مقاله

ربات‌های موازی کابلی؛ انواع و کاربردها

محمد نصیری
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی شیراز
mo.nasiri@sutech.ac.ir

امیر لطف‌آور*
استادیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک و هوافضا
دانشگاه صنعتی شیراز
lotfavar@sutech.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۷/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۲۵

چکیده

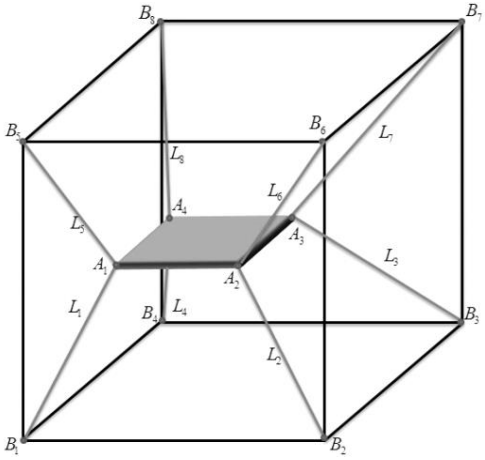
ربات‌های موازی کابلی[1] ویژگی‌های منحصر بفردی دارند و برای اهدافی چون تعمیر و نگه‌داری در لنگرگاه‌ها و آشیانهٔ هواپیماها، حمل‌ونقل، انجام عملیات جوشکاری، بازبینی خطوط لوله و رادیوتلسکوپ‌ها و نظایر آنها به‌کار می‌روند. امروزه ویژگی‌هایی چون وسعت فضای کاری، قابلیت مونتاژ و دمونتاژ سریع، اینرسی کم قسمت‌های متحرک و حمل‌ونقل آسان از یک‌سو، و هزینهٔ ساخت و نگه‌داری اندک از سوی دیگر سبب شده است تا این گروه از ربات‌ها مورد توجه بسیار قرار بگیرند و کاربردهای گسترده‌ای پیدا کنند. در این مقاله سعی شده است تا ضمن معرفی ربات‌های کابلی و انواع آن، کاربردهای این دسته از ربات‌ها تشریح گردد.

واژگان کلیدی: ربات، ربات موازی، ربات موازی کابلی

۱. مقدمه

امروزه نیاز مبرم به کاربردهای متنوع دانش رباتیک سبب شده است تا این دانش نوپا بتواند روند تکامل خود را با سرعت بیشتری طی کند. گسترش روزافزون نیازهای بشر در عرصه‌های گوناگون منجر به ظهور انواع متنوعی از ربات‌ها نظیر ربات‌های سری، موازی و یا هیبریدی شده است؛ ربات‌هایی که می‌توان آنها را براساس معیارهای گوناگونی چون منبع قدرت، هندسه، ساختار سینماتیک و یا فضای کاری دسته‌بندی کرد. ربات‌های موازی اصطلاحاً به دسته‌ای از ربات‌ها گفته می‌شود که از یک عملگر نهایی و یک پایهٔ ثابت تشکیل شده‌اند، به‌طوری‌که حرکات عملگر نهایی نسبت به پایهٔ ثابت توسط n محرک[2] ساده صورت می‌پذیرد. برای این ربات‌ها می‌توان چنین بیان کرد که کمترین تعداد زنجیره‌های سینماتیکی بین پایهٔ ثابت و عملگر نهایی برابر ۲ است و در هر زنجیره حداقل یک محرک وجود دارد. تفاوت‌های چشمگیری میان این دسته از ربات‌ها و ربات‌های سری وجود دارد. مثلاً در ربات‌های موازی هر یک از زنجیره‌های سینماتیکی تنها سهم مشخصی از بار کل را متحمل می‌شوند و همین امر سبب افزایش قدرت حمل بار نسب به وزن ربات می‌شود. همچنین با توجه به قابلیت نصب محرک‌ها روی پایه،

می‌توان اینرسی بخش در حال حرکت را کاهش داد و بدین ترتیب به شتاب عملکرد بالاتری دست یافت. اما مشکل بزرگی که بر سر راه این دسته از ربات‌ها وجود دارد، کوچک‌بودن فضای کاری آنهاست. امروزه، با توجه به محدودیت‌های ربات‌های سری و موازی، دستهٔ دیگری از ربات‌ها تحت عنوان ربات‌های موازی کابلی ساخته و روانه بازار شده‌اند. پیدایش ربات‌های موازی کابلی به دههٔ ۱۹۸۰ م بازمی‌گردد. در آن دوره مفاهیم بنیادین جرثقیل‌ها، بازوهای سینماتیکی موازی و تجهیزات مربوط به ربات‌های کابلی در ایالات متحدهٔ امریکا و ژاپن با هم ترکیب شدند تا نسل جدیدی از ربات‌ها تحت عنوان ربات‌های موازی کابلی ظهور و بروز یابند [۱]. ربات‌های موازی کابلی متعلق به کلاس خاصی از ربات‌های موازی‌اند که در آنها کابل‌ها جایگزین بازوهای صلب می‌شوند. این کابل‌ها به‌منظور موقعیت‌دهی مناسب عملگر نهایی[۳]، توسط یک سیستم محرک کنترل می‌شوند. در شکل ۱ نمایی شماتیکی از این دسته از ربات‌ها نمایش داده شده است.

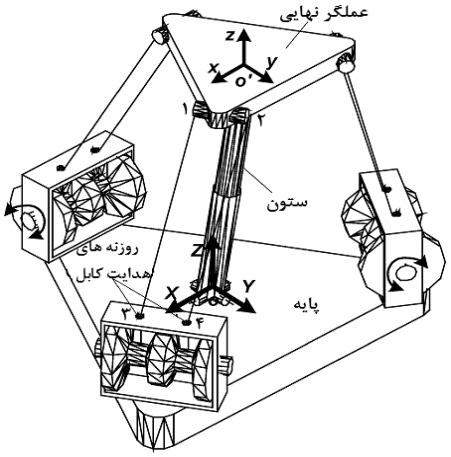


شکل ۱. نمایی شماتیک از یک ربات موازی کابلی

با استفاده از کابل‌ها، جرم ساختار موازی به‌شدت کاهش می‌یابد، همین امر نیز سبب کاهش چشمگیری در جرم بخش متحرک ربات می‌شود و در نتیجه، ضمن آنکه قابلیت حمل بار افزایش می‌یابد، عملگر نهایی می‌تواند با سرعت و شتاب بالاتری حرکت کند. همچنین چون ساختار موازی متعارف قبلی حفظ شده است، محرک‌ها در پایهٔ ثابت قرار داشته و تنها قسمتی از بار کلی وارده را تحمل می‌کنند. بدین ترتیب سیستم از منظر انرژی بسیار پربازده است و برای حمل‌ونقل بارهای سنگین مناسب می‌باشد.

۲. دسته‌بندی

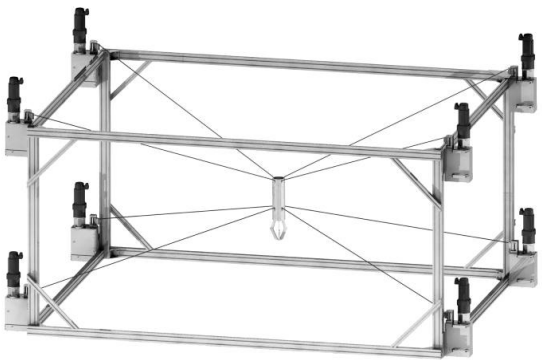
به‌طور کلی، ربات‌های موازی کابلی براساس نحوهٔ استفاده و قرارگیری کابل‌ها به دو دستهٔ کلی ربات‌های کابل - پایه[۴] و ربات‌های کابل – آویز[۵] تقسیم می‌شوند. ربات‌های کابل - پایه دراری یک عضو منشوری‌اند که معمولاً یک سیلندر و پیستون است و بیشتر برای جابه‌جایی قطعات با سرعت بسیار بالا به‌کار می‌روند. در این دسته از ربات‌های کابلی، مکان عملگر نهایی[۶] به‌وسیلهٔ عضو منشوری و زوایای آن به‌وسیلهٔ کابل‌ها تعیین و کنترل می‌شوند. در شکل ۲ نمایی کلی از ربات بتابوت[۷]، به‌عنوان نمونه‌ای از سازوکارهای رباتیک کابل - پایه، نمایش داده شده است. این ربات در دانشگاه واترلو[۸] ابداع و ساخته شده است [۲].



شکل ۲. نمایی شماتیک از ربات بتابوت [۲]

دستهٔ دوم با عنوان ربات‌های کابل - آویز بیشتر در حمل‌ونقل مواد و ماشین‌آلات در فضاهای کاری بزرگ استفاده می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، این دسته از ربات‌ها دارای ساختاری ساده شامل چند کابل هستند که از یک‌سو به عملگر نهایی متصل

می‌شوند و از سوی دیگر بدور پولی‌های متصل به موتورهای واقع در یک پایهٔ ثابت پیچیده می‌شوند تا از طریق آنها موقعیت عملگر نهایی مهار شود. البته بسته به نیاز و نوع طراحی، موتورها می‌توانند روی پایهٔ متحرک قرار داشته و سر دیگر کابل‌ها به پایهٔ ثابت متصل شوند. همچنین عملگر نهایی ممکن است با توجه به نیاز به وسائلی چون دوربین، آهنربای الکتریکی، دستگاه برش و یا ادواتی دیگر از این دست مجهز باشد.



شکل۳. نمایی شماتیکی از یک نمونه ربات کابل - آویز [۳]

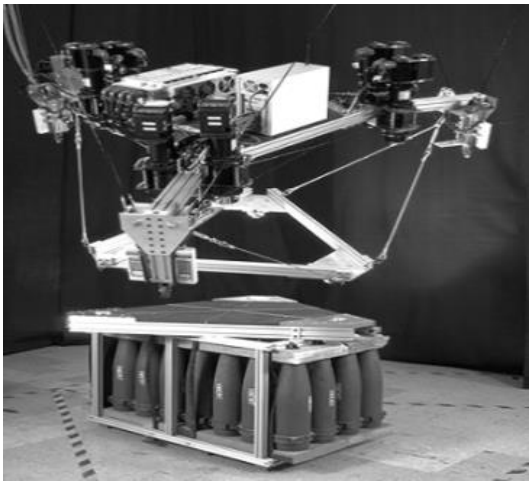
با توجه به عدم قابلیت تحمل فشار توسط کابل، به‌هنگام طراحی ربات‌های کابل - آویز می‌بایست به نوعی مطمئن شد که کابل‌ها تحت کشش‌اند تا وظایف عملکردی ربات به‌درستی انجام شود. برای این منظور یا باید از تعداد کابل‌های بیشتری استفاده کرد و یا از وجود یک نیروی منفعل بهره گرفت؛ نیرویی که کشش کابل‌ها را در طول عملیات و کارکرد ربات تضمین کند. بر این اساس، ربات‌های کابل - آویز به دو گروه کلی ربات‌های مقید کامل[۹] و ربات‌های نیمه‌مقید[۱۰] تقسیم می‌شوند [۴]. وقتی عملگر نهایی دارای n درجه آزادی باشد، می‌توان نشان داد برای اینکه ربات از نوع کاملاً مقید باشد به n+1 کابل نیاز است. بدین ترتیب باید حداقل یک محرک کابلی افزون بر درجات آزادی سازوکار وجود داشته باشد که در نتیجهٔ آن مفهومی به نام افزونگی محرک[۱۱] را ایجاد می‌نماید. در این‌گونه ربات‌ها درجات آزادی سیستم به‌وسیلهٔ کابل‌ها محدود می‌شود و در نتیجه موقعیت دقیق عملگر نهایی با دانستن اندازهٔ طول کابل‌ها حاصل می‌گردد. البته به‌دلیل زیادبودن تعداد کابل‌ها احتمال تداخل کابل‌ها بیشتر شده و در نتیجه فضای کاری قابل دسترس محدود شود [۵ –۶].

در ربات‌های نیمه‌مقید، که نسبت به ربات‌های کاملاً مقید تعداد کابل کمتری دارند، اغتشاش‌های خارجی ممکن است بر موقعیت و جهت عملگر نهایی تأثیر گذارد و لذا نمی‌توان با استفاده از طول کابل‌ها موقعیت و جهت آن را مشخص کرد. بدین ترتیب به یک نیروی منفعل شبیه جاذبه نیاز خواهد بود. در این‌گونه ربات‌ها استفاده از تعداد کمتر کابل‌ها سبب سادگی بیشتر و بزرگ‌تر شدن فضای کاری نسبت به حالت قبل می‌گردد که در نتیجه مانند آنچه در بندرگاه‌ها برای جابه‌جایی بار مورد استفاده است، اغلب ربات‌های مورد استفاده مخصوصاً در حالتی‌که فضای کاری بزرگ مورد نیاز است از نوع نیمه‌مقیدند.

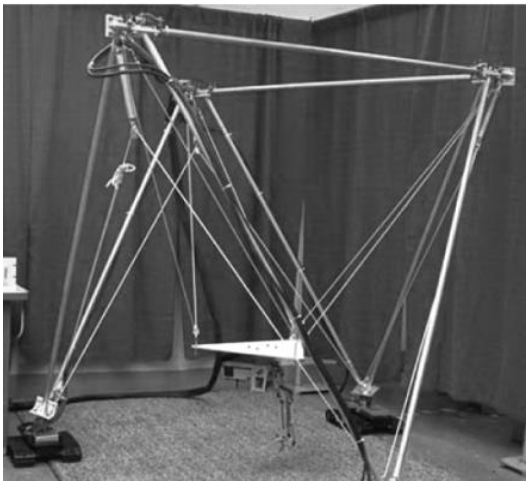
۳. موارد کاربرد

ربات‌های موازی کابلی در زمینه‌های متنوعی چون کاربردهای صنعتی مانند حمل بار [۷]، دستگاه‌های لمسی [۸ – ۹]، کاربردهای تبلیغاتی و انتقال اطلاعات مانند فیلمبرداری از فضاهای بزرگ و تنظیم رادیوتلسکوپ‌ها، کاربردهای پزشکی مانند توانبخشی و کمک در انجام اعمال جراحی و نظایر آن ایفای نقش می‌کنند [۱۰]. در دههٔ ۱۹۸۰ م، انجمن ملی استاندارد و فناوری[۱۲]، به‌منظور جابه‌جایی بار در لنگرگاه‌ها و بندرها نمونه‌ای اولیه[۱۳] از یک ربات تحقیقاتی کابل – آویز به نام ربوکِرین[۱۴] را طراحی کرد [۱۱]. این طرح با عنوان طرحی نوین برای بازوهای موازی ماهر، پایه و اساس کار بسیاری از محققان قرار گرفت تا جایی‌که امروز نمونه‌های بهبودیافتهٔ آن در صنایع بسیار حساس همچون حمل‌ونقل جنگ‌افزارهایی مثل انواع خمپاره و راکت و نظایر آن به‌کار می‌روند [۱۲]. در شکل ۴ نمایی از یک نمونهٔ تحقیقاتی این نوع ربات نمایش داده شده است. روبوکـرین از نوع ربات‌های موازی کابلی

نیمه‌مقید است و ساختاری مشابه سازوگار شش درجه آزادی استوارت دارد؛ با این تفاوت که شش کابل متصل به موتورهای الکتریکی جایگزین محرک‌های هیدرولیکی شده و در نتیجه کل ساختار به‌صورت وارون قرار گرفته است (شکل ۵). این ربات ضمن آنکه ویژگی‌هایی چون پایداری در چرخش، نوسانات و خطای کمتر از چند میلی‌متر در مکان‌یابی و دقتی در حدود یک درجه در جهت‌یابی را داراست، امکان کنترل نیرو و گشتاور و اعمال نیرو به پیرامون را نیز فراهم می‌سازد. همچنین کاهش خدمه و کارگران از سه یا چهار نفر به صفر یا یک نفر و در نهایت مصون‌ماندن از مخاطرات انسانی احتمالی از دیگر مزایای این ربات است [۱۱].



شکل۴. ربات موازی کابلی ربوکرین [۱۳]



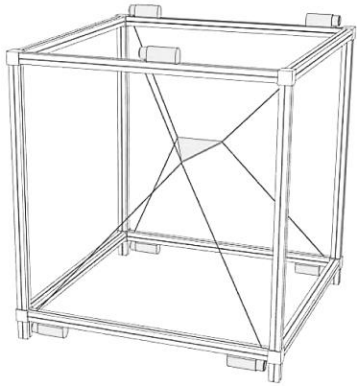
شکل ۵. نمایی از ربات ربوکرین [۱۲]

ربات موازی سجستا[۱۵] با هفت عملگر کابلی از دیگر ربات‌های موازی کابلی است که طراحی آن در حدود سال ۱۹۹۵ م در دستور کار مرکز مکاترونیک دانشگاه دویسبورگ ایسن[۱۶] قرار گرفت. از ویژگی‌های این ربات می‌توان به نحوهٔ قرارگیری کابل‌ها اشاره کرد، به‌نحوی‌که سعی شده است حتی‌الامکان از برخورد کابل‌ها با هم، عملگر نهایی و محیط اجتناب شود [۱۴]. هدف از طراحی و ساخت این ربات، انجام تحقیقات دربارهٔ افزایش سرعت عملکرد و یافتن روش‌های قابل اعتماد برای محاسبهٔ فضای کاری بوده است [۱۵]. از دیگر اهداف این پروژه می‌توان به توسعهٔ مفاهیم کنترل مقاوم و آزمون الگوریتم‌های کنترل در حرکات سریع اشاره کرد [۱۶]. پس از آزمایش‌های متعدد، اعتبارسنجی میان نتایج عملی و نظری برای سیستم نشان داد که می‌تواند به شتابی حدود ۱۰ برابر گرانش و سرعتی برابر ۱۰ متر بر ثانیه برسد [۱۷].

ربات اسکای‌کم[۱۷] نمونهٔ دیگری از ربات‌های کابلی است که به‌منظور فیلمبرداری در استادیوم‌هاط ورزشی و مناطق باز ابداع شده است. بدین ترتیب با تجهیز عملگر نهایی به یک دوربین، فیلمبرداری از تمام نقاط زمین از زوایای مختلف ممکن شده است. در شکل ۷ نمونه‌ای از این ربات مجهز به دوربین مشاهده می‌شود.

زمینهٔ توانبخشی، یکی دیگر از زمینه‌های مطالعاتی پژوهشگران است که در این راستا ربات‌ها با ساختارهای متفاوتی ساخته شده‌اند که از آن جمله می‌توان به کار تحقیقاتی استرینگ – من[۱۸] اشاره کرد. این ربات، که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، به‌منظور بهبود وضعیت حرکتی و تمرینات متنوع توانبخشی در سال ۲۰۰۳ م در کشور آلمان طراحی و ساخته شده است [۱۹].

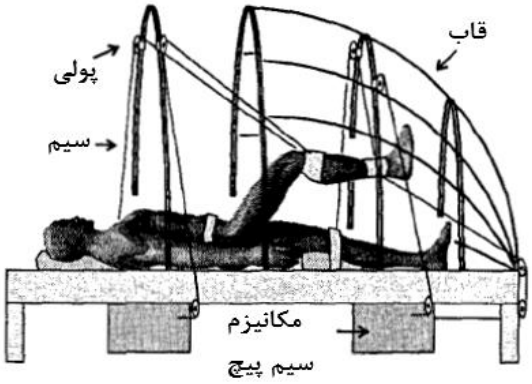
مطابق شکل‌های ۹ الی ۱۱، طرح‌های دیگری از ربات‌های کابلی با قابلیت توانبخشی نیز طراحی و ساخته شده است که از آن جمله می‌توان به ربات طراحی‌شده برای بهبود وضعیت حرکتی زانوها و لگن توسط هوما [۲۰]، ربات‌های نریبوت[۱۹] و ماریبوت[۲۰] ارائه‌شده توسط رزتی و همکارانش و ربات مک‌آرم[۲۱] که در آزمایشگاه آی. ای. آی.[۲۲] برای توانبخشی اندام فوقانی طراحی و ساخته شده‌اند [۲۱ – ۲۲] اشاره کرد.



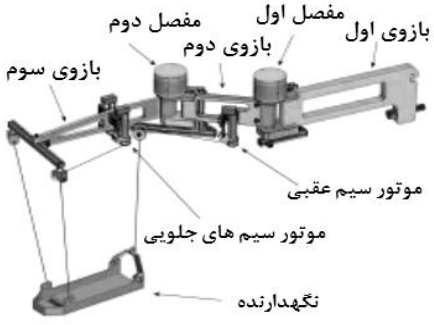
شکل۶. ربات موازی کابلی سجستا با هفت عملگر کابلی [۱۴]

شکل۷. نمایی از ربات اسکای کم [۱۸]

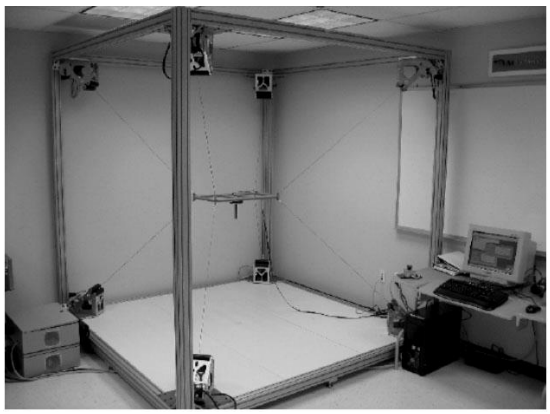
شکل۸. نمونه کاربردی ربات موازی کابلی استرینگ – من [۱۹]



شکل۹. ربات طراحی‌شده برای توانبخشی پاها و لگن [۲۰]

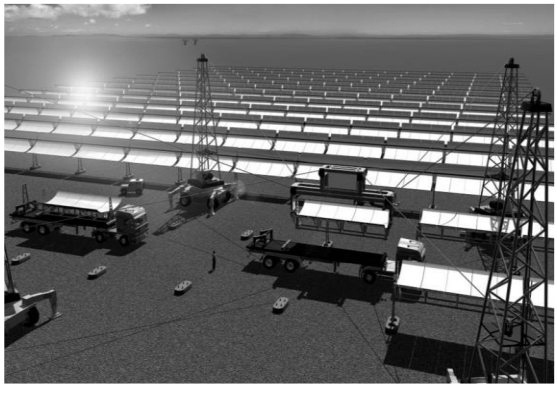


شکل۱۰. ربات طراحی‌شده برای توانبخشی اندام فوقانی [۲۱]

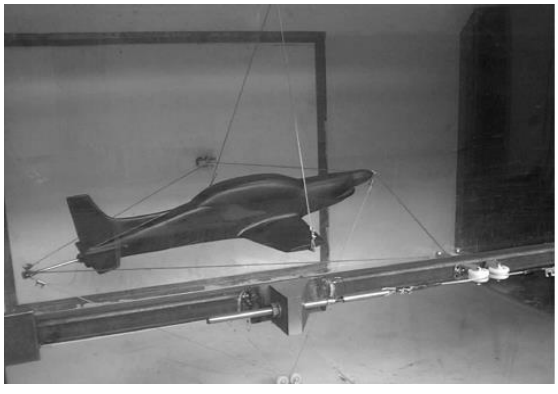


شکل۱۱. ربات مک‌آرم برای توانبخشی اندام فوقانی [۲۲]

از ربات‌های موازی کابلی می‌توان در زمینهٔ نصب خودکار نیروگاه‌های خورشیدی نیز بهره برد. ویژگی‌های منحصر بفرد این نسل از ربات‌ها سبب شده است تا بتوان با قابلیت اطمینان بالا و با سرعتی به‌مراتب بالاتر نسبت به سایر گونه‌های ربات به این مهم نائل آمد [۳]. آزمون تونل باد روشی متداول جهت به‌دست آوردن ضرایب آئرودینامیکی هواپیماست. نکتهٔ حائز اهمیت در این آزمایش آن است که همواره مدل شماتیک هواپیما باید توسط سیستم تعلیق در مسیر رژیم جریان مد نظر قرار گیرد. سیستم نگه‌دارندهٔ مدل مورد آزمایش تأثیر بسیار زیادی بر قابلیت اطمینان نتیجه آزمون دارد؛ از همین‌رو کوچکترین خطا در این سیستم سبب بروز خطایی به‌مراتب بزرگتر در نتایج خواهد داشت. سیستم تعلیق متداولی که تا سال‌ها پیش مورد استفاده قرار می‌گرفت، متشکل از قطعه‌ای به نام استرات بود که بر نحوهٔ توزیع رژیم جریان سیال اثر منفی می‌گذاشت. این‌گونه از سیستم‌های تعلیق، که صلب نامیده می‌شدند، دقت مناسبی نداشتند. امروزه اما، پژوهشگران با بهره‌گیری از گونه‌ای از ربات‌های کابلی تحت عنوان سیستم تعلیق موازی کابلی[۲۳] توانسته‌اند به نتایجی به‌مراتب دقیق‌تر و با قابلیت اطمینان بهتر دست یابند [۲۳].



شکل۱۲. ربات کابلی متحرک به‌کار گرفته شده در زمینهٔ نصب خودکار نیروگاه خورشیدی [۳]



شکل۱۳. سیستم تعلیق مورد استفاده در تونل باد با بهره‌گیری از ایدهٔ ربات‌های موازی کابلی [۲۳]

۴. جمع‌بندی

در این مقاله نوع جدیدی از ربات‌ها تحت عنوان ربات‌های موازی کابلی معرفی و دسته‌بندی کلی آنها مطرح شد. همچنین مشاهده شد که این دسته از ربات‌ها با پیکره‌بندی‌های متنوع دارای کاربردهای متنوعی از پزشکی و توانبخشی تا کاربردهای صنعتی در حمل‌ونقل و محیط‌های با فضای کاری بزرگ می‌باشند.

۵. مآخذ

[1] Bruckmann T., A. Pott. *Cable-Driven Parallel Robots, The proceedings of the First International Conference on Cable Robot*, Springer, 2013, Germany, Vol. 12, p. vii.

[2] Behzadpour S., A. Khajepour. "A New Cable-Based Parallel Robot with Three Degrees of Freedom." *Multibody System Dynamics*, 2005, Vol. 13, pp. 371-383.

[3] Pott A. *Cable-driven parallel robot for automated handling of components in all dimensions, In: Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation*, Brochure 300/354e, Stuttgart 2010.

[4] Roberts R., T. Graham, T. Lippitt. "On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable-suspended robots." *Journal of Robotic Systems*, 1998, Vol. 15, No. 10, pp. 581–597.

[5] Verhoeven R., "Analysis of the Workspace of Tendon-Based Stewart Platforms," Ph.D. thesis, University of Duisburg-Essen, 2004.

[6] Bosscher P., I. Ebert-Uphoff, P. A. Voglewed. On the Connections between Cable-Driven Robots, Parallel Manipulators and Grasping." *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* 2004, New Orleans, pp. 4521-4526.

[7] Ghosal A., B. Ravani, *Differential geometric analysis of singularities of point trajectories if serial and parallel manipulators*, Sept.13-16, 1998, Atlanta, Georgia, USA.

[8] Morizono T., K. Kurahashi, S. Kawamura. "Realization of a virtual sports training system with parallel wire mechanism." *Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, New Mexico, April 1997, pp. 3025–3030.

[9] Williams II, R.L. "Cable–suspended haptic interface." *Journal of Virtual Reality*, 3(3), 1998, pp. 13-21.

[10] Homma K., O. Fukuda, Y. Nagata. "Study of a wire-driven leg rehabilitation system." *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 2002, Lausanne, Switzerland, pp. 1451–1456.

[11] Albus J., R. Bostelman, N. Dagalakis. "The NIST Robocrane." *Journal of Robotic Systems*, 1993, Vol. 97, No. 3, pp. 709-724.

[12] Landsbergera S. E., T. B.Sheridan. "A new design for parallel link manipulator." *IEEE Proceedings of the International Conference on Cybernetics and Society*, 1985, pp. 14-812.

[13] National Institute of Standards and Technology (NIST), RoboCrane Project, http://www.nist.gov/el/isd accessed October 20, 2012.

[14] Hiller M., S. Fang, S. Mielczarek, R. Verhoeven, and D. Franitza. "Design, analysis and realization of tendon-based parallel manipulators." *Mechanism and Machine Theory*, 40, 2005, pp. 429-445.

[15] Verhoeven R., M. Hiller. "Estimating the controllable workspace of tendonbased Stewart platforms." *Proceedings of the ARK'00: 7th International Symposium on Advances in Robot Kinematics*, 2000, Portoroz, Slovenia, pp. 277–284.

[16] Mikelsons L., T. Bruckmann, M. Hiller, D. Schramm. "A real-time capable force calculation algorithm for redundant tendon-based parallel manipulators." *Proceedings on IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008, pp. 3869-3874.

[17] Hiller M., S. Fang, C. Hass, T. Bruckmann. "Analysis, realization and application of the tendon-based parallel robot segesta," In Last, P., Budde, C., and Wahl, F., editors, Robotic Systems for Handling and Assembly, volume 2 of International Colloquium of the Collaborative Research Center SFB 562, 2005, Braunschweig, Germany. Aachen, Shaker Verlag, pp. 185–202.

[18] SkyCam at Stanford, http://upload.wikimedia.org accessed June 2, 2013.

[19] Surdilovic D., R. Bernhardt, "STRING MAN: a New Wire-Robot Gait Rehabilitation." *Proceeding of the IEEE, International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, New Orleans, 2004, pp. 2031-2036.

[20] Homma K., O. Fukuda, Y. Nagata, J. Sugawara, M. Usuba. "A Wire-Driven Leg Rehabilitation System: Development of a 4-D.O.F. Experimental System." *Proceedings of the 2003 IEEWASME International Conference on Advanced Inteligent Mechatronics* (AIM 2003), 2003, pp. 1668-1673.

[21] Rosati G., P. Gallina, S. Masiero, A. Rossi. "Design of a New 5 D.O.F. Wire-Based Robot for Rehabilitation." *proceeding of the 2005 IEEE, 9th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Chicago, 2005, pp. 430-433.

[22] Aghazadeh F. "Evaluation of Suited and Unsuited Human Functional Strength using Multi Purpose, Multiaxial Isokinetic Dynamometer", Final Report of NASA Faculty Fellowship Program of 2004, Johnson Space Center, 2004.

[23] Zheng Y., Q. Lin, X. Liu. "A Wire-Driven Parallel Suspension System with 8 Wires (WDPSS-8) for Low-Speed Wind Tunnels." *Robot Manipulators Trends and Development*, 2010.

پی‌نوشت

1. parallel cable-based robots
2. actuator
3. moving platform
4. cable-based
5. cable-suspended
6. end-effector
7. Betabot
8. University of Waterloo, https://uwaterloo.ca (accessed June 04, 2014)
9. fully-constrained
10. under-constrained
11. actuator redundancy
12. National Institute of Standards and Technology (NIST)
13. prototype
14. robocrane
15. Seilgetriebene Stewart-Plattformen in Theorie und Anwendung (SEGESTA)
16. Duisburg-Essen University, https://www.uni-due.de (accessed June 04, 2014)
17. Sky-Cam
18. String-Man
19. NeReBot
20. MariBot
21. Multi-Axis Cartesian-based Arm Rehabilation Machine, MACARM
22. Inteligent Automation Incorprated
23. Wire-Driven Parallel Suspension System