مقاله

طراحی و ساخت ترمز اختلافی قابل برنامه‌ریزی برای سیستم‌های رباتیک و هپتیک غیرفعال

ساناز جباری*
دانشجوی کارشناسی ارشد مکاترونیک
دانشگاه اراک
s-jabbari@arshad.araku.ac.ir

مهدی مدبری‌فر
استادیار گروه مهندسی مکانیک
دانشگاه اراک
m-modabberifar@araku.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۲۵

چکیده

این مقاله یک سیستم جدید ترمز اختلافی قابل برنامه‌ریزی با طراحی ساده را معرفی می کند؛ سیستمی که به‌طور گسترده‌ای بر روی سیستم‌های رباتیک و هپتیکی غیر فعال قابل استفاده است. این ترمز توانایی ایجاد نیروهای برخورد با سفتی بالا را بدون نیاز به اندازه‌گیری نیرو دارد. این سیستم براساس یک بازوی مکانیکی[1] دو درجه آزادی چرخشی است که از ترمزهای قابل برنامه‌ریزی مغناطیسی استفاده می‌کند. در این مقاله ابتدا مفهوم ترمز اختلافی قابل برنامه‌ریزی بیان و سپس کاربرد آن در سیستم‌های رباتیک و هپتیکی بررسی می‌شود. در ادامه، نمونه‌ای از ترمز پیشنهادی ساخته و عملکرد آن بررسی می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که این ترمز پیشنهادی با دقت قابل قبولی توانایی محدودسازی سیستم‌های هپتیکی را در زوایای مورد نظر دارد.

واژگان کلیدی: هپتیک غیرفعال، رباتیک، ترمز قابل برنامه‌ریزی

۱. مقدمه

سیستم‌های رباتیک را می‌توان به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی کرد که نقشی غیرفعال داشته باشند. مثلا! به‌جای اینکه کنش داشته باشند، از خود واکنش نشان دهند. این ربات‌ها در صورت عملکرد بد، به‌دلیل ویژگی ایمن خود، تهدیدهای ناشی از عملکرد ناصحیح را بی‌خطر می‌کنند. یک طراحی براساس اجزای غیرفعال مانند کلاچ‌ها و ترمزها در توسعهٔ لینک‌های ماشین - انسان، که در آنها ربات‌ها در فاصله‌ای نزدیک از اپراتورها کار می‌کنند، لازم و ضروری است. ربات‌های غیرفعال برای کاربری‌های پزشکی که در آنها ایمنی طراحی بسیار مهم است، مانند ربات‌های دستیار جراح و سیستم‌های هپتیکی که جهت آموزش استفاده می‌شوند (مانند انواع سیمیلاتورها)، مناسب یافته شده‌اند. یک سازوکار فرمان براساس انتقال متغیر پیوسته که به مفهوم "ماشین حرکات انسان" تجسم بخشید در مأخذ [۱]

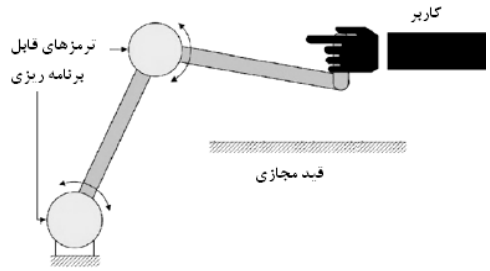
اجرا شده است. در این پژوهش یک سازوکار پنج اتصاله در کنار یک الگوریتم کنترلی خاص حرکت انتهای ربات ، که به‌وسیلهٔ یک کاربر ایجاد شده است، را در امتداد مسیری از قبل برنامه‌ریزی شده هدایت می‌کند. این هدایت به‌وسیلهٔ یکسری پولی قابل کنترل، که نسبت کاهش هر کدام از آنها با تغییر شعاع هر چرخ به‌صورت بلادرنگ قابل تنظیم است، انجام می‌شود. با این‌حال، این سیستم به‌دلیل عدم استفاده از سازوکارهای قفل‌کننده مانند ترمزها قادر به تهیهٔ بازخورد سفت نیست. این بدان معناست که نمی‌تواند از برخورد با "دیوارهای مجازی" جلوگیری کند. این دیوارهای مجازی محدودکننده‌هایی قابل برنامه‌ریزی‌اند که حرکات ربات‌ها را در محدودهٔ خاصی کنترل می‌کنند. ربات اصلاح مسیر غیر فعال دیگری به نام P-TER استراتژی کنترلی مشابهی با استفاده از ترمزها و کلاچ‌ها را پیاده می‌کند. این ربات به‌منظور هدایت حرکت انتهای تأثیرگذار بازوی ربات در امتداد یک مسیر قابل برنامه‌ریزی با نیروی ورودی دلخواه طراحی شده است [۲]. در این ربات سازوکار پنج میله‌ای اجازهٔ حرکت دو درجه آزادی را به ربات می‌دهد. این ربات از ترمزها جهت برداشتن انرژی از سیستم و از کلاچ‌ها با یک چیدمان چرخ‌دندهٔ تفاضلی جهت انتقال انرژی بین مفاصل استفاده می‌کند. یکی از مزیت این سیستم بر سیستم‌های قبلی این است که وقتی قیدهای قابل برنامه‌ریزی اعمال می‌شوند، قادر به تولید مجدد نیروهایی، که حین برخوردهای بین سطوح سخت ایجاد می‌شوند، می باشد. اضافه‌شدن یک سازوکار قفل‌کننده به ربات به قیمت استفاده از یک حسگر نیرو جهت احساس امتداد نیروی اعمال‌شده توسط اپراتور امکان‌پذیر است.

یک دستگاه هپتیکی غیرفعال به نام ماشین با قیدهای قابل برنامه‌ریزی[۲] با استفاده از المان‌های همه‌جهته در مأخذ [۳] اجرا شده است. مثالی از این المان‌ها چرخ فرمان است. این پیکربندی حرکت مقید دو بعدی را میسر می‌سازد. در این سیستم چرخ آزاد است تا در پاسخ به نیروی اعمال‌شده به دسته توسط کاربر بچرخد. در مواجهه با یک دیوار مجازی، چرخ به‌سادگی مماس به دیوار رانده می‌شود که از حرکت بیشتر در جهت عمود به دیوار بدون تأثیرگذاری بر حرکات مماسی جلوگیری می‌کند. در این پژوهش، نویسندگان پیشنهاد کرده‌اند که در طراحی چرخ‌هایی می‌توانند اضافه شوند تا ارگونومی دسته بهبود یابد، اما چنین تغییری این دستگاه را به قیدهای دو بعدی محدود می‌کند و برای کاربری‌های سه بعدی مناسب نیست.

موفق‌ترین اجرای درست یک ربات غیرفعال PADyC (بازوی غیرفعال با قیدهای دینامیک) است که حرکت مقید یک ابزار با در نظر گرفتن وظیفه‌ای مشخص در زمینهٔ جراحی را اجازه می‌دهد [۴]. این سیستم براساس یکسری مفاصل مکانیکی نوین است. هرکدام از آنها شامل دو چرخ و دو موتور الکتریکی هستند. اجرای این سیستم منتهی به چهار حالت مستقل قابل برنامه‌ریزی حرکتی می‌شود که شامل حرکت آزادانه در هر دو جهت، حرکت مقید در یک جهت (ساعتگرد یا پادساعتگرد) و بدون حرکت می‌باشد. یک مزیت آشکار سیستم PADyC این است که می‌تواند سرعت دورانی مفاصل را محدود کرده، در نتیجه انتهای بازوی روبات را در امتداد مسیری ویژه هدایت کند، حال آنکه قادر به انجام هیچ حرکت اتومات دیگری نیست. سازوکار قفل‌کننده بر مبنای چرخ آزاد شامل دیسک‌هایی خاص و شکاف‌هایی پرشده از ساچمه‌های فلزی است. چون ساچمه‌ها بین دیوارهٔ خارجی و داخلی قفل می‌شوند، از چرخش محور در یک امتداد جلوگیری می‌شود، در حالی‌که چرخش در جهت دیگر آزاد است. اجرای این فناوری به‌دلیل استفاده از دو دیسک و دو موتور بسیار پیچیده است.

بر مبنای این مثال‌ها، ربات‌های غیرفعال بر اساس عملکردشان به سه دسته تقسیم می‌شوند: دستهٔ نخست سیستم‌های راهنمای غیرفعال است که به انتهای کاری بازوی ربات‌ها فرمان می‌دهد در مسیرهایی مشخص حرکت کند، اما نمی‌تواند بازخورد دیواره‌های سفت را شبیه‌سازی کند. دستهٔ دوم سیستم‌های محدودکنندهٔ حرکت است که شامل تعدادی سازوکار قفل‌کننده است که از

ترمزها استفاده می‌کنند (شکل ۱). قفل‌کننده‌های مفاصل حرکت انتهای بازوی ربات را محدود می‌کنند، اما به حسگر نیرو جهت آشکارسازی اثر متقابل بین کاربر و دسته نیاز دارند. همچنین هزینهٔ این حسگر و مدار الکترونیکی آن گران است و این یکی از معایب مهم این دسته از ربات‌ها می‌باشد. دستهٔ سوم سیستم‌هایی هستند که از کلاچ‌های قابل برنامه‌ریزی استفاده می‌کنند که تنها مثال این دسته سازوکارهای قفل‌شونده‌ای است که در PADyC اجرا می‌شود. کنترل و مونتاژ این سیستم چرخ آزاد مبنا پیچیده است و نتایج نشان داده‌اند که این سیستم به‌طور ویژه‌ای به پدیده‌های وابسته به زمان مانند چرخ‌دنده حساس است و لقی این سازوکار را در مدت استفاده افزایش می‌دهد.

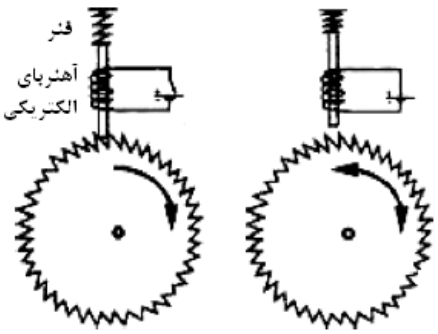


شکل ۱. لینک دوتایی یک دستگاه هپتیک

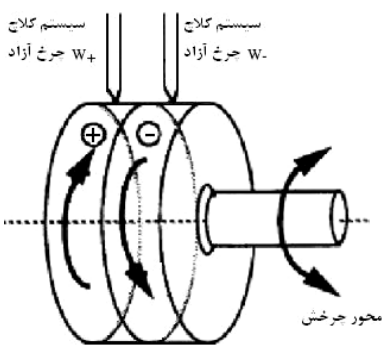
این مقاله یک طرح جدید ترمز را ارائه می‌دهد که توسعه سیستم‌های مربوط به گروه دوم دسته‌بندی ربات‌ها را تسهیل می‌کند، اما این ترمز می‌تواند به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شود که عملکردی مشابه با سیستم‌های دستهٔ سوم داشته باشد. این ترمز طرحی ساده و کم‌حجم دارد و به حسگر نیرو نیازی ندارد. قبل از طرح این ایده، نتایج اولیه‌ای که در یک بازوی مکانیکی دو درجه آزادی چرخشی - چرخشی با استفاده از این ترمز اختلافی قابل برنامه‌ریزی جهت دستیابی به قیدهای صفحه‌ای و دورانی در فضای دو بعدی به‌دست می‌آید بیان می‌شود.

۲. مفهوم ترمز اختلافی قابل برنامه‌ریزی

ترمز وسیله‌ای مکانیکی است برای کاهش یا توقف حرکت به‌وسیلهٔ کاهش انرژی بین اجزای متحرک (عمدتاً توسط اصطکاک). عیب عمدهٔ ترمزهای معمولی در یک مفصل در حال چرخش این است که وقتی تحریک می‌شود بر چرخش در هر دو جهت تأثیر می‌گذارد (یعنی هم در جهت عقربه‌های ساعت هم خلاف آن). بنابراین تنها دو حالت دارد: حرکت چرخشی آزاد و عدم حرکت. در توسعه‌ای که در سیستم PADyC داده شد، [۵] یک سازوکار ترمز می‌تواند به‌وسیلهٔ فناوری جغجغه‌ای بهبود یافته و مطابق شکل ۲ امکان حرکت در تنها یک جهت یا هر دو جهت را داشته باشد. یک مفصل با دو قطعهٔ قفل‌کنندهٔ جغجغه‌ای در یک پیکربندی پشت به پشت مطابق شکل ۳ تبدیل به یک ترمز قابل برنامه‌ریزی چهار حالته می‌شود: حرکت چرخشی آزادانه وقتی هر دو کلاچ غیرفعال‌اند، حرکت در یک جهت وقتی فقط یکی از کلاچ‌ها غیرفعال است و بدون حرکت وقتی که هر دو کلاچ فعال‌اند. عیب عمدهٔ این سیستم مربوط به طبیعت گسستهٔ حرکت مقید است که رزولوشن آن به‌طور مستقیم به تعداد دندانه‌ها در هر چرخ وابسته است.

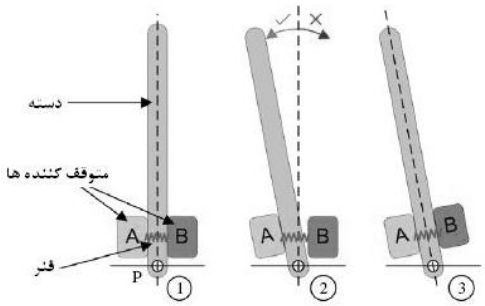


شکل۲. سیستم کلاچ پیشنهادی در مأخذ [۵]

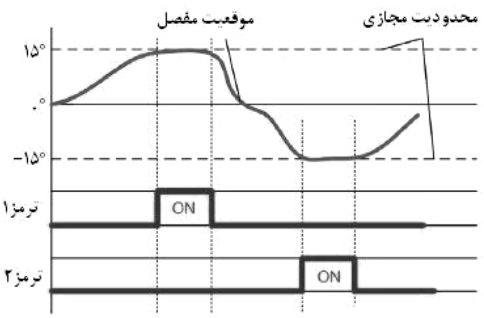


شکل ۳. یک محور مقید [۵]

بر اساس این اصل، در این مقاله یک ترمز ساده‌تر و قابل برنامه‌ریزی پیشنهاد می‌شود که مفهوم آن در دیاگرام شکل ۴ آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود، لینک می‌تواند حول نقطهٔ P دوران کند، در حالی‌که دو متوقف‌کنندهٔ مستقل روی هر دو سطح رابط به‌وسیلهٔ یک فنر به یکدیگر نگه داشته شده‌اند. این دو متوقف‌کننده به‌همراه رابط پیوسته حرکت می‌کنند و این اطمینان حاصل می‌شود که عمل ترمز در تمامی محدودهٔ عملکردی مفصل قابل انجام است. ترمز در یک جهت با تحریک متوقف‌کنندهٔ متناسب انجام می‌گیرد که از هرگونه حرکت اضافه در آن جهت جلوگیری شود. موقعیت دورانی این لینک باید به‌طور دقیق (از طریق یک انکودر نوری) حس شود تا این اطمینان حاصل گردد که حرکت دورشدن از قید سریعاً آشکار می‌شود. فعال و غیرفعال‌سازی متوقف‌کننده‌ها باید توسط یک کنترلر مناسب کنترل شود.



شکل ۴. مفهوم ترمز قابل برنامه ریزی جدید



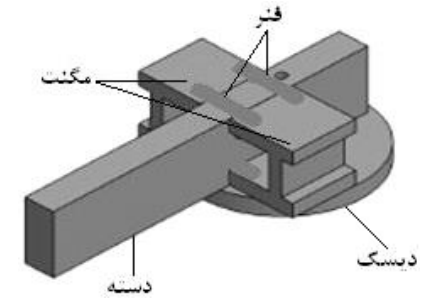
شکل ۵. دیاگرام عملکردی ترمز قابل برنامه‌ریزی

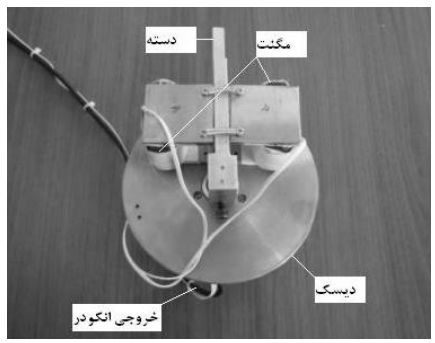
مونتاژ لینک باید به‌گونه‌ای انجام شود که حرکت آزادانه برای تمامی موقعیت‌های زاویه‌ای کمتر یا مساوی با ۹۰ درجه امکان‌پذیر باشد. برای اجرای این قید، موقعیت چرخشی رابط حس شده و اگر به موقعیت بحرانی زاویهٔ ممنوعه برسد، با فعال‌شدن متوقف‌کننده B (شکل ۴ دیاگرام ۲) چرخش رابط را در جهت ساعتگرد متوقف خواهد کرد، در حالی‌که حرکت پادساعتگرد همچنان میسر است، متوقف می‌شود. اگر این رابط بعداً در جهت پادساعتگرد بچرخد متوقف‌کنندهٔ B غیرفعال می‌شود. متوقف‌کننده غیرفعال شده توسط فنر به جای خود روی رابط برمی‌گردد. کوپلینگ بین متوقف‌کننده‌ها و لینک طوری طراحی شده است که حرکت دورشدن از یک توقف سفت ممکن است، که این طراحی اجازه حس‌کردن حرکت کاربر را بدون نیاز به اندازه‌گیری نیرو ممکن می‌سازد. یک مثال از محدودسازی حرکت رابط در شکل ۵ نمایش داده شده است. در این شکل حرکت زاویه‌ای رابط در بازهٔ ۱۵± درجه محدود شده است؛ یعنی لینک مجاز به حرکت آزادانه در این محدوده است، مگر اینکه به مرزهای محدودهٔ مجاز برسد. این مکانیزم توانایی انجام چهار حالت عملیاتی را دارد: اول، زمانی‌که متوقف‌کننده‌ها تحریک نشده‌اند و رابط آزادانه می‌تواند حول نقطهٔ P در شکل چهار گردش کند. دوم، هر دو متوقف‌کننده فعال شده که از حرکت رابط در دو جهت ساعتگرد و پادساعتگرد جلوگیری می‌کند. سوم، فقط متوقف‌کننده B فعال است (شکل ۴ دیاگرام ۲) که از حرکت ساعتگرد جلوگیری می‌کند در حالی‌که حرکت پادساعتگرد همچنان آزاد است. چهارم، تنها متوقف‌کننده A فعال است که حرکت در جهت پادساعتگرد را ممانعت کرده، اما حرکت ساعتگرد آزاد است. این رفتار چهارحالته اجازهٔ ایجاد یک واسطهٔ مکانیکی را به‌نحوی می‌دهد که ترمزها مطابق با اعمال اپراتور درگیر می‌شوند بدون اینکه نیازی به حسگر نیرو باشد.

۳. ساخت ترمز و مفهوم سازوکار دو درجه آزادی

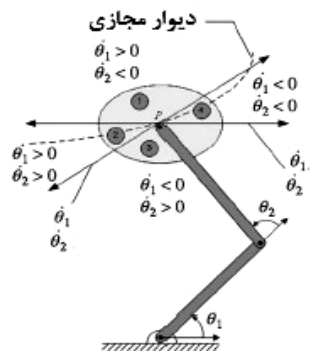
به‌منظور معرفی مفهوم ترمز قابل برنامه‌ریزی براساس متوقف‌کننده‌های مکانیکی، یک نمونه بر اساس محرکه‌های

مغناطیسی ساخته و تست شد. مدل و نمونهٔ ساخته‌شده مطابق شکل ۶ است. در این نمونه، متوقف‌کننده‌ها بلوک‌های فولادی C شکلی هستند که با سیم‌های لاکی سیم‌پیچی شده، وقتی با یک جریان الکتریکی تحریک می‌شوند، نیروی مغناطیسی بزرگی ایجاد می‌کنند که سبب جذب و چسبیدن مگنت‌ها به دیسک زیرین شده، از حرکت چرخشی لینک جلوگیری می‌کنند. این دو بلوک توسط فنرهایی به یکدیگر متصل شده و آنها را در موقعیت آماده نگه می‌دارند. برنامه‌ریزی تحریک سیم‌پیچ‌ها توسط یک میکرو کنترلر AVR و یک مدار فرمان انجام می‌پذیرد.





شکل ٦. مدل و نمونهٔ ساخته‌شدهٔ ترمز اختلافی قابل برنامه‌ریزی



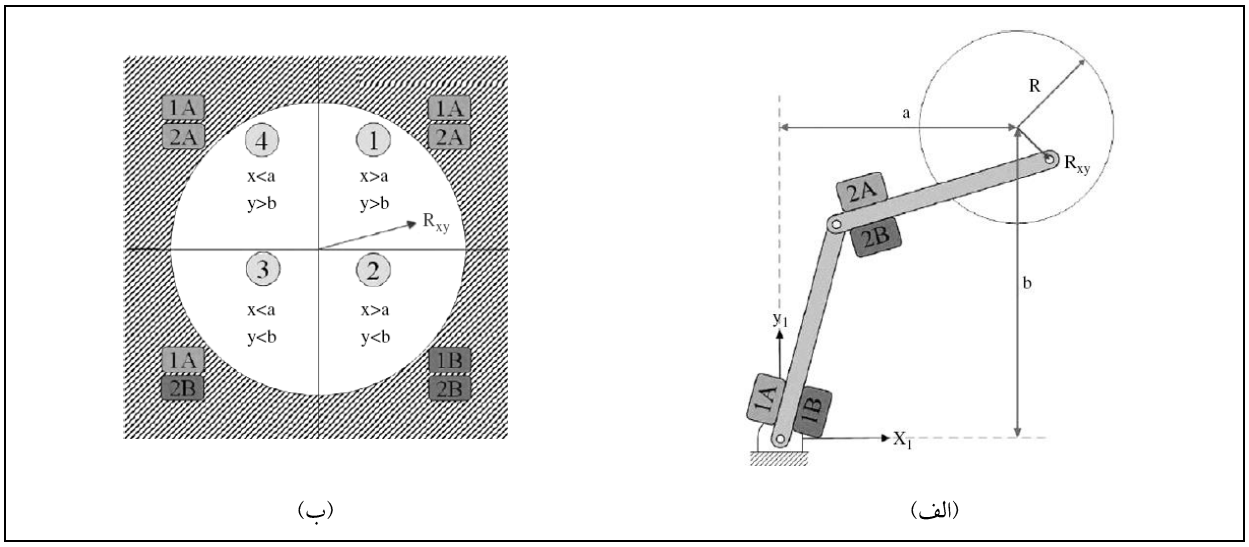
شکل ۷. حرکات نقطهٔ انتهایی P در یک سازوکار مفصلی دوتایی

برای ارزیابی عملکرد سازوکار ترمز قابل برنامه‌ریزی جدید در چارچوب گسترده‌تر از کنترل رباتیک، یک بازوی مکانیکی دو لینک معمولی RR در نظر گرفته می‌شود که مفاصل آن به ترمزهای جدید پیشنهادی مجهز است. حرکت انتهای مؤثر P به سرعت مفاصل وابسته است که ۸ سناریوی حرکتی دارد (شکل ۷). چهار سناریوی نخست در امتداد دو خط جداکننده‌ای هستند که هر خط از نقطهٔ انتهایی عبور می‌کند و بیانگر حرکت بالقوهٔ ایجادشده در صورت قفل‌شدن یکی از مفاصل است. چهار ناحیهٔ سرعت بالقوه دیگر (یعنی ۱ و ۲ و ۳ و ۴ در شکل ۷) آنهایی هستند که بین این خطوط قرار دارند و بیانگر نواحی هستند که در صورت چرخش آزادانه دو مفصل در دسترس قرار می‌گیرند. دستگاه‌های هپتیکی بازخورد نیرو تهیه می‌کنند و ارزیابی یک دستگاه هپتیک روی یک دیوار مجازی کاری متداول است. دیوار مجازی یک قید مجازی است که نیروهای انتهای بازوی ربات روی آن تکیه دارند. شکل ۷ منطق محدودیت برای دیوارهٔ مجازی، که در آن P بسیار به دیوار مجازی نزدیک است، را نشان می‌دهد. در این مورد خاص روشن است که حرکت انتهای مؤثر بازوی ربات به مناطق ۱، ۲ و ۴ ممکن است که به نفوذ آن به دیوار منتج شود، بنابراین تنها حرکات P در جهت منطقهٔ ۳ باید اجازه داده شود. برای اجرای چنین محدودیتی، باید محدودیت‌های مفصلی زیر برای ترمزها برنامه‌ریزی شود:

$$\dot{\theta}_1 < 0 \qquad (۱)$$
$$\dot{\theta}_2 > 0$$

نمونه‌ای دیگر از فضای کاری با یک قید دایروی در شکل ۸ قسمت الف نمایش داده شده است. منطق کنترلی برای قید دایروی در شکل۸ قسمت ب بیان شده است. این شکل نشان می‌دهد که چگونه نقطهٔ انتهایی لینک در دایره‌ای به شعاع R محدود می‌شود. همچنین شکل۸ قسمت ب نشان می‌دهد که دایرهٔ مجازی به چهار ناحیه تقسیم می‌شود که ترمزهای قابل برنامه‌ریزی باید به‌صورت اختلافی تحریک شوند تا موقعیت نقطهٔ انتهایی را داخل دایره محدود کنند.

چنین محدودیتی به شکل گرافیکی در شکل ۸ نمایش داده شده است. در این حالت از کاربر خواسته می‌شود که داخل دایره نفوذ کند، در حالی‌که کنترلر دستگاه حرکت انتهای مؤثر بازوی ربات را محدود می‌کند.



(الف) (ب)

شکل ۸ ترتیب فعال سازی ترمزها برای یک قید دایروی. الف) مفهوم قید دایروی
ب) نحوهٔ فعال‌شدن مگنت ترمزها، برای محدودکردن حرکت انتهای بازوی ربات در یک دایره

٤. نتیجه‌گیری

رباتیک غیرفعال پتانسیل بالایی در کاربردهای پزشکی دارد. طرح‌های هپتیکی غیرفعال موجود فاقد سادگی‌اند و در نتیجه به‌ندرت در برنامه‌های کاربردی بالینی استفاده می‌شوند. این مقاله نوع جدیدی از ترمز قابل برنامه‌ریزی برای دستگاه‌های هپتیکی غیرفعال ارائه می‌کند که می‌تواند به چهار حالت برنامه‌ریزی شود. ساختار ساده‌ای دارد، ساخت آن مقرون به‌صرفه است و به اندازه‌گیری نیرو نیاز ندارد. یک نمونه با استفاده از متوقف‌کننده‌های مغناطیسی ساخته شد که می‌تواند بازخورد با سفتی محدود ایجاد کند. این ترمز جدید می‌تواند در سازوکارهایی که در آن ایمنی مهم است، مانند سازوکارهای غیرفعالی که برای ایجاد محدودیت به‌کار می‌روند، استفاده شود. همچنین، در حالی‌که در این طراحی برای یک مفصل پیچشی به اجرا درآمد، از آن می‌توان به‌راحتی در محرک خطی استفاده کرد. نهایتاً، در حالی‌که اجزای غیرفعال در کاربردهای حساس ایمنی با ارزش‌اند، این ترمز جدید را می‌توان در سیستم‌های رباتیک که در آن ایمنی زیادی مورد نیاز است به‌کار گرفت. مثلاً، ترمزهای قابل برنامه‌ریزی را می‌توان برای توقف یک سازوکار در مواقعی که به مرحلهٔ تصادم خطرناکی رسیده و یا در جهت بهبود ثبات سیستم با ترکیبی از اجزای فعال و غیرفعال استفاده کرد. هدف این پژوهش نشان‌دادن ارزش ترمز قابل برنامه‌ریزی جدید و کاربرد آن در سیستم‌های هپتیکی غیرفعال بود. این ترمز مؤثر و مقرون به صرفه است، و قادر به ارائهٔ چهار حالت کنترل بدون نیاز به یک حسگر نیرو است.

قدردانی

نویسندگان این مقاله برخود لازم می‌دانند تا از معاونت پژوهشی دانشگاه اراک، به‌دلیل حمایت مالی از این طرح، قدردانی کنند.

۵. مآخذ

[1] Surdilovic, D., R. Bernhardt, L. Zhang. "*New intelligent power-assist systems based on differential transmission*." *Robotica*, 2003, pp. 295-302.

[2] Davis, H., W. Book. *"Torque control of a redundantly actuated passive manipulator." Proceedings of the American Control Conference*, 1997, pp. 959-963.

[3] Colgate, J.E., M.A. Peshkin, W. Wannasuphoprasit. "Nonholonomic haptic display." *proceeding: IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1996, pp.539-544.

[4] Schneider, O., J. Troccaz, O. Chavanon, D. Padyc. "A synergistic robot for cardiac puncturing." *proceeding: IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2000, pp. 2883-2888.

[5] Troccaz, J., S. Lavalee, E. Hellion. "A passive arm with dynamic constraints: A solution to safety problems in medical robotics." *proceeding: IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics*, 1993, pp. 166-172.

پی‌نوشت

1. Manipulator
2 .PCM