



برنامه‌ریزی شده مستقل عملیاتی و کنترل حلقه بسته شده یک میز رباتیک نرم برای دستکاری چند شی بصورت همزمان

محمدرضا محمدیان آسیابرا^۱

^۱ کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، mohammadrezamohammadiyan28@yahoo.com

چکیده

در این مقاله، طراحی، توسعه و اعتبار سنجی یک سیستم کنترل حلقه بسته را برای یک میز رباتیک نرم ارائه می‌دهد. میز نرم می‌تواند به طور همزمان دستکاری مستقلی را برای اشیاء چندگانه فراهم کند، که مزیتی نسبت به دستگاه‌های سنتی مانند بازوهای رباتیک و سیستم‌های تسمه‌نقاله است. این میز همچنین امکان دستکاری نرم ذاتی برای اشیاء ظریف را فراهم می‌کند. به منظور اجرای وظایف اتوماسیون، یک سیستم بازخورد بینایی و یک کنترل‌کننده عملیاتی توسعه داده می‌شوند و در نمونه اولیه میز موجود ادغام می‌شوند تا یک کنترل حلقه بسته را تشکیل دهند. سیستم بازخورد بینایی تکنیک‌های پردازش تصویر را برای شناسایی موقعیت شی از تصاویر گرفته‌شده پیاده‌سازی می‌کند. کنترل‌کننده عملیاتی از سه مجموعه الگوریتم شامل برنامه‌ریزی حرکت، انتخاب محرک و برنامه‌ریزی تحریک ادغام شده‌است. دو مجموعه آزمایش برای اعتبار سنجی سیستم حلقه بسته و قابلیت میز نرم انجام شد. مجموعه اول، کار دستکاری انتقال یک شی به مکان مورد نظر با برنامه‌ریزی و اجرای مستقل را تایید می‌کند. مجموعه دوم توانایی میز برای دستکاری همزمان و مستقل چندین شی را تایید می‌کند. ویدیوهایی از هر دو آزمایش تهیه شده‌است. توجه به متخصصان - یک میز رباتیک نرم برای دستکاری اشیاء ظریف بر روی یک سطح توسعه داده شده‌است. این میز برای وظایف دسته‌بندی خودکار در یک محیط صنعتی در نظر گرفته شده‌است. چندین شی قرار داده‌شده بر روی سطح میز را می‌توان به طور همزمان و به طور مستقل انتقال داد و بر روی صفحه افقی XY جهت داد. سطح تغییر شکل پذیر میز، امکان دستکاری نرم را برای اشیاء ظریف فراهم می‌آورد. اینها مزایایی نسبت به دستکاری‌های موجود مانند بازوهای رباتیکی و سیستم‌های تسمه‌نقاله هستند. براساس آزمایش‌ها انجام‌شده قبلی، مشخص شد که کنترل حلقه باز برای اجرای وظایف اتوماسیون به دلیل تغییرپذیری در حرکت اشیاء با تعاملات نرم، ناکارآمد است. برای حل این مشکل، یک سیستم کنترل حلقه بسته برای دستکاری شی مستقل توسعه داده شده‌است و طراحی و پیاده‌سازی دقیق آن در این مقاله ارائه شده‌است. یک سیستم بازخورد بینایی و یک کنترلر برای تشکیل کنترل حلقه بسته پیشنهادی توسعه داده شده‌اند. دو مجموعه از آزمایش‌ها شامل وظایف دستکاری معمول انجام شد. ثابت شده‌است که سیستم کنترل در کنترل عدم قطعیت در حرکات شی و دستکاری خودکار شی توسط میز رباتیک نرم موثر است. عملکرد این سیستم کنترل را می‌توان با پیش‌بینی بهتر هر دو تغییر شکل روی سطح میز و حرکات شی حاصل بهبود بخشید. قرار دادن حسگرهای تغییر شکل پذیر در سطح میز یک روش بالقوه برای رسیدن به چنین بهبودی است و این موضوع می‌تواند در کارهای آینده مورد بررسی قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: کنترل حلقه بسته، دستکاری شی، رباتیک نرم، میز نرم.

۱. مقدمه

در زمینه‌های مهندسی و رباتیک، ابزارهای زیادی برای دست یابی به دستکاری اشیاء در یک فضای تعریف شده توسعه داده شده‌اند. نمونه‌های معمول شامل بازوهای رباتیک، جداول XY و سیستم‌های تسمه‌نقاله هستند. بازوهای رباتیک می‌توانند یک شیء را بگیرند و آن را با درجات خاصی از آزادی در یک فضای سه‌بعدی جهت دهند. الگوریتم‌های کنترل پیچیده یا بهبود سخت‌افزار، مانند پیچیدن مواد نرم در اطراف گریپر رباتیک، برای جلوگیری از آسیب به اشیاء ظریف مورد نیاز است [۱]، [۲].

میز XY می‌تواند موقعیت یابی دقیق یک شیء را در محدوده نسبتاً کوچکی فراهم کند. هدف به طور کلی بر روی پلتفرم XY قفل می‌شود و موقعیت هدف مطلوب با تغییر کل پلتفرم بدست می‌آید. بهبود دقت و دستکاری شیئی مقیاس میکرو جهت‌های تحقیقاتی محبوبی برای میز XY هستند [۳] - [۵]. سیستم‌های تسمه‌نقاله، اشیائی را که بر روی تسمه‌نقاله قرار می‌گیرند، حمل می‌کنند. این موارد به طور گسترده در توزیع خودکار به دلیل قابلیت حمل حجم زیاد در یک زمان کوتاه مورد استفاده قرار می‌گیرند. اشیائی که حمل می‌شوند تنها می‌توانند در جهت حرکت تسمه‌تایم حرکت کنند. به طور کلی، ابزارهای ذکر شده در بالا نمی‌توانند دستکاری مستقلی را برای چندین شیء به طور همزمان فراهم کنند. ضعف دیگر، فقدان رسیدگی سازگار به اشیاء ظریف است. پیشرفت‌های اخیر در رباتیک نرم، پتانسیل تحقق این ویژگی‌ها را نشان داده‌است. رباتیک نرم یک زمینه تحقیقاتی جدید و رو به رشد در رباتیک نرم، پتانسیل تحقق این ویژگی‌ها را نشان داده‌است. ربات را قادر می‌سازد تا شکل را با درجات آزادی نزدیک به بی‌نهایت تغییر دهد. این انعطاف‌پذیری بالای بدن یک مزیت نسبت به ربات‌های سنتی است زیرا آن‌ها می‌توانند با محیط اطراف خود با حداقل پیچیدگی کنترل سازگار شوند [۶]. این نرمی همچنین سازگاری با سیستم را معرفی می‌کند، که به ربات اجازه می‌دهد تا حرکات نرم و طبیعی قابل‌مقایسه با حرکات انسان و حیوان ایجاد کند. لوازم آرایشی یک مسیر تحقیقاتی محبوب برای ربات‌های نرم است. این ربات‌های نرم رفتار حیواناتی مانند نورد بالستیکی کاترپیلار [۷] و فرار سریع ماهی‌ها را تقلید می‌کنند [۸]. بدن سازگار ربات نرم، تعامل انسان - ربات ایمن را ممکن می‌سازد، که یک ویژگی جذاب برای کاربردهای پزشکی است. مثال‌هایی از چنین کاربردهایی عبارتند از یک ابزار رباتیک نرم قابل کاشت که به عملکرد قلب کمک می‌کند [۹]، یک لباس پوشیدنی نرم که اندازه‌گیری‌های بیومکانیک را جمع‌آوری می‌کند [۱۰]، و یک بازوی رباتیک نرم برای جراحی [۱۱]. اگرچه رباتیک نرم وعده‌های بزرگی در کاربردهای بیومیمتیک و پزشکی از خود نشان داده‌است، اما کاربردهای صنعتی هنوز تا حد زیادی ناشناخته هستند. برای پرداختن به نقاط ضعف در ابزارهای موجود دستکاری شیء، یک میز رباتیک نرم با استفاده از فن‌آوری‌های رباتیک نرم توسعه داده شد [۱۲].

میز نرم یک روش جدید برای دستکاری اشیاء متعدد به صورت همزمان و مستقل فراهم می‌کند. نرمی ذاتی سطح میز امکان کنترل ایمن اشیاء ظریف را فراهم می‌کند. میز نرم برای وظایف دستکاری مربوط به تولید، دسته‌بندی و بازرسی در محیط‌های صنعتی در نظر گرفته شده‌است. این میز رباتیک همچنین پتانسیل ربات‌های نرم را در کاربردهای صنعتی نشان می‌دهد. اشیاء قرار داده‌شده بر روی سطح میز نرم را می‌توان بر روی صفحه XY افقی با حرکات انتقالی و چرخشی دستکاری کرد. این جابجایی‌ها به وسیله چرخه‌های گسسته تغییر شکل‌های سطحی به دست می‌آیند، که مشابه حرکت رو به جلو کرم در طول حرکت است. ابزارهای دیگری نیز وجود دارند که از تغییر شکل سطحی برای ایجاد حرکت شیء استفاده می‌کنند. نمونه‌هایی از این موارد عبارتند از سیستم انتقال موج [۱۳]، [۱۴] MoleBot، و سیستم اصلاحات [۱۵]. این دستگاه‌ها تمایل به ایجاد شیب‌هایی بر روی سطح خود دارند که شیء را وادار به حرکت به سمت پایین یا غلتک می‌کنند تا حرکت را آغاز کنند. حرکت پیوسته حاصل در مقایسه با مراحل حرکت جسم گسسته تولید شده توسط میز رباتیک نرم، کم‌تر قابل‌پیش‌بینی و قابل‌کنترل است. دستگاه دیگر از ارتعاش برای تولید نیروهای اصطکاکی بر روی یک سطح برای حرکت یک شیء استفاده می‌کند [۱۶]. این رویکرد برای رسیدگی به اشیاء ظریف مناسب نیست. دینامیک حلقه باز سیستم میز نرم در [۱۷] مشخص شده‌است. مشخص شد که رفتار سیستم به شدت به ویژگی‌های شیء دستکاری‌شده به دلیل طبیعت نرم سطح میز وابسته است. توسعه یک مدل سیستم جهانی که برای همه اشیاء قابل اجرا باشد، دشوار بود. مطالعات مرتبط برای توسعه یک استراتژی کنترل حلقه باز برای میز نرم با استفاده از یک مدل احتمالی انجام شد [۱۸، ۱۹]. با این حال، یک سیستم کنترل حلقه بسته

برای دستیابی به اجرای موثر و کارآمد وظایف دستکاری مستقل برای اشیاء مختلف مورد نیاز است. این مقاله طراحی دقیق، پیاده‌سازی و اعتبارسنجی یک سیستم کنترل حلقه بسته از میز رباتیک نرم برای دستکاری خودکار اشیاء را ارائه می‌دهد. براساس سیستم میز حلقه باز ارائه‌شده در [۱۷]، یک سیستم بازخورد بینایی برای ردیابی شی و یک کنترل‌کننده عملیاتی برای برنامه‌ریزی تحریک به منظور تشکیل یک کنترل حلقه بسته توسعه داده شده‌است. جریان عملکرد و معماری این سیستم کنترل در بخش دوم ارائه شده‌است. پیاده‌سازی سیستم بازخورد بینایی شامل تکنیک‌های پردازش تصویر در بخش سوم مورد بحث قرار گرفته‌است. کنترل‌کننده عملیاتی سه مجموعه الگوریتم را برای برنامه‌ریزی حرکت شی و تحریک میز به منظور دستیابی به دستکاری شی مستقل اجرا می‌کند. این الگوریتم‌ها در بخش چهارم توضیح داده شده‌اند. در نهایت، آزمایش‌ها برای تایید این سیستم کنترل حلقه بسته انجام می‌شوند و این آزمایش‌ها در بخش پنجم ارائه شده‌اند. مشارکت‌های این مقاله به شرح زیر است:

- ۱) طراحی یک سیستم کنترل حلقه بسته برای دستیابی به دستکاری شی مستقل؛
- ۲) توسعه و ساخت یک سیستم بازخورد بینایی برای رسیدن به ردیابی اشیاء؛
- ۳) طراحی و پیاده‌سازی یک کنترل‌کننده عملیاتی برای رسیدن به کنترل حلقه بسته؛
- ۴) اعتبارسنجی سیستم کنترل حلقه بسته پیشنهادی از طریق آزمایش‌ها.

۲. سیستم کنترل حلقه بسته میز نرم

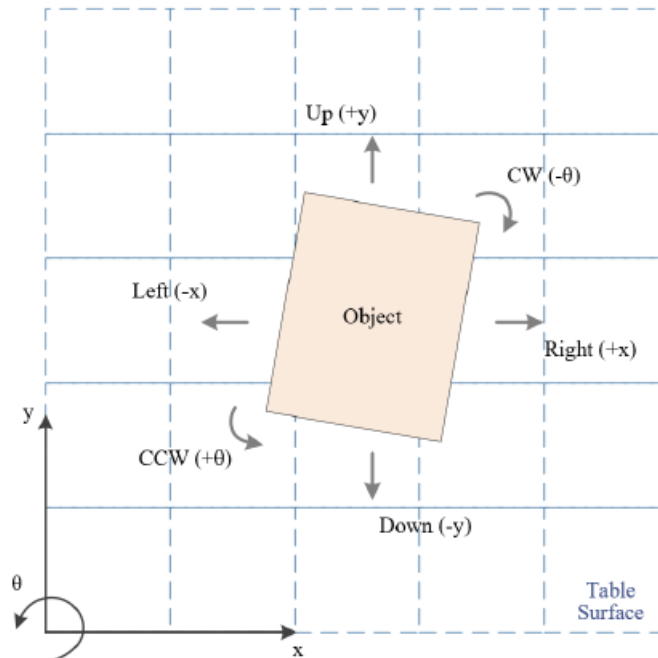
هدف از ایجاد یک سیستم کنترل حلقه بسته، فعال کردن میز رباتیک نرم برای انجام وظایف اتوماسیون شامل دستکاری شی است. در این مقاله، ما بر وظیفه انتقال یک شی از یک موقعیت (شروع) به موقعیت مطلوب (هدف) با برنامه‌ریزی و اجرای مستقل تمرکز می‌کنیم. در ادامه، مروری بر سیستم میز نرم ارائه شده‌است. سپس طراحی سیستم کنترل حلقه بسته توضیح داده می‌شود.

۱.۲. سیستم میز رباتیک نرم

میز رباتیک نرم [۱۲] توسط آرایه دو بعدی از ماژول‌های محرک نرم ساخته شده‌است. هر ماژول شامل یک پمپ چرخان، پنج شیر سلنوئید، و یک محرک نرم مکعبی شکل است. این محرک از لاستیک سیلیکونی ساخته شده‌است و با چهار محفظه هوایی مکعبی شکل تعبیه شده‌است. نمونه اولیه میز نرم اجرا شده در این مقاله شامل ۲۵ مدول محرک نرم است که یک میز ۵ مربعی را تشکیل می‌دهند. در طول عملیات، لازم است که شی دستکاری‌شده توسط چهار یا چند محرک پشتیبانی شود. شرط دیگر این است که مرکز شی باید حداقل ۱۵ میلی‌متر دورتر از لبه‌های میز باشد تا شی قابل انتقال باشد. حرکت شی با تولید مجموعه‌ای از تغییر شکل‌های سطحی به دست می‌آید، که توسط فشار اتاق‌های هوای جاسازی‌شده تولید می‌شود. هر چرخه عملیات محرک می‌تواند یک تحریک انتقالی ایجاد کند که شی را با یک گام کوچک افقی حرکت می‌دهد. با استفاده از عملگرهای چندگانه، می‌توان جسم را در چهار جهت انتقالی و دو جهت چرخشی بر روی سطح میز حرکت داد، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده‌است. به دلیل طبیعت نرم میز، حرکات شی در یک جهت اغلب به طور آزادانه با حرکات در جهات دیگر جفت می‌شوند. به عنوان مثال، یک حرکت انتقالی "درست" می‌تواند شی را به سمت جهت +X انتقال دهد در حالی که جابجایی‌های جزئی را در Y و X القا می‌کند. حرکت شی هدف تولید شده توسط یک چرخه عملیاتی را می‌توان به شکل ماتریس زیر بیان کرد.

$$M_{\text{Object}} = \begin{bmatrix} \Delta x & Sx \\ \Delta y & Sy \\ \Delta \theta & S\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن S جابجایی شی در هر چرخه است و می‌تواند توسط چرخه کار DC اعمال شده به پمپ و زمان تورم قلع مورد استفاده برای فرآیند فشار کنترل شود. افزایش DC منجر به تغییر شکل‌های سطحی بزرگ‌تر و در نتیجه S بزرگ‌تر در هر چرخه می‌شود. کاهش قلع دوره چرخه را کاهش می‌دهد که اگر S در هر چرخه ثابت باشد منجر به حرکت سریع‌تر جسم می‌شود. جابجایی S در هر چرخه از هر جهت حرکت در [۱۷] مشخص شده است. عملیات عملگرهای نرم همزمان می‌شوند.



شکل ۱- میز نرم می‌تواند یک شی را در چهار جهت انتقالی (بالا، پایین، چپ و راست) و دو جهت چرخشی (ساعتگرد و پادساعتگرد) در هر چرخه عملیاتی حرکت دهد.

۲.۲. طراحی سیستم کنترل حلقه بسته

سیستم کنترل میز رباتیک نرم به دو فضا تقسیم می‌شود: فضای محرک و فضای وظیفه. فضای محرک، کنترل سطح پایین محرک‌های نرم را توصیف می‌کند، که توالی فشار محفظه را کنترل می‌کند، که مجموعه‌ای از تغییر شکل‌های سطحی را ایجاد می‌کند. عبارت فضای محرک به جای فضای مشترک استفاده می‌شود که به دلیل تحریک تولید شده توسط عملگرهای نرم دارای درجات آزادی تقریباً بی‌نهایت است. به دست آوردن بازخورد در فضای محرک دشوار است. ویژگی مورد توجه در اینجا مجموعه‌ای از تغییر شکل‌ها بر روی سطح محرک است، اما حضور شی با روش‌های سنجش خارجی مانند لیزر یا امواج فراصوت تداخل دارد. قرار دادن حسگرهای تغییر شکل پذیر در سطح محرک یک راه حل بالقوه است اما در حال حاضر خارج از محدوده این مقاله است. کنترل در فضای کار بر برنامه‌ریزی عملیاتی سطح بالا تمرکز می‌کند که به طور مستقیم با حرکت شی در ارتباط است. این شامل هماهنگی چندین عملگر برای تولید فعل‌های خاص به منظور دستیابی به یک حرکت مطلوب شی، و همچنین برنامه‌ریزی مجموعه‌ای از حرکات شی برای یک کار اتوماسیون است. سیستم کنترل حلقه بسته در فضای کار با استفاده از بازخورد بینایی برای استخراج اطلاعات مربوط به حرکات شی ایجاد می‌شود. این سیستم به سه بخش تقسیم می‌شود: یک کنترل‌کننده عملیاتی، یک سیستم بازخورد بینایی، و دستگاه میز، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است. موقعیت مورد نظر هدف و موقعیت فعلی هدف به صورت زیر بیان می‌شوند:

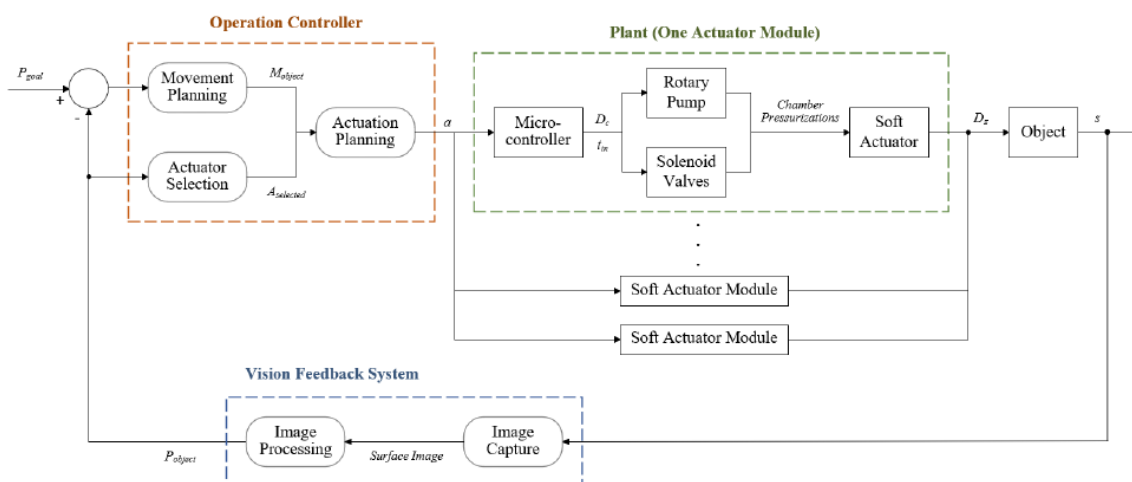
$$P_{\text{object}} = \begin{matrix} x \\ y \\ \theta \end{matrix} \quad \text{و} \quad P_{\text{goal}} = \begin{matrix} x_{\text{goal}} \\ y_{\text{goal}} \\ \theta_{\text{goal}} \end{matrix} \quad (2)$$

عملیات میز با دریافت P_{goal} شروع می‌شود. تصویری از سطح میز توسط سیستم بازخورد بینایی گرفته می‌شود و تکنیک‌های پردازش تصویر مانند تشخیص ویژگی و تطبیق ویژگی برای تعیین P_{object} اعمال می‌شود. کنترل‌کننده عملیات دو

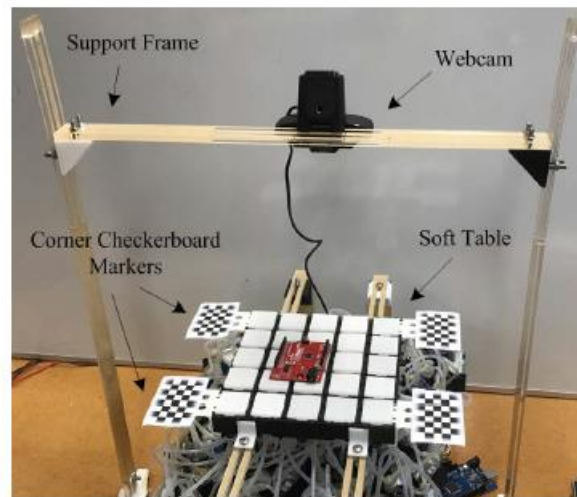
موقعیت را مقایسه می کند و سه کار را انجام می دهد: (۱) برنامه ریزی حرکت شی Mobject برای این چرخه؛ (۲) انتخاب فعال کننده های انتخابی برای فعال شدن براساس Pobject و اندازه شی داده شده؛ و (۳) تحریک تولید شده بر روی عملگرهای انتخاب شده را به منظور دستیابی به Mobject برنامه ریزی کنید. تحریک برنامه ریزی شده a سپس برای اجرا به ماژول های محرک نرم منتخب فرستاده می شود. میکروکنترلرهای ماژول مربوطه این فرمان ها را دریافت می کنند و پمپ های چرخشی و شیرهای سلنوئید را برای تولید یک توالی از فشار محفظه به کار می گیرند. این امر منجر به مجموعه ای از تغییر شکل های سطحی می شود که یک مرحله از جابجایی شی S را تولید می کند. در چرخه عملیاتی بعدی، سیستم بینایی تصویر جدیدی از سطح میز را برای تعیین موقعیت شی جدید می گیرد. این امر به کنترلر عملیاتی باز می گردد و فرآیند تا رسیدن به موقعیت هدف تکرار می شود. هر چرخه عملیات، از جمله ضبط و پردازش تصویر، برنامه ریزی عملیات، و اجرای تحریک، ۱.۲۵ ثانیه طول می کشد تا با تنظیمات معمول تکمیل شود. کنترل حلقه بسته در فرکانس ۰.۸ هرتز کار می کند.

۳. سیستم بازخورد بینایی

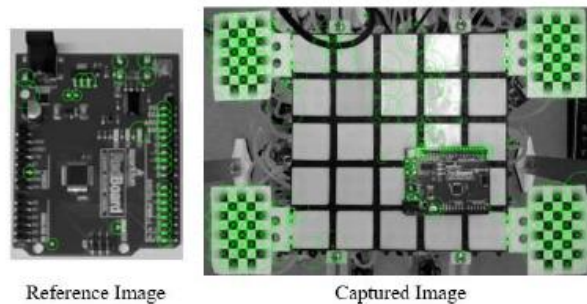
هدف از ساختن یک سیستم بازخورد بینایی ردیابی موقعیت Pobject شی مورد دستکاری است. یک وب کم (وب کم لاجیتک HD C270) برای گرفتن تصویری از سطح میز در ابتدای هر چرخه عملیاتی استفاده می شود. سپس این تصویر برای استخراج موقعیت شی فعلی پردازش می شود. هیچ نشانگری به شی متصل نیست. در عوض یک تصویر مرجع از شی برای کمک به پردازش تصویر ارائه می شود. نرم افزار MATLAB به عنوان نرم افزار برنامه نویسی انتخاب شده است و از دید کامپیوتری و جعبه ابزار پردازش تصویر برای پردازش تصاویر استفاده شده است. در مرحله اول، تصویر جسم مرجع و تصویر اخذ شده از وب کم از رنگ به خاکستری تبدیل می شوند. ویژگی های این تصاویر با استفاده از الگوریتم ویژگی های قوی سرعت ((PTF تشخیص داده می شوند [۲۰]. این ویژگی ها، الگوهای تصویری هستند که بافت های متمایز و قابل تشخیص مانند گوشه ها، لبه ها، و لکه های روشن / تاریک دارند. یک نمونه از تشخیص یک شی مورد مدار چاپی قرمز در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲- سیستم کنترل حلقه بسته میز روباتیک نرم در فضای وظیفه

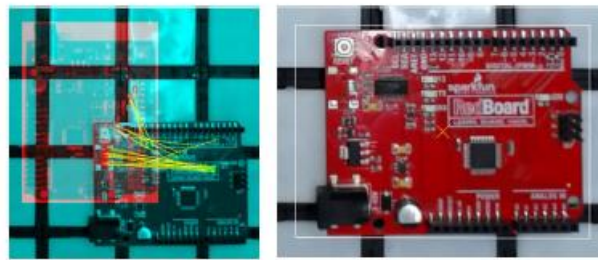


شکل ۳- سیستم بازخورد بینایی شامل یک وب کم متصل به یک قاب پشتیبانی و چهار نشانگر صفحه نمایش متصل به گوشه های میز است

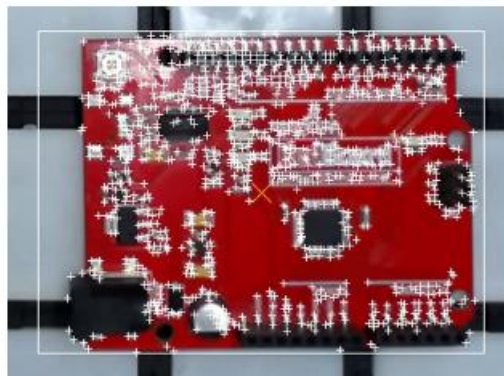


شکل ۴- مرحله تشخیص شی ۱: تشخیص ویژگی تصویر مرجع شی و تصویر وب کم گرفته شده

سپس دو مجموعه از ویژگی های شناسایی شده در مرحله ۲ مقایسه می شوند. ویژگی های تطبیقی کافی نشان می دهند که شی در تصویر ثبت شده یافت می شود. الگوریتم اجماع نمونه تصادفی [۲۱] برای برآورد تبدیل هندسی از جفت نقاط تطابق استفاده می شود. از این روش برای تعیین موقعیت شی داخل تصویر گرفته شده استفاده می شود. در مرحله ۳، یک کادر محدود کننده حول ویژگی های منطبق بر چارچوب تصویر مرجع کشیده می شود. این جعبه منطقه مورد نظر ((ROI است. جعبه مقید کننده به شی کشف شده ثابت می شود و بنابراین موقعیت و جهت گیری شی را می توان محاسبه کرد. مراحل دوم و سوم این فرآیند تشخیص شی در شکل ۵ نشان داده شده است. به جای انجام تشخیص شی بر روی هر تصویر گرفته شده، ردیابی شی برای کارآمدتر کردن فرآیند کلی اجرا می شود. در داخل جعبه محدوده تعریف شده قبلی ((ROI، مجموعه دیگری از استخراج ویژگی با استفاده از الگوریتم حداقل مقدار ویژه انجام می شود. الگوریتم کاناده - لوکاس - توماسی ((KLT [۲۲] سپس برای ردیابی نقاط ویژگی شناسایی شده، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، استفاده می شود. در تصاویر گرفته شده زیر، این نقاط ردیابی می شوند و ROI برای محاسبه موقعیت شی بدون انجام دوباره فرآیند تشخیص شی ایجاد می شود. با گذشت زمان، نقاط ردیابی به دلیل تغییر در نورپردازی و زاویه دوربین در نتیجه حرکت شی از دست خواهند رفت. تشخیص شی زمانی مورد نیاز است که تعداد نقاط ردیابی شده به زیر یک آستانه کاهش یابد. به طور کلی، پردازش تصویر بین تشخیص شی و ردیابی شی تغییر می کند. در مقایسه با استفاده از تنها تشخیص شی، ترکیب تشخیص و ردیابی، میانگین زمان پردازش تصویر را تا حدود ۴۰٪ کاهش می دهد. موقعیت و جهت گیری شی را می توان به ترتیب با دقت $0.3(- +)$ میلی متر و $0.4(- +)$ درجه دنبال کرد.



شکل ۵- مرحله تشخیص شی ۲: انطباق ویژگی‌های کشف‌شده از دو تصویر. مرحله ۳: ایجاد یک جعبه محدود کننده (سفید) و محاسبه مرکز شی (زرد).



شکل ۶- تصویر نقاط ویژگی شناسایی شده برای ردیابی نقطه با استفاده از الگوریتم KLT.

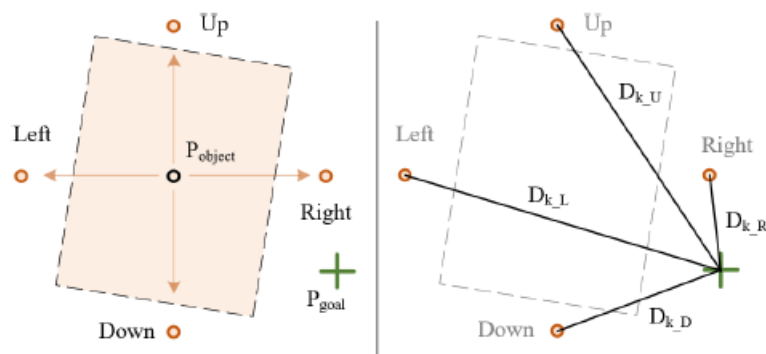
۴. کنترل عملیات در فضای وظیفه

کنترل کننده عملیاتی میز نرم از سه مجموعه الگوریتم ادغام شده است: برنامه ریزی حرکت، انتخاب محرک و برنامه ریزی تحریک. این الگوریتم ها در چارچوب نرم افزاری موجود سیستم میز گنجانده شده اند.

۱.۴. برنامه ریزی حرکت

منطق برنامه ریزی حرکت می تواند به عنوان تغییر برنامه ریزی مسیر سنتی در نظر گرفته شود. در اینجا، یک شی می تواند در یکی از شش جهت موجود در هر چرخه عملیاتی حرکت کند. مسیرهای منحنی یا قطری نمی توانند به طور کامل اجرا شوند زیرا میز نیاز به تولید مراحل متعدد گسسته از جهات مختلف برای دنبال کردن چنین مسیرهایی دارد. برای اینکه یک مسیر برنامه ریزی شده قابل اجرا باشد، باید در یک سری از حرکت ها بیان شود که شی را از ابتدا به سمت هدف هدایت می کند:

$$P_{goal} = P_{object} + M_{object_1} + M_{object_2} + \dots + M_{object_N} \quad (3)$$



شکل ۷- موقعیت شی برآیند را برای هر یک از چهار حرکت انتقالی پیش‌بینی کرده و سپس فواصل مطلق را با موقعیت هدف مقایسه کنید

تکنیک‌های برنامه‌ریزی مسیر سنتی را می‌توان در این مورد با در نظر گرفتن شی به عنوان ربات متحرک و میز نرم به عنوان محیط به کار برد. به جای حرکت اشیاء، میز نرم تحریک را برای فراهم کردن حرکات نسبی تولید می‌کند. تکنیک‌های سنتی می‌توانند با محیط‌های ناشناخته کار کنند اما به طور معمول نیاز دارند که حرکت ربات قابل‌پیش‌بینی باشد. در اینجا، نگرانی در عدم قطعیت در حرکت جسم به دلیل ماهیت عملگرهای نرم نهفته‌است. سطح مشخصی از تصادفی بودن در هر مرحله حرکت وجود دارد، که پیش‌بینی دقیق آن را دشوار می‌سازد و ممکن است شی را از مسیر تعیین‌شده خود منحرف کند. یک روش برنامه‌ریزی مناسب‌تر، برنامه‌ریزی بهترین حرکت جسم در آغاز هر چرخه عملیاتی به جای دنبال کردن یک مسیر از پیش برنامه‌ریزی‌شده است. این بیشتر واکنش‌پذیر و محکم است چون می‌تواند با موقعیت شی جدید پس از هر حرکت سازگار شود. برای هر چرخه عملیات، موقعیت فعلی شی P_{object} و موقعیت هدف مورد نظر P_{goal} توسط الگوریتم برنامه‌ریزی حرکت پردازش می‌شود تا بهترین حرکت شی M_{object} را برنامه‌ریزی کند. یک استراتژی برنامه‌ریزی ساده اما موثر، پیاده‌سازی یک الگوریتم حریصانه با بررسی تفاوت موقعیت بین P_{goal} و P_{object} پیش‌بینی شده پس از تولید یک M_{object} خاص است. این موقعیت پیش‌بینی شده براساس اندازه گام هر جهت حرکت به‌دست‌آمده از مشخصه یابی تخمین زده می‌شود. موقعیت XY شی و جهت گیری (به طور جداگانه در نظر گرفته می‌شوند و یکی از آن‌ها برای داشتن یک اولویت بالاتر در طول عملیات تنظیم می‌شود. برای موقعیت XY ، فاصله مطلق D_k بین هدف (x_{end}, y_{end}) و موقعیت پیش‌بینی شده (x, y) برای هر یک از چهار هدف انتقالی محاسبه می‌شود. حرکت با حداقل D_k به عنوان نزدیک‌ترین شی به هدف انتخاب می‌شود. مثالی از این فرآیند در شکل ۷ نشان داده شده‌است. بهترین هدف در این مورد "راست" است چون کوتاه‌ترین D_k را دارد. همین منطق برای دستیابی به جهت گیری مورد نظر با محاسبه اختلاف زاویه بین هدف و پیش‌بینی شده برای دو M_{object} چرخشی اعمال می‌شود. به طور کلی، این فرآیند برنامه‌ریزی شبیه به دنبال کردن کوتاه‌ترین مسیر است.

۲.۴. انتخاب تنظیم کننده

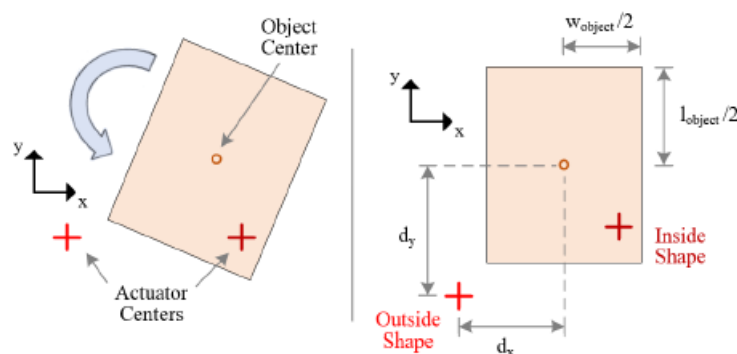
الگوریتم انتخاب محرک تعیین می‌کند که کدام عملگرهای نرم باید در چرخه عملیاتی فعلی فعال شوند. ورودیه‌ای الگوریتم، و شکل و اندازه شی داده‌شده هستند. ۲۵ عملگر نرم در نمونه اولیه میز وجود دارد و عملکرد فعال‌کننده‌هایی که به حرکت اشیاء کمکی نمی‌کنند، زاید است. منطق در اینجا انتخاب فعال‌هایی است که نقاط مرکزی خود را با شکل شی پوشش می‌دهند، که به عنوان سهم کافی در حرکت شی در نظر گرفته می‌شود. به طور انتزاعی‌تر، این بررسی است که آیا یک نقطه در داخل یک شکل قرار دارد یا خیر. طرح کلی شی و مراکز محرک بر روی یک گراف با توجه به سیستم مختصات میز به منظور کمک به این انتخاب ترسیم شده‌اند. هدف PCB در اینجا به عنوان نمونه‌ای برای توضیح دقیق این روند مورد استفاده قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده‌است PCB یک شکل مستطیلی دارد و با یک جهت گیری خاص بر روی سطح میز قرار داده می‌شود. دو مرکز محرک با مثبت‌های قرمز نشان داده می‌شوند. کل کادر طوری دوران داده می‌شود که لبه‌های مستطیل با محور X و محور Y هم تراز باشند. سپس فواصل افقی و عمودی dx و dy بین مرکز شی و مرکز محرک محاسبه می‌شوند. اگر هر دو dx و y به ترتیب از نیمی از شی با عرض w_{object} و طول l_{object} فاصله داشته باشند، آنگاه مرکز محرک در داخل مستطیل قرار می‌گیرد و بنابراین محرک برای عملیات انتخاب می‌شود. کل انتخاب عملگر را می‌توان با یک کد دودویی ۲۵ رقمی که در آن هر رقم به عنوان متناظر با یک عملگر انتخاب می‌شود، نشان داد. مقدار "۱" برای As نشان می‌دهد که محرک انتخاب شده‌است، در حالی که "۰" نشان می‌دهد که فعال نشده است. فرآیند انتخاب را می‌توان با معادلات زیر خلاصه کرد:

$$A_{selected} = \{A_{s1}, A_{s2}, A_{s3}, \dots, A_{s25}\} \quad (4)$$

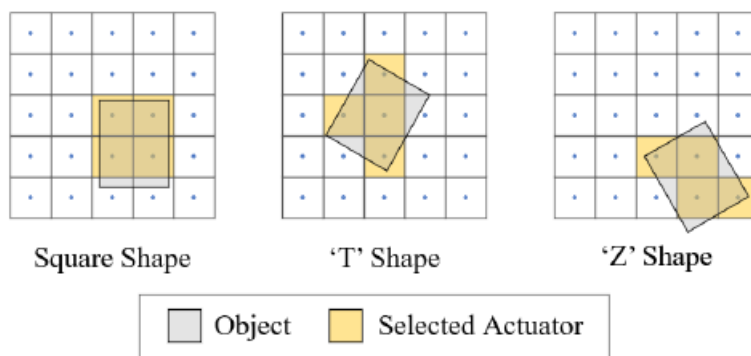
فرآیند انتخاب مشابهی را می‌توان برای اشیاء دایره‌ای شکل به کار برد. فاصله مطلق بین مرکز جسم و مرکز محرک را می‌توان با شعاع جسم دایره‌ای مقایسه کرد

۳.۴. برنامه‌ریزی تثبیت

الگوریتم برنامه‌ریزی تحریک، جهت تحریک عملگرها را تعیین می‌کند که برای تولید حرکت برنامه‌ریزی شده هدف انتخاب شده‌اند. استراتژی‌های حرکت برای حرکات انتقالی و چرخشی متفاوت هستند و بنابراین به استراتژی‌های برنامه‌ریزی تحریک متفاوتی نیاز دارند. برای ترجمه، *adir* با جهت حرکت برنامه‌ریزی شده *Mobject* مطابقت دارد. به عنوان مثال، اگر *Mobject* برنامه‌ریزی شده "بالا" باشد، آدیر از محرک‌های انتخاب شده نیز "بالا" است. برنامه‌ریزی فعال‌سازی برای چرخش پیچیده‌تر است زیرا نیاز به هماهنگی دو یا چند عملگر برای تولید جهت‌های مختلف تحریک دارد. چرخش با جدا کردن عملگرها به دو گروه انجام می‌شود و هر کدام از آن‌ها فعلیت ترجمه مخالف را انجام می‌دهند. منطق انسانی به راحتی می‌تواند فعال‌کننده‌ها را جدا کند و تحریک مناسب را برای هر گروه انتخاب کند. هدف در اینجا تبدیل چنین منطقی به الگوریتمی است که بتواند توسط کنترلر اجرا شود. چندین راه‌حل برای رسیدن به حرکت مورد نیاز برای شرایط یک‌سان وجود دارد. در صورتی که بتوان جسم را بر روی حالت مسطح شده در طول عملیات نگه داشت، همه عملگرهای انتخاب شده نیاز به فعال شدن ندارند. یکی از ملاحظات، نزدیکی بین مرکز چرخش و مرکز شی است. در حالت ایده‌آل، دو مرکز باید در یک موقعیت قرار گیرند.



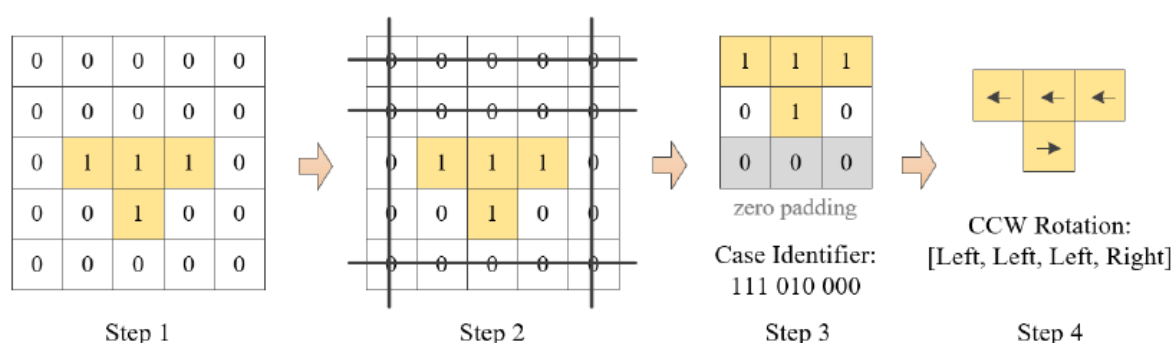
شکل ۸- فرآیند تعیین اینکه آیا یک نقطه (مرکز محرک) در یک شکل مستطیلی (شیء) قرار دارد یا خیر.



شکل ۹- سه نمونه از چهار محرک انتخاب شده در ساختارهای مختلف.

به طور کلی، فرآیند برنامه‌ریزی برای چرخش به دو وظیفه تقسیم می‌شود: شناسایی مورد و انتخاب تحریک. در اینجا، یک مورد به عنوان یک شکل‌گیری منحصر به فرد از عملگرهای انتخاب شده تعریف می‌شود. به عنوان مثال، چهار عملگر انتخاب شده می‌توانند در یک شکل مربعی، یک شکل "T" یا یک شکل "Z" باشند که در شکل ۹ نشان داده شده‌است. همانطور که قبلاً بحث شد، عملگرهای انتخابی با یک کد دودویی ۲۵ رقمی نشان داده می‌شوند. این کد را می‌توان به شکل یک نگاشت بیتی ۵ * ۵ با هر بیت که محرک متناظر خود را در سطح میز ۵ * ۵ مربعی نشان می‌دهد، مرتب کرد. از نداشت بیت می‌توان به عنوان یک شناسه برای هر مورد استفاده کرد. برای یک میز با ۲۵ عملگر نرم، تعداد موارد ممکن نسبتاً بزرگ است (۲۲۵ = ۳۳ میلیون) اما می‌تواند با در نظر گرفتن شکل و اندازه شی تا حد زیادی کاهش یابد. با استفاده از PCB قبلی به

عنوان مثال، این PCB تنها می‌تواند دوتا شش عامل را در هر زمان مشخص پوشش دهد. شکل و اندازه آن تعداد عملگرهای انتخاب‌شده و در نتیجه موارد ممکن را محدود می‌کند. بیست و هشت مورد منحصر به فرد برای PCB از جمله تصاویر آینده‌ای از تشکیلات و همه جهت گیری های ممکن شناسایی شده‌اند. تشکیلات محرک این موارد می‌تواند در یک نگاشت بی‌تی ۳ * ۳ جای گیرد که می‌تواند با یک کد دودویی ۹ رقمی نشان داده شود. مثالی از برنامه‌ریزی تحریک برای چرخش خلاف جهت عقربه‌های ساعت (CCW) در شکل ۱۰ نشان داده شده است. اولین مرحله، تجزیه و تحلیل عملگرهای انتخابی است که با یک ماتریس ۵ * ۵ (نگاشت بیت) نشان داده می‌شود. سپس ردیف‌ها و ستون‌هایی که حاوی تمام صفرهای هستند، برش داده می‌شوند، که شبیه به برش زنی یک تصویر است. این امکان وجود دارد که یک ماتریس با اندازه کوچک‌تر از ۳۳x ایجاد شود، که پس از آن لازم است تا با لایه‌گذاری صفر در لبه‌های راست و پایین به ۳ * ۳ گسترش داده شود. این امر تضمین می‌کند که الگوی شکل همیشه در گوشه بالای سمت چپ ماتریس شروع می‌شود، که از موارد تکراری اجتناب می‌کند. سپس نگاشت بی‌تی ۳ * ۳ به کد باینری تبدیل می‌شود، که به عنوان شناسه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مثالی که در شکل ۱۰ نشان داده شده است یک شناسه موردی ۱۰۰۰ - ۱۱۱ دارد.



شکل ۱۰- مثالی از فرآیند برنامه‌ریزی تحریک برای یک چرخش CCW شامل چهار مرحله.

انتخاب تنظیمات وظیفه بعدی است. از آنجا که تعداد موارد نسبتاً کم است (۲۸ مورد برای PCB)، استفاده از رویکرد میز جستجو کارآمدتر و موثرتر است. مناسب‌ترین تحریک برای هر مورد توسط منطق انسانی از پیش تعیین‌شده و در یک میز جستجو با شناسه مورد مربوطه ذخیره می‌شود. تحریک با در نظر گرفتن پایداری حرکت و نزدیکی بین مرکز چرخش و مرکز شی انتخاب می‌شود. در اینجا، یک حرکت پایدار به عنوان حفظ جسم در حالت تراز شده در طول حرکت تعریف می‌شود. به طور خلاصه، تحریک برنامه‌ریزی برای یک حرکت چرخشی شامل تبدیل انتخاب محرک به یک شناسه مورد و تعیین جهت تحریک با استفاده از جداول جستجو از پیش تعیین‌شده است.

۵. اعتبار سنجی آزمایش‌ها

دو مجموعه از آزمایش‌ها برای اعتبارسنجی سیستم کنترل حلقه بسته و نشان دادن قابلیت میز نرم برای انجام وظایف اتوماسیون انجام شد.

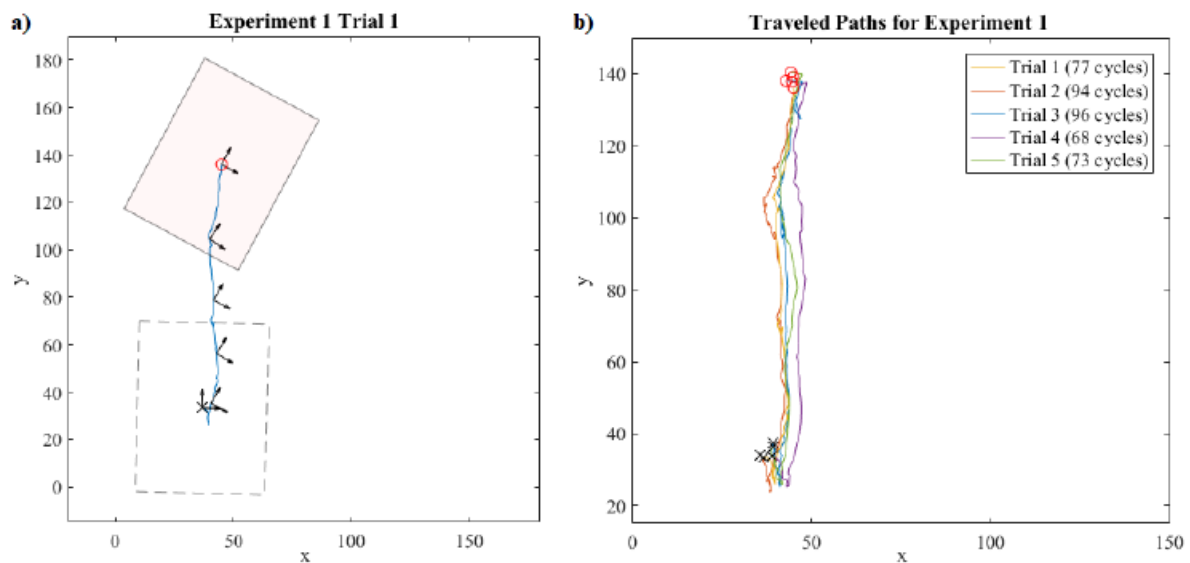
۱.۵. حمل و نقل مستقل یک شی

آزمایش اول برای اعتبار سنجی توانایی میز برای انتقال یک شی از یک مکان (شروع) به یک موقعیت تعریف‌شده توسط کاربر (هدف) با برنامه‌ریزی و اجرای مستقل تنظیم شد. PCB قرمز به عنوان شی دست‌کاری شده انتخاب شده است و اندازه آن ۶۹ میلی‌متر ۵۵ میلی‌متر ۱۲ میلی‌متر و جرم آن ۱۷ گرم است. وظیفه دستکاری انتقال جسم در جهت مثبت با جهت ۲۴۰ است. موقعیت‌های شروع و هدف شی به ترتیب (۳۸، ۳۵، ۲۷۰) و (۴۰، ۱۴۰، ۲۴۰) در مختصات میز هستند. راه‌اندازی این سیستم مختصات در شکل ۱ نشان داده شده است. موقعیت XY بر حسب میلی‌متر و جهت گیری بر حسب درجه اندازه‌گیری می‌شود.

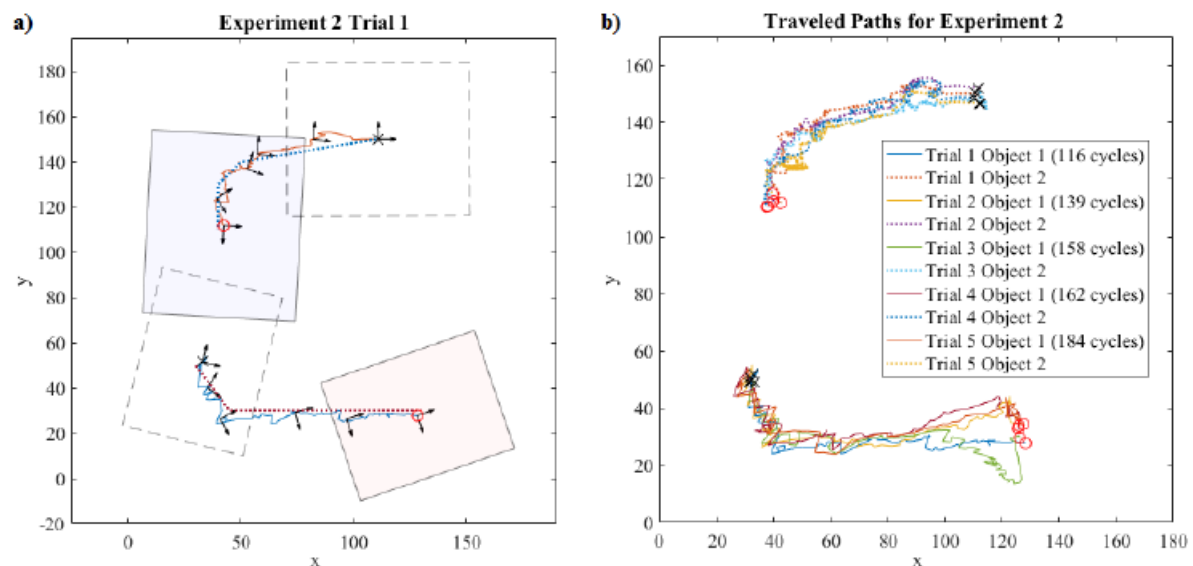
تحمل برای X ، Y مطلوب مجاز است و به ترتیب ۵ میلی‌متر، ۵ میلی‌متر و ۱۵ درجه تنظیم شده‌است. جهت گیری شی به گونه‌ای تنظیم شده‌بود که اولویت بالاتری نسبت به موقعیت XY داشته باشد. برای عملیات میز، سیکل کاری DC اعمال شده به پمپ چرخشی در ۶۸٪ ثابت نگه‌داشته شد. دوره هر چرخه عملیاتی ۱.۲۵ ثانیه با زمان تورم ۰.۲۵ ثانیه تنظیم شد. پنج آزمایش این کار برای بررسی تکرارپذیری انجام شد. مسیر پیموده‌شده شی در آزمایش ۱ در شکل ۱۱ (a) به عنوان یک مطالعه موردی ارائه شده‌است. موقعیت‌های شروع و هدف به ترتیب با صلیب‌های سیاه و دایره‌های قرمز مشخص می‌شوند. شکل شی در موقعیت شروع با خطوط نقطه‌چین مشخص می‌شود، در حالی که شکل در موقعیت هدف با خطوط پیوسته مشخص می‌شود. علاوه بر این، شکل شی در موقعیت هدف به رنگ نارنجی روشن است. خط توپر آبی مسیر حرکت شی و فریم‌های مختصات کوچک جهت گیری شی را هر ۱۵ چرخه عملیاتی نشان می‌دهد. در طول چند چرخه اول دستکاری مستقل، شی در محل شروع به سمت جهت گیری مورد نظر چرخانده شد و این باعث یک تغییر رو به پایین مشخص در موقعیت XY شد. سپس تحریک "بالا" به طور مکرر توسط محرک‌های انتخاب‌شده برای حرکت شی در جهت $+Y$ انجام شد. مسیر حرکت به طور منطقی مستقیم بود و موقعیت هدف مورد نظر پس از ۷۷ چرخه عملیات به دست آمد، که تقریباً ۹۶ ثانیه است. جهت گیری شی دو بار در طول این مسیر تنظیم شد در حالی که حرکات انتقالی چرخش‌های جزئی را جمع می‌کردند. مسیرهای طی‌شده هر پنج آزمایش در شکل ۱۱ (b) نشان داده شده‌اند. تمام آزمایش‌ها یک مسیر مشابه را نشان می‌دهند. تغییرات جزئی در مسیر ناشی از تغییرات عملکرد عملگرهای نرم است. همان تغییر اولیه رو به پایین در همه آزمایش‌ها مشاهده می‌شود به طوری که چرخش‌های شی با حرکت‌های فرعی XY جفت می‌شوند. به طور متوسط ۸۲ چرخه عملیاتی برای تکمیل این کار استفاده شد، که تقریباً ۱۰۲ ثانیه طول کشید. کار دستکاری این آزمایش با موفقیت در تمام آزمایش‌ها انجام شد و ثابت شد که سیستم بازخورد بینایی و کنترل‌کننده عملیات مطابق انتظار عمل می‌کنند. تصاویر سطح میز به طور موفقیت آمیزی برای استخراج موقعیت جسم در طول عملیات آنالیز شدند. الگوریتم برنامه‌ریزی حرکت قادر به رسیدگی به تغییرات در حرکات شی بود زیرا هدف در تمام آزمایش‌ها با تنها مسیرهای اندکی متغیر به دست آمد. هر دو الگوریتم انتخاب محرک و برنامه‌ریزی تحریک همان طور که انتظار می‌رفت عمل کردند تا ورودی‌ها را برای اجرای میز فراهم کنند. به طور کلی، سیستم کنترل حلقه بسته میز نرم و حمل و نقل مستقل یک شی از یک موقعیت به موقعیت دیگر تایید شد.

۲.۵. دستکاری همزمان دو شی

آزمایش دوم به منظور اعتبار سنجی توانایی میز برای دستکاری همزمان دو شی در طول مسیرهای از پیش تعریف‌شده طراحی شده‌است. اشیائی که انتخاب شدند، PCB سرخ و یک جعبه بسته‌بندی برای یک شیر با تحریک جریان الکتریکی بودند. جعبه دارای اندازه ۸۰ میلی‌متر ۶۶ میلی‌متر ۲۴ میلی‌متر و جرم ۹ گرم است. یک تصویر مرجع از این جعبه به سیستم بازخورد بینایی ارائه شد. از آنجا که دو شی ویژگی‌های تصویر متفاوتی دارند، پردازش تصویر یکسانی برای ردیابی موقعیت شی دوم انجام شد. کنترل‌کننده عملیات همان فرآیند برنامه‌ریزی را برای تعیین بهترین حرکت، انتخاب فعال‌کننده‌ها، و برنامه‌ریزی تحریک برای شی دوم در هر چرخه عملیات تکرار کرد.



شکل ۱۱- (الف) مسیر نتیجه آزمایش ۱ آزمایش ۱. (ب) مسیرهای طی شده از پنج آزمایش انجام شده برای آزمایش ۱.



شکل ۱۲- (الف) مسیرهای سفر اشیا ۲ آزمایش ۲. (ب) مسیرهای طی شده از پنج آزمایش انجام شده برای آزمایش ۲.

دوره چرخه برای جبران زمان پردازش اضافی به ۱.۵ ثانیه افزایش یافت. پارامترهای دیگر سیستم مشابه آزمایش اول تنظیم شدند. وظیفه این آزمایش، دستکاری دو شی برای حرکت به روش CCW بر روی سطح میز است. PCB به سمت پایین منتقل می‌شود و سپس به سمت راست منتقل می‌شود. جعبه بسته‌بندی به سمت چپ و سپس به سمت پایین محور y منتقل می‌شود. این مسیرها با ترتیبی از چهار موقعیت شامل شروع، هدف و دو موقعیت میانی به نام نقاط عطف نشان داده شدند. مسیرهای برنامه‌ریزی شده را می‌توان خطوط مستقیمی دانست که برای اتصال این مکان‌ها کشیده شده‌اند. راه‌ها چنان گسترده شده بودند که حرکت هر شی با یکدیگر تداخل نمی‌کرد. مسیر با سه وظیفه متوالی دستیابی به هدف به دست آمد. در ابتدا، نقطه عطف اول ((MS1 به عنوان هدف در کنترل‌کننده عملیاتی تنظیم شد و همان برنامه‌ریزی و اجرای مستقل مورد استفاده در آزمایش اول در اینجا اعمال شد. هنگامی که به MS1 رسیدند، دومین نقطه عطف ((MS2 به عنوان هدف بعدی در کنترل تعیین شد و همان فرآیند تکرار شد. هدف کلی مسیر به عنوان هدف نهایی در کنترل پس از رسیدن به MS2 تعیین شد. موقعیت‌های شروع، موقعیت‌های هدف، و نقاط عطف دو موضوع در میز ۱ خلاصه شده‌اند. PCB به عنوان هدف ۱ در نظر گرفته شد، در حالی که جعبه بسته‌بندی به عنوان هدف ۲ در نظر گرفته شد. جهت‌گیری‌های هدف مشخص دو نقطه

عطف متفاوت هستند، که باید به طور فعال در طول مسیرهای θ تنظیم شوند. پنج آزمایش از این کار دستکاری انجام شد. مسیرهای سفر اشیا در آزمایش ۱ در شکل ۱۲ (a) نشان داده شده است. خطوط نقطه چین رنگی نشان دهنده مسیرهای برنامه ریزی شده هستند. صلیب سیاه و دایره های قرمز نیز برای نشان دادن موقعیت های شروع و هدف به ترتیب برای شی ۲ استفاده می شوند. دو شی نسبتاً نزدیک به مسیرهای از پیش تعریف شده خود دنبال کرده بودند. شی یک ۱۵ چرخه دیگر را برای رسیدن به هدف خود به دلیل تنظیمات جهت گیری بیشتر که در طول حمل و نقل انجام شد، در نظر گرفت. مسیرهای طی شده هر پنج آزمایش در شکل ۱۲ (b) نشان داده شده است. شی ۱ مشاهده شد که مسیرهای زیگزاگ نزدیک موقعیت شروع خود دارد که از اورشوت چرخش تکراری در تنظیمات جهت گیری حاصل شده است. چرخش های کمپنزاسیون اجرا شده برای تنظیم جهت گیری شی باعث تغییرات افقی شده بود که شی را از هدف دور می کرد. حرکت شی ۱ در آزمایش ۳ (خط توپر سبز روشن) به همان دلیل از مسیر برنامه ریزی شده خود نزدیک به هدف منحرف می شود. به طور متوسط، این کار دستکاری، ۱۵۲ چرخه عملیات را تکمیل کرد، که تنها کم تر از ۴ دقیقه است. به طور کلی، کار دستکاری با موفقیت در تمام آزمایش ها انجام شده بود. این دو شی به طور منطقی نزدیک به مسیرهای از پیش تعریف شده خود در طول عملیات دنبال کرده بودند و این موضوع ثابت کرد که میز روباتیک نرم می تواند مسیریابی مستقل را برای اشیا ظریف انجام دهد. دقت دنبال کردن مسیر را می توان با استفاده از نقاط عطف بیشتر برای توصیف مسیرها بهبود بخشید. نمونه اولیه میز X55 به اندازه کافی بزرگ بود تا دو شی را بدون تعامل بین آن ها دستکاری کند. مسیرهای برنامه ریزی شده اشیا را به اندازه کافی از هم جدا می کنند، که در آن می توانند به عنوان دستکاری های مستقل در نظر گرفته شوند. این آزمایش قابلیت میز روباتیک نرم را در انجام دستکاری مستقل، مستقل و همزمان برای چندین شی تایید می کند. برای کارهای آینده، حسگرهای تغییر شکل پذیر را می توان توسعه داد و درون سطح محرک نرم قرار داد تا تغییر شکل آن را اندازه گیری کند. این داده ها می توانند به میکروکنترلر مازول بازخورد داده شوند و یک کنترل حلقه بسته را در فضای محرک شکل دهند. این امر سیستم کنترل موجود را افزایش می دهد زیرا جابجایی شی در هر چرخه را می توان با دقت بیشتری کنترل کرد. یکی از محدودیت های سیستم بینایی فعلی این است که نمی تواند با چندین شی یکسان کار کند. این موضوع در کارهای آینده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول ۱- بررسی آزمایش ۲

| هدف - شی ۲ | | | | هدف - شی ۱ | | | | |
|------------|-----|-----|------|------------|-----|-----|------|----------|
| هدف | MS2 | MS1 | شروع | هدف | MS2 | MS1 | شروع | |
| ۴۰ | ۴۰ | ۵۰ | ۱۱۰ | ۱۳۰ | ۹۰ | ۴۵ | ۳۰ | X |
| ۱۱۰ | ۱۳۰ | ۱۴۰ | ۱۵۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۵۰ | Y |
| ۰ | ۶۵ | ۸۰ | ۹۰ | ۲۰ | ۲۰ | ۵۰ | ۷۰ | θ |

۶. نتیجه گیری

در این مقاله، طراحی، توسعه و اعتبار سنجی سیستم کنترل حلقه بسته میز روباتیک نرم را ارائه می کند. سیستم بازخورد بینایی یکی از اجزای این سیستم کنترل است. یک وب کم برای گرفتن تصاویر سطح میز مورد استفاده قرار گرفت و الگوریتم های مختلف پردازش تصویر برای تعیین موقعیت شی اجرا شد. کنترل کننده عملیاتی جز دیگری از سیستم حلقه بسته است. سه مجموعه از الگوریتم ها برای برنامه ریزی حرکت شی، انتخاب فعال کننده ها، و برنامه ریزی تحریک برای هر چرخه عملیاتی توسعه داده شدند. دو مجموعه از آزمایش ها شامل وظایف مختلف دستکاری برای تایید این سیستم کنترل حلقه بسته انجام شد. حمل و نقل شی از یک موقعیت به موقعیت دیگر با برنامه ریزی و اجرای مستقل ثابت شده است که با استفاده از این سیستم حلقه بسته موفق بوده است. دستکاری همزمان اشیا متعدد نیز تایید شد زیرا تمام وظایف دستکاری انجام شده در آزمایش دوم با موفقیت تکمیل شدند.

۱۲. منابع و مراجع

- [1] N. Uchiyama, S. Sano, and K. Ryuman, "Control of a robotic manipulator for catching a falling raw egg to achieve human-robot soft physical interaction," in Proc. IEEE RO-MAN, Sep. 2012, pp. 777–784.
- [2] T. Yoshimi, N. Iwata, M. Mizukawa, and Y. Ando, "Picking up operation of thin objects by robot arm with two-fingered parallel soft gripper," in Proc. IEEE Workshop Adv. Robot. Social Impacts (ARSO), May 2012, pp. 7–12.
- [3] E.-C. Park, H. Lim, and C.-H. Choi, "Position control of X-Y table at velocity reversal using presliding friction characteristics," IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 11, no. 1, pp. 24–31, Jan. 2003.
- [4] C.-H. Kim and Y.-K. Kim, "Micro XY-stage using silicon on a glass substrate," J. Micromech. Microeng., vol. 12, no. 2, pp. 103–107, 2002.
- [5] Q. Xu, Y. Li, and N. Xi, "Design, fabrication, and visual servo control of an XY parallel micromanipulator with piezo actuation," IEEE Trans. Autom. Sci. Eng., vol. 6, no. 4, pp. 710–719, Oct. 2009.
- [6] D. Trivedi, C. D. Rahn, W. M. Kier, and I. D. Walker, "Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research," Appl. Bionics Biomech., vol. 5, no. 3, pp. 99–117, 2008.
- [7] H.-T. Lin, G. G. Leisk, and B. Trimmer, "GoQBot: A caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot," Bioinspir. Biomim., vol. 6, no. 2, 2011, Art. no. 026007.
- [8] A. D. Marchese, C. D. Onal, and D. Rus, "Autonomous soft robotic fish capable of escape maneuvers using fluidic elastomer actuators," Soft Robot., vol. 1, no. 1, pp. 75–87, 2014.
- [9] E. T. Roche et al., "Soft robotic sleeve supports heart function," Sci. Transl. Med., vol. 9, no. 373, 2017, Art. no. eaaf3925.
- [10] Y. Mengüç et al., "Soft wearable motion sensing suit for lower limb biomechanics measurements," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA), May 2013, pp. 5309–5316.
- [11] M. Cianchetti et al., "Soft robotics technologies to address shortcomings in today's minimally invasive surgery: The STIFF FLOP approach," Soft Robot., vol. 1, no. 2, pp. 122–131, 2014.
- [12] Z. Deng, M. Stommel, and W. Xu, "A novel soft machine table for manipulation of delicate objects inspired by caterpillar locomotion," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 21, no. 3, pp. 1702–1710, Jun. 2016.
- [13] (2014). WaveHandling. Accessed: Mar. 17, 2014. [Online]. Available: http://www.festo.com/cms/en_corp/13136.htm
- [14] W. Lee, N. Lee, J.-W. Kim, M. Shin, and J. Lee, "'MoleBot': An organic user-interface-based robot that provides users with richer kinetic interactions," Interact. Comput., vol. 25, no. 2, pp. 154–172, 2013.
- [15] S. W. Follmer, D. Leithinger, A. Olwal, A. Hogge, and H. Ishii, "inFORM: Dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation," in Proc. UIST, vol. 13, 2013, pp. 417–426.
- [16] T. H. Vose, P. Umbanhowar, and K. M. Lynch, "Friction induced lines of attraction and repulsion for parts sliding on an oscillated plate," IEEE Trans. Autom. Sci. Eng., vol. 6, no. 4, pp. 685–699, Oct. 2009.
- [17] Z. Deng, M. Stommel, and W. Xu, "Mechatronics design, modeling, and characterization of a soft robotic table for object manipulation on surface," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 23, no. 6, pp. 2715–2725, Dec. 2018.
- [18] M. Stommel and W. Xu, "Optimal, efficient sequential control of a soft-bodied, peristaltic sorting table," IEEE Trans. Autom. Sci. Eng., vol. 13, no. 2, pp. 858–867, Apr. 2016.

- [19] M. Stommel, Z. Deng, and W. L. Xu, "Probabilistic automata model of a soft robot for the planning of manipulation tasks," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 1722–1730, Oct. 2017.
- [20] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, "Speeded up robust features (SURF)," *Comput. Vis. Image Understand.*, vol. 110, no. 3, pp. 346–359, 2008.
- [21] M. A. Fischler and R. C. Bolles, "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," in *Readings in Computer Vision*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1987, pp. 726–740.
- [22] C. Tomasi and T. Kanade, "Shape and motion from image streams under orthography: A factorization method," *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 9, no. 2, pp. 137–154, Nov. 1992.

Programmable independent operation and closed-loop control of a soft robotic table for simultaneous manipulation of multiple objects

Mohammadreza mohammadiyan asiabar,
Master's degree, Islamic Azad University, Karaj Branch,
mohammadrezamohammadiyan28@yahoo.com

Abstract— This paper presents the design, development and validation of a closed-loop control system for a soft robotic table. A soft table can simultaneously provide independent manipulation of multiple objects, which is an advantage over traditional devices such as robotic arms and conveyor belt systems. This table also allows for the inherent smooth handling of delicate objects. In order to implement the automation tasks, a vision feedback system and an operation controller are developed and integrated into the existing desk prototype to form a closed-loop control. The vision feedback system implements image processing techniques to identify the object position from captured images. The operational controller is integrated from three sets of algorithms including motion planning, stimulus selection and stimulation planning. Two sets of tests were conducted to validate the closed loop system and the soft table capability. The first set confirms the manipulative task of moving an object to a desired location with independent planning and execution. The second set confirms the table's ability to manipulate multiple objects simultaneously and independently. Videos of both tests have been prepared. Attention experts - a soft robotic table has been developed for manipulating delicate objects on a surface. This table is intended for automatic sorting tasks in an industrial environment. Multiple objects placed on the table surface can be simultaneously and independently moved and oriented on the horizontal XY plane. The deformable surface of the table allows smooth manipulation of delicate objects. These are advantages over existing manipulators such as robotic arms and conveyor belt systems. Based on previous experiments, it was found that open-loop control is inefficient for performing automation tasks due to the variability in the motion of objects with soft interactions. To solve this problem, a closed-loop control system for independent object manipulation has been developed, and its detailed design and implementation are presented in this paper. A vision feedback system and a controller are developed to form the proposed closed-loop control. Two sets of experiments involving routine manipulation tasks were performed. It has been proven that the control system is effective in controlling the uncertainty in the object movements and the automatic manipulation of the object by the soft robotic table. The performance of this control system can be improved by better predicting both the deformations on the table surface and the resulting object movements. Placing deformable sensors on the surface of the table is a potential method to achieve such an improvement, and this issue can be explored in future work.

Key words: closed loop control, object manipulation, soft robotics, soft table.