت و منفی اعمال تحریک کنند، اما در این ربات‌ها محرک‌ها فقط باید در یک جهت عمل کنند. به همین دلیل از نقطه نظر کنترلی افزونگی در این ربات‌ها یک ضرورت است تا بتواند به نحوی این نقص اعمال یک طرفه اعمال نیرو را به نحوی جبران کند. البته باید به این نکته توجه داشت که علاوه بر طراحی کنترل با در نظر گرفتن قید کششی بودن نیروی کابل‌ها باید به گونه‌ای مسئله حل افزونگی که به نحوی با توزیع نیروهای کابل‌ها در ارتباط است مد نظر گیرد. علاوه بر این در کاربردهای سرعت بالا و یا فضاهای کاری بزرگ انعطاف‌پذیری کابل و شکم دادگی آن باید به گونه‌ای موثر در نظر گرفته شده و الگوریتم کنترلی به گونه‌ای طرح شود که بتواند حداکثر کارایی را در قبال نوسانات ناخواسته ناشی از دینامیک کابل داشته باشد. از دیگر موضوعات نظری دیگری که در رابطه با ربات‌های موازی کابلی می‌توانند به عنوان چالش مطرح گردند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- حل سینماتیک وارون و مستقیم ربات‌های کابلی با در نظر گرفتن شکم دادگی کابل و تحلیل نیروی کشش در آن.
- پیدا کردن توزیع بهینه نیروهای کششی کابل‌ها به خصوص در سیستم‌های با افزونگی بالا.
- توسعه روش‌های کالیبراسیون مناسب ربات‌های کابلی با توجه به امکان حل بر خط آن.
- استفاده از افزونگی در سنسورهای اندازه گیری به منظور خود-کالیبراسیون ربات.
- تحلیل مسئله سختی و کنترل آن در ربات‌های با کابل های انعطاف پذیر.
- تحلیل فضای کاری و دینامیک ربات‌های کابلی معلق
- طراحی مسیر زمان بهینه در ربات‌های کابلی معلق با در نظر گرفتن محدودیت کششی در کابل ها
- حل مسئله کالیبراسیون و کنترل همزمان در ربات های کابلی بازشونده[1]
- طراحی کنترل کننده های مقاوم در ربات های کابلی بازشونده
- طراحی بهینه ربات‌های کابلی تغییر شکل پذیر[2]
- تحلیل دینامیکی و کنترل ربات‌های کابلی تغییر شکل پذیر

مراجع

[1] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo. Robotics: modelling, planning and control. Springer, 2011.

[2] J. P. Merlet, Parallel Robots, Springer, 2006.

[3] H. D. Taghirad. Parallel Robots: Mechanics and Control. CRC Press, 2013.

[4] Z-F. Shao, X. Tang, X. Chen, L-P. Wang. Research on the inertia matching of the Stewart parallel manipulator. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 28, no. 6, pages 649-659, 2012.

[5] G. Chen, H. Wang, Z. Lin. Generalized kinematic mapping of constrained plane motions and its application to the accuracy analysis of general planar parallel robots. Mechanism and Machine Theory, vol. 50, pages 29-47, 2012.

[6] L.W. Tsai. Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators. Wiley-Interscience, 1999.

[7] M. Isaksson, T. Brogardh, M. Watson, S. Nahavandi, P. Crothers. The octahedral hexarot - A novel 6-DOF parallel manipulator. Mechanism and Machine Theory, vol. 55, pages 91-102, 2012.

[8] VE Gough. Contribution to discussion of papers on research in automobile stability, control and tyre performance. In Proc. Auto Div. Inst. Mech. Eng, 1957.

[9] D. Stewart. A platform with six degrees of freedom. UK Institution of Mechanical Engineers Proceedings, vol.180, no.1, pages 371-386, 1965.

[10] M. Pellicciari, G. Berselli, F. Leali, A. Vergnano. A method for reducing the energy consumption of pick-and-place industrial robots. Mechatronics, vol. 23, no. 3, pages 326-334, 2013.

[11] O.Company, F. Marquet and F. Pierrot. A new High-Speed 4-DOF parallel robot synthesis and

[1] Deployable Cable Robots
[2] Reconfigurable Robots

applications. Cable-Driven Parallel Robots, pp. 119-134, 2012.

[25] A. Pott, C. Meyer, and A. Verl. Large-scale assembly of solar power plants with parallel cable robots, In 41th International Symposium on Robotics, pp. 1-6, 2010.

[26] P. Dewdney, M. Nahon, and B. Veidt. The large adaptive reflector: a giant radio telescope with an aero twist. Canadian aeronautics and space journal, vol. 48, no. 4, pages 239–250, 2002.

[27] P.D. Campbell, P.L. Swaim, and C.J. Thompson. Charlotte robot technology for space and terrestrial applications. In SAE, International Conference on Environmental Systems, 25th, San Diego, CA, 1995.

[28] G. Rosati, P. Gallina, and 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, pages 560–569, 2007.

[29] Homma K., Fukuda O., Nagata Y., Sugawara J., Nagata Y., and Usuba M., "A Wire-driven Leg Rehabilitation System: Development of a 4-DOF Experimental System", Proceedings of the 2003 IEEWASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics(AIM 2003), 2003, pp.

[30] Mayhew D., Bachrach B., Rymer W. Z., and Beer R. F., "Development of the MACARM – a Novel Cable Robot for Upper Limb Neurorehabilitation", Proceedings of the 2005 IEEE 9th Internationa Conference on Rehabilitation Robotics, Chicago, 2005, pp. 299-302.

[31] J. P. Merlet, R. Daney, A portable, modular parallel wire crane for rescue operations Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference onRobotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference onRobotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on. Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference onRobotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference onRobotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on

[32] S. Tadokoro, Y. Murao, M. Hiller, R. Murata, H. Kohkawa, and T. Matsushima. A motion base with 6-dof by parallel cable drive architecture. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 7, no. 2, pages: 115–123, 2002.

[33] S. Kawamura, H. Kino, and C. Won. High-speed manipulation by using parallel wire-driven modeling Issues. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 19, no. 3, pages 411-420, 2003.

[12] Adept. Technology inc. http://www.adept.com, 2012.

[13] S. E. Landsberger and T.B. Sheridan. A new design for parallel link munipulator. Proc Systems, Man and Cybernetics, pages 8–12, 1985.

[14] A. Alikhani, S. Behzadipour,A. Alasty, S. A. S. Vanini. Design of a large-scale cable-driven robot with translational motion. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. Vol. 27, no. 2, pages 357-366, 2011.

[15] P. Bosscher, R. Robert L. Williams II, L. S. Bryson, D. Castro-Lacouture. Cable-suspended robotic contour crafting system. Automation in construction, vol. 17, no. 1, pages 45-55, 2007.

[16] J. Albus, R. Bostelman, and N. Dagalakis. The NIST robocrane. Journal of Robotic Sysems, pages 709-724, 1992.

[17] L.L Cone. Skycam: An aerial robotic camera system. Byte, vol. 10, no.10, pages 122–32, 1985.

[18] H.D. Taghirad and M. Nahon. Kinematic analysis of a macro–micro redundantly actuated parallel manipulator. Advanced Robotics, vol. 22, no.6, pages 657–687, 2008.

[19] R.G. Roberts, T. Graham, and T. Lippitt. On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable-suspended robots. Journal of Robotic Systems, vol. 15, no. 10, pages 581–597, 1998.

[20] R. Bostelman, J. Albus, N. Dagalakis, A. Jacoff, and J. Gross. Applications of the nist robocrane. In Proceedings of the 5th International Symposium on Robotics and Manufacturing, pages 14–18, 1994.

[21] C.S. Holland and D.J. Cannon, Cable Array Robot for Material Handling, United States Patent No. 6,826,452 B1, 2004.

[22] C. J. Thompson, and P. D. Campbell, Tendon Suspended Platform Robot, US Patent 5585707, 1996.

[23] So-Ryeok Oh, Kalyan Mankala, Sunil K. Agrawal and James S. Albus, A Dual-Stage Planar Cable Robot: Dynamic Modeling and Design of A Robust Controller with Positive Inputs, J. Mech. Des., 127(4), pages 612-620, 2004.

[24] A. Pott, H. Mutherich, W. Kraus, V. Schmidt, P. Miermeister, and A. Verl. IPANema: A family of cable-driven parallel robots for industrial

[47] H. L. le, L.H. Zhao, W. Peng and D. Zhi-shan, Forward kinematics based on improved genetic algorithms of 6-DOF parallel robot, Journal of Applied Sciences, Vol. 23, 2005.

[48] H. Sadjadian, H.D. Taghirad and A. Fatehi, Neural Networks Approaches for Computing the Forward Kinematics of a Redundant Parallel Manipulator, International Journal of Computational Intelligence, Vol. 2, Number 1, 2005.

[49] H. Sadjadian and H. D. Taghirad, Comparison of Different Methods for Computing the Forward Kinematics of a Redundant Parallel Manipulator, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2005.

[50] A. Rezaei, A. Akbarzadeh, P. Mahmoodi-Nia, M-R. Akbarzadeh. Position, Jacobian and workspace analysis of a 3-PSP spatial parallel manipulator. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 29, no. 4, pages 158-173, 2013.

[51] C. Zhang, L. Zhang. Kinematics analysis and workspace investigation of a novel 2-DOF parallel manipulator applied in vehicle driving simulator. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 29, no. 4, pages 113-120, 2013.

[52] A. Gallant, R. Boudreau, M. Gallant. Geometric determination of the dexterous workspace of n-RRRR and n-RRPR manipulators. Mechanism and Machine Theory, vol. 51, pages 159-171, 2012.

[53] M.Gouttefarde, J-P. Merlet, D.Daney. Determination of the wrench-closure workspace of 6-DOF parallel cable-driven mechanisms. Advances in Robot Kinematics Mechanisms and Motion, , Springer , Printed in the Netherlands., pages 315-22, 2006.

[54] S.K.Mustafa, S.H.Yeo and C.B.Pham, G.Yang and W.Lin. A Biologically-Inspired Anthropocentric Shoulder JointRehabilitator: Workspace Analysis & Optimization. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation**,** pages 1045- 1050, 2005.

[55] Sh.Fang, D.Franitza, M.Torlo, F.Bekes, and M.Hiller. Motion control of a tendon-based parallel manipulator using optimal tension distribution. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 9, no. 3, pages 561-568, 2004.

[56] M. Arsenault. Workspace and stiffness analysis of a three-degree-of-freedom spatial cable-suspended parallel mechanism while considering cable mass. Mechanism and Machine Theory, vol. 66, no. 1, pages 1-13, 2013.

robots. Robotica, vol. 18, no. 1, pages13–21, 2000.

[34] M. Khosravi, Modeling and robust control of redundant paralle cable robots considering longitudinal flexibility in cables, PhD. Thesis, K. N. Toosi University of Technology, 2013.

[35] J.J. Craig. Introduction to robotics: mechanics and control. Prentice Hall, 2004.

[36] J. P. Merlet, Parallel Robots: Open Problems, 9th International Symposium of Robotics Research, 2003.

[37] Hamid D. Taghirad and Meyer Nahon, Dynamic Analysis of A Macro–Micro Redundantly Actuated Parallel Manipulator, Advanced Robotics, Vol. 22, No. 3, pp 949–981, Sept. 2008.

[38] J. P. Merlet, Still a Long Way to Go to the Road for Parallel Manipulator, ASME 2002 DETC Conference, Montréal, Canada, 2002.

[39] Xianwen Kong and Clément Gosselin, Cartesian Parallel Manipulators, US Patent 6,729,202 B2, May 4, 2004.

[40] Xianwen Kong and Clément Gosselin, Type Synthesis of Parallel Mechanisms, Springer Tracts in Advanced Robotics, Germany, 2007.

[41] Andrew J. Sommse and Charles W. Wampler, The Numerical Solution of Systems of Polynomials Arising in Engineering and Science, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2005, Pg 104.

[42] V. Parenti-Castelli and R. D. Gregorio, a New Algorithm Based on Two Extra Sensors for Real-Time Computation for the Actual Configuration of the Generalized Stewart-Gough Manipulator. ASME Journal of Mechanics, Vol. 112, 2000.

[43] H. Sadjadian, H.D. Taghirad, A Quasi-Closed Solution Method for Computing the Forward Kinematics of a Redundant Parallel Manipulator 12th Iranian International Conference on Electrical Engineering, Mashad, May 2004.

[44] Yu-Jen Chiu and Ming-Hwei Perng, Forward Kinematics of a General Fully Parallel Manipulator with Auxiliary Sensors, the International Journal of Robotics Research, Vol. 20, 2001.

[45] R. Nair and J.H. Maddocks, On the Forward Kinematics of Parallel Manipulators, the International Journal of Robotics Research, 1994.

[46] Jing-Shan Zhao, Yuan Yun, Li-Ping Wang, Jin-Song Wang and Jing-Xin Dong, Investigation of the forward kinematics of the Gough-Stewart manipulator with natural coordinates, International Journal of Manufacturing Technology, 2005.

[57] P.Bosscher, A.T. Reichel, I.Ebert-Uphoff. Wrench feasible workspace generation for cable driven robots. IEEE Transactions on Robotics, vol. 22, no. 5, pages 890-902, 2006.

[58] A.T.Riechel, I.Ebert-Uphoff. Force feasible workspace analysis for underconstrained, point mass cable robots. IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.5, pages 4956-62, 2004.

[59] M. Gouttefarde, D. Daney, J.P. Merlet. Interval analysis based determination of the wrench feasible workspace of parallel cable driven robots. IEEE Transactions on Robotics, vol. 27, no. 1, pages 1-13, 2011.

[60] M. Hiller, S. Fang, S. Mielczarek, R. Vehoeven, and D. Franitza, Design, analysis and realization of tendon-based parallel manipulators. Mechanism and Machine Theory, vol. 40, no. 4, pages 429–445, 2005.

[61] I.Ebert-Uphoff and P. H.Voglewede. On the connections between cable-driven robots, parallel manipulators and grasping. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 4521-6, 2004.

[62] H.Osumi, Y., and M.Koshikawa. Development of a manipulator suspended by parallel wire structure. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000), pages 498-503, 2000.

[63] G.Barrette, C.M.Gosselin, Determination of the dynamic workspace of cable-driven planar parallel mechanisms. Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design, vol. 127, no. 2, pages 242-248, 2005.

[64] R. Verhoeven. Analysis of the workspace of tendon-based Stewart Platforms. PhD. Thesis, Duisburg-Essen University, 2004.

[65] W.B. Lim, G. Yang, S. H. Yeo, S. K. Mustafa. A generic force-closure analysis algorithm for cable-driven parallel manipulators. Mechanism and Machine Theory, vol. 46, pages 1265-1275, 2011.

[66] S. Kawamura and K. Ito. A new type of master robot for teleoperation using a radial wire drive system. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, Intelligent Robots for Flexibility, vol. 1, no. 1, pages 55-60, 1993.

[67] M. Gouttefarde, S. Krut, O. Company, F. Pierrot and N. Ramdani. On the design of fully constrained parallel cable-driven robots. Advances in Robot Kinematics: Analysis and Design, part 2, Springer, printed in Netherlands, pages 71-78, 2008.

[68] R. G. Roberts, T.Graham and T. Lippitt. On the Inverse Kinematics, Statics, and Fault Tolerance of Cable-Suspended Robots. Journal of Robotic Systems, vol. 15, no. 10, pages 581-97, 1998.

[69] C.B.Pham, S.H.Yeo, G. Yang, M.S. Kurbanhusen, I-M.Chen. Force-closure workspace analysis of cable-driven parallel mechanisms. , vol. 41, pages 53-69, 2006.

[70] C.B.Pham, S.H.Yeo, G. Yang. Tension analysis of cable-driven parallel mechanism. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005.

[71] R.T. Rockafellar, Convex Analysis, Princeton univ. Press, 1970.

[72] D. McColl, L. Notash. Workspace formulation of planar wire-actuated parallel manipulator. Robotica, vol. 29, no. 4, pages 607-617, 2011.

[73] M. Gouttefarde, C.M.Gosselin. Analysis of the Wrench-Closure Workspace of Planar Parallel Cable-Driven Mechanisms. IEEE Transactions on Robotics, vol. 22, no. 3, pages 434-45, 2006.

[74] A. Zarif Loloei, H. D. Taghirad. Controllable workspace of cable driven redundant parallel manipulator by fundamental wrench analysis. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, vol. 36, no. 3, pages 297-314, 2012.

[75] M. M. Aref and H. D. Taghirad, Geometrical Workspace Analysis of a Cable-Driven Redundant Parallel Manipulator: KNTU CDRPM, in the proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2008, Nice, France, Sept. 2008.

[76] J.P.Merlet, Jacobian, manipulability, condition number, and accuracy of parallel robots. Transactions of the ASME. Journal of Mechanical Design, vol. 128, no. 1, pages 199-206, 2006.

[77] T. Yoshikawa. Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy. In Robotics Research: The First International Symposium, pages 735–747. Mit Press, 1984.

[78] G. Legnani, I. Fassi, H. Giberti, S. Cinquemani, D. Tosi. A new isotropic and decoupled 6-DoF parallel manipulator. Mechanism and Machine Theory, vol. 58, pages 64-81, 2012.

[79] P. Cardou, S. Bouchard, and C. Gosselin. Kinematic-Sensitivity Indices for Dimensionally Nonhomogeneous Jacobian Matrices. IEEE Transactions on Robotics, vol. 26, no. 1, pages 166-173, 2010.

[80] T. Yoshikawa. Manipulability of Robotic Mechanisms. The International Journal of

[92] M.Hassan, A.Khajepour, "Optimization of actuator forces in cable-based parallel manipulators using convex analysis", IEEE Transactions on Robotics, vol. 24, no. 3, p 736-40, 2008.

[93] Hamid D. Taghirad, Yousef B. Bedoustani, An Analytic-Iterative Redundancy Resolution Scheme for Cable-Driven Redundant Parallel Manipulators, IEEE Trans. On Robotics, 27(6), p. 1137-1143, Dec. 2011.

[101] David G. Luenberger: "Introduction to Linear and Nonlinear Programming", Addison-Wesley Publishing Company, 1973.

[95] S. Tadokoro and T. Matsushima. A parallel cable-driven motion base for virtual acceleration. In International Conference of IROS, 2001.

[96] T. Yoshikawa. Manipulability of robotic mechanisms. The International Journal of Robotics Research, vol. 4, no. 2, pages 3–9, 1985.

[97] F. Hao and J. Merlet. Multi-criteria optimal design of parallel manipulators based on interval analysis. Mechanism and Machine Theory, vol. 40, no. 2, pages 157–171, 2005.

[98] J. O. Kim. Dexterity measures for design and control of manipulators. In IEEE International workshop on intelligent robots and systems, (Osaka, Japan), pages 758–763, 1991.

[99] C. A. Klein and B. E. Blaho. Dexterity measures for the design and control of kinematically redundant manipulators. International Journal of Robotics Research, vol. 6, no. 1, pages 72–83, 1987.

[100] H. Asada. A geometrical representation of manipulator dynamics and its application to arm design. Journal of dynamic systems, measurement, and control, vol. 105, no. 3, pages 131–142, 1983.

[101] M. Hiller, Sh. Fang, S. Mielczarek, R. Vehoeven and D. Franitza. Design, analysis and realization of tendon-based parallel manipulators. Mechanism and Machine Theory, vol. 40, no. 1, pages 429-445, 2005.

[102] L. Weihmann, D. Martins, L.S. Coelho. Parallel manipulators, Expert Systems with Applications, vol. 39, no. 6, pages 6150-6156, 2012.

[103] R. Boudreau, S. Nokleby. Parallel manipulators, Mechanism and Machine Theory, vol. 56, pages 138-155, 2012.

[104] D. Zhang, Z. GAO. Forward kinematics, performance analysis, and multi-objective optimization of a bio-inspired parallel manipulator. Robotics and Computer-Integrated Robotics Research, vol. 4, no. 2, pages 3–9, 1985.

[81] W. A. Khan and J. Angeles. The Kinetostatic Optimization of Robotic Manipulators: The Inverse and the Direct Problems. Journal of Mechanical Design, vol. 128, no. 1, pages 168–178, 2006.

[82] L. J. Stocco, S. E. Salcudean, and F. Sassani. On the Use of Scaling Matrices for Task-Specific Robot Design. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 15, no. 5, pages 958–965, 1999.

[83] P. Cardou, S. Bouchard, and C. Gosselin. Kinematic-sensitivity indices for dimensionally nonhomogeneous jacobian matrices. IEEE Transactions on Robotics, vol. 26, no. 1, pages 166–173, 2010.

[84] M.H. Saadatzi, M.T. Masouleh, H.D. Taghirad, C. Gosselin, and P. Cardou. Geometric analysis of the kinematic sensitivity of planar parallel mechanisms. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, vol. 35, no. 4, pages 477-487, 2011.

[85] S.A. Khalilpour. Multi Objective Optimal Design of Cable Robots Based on Kinematic Sensitivity and Controllable Workspace Indices. M. Sc. Thesis, K. N. Toosi University of Technology, 2013.

[86] R.Kurtz and V.Hayward. Dexterity measures with unilateral actuation constraints: the n+1 case. Advanced Robotics, vol. 9, no. 5, pages 561-77, 1995.

[87] A. Zarif-Loloei, Workspace Optimization of Spatial Cable-Driven Redundant Parallel Manipulators, PhD Thesis, K. N. Toosi University of Technology, 2013.

[88] A. Russell, "A Robotic System for Performing Sub-millimeter Grasping and Manipulation Tasks", Robotics and Autonomous Systems, vol. 13, no. 3, p 209-18, 1994.

[89] S. Behzadipour, and A. Khajepour, "A New Cable-based Parallel Robot with Three Degrees of Freedom", Multibody System Dynamics, vol. 13, no. 4, p 371-83, 2005.

[90] G. Mroz and L. Notash, "Design and prototype of parallel, wire-actuated robots with a constraining linkage", Journal of Robotic Systems, vol. 21, no. 12, p 677 – 87, 2004.

[91] Sh.Fang, D.Franitza, M.Torlo, F.Bekes, and M.Hiller, "Motion control of a tendon-based parallel manipulator using optimal tension distribution", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 9, no. 3, p 561-8, 2004.

[117] G. Lebret, K. Liu, and F.L. Lewis. Dynamic analysis and control of a stewart platform manipulator. Journal of Robotic Systems, 10(5):629–655, July 1993.

[118] Jiegao Wang and C.M. Gosselin. A new approach for the dynamic analysis of parallel manipulators. Multibody System Dynamics, 2(3):317–334, Sept. 1998.

[119] YK Yiu, H. Cheng, ZH Xiong, GF Liu, and ZX Li. On the dynamics of parallel manipulators. In Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on, volume 4, pp. 3766–3771. IEEE, 2001.

[120] Y. Nakamura and M. Ghodoussi. Dynamics computation of closed-link robot mechanisms with nonredundant and redundant actuators. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 5(3):294–302, 1989.

[121] J. Wittenburg. Dynamics of multibody systems. B.G. Teubner, Stuttgart, 1977.

[122] M.W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar. Robot modeling and control. John Wiley & Sons, 2006.

[123] Hui Cheng, Yiu-Kuen Yiu, and Zexiang Li. Dynamics and control of redundantly actuated parallel manipulators. IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 8:483–491, 2003.

[124] N. Srinil, G. Rega, and S. Chucheepsakul. Three-dimensional non-linear coupling and dynamic tension in the large-amplitude free vibrations of arbitrarily sagged cables. Journal of Sound and Vibration, 269(3):823–852, 2004.

[125] M. Lepidi, V. Gattulli, and F. Vestroni. Static and dynamic response of elastic suspended cables with damage. International Journal of Solids and Structures, 44(25):8194–8212, 2007.

[126] H.M. Irvine. Cable structures. The MIT Press. 1981.

[127] J.J Gorman, K.W. Jablokow, and D.J. Cannon. The cable array robot: Theory and experiment. In Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on, volume 3, pages 2804–2810. IEEE, 2001.

[128] A.B Alp and S.K. Agrawal. Cable suspended robots: Feedback controllers with positive inputs. American Control Conference, volume 1, pp. 815–820. IEEE, 2002.

[129] O. Ma and X. Diao. Dynamics analysis of a cable-driven parallel manipulator for hardware-in-the-loop dynamic simulation. In Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on, pages 837–842. IEEE, 2005.

Manufacturing, vol. 28, no. 4, pages 484-492, 2012.

[105] D. Kalyanmoy. Multi objective optimization using evolutionary algorithms. John Wiley and Sons, 2001.

[106] F.Hao, J.P.Merlet. Multi-criteria optimal design of parallel manipulator based on interval analysis. Mechanism and Machine Theory, vol. 40, no. 2, pages 157-71, 2005.

[107] Z. Ji. Analysis of design parameters in platform manipulators. Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design, vol. 118, no. 4, pages 526-31, 1996.

[108] T. Bruckmann, L. Mikelsons, T. Brandt, M. Hiller and D Schramm. Wire Robots Part I: Kinematics, Analysis & Design. Published in: Parallel Manipulators: New Developments, Edited by: Jee-Hwan Ryu, I-Tech Education and Publishing , pages 109-132, first Editon: 2008.

[109] A.M.Hay, and J.A. Snyman. Optimization of a planar tendon-driven parallel manipulator for a maximal dextrous workspace. Engineering Optimization, vol. 37, no. 3, pages 217–36, 2005.

[110] A. Fattah, and S. K. Agrawal. On the design of cable-suspended planar parallel robots. Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design, vol. 127, no. 5, pages 1021-8, 2005.

[111] S.Perreault, C.M.Gosselin, "Cable-driven parallel mechanisms: application to a Locomotion Interface", Journal of Mechanical Design, vol. 130, no. 10, p 102301-8, 2008.

[112] M.M. Aref, H.D. Taghirad, and S. Barissi. Optimal design of dexterous cable driven parallel manipulators. International Journal of Robotics, vol. 1, no. 1, pages 29–47, 2009.

[113] C. Gosselin. Parallel computational algorithms for the kinematics and dynamics of planar and spatial parallel manipulators. Trans. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 118(1):22–28, 1996.

[114] N. Dasgupta and T.S. Mruthyunjaya. A newton-euler formulation for the inverse dynamics of the stewart platform manipulator. Mechanism and Machine Theory, 33(8):1135–52, 1998.

[115] A. Fattah and G. Kasaei. Kinematics and dynamics of a parallel manipulator with a new architecture. Robotica, 18:535–543, Sept. 2000.

[116] C.C. Nguyen and F.J Pooran. Dynamic analysis of a 6 DOF CKCM robot end-effector for dual arm telerobot systems. Robotica and Autonomous Systems, 5(4):377-394, 1989.

[130] K. Kozak, Q. Zhou, and J. Wang. Static analysis of cable-driven manipulators with non-negligible cable mass. Robotics, IEEE Transactions on, 22(3):425–433, 2006.

[131] B. Zi, BY Duan, JL Du, and H. Bao. Dynamic modeling and active control of a cable-suspended parallel robot. Mechatronics, 18(1):1–12, 2008.

[132] Behzadipour and A. Khajepour. Sti.ness of cable-based parallel manipulators with application to stability analysis. Journal of mechanical design, 128:303, 2006.

[133] S. Behzadipour and M.A. Sohi. Antagonistic sti.ness in cable-driven mechanisms. In IFToMM World Congress, France, 2007.

[134] G. Meunier, B. Boulet, and Meyer Nahon. Control of an overactuated cable-driven parallel mechanism for a radio telescope application. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 17(5):1043–54, Sept. 2009.

[135] Y. Zhang, S.K Agrawal, and M.J Piovoso. Coupled dynamics of flexible cables and rigid end-effector for a cable suspended robot. American Control Conference, 2006.

[136] Y. Zhang. Modeling and control of flexible cable transporter systems with arbitrary axial velocity, PhD Thesis, 2004.

[137] E. Ottaviano and G. Castelli. A study on the effects of cable mass and elasticity in cable-based parallel manipulators. ROMANSY 18 Robot Design, Dynamics and Control, pages 149–156, 2010.

[138] E. Ottaviano and G. Castelli. Issues on the modelling of cable-based parallel manipulators.

[139] X. Diao and O. Ma. Vibration analysis of cable-driven parallel manipulators. Multibody System Dynamics, 21(4):347–360, 2009.

[140] M.A. Khosravi, H.D. Taghirad, "Stability Analysis and Control of Parallel Robots with Elastic Cables: Singular Perturbation Approach," IEEE Transactions of Robotics, Vol. 30, No.3, pp. 694-704, 2014.

[141] M.A. Khosravi, H.D. Taghirad, "Dynamic Modeling of Cable Driven Robots; Singular Perturbation Approach," in Proceedings of 2th International Conference on Control, Instrumentation and Automation, Shiraz, Iran, 2011 (in Persian).

[142] M.A. Khosravi, H.D. Taghirad, "Dynamic Analysis and Control of Fully-Constrained Cable Robots with Elastic Cables: Variable Stiffness Formulation," Cable Driven Parallel Robots, In Cable-Driven Parallel Robots, pages 161–177. Springer, 2015.

[143] M.A. Khosravi, H.D. Taghirad, "Robust PID Control of Fully-Constrained Cable Driven Parallel Robots," Mechtronics, Vo1. 24, No. 2, pp. 87-97, 2014.

[144] A. Vafaei, M.A. Khosravi, H.D. Taghirad, "Modeling and Control of Cable Driven Parallel Manipulators with Elastic Cables: Singular Perturbation Theory," Intelligent Robotics and Applications, Springer, pp. 455-464, 2012.

[145] M.A. Khosravi, H.D. Taghirad, "Dynamic Analysis and Control of Cable Driven Robots with Elastic Cables," Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, Vol. 35, No. 4, pp. 543-557, 2011.

[146] A. Codourey. Dynamic modeling of parallel robots for computed-torque control implementation. The International Journal of Robotics Research, 17(12):1325–1336, 1998.

[147] A. Ryeok Oh and Sunil Kumar Agrawal. Cable suspended planar robots with redundant cables: controllers with positive tensions. IEEE Transactions on Robotics, 21(3):457–465, 2005.

[148] Robert L. Williams, James S. Albus, and Roger V. Bostelman. 3d cable-based Cartesian mettrology system. Journal of Robotic Systems, 21(5):237–257, 2004.

[149] Werner Kraus, Valentin Schmidt, Puneeth Rajendra, and Andreas Pott. Load identification and compensation for a cable-driven parallel robot. In Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on, pages 2485–2490.IEEE, 2013.

[150] BY Duan, YY Qiu, FS Zhang, and B Zi. On design and experiment of the feed cable-suspended structure for super antenna. Mechatronics, 19(4):503–509, 2009.

[151] Peter Dewdney, Meyer Nahon, and Bruce Veidt. The large adaptive reflector: a giant radio telescope with an aero twist. Canadian aeronautics and space journal, 48(4):239–250, 2002.

[152] Hitoshi Kino, Toshiaki Yahiro, Fumiaki Takemura, and Tetsuya Morizono. Robust PD control using adaptive compensation for completely restrained parallel-wiredriven robots: Translational systems using the minimum number of wires underzero-gravity condition. Robotics, IEEE Transactions on, 23(4):803–812, 2007.

[153] Tej Dallej, Marc Gouttefarde, Nicolas Andreff, Redwan Dahmouche, and Philippe Martinet. Vision-based modeling and control of large-dimension cable-driven parallel robots. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012,

[158] R. Chellal, L. Cuvillon, and E. Laroche. A Kinematic Vision-Based Position Control of a 6-DoF Cable-Driven Parallel Robot. In Cable-Driven Parallel Robots, pages 213–225. Springer, 2015.

[159] R. Babaghasabha, M.A. Khosravi, H.D. Taghirad, "Adaptive Control of KNTU Planar Cable- driven Parallel Robot with Uncertainties in Dynamic and Kinematic Parameters," Cable Driven Parallel Robots, Mechanisms and Machine Science 32, Springer, pp. 145-160, 2014.

[160] R. Babaghasabha, M. A. Khosravi, and H. D. Taghirad. Adaptive robust control of fully-constrained cable driven parallel robots. Accepted for publication in Mechatronics, 2014.

[161] M.A. Khosravi and H.D. Taghirad, "Robust PID Control of Cable-Driven Robots with Elastic Cables," in proceedings of First RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), Iran, 2013.

IEEE/RSJ International Conference on, pages 1581–1586. IEEE, 2012.

[154] R. Babaghasabha, M.A. Khosravi, H.D. Taghirad, "Vision Based PID Control on a Planar Cable Robot," in proceedings of 22nd Iranian Conference on Electrical Eng. (ICEE2014), Iran, 2014.

[155] A.B. Alp and S.K. Agrawal. Cable suspended robots: Design, planing and control. In Proceeding of Int. Conf. on Robotics and Automation, pages 4275–4280, Desember 2002.

[156] R.L. Williams II, P. Gallina, and J. Vadia. Planar translational cable-direct-driven robots. Journal of Robotic Systems, 20(3):107–120, 2003.

[157] So-Ryeok Oh and S.K. Agrawal. Generation of feasible set points and control of a cable robot. IEEE Trans. on Robotics, 22(3):551–558, June 2006.