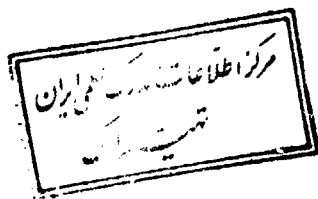


دانشگاه تهران

دانشکده فنی

گروه مهندسی برق و کامپیوتر

۱۶ / ۹ / ۱۳۷۹



پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

در

رشته مهندسی کامپیوتر - گرایش هوش ماشین و رباتیک

011234

موضوع:

مطالعه مسأله قفل حرکتی در سیستم ربات‌های

گسترده جابه‌جا کننده اجسام

توسط:

محمدرضا بارونی ابراهیمی

استاد راهنما:

دکتر مجید نیلی احمد آبادی

استاد مشاور:

دکتر بهزاد مشیری

پاییز سال ۱۳۷۹

۳۴۰۷۹

موضوع:

# مطالعه مسأله قفل حرکتی در سیستم ربات‌های گسترده جابه‌جاکننده اجسام

توسط:

محمد رضا بارونی ابراهیمی

پایان‌نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

در

رشته مهندسی کامپیوتر- گرایش هوش ماشین و رباتیک

از این پایان‌نامه در تاریخ ۱۳۷۹/۷/۱۹ در مقابل هیات داوران دفاع به عمل آمد و مورد تصویب قرار گرفت.

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده فنی- دکتر محمد علی بنی هاشمی

سرپرست گروه مهندسی برق و کامپیوتر- دکتر محمود کمره‌ای

سرپرست تحصیلات تکمیلی گروه- دکتر جواد فیض

استاد راهنما- دکتر مجید نیلی احمدآبادی

استاد مشاور- دکتر بهزاد مشیری

عضو هیات داوران- دکتر پرویز جبه‌دار مارالانی

عضو هیات داوران- دکتر کارولوکس

عضو هیات داوران- دکتر محمد جواد یزدان‌پناه

۳۴۰۷۹

## چکیده

روش‌های کنترل گسترده‌ی ربات‌های همکار در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. در الگوریتم‌های ارائه‌شده، وظایف بین ربات‌ها تقسیم شده و در مجموع تیم ربات‌ها با همکاری یکدیگر وظیفه‌ی مورد نظر را انجام می‌دهد. یکی از روش‌های مطرح شده الگوریتم محدودیت-حرکت<sup>1</sup> [1] می‌باشد. در الگوریتم محدودیت-حرکت برای دوران یک جسم در دو بعد، یک گروه ربات متحرک جسم را به گونه‌ای محدود می‌نمایند که جسم نتواند در راستای دو بعد حرکت کند و فقط بتواند حول نقطه‌ی مشخصی دوران نماید. گروه دیگر ربات‌ها جسم را هل می‌دهند تا جسم حول مرکز دوران مورد نظر دوران نماید. وجود اندکی خطا در راستای بازوی ربات‌ها موجب می‌شود که جسم نتواند در یکی از دو جهت ممکن (یا در هر دو جهت) دوران کند و مشکل قفل دورانی به وجود آید. استفاده از نرمی می‌تواند مشکل قفل دورانی را با وجود خطاهای کوچک در راستای بازوها برطرف نماید. اثرات نامطلوب نرمی در سیستم و محدودیت آن در رفع خطا کارایی سیستم را پایین می‌آورد.

در این پایان‌نامه پس از تحلیل دلایل به وجود آمدن قفل دورانی در یک تیم سه رباته‌ی محدودکننده‌ی جسم، روشی گسترده برای حل مشکل قفل دورانی بدون استفاده از نرمی مطرح شده است. همچنین الگوریتم‌های ساده‌ای برای تشخیص مشکل قفل دورانی آورده شده است. مشکل قفل دورانی برای تعداد چهار و پنج ربات محدودکننده نیز مورد بررسی قرار گرفته و راه‌حل گسترده‌ی رفع آن ارائه شده است. در انتها سیستم شبیه‌سازی و مشابه‌سازی‌های مربوطه برای ارزیابی کارایی الگوریتم‌ها در شرایط مختلف و مقایسه‌ی آن با روش استفاده از نرمی در بازوهای ربات مطرح شده است.

**کلمات کلیدی:** ربات متحرک، سیستم‌های گسترده، همکاری رباتیکی، هماهنگی، جابجایی

اجسام، دوران جسم

تقدیم به خانواده‌ی گرامیم که از  
صمیم قلب دوستشان دارم.

... لازم می‌دانم سپاس قلبی خود را به استاد گرامی  
جناب آقای دکتر نیلی تقدیم نمایم، چرا که بدون  
رهنمودهای ایشان انجام این پژوهش برای من میسر  
نبود. همچنین از همکاری صمیمانه کلیه‌ی دوستان و  
آشنایان (که ذکر اسامی آن‌ها در این مختصر نمی‌گنجد)  
کمال تشکر را دارم.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱- مقدمه
۴	۲- مروری بر سیستم‌های گسترده‌ی جابه‌جاکننده‌ی اجسام
۴	۱-۲- جابه‌جا کردن یک جسم در دو بعد به روش Stilwell
۵	۲-۲- دوران اجسام در دو بعد به روش Rus
۷	۱-۲-۲- قرارداد کنترلی off-line, global
۸	۲-۲-۲- قرارداد کنترلی off-line, local
۸	۳-۲-۲- قرارداد online, synchronous
۹	۴-۲-۲- قرارداد online, asynchronous
۹	۳-۲- روش BeRoSH
۱۲	۴-۲- الگوریتم محدودیت-حرکت
۱۴	۵-۲- نتیجه‌گیری
۱۵	۳- الگوریتم محدودیت-حرکت برای دوران یک جسم حول یک مرکز دوران دلخواه در دو بعد
۲۳	۱-۳- مشکل قفل دورانی
۲۳	۲-۳- رفع مشکل قفل دورانی به کمک ایجاد نرمی در بازوها
۲۶	۱-۲-۳- معایب استفاده از نرمی برای رفع مشکل قفل دورانی
۲۸	۳-۳- رفع مشکل قفل دورانی به کمک دوران بازوها
۳۲	۱-۳-۳- الگوریتم دوران بازو برای رفع مشکل قفل دورانی
۳۲	۴-۳- پارامترهای مهم برای بررسی و مقایسه‌ی الگوریتم‌ها
۳۲	۱-۴-۳- خطای جابه‌جایی مرکز دوران دلخواه
۳۳	۲-۴-۳- خطای نیروهای داخلی
۳۷	۵-۳- تحلیل و مقایسه‌ی الگوریتم‌های برطرف‌کننده‌ی مشکل قفل
۴۲	۶-۳- به وجود آمدن مثلث اشتراک در الگوریتم دوران بازو
۴۳	۷-۳- تشخیص مشکل قفل دورانی
۴۴	۱-۷-۳- الگوریتم سرعت-مکان برای تشخیص مشکل قفل دورانی و رفع آن
۴۶	۲-۷-۳- الگوریتم نیروی داخلی برای تشخیص قفل دورانی و رفع آن

۴۹	۳-۷-۳- بررسی کلی دو الگوریتم نیروی داخلی و سرعت-مکان
۴۹	۳-۸- ترکیب نرمی و الگوریتم دوران بازو برای رفع مشکل قفل دورانی
۵۱	۴- افزایش تعداد ربات‌ها
۵۱	۴-۱- بحث ریاضی
۵۴	۴-۲- مشکل قفل دورانی با وجود ۴ ربات محدودکننده
۶۰	۴-۳- الگوریتم دوران بازو
۶۴	۵- شبیه‌سازی
۶۴	۵-۱- نرم‌افزار شبیه‌ساز
۶۴	۵-۱-۱- مدل ربات متحرک
۷۰	۵-۱-۲- مدل جسم
۷۱	۵-۲- محیط شبیه‌سازی و آزمایش‌های با چهار ربات
۸۷	۵-۳- محیط شبیه‌سازی و آزمایش‌های با پنج ربات
۹۳	۶- نتایج و پیشنهادات
۹۵	مراجع
۹۵	ضمیمه
۹۷	۱- مرکز دوران لحظه‌ای (Instantaneous centr of rotation) (ICR)
۹۸	۲- مخروط اصطکاک

## فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۵	شکل ۱-۲: ربات‌های شبیه تانک در حال جابه‌جا کردن جسم به روش Stilwell هستند.
۶	شکل ۲-۲: ربات‌ها به کمک عمل push-track جسم را دوران می‌دهند.
۷	شکل ۳-۲: روش قرارداد کنترلی مرکزی غیر لحظه‌ای برای دوران یک جسم
۹	شکل ۴-۲- سیستم BeRoSH
۱۰	شکل ۵-۲- جهت توانایی ربات و نقطه هدف مجازی
۱۱	شکل ۶-۲- رفتارهای فعال ربات و حرکت ربات به سمت هدف
۱۱	شکل ۷-۲- بستار فرم در صفحه دوبعدی
۱۲	شکل ۸-۲: هندل با محدودیت در نیروی وارده آن را به نیروی دورانی تبدیل می‌کند.
۱۳	شکل ۹-۲- محدودیت برای حرکت روی مسیر مستقیم
۱۵	شکل ۱-۳- جابه‌جایی جسم توسط چند ربات همکار
۱۷	شکل ۲-۳: نیم‌صفحه‌ی مجاز ربات محدودکننده قسمت هاشورخورده است.
۱۸	شکل ۳-۳: دو ربات محدودکننده نمی‌توانند ناحیه‌ی مجاز بسته‌ای برای تشکیل ICR ایجاد کنند.
۱۹	شکل ۴-۳: سه ربات محدودکننده ناحیه‌ی مجاز برای تشکیل ICR را به یک نقطه تبدیل نموده‌اند.
۱۹	شکل ۵-۳: اگر سه ربات محدودکننده شرط محدودیت را رعایت نکنند ناحیه‌ی مجاز برای تشکیل ICR محدود نمی‌شود.
۲۰	شکل ۶-۳: گشتاوری حول مرکز دوران جسم (O) ایجاد می‌کند.
۲۲	شکل ۷-۳: چهار ربات به کمک الگوریتم محدودیت حرکت جسم را دوران می‌دهند.
۲۴	شکل ۸-۳: با توجه به جهت دوران، مثلث ABC ممکن است مثلث اشتراک(الف) یا مثلث قفل (ب) باشد.
۲۵	شکل ۹-۳: اگر راستای بازوی ربات‌ها از یک نقطه‌ی مشترک نگذرد، مثلث صلب $T_1T_2T_3$ محصور بین ربات‌ها در یک جهت نمی‌تواند دوران نماید.
۲۷	شکل ۱۰-۳: با استفاده از فنر در بازوی ربات‌ها می‌توان نرمی در سیستم ایجاد نمود.
۲۷	شکل ۱۱-۳: با ایجاد نرمی در سیستم، مثلث $T_1T_2T_3$ آزاد می‌شود و می‌تواند دوران نماید.



۲۹	شکل ۳-۱۲: با وجود شرط محدودیت ایده‌آل، مثلث قفل حتماً درون مثلث جسم قرار می‌گیرد.
۳۰	شکل ۳-۱۳: با دوران $d_2$ در جهت عکس $\gamma$ همپوشانی نیم‌صفحه‌ی مجاز ربات ۲ و مثلث جسم افزایش می‌یابد.
۳۴	شکل ۳-۱۴: اگر دوران جسم حول مرکز دوران دلخواه نباشد از خطای جابه‌جایی مرکز دوران دلخواه برای مقایسه‌ی الگوریتم‌ها استفاده می‌شود.
۳۶	شکل ۳-۱۵: در حالتی که راستای ربات از $c.t$ (مرکز دوران واقعی جسم) نمی‌گذرد اگر $c.t$ در حین دوران در نیم‌صفحه‌ی مجاز ربات نباشد فنر ربات فشرده می‌شود و اگر $c.t$ در نیم‌صفحه‌ی مجاز ربات باشد فنر ربات از حالت فشردگی خارج می‌شود.
۴۰	شکل ۳-۱۶: راستای ربات ۲ از نقطه‌ی $d.c.t$ نمی‌گذرد و با توجه به جهت دوران جسم مثلث قفل به‌وجود آمده است.
۴۳	شکل ۳-۱۷: دوران بیش از حد ربات ۳ مثلث قفل را به مثلث اشتراک تبدیل می‌کند.
۴۷	شکل ۳-۱۸: وقتی جسم به درستی در حال دوران است (وضعیت ۱)، اگر نیروی $F_{ext}$ بزرگی بر جسم وارد شود، الگوریتم نیروهای داخلی مرکز دوران را به هم می‌زند و مثلث اشتراک درست می‌کند (وضعیت ۲).
۵۲	شکل ۴-۱: اگر چهار ربات جسم را محدود کنند، دو ربات قرینه وجود خواهد داشت.
۵۳	شکل ۴-۲: اگر ۵ ربات به درستی جسم را محدود کنند با حذف یک ربات دلخواه می‌توان الگوریتم محدودیت حرکت را اجرا نمود.
۵۴	شکل ۴-۳: اگر راستای بازوی ربات‌ها از یک نقطه نگذرد، تشخیص دو ربات قرینه و شرط محدودیت جسم به سادگی امکان‌پذیر نیست.
۵۵	شکل ۴-۴: بردار $v_1$ بردار سرعت ممکن برای جسم و بردار $v_2$ بردار سرعت غیرممکن است.
۵۶	شکل ۴-۵: با دو ربات محدودکننده ناحیه‌ی امکان از بین نمی‌رود.
۵۷	شکل ۴-۶: محور منفی بازوی هر ربات بین محورهای مثبت بازوهای دو ربات دیگر قرار دارد و شرط محدودیت برقرار است.
۵۹	شکل ۴-۷: از روی محور ربات‌ها می‌توان تشخیص داد که سه ربات ۱، ۲ و ۳ جسم را محدود کرده‌اند و ربات اضافه‌شده با ربات ۲ قرینه است.
۶۰	شکل ۴-۸: با توجه به جهت دوران، مثلث $M_2P_1P_2$ مثلث قفل و مثلث $M_1M_2M_3$ مثلث اشتراک است.
۶۱	شکل ۴-۹: با توجه به جهت دوران، مثلث $MP_1P_2$ مثلث قفل و ربات اضافه‌شده، ربات خطاکار است.

۶۳	شکل ۴-۱۰: با توجه به جهت دوران، مثلث $MP_1M_2$ و مثلث $MM_1M_2$ ، هر دو مثلث قفل هستند و ربات ۳، ربات خطا کار است.
۶۴	شکل ۵-۱: مدل سینماتیکی ربات متحرک
۶۵	شکل ۵-۲: از روی $v_1$ و $v_r$ می توان مکان نقطه $O$ و اندازه $v$ دوران ربات را به دست آورد.
۶۹	شکل ۵-۳: با داشتن بردار $v$ رأس ربات می توان سرعت چرخ ها را بدست آورد.
۶۹	شکل ۵-۴: بازوی ربات با یک فنر-دمپر مدل سازی شده است.
۷۲	شکل ۵-۵: مدل سیستمی که در شبیه سازی برای انجام آزمایش ها از آن استفاده شده است.
۷۳	شکل ۵-۶: نمودار زاویه، $e_r$ و $F_r$ برای سه ضریب مختلف فنر، بدون وجود خطا در راستای بازوی ربات ها (آزمایش اول، حالت اول)
۷۵	شکل ۵-۷: نمودار زاویه، $e_r$ و $F_r$ برای سه ضریب مختلف فنر، با وجود دو درجه خطا در راستای بازوی ربات ۲، بدون رفع خطا (آزمایش اول، حالت دوم)
۷۶	شکل ۵-۸: نمودار زاویه، $e_r$ و $F_r$ برای سه ضریب مختلف فنر، با چهار درجه خطا در راستای بازوی ربات ۲، بدون رفع خطا (آزمایش اول، حالت سوم)
۷۸	شکل ۵-۸: نمودار زاویه، $e_r$ و $F_r$ برای سه ضریب مختلف فنر، با چهار درجه خطا در راستای بازوی ربات ۲، بدون رفع خطا (آزمایش اول، حالت سوم)
۸۰	شکل ۵-۱۰: نمودار زاویه، $e_r$ و $F_r$ برای سه روش رفع خطا با استفاده از الگوریتم سرعت-مکان، با چهار درجه خطا در راستای بازوی ربات ۲، ضریب فنر $K=100,000$ ، (آزمایش دوم، حالت دوم)
۸۱	شکل ۵-۱۱: نمودار زاویه، $e_r$ و $F_r$ برای سه نرمی مختلف، با چهار درجه خطا در راستای بازوی ربات ۲، رفع خطا به روش همی ربات ها با استفاده از الگوریتم سرعت-مکان (آزمایش سوم، حالت اول)
۸۳	شکل ۵-۱۲: نمودار زاویه، $e_r$ و $F_r$ برای سه نرمی مختلف، با شش درجه خطا در راستای بازوی ربات ۲، روش همی ربات ها با الگوریتم سرعت-مکان، (آزمایش سوم، حالت دوم)
۸۴	شکل ۵-۱۳: نمودار زاویه، $e_r$ و $F_r$ برای دو وضعیت الگوریتم سرعت مکان، بدون وجود خطا، ضریب فنر $K=100,000$ ، رفع خطا به روش همی ربات ها (آزمایش چهارم)
۸۶	شکل ۵-۱۴: نمودار زاویه، $e_r$ و $F_r$ برای دو دوران مختلف به وسیله الگوریتم نیروی داخلی، با وجود چهار درجه خطا در راستای بازوی ربات ۲، ضریب فنر $K=10,000$ ، (آزمایش پنجم)
۸۷	شکل ۵-۱۵: محیط شبیه سازی با پنج ربات که در آن ربات ۳ و ربات اضافه شده قرینه هستند.

۸۸	شکل ۵-۱۶: نمودار زاویه، $e_r$ و $F_r$ برای دو حالت: بدون رفع خطا و رفع خطا به وسیله‌ی ربات قرینه، با وجود پنج درجه خطا در راستای بازوی ربات اضافه‌شده، $K=10,000$ ، (آزمایش ششم)
۹۰	شکل ۵-۱۷: نمودار زاویه، $e_r$ و $F_r$ با وجود پنج درجه خطا در راستای بازوی ربات اضافه‌شده، $K=10,000$ ، مقایسه‌ی سه روش دوران بازو، (آزمایش ششم)
۹۱	شکل ۵-۱۸: نمودار زاویه، $e_r$ و $F_r$ برای دو حالت عدم رفع خطا و رفع خطا به وسیله‌ی یکی از ربات‌های قرینه، با وجود چهار درجه خطا در راستای بازوی ربات ۲ (ربات غیرقرینه)، $K=10,000$ ، (آزمایش هفتم)
۹۲	شکل ۵-۱۹: نمودار زاویه، $e_r$ و $F_r$ برای سه روش رفع خطا، با وجود چهار درجه خطا در راستای بازوی ربات ۲، $K=10,000$ ، (آزمایش هفتم)
۹۷	شکل ض-۱: ICR برای یک میله در لحظه‌ای که سرعت خطی دو سر میله $v_o$ و $v_B$ هستند.
۹۸	شکل ض-۲: وقتی دو بردار سرعت موازی هستند ICR از تقاطع محور OB و خط متصل‌کننده‌ی رأس دو بردار به دست می‌آید.
۹۹	شکل ض-۳: برای این که دست ربات لیز نخورد باید راستای بازوی ربات در مخروط اصطکاک باشد.

# فصل اول

## مقدمه

امروزه انجام وظیفه به کمک ربات‌ها امری عادی به‌شمار می‌آید. یک ربات برای انجام وظیفه‌ی خود اولاً به سخت‌افزار لازم مانند حس‌گر، بازو و ۰۰۰ نیاز دارد و ثانیاً باید الگوریتم مناسبی برای اجرای درست وظیفه داشته باشد. پیچیده شدن سخت‌افزار و نرم‌افزار مورد نیاز از یک سو و استفاده‌ی ربات تولیدشده برای یک وظیفه‌ی خاص از سوی دیگر باعث پیدایش سیستم‌های چندرباته شده است. یک گروه ربات علاوه بر انجام وظایف مختلف می‌توانند با تقسیم وظایف الگوریتم‌های ساده‌تری را به‌کار گیرند.

اساس اغلب تصمیم‌گیری‌هایی که برای تعریف یک معماری گروهی انجام می‌گیرد این است که آیا این معماری از نوع سیستم‌های مرکزی<sup>۱</sup> باشد یا غیرمرکزی و اگر غیرمرکزی است آیا یک سیستم گسترده باشد یا سلسله‌مراتبی<sup>[11]</sup>. معماری‌های مرکزی توسط یک عامل<sup>۲</sup> کنترلی واحد، مشخص و هدایت می‌شوند ولی معماری‌های غیرمرکزی دارای یک منبع عامل نیستند. در معماری‌های گسترده که نوعی از معماری‌های غیرمرکزی هستند همه‌ی عامل‌ها از نظر کنترلی یکسان هستند و معماری‌های سلسله‌مراتبی به صورت داخلی مرکزی هستند. به‌طور کلی معماری‌های غیرمرکزی مزایای متعددی بر معماری‌های مرکزی دارند. از جمله‌ی این مزایا می‌توان عدم نیاز به یک ربات جهت راهبری، تحمل‌پذیری بیشتر خطا و قابلیت اطمینان بالاتر را نام برد.

---

<sup>۱</sup> Centralized

<sup>۲</sup> Hierarchical

<sup>۳</sup> Agent

یک سیستم چند رباتی در حقیقت یک حالت خاص از سیستم محاسباتی گسترده است. بنابراین سیستم‌های گسترده یک منبع طبیعی ایده‌ها و راه‌حل‌ها برای سیستم‌های چند رباتی است و هر ربات متعلق به فضای عمومی سیستم محاسباتی گسترده است. اما باید متوجه بود که سیستم‌های محاسباتی گسترده فقط براساس تئوری‌های عمومی استفاده می‌شوند و در مرحله‌ی بعد باید این روش‌ها بر روی مجموعه‌های رباتیکی پیاده شود. یک سیستم محاسباتی گسترده شامل یک مجموعه از وسایل محاسباتی است که ممکن است در قالب‌های جداگانه‌ای به نام سایت‌ها قرار بگیرند. در شبیه‌سازی سیستم‌های محاسبات گسترده، وابستگی تئوری‌ها به dead lock، ارسال پیغام<sup>۱</sup> و اختصاص منابع<sup>۲</sup> برای جمع‌آوری ربات‌ها در یک مجموعه مؤثر است. کنترل گسترده، یک روش امیدوارکننده برای هماهنگی چند ربات است. به‌خاطر مشکلات ارتباط، کنترل گسترده می‌تواند فرمول‌های امیدوارکننده‌ای برای هماهنگی ربات‌ها با کمترین ارتباط پیشنهاد کند. در حقیقت شرط اولیه‌ی یک سیستم مرکزی ارتباط بین عامل کنترلی با بقیه‌ی عامل‌ها است. اما کنترل گسترده عامل کنترلی مرکزی ندارد. در یک سناریوی ایده‌آل، بیشترین تحمل‌پذیری خطا، عدم نیاز به داشتن مدل عامل‌های دیگر و ساده‌ترین سیستم کنترلی مدنظر است.

در یک سیستم گسترده‌ی جابه‌جا کننده‌ی اجسام، وزن جسم بین ربات‌ها تقسیم می‌شود. از سوی دیگر ربات‌ها می‌توانند اجسام با اشکال هندسی متفاوت را جابه‌جا نمایند. افزایش تعداد ربات‌ها می‌تواند تحمل‌پذیری خطا را در سیستم افزایش دهد ولی باید توجه داشت که هماهنگی بین ربات‌ها در جابه‌جا کردن سیستم امری حیاتی به‌شمار می‌آید. این هماهنگی باید در ساخت ربات و در الگوریتم انجام وظیفه مدنظر قرار گیرد. از سوی دیگر ایجاد ارتباط در سیستم مشکلات خاص خود را دارد و عدم استفاده از آن بر پیچیدگی الگوریتم می‌افزاید.

---

Message passing<sup>۱</sup>  
Resource allocation<sup>۲</sup>

در این پایان نامه ابتدا در فصل دوم الگوریتم‌های به کار رفته برای جابه‌جایی اجسام به کمک سیستم‌های گسترده مرور می‌شود. در این الگوریتم‌ها از سیستم‌های مرکزی، رهبر-رهرو و ... استفاده شده است. همچنین الگوریتم محدودیت حرکت (که برای جابه‌جایی یک جسم به کمک یک سیستم گسترده‌ی ربات به کار گرفته شده است) بیان می‌گردد. الگوریتم محدودیت حرکت بسیاری از پارامترهای مثبت را دارد و از جهاتی بر روش‌های دیگر مطرح شده برتری دارد. اما اثرات منفی نیروهای بین ربات‌ها مشکل قفل حرکتی را به وجود می‌آورد. راه حل رفع مشکل قفل حرکتی (استفاده از نرمی) چندان کارا نیست.

در فصل سوم ابتدا الگوریتم محدودیت حرکت برای دوران یک جسم، مشکل قفل دورانی، استفاده از نرمی برای رفع مشکل قفل دورانی و مشکلات آن مطرح می‌شود. سپس ایده‌ی جدید رفع مشکل قفل دورانی (الگوریتم دوران بازو) بدون استفاده از نرمی بیان می‌شود. با تعریف دو پارامتر مقایسه‌ای، کارایی الگوریتم دوران بازو بررسی شده و با روش ایجاد نرمی مقایسه می‌شود. پس از آن الگوریتم‌های تشخیص مشکل قفل دورانی پیشنهاد و بررسی می‌شوند. در انتهای فصل راه‌حل بهینه برای رفع خطا پیشنهاد می‌شود.

در فصل چهارم افزایش تعداد ربات‌ها مدنظر قرار می‌گیرد. تأثیرات ربات اضافه‌شده، مشکل قفل دورانی در این حالت، امکان استفاده از الگوریتم‌های رفع مشکل قفل و کارایی آن‌ها بررسی می‌شود.

در فصل پنجم ابتدا نرم‌افزار شبیه‌ساز توضیح داده می‌شود. معادلات حاکم بر ربات و مدل سیستم بیان می‌شود. در انتهای فصل آزمایش‌های انجام شده به کمک شبیه‌ساز برای بررسی کارایی الگوریتم‌ها وجود دارد.

در انتها نتیجه‌گیری کلی و پیشنهاد ادامه‌ی کار آمده است.

# فصل دوم

## سیستم‌های گسترده‌ی

## جابه‌جاکننده‌ی اجسام

سیستم‌های گسترده به خوبی توانسته‌اند قابلیت خود را در جابه‌جایی اجسام به نمایش بگذارند. جابه‌جایی اجسام سنگین با اشکال هندسی مختلف نیاز به رباتی پیچیده و قدرتمند دارد. در یک سیستم گسترده‌ی رباتیکی از یک سو وزن جسم بین مجموعه‌ی ربات‌ها تقسیم می‌شود و از سوی دیگر ربات‌ها وابستگی کمتری به شکل هندسی جسم دارند. در این راستا مجموعه‌ی ربات‌ها به دلیل داشتن یک وظیفه‌ی مشترک (جابه‌جایی جسم) که آن‌ها را به یکدیگر وابسته می‌نماید باید الگوریتمی هماهنگ داشته‌باشند. تاکنون روش‌های مختلفی برای جابه‌جایی اجسام توسط سیستم‌های گسترده‌ی رباتی مطرح شده است. در ذیل چند روش نمونه که ارتباط بیشتری با بحث‌های ارائه شده در این پایان‌نامه دارند توضیح داده می‌شود.

### ۱-۲ - جابه‌جا کردن یک جسم در دو بعد به روش *Stilwell*

Stilwell روشی را پیشنهاد کرده است [12] که در آن چند ربات شبیه تانک، یک جسم را در دو بعد جابه‌جا می‌کنند (شکل ۱-۲). جسم روی ربات‌ها قرار دارد و ربات‌ها به سمت مقصد حرکت می‌کنند. همه‌ی ربات‌ها جهت حرکت جسم را می‌دانند ولی ممکن است همه‌ی ربات‌ها نتوانند در جهت دقیق به