

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی حرکت برای یک کانتینیوم ربات پایه متحرک

دانشجو:

آرمان مردانی

استاد راهنما:

دکتر مهدی بامداد

شهریور ۱۳۹۳



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:
تاریخ:
ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای آرمان مردانی رشته مکترونیک گرایش مکترونیک تحت عنوان طراحی حرکت برای یک کانتینوم ربات پایه متحرک. برای یک کانتینوم ربات پایه متحرک. که در تاریخ ۱۳۹۳/۶/۲۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : عالی امتیاز) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰-۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹-۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹-۱۶)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹-۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر مهدی بامداد	۱- استادراهنما
			۲- استاد مشاور
	استادیار	دکتر امیر جلالی	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر محمد اعظم خسروی	۴- استاد ممتحن
	استادیار	دکتر حبیب احمدی	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان

امضاء



تقدیم بہ تو کہ حاصل دو سال از زندگی مرا کشودہ امی

تشر و قدردانی

به نام ایزد دانش و آفرینش. به نام آن کس که بزرگ‌ترین هدیه مرا همراهی با اساتیدی کوشا قرارداد تا بتوانم از این گران‌مایه زندگی اندک، برای بزرگی و فر سرزمینم بیشتر بکوشم.

من آرمان مردانی فرزند منوچهر فرزند جهانگیر تا جان در بدن دارم بنده دانش کسانی خواهم بود؛ که در راه خوشنودی ایزد دانش می‌کوشند. اساتیدی گرام چون دکتر مهدی بامداد و دکتر سعید ابراهیمی که بیش از هر آفریده دیگری پس از پدر و مادرم مدیونشان هستم چون مرا آموختند. پرورش دادند و کوشیدند تا پژوهش پیش رو و پژوهش‌های دیگر این‌جانب به بار بنشیند.

کسانی که بیش از یک دنیا برای من ارزش دارند ولی با این حال در جمله کوچکی وصف می‌شوند: استادانی که پدرانۀ یاری‌ام کردند.

همچنین از مهندس فرزین طاهری و عباسعلی اصغری، دانشجویان دانشگاه صنعتی شاهرود، به دلیل مشاوره و کمک در زمینه ساخت مدل اولیه سپاس فراوان دارم.

آرمان مردانی

چهارم تیرماه ۱۳۹۳ خورشیدی

شاهرود

تعهد نامه

این جانب آرمان مردانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکترونیک دانشکده مهندسی مکترونیک و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه " طراحی حرکت برای یک کانتینیوم ربات متحرک " تحت راهنمایی دکتر مهدی بامداد متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ ۲۶ شهریور ماه ۱۳۹۳



امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

ربات‌های کف‌نورد یکی از کاربردی‌ترین ربات‌های متحرک، در امر کاوش هستند. این ربات‌ها در انواع چرخ‌دار و مجهز به پا ساخته شده‌اند و بنابر کاربرد ساختار مکانیکی متفاوتی یافته‌اند. این ساختار مکانیکی مشکلاتی را نیز فراهم آورده است؛ که از جمله آن می‌توان به محدودیت‌های کارکرد در برخی وضعیت‌ها اشاره کرد. ربات‌های چند کارکرد و مولتی‌مد، توانایی پیمایش و کاوش در بازه گسترده‌تری از وضعیت‌ها را دارند. استفاده از یک بازوی مناسب کمک‌یار کاوش، مهم‌ترین مفهوم پس از انتخاب ساختار پایه پویا می‌باشد. در این راستا اگر ربات با یک محیط ناشناخته رو برو گردد باید توان حمل و برداشت انواع نمونه‌ها و پویش در انواع سطوح را داشته باشد. دستیابی به این امر با استفاده از ربات‌های چندکارکرد فراهم می‌گردد. در این پژوهش تلاش شده تا با ابداع یک ربات پایه پویای نوین چند کارکرد و به کارگیری یک بازوی ساختار پیوسته مهره‌ای چندکارکرد، بهترین توانمندی دینامیکی برای یک کاوش‌گر فراهم آید. از سویی مساله پایداری نیز از جمله اصلی‌ترین مفاهیم در طرح نوین بوده‌است؛ که پایداری مناسب‌تری را برای ربات نوین نسبت به نمونه‌های همکار موجود فراهم می‌آورد. برای اثبات توانمندی‌های این ربات و شناساندن مرزهای کارکرد و برتری‌هایش، به نمونه‌های موجود، از مدل‌سازی دینامیکی به روش لاگرانژ، در مرحله نخست و معادلات توانمندی مکانیکی (به‌دست آوردن مرزهای شتاب و نیرو و کارکرد)، معادلات زاویه بیشینه پایداری (مقایسه و بررسی پایداری ساختارها)، معیار پیشنهادی حجم کارکرد (دستیابی به یک عدد برای نمره‌دهی به توانمندی) استفاده شده است. برای اثبات توانمندی بخش‌های گوناگون، به تحلیل اکتفا نشده و قسمت‌های ناملموس و نوین ربات، ساخته و آزمایش شده‌اند. تا کارکرد آن بخش‌ها اثبات گردد؛ و از سویی از نتایج عملی در تحلیل‌ها استفاده شود. ربات نوین روتوپود^۱ نامگذاری شده‌است؛ که برگرفته از یکی از توانمندی‌های ربات در به کارگیری چرخ و قلاب و پا است. ایده، به گونه‌ای پرورش یافته که هیچ‌المان اضافه‌ای به یک ربات چهار پا افزوده نشود؛ بلکه با تغییرات هندسی و دینامیکی به مقصود رسید.

کلمات کلیدی: ربات مولتی‌مد، گیره ریز دانه، ربات مهره‌ای، ربات ساختار پیوسته، معادلات توانمندی مکانیکی، معادلات شتاب پذیری، پایداری ربات‌ها و تعادل

^۱ ROTOPOD

فهرست

- فصل اول: دیباچه و تاریخچه ۱
- ۱-۱ دیباچه ۲
- ۱-۲ تاریخچه ۳
- ۱-۲-۱ ربات‌های گام زن ۳
- ۱-۲-۱-۲ ربات‌های چرخ دار ۵
- ۱-۲-۱-۳ ربات‌های چند کارکرد ۵
- ۱-۲-۱-۴ ربات‌های ساختار پیوسته ۷
- ۱-۲-۱-۵ گیره انتهای ربات ۱۰
- ۱-۲-۱-۶ معیارهای طراحی و کارکرد ربات ۱۳
- ۱-۳-۱ ضرورت و هدف تحقیق ۱۵
- ۱-۴-۱ پیشنهاد ساختار نوین ۱۵
- ۱-۵-۱ ساختار پایان نامه ۱۶
- فصل دوم: درون مایه ساختار نوین ۱۷
- ۱-۲-۱ دیباچه ۱۸
- ۱-۱-۱-۱ ناپایداری ربات دو چرخ ۱۸
- ۲-۱-۲ عدم توانایی مناسب ربات چهارچرخ در چرخش ۱۸
- ۳-۱-۲ عدم توانایی ربات چرخ دار در حرکت روی سطوح ناهموار ۱۸
- ۴-۱-۲ ایده نوین ۱۹
- ۲-۲-۲ بازوی ساختار پیوسته ۲۰
- ۲-۲-۱ دسته بندی ساختار ربات‌های پیوسته بر پایه گونه ی مهره ۲۰
- ۲-۲-۲ دسته بندی ساختار ربات‌های پیوسته بر پایه گونه ی انتقال نیرو ۲۰

۲۲	..... ۳-۲ ساختار چرخ نوین
۲۳	..... ۱-۳-۲ نمونه آزمایشگاهی
۲۳	..... ۴-۲ ساختار نوین بدنه
۲۴	..... ۵-۲ گیره رباتیک پیشنهادی
۲۵	..... ۱-۵-۲ عملکرد گیره بالنی طراحی شده
۲۹	..... فصل سوم: سینماتیک
۳۰	..... ۱-۳ دیباچه
۳۱	..... ۲-۳ معرفی هندسه و پارامترهای سینماتیک
۳۳	..... ۱-۲-۳ هندسه ربات پایه
۳۵	..... ۳-۳ ماتریس کنترل
۳۶	..... ۴-۳ سینماتیک معکوس
۳۸	..... ۵-۳ سینماتیک نمونه پا
۳۸	..... ۱-۵-۳ محدودیت‌های هندسی و قیدهای ساختاری
۳۸	..... ۲-۵-۳ نمونه مجازی سنجش
۴۰	..... ۳-۵-۳ معادلات سینماتیک
۴۱	..... ۶-۳ سینماتیک دو بعدی چرخ دار (کارکرد چرخ دار)
۴۵	..... ۷-۳ سینماتیک سه بعدی روی سطح هموار برای ربات چرخ دار
۴۷	..... فصل چهارم: دینامیک
۴۸	..... ۱-۴ دیباچه
۴۹	..... ۲-۴ به دست آوردن تابع تبدیل
۴۹	..... ۳-۴ دینامیک تماس با سطح
۵۱	..... ۴-۴ کنترل
۵۱	..... ۵-۴ نقاط تکین
۵۳	..... فصل پنجم: معیارهای توانمندی مکانیکی

۵۴	..... ۱-۵ دیباچه
۵۵	..... ۲-۵ پایداری
۵۶	..... ۳-۵ معادلات شتاب پذیری و توانایی دینامیکی
۶۱	..... ۴-۵ طراحی مسیر برای چرخ دار
۶۱	..... ۱-۴-۵ طراحی مسیر برای نقطه میانی بدنه ربات
۶۲	..... ۵-۵ طراحی مسیر برای چرخ قلاب
۶۷	..... ۶-۵ طراحی مسیر برای پا دار
۶۷	..... ۷-۵ مروری بر حرکت چند پایان در طبیعت
۷۰	..... ۸-۵ پیشنهاد گام زنی جانبی
۷۱	..... ۹-۵ طراحی مسیر ربات سری موازی
۷۵۱	..... فصل ششم: ساخت و شبیه‌سازی
۷۲	..... ۱-۶ دیباچه
۷۶	..... ۲-۶ مقدار دهی پارامترها
۷۷	..... ۳-۶ ساخت و داده برداری پا
۷۷	..... ۱-۳-۶ کارکرد چرخ
۷۷	..... ۲-۳-۶ کارکرد پا
۷۹	..... ۶-۴ ساخت و داده برداری گیره
۷۹	..... ۱-۴-۶ آزمایش سنجش تأثیر هندسه بر موفقیت برداشت
۸۰	..... ۲-۴-۶ آزمایش سنجش تأثیر قطر بالن بر موفقیت برداشت
۸۲	..... ۳-۴-۶ آزمایش سنجش تأثیر نیروی جانبی بر موفقیت برداشت
۸۴	..... ۴-۴-۶ آزمایش سنجش تأثیر قطر دانه‌ها بر موفقیت برداشت
۸۵	..... ۵-۴-۶ آزمایش سنجش تأثیر ضخامت پوسته بر موفقیت برداشت
۸۶	..... ۶-۴-۶ تأثیر پارامتر چگالی در توان برداشت
۸۷	..... ۷-۴-۶ تدوین رابطه نهایی

۸۸	۶-۴-۸ بررسی صحت رابطه (۶-۶) به وسیله نتایج موجود در مقالات دیگر
۸۹	۶-۵ راستی آزمایی معادلات
۸۹	۶-۵-۱ راستی آزمایی روش استخراج معادلات قسمت بازو
۹۰	۶-۶ دسته آزمون‌های ۱
۹۱	۶-۶-۱ آزمون به دست آوردن رابطه پیش کشش و شتاب بیشینه موتور
۹۱	۶-۶-۲ آزمون شبیه‌سازی ربات دو درجه آزادی بازو
۹۵	۶-۷ دسته آزمون‌های ۲
۹۵	۶-۷-۱ آزمون شبیه‌سازی ربات در سه بعد
۹۶	۶-۷-۲ آزمون ملاحظات شتاب-گشتاور دو بعدی روی سطح ناهموار
۱۰۳	۶-۸ دسته آزمون‌های ۳
۱۰۳	۶-۸-۱ بررسی مرزهای توانایی پا
۱۰۶	۶-۹ دسته آزمون‌های ۴
۱۰۶	۶-۹-۱ آزمون استفاده از گیره
۱۰۸	۶-۹-۲ آزمون استفاده از خرطوم
۱۱۰	۶-۱۰ دسته آزمون‌های ۵
۱۱۲	۶-۱۱ دسته آزمون‌های ۷
۱۱۳	۶-۱۱-۱ بررسی معیار زاویه مرزی پایداری برای ربات در کارکرد پل
۱۱۳	۶-۱۱-۲ مقایسه ساختار نوین و ساختارهای موجود از دیدگاه پایداری
۱۱۵	۳-۱۱-۶ بررسی تاثیر بار بر روی پایداری ساختار نوین در زوایای خاص
۱۱۵	فصل هفتم: نتیجه گیری و برآیند
۱۱۶	۷-۱ نتایج
۱۲۰	۸ منابع و مراجع
۱۲۶	۹ Abstract

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ الگوریتم پژوهش ۱۶
- شکل ۱-۲ ربات ROTOPOD در چند کارکرد اصلی ۱۹
- شکل ۲-۲ چند نوع انتقال توان در ربات‌های مهره‌ای ۲۰
- شکل ۳-۲ دو نوع کاربرد ربات مهره‌ای ۲۱
- شکل ۴-۲ تغییر کارکرد چرخ به پا ۲۲
- شکل ۵-۲ ساده‌سازی شماتیک پا ۲۲
- شکل ۶-۲ نمونه آزمایشی چرخ ۲۳
- شکل ۷-۲ تغییر کارکرد دو چرخ به چهارچرخ ۲۴
- شکل ۸-۲ طرح سه بعدی گیره رباتی ۲۵
- شکل ۹-۲ نمودار نیروی حمل بر حسب نوع هندسه [18] ۲۵
- شکل ۱۰-۲ تغییرات حجم و تنش ناشی از تغییرات فشار داخل بالن [۵۳] ۲۶
- شکل ۱۱-۲ نحوه کارکرد ۲۷
- شکل ۱۲-۲ گیره ساخته شده. الف نمونه اولیه گیره، ب. نمونه شامل بال‌های جانبی ۲۷
- شکل ۱۳-۲ نحوه اتصال گیره به بدنه کاوش گر ۲۸
- شکل ۱-۳ کارکردهای روتوپود ۳۰
- شکل ۲-۳ سینماتیک ۳۱
- شکل ۳-۳ سینماتیک بازوی مهره‌ای ۳۲
- شکل ۴-۳ پارامترهای پای آزمایشی ۳۹
- شکل ۵-۳ نمونه دو بعدی کارکرد چرخ دار ۴۱
- شکل ۶-۳ سینماتیک سه بعدی چرخ دار ۴۵
- شکل ۱-۴ نحوه تماس پا با صفحات سطح خارجی ۵۰
- شکل ۱-۵ مساله هندسی سه بعدی تعادل ۵۵
- شکل ۲-۵ محدوده قابل پذیرش شتاب سرعت ۵۷
- شکل ۳-۵ پارامترهای دینامیک در محاسبه دو بعدی ۵۹
- شکل ۴-۵ چیرگی بر مانع در کارکرد چرخ قلاب ۶۲
- شکل ۶-۵ حرکت آفتاب‌پرست [۵] ۶۷
- شکل ۷-۵ الگوریتم گام زنی ۶۸

- شکل ۵-۸ گام زنی آفتاب پرست ۶۸
- شکل ۵-۹ پارامترهای سینماتیک گام زنی ۶۹
- شکل ۵-۱۰ مسیر مناسب گام زنی ۶۹
- شکل ۵-۱۱ گام زنی خرچنگ ۷۰
- شکل ۵-۱۲ رویارویی با مانع و تغییر مسیر جانبی ۷۱
- شکل ۵-۱۳ الگوریتم نوعی گرفتن جسم خارجی ۷۱
- شکل ۵-۱۴ دیاگرام طراحی مسیر بهینه و پایدار ۷۳
- شکل ۶-۱ پارامترهای آزمایش کارکرد چرخ برای موتور اول ۷۷
- شکل ۶-۲ نمونه پا در هنگام باز شدن ۷۸
- شکل ۶-۳ پارامترهای کارکرد پا برای موتور اول ۷۸
- شکل ۶-۴ کارکرد باز شدن قلاب ۷۹
- شکل ۶-۵ پارامترهای دینامیک قلاب ۷۹
- شکل ۶-۶ نمره دهی تأثیر هندسی ۸۰
- شکل ۶-۷ درصد موفقیت بر مبنای نسبت قطر ۸۱
- شکل ۶-۸ تأثیر نیروی عمودی بر موفقیت حمل نمونه استوانه‌ای ۸۲
- شکل ۶-۹ مقایسه موفقیت بالن جانبی با بالن اصلی ۸۳
- شکل ۶-۱۰ میزان تأثیر شیب جانبی بر تأثیر نیروی جانبی روی موفقیت برداشت نمونه ۸۴
- شکل ۶-۱۱ تأثیر ضخامت پوسته بر درصد موفقیت ۸۵
- شکل ۶-۱۲ تأثیر ضریب اصطکاک و بار عمودی بر توان گیرش و حمل و درصد موفقیت ۸۶
- شکل ۶-۱۳ پارامترهای مؤثر در گیرش و حمل و نمونه ساخته شده نیروی عمودی ۸۷
- شکل ۶-۱۴ راستی آزمایی ۹۰
- شکل ۶-۱۵ رابطه گشتاور-شتاب-پیش کشش ۹۱
- شکل ۶-۱۶ مسیر پیروی بدون نیروی خارجی ۹۲
- شکل ۶-۱۷ کشش کابل و گشتاور موتور ربات مهره‌ای ۹۳
- شکل ۶-۱۸ مسیر زاویه‌ای با نیروی خارجی ۹۴
- شکل ۶-۱۹ گشتاور موتورها ۹۴
- شکل ۶-۲۰ کشش کابلها ۹۴
- شکل ۶-۲۱ مسیر سه بعدی طی شده توسط ربات ۹۵

- شکل ۶-۲۲ خطای کنترل ۹۵
- شکل ۶-۲۳ نتایج معادلات توانمندی مکانیکی برای پا ۹۶
- شکل ۶-۲۴ تأثیر جرم بازو و محموله در حرکت پایه ۹۶
- شکل ۶-۲۵ محدودیت شتابها با وجود جرم چهار کیلوگرم ۹۷
- شکل ۶-۲۶ نمایش ناحیه اسکن شده ۹۸
- شکل ۶-۲۷ الگوریتم محاسبات سطح ۹۹
- شکل ۶-۲۸ نمودارهای خطا و پیمایش در رفع اغتشاش ۱۰۰
- شکل ۶-۲۹ نمودارهای خطا و پیمایش در مسیر پیمایی ۱۰۱
- شکل ۶-۳۰ تأثیر ناهمواری و بارهای گوناگون بر گشتاور موتور جلو ۱۰۱
- شکل ۶-۳۱ تأثیر ناهمواری و بارهای گوناگون بر گشتاور موتور عقب ۱۰۲
- شکل ۶-۳۲ رابطه کار اصطکاک جانبی با فاصله محورها ۱۰۲
- شکل ۶-۳۳ محاسبات توانمندی دینامیکی چرخ ۱۰۴
- شکل ۶-۳۴ حجم توانمندی مکانیکی و ارتباط آن با گشتاور بیشینه ۱۰۶
- شکل ۶-۳۵ آزمون گرفتن جسم توسط گیره در کارکرد سری موازی ۱۰۷
- شکل ۶-۳۶ نتیجه شبیه‌سازی ۱۰۷
- شکل ۶-۳۷ نتایج دینامیک و سینماتیک آزمون گیره ۱۰۸
- شکل ۶-۳۸ شماتیک کارکرد سری موازی-خرطوم ۱۰۹
- شکل ۶-۳۹ نتیجه شبیه‌سازی گیرش و برداشت در کارکرد خرطوم ۱۰۹
- شکل ۶-۴۰ گشتاور موتورهای گردن در برداشت نمونه ۱۱۰
- شکل ۶-۴۱ ماتیک چیرگی بر مانع مرتفع و کارکرد قیچی ۱۱۰
- شکل ۶-۴۲ وضعیت چیرگی بر مانع در شبیه‌سازی ۱۱۱
- شکل ۶-۴۳ بررسی در معیار لغزش و گشتاور ۱۱۱
- شکل ۶-۴۴ بررسی در معیار لغزش و گشتاور و پایداری ۱۱۲
- شکل ۶-۴۵ بررسی پایداری در طی مسیر دو بعدی ۱۱۳
- شکل ۶-۴۶ بررسی آستانه پایداری بر روی شیب ۱۱۴
- شکل ۶-۴۷ نتایج مقایسه مرزهای پایداری ۱۱۴
- شکل ۶-۴۸ تأثیر بار و فاصله محور بر مرز زاویه پایداری روی شیب ۱۱۵

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۳	مختصات مرکز جرم مهره‌های گردن	۴۳
جدول ۱-۵	مشخصات دوبعدی	۵۹
جدول ۱-۶	مقدار دهی پارامترهای سینماتیک و دینامیک	۷۶
جدول ۲-۶	مشخصات فرمول (۶)	۸۹
جدول ۳-۶	مقادیر عددی پارامترها	۹۸
جدول ۴-۶	مقادیر عددی پا	۱۰۳
جدول ۵-۶	ضرایب تصحیح حجم	۱۰۵
جدول ۱-۷	کارکرد های پیشنهادی	۱۲۰

فصل اول: دسابعہ و تاریخچه

۱-۱ دیباچه

چندین سال پیش، گروهی از دریانوردان ارتش باستانی چین، از طرف امپراتور فرمان گرفتند تا به سمت دریاهای جنوبی حرکت کنند؛ و کاوش دریایی گسترده‌ای را برای آشنایی با دنیای پیرامون آغاز کنند. این سفر بزرگ و تاریخی، بخشی از نخستین تکاپوهای انسان برای کاوش در جهان پیرامون خود بود. چند صده پس از آن سفر، در کشاکش جنگ سرد، میان بلوک شرق و غرب، آرزوهای انسان در یک سفینه متعلق به اتحاد جماهیر شوروی از جو گذشت؛ و کاوش‌ها را از مرز زمین گذراند. این آرزوی برآورده شده، کاوش‌گری بود؛ که به سمت سیاره زهره فرستاده می‌شد. هرچند تنها یک عکس از درون جو زهره فرستاد؛ اما انسان را به آینده کاوش‌ها امیدوار کرد. در همین زمان ایالات‌متحده، پروژه بزرگ کاوش بر مریخ را دنبال می‌کرد. پس از فروپاشی اتحاد، ایالات‌متحده به فکر استفاده از دانش رباتیک در کاوش‌های فضایی افتاد. این امر در ابتدا با شکست‌های فراوانی روبرو شد. سال‌ها گذشت تا اینکه اولین تصاویر کاوش گر سطح نورد سیاره بهرام در نمایش‌گرهای زمین، انسان‌ها را شگفت‌زده کرد. امروز، همه تلاش‌های طراحی و تحقیق در زمینه کاوش‌گرها، برای ارتقای توانایی دینامیکی و کنترلی این مخلوقات انسان کنجکاو در جریان است. کاوش‌گرها بنابر پیرامونشان شکل و دینامیک گوناگون پیدا می‌کنند. کاوش-گرهای کف‌نورد که برای پیمایش و بررسی سطح زمین به کار گرفته می‌شوند؛ همان ربات‌هایی هستند که بر روی ماه و مریخ کاوش می‌کنند. ربات‌های کف‌نورد به دو دسته بزرگ چرخ‌دار و گام‌زن تقسیم می‌شوند. در ادامه کمی در مورد کاوش‌گرها و تاریخچه ربات‌های سطح نورد چرخ‌دار و گام‌زن و بازوهای استفاده‌شده بر روی آن‌ها توضیح داده خواهد شد.

۲-۱ تاریخچه

در سال ۱۹۹۴ پژوهش‌های سازمان فضایی اروپا برای ساخت کاوش‌گر سطح نورد لدا^۱ آغاز شد [۱] این کاوش‌گر که شامل شش چرخ است؛ برای پژوهش و کاوش بر سطح ماه آماده شده بود. امروزه حوزه مربوط به کاوش فضایی به دلیل نیاز به بررسی سطح سیارات و اقمار، روبه گسترش است؛ و در این میان ربات‌ها توانسته‌اند نقش مهمی ایفا نمایند [۲]. ربات‌های کاوشگر تنها در کاربردهای فضایی استفاده نمی‌شوند بلکه برای جستجو در نقاطی که برای انسان پر خطر است؛ نیز به کار گرفته می‌شوند نظیر ربات‌های سطح نورد نظامی [۳]، ربات‌های کارگر در معادن زیرزمینی [۴]. هر چند در این میان ربات‌های چرخ دار از کاربرد بیشتری برخوردارند؛ اما بررسی ربات‌های گام زن در پژوهش‌های اخیر، نشان می‌دهد؛ که این ربات‌ها دارای توانایی بالای حرکتی می‌باشند. پروژه‌های گوناگون ربات‌های کفنورد، با ساختار شش و هشت پا، نشان‌دهنده این امر است.

۱-۲-۱ ربات‌های گام زن

شاید ماشین چهار پای پاسکال، اولین نمونه کامل از گام زنی مکانیکی باشد. این ماشین گام زن، در شکل شیر، برای یکی از نجیب زادگان آماده شده بود. سال‌های بعد کار بر روی ربات‌های گام زن ادامه داشت؛ و در نمونه‌های آزمایشگاهی ساده، ساخته شد. اولین نمونه‌های این ربات‌ها، به طور کاملاً واضح از طبیعت الهام گرفته شده بودند. حرکات موجودات چهارپا و شش پا، از جمله خزندگان و حشرات، نمونه‌های الهام‌بخش مناسبی برای طراحی بدنه و مسیر [۵] و طراحی گام زنی می‌باشند. حرکات پای موجودات زنده گام زن، به صورت نمودارهای مبتنی بر زوایای حرکتی اعضا استخراج شده است [۶]. ربات‌های چهارپا بنا بر رفتار گام زنی و ساختار بدنه، گوناگونی بسیاری می‌یابند. ربات‌هایی که دارای پاهای کارترین (حرکت خطی در مفاصل، جایگزین حرکت

^۱ LEDA

دورانی شده است.) هستند؛ از ساده‌ترین ربات‌های چهارپا به شمار می‌روند. در حقیقت دینامیک این‌گونه ربات‌ها نیز، روان‌تر از گونه‌های دیگر به دست می‌آید [۷]. در نمونه‌های ساده‌تر یک پای دورانی جایگزین دو پای عقب شده است؛ که به یک ساختار سه پا بدل گردیده است [۸]. این ربات، ساده‌ترین حالت یک ربات پا دار است که ساختار ذاتاً پایدار دینامیکی دارد. همان‌گونه که در طبیعت نیز ساختارهای چهار پا با ساختار مفاصل دورانی، به حرکت در می‌آیند؛ در پژوهش‌های نوین نیز ربات‌های با پای دورانی، جایگزین ربات‌های با پای کارتزین شده‌اند. در ساده‌ترین حالت هر پا دو درجه آزادی دارد [۹، ۱۰]. این ربات‌ها به دلیل درجه آزادی پایین، از توانایی پویای کمی برخوردارند. به گونه‌ای که مرکز بدنه ربات به هیچ‌گونه نمی‌تواند برخی فرمان‌ها را پیروی کند. به همین دلیل در اغلب ربات‌های پا دار، درجه آزادی هر پا، حداقل ۳ در نظر گرفته شده است. در نمونه‌ای که این پژوهش هم از آن بهره فراوان برده است؛ ساختار هر پا دارای ۳ درجه آزادی است [۱۱]. البته بیشتر ربات‌های شش پا و هشت پا نیز بر روی هر پای خود، حداقل سه درجه آزادی دارند. ربات‌های چهار پا، دارای تنوع حرکتی بالایی هستند. این ربات‌ها می‌توانند شیوه‌های پویای چهارپایان را به درستی پیاده‌سازی کنند. در کنار این گوناگونی روش‌های پویای، کاستی‌هایی نیز دیده می‌شود. از آن دسته، می‌توان به عدم پایداری مناسب، هنگام گام زنی [۱۱]، پیچیدگی طراحی مسیر به خاطر فرا آزادی بودن ساختار این ربات‌ها، نداشتن توانایی مناسب در پیچیدن و سرعت پایین اشاره کرد. همین کاستی‌ها سبب می‌گردد تا در بیشتر کاربردهای امروزی از ربات‌های چرخ دار استفاده شود. با پیشرفت دانش کنترل، امید به بهره‌گیری از این‌گونه پویا، بیشتر شده است. دانش امروز آدمی، توانایی به‌کارگیری گسترده ربات‌های پا دار را در اندازه صنعتی و عمومی؛ هم چون ربات‌های چرخ دار، ندارد. برتری‌های ربات‌های چرخ دار، در پویای ناگهانی و سریع بر ربات‌های پادار روشن است. در ادامه به بررسی تاریخچه، برتری‌ها و کاستی‌های ربات‌های چرخ دار پرداخته خواهد شد.

۱-۲-۲ ربات‌های چرخ دار

ویل دورانت چرخ را بزرگترین اختراع، و تأثیرگذارترین ساخته دست بشر، در طول تاریخ تمدن می‌داند. به همان اندازه چرخ، در ربات‌های پویا کاربردی و کارساز است. سادگی ساختار چرخ، و خود پایداری بیشتر ساختارهای چرخ دار، کاربرد ربات‌های چرخ دار را فراگیر کرده است. ربات‌های چرخ دار در کنار همه برتری‌ها، کاستی‌هایی هم دارند. از آن دسته می‌توان به اصطکاک و سایش جانبی در چرخش ربات‌های چهارچرخ و ناپایداری ساختاری ربات‌های دو چرخ اشاره کرد. ربات‌های چهارچرخ هنگام پیچیدن فضای زیادی را پوشش می‌دهند. این کاستی در ربات‌های دو چرخ از میان رفته است. ربات‌های دو چرخ نیز با آنکه به راحتی و چالاکی دوران می‌کنند و مسیرهای مطلوب را پیروی می‌کنند؛ دارای ساختار ناپایدارند. پژوهش‌های گسترده‌ای در مورد این ساختارها و پایدار سازی آن‌ها انجام شده است [۱۲]. دانش کنترل امروز نمی‌تواند در تمامی محیط‌ها و با شرایط لغزش و ضربه و انعطاف‌پذیری‌های نادیده، یک ربات ذاتاً ناپایدار را با اطمینان بالا کنترل کند. از سویی در هنگام واژگونی، بازیابی پایداری دشوار است. پس از تحلیل کاستی ربات‌های چرخ دار و گام زن، یک پرسش اساسی به ذهن می‌رسد. با وجود کاستی‌ها و برتری‌های موجود در یک ساختار، آیا می‌توان از برتری‌های هر ساختار در سطح‌ها و دستورات گوناگون بهره برد؟ پاسخ این پرسش در پژوهش‌هایی داده شد که بر روی ساختارهای ترکیبی انجام گرفته است. به این ساختارهای ترکیبی، ربات‌های چند کارکرد گفته می‌شود.

۱-۲-۳ ربات‌های چند کارکرد

ربات‌های چند کارکرد، نمودِ راستینِ مَثَلِ با یک تیر چند نشان را زدن است. ربات‌های دوچرخ، قابلیت پیمایش سریع و دور زدن در جا را دارند. اگر چه ربات‌های تک‌چرخ نیز در پژوهش‌های نزدیک، به کار گرفته شده‌اند [۱۳]. اما هم ربات‌های دو چرخ و هم ربات‌های تک‌چرخ، ساختاری ناپایدار دارند [۱۳]. به همین دلیل، در کاوشها، بیشتر از ربات‌هایی با چهارچرخ و یا بیشتر استفاده

می‌شود. ربات‌های چهارچرخ هنگام دور زدن حول یک نقطه، با اصطکاک مقاوم زیادی در چرخ‌ها روبرو می‌شوند. ربات‌های چند کارکرد دارای چندین ساختار دینامیکی هستند، که برای هر کاربردی، از یک ساختار مخصوص استفاده می‌شود. در یک نمونه ساده، ربات‌های کوچک مدولار در قالب یک واحد هوشمند، توان اتصال به دیگر واحدها را داشته و می‌توانند ساختارهای کلی متفاوت با کارکرد متنوع را ایجاد کنند [۱۴]. برای مثال اجزای ربات با قابلیت شکل‌گیری مجدد می‌توانند به یک چرخ تبدیل شوند [۱۴]؛ و یا در نمونه‌ای دیگر، می‌توان به ربات‌هایی با قابلیت گام زنی و پیمایش چرخ دار اشاره داشت [۱۵]. آرهکز^۱ رباتی است که گام‌های آن هم زمان قابلیت پیمایش بر روی پا و نیم چرخ را دارا است [۱۶، ۱۷، ۱۸]. ربات‌های چند کارکرد می‌توانند برای مصارف خاص نیز طراحی گردند. برای نمونه می‌توانند برای پیمایش پله به کار گرفته شوند [۱۹]. ام اکس راکس^۲ با ساختار ترکیبی چرخ‌ها به سادگی پله‌ها را پشت سر می‌گذارد [۲۰]، همچنین ربات‌های شنی چند کارکردی به وجود آمده‌اند؛ که می‌توانند در کاوش، موانع را به خوبی پشت سر گذارند. ربات‌های با ساختار گسسته (چند ربات کوچک با وظیفه مشترک)، در قالب چند واحد کوچک متحرک هوشمند نیز، چند کارکردهایی هستند؛ که به راحتی گونه‌های مختلف کارکرد را فراهم می‌کنند [۲۱]. گاهی این واحدها، بزرگ هستند به اندازه‌ای که خود، هم حجم یک ربات متحرک می‌باشند. در این زمینه گاهی از ربات‌های هولونومیک با چرخ‌های چند جهت استفاده می‌شود که آزادی حرکتی بیشتری به سیستم می‌دهد. ربات‌های چند کارکرد چرخ دار از طبیعت الگوبرداری شده‌اند. همان‌گونه که چرخش بدن حلقه شده یک جانور خزنده در موارد خاص می‌تواند به بدن این جانور ساختاری دو کارکردی بدهد؛ همین حلقه شدن در رباتیک نیز، ساختاری چند کارکرد را فراهم می‌کند [۲۲]. هر چند ربات‌های چند کارکرد ابزار پویای مناسبی در کاوش‌ها هستند؛ اما این پرسش به ذهن می‌رسد که آیا یک کاوش‌گر، با پویای محض، توانایی

^۱ Rhex

^۲ MS rox

شناسایی کامل یک سطح را دارد؟ همه ربات‌های پویا که باهدف داده برداری و تشخیص به یک محیط فرستاده می‌شوند؛ دارای بازوهایی هستند که امکان داده برداری و نصب تجهیزاتی مانند دوربین را فراهم می‌کند. بازوهای رباتیک به دو دسته ساختار متمرکز و ساختار پیوسته تقسیم می‌شوند.

۱-۲-۴ ربات‌های ساختار پیوسته

بازوهای رباتیک دیر زمانی است که چهارچوب اصلی بسیاری از فعالیت‌های صنعتی، پژوهشی و نظامی را شکل می‌دهند. یکی از بخش‌های نسبتاً جدید، شاخه ربات‌های ساختار پیوسته است. فعالیت‌ها در این زمینه از حدود ۵۰ سال پیش آغاز شده است. اولین ایده‌ها در مورد ربات‌های ساختار پیوسته، از طبیعت گرفته شده است. ساختار حرکت پیوسته و دامنه‌دار مار، قابلیت حرکت گسترده بازوان هشت‌پا و ماهی مرکب، با حرکت موج‌داری که به پیشران‌ش منجر می‌گردد؛ الهام‌بخش پژوهندگان بوده است [۲۳]. این پژوهش بر تحلیل حرکت و ساختار هندسی متمرکز است. ساختارهای پیوسته موجود بنا به نوع کاربرد، تفاوت بسیاری با یکدیگر دارند. از آنجا که دسته مهمی از ربات‌های پیوسته، توسط کابل‌های انتقال قدرت تغذیه می‌گردند، ربات پیوسته‌ی محرک کابلی، در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد. ربات‌های محرک کابل، بسته به آرایش اجزاء، در قالب ساختارهای سری و موازی قابل تحلیل هستند. اگرچه در این پژوهش، ربات پیوسته (ساختار پیوسته) از چیدمان سری بهره می‌برد، ساختارهای موازی قابلیت‌های دیگری در حفظ تعادل، فضای کاری وسیع و ظرفیت دینامیکی ایجاد می‌کنند [۲۴]. ساختار حرکتی مبتنی بر کابل به دو دسته بدون پایان (حلقه بسته کابل) و پایان‌پذیر (اتصال مهره-کابل) تقسیم می‌گردند [۲۵] که هر دو شیوه از هزینه، وزن کم و استهلاک پایین، برخوردارند. در کنار این مزایا، بنا بر ساختار هندسی و دینامیکی، ناهنجاری‌هایی را نیز به سیستم می‌افزایند؛ که از جمله آن می‌توان به افزایش نوسانات و انعطاف‌پذیری ناخواسته، کاهش قابلیت حمل بار، افزایش

درجات اضافی آزادی اشاره کرد [۲۶]. یکی از کاربردهای متداول، استفاده از این ساختارها با تعداد بازوی محدود در زمینه انگشت‌های مکانیکی است [۲۷]. برای نمونه، انگشت با سه بازوی پیوسته در عمل گرفتن اجسام پیشنهاد و بررسی شده است [۲۸]. اغلب ربات‌های مهره‌ای، با این هدف به کار گرفته می‌شوند؛ که تعداد زیادی از بازوها به وسیله تعدادی محدود موتور پیش رانده شوند. معمولاً به وسیله یک کابل، چندین چرخک (پولی) به صورت مشترک و سری حرکت داده می‌شوند [۲۹] و سعی می‌شود بازوها، دارای تغییرات زاویه‌ای نسبی برابر باشند. البته این شرایط ایده آل در مواردی به دلیل ساختار انتقال حرکت و نحوه ورود اصطکاک به معادلات برآورده نمی‌شود [۳۰].

ربات‌های مهره‌ای کاملاً مقید سینماتیکی، ضربه‌پذیری بالایی ندارند؛ و امکان ویرانی ساختار، تحت بارهای ضربه‌ای، افزایش می‌یابد. کابل به عنوان یک جزء اساسی این ساختارها، به تنهایی قابل تحلیل و دارای اهمیت است؛ به گونه‌ای که افزایش انعطاف‌پذیری کابل، به عنوان اضافه کردن فنریت به سیستم مهره‌ای تلقی می‌گردد [۲۹]. در پیکربندی‌های طبیعی، این انتقال قدرت تاندونی و انعطاف‌پذیری، قابل کنترل است [۳۱]؛ در ربات‌های کابلی، انتقال قدرت می‌تواند به وسیله یک کابل مجزا برای هر مفصل، و یا یک کابل شاخه‌ای یکپارچه، برای همه مفاصل، انجام گیرد [۳۲]. کابل‌های شاخه‌ای، به ربات کمک می‌کند؛ تا با یک رشته کابل متصل به محرکه، چندین بازوی رباتیکی را کنترل کند. انگشتان رباتیک که به وسیله این کابل و یا چند کابل کنترل می‌شوند؛ متأثر از نمونه دینامیکی بازوها و بدنه است. انعطاف‌پذیری کابل در اغلب موارد، خطی در نظر گرفته می‌شود؛ اما مواردی وجود دارد؛ که پژوهشگران، این انعطاف‌پذیری را به صورت غیرخطی شبیه‌سازی می‌کنند [۳۰].

علاوه بر موضوع انعطاف‌پذیری، نحوه اعمال نیرو بر روی مهره‌ها نیز اهمیت می‌یابد. برخی ربات‌ها توسط یک کابل کنترل می‌شوند که از دو طرف به موتور متصل است؛ اما گروهی دیگر دارای دو کابل جفت شده می‌باشند؛ که از هر طرف به یک محرکه متصل است [۳۳]. این امر به دلیل عدم

قابلیت انتقال قدرت در کابلها در شرایط فشار است. به عبارتی، جفت شدن دو کابل به دستگاه کمک می‌کند؛ تا زمانی که یک کابل، دیگر توان اعمال فشار را ندارد؛ کابل دیگر با اعمال کشش، نقص را جبران نماید. همین امر سبب به وجود آمدن راهبردهای گوناگون کنترلی برای این گونه از ربات‌ها شده است. این بدان معناست که یک ربات، با کابل جفت شده مرکب، توسط دو موتور کنترل می‌شود؛ و یک ربات، با یک کابل همواره در کشش، توسط یک موتور کنترل می‌گردد. وجود کابل‌های شاخه‌ای، در ربات‌هایی که به صورت کابل‌های جفت شده استفاده می‌شوند؛ سبب ایجاد ساختار دینامیکی خاصی می‌گردد که از طرفی قابلیت ایجاد تنش‌های همواره کششی را بر روی ربات دارد؛ و از طرفی می‌تواند ربات را از هر دو طرف به صورت فعال کنترل کند [۳۴]. در حالی که اغلب سیستم‌ها فقط دستور کشش می‌دهند؛ و این فرمان‌های یک طرفه منجر به واکنش شدید و مشکلات دیگر در حرکت بازوی رباتیک می‌گردد، الگوریتم مطرح شده در [۳۵] اجازه می‌دهد هر دو نیروی فشار و کشش به محرک فرمان داده شود؛ و اطمینان حاصل می‌شود که کابلها شل نشده است.

سایش کابل به ساختار مهره و یا محل اتصال مهره‌ها به هم، می‌تواند عوامل ایجاد اصطکاک در ساختارهای محرک کابلی باشد. مدیریت اصطکاک در این مکانیزم‌های زیر محرک یک چالش است؛ که منجر به ترجیح دادن کمترین اصطکاک در انتقال نیرو می‌گردد [۳۶]. بدین ترتیب در این ربات‌های مهره‌ای، اصطکاک نیروی مطلوبی تلقی نشده؛ و به‌کارگیری هرز گرد‌ها و روغن کاری، با تقریب خوبی به حذف اصطکاک منجر می‌شود. در برخی موارد، نه تنها اصطکاک حذف نشده است؛ بلکه دینامیک سیستم، بر مبنای اصطکاک بنا شده است [۳۰]. بازوهای ساختار پیوسته، در پژوهش‌هایی بر روی بدنه پویا نصب شده‌اند. در نزدیک‌ترین این پژوهش‌ها، یک بازوی ساختار پیوسته بر روی یک ربات شنی نصب شده است [۳۷].

پس از بر شمردن برتری و کاستی‌های ربات‌های پویا و بازوهای پیوسته و گزارشی از پژوهش‌هایی که به اتصال بازو به ربات‌های پویا پرداخته‌اند، پیشنهادی مطرح خواهد شد که در شکل یک

ایده نوین، از برتری‌های ساختارهای موجود، در یک ساختار یکپارچه بهره برده است؛ تا بتواند یک بازوی نمونه بردار پیوسته را به نقطه مورد نظر برساند.

۱-۲-۵ گیره انتهای ربات

برای گرفتن و نگه‌داشتن اجسام، طوری که تماس مستقیم با دست انسان نداشته باشد، گیره‌هایی با شکل‌های متفاوت طراحی و ساخته شده است. در حوزه رباتیک، با توجه به رشد روزافزون این دانش، نیاز به ربات‌هایی با کاربردهای خاص بیش از پیش احساس می‌شود. گیره‌ها در بازوان رباتیکی، برای گرفتن و نگه‌داشتن اجسام در یک موقعیت مشخص طراحی شده؛ و می‌تواند دامنه وسیعی از کاربردها را برای ربات‌ها فراهم سازد. گیره بین میچ و جسم قرار می‌گیرد و از آنجایی که اجسام می‌توانند در اندازه، شکل، جرم متفاوت باشند، عموماً یک ربات احتیاج به سیستمی برای تعویض گیره‌ها دارد.

گیره‌های رباتیک در ۴ گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند. گیره‌های ضربه‌ای، که نیروی مستقیم مکانیکی در دو جهت یا بیشتر برای گرفتن جسم به کار گرفته می‌شود. گیره‌های داخل شونده، که عمل گرفتن از طریق نفوذ در سطح جسمی که بایستی گرفته شود، صورت می‌گیرد. گیره‌های انقباضی، که نیروهای دربرگیرنده جسم در یک جهت در بازه زمانی کوتاه اعمال می‌شود. گیره غیرضربه‌ای که نیروی نگه‌دارنده به سبب تماس مستقیم، بر اساس فرایندهای حرارتی و شیمیایی خاص نظیر کشش سطحی در ابعاد میکرو، ایجاد می‌شود [۳۸].

گیره‌های با ساختار کامل اهرمی و میله بندی، می‌توانند جزء گروه گیره‌های ضربه‌ای و داخل شونده محسوب گردند. طراحی این نوع گیره‌ها آسان بوده و هزینه‌های ساخت نسبتاً کمی دارند اما مهارت عملکرد، در این گیره‌ها کم است. حفظ دقت نگه‌دارندگی و گرفتن، برای قطعات با هندسه پیچیده، نیازمند یافتن نقاط نگه‌دارنده مناسب است. تعیین مرکز گرانش برای قطعاتی با

اشکال غیریکنواخت یا ترکیب ناهمگون با چگالی‌های مختلف، دشوار است. به علاوه، موفقیت فرایند گرفتن بستگی به پارامتر صافی سطح، و ضعف ساختار گیره در نقطه تماس دارد. گیره فلزی لولایی، معمولاً برای کاربردهای خاص، برداشتن و حمل اشیاء با شکل‌های مشخص و محدود ساخته می‌شود. به طوری که به ندرت میزان انعطاف‌پذیری لازم برای انجام حرکات نرم‌تر را دارد. اگر چه باهدف ارتقا توان برداشت، پیچیدگی مکانیزم گیره افزایش یافته [۳۹] اما همچنان گستره وسیعی از اجسام را نمی‌توانند حمل کنند. در کنار گیره‌هایی با مکانیزم کاملاً مقید، نمونه‌های نیمه‌مقید، نظیر گیره انگشتی، باهدف انعطاف‌پذیری بیشتر طراحی شده است [۴۰].

انعطاف‌پذیری به رغم کاهش صلبیت، موجب می‌شود گیره انواع گسترده‌تری از هندسه‌ها را با موفقیت حمل کند. این قابلیت گیره‌ها، در سیستم‌های اتوماسیون صنعتی و طراحی برای مونتاژ، فرایند تولید را سریع‌تر و آسان‌تر می‌کنند. با اضافه کردن حسگر نیرو می‌توان به بهبود عملکرد ربات کمک کرد [۴۱، ۴۲]. انگشتان تنظیم ارتفاعی‌میری به همراه سنسورهای لامسه‌ای، هوشمندی گیره‌های انگشتی را ارتقا داده‌اند. به عبارت دیگر، این نوع گیره با توجه به نرمی جسم، نیروی گیرش متناسبی وارد می‌کند [۴۳]. گیره‌های سه و پنج انگشتی معمولاً برای پروتز دست انسان به کار می‌روند و در کاربردهای صنعتی گیره دو انگشتی متداول است [۴۴]. در راستای بهبود طراحی انگشت‌های مار مانند، مکانیزم چند میله‌ای با توزیع فشار یکنواخت طراحی شده است که هنگام گرفتن اجسام، با انعطاف بیشتری عمل می‌کند. حرکت گیره رباتیک می‌تواند با استفاده از کابل‌های محرک ایجاد شود [۴۵]. کابل‌های مشترک که توسط چرخک‌های راهنما روی میله بندی هدایت می‌شوند، و مانند تاندون‌های انگشت انسان عمل می‌کنند. کابل می‌تواند به عنوان یک جزء الاستیک، حرکتی هموار را برای گیره فراهم آورد [۴۶]. عموماً گیره‌های انعطاف‌پذیر علیرغم هزینه‌های زیاد، نیروی محدودی ایجاد کرده و اغلب حرکت آهسته‌ای دارند. به علاوه شامل بخش‌های متحرک زیاد با درجات آزادی اضافی هستند. پیشنهاد افزودن بالن‌های

الاستیک به منظور حل چنین مشکلاتی مطرح شده است. پژوهشگرانی همچون اشمیت [۴۷] و پرووسکی [۴۵] در این زمینه پیشگام بوده‌اند.

شرایط فیزیکی گیره رباتیکی از دیدگاه تحلیل اجزا قابل توجه است. روابط برای ناحیه خلأ، مستقل از اصطکاک در انقباض پیرامونی اجسام کروی، نوشته شده است [۴۸]. هم چنین، توزیع نیرویی و میزان تنش‌های برشی در مواد دانه ریز بررسی شده است. نیروهای تماسی در لحظه شروع انقباض موجب یکپارچگی ماده دانه ریز می‌شود [۴۹]. به طوری که در وضعیت آزاد هیچ تنش و ضریب کشسانی در نظر گرفته نمی‌شود [۵۰]. یکی از مشکلات این سیستمها تأثیر محکم شدن کیسه در میانه فرایند مکش، بر روی قالب‌گیری کامل بالن حول نمونه است [۵۰]. این رفتار اجازه شکل‌گیری کامل را به کیسه نمی‌دهد و تأثیرات منفی بر رفتار مکانیکی و عملکرد سیستم می‌گذارد [۵۱]. باهدف سنجش موفقیت این نوع گیره‌ها و میزان توانایی آن در حالتی که فشار رها کننده سریع موجود باشد، بررسی‌ها و تست‌هایی انجام شده است [۵۲]. این خلأ ناشی از وجود یک ناحیه تهی از هوا، در پشت جسم است که توان گیرش را افزایش می‌دهد. به همین دلیل است که میزان تأثیر فشار منفی در توان گیرش و حمل اجسام، از اهمیت بسزایی برخوردار است [۵۳].

در این مقاله گیره رباتیک باهدف ایجاد انعطاف‌پذیری بالا، بر اساس نحوه قرارگیری و چسبندگی دانه‌های ریز طراحی شده است. برای بهبود عملکرد گیره، حلقه‌ای با قابلیت انبساط به آن اضافه شده است. به این ترتیب، نیروی جانبی بیشتری به جسم اعمال می‌گردد. یکی از نوآوری‌های مقاله، اعمال نیروی جانبی توسط یک بالن اضافی حلقه مانند در ترکیب با بالن اصلی است؛ که در نمونه‌های موجود مشاهده نشده است. با به‌کارگیری نمونه ارتقا یافته گیره بالنی، می‌توان به موفقیت آن‌ها در حوزه رباتیک امیدوارتر بود.

مطالعه کارهای گذشته امکان طراحی اولیه پیش از ساخت را فراهم نمی‌کند. در اینجا لزوم تدوین یک رابطه که موفقیت و یا عدم امکان برداشتن را پیش‌بینی کند، احساس می‌شود. در این مقاله،

بر اساس نتایج نمونه ساخته شده، نقش پارامترهای اساسی در درصد موفقیت، در قالب یک رابطه نهایی بازگو شده است و گام جدیدی در روند طراحی گیره‌های بالنی رباتیک محسوب می‌گردد.

۶-۲-۱ معیارهای طراحی و کارکرد ربات

تا کنون در مورد درون مایه بخش‌های گوناگون یک ساختار نوین، در یک نگاه گسترده نگر، گفتگو شد. گام دومین پس از گذار از بخش درون مایه، بهره‌گیری از ابزارهای سنجش و طراحی ساختارهای رباتیک در گستره ریاضیات است. برای آنکه یک ایده نوآورانه در دانش رباتیک، برای جامعه علمی پذیرفته گردد؛ نیاز به طراحی بر مبنای معیارهای مشخص ریاضی و آزمودن توانایی‌ها در معیارهای دیگر مشابه است. تا کنون معیارهای گوناگونی برای سنجش توانایی‌ها و یا طراحی یک ساختار نوین پیشنهاد شده است. از معیارهای پایه طراحی می‌توان به فضای کار اشاره کرد. حجم بیشتر فضای کار و یا قابلیت دسترسی به نقاط دور تر می‌تواند برتری مورد نظر طراح را برای ربات راهم کند. میزان حجم فضای کار، نخستین بار در کارهای راف استفاده شده است [۵۴، ۵۵] کومار و والدرون بر روی استخراج فضای کار با استفاده از محاسبات رقمی کار کرده‌اند. [۵۴، ۵۵] یانگ و لی نیز این چنین محاسبه‌ای را پیاده‌سازی کرده‌اند [۵۶]. معیارهای بر مبنای تراز سطوح دسترس به وسیله کاپتا و راف به کار گرفته شده‌اند [۵۵، ۵۷، ۵۸]. معیار دیگری که به کار گرفته شده است، معیار چالاکی است. در این معیار، تلاش بر این است؛ که توانایی حرکت و اعمال نیرو در جهات مختلف و مطلوب بررسی گردد. معیار چالاکی، توسط سالسبوری و کریگ زمانی ابداع شد که بر روی دست‌های رباتیک پژوهش می‌کردند [۵۹]. از جمله معیارهای دیگر، معیار کارکرد دینامیک است. تا زمانی که حرکت بر اثر اعمال نیرو و گشتاور بر اجسام ایجاد می‌شود، این یک امر قابل توجیه است؛ که شاخص‌های کارکرد مکانیکی را به صورت فرمولی در آوریم. آسادا [۶۰] یک بیضی تعمیم یافته اینرسی را تعریف می‌کند که

از ضرب ترم‌های ژاکوبین به دست می‌آید. $G = J^{-T}MJ^{-1}$. که M ماتریس اینرسی بازو است. این بیضی، با جایگذاری مقادیر منفرد در ضریب گفته شده، دارای محورهای مشابه می‌گردد. یوشیکاوا [۶۱]، یک معیار متناظر با توانایی کنترل دینامیک را به صورت روبرو به دست آورده است. $JM^{-1}(JM^{-1})^T$. در واقعیت، این دو معیار بیان‌کننده دو قضیه است. فرض کنید ربات به صورت یک دستگاه ورودی خروجی در نظر گرفته شده است؛ که گشتاور را در مفاصل خود دریافت می‌کند؛ و شتاب را بر روی کنش گر نهایی می‌سازد. معیار یوشیکاوا برابری و مشابهت ضرایب شتاب و گشتاور را بررسی می‌کند. ولی معیار جی آی ای^۱ آسادا معکوس این ضرایب را بررسی می‌کند. اگر یک انسان، کنش گر پایانی بازو را در دست گیرد و سعی کند که آن را حرکت دهد؛ معیار جی آی ای می‌تواند میزان مقاومت این حرکت کنش گر نهایی را اندازه بگیرد. دیگر اندازه گیری‌هایی که تلاش می‌کنند تا کارکرد ربات را بر پایه یک رابطه از دینامیک ربات بیان کنند [۶۲]؛ معیارهایی را بر مبنای سختی مفاصل و اینرسی لینک‌ها پیشنهاد می‌دهند. هدف از این کار ایجاد یک فاصله دوری کردن امن از پیرامون وضعیت‌های منفرد و خطرناک است. خطیب و بولینگ، [۶۳] یک چهارچوب عمومی برای بررسی توانمندی دینامیکی یک ربات بازوی نوعی را پیشنهاد می‌دهند؛ که دربرگیرنده مشخص سازی سرعت و شتاب کنش گر نهایی با توجه به معیارهای محاسبه شده از جمله سرعت و شتاب بیشینه مفاصل است.

معیارهای طراحی یک ربات بنا بر گفته فرانک سی پارک، به چند دسته تقسیم می‌گردد. یکی معیارهای هندسه سینماتیک^۲ یکی معیارهای هندسه پویا^۳ و معیارهای دربرگیرنده سختی، که به دو دسته انعطاف پویا^۴ و انعطاف ایستا^۵ تقسیم می‌شوند. تا کنون، معیارهای هندسی و به دور

^۱ GIE

^۲ kinostatic

^۳ kinodynamic

^۴ elastodynamic

^۵ elastostatic

از انعطاف بررسی شده‌اند. معیارهای مرتبط با انعطاف‌پذیری ایستا، بدون توجه به اینرسی اعضای ربات، به بررسی ارتباط سختی انتها و مفاصل می‌پردازند [۶۴، ۶۵]. و معیارهای انعطاف پویا، به بررسی همین سختی این بار با در نظر گیری انعطاف می‌پردازند [۶۶]. یکی دیگر از معیارهای بسیار کارا در مقایسه و برآورد توانایی‌های یک ربات، معیارهای پایداری و تعادل دینامیکی و استاتیکی است. به وسیله این معیارها به راحتی بازه ای از وضعیت‌ها و ماموریت‌های ربات، که ربات در آنها پایدار می‌ماند؛ قابل تشخیص است [۶۷، ۶۸]. در این پژوهش، از معیارهای مبتنی بر سنجش توانایی دینامیکی، مانند معادلات توانایی دینامیکی و پایداری استفاده شده است. هدف از به‌کارگیری این معیارها، طراحی برازنده ساختار نوین و توانمند کننده کارایی‌های این ساختار است.

۳-۱ ضرورت و هدف تحقیق

هدف این پژوهش عبارت است از:

- ایجاد یک ساختار دینامیک چند کارکرد برای دستیابی به توانایی‌های بیشتر
- دوری از به کار بردن قطعات بیشتر و پیچیده کردن ساختار
- استفاده از یک بازوی پیوسته نمونه بردار بر روی یک ساختار پویا (عنوان پروژه)
- راستی آزمایی و توانایی سنجی ساختار نوین
- مقایسه توانایی‌های ساختار نوین با ساختارهای گذشته در ترازوی معیارهای گوناگون

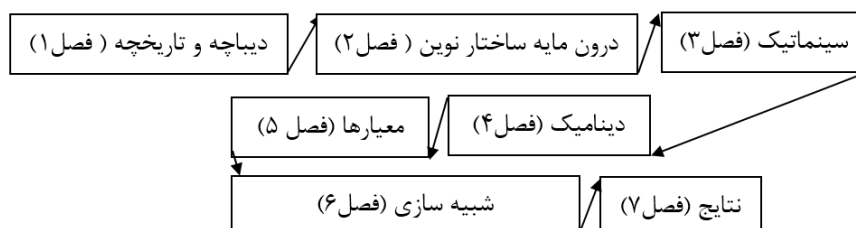
۴-۱ پیشنهاد ساختار نوین

ایده جدید بر یک قانون اصلی استوار است. "نوآوری، پیشنهاد یک راه ساده‌تر برای یک فرایند سخت است؛ نه تراشیدن یک مسیر پیچیده برای نوآور شناخته شدن". بر این اساس، ساختار نوین پیشنهادی بدون افزودن درجه آزادی به ساختار یک ربات چهار پا منطبق بر ساختار ارائه شده در [۱۱]، شکل گرفته است؛ نوآوری‌های پژوهش

- ساختار نوین مکانیکی برای ربات کاوش گر
- توانایی عبور از گودی‌ها و ارتفاعات
- بررسی توانایی ساختار با معادلات توانایی دینامیکی و پایداری
- کنترل مرکز انحنای ربات مهره‌ای بر روی یک ساختار چهار پا
- گام زنی چند جهت برای یک ربات چهار پای نوین
- پیشنهاد معیار حجم توانمندی، برای ربات‌های پایه پویا
- استفاده از گیره ریز دانه برای برداشت تمامی هندسه‌ها

۵-۱ ساختار پایان‌نامه

این پژوهش بر هفت بخش استوار گشته است. بخش نخستین که دیباچه پژوهش بود؛ توضیح داده شد. در بخش دوم به گسترش پیشنهاد نوین پرداخته خواهد شد. در این بخش پیشنهاد نوین در درباره ساختار هندسی روشن سازی می‌شود. در همین بخش به ساخت نمونه آزمایش اشاره شده است؛ و مشخصات ساختاری از آن نمونه برداشت شده است. در بخش سوم کارکردهای گوناگون توضیح داده می‌شوند. در همین فصل سینماتیک ربات استخراج می‌گردد. در بخش چهارم دینامیک ساختار استخراج می‌گردد. در ادامه بخش ۳ به نمونه‌سازی سطح و اصطکاک و تماس پرداخته خواهد شد؛ و در انتها با توجه به معادلات پیرامون کنترل ساختار نمونه‌ای ساده ارائه خواهد شد. در بخش پنجم، به طراحی مسیر با توجه به مرزهای توانایی ساختار پرداخته خواهد شد. این مرزهای توانایی در بررسی‌های تماس و سطوح گشتاور و سرعت به دست می‌آیند.



شکل ۱-۱ الگوریتم پژوهش

فصل دوم: درون‌مایه ساختار نوین

۱-۲ دیباچه

هر کدام از ربات‌های پایه پویا دارای کاستی‌ها و برتری‌هایی است. برای استفاده از همه برتری‌ها و کم‌کردن اثر کاستی‌ها باید چه کرد؟ پاسخ این پرسش، ربات چند کارکرد است؛ که از ترکیب کارکردهای ربات‌ها به وجود می‌آیند. در این زمینه پژوهش‌های گذشته تا ایجاد ربات‌های چند کارکرد با ساختارهای متنوع پیش رفته است. ربات آر‌هکز [۱۶] و ربات ام اس راکس [۱۸]، از نزدیک‌ترین پژوهش‌های چند کارکرد هستند. در این پژوهش، یک گام فراتر نهاده شده است؛ و یک چند کارکرد با ساختار خود پایدار، فراهم شده است. روتوپود، ساختار نوینی است؛ که در ادامه توضیح داده خواهد شد. تلاش شده تا با اجرای یک ساختار نوین، توانایی ایجاد کارکرد دو چرخ و چهارچرخ و پادار به خوبی ایجاد گردد.

۱-۱-۲ ناپایداری ربات دو چرخ

در ابتدای بحث به موضوع ناپایداری ربات دو چرخ پرداخته شد. این موضوع با انتقال مرکز جرم ربات به قسمت زیر دو چرخ، در حالت دو چرخ فراهم می‌شود. بدین منظور باید در نحوه چیدمان جرم‌های اجزای موجود در ربات، بازنگری کرد.

۲-۱-۲ عدم توانایی مناسب ربات چهارچرخ در چرخش

این امر با کاهش فاصله محورها و حتی یکی شدن آن‌ها، که به دو چرخ شدن می‌انجامد؛ بر طرف می‌شود. این امر به دلیل از بین بردن مؤلفه عمود بر مسیر چرخ در سرعت است.

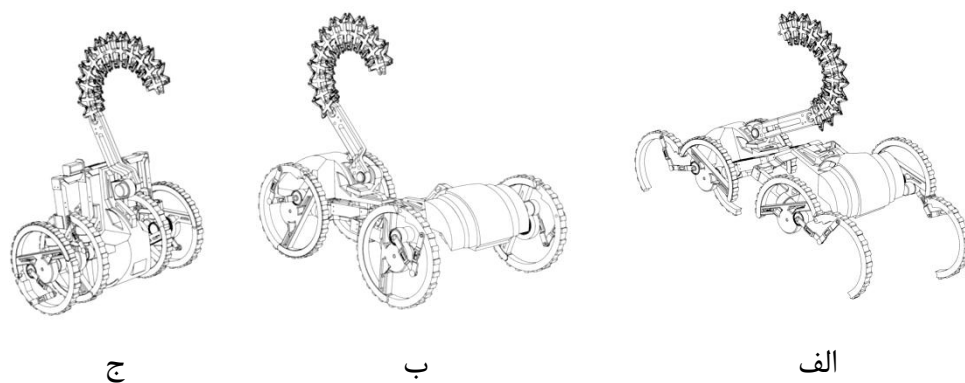
۳-۱-۲ عدم توانایی ربات چرخ دار در حرکت روی سطوح ناهموار

ربات‌های چرخ دار، در حرکت روی سطوحی که دارای ناهمواری‌های شدید همچون پله هستند به شدت مشکل دارند. این امر به خاطر ذات پیوسته حرکت این ربات‌ها است؛ و نیاز به نیروی

تکیه‌گاه برای ایجاد نیروی اصطکاک. این اصطکاک، به سیستم کمک می‌کند، تا برای چرخ شرایط غلتش را فراهم کند؛ و اگر شیب زمین زیاد باشد؛ به دلیل ذات لغزنده ساختار، بر روی شیب، این توانایی از میان می‌رود؛ و چرخ از وجه جانبی تنظیم ارتفاعه بالا نمی‌رود. پیمایش برخی ناهمواری‌ها، که چرخ روی آنها می‌لغزد؛ و یا در جا حرکت می‌کند؛ نیازمند، یک گیره به شکل قلاب است. برای رفع این مشکل، باید به این امر توجه داشت؛ که می‌توان با تغییر اندازه و هندسه چرخ‌ها، بدون اضافه کردن وزن و قطعات جدید، کاربردهای بیشتری را به یک چرخ و حتی پای ساده بخشید.

۲-۱-۴ ایده نوین

کاوش گر روتوپود در شکل ۲-۱-۲ نمایش داده شده است. در این ساختار پیشنهادی، تلاش شده است؛ تا کارکردهای گوناگون مورد نیاز یک ربات برآورده گردد؛ و در کنار آن بر پیچیدگی ساختار؛ بیش از نیاز افزوده نشود.



شکل ۲-۱ ربات ROTPOD در چند کارکرد اصلی

الف، نمایان گر ربات در حالت چهار پا است. ب، کارکرد چهارچرخ، ج، کارکرد دو چرخ، و د، ه و روش تبدیل چهارچرخ به دو چرخ را بیان می‌کنند. در ادامه به توضیح بخش‌های گوناگون ربات، پرداخته خواهد شد.

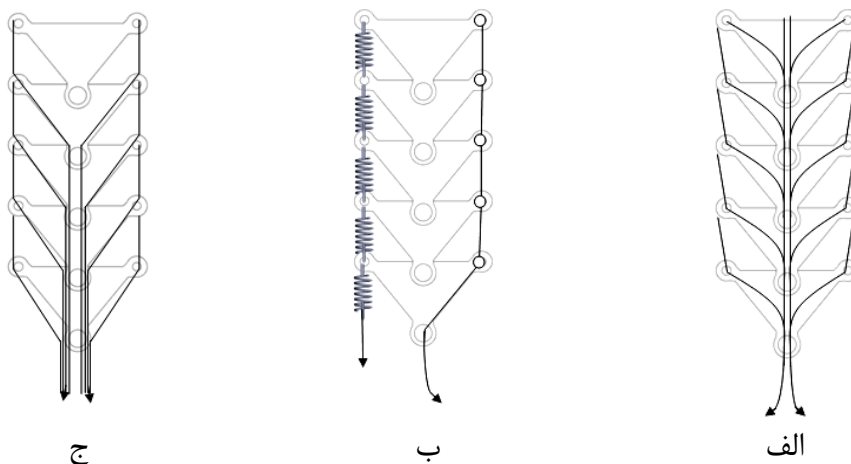
۲-۲ بازوی ساختار پیوسته

۱-۲-۲ دسته بندی ساختار ربات‌های پیوسته بر پایه گونه ی مهره

ساختارهای سینماتیکی و انتقال حرکت، بنا بر نوع و کاربرد به دو دسته دارای مهره و چرخک تقسیم‌بندی می‌شوند. ساختار مهره‌ای، همچون ستون مهره‌های بدن انسان، شامل تعداد زیادی از مهره‌های به هم پیوسته است که توسط یک یا چند محرکه محدود به واسطه کابل‌ها هدایت می‌شود. چرخک در ساختار دیگر موجب انتقال حرکت از محرکه کابلی به بازوان رباتیک می‌گردد.

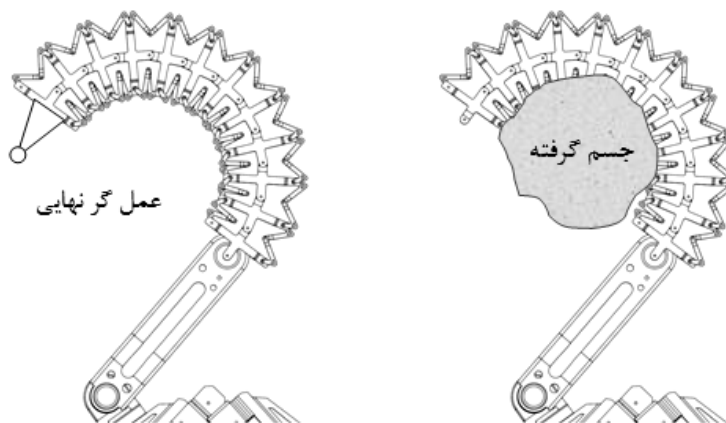
۲-۲-۲ دسته بندی ساختار ربات‌های پیوسته بر پایه گونه ی انتقال نیرو

از دیدگاه انتقال نیرو، به مهره‌های دور از موتور، روش‌های گوناگونی یافت می‌شود. می‌توان برای هر مهره، از پایه یک ریسمان در نظر گرفت. می‌توان برای تمام مهره‌ها را از یک سو با یک ریسمان هدایت کرد؛ و از طرف دیگر، یک فنر، کار برگشت مهره‌ها را بر عهده داشته باشد. می‌توان از پایه برای هر چند مهره یک ریسمان شاخه دار در نظر گرفت. از سویی با افزایش شمارگان مهره‌ها، استفاده از چند ریسمان که از سویی به سمت مهره‌ها می‌روند و هم از سوی دیگر از سوی مهره‌ها به سمت موتور باز می‌گردند؛ سبب زیاد شدن شمارگان ریسمان‌ها می‌گردد. استفاده از ریسمان‌های شاخه دار، راه گشایش مناسبی از این گره است. شکل ۲-۲ گونه‌های نیرو رسانی ریسمانی را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۲ چند نوع انتقال توان در ربات‌های مهره‌ای

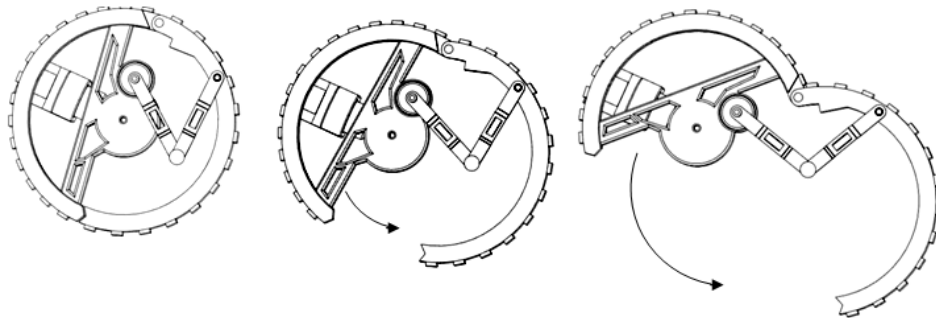
در شکل ۲-۲ الف، گونه ریسمان شاخه دار مشاهده می‌شود. در ب ریسمان یک سویه با کمک فنر دیده می‌شود. و در پ، ریسمان جداگانه برای هر مهره مشاهده می‌شود. همان‌گونه که دیده می‌شود؛ پ بسیار پر ریسمان است؛ ولی ب و الف تنها یک تا دو ریسمان دارند. در ب به دلیل ورود فنریت به ساختار، از تقید نمونه کم می‌شود؛ و از یک سو، ساختار کاملاً بدون پشتوانه است. در الف، از سویی تعداد ریسمان کم است و از سویی ساختار مقید کامل بوده و بارهای پیرامونی توان ایجاد جابجایی‌های ناخواسته را ندارند. از بین این سه ساختار، بنا بر کاربرد، هر کدام می‌تواند یک گزینه مناسب باشد.



شکل ۲-۳ دو نوع کاربرد ربات مهره‌ای

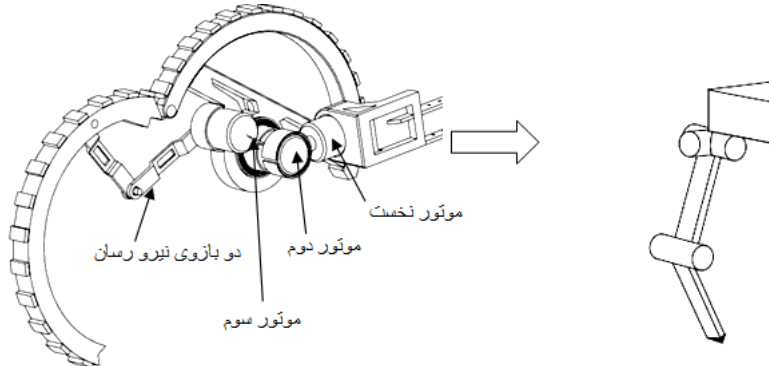
در بازوهای دو لینکی با ساختار همچون گذشته، استفاده از دو لینک، تنها اجازه کنترل نقطه نهایی را فراهم می‌کند. این کاستی، از روی بی‌کاربردی میانه بدنه بازو نمایان می‌شود. در بازوهای پیوسته، از یک سو می‌توان کنترل را برای پایان لینک دوم ایجاد کرد و از یک سو ساختار بازو می‌تواند همچون خرطوم یک فیل، بدنه یک جسم را در خود بگیرد. ربات‌های مهره‌ای، هم می‌توانند در راستای گرفتن یک جسم به کار بروند و هم در راستای کنترل نقطه پایانی. شکل ۲-۳ این دو حالت را نشان می‌دهد. در انتها، این ساختار پیوسته بر روی روتوپود نصب می‌گردد.

۳-۲ ساختار چرخ نوین



شکل ۴-۲ تغییر کارکرد چرخ به پا

در شکل ۴-۲ ساختار دو بخشی چرخ نوین به تصویر کشیده شده است. در این ساختار؛ سه موتور قرار دارد که برای حرکات پا و چرخ و کارکردهای بینابینی به کار گرفته می‌شوند. در این مورد جانشینی موتورها در شکل ۵-۲ نمایش داده شده است. در شکل ۴-۲ به روشنی باز شدن بخش چرخ، نشان داده شده است. از سویی در شکل ۵-۲ نیز توانایی تبدیل چرخ به یک پای سه درجه آزادی نشان داده شده است. در شکل ۵-۲ نمونه سینماتیک پا نمایش داده شده است.



شکل ۵-۲ ساده سازی شماتیک پا

آن گونه که شکل ۴-۲ و شکل ۵-۲ نشان دادند؛ پای ربات بدون افزودن درجه بیشتر آزادی و یا کنش گره‌های بیشتر، با ساختار هندسی نوین به پا تبدیل می‌شود. دو بازوی به کار گرفته شده در شکل ۵-۲، برای نیرو رسانی از موتور دوم که بازوی دوم را حرکت می‌دهد؛ و بر روی بازوی اول نصب شده است؛ استفاده شده است.

۲-۳-۱ نمونه آزمایشگاهی

با توجه به ساختار نوین چرخ، نیاز به داشتن یک نمونه واقعی، برای اطمینان از کارا بودن پاهای ربات، الزامی به نظر می‌رسد. نمونه نمونه ساخته شده در آزمایشگاه، که نمونه اصلی ربات بر پایه آن ساخته خواهد شد؛ در شکل ۲-۶، به نمایش در آمده است. این نمونه آزمایشگاهی، به منظور برداشت داده‌های گشتاور و جریان، که مبنای پردازش دینامیک، از روی داده‌های آزمایشگاهی است؛ ساخته شده است. دو موتور حرکات لازم را نیز در ربات ایجاد می‌کنند.

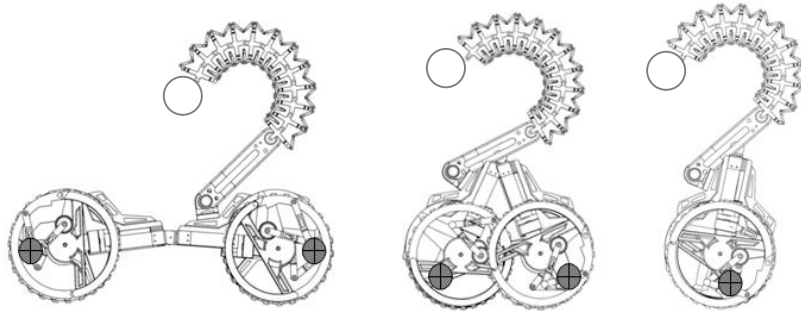


شکل ۲-۶ نمونه آزمایشی چرخ

۲-۴ ساختار نوین بدنه

در ساختار نوین، بدنه به دو نیم، بخش شده است؛ و با یک مفصل گردان به یکدیگر پیوسته اند. در شکل ۲-۱ که در آغازین این بخش آورده شده است، این ویژگی نشان داده شده است. این مفصل، بنابر کاربرد، می‌تواند کنش گر(فعال) و یا رها(منفعل) باشد. این مفصل، به ربات این توانایی را می‌دهد؛ تا چرخ‌های پیشین را به چرخ‌های پسین نزدیک کند. این توانایی به ربات، توان بودن در دو گونه چهارچرخ و دو چرخ را می‌دهد؛ و از سویی دیگر ارتفاع ربات را نیز در مفصل میانی دو بخش بدنه، بدون افزودن درجه آزادی و کنش گر(محرکه یا موتور)، قابل کنترل می‌کند. در این پژوهش از این ویژگی برای طراحی مسیر برای نقطه میانی و یا از بین بردن نوسانات سطح زمین، بر روی بازو، بهره برده شده است. مرکز گرانی نیز در هر دو بخش پیشین و پسین ربات به گونه‌ای جایابی شده است؛ که بتواند در زمان دو چرخ بودن، زیر محور چرخ‌ها قرار گیرد؛ تا ربات ساختار

خود پایدار یابد. در شکل ۷-۲ جایابی مرکز گرانی، در زمان رفتن از کارکرد چهارچرخ به دو چرخ، نشان داده شده است. نکته اینجاست که؛ ساختار هندسی به گونه‌ای ساخته شده است؛ که ربات در کارکرد دو چرخ هیچ برخوردی بین نیمه پیشین و پسین نداشته باشد. این دیگرگونی ساختار، با دو اندازه ساختن محور پیشین و پسین فراهم شده است.



شکل ۷-۲ تغییر کارکرد دو چرخ به چهارچرخ

این طرح، به صورت نهایی، در یک ساختار درآمیخته شده از یک ربات چند کارکرد و یک بازوی پیوسته نوین، دارای کاستی‌ها و برتری‌هایی است. در این پژوهش نوع جدیدی از گیره طراحی شده است که دقیقاً منطبق با شکل جسم عمل می‌کند. این گیره یونیورسال، برای مواردی که انطباق با دست انسان لازم باشد، پیشنهاد می‌شود و یا زمانی که لازم است اجسام گوناگون با سهولت، مطمئن، سریع و بدون هیچ باز خوردی گرفته شوند. با افزودن یک بالن حلقوی، دور محفظه مواد دانه ریز، نیروی جانبی بالن اصلی را می‌فشرود و اصطکاک بین محفظه و بار را افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج آزمایش‌ها در این پژوهش، اصلاحات مکانیزم گیره جدید، مؤثر واقع شده است؛ و میزان موفقیت گیره، با توجه به پارامترهای تأثیرگذار، فرموله شده است. این فرمولاسیون، می‌تواند تخمین مناسبی برای طراحی گیره موفق ارائه کند.

۵-۲ گیره ربانیک پیشنهادی

در این پژوهش، بر اضافه نمودن یک نیروی جانبی برای افزایش نیروی اصطکاک تمرکز شده است. در شکل ۸-۲ طرح کامل گیره، نشان داده شده است.

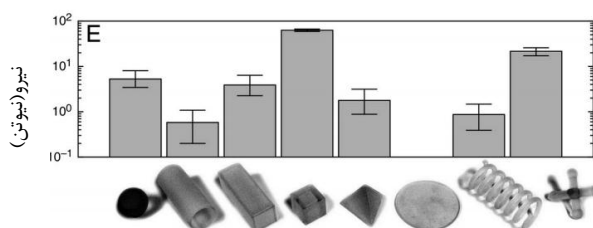


شکل ۸-۲ طرح سه بعدی گیره رباتیک ۱-اتصال بدنه به بازوی مکانیکی، ۲-بالن اصلی ۳-بالن حلقه‌ای، ۴-لوله‌های مکش هوا، ۵-بدنه نگاه‌دارنده بالن حلقه‌ای

این گیره از دو بالن کروی و حلقوی شکل ساخته شده است؛ که به ترتیب به یک موتور مکش هوا، و یک موتور پمپ هوا مجهز شده است. قسمت دوم شکل ۸-۲، بالن حاوی ماده دانه‌ریز را نشان می‌دهد. قسمت سوم، بالن حلقه‌ای است که با ورود هوا افزایش حجم پیدا می‌کند و دور بالن اصلی را می‌فشارد و همزمان نیروی جانبی اعمال می‌کند.

۲-۵-۱ عملکرد گیره بالنی طراحی شده

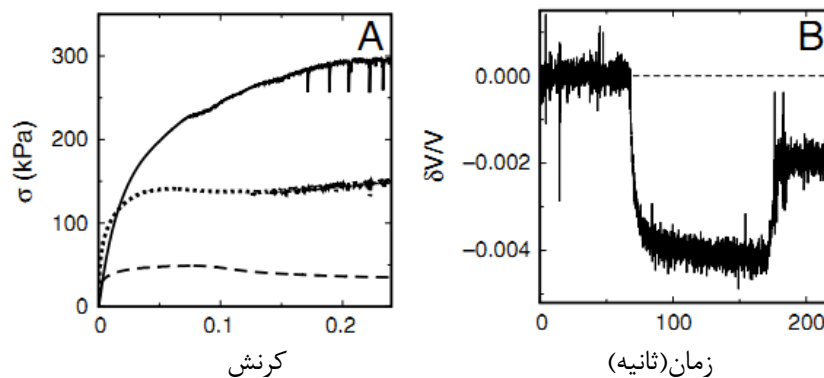
گیره‌های انقباضی توانایی حمل انواع گوناگونی از نمونه‌ها را دارد. این موضوع در شکل ۹-۲ بیان شده است. در این شکل نیروی مورد نیاز برای حمل هر جسم گزارش شده است.



شکل ۹-۲ نمودار نیروی حمل بر حسب نوع هندسه [18]

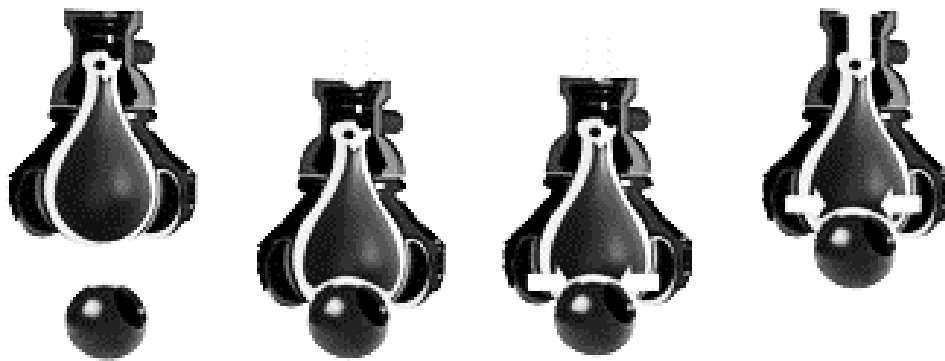
عملکرد مکانیزم، به صورتی است؛ که ابتدا گیره بر روی جسم می‌نشیند، در حالی که از بالا نیروی رو به پایینی، برای جفت شدن بهتر بالن با جسم، وارد می‌گردد. در این حالت پودر آویشن دور تا دور قطعه را می‌گیرد و در ادامه با انجام مکش، هوای بین مواد دانه ریز از بین رفته، و پودرها شکل جسم را به خود می‌گیرند. نیروی نگاه داری جسم، در این فرایند شامل دو مؤلفه نیروی

اصطکاک، مابین جسم و بالن ذرات، و نیروی خلأ، ناشی از هوای کم فشاری است؛ که میان جسم و بالن به دام افتاده است. دلیل این محبوس شدن، بسته شدن راه خروج هوای مابین جسم و بالن، در حین فرایند مکش، قبل از خروج تمامی هوا است. به طور کلی اگر سطح جسم اندکی ناصاف و زبر باشد، به گونه‌ای که بتواند هوا را از میان شیارهای سطحی خود عبور دهد؛ خلأ کامل ایجاد نشده؛ و نیروی مکشی به وجود نمی‌آید. به همین دلیل در این پژوهش، افزایش نیروی اصطکاک ناشی از افزایش نیروی جانبی پیشنهاد می‌گردد. اضافه کردن بالن جانبی حلقه شکل، به برداشت اجسام کمک می‌کند. بنا به طراحی صورت گرفته، برای بالن حلقوی، از جایی که امکان افزایش حجم به خارج به دلیل بدنه نگهدارنده وجود ندارد؛ تمام افزایش حجم موجب فشرده شدن بالن دور جسم می‌شود. این کاهش حجم در [۵۳] ناشی از خود گیره است و مطابق شکل ۱۰-۲ گزارش شده است.



شکل ۱۰-۲ تغییرات حجم و تنش ناشی از تغییرات فشار داخل بالن [۵۳]

نتایج نشان می‌دهد که میزان تغییرات حجم کم بوده و نیروی جانبی اندکی از طرف خود بالن اعمال می‌گردد. به همین جهت، اضافه کردن یک بالن جانبی، برای ایجاد یک نیروی جانبی، می‌تواند اثر بخش باشد. همان‌گونه که در شکل ۱۱-۲ مشاهده می‌شود، بالن جانبی، همچون دست یک بازیکن هندبال، نیروی جانبی را برای حفظ جسم اعمال می‌کند. این کار نیاز به ایجاد خلأ، میان بالن و جسم را برای تضمین موفقیت عملیات کاهش می‌دهد.



شکل ۱۱-۲ نحوه کارکرد

دو نمونه برای گیره بالنی رباتیک طراحی و ساخته شده است. نمونه اولیه گیره، که در شکل ۱۲-۲ الف - ب نشان داده شده است از یک بالن اصلی حاوی ذرات ماده دانه ریز تشکیل شده است. در دومین نمونه، نمونه ارتقا یافته در دو بخش طراحی شده است (شکل ۱۲-۲ ب). بالن اصلی حاوی ماده دانه ریز و بالن حلقه‌ای شکل، که توسط هوا پر و خالی می‌گردد. بالن سفید رنگ، اصلی و بالن‌های دو سمت آن بالن‌های جانبی هستند. در این حالت بالن‌های جانبی خالی هستند و هیچ نیرویی بر بالن اصلی و حلقه‌های جانبی وارد نمی‌گردد. انتهای بالن اصلی به بدنه و لوله مکش و همچنین لوله تزریق هوا به بالن جانبی متصل می‌گردد.



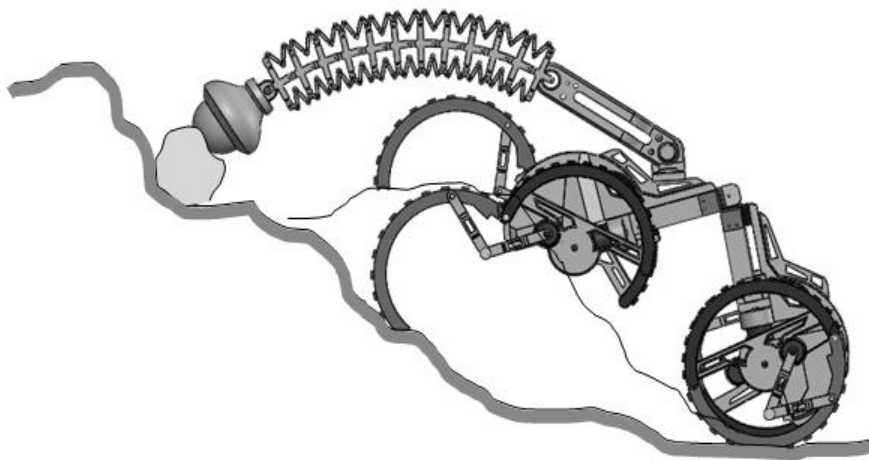
ب



الف

شکل ۱۲-۲ گیره ساخته شده. الف نمونه اولیه گیره، ب. نمونه شامل بالن‌های جانبی

شکل ۱۳-۲ نحوه اتصال گیره نوین را به انتهای بازوی ربات نشان می‌دهد. در شکل ۱۳-۲ ربات بدنه به واسطه بازوی پیوسته بر انتهای گیره نیرو وارد می‌کند و زمانی که مکش به طور کامل انجام شد؛ عمل برداشت انجام می‌شود. میزان نیروی اعمالی از طرف انتهای ربات بر روی گیره تعیین کننده توانایی برداشت جسم خواهد بود. این نیرو در این فصل به طور کامل تشریح شده است و درصد موفقیت برداشت متناسب با آن نیز محاسبه گردیده است.

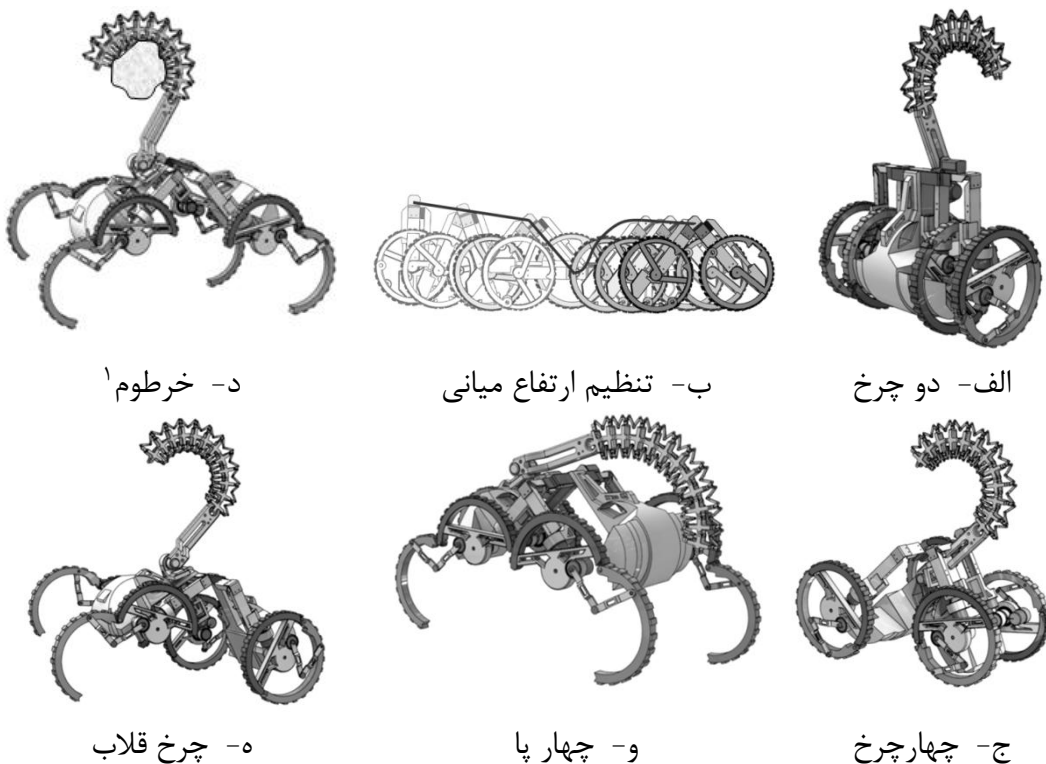


شکل ۱۳-۲ نحوه اتصال گیره به بدنه کاوش گر

فصل سوم: سینماتیک

۱-۳ دیباچه

همه حیوانات، پدیده‌های طبیعی را به خوبی انسان و یا حتی بهتر درک می‌کنند. ولی فقط انسان است؛ که می‌تواند آن‌ها را به زبان ذهن خود، که همان ریاضی است؛ بیان کند. ساختار ریاضی روتوپود و معادلات دینامیک در ادامه به دست خواهد آمد. در ابتدا معادلات سینماتیک مستقیم و معکوس، به دست می‌آید و در پایان نیز، کارکردها بررسی خواهند شد. کارکردهای مد نظر روتوپود در شکل ۱-۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱-۳ کارکردهای روتوپود

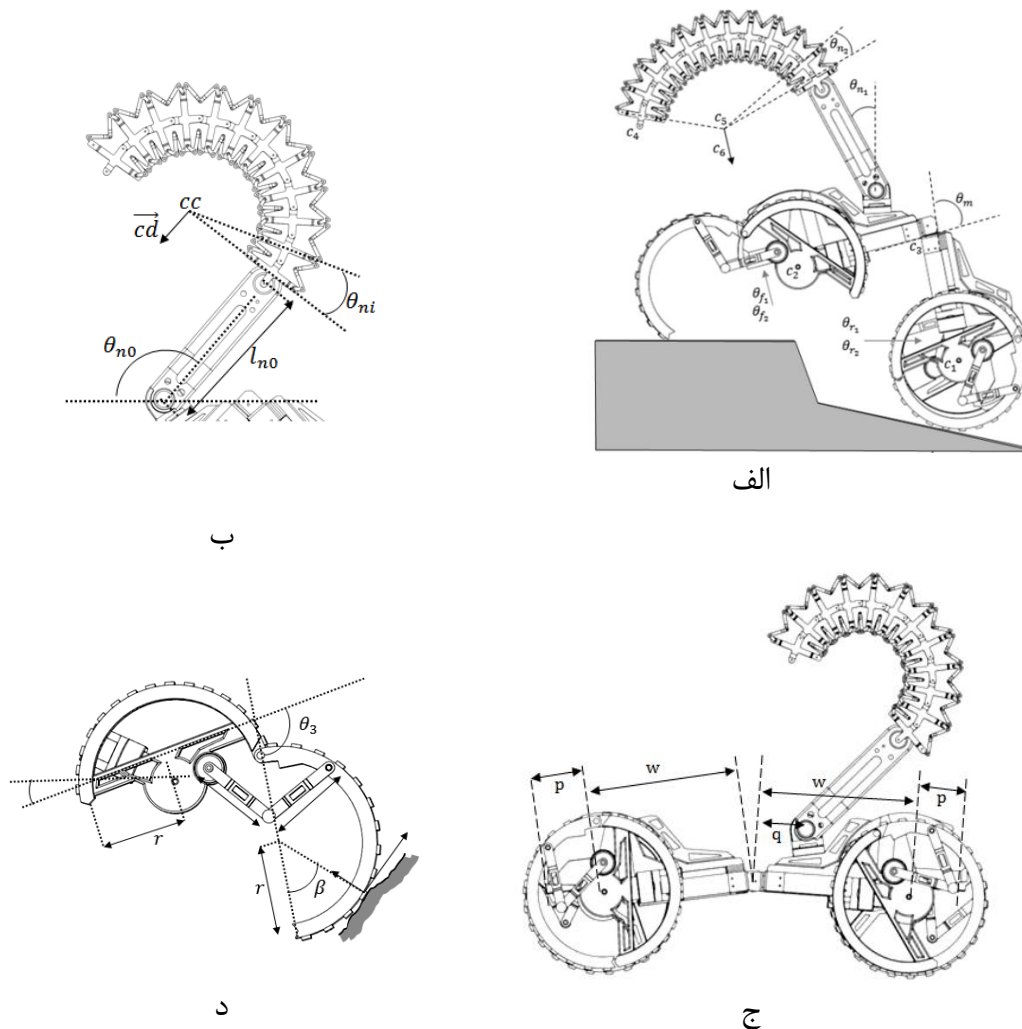
در شکل ۱-۳، شش کارکرد اصلی روتوپود نمایش داده شده است؛ و با توجه به نیازهای این پژوهش، به محاسبات سینماتیک، در گام دیگر، به محاسبه سینماتیک، بنا بر هر کارکرد پرداخته خواهد شد. در نخستین گام به شناسایی پارامترهای سینماتیک، پرداخته خواهد شد. کنترل هر

^۱ Trunk

کارکرد نیز وابسته به اهداف آن کارکرد است. اهداف کنترل نیز در ماتریس کنترل هر کارکرد تعریف می‌شود.

۲-۳ معرفی هندسه و پارامترهای سینماتیک

شکل ۲-۳، نمای ربات و اجزای آن را نشان می‌دهد. در الف، ویژگی‌های سینماتیک بدنه اصلی مشخص شده است. در ب، مشخصات سینماتیک بازو نشان داده شده است. در ج، مشخصات برخی مشخصات هندسی بدنه نشان داده شده است. شکل د نیز پارامترهای تماس با سطح را نشان داده است.

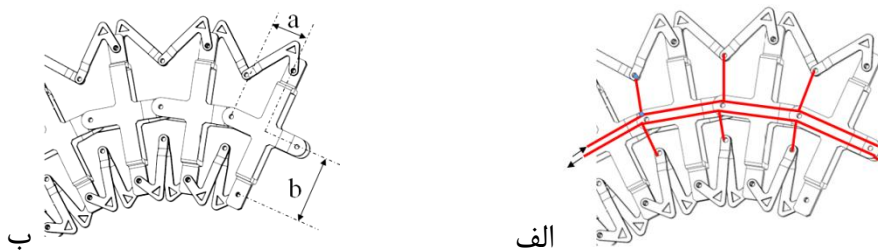


شکل ۲-۳ سینماتیک. (الف) پارامترهای هندسی و زوایای موتورها، (ب) پارامترهای بازو، (ج) پارامترهای هندسی ساختار، (د) پارامترهای چرخ و تماس

متغیرهای ربات، شامل زاویه لینک میانی، دو موتور عقب و دو موتور جلو و دو موتور گردن به همراه سه درجه آزادی صفحه‌ای، در میانه لینک وسط است.

سینماتیک مستقیم

حل سینماتیک مستقیم، برای استفاده در فرایند به دست آوردن معادلات لاگرانژ، کارساز است. در گام نخستین، هندسه یکایک بخش‌های ربات، با استفاده از ماتریس‌های روش دیناویت هارتنبرگ به دست می‌آید. و در گام دیگر، از این ماتریس‌ها، برای به دست آوردن ماتریس ژاکوبین مراکز گرانی هر کدام از بخش‌های ربات، بهره گرفته می‌شود. شکل ۳-۳ دیگر پارامترهای بخش ربات مهره‌ای بازو را که در تشریح همگانی پارامترهای شکل ۲-۳ نیامده‌اند؛ نشان می‌دهد. الف نشان‌دهنده نحوه انتقال توان، با ریسمان را نشان می‌دهد؛ و ب، نشان‌گر پارامترهای هندسی ربات مهره‌ای است. این پارامترهای هندسی به همراه پارامترهای سینماتیک؛ روشنگر معادلات سینماتیک جسم است. در گام نخست، باید تعداد مهره‌های مورد نیاز ربات استخراج گردد. این کار با معادلات رابطه (۱-۳) صورت می‌گیرد. در این روابط با دارا بودن طول هر مهره (a)، عرض مهره (b) و حداکثر زاویه چرخش هر مهره، تعداد مهره‌ها (n) به دست می‌آید. R، شعاع انحنای مورد نظر در بیشینه زاویه انتها، و θ_t بیشینه زاویه انتها است.



شکل ۳-۳ سینماتیک بازوی مهره‌ای

$$\begin{cases} na = \theta_t R \\ 2n \tan^{-1} \left(\frac{a}{b} \right) = \theta_t \end{cases}$$

(۱-۳)

هندسه بازوی پیوسته، در صفحه با توجه به تعداد مهره‌های به دست آمده، با رابطه (۲-۳) به دست می‌آید. این هندسه با توجه به دو بعدی بودن ربات بازو به دست آمده است. ماتریس انتقال،

نسبت به پایه خود بازوی مهره‌ای است. در ادامه ماتریس‌های انتقال دیگر نقاط ربات نیز به دست می‌آید؛ که با ضرب پارامترها، ماتریس انتقال هر بخش ربات نسبت به مرجع مختصات کارتزین ثابت به دست می‌آید.

$$q_i = \begin{cases} a \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{i-1} \cos\left(\sum_{k=1}^j \theta_k\right) + 0.5 \cos\left(\sum_{c=1}^i \theta_c\right) \\ \sum_{j=1}^{i-1} \sin\left(\sum_{k=1}^j \theta_k\right) + 0.5 \sin\left(\sum_{c=1}^i \theta_c\right) \\ \sum_{k=1}^i \theta_k \end{bmatrix} & i > 1 \\ a \begin{bmatrix} 0.5 \cos(\theta_1) \\ 0.5 \sin(\theta_1) \\ \theta_1 \end{bmatrix} & i = 1 \end{cases} \quad (2-3)$$

۱-۲-۳ هندسه ربات پایه

هندسه ربات پایه، شامل شش نقطه مربوط به مرکز جرم اجزای پایه ربات و دو نقطه تماس با زمین در هر لحظه است. شش رابطه (۳-۳) تا (۸-۳) در سینماتیک مستقیم و تعیین معادلات لاگرانژ استفاده می‌شوند و دو رابطه (۹-۳) و (۱۰-۳) در مشخص کردن نقطه برخورد با زمین و طراحی مسیر برای انتهای پا به کار گرفته می‌شوند. رابطه (۳-۳) نشان‌گر مختصات مرکز چرخش لینک اول پای عقب و رابطه (۴-۳)، نشان‌گر مختصات مرکز لینک دوم پای عقب است.

$$\begin{bmatrix} x_{r1} \\ y_{r1} \\ \theta_{r1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b - w \cos(\theta_b) \\ y_b - w \sin(\theta_b) \\ \theta_b + \theta_{r1} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

رابطه (۵-۳) و (۶-۳)، نشان‌گر مرکز لینک‌های اول و دوم پای جلو است.

$$\begin{bmatrix} x_{r2} \\ y_{r2} \\ \theta_{r2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{r1} \\ y_{r1} \\ \theta_{r1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r \cos(\theta_{r1} + \theta_b) - r \cos(\theta_{r1} + \theta_{r2} + \theta_b) \\ -r \sin(\theta_{r1} + \theta_b) - r \sin(\theta_{r1} + \theta_{r2} + \theta_b) \\ \theta_{r2} \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

$$\begin{bmatrix} x_{f1} \\ y_{f1} \\ \theta_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b + w \cos(\theta_b + \theta_m) \\ y_b + w \sin(\theta_b + \theta_m) \\ \theta_b + \theta_m + \theta_{f1} \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

$$\begin{bmatrix} x_{f2} \\ y_{f2} \\ \theta_{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{f1} \\ y_{f1} \\ \theta_{f1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r\cos(\theta_{f1} + \theta_b + \theta_m) + r\cos(\theta_{f1} + \theta_{f2} + \theta_b + \theta_m) \\ r\sin(\theta_{f1} + \theta_b + \theta_m) + r\sin(\theta_{f1} + \theta_{f2} + \theta_b + \theta_m) \\ \theta_{f2} \end{bmatrix} \quad (6-3)$$

رابطه (7-3) و (8-3) نشان گر مختصات مرکز جرم دو قسمت بدنه ربات است.

$$\begin{bmatrix} x_{rb} \\ y_{rb} \\ \theta_{rb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b - (w+r)\cos(\theta_b) \\ y_b - (w+r)\sin(\theta_b) \\ \theta_b \end{bmatrix} \quad (7-3)$$

$$\begin{bmatrix} x_{fb} \\ y_{fb} \\ \theta_{fb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b + (w+r)\cos(\theta_b + \theta_m) \\ y_b + (w+r)\sin(\theta_b + \theta_m) \\ \theta_b + \theta_m \end{bmatrix} \quad (8-3)$$

رابطه (9-3) و (10-3)، نشان گر نقطه اتصال پا به زوین از روی منحنی لینک دوم است.

$$u_{cr} = \begin{bmatrix} x_{cr} \\ y_{cr} \\ \theta_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{r2} \\ y_{r2} \\ \theta_{r2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r\cos(\theta_{r1} + \theta_{r2} + \theta_b) - r\cos(\theta_{r1} + \theta_{r2} + \theta_b + \beta_f) \\ -r\sin(\theta_{r1} + \theta_{r2} + \theta_b) - r\sin(\theta_{r1} + \theta_{r2} + \theta_b + \beta_f) \\ \beta_r \end{bmatrix} \quad (9-3)$$

$$u_{cf} = \begin{bmatrix} x_{cf} \\ y_{cf} \\ \theta_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{f2} \\ y_{f2} \\ \theta_{f2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r\cos(\theta_{f1} + \theta_{f2} + \theta_b + \theta_m) + r\cos(\theta_{f1} + \theta_{f2} + \theta_b + \theta_m + \beta_f) \\ r\sin(\theta_{f1} + \theta_{f2} + \theta_b + \theta_m) + r\sin(\theta_{f1} + \theta_{f2} + \theta_b + \theta_m + \beta_f) \\ \beta_f \end{bmatrix} \quad (10-3)$$

هندس زمین و بردار عمود زمین، از رابطه (11-3) و (12-3) به دست می آید. در رابطه (11-3)

هندس زمین برای شبیه سازی، یک سری فوریه دو درجه آزادی تصور شده است. بردار عمود بر

سطح نیز در هر نقطه برابر با رابطه (12-3) است.

$$z = \sum_{i=1}^{n_a} a_i \sin(\omega_i x) + \sum_{i=1}^{m_a} a_i \sin(\omega_i y) \quad (11-3)$$

$$\vec{N}_s = \frac{\left(-\frac{\partial z_3}{\partial x}, -\frac{\partial z_3}{\partial y}, \frac{\partial z_3}{\partial z}\right)}{\left|\left(\frac{\partial z_3}{\partial x}, \frac{\partial z_3}{\partial y}, \frac{\partial z_3}{\partial z}\right)\right|} \quad (12-3)$$

نمونه نقطه تماس با زمین از رابطه (13-3) و ژاکوبین مرکز جرم بخش های گوناگون ربات، طی

یک فرایند مشتق گیری منظم بدست می آید [69]. در رابطه (13-3)، ac_s میزان خطای مورد

نظر است؛ که از تفاضل نقاط زمین در محدوده انتهای پا و نقطه انتهای پا به دست می آید.

$$x, y, z \in R^3 \exists f(x, y, z) < ac_s$$

(۱۳-۳)

۳-۳ ماتریس کنترل

حل دوم سینماتیک برای کنترل انجام می‌شود؛ که یک حل سینماتیک وارون است. این حل در طراحی حرکت و بررسی گونه‌های کارکرد، به کار گرفته می‌شود. در کنار ژاکوبین کامل ربات، که برای به دست آوردن معادله حرکت به کار گرفته می‌شود؛ یک ماتریس نیز، برای کنترل ربات مد نظر است؛ که با فرض‌های ساده کننده و متغیرهای کمتر به دست می‌آید. این فرض‌ها، در ادامه گفته شده است. این ژاکوبین در طراحی مسیر و کنترل به کار گرفته می‌شود. ربات بر روی زمین نمی‌لغزد. ربات توانایی کاکرد کامل خود را حفظ می‌کند. ربات بیش از متغیرهای هدف کنترل، درجه آزادی کنش‌گر(فعال) دارد؛ و این سبب فرآزادی شدن ربات شده است. برای جبران این بیشینگی آزادی، از معادلات قید کنترل استفاده شده است. ربات به دو قسمت تقسیم شده است؛ که شامل بدنه به همراه پاها و گردن است. نقاط اتصال به زمین نیز در دستورات کنترل به کار گرفته می‌شوند. رابطه (۱۴-۳) نشان می‌دهد، تعداد متغیرهای ربات از تعداد درجات آزادی انتهای ربات که هدف از کنترل است؛ بیشتر است. در این حالت ژاکوبین وارون که در طراحی مسیر در سینماتیک معکوس به کار گرفته خواهد شد، مربعی نبوده و معکوس آن نیز به صورت شبه معکوس محاسبه می‌شود. علاوه بر این، آزادی بیشتر ساختار، این امکان را فراهم آورده است که در هنگام کارکرد، توانایی‌های حرکتی بالاتری به ربات داده شود. بنا بر کارکرد مورد نظر برای ربات، در هر فرمان کنترل، ماتریس کنترل متفاوت است. در حقیقت ماتریس کنترل همواره شامل هفت فرمان است. این ماتریس یک ماتریس عمودی هفت در یک است؛ که هر سطر آن یک فرمان کنترل، برای یک هدف مشخص است. به عبارتی، این فرمان‌ها تابعی اسکالر و یک بعدی از متغیرهای گردن هستند. هر کدام از این توابع یک قید برابری بین متغیرها است [۷۰]. این نحوه استفاده از فرمان‌های اضافه، برای آنکه حل معکوس به واسطه شبه معکوس گیری،

دچار مشکل نشود؛ در واقع یک فضای پوچی را با مقادیر فرمان‌های مطلوب پر می‌کند. با این کار، حل معادلات جواب یکتا داشته؛ و خطای تقریب شبه معکوس گیری هم از میان می‌رود [۷۱].

$$\begin{cases} G_i = \text{function}_i(x_b, y_b, \theta_b, \theta_m, \theta_{r1}, \theta_{r2}, \theta_{f1}, \theta_{f2}, \theta_{n1}, \theta_{n2}) \\ N_m = [G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6, G_7]^T \end{cases} \quad (14-3)$$

۴-۳ سینماتیک معکوس

در فرایند بدست آوردن سینماتیک معکوس، بنا بر دو هدف، زوایای موتورها مشخص می‌گردد. یکی مکان نقطه انتهای پا، و دیگری اهداف کنترل می‌باشند. در این صورت رابطه (۳-۱۵)، بیانگر دو نقطه اتصال پای عقب و جلو به زمین است، که با مقادیر عددی آن‌ها برابر قرار داده شده‌اند.

$$\begin{cases} u_{cr} = E_{cr} \rightarrow \dot{u}_{cr} = \dot{E}_{cr} \\ u_{cf} = E_{cf} \rightarrow \dot{u}_{cf} = \dot{E}_{cf} \end{cases} \quad (15-3)$$

در رابطه (۳-۱۶)، ماتریس‌های ژاکوبین، بین متغیرها و توابع هندسی و ماتریس کنترل، تبیین شده است. و در رابطه (۳-۱۷)، متغیرهای مرکز دو قسمت بدنه ربات، به عنوان ارتباط بین اهداف کنترل، نقاط اتصال به زمین و زوایای موتورها مستقل شده‌اند.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{u}_{crb} \dot{B} + \dot{u}_{\theta_{rw}} \theta_{rw} = \dot{E}_{cr} \\ \dot{u}_{cfeb} \dot{B} + \dot{u}_{\theta_{fw}} \theta_{fw} = \dot{E}_{cf} \\ \dot{N}_m \dot{B} + \dot{N}_{mn} \dot{\theta}_n + \dot{N}_{mfw} \theta_{fw} + \dot{N}_{mrw} \theta_{rw} = \dot{N}_{me} \\ \left[\frac{\partial u_{cr}}{\partial x} \quad \frac{\partial u_{cr}}{\partial y} \quad \frac{\partial u_{cr}}{\partial \theta_b} \right] [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\theta}_b]^T = \dot{u}_{crb} \dot{B} \\ \left[\frac{\partial u_{cf}}{\partial x} \quad \frac{\partial u_{cf}}{\partial y} \quad \frac{\partial u_{cf}}{\partial \theta_b} \right] [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\theta}_b]^T = \dot{u}_{cfeb} \dot{B} \\ \left[\frac{\partial N_m}{\partial x} \quad \frac{\partial N_m}{\partial y} \quad \frac{\partial N_m}{\partial \theta_b} \right] [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\theta}_b]^T = \dot{N}_m \dot{B} \\ \left[\frac{\partial u_{cr}}{\partial \theta_{r1}} \quad \frac{\partial u_{cr}}{\partial \theta_{r2}} \right] [\dot{\theta}_{r1} \quad \dot{\theta}_{r2}]^T = \dot{u}_{\theta_{rw}} \theta_{rw} \\ \left[\frac{\partial N_m}{\partial \theta_m} \quad \frac{\partial N_m}{\partial \theta_{f1}} \quad \frac{\partial N_m}{\partial \theta_{f2}} \right] [\dot{\theta}_m \quad \dot{\theta}_{f1} \quad \dot{\theta}_{f2}]^T = \dot{N}_{mfw} \theta_{fw} \\ \left[\frac{\partial u_{cf}}{\partial \theta_m} \quad \frac{\partial u_{cf}}{\partial \theta_{f1}} \quad \frac{\partial u_{cf}}{\partial \theta_{f2}} \right] [\dot{\theta}_m \quad \dot{\theta}_{f1} \quad \dot{\theta}_{f2}]^T = \dot{u}_{\theta_{fw}} \theta_{fw} \\ \left[\frac{\partial N_m}{\partial \theta_{n1}} \quad \frac{\partial N_m}{\partial \theta_{n2}} \right] [\dot{\theta}_{n1} \quad \dot{\theta}_{n2}]^T = \dot{N}_{mn} \dot{\theta}_n \end{array} \right. \quad (16-3)$$

$$\dot{B} = \dot{N}_m^\dagger (-\dot{N}_{mn}\dot{\theta}_n - \dot{N}_{mfw}\dot{\theta}_{fw} - \dot{N}_{mrw}\dot{\theta}_{rw} + \dot{N}_{me}) \quad (17-3)$$

با جایگذاری \dot{B} در دیگر بخش‌های رابطه (۱۶-۳)، دو رابطه (۱۸-۳) و (۱۹-۳) به دست می‌آید. در این دو رابطه، مقادیر متغیرهای مرکز دو قسمت بدنه از میان رفته است.

$$-\dot{u}_{crb}\dot{N}_m^\dagger\dot{N}_{mn}\dot{\theta}_n - \dot{u}_{crb}\dot{N}_m^\dagger\dot{N}_{mfw}\dot{\theta}_{fw} + \dot{u}_{crb}\dot{N}_m^\dagger\dot{N}_{me} + (\dot{u}_{\theta rw} - \dot{u}_{crb}\dot{N}_m^\dagger\dot{N}_{mrw})\dot{\theta}_{rw} = \dot{E}_{cr} \quad (18-3)$$

$$-\dot{u}_{cfb}\dot{N}_m^\dagger\dot{N}_{mn}\dot{\theta}_n - \dot{u}_{cfb}\dot{N}_m^\dagger\dot{N}_{mrw}\dot{\theta}_{rw} + \dot{u}_{cfb}\dot{N}_m^\dagger\dot{N}_{me} + (\dot{u}_{\theta fw} - \dot{u}_{cfb}\dot{N}_m^\dagger\dot{N}_{mfw})\dot{\theta}_{fw} = \dot{E}_{cf} \quad (19-3)$$

در نهایت با استفاده از ماتریس‌های استخراج شده در روابط (۲۰-۳) تا (۲۲-۳)، رابطه سینماتیک معکوس نهایی در قالب رابطه (۲۳-۳) استخراج می‌شود.

$$\left\{ \begin{array}{l} G_1 = \begin{bmatrix} \text{zero}(2,7) & \text{eye}(2) & \text{zero}(2,2) \\ \text{eye}(7) & \text{zero}(2,2) & \text{zero}(2,2) \\ \text{zero}(2,7) & \text{zero}(2,2) & \text{eye}(2) \\ \text{eye}(7) & \text{zero}(2,2) & \text{zero}(2,2) \end{bmatrix} \in R^{18 \times 11} \\ G_2 = \begin{bmatrix} \text{eye}(7) & \text{zero}(7,1) & \text{zero}(7,1) \\ \text{zero}(1,7) & 1 & 0 \\ \text{eye}(7) & \text{zero}(7,1) & \text{zero}(7,1) \\ \text{zero}(1,7) & 0 & 1 \end{bmatrix} \in R^{16 \times 9} \\ G_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \\ G_4 = [0 \ 0 \ 1]^T \end{array} \right. \quad (20-3)$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} [G_3 \ \dot{u}_{crb}\dot{N}_m^\dagger] & \text{zero}(3,9) \\ \text{zero}(3,9) & [G_3 \ \dot{u}_{cfb}\dot{N}_m^\dagger] \end{bmatrix} \in R^{6 \times 18} \quad (21-3)$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -\dot{u}_{crb}\dot{N}_m^\dagger\dot{N}_{mn} \\ -\dot{u}_{crb}\dot{N}_m^\dagger\dot{N}_{mfw} \\ \dot{u}_{\theta rw} - \dot{u}_{crb}\dot{N}_m^\dagger\dot{N}_{mrw} \\ G_4 \end{bmatrix}^T \in R^{3 \times 8} & \text{zero}(3,8) \\ \text{zero}(3,8) & \begin{bmatrix} -\dot{u}_{cfb}\dot{N}_m^\dagger\dot{N}_{mn} \\ \dot{u}_{\theta fw} - \dot{u}_{cfb}\dot{N}_m^\dagger\dot{N}_{mfw} \\ -\dot{u}_{cfb}\dot{N}_m^\dagger\dot{N}_{mrw} \\ G_4 \end{bmatrix}^T \in R^{3 \times 8} \end{bmatrix} \in R^{6 \times 16} \quad (22-3)$$

رابطه (۲۳-۳)، رابطه نهایی سینماتیک معکوس می‌باشد. در این رابطه، ارتباط هندسی بین نقاط اتصال با زمین و اهداف کنترل، با زوایای موتورها به دست می‌آید.

$$H_2 G_2 [\dot{\theta}_n \quad \dot{\theta}_r \quad \dot{\theta}_f \quad \dot{E}_{cr}(3) \quad \dot{E}_{cf}(3)]^T = H_1 G_1 [\dot{N}_{me} \quad \dot{E}_{cr}(1:2) \quad \dot{E}_{cf}(1:2)]^T \quad (3-23)$$

در رابطه (۳-۲۳) ، در سمت چپ پارامترهای زاویه موتورها و زاویه انتهای پاها، به عنوان تابع سینماتیک معکوس به دست می‌آیند و در سمت راست، ماتریس کنترل اهداف و ماتریس مختصات انتهای پا به عنوان متغیرها در نظر گرفته شده است.

۳-۵ سینماتیک نمونه پا

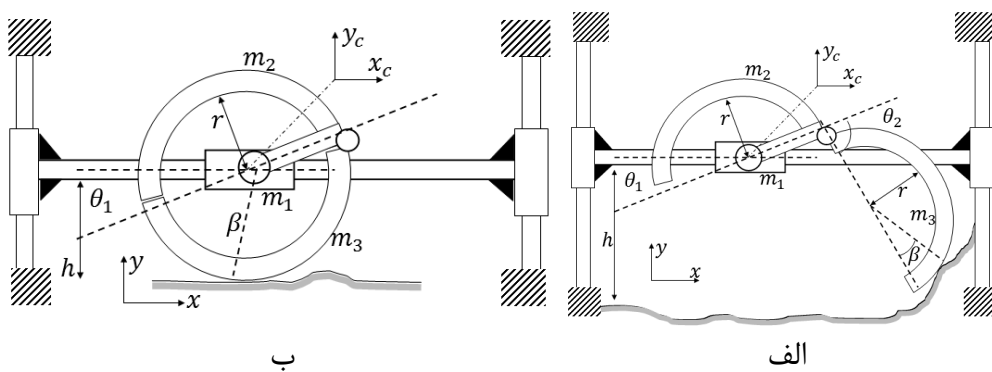
۳-۵-۱ محدودیت‌های هندسی و قیدهای ساختاری

این پا از نظر ساختار هندسی دارای محدودیت‌هایی است. فضای اشغال شده توسط پای نوین، در مقایسه با پاهای موجود، در یک مسیر مشخص، بیشتر است. همان‌گونه که از شکل ۳-۴ بر می‌آید؛ این ساختار در حالت پا، ممکن است به جای انتهای پا، از روی انحنای لینک دوم به سطح برخورد کند. حداکثر زاویه باز شدن لینک دوم نسبت به لینک اول نیز دارای محدودیت‌هایی است. این پای نوین نمی‌تواند؛ تا هر کجا که فرمان کنترلی دستور می‌دهد؛ بچرخد. به دلیل تداخل هندسی لینک اول دوم این زاویه بیش از ۱۸۰ درجه نیست.

۳-۵-۲ نمونه مجازی سنجش

چون تحلیل‌های این پژوهش، نیازمند تمرکز بر روی ساختار چرخ است؛ یک نمونه مجازی سنجش چرخ ایجاد شده است. در این نمونه که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است؛ فرض‌های زیر در مورد ربات کامل در نظر گرفته شده است. ربات در هنگام گام زنی حول بدنه خود دوران محدودی دارد. در نتیجه می‌توان برای ربات، یک حرکت خطی فرض کرد. این فرض با یک میله افقی در شکل ۳ نشان داده شده است. چون در هر فرایند گام‌زنی ربات چهار پا، سه پا در گیر زمین و حامل بار اند؛ یک پا در فضا معلق است؛ در نتیجه یک سوم از وزن کل ربات به صورت مجازی روی مفصل اول پا متصل به بدنه قرار می‌گیرد. در نمونه شکل ۳-۴ این امر، با یک لغزنده با یک سوم وزن ربات انجام شده است.

چون پا در هر دو مد کارکرد باید یک سوم وزن ربات را نیز تحمل کند؛ در نتیجه در راستای ارتفاع نیز قابلیت حرکت دارد. به دلیل تداخل هندسی لینک دوم پا نمی‌تواند با زاویه بیش از ۱۰۰ درجه نسبت به لینک قبل بچرخد. بنابراین در نمونه ریاضی، یک تابع شرطی به این منظور استفاده شده است. نمونه به دست آمده هم برای چرخ صادق است و هم برای پا. تفاوت در محدوده چرخش لینک دوم است، که در کارکرد چرخ یک مقدار ثابت است و برابر با ۱۸۰- درجه است.



شکل ۳-۴ پارامترهای پای آزمایشی

شکل ۳-۴ نمونه آزمایش ساده شده را به همراه پارامترهای سینماتیک و هندسی به خوبی بیان می‌کند. هر دو قسمت شکل دارای یک معادله حرکت و سینماتیک است؛ و تنها شرایط داخلی آن معادلات متفاوت است. در شکل، شمارگان جرم‌ها به ترتیب نمایش داده شده است. این نمونه، می‌تواند با تقریب خوبی، عملکرد پا را شبیه‌سازی کند. نقطه اتصال به زمین، به خاطر ساختار منحنی پا، فقط بر انتهای لینک دوم نبوده؛ و بنا بر شرایط زاویه‌ای، می‌تواند روی بدنه خود لینک دوم هم قرار گیرد که در شکل ۳-۴-ب نشان داده شده است. در حقیقت، تماس با زمین، یک تابع شرطی است. اگر مجموع زاویه لینکی اول و دوم کمتر از ۹۰ درجه باشد، جسم با نقطه انتهای لینک دوم با زمین تماس دارد. ولی اگر زاویه بیش از نود درجه باشد، لینک دوم از روی انحنا خود با زمین در تماس است.

۳-۵-۳ معادلات سینماتیک

پارامترهای سینماتیک چرخ در شکل ۳ نشان داده شده است. متغیرهای این ساختار، جابجایی در راستای عمودی و افقی، در مرکز لینک اول و دو زاویه در دو لینک است. معادلات مشخصات سینماتیک مرکز دو لینک در رابطه (۳-۲۴) و (۳-۲۵) نشان داده شده است. رابطه (۳-۲۴) و (۳-۲۵)، به ترتیب مربوط به هندسه مرکز لینک اول و لینک دوم هستند.

$$\begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ \theta_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{c1} \cos(\theta_1) + x_c \\ r_{c1} \sin(\theta_1) + y_c \\ \theta_1 \end{bmatrix} \quad (3-24)$$

$$\begin{bmatrix} x_{c2} \\ y_{c2} \\ \theta_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos(\theta_1) + r_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2) + x_c \\ r \sin(\theta_1) + r_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2) + y_c \\ \theta_1 + \theta_2 \end{bmatrix} \quad (3-25)$$

با استفاده از ژاکوبین سرعت، به راحتی ارتباط بین متغیرها و مشخصات سینماتیک اعضا به دست می‌آید. در رابطه (۳-۲۶) و (۳-۲۷) ژاکوبین گفته شده به صورت نوعی برای هر دو لینک استخراج شده است.

$$[\dot{x}_{ci} \quad \dot{y}_{ci} \quad \dot{\theta}_{ci}]^T = J_i [\dot{x}_c \quad \dot{y}_c \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2]^T \quad (3-26)$$

$$J_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{ci}}{\partial x_c} & \frac{\partial x_{ci}}{\partial y_c} & \frac{\partial x_{ci}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x_{ci}}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y_{ci}}{\partial x_c} & \frac{\partial y_{ci}}{\partial y_c} & \frac{\partial y_{ci}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y_{ci}}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial \theta_{ci}}{\partial x_c} & \frac{\partial \theta_{ci}}{\partial y_c} & \frac{\partial \theta_{ci}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \theta_{ci}}{\partial \theta_2} \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

$\dot{\alpha}$ نشانگر شماره لینک است. ژاکوبین نقطه برخورد با زمین هم نسبت به مرجع لخت، به همین ترتیب به دست می‌آید؛ با این تفاوت که این ژاکوبین، شامل یک متغیر β نیز است؛ که در شکل ۳-۴-ب نمایش داده شده است. رابطه (۳-۲۸) نشان دهنده مشخصات هندسی این نقطه است. این نقطه تماس در شبیه‌سازی، در واقع نقطه‌ای است که بردار عمود بر انحنا قسمت دوم پا در

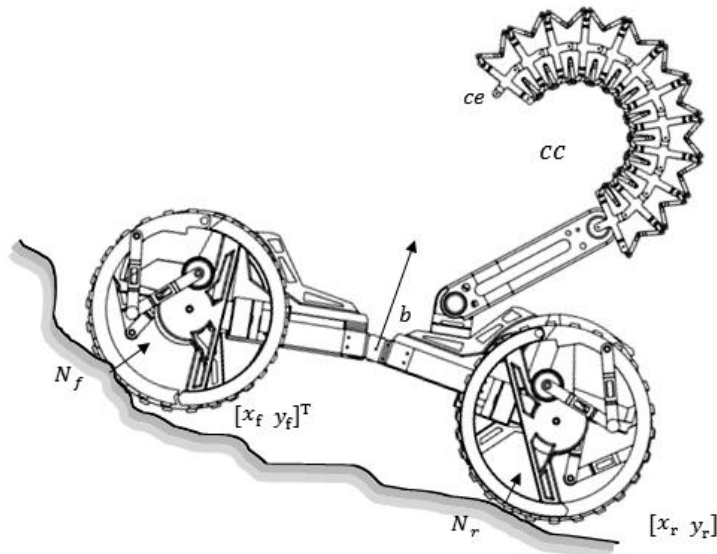
آن نقطه با بردار عمود زمین یکی باشد. در این پژوهش زمین، هموار در نظر گرفته شده است؛ و بردار عمود آن بردار یکه در راستای ارتفاع است.

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos(\theta_1) + r \cos(\theta_1 + \theta_2) + r \cos(\theta_1 + \theta_2 + \beta) + x_c \\ r \sin(\theta_1) + r \sin(\theta_1 + \theta_2) + r \sin(\theta_1 + \theta_2 + \beta) + y_c \end{bmatrix} \quad (28-3)$$

$$J_t = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_t}{\partial x_c} & \frac{\partial x_t}{\partial y_c} & \frac{\partial x_t}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x_t}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y_t}{\partial x_c} & \frac{\partial y_t}{\partial y_c} & \frac{\partial y_t}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y_t}{\partial \theta_2} \end{bmatrix} \quad (29-3)$$

۳-۶ سینماتیک دو بعدی چرخ دار (کارکرد چرخ دار)

فرض‌های حل سینماتیک برای معادلات توانایی به ترتیب، دو بعدی بودن فضای ربات و نا هموار در نظر گرفتن سطح کاری، هستند.



شکل ۳-۵ نمونه دو بعدی کارکرد چرخ دار

سطح زیر ربات یک سری فوریه از جمع توابع سینوسی در نظر گرفته شده است. زاویه چرخش چرخ‌ها نسبت به موتور نیز متغیرهای اصلی حالت در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به این جرم و باند گشتاور، میزان سطوح شتاب در دسترس نقطه C به دست می‌آید. سطح کاری با رابطه (۳۰-۳) نشان داده شده است. رابطه (۳۰-۳) هم برای چرخ جلو و هم عقب صادق است. و با اندیس f و r بیان کننده برای هر چرخ است. با استفاده از روابط برداری رابطه (۳۱-۳) به دست

می‌آید. این رابطه، نشان‌دهنده نقطه مرکز در هر چرخ است. اندیس‌های روابط با نام اعضا نشان داده شده است. و معادلات برداری نسبت به مرجع لخت نشان داده شده، در شکل ۳-۴ به دست آمده‌اند. با استفاده از رابطه (۳-۳۱)، رابطه (۳-۳۲) که نشان‌دهنده نقطه میانی C است به دست می‌آید. در رابطه (۳-۳۲)، R نشان‌دهنده ماتریس دوران در صفحه به اندازه ۹۰ درجه است. نقطه b، محل اتصال بدنه ب گردن ربات است. جهت این نقطه در راستای عمود در نظر گرفته می‌شود. جهت و زاویه ی مرکز دو بخش بدنه در رابطه (۳-۳۳) به دست آمده است.

$$\begin{cases} y = \sum_{i=1}^n A_n \sin(n\omega_s x) \\ \vec{N}_f = [-\frac{\partial y_f}{\partial x_f}, 1]^T \\ \vec{N}_r = [-\frac{\partial y_r}{\partial x_r}, 1]^T \end{cases} \quad (30-3)$$

$$\begin{cases} \vec{c}_{fw} = r\vec{N}_f + [x_f \ y_f]^T \\ \vec{c}_{rw} = r\vec{N}_r + [x_r \ y_r]^T \end{cases} \quad (31-3)$$

$$\vec{c}_c = \frac{\vec{c}_{rw} + \vec{c}_{fw}}{2} + (R\sqrt{w^2 - |\vec{c}_{rw} - \vec{c}_{fw}|^2})\vec{d}_b \quad (32-3)$$

$$\begin{cases} e_{|\vec{c}_{rw} - \vec{c}_{fw}|} = \vec{d}_b \\ \theta_b = \tan^{-1}\left(\frac{(\vec{c}_{rw} + \vec{c}_{fw})_2}{(\vec{c}_{rw} + \vec{c}_{fw})_1}\right) \end{cases} \quad (33-3)$$

حال، مختصات مرکز جرم دو میله عقب و جلو به صورت زیر استخراج می‌گردد. زاویه چرخش هر عضو نیز در رابطه (۳-۳۵) نشان داده شده است.

$$\begin{cases} \vec{c}_{rb} = \vec{c}_{rw} + p\vec{F}_b \\ \vec{c}_{fb} = \vec{c}_{fw} + p\vec{F}_b \\ e_{|\vec{c}_{rw} - \vec{c}_c|} = \vec{F}_b \end{cases} \quad (34-3)$$

$$\begin{cases} \theta_{rb} = \angle \vec{c}_c - \vec{c}_{rw} \\ \theta_{fb} = \angle \vec{c}_c - \vec{c}_{fw} \\ \theta_{rw} = \angle(\vec{N}_r) + \angle(\varphi_{rw}) \\ \theta_{fw} = \angle(\vec{N}_f) + \angle(\varphi_{fw}) \\ \theta_c = \theta_{rb} \end{cases} \quad (3-35)$$

که φ ، زاویه چرخش موتور چرخ است. رابطه (3-36)، نشان‌دهنده رابطه هندسی بین سرعت زاویه چرخش موتورها و سرعت افقی نقطه اتصال به زمین است.

$$\begin{cases} \dot{x}_r = \frac{r\dot{\varphi}_{rw}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial y_r}{\partial x_r}\right)^2}} \\ \dot{x}_f = \frac{r\dot{\varphi}_{fw}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial y_f}{\partial x_f}\right)^2}} \end{cases} \quad (3-36)$$

در ادامه گردن به نقطه b متصل می‌گردد. در این حالت از نتایج ماتریس‌های انتقال قسمت اول فصل برای گردن (رابطه (3-2)) استفاده می‌شود؛ و زاویه نهایی و مختصات هر کدام از بخش‌های گردن به صورت جدول 3-1، به دست می‌آید.

جدول 3-1 مختصات مرکز جرم مهره‌های گردن

عضو گردن	نماد زاویه	نماد مختصات	زاویه	مختصات مرکز جرم
لینک اول	θ_{n0}	c_{n0}	$\theta_c + \theta_0$	$\vec{c}_c + l_{n0}[\sin(\theta_c + \theta_0), \cos(\theta_c + \theta_0)]^T$
لینک‌های گردن	θ_{ni}	c_{ni}	$\theta_c + \theta_0 + i\theta_1$	$\vec{c}_c + c_{n0} + \left[\sum_{j=1}^i \sin(j\theta_1), \sum_{j=1}^i \cos(j\theta_1) \right]^T$

معادلات ژاکوبین مورد نیاز برای استخراج معادلات حالت سیستم در رابطه (3-37) نشان داده شده است. از آنجا که به دست آوردن ژاکوبین‌های زیر، با توجه به روابط هندسی به دست آمده، روال مشخص دارد، و این کار توسط برنامه کامپیوتری انجام گرفته؛ از ذکر جزئیات پرهیز می‌شود.

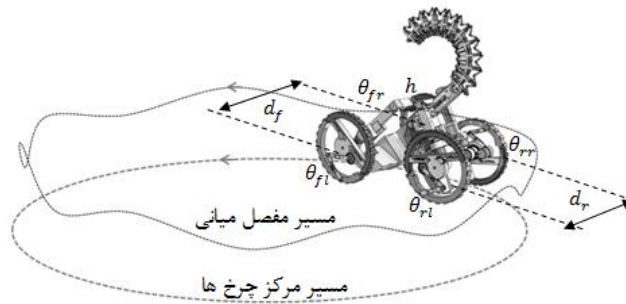
$$\begin{cases} [\dot{x}_r \ \dot{x}_f]^T = J_1[\dot{\varphi}_{rw} \ \dot{\varphi}_{fw}]^T \\ [\dot{x}_{rw} \ \dot{y}_{rw} \ \dot{\theta}_{rw}]^T = J_{rw}[\dot{x}_r \ \dot{x}_f]^T \\ [\dot{x}_{fw} \ \dot{y}_{fw} \ \dot{\theta}_{fw}]^T = J_{fw}[\dot{x}_r \ \dot{x}_f]^T \\ [\dot{x}_{rb} \ \dot{y}_{rb} \ \dot{\theta}_{rb}]^T = J_{rw}[\dot{x}_r \ \dot{x}_f]^T \\ [\dot{x}_{fb} \ \dot{y}_{fb} \ \dot{\theta}_{fb}]^T = J_{fw}[\dot{x}_r \ \dot{x}_f]^T \\ [\dot{x}_{ni} \ \dot{y}_{ni} \ \dot{\theta}_{ni}]^T = J_i J_1[\dot{x}_r \ \dot{x}_f]^T \end{cases} \quad (37-3)$$

رابطه (37-3)، روابط سرعت‌ها را بر مبنای نقطه اتکا به زمین به دست آورده است. این در صورتی است که با فرض عدم لغزش، روابط در فضای سرعت زاویه‌ای موتورها بیان گردند. رابطه (38-3) به این مهم دست یافته است. ماتریس ژاکوبین نهایی تمامی اعضا در کارکرد چرخ دار صفحه‌ای است.

$$\begin{bmatrix} [\dot{x}_{rw} \ \dot{y}_{rw} \ \dot{\theta}_{rw}]^T \\ [\dot{x}_{fw} \ \dot{y}_{fw} \ \dot{\theta}_{fw}]^T \\ [\dot{x}_{rb} \ \dot{y}_{rb} \ \dot{\theta}_{rb}]^T \\ [\dot{x}_{fb} \ \dot{y}_{fb} \ \dot{\theta}_{fb}]^T \\ [\dot{x}_{ni} \ \dot{y}_{ni} \ \dot{\theta}_{ni}]^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{rw}J_1 \\ J_{fw}J_1 \\ J_{rb}J_1 \\ J_{fb}J_1 \\ J_iJ_1 \end{bmatrix} [\dot{\varphi}_{rw} \ \dot{\varphi}_{fw}]^T = J_{nwm}[\dot{\varphi}_{rw} \ \dot{\varphi}_{fw}]^T \quad (38-3)$$

۷-۳ سینماتیک سه بعدی روی سطح هموار برای ربات چرخ دار

شکل شماتیک سینماتیک سه بعدی و حرکت در صفحه در شکل ۶-۳ نشان داده شده است و با توجه به پارامترهای موجود در این شکل، رابطه (۳۹-۳) بیان گر سینماتیک معکوس حرکت است.



شکل ۶-۳ سینماتیک سه بعدی چرخ دار

$$\left\{ \begin{array}{l}
 J_1 = \begin{bmatrix} -0.5c & -0.5c & 0.5c & 0.5c \\
 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\
 \frac{1}{d_r} & \frac{-1}{d_r} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1}{d_f} & \frac{-1}{d_f} \end{bmatrix} \\
 c = \frac{-l}{\sqrt{16w^2 - 4l^2}} \\
 l = \frac{r(\theta_{fr} + \theta_{fl} - \theta_{rr} - \theta_{rl})}{2} \\
 J_2 = \begin{bmatrix} eye(3) \\
 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 J_3 = r * eye(4) \\
 J_{tot} = (J_1 J_3)^{-1} J_2 \\
 \theta = J_{tot} h
 \end{array} \right.$$

(۳۹-۳)

فصل چہارم: دینامیک

۱-۴ دیباچه

در این بخش، معادلات حالت ساختار ربات در کارکردهای گوناگون به دست خواهد آمد. دینامیک ربات‌های بازو، با روش لاگرانژ و با استفاده از هندسه سرعت، به طور کامل به دست می‌آید. این امر در مورد ربات‌های متحرک به راحتی امکان‌پذیر نیست. اگر شرایط دینامیک ربات با فرض لغزش و برخورد در نظر گرفته شود؛ امکان اینکه بتوان، با استفاده از معادلات هندسه سرعت، به حل کاملی از دینامیک دست یافت؛ وجود ندارد. دینامیک ساختارهای متحرک به دو بخش تقسیم می‌شود. نخست دینامیک خود ساختار، بدون در نظر گرفتن نیروهای خارجی تماس و کنش بازوها، و دیگری دینامیک برخورد و لغزش در تماس با سطح. در این پژوهش دینامیک تکمیلی این ربات‌ها، که در برگیرنده دینامیک سطح (همچون لغزش و جابجایی اجزای حرکت پذیر) است؛ در نظر گرفته نشده است. نخستین مسئله، دینامیک خود ربات است؛ که از روابط هندسه سرعت موجود، در فصل سینماتیک، به دست خواهد آمد. در ادامه، دینامیک برخورد در نظر گرفته خواهد شد. اصلی‌ترین عامل ایجاد پایداری در یک ربات پویا، نیروهای واکنش زمین، وارد بر انتهای پاها یا چرخ‌های ربات است. این نیروها، در تماس با انتهای چرخ، دارای نمونه‌های گوناگونی هستند. یکی از این نمونه‌ها، نمونه ضربه و برخورد بین نقطه تماس و ربات است [۷۲]. در این نمونه، سطح یک فنر و میراگر فرض می‌شود؛ که پا در هنگام نزدیک شدن به زمین به آن می‌رسد. در نمونه‌ای دیگر، از روی فضای حالت ساختار، نیروهای اعمال شده بر پایه به دست می‌آید. این نیروها به دو بخش اصطکاک و واکنش عمودی سطح تقسیم می‌شود. در نهایت بخش اصطکاک، با نمونه‌های اصطکاک به منظور تشخیص لغزش بررسی می‌شود. نمونه‌های گوناگونی برای لغزش وجود دارد؛ که هر کدام، شرایط لغزش متفاوتی را بیان می‌کنند. [۷۳، ۷۴]. آقای بولینگ، یک ربات شش پا را از نظر واکنش با زمین و پایداری به طور کامل بررسی کرده است [۷۰]. در گام بعد با استفاده از معادلات حالت شروط چیرگی بر سطح (سطح کاری) بررسی

خواهد شد. این کار به دستیابی به یک معیار مناسب، در جهت مقایسه توانایی عمومی ربات‌ها، در پیمایش یک میدان کاری، کمک خواهد کرد.

۲-۴ به دست آوردن تابع تبدیل

با استفاده از روش دستیابی لاگرانژ، به دینامیک ساختار، معادله اساسی ساختار در شکل رابطه (۱-۴) به دست می‌آید. در این رابطه، H ، C ، g ، J^T ، F و φ ، به ترتیب ماتریس اینرسی، ماتریس کریولیس-گریز از مرکز، ماتریس گرانش، ژاکوبین نگاشت نقطه اعمال نیرو بر روی متغیرها، نیروی واکنش زمین و ماتریس متغیرها است. R_e و J_T ، نیز به ترتیب ماتریس دوران نیروهای مماسی و عمودی به نیروهای در راستای محورهای مختصات کارتیزین و ماتریس انتقال نیروی عمودی افقی بر روی متغیرها است. به دلیل آنکه نیروهای واکنش سطح بر روی انتهای پاها وارد می‌شود؛ در نتیجه برای یافتن میزان نیروی برخورد و تماس با زمین، به بیان معادله دینامیک در فضای کار نیازمندیم. این بیان در پژوهش‌های گوناگون استفاده شده است [۶۳]؛ که به قرار رابطه (۲-۴) است.

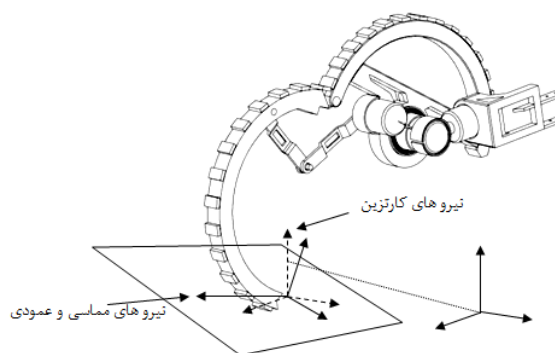
$$\begin{cases} H\ddot{\varphi} + C\dot{\varphi} + g + J^T F = \tau \\ J^T = J_T R_e \end{cases} \quad (۱-۴)$$

$$\begin{cases} E\dot{v}_e + Dv_e + g + J^T F = \tau \\ E = HJ^{-1} \\ D = HJ^{-1}\dot{J} + C \end{cases} \quad (۲-۴)$$

۳-۴ دینامیک تماس با سطح

مدل تماس با زمین، یک فنر و میراگر با ضریب سختی‌های به دست آمده، از آزمایش‌ها اولیه است. این نمونه، یک نمونه رایج در شبیه‌سازی برخورد دو جسم است [۷۲]. این نمونه در شبیه‌سازی برخورد انتهای بازو به اجسام نیز کاربرد دارد.

$$\begin{cases} F = J^{-T}(\tau - g - Dv_e + F_c) \\ F_c = (1 + e)\frac{Ev_e}{t_c} \end{cases} \quad (۳-۴)$$



شکل ۴-۱ نحوه تماس پا با صفحات سطح خارجی

برای نیروی اصطکاک نمونه‌های مختلفی ارائه شده است. یکی از این نمونه‌ها؛ نمونه اصطکاک خشک کلمب است. در به دست آوردن نیروی موجود از معادله اصلی حرکت، که در رابطه (۴-۳) بیان شده است؛ دو نیرو به دست می‌آید. یکی نیروی عمود بر سطح و دیگری نیروی مماس بر سطح. در فضای سه بعدی، سه نیرو وجود دارد. که دو نیرو مماس بر سطح و یک نیرو عمود بر سطح هستند. نمونه اصطکاک کلمب در فضا به نمونه مخروط اصطکاک معروف است که در پژوهش‌های ربات‌های متحرک پادار، استفاده شده است [۷۰]. در واقع نیرویی که مماس بر سطح به دست می‌آید؛ همان نیروی اصطکاک مورد نیاز برای ایجاد ایستایی، در انتهای پا است. اگر این اندازه این نیرو از اندازه نیروی عمودی بیشتر باشد؛ میزان نیروی اصطکاک برابر می‌شود؛ با نیروی عمودی در ضریب اصطکاک و اگر کمتر باشد، برابر با همان مقدار به دست آمده است. در زمانی که نیروی اصطکاک به دست آمده، از نیروی عمودی در ضریب اصطکاک ایستایی بیشتر باشد؛ جهت اصطکاک اصلی، در راستای وارون سرعت تصویر شده انتهای پا در صفحه حرکت است. نیروی اصطکاک بنا بر نمونه مخروط اصطکاک از رابطه (۴-۴) محاسبه می‌شود.

$$\left\{ \begin{array}{l} F = J^{-T}(\tau - g - Dv_e) + F_c \\ \begin{bmatrix} F_n \\ F_t \end{bmatrix} = F \\ F_n < 0 \rightarrow F_n = 0 \\ |F_t| < |\mu_s F_n| \rightarrow F_t = F_t \\ |F_t| \geq |\mu_s F_n| \rightarrow F_t = |\mu_k F_n| \frac{v}{|v|} = |\mu_k F_n| \frac{F_t}{|F_t|} \end{array} \right.$$

(۴-۴)

۴-۴ کنترل

ربات‌های متحرکِ کاوش‌گرِ کفنورد، دارای دو بخش بازو و بدنه پویا است. این بازو و بدنه به طور جداگانه قابل کنترل است. آن چیزی که در کنترل ربات‌های متحرک اهمیت دارد، هدف از کنترل است. در ربات‌های تک کارکرد، کنترل یک مسیر مشخص دارد. اما در ربات‌های چند کارکرد، کنترل ممکن است چند هدف گوناگون را دنبال کند. این کنترل می‌تواند با فرض لغزش و نرمی زمین طراحی شود؛ و می‌تواند هرکدام از این فرض‌ها را نداشته باشد. اگر فرض کنترل، عدم لغزش باشد، در صورت لغزش ساختار کنترل با خطای پایدار همراه خواهد بود. اما اگر کنترل بر مبنای فرض لغزش طراحی شود؛ با وجود لغزش هم، خطای ساختار جبران خواهد شد. مشکل این فرض‌ها، افزایش شمارگان حس‌گرها است. شبیه‌سازی کنترلر به صورت یک خطی ساز پس‌خورد صورت گرفته است؛ که در ادامه در رابطه (۴-۵)، مقادیر همراه اندیس d مقادیر فرمان کنترل می‌باشند. k_p و k_d نیز ضرایب کنترل کننده PD استفاده شده در ساختار کنترل است.

$$H(\ddot{\varphi}_d + k_p(\varphi - \varphi_d) + k_d(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_d) + C\dot{\varphi} + g + J^T F = \tau$$

(۴-۵)

مقادیر مطلوب در قانون کنترل فوق از سینماتیک معکوس جایگذاری می‌شوند. شرایط عدم لغزش و مرزهای پایداری، در کالبد یک مجموعه قیدهای نابرابری به دست آمده است؛ که هر کدام محدوده‌ای را برای گشتاور تعیین می‌کند. اشتراک تمامی این محدوده‌ها، به عنوان یک تابع اشباع، بر روی خروجی کنترلر اعمال می‌شود.

ربات‌های پایه متحرک

۴-۵ نقاط تکین

معادلات دینامیک، معادلات سینماتیک و ساختارهای کنترل، تماماً شامل نقاط تکینی هستند؛ که در این نقاط، ژاکوبین دارای دترمینان صفر هستند. این ژاکوبین می‌تواند، ماتریس اینرسی در معادلات حرکت باشد. در این صورت، هنگامی که از خطی ساز پس‌خورد بنا بر معادله کنترلر استفاده می‌گردد. در حل و به دست آوردن میزان شتاب، به ماتریس معکوس اینرسی نیاز است.

در صورتی که در نقاط تکین، ماتریس اینرسی معکوس ندارد و شتاب بی نهادیت می‌گردد. این تکینگی نقاط در اینرسی بنا بر نحوه به دست آوردن آن، از روی ماتریس‌های ژاکوبین سینماتیک سرعت، اگر ماتریس ژاکوبین سرعت نیز دارای دترمینان صفر باشد؛ ربات در تکینگی قرار دارد. با توجه به روابط سینماتیک، ربات در وضعیتی که در حالت دو چرخ کامل قرار بگیرد، به دلیل صفر بودن ژاکوبین یکی از ماتریس‌های سرعت، ربات در وضعیت تکینگی قرار می‌گیرد و یا در کشیدگی کامل پاها، تکینگی رخ می‌دهد. از رسیدن به این نقاط، در شبیه‌سازی‌ها، اجتناب شده است. در مجموع اگر در معادله (۴-۶) دترمینان ماتریس ژاکوبین سرعت صفر باشد مه‌ادله در تکینگی قرار گرفته است که این تکینگی در دو نقطه رخ می‌دهد. یکی در زاویه بین دو پل برابر با صفر و دیگری در زاویه ۱۸۰ درجه. از طرفی اگر دترمینان ماتریس ژاکوبین مربوط به گردن ساختار مهره ای نیز صفر باشد نقطه دیگر تکینگی است که در دو زاویه گردن برابر با صفر درجه رخ می‌دهد.

فصل پنجم: معیارهای توانمندی مکانیکی

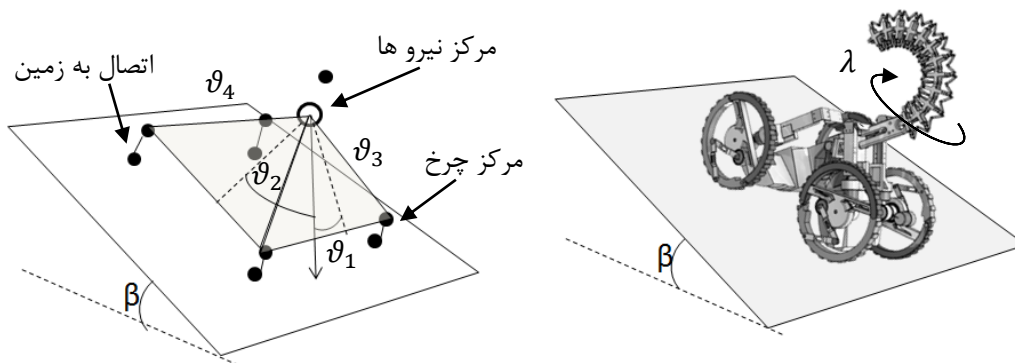
۵-۱ دیباچه

سنجش، ابداع ذهن خلاق انسان برای ارضای ذهن مخاطب، در برابر یک ادعا است^۱. در فصل گذشته تلاش شد تا معادلات دینامیک به دست آید و راهبردهای کنترل بیان شود. طراحی یک ساختار نوین، تنها به ساخت یک ابزار نوین در ذهن و واقعیت محدود نمی‌شود. بلکه استفاده از معیارهای طراحی، برای بهینه‌سازی ساختار، نسبت به برخی از اهداف، یکی از مهم‌ترین بخش‌های یک طراحی است. برای سنجش یک ربات، معیارهای گوناگونی ارائه شده است؛ که از آن دسته می‌توان به معیارهای سینماتیک پایه و دینامیک پایه و حتی هندسه پایه اشاره کرد. در ادامه فصل، در ابتدا معیارهای دینامیک پایه همچون معادلات شتاب پذیری بررسی می‌گردد. این معادلات بر مبنای فعالیت‌های پیشین، شکل گرفته است [۷۵، ۷۶]. در بخش بعدی معیارهای پیشنهادی همچون حجم توانمندی بررسی می‌گردد. پس از بررسی توانایی‌ها و محدودیت‌ها، طراحی مسیر، با توجه به توانایی‌ها و محدودیت‌های شناخته شده از ربات جدید، برای کارکردهای گوناگون، انجام خواهد شد. این طراحی مسیر در گام زنی چهارپا، می‌تواند الهام پذیر از موجودات زنده باشد [۶، ۷]. در این کارکرد، گام زنی یک پا، انجام خواهد شد؛ تا توانایی اعمال آن بر کل ربات بررسی گردد. در تمام طول فصل معیارهای ابداعی این پژوهش با عنوان معیار پیشنهادی شناسانده شده است. این معیارهای پیشنهادی توانایی مناسبی در توصیف یک خصوصیت ربات در یک یا دو عدد اسکالر دارند.

^۱ لاوازیه

۲-۵ پایداری

در فصل دوم ادعا شده است؛ که ساختار نوین از دیگر ساختارها در کارکردهای گوناگون می‌تواند پایدارتر باشد. در این بخش تلاش شده تا مبانی ریاضی مورد نظر برای شبیه سازی و محاسبات پایداری ساختار روشن گردد. در [۶۷] پایداری دو بعدی یک جرتقیل بررسی شده است. بوسیله معیار ارائه شده [۶۸]، مرز زاویه پایداری، می‌توان پایداری را در صفحه بررسی کرد. در این پژوهش تلاش شده است؛ تا با گسترش این معیار به فضای سه بعدی، پایداری ساختار بررسی و با نمونه‌های موجود مقایسه گردد. به این منظور در ابتدا یک مساله هندسی در فضای سه بعدی تعریف می‌شود. طبق این مساله و [۶۷] زمانی یک ساختار پایدار است؛ که خط اثر نیروهای خارجی از میانه نقاط اتصال به زمین عبور کند.



شکل ۱-۵ مساله هندسی سه بعدی تعادل

با توجه به شکل ۱-۵، برای یافتن مرکز نیروهای وزن، مرکز جرم کل سیستم، استخراج می‌گردد. سپس جهت نیروی وزن، با اندازه وزن کل ساختار، روی مرکز جرم اعمال می‌شود. بدین ترتیب، نیرو، نقطه اثر و جهت آن کاملاً مشخص می‌گردد. که در شکل با عنوان مرکز نیروها نشان داده شده است. دو زاویه β و λ به ترتیب زاویه شیب و چرخش بدنه حول محور نسبی سطح شیب دار می‌باشد. با استفاده از هندسه فضایی مختصات نقاط اتصال، مرکز چرخ‌ها و مرکز نیروها به دست می‌آید. مرکز نیروهای گرانشی با استفاده از رابطه (۱-۵) به دست می‌آید. که m_i, p_i و m_t به ترتیب برابر جرم قطعه i ام، مختصات مرکز جرم قطعه i ام، جرم کل ساختار می‌باشند.

$$CG = \frac{\sum m_i p_i}{m_t} \quad (1-5)$$

حال باید نیروی برآیند گرانشی از نقطه اثر CG و جهت شتاب گرانش، از بین نقاط اتصال به زمین عبور کند. برای سنجش، زاویه بردار نیرو، با هر کدام از صفحات θ_1 تا θ_4 به دست می‌آید. رابطه (2-5) این زاویه را نشان داده است. در این رابطه N_j و ξ_j به ترتیب نرمال سطح و زاویه نیرو با صفحه j ام است.

$$\xi_j = \cos^{-1} \frac{|F \times N_j|}{|F||N_j|} \quad (2-5)$$

اگر این زاویه به 0 نزدیک شود بدان معناست که پایداری به مرز بحرانی نزدیک شده است. هیچ کدام از چهار زاویه نباید به صفر نزدیک شوند. در نتیجه معیار اصلی کمینه این چهار زاویه در هر وضعیت استاتیکی است؛ چون اگر هر کدام از این زوایا به صفر برسند؛ و مقدار منفی به خود بگیرند؛ نشان گر آن است؛ که خط اثر نیرو از بیرون چند ضلعی نقاط تماس با زمین گذشته است و در نتیجه پایداری از بین رفته است.

5-3 معادلات شتاب پذیری و توانایی دینامیکی

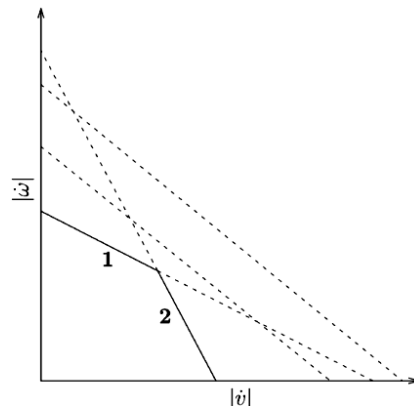
معادلات شتاب پذیری، بیان‌کننده مقادیر قابل دسترسی شتاب را برای یک ساختار، با توجه به مرزهای گشتاور است. اگر معادله دینامیکی ساختار نسبت به نقطه انتها و یا مرکز بدنه ربات، مشابه ساختار رابطه (3-5) توصیف شود؛ در نتیجه می‌توان با گذاشتن مرز بر روی مقادیر گشتاور، مرزهای پارامترهای مطلوب را تعیین نمود. معادلات توانایی دینامیکی، وابسته به سطوح شتاب و گشتاور هستند. در مورد ربات متحرک، بر روی سطوح ناهموار، با بار متغیر، از جمله دیگر پارامترها جرم نقطه میانی و دامنه اغتشاشات سطوح است. پس سطوح شتاب ربات، وابسته به سه پارامتر دامنه نوسانات سطح، جرم نقطه میانی و سطوح گشتاور موتورها است. در رابطه (3-5)، v_c سرعت خطی نقطه میانی و ω_c سرعت دورانی نقطه میانی است.

$$\begin{bmatrix} E_{v_c} \\ E_{\omega_c} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{\omega}_c \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} + g = \tau \quad (3-5)$$

با در نظر گرفتن یک سطح بیشینه و کمینه برای گشتاور موتورها، منحنی‌های پارامتری سطوح شتاب نقطه انتها به دست می‌آید. [۲۷-۲۸-۲۹] مراحل استخراج معادلات توانایی را به خوبی پیموده است. رابطه (۴-۵) نشانگر این محدوده است.

$$\begin{bmatrix} \|E_v\| |\dot{v}_c| + \|E_\omega\| |\dot{\omega}_c| + \|g\| \\ \|E_v\| |\dot{v}_c| + \|E_\omega\| |\dot{\omega}_c| + \|g\| \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \tau_{up} \\ -\tau_{low} \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

که τ_{low} و τ_{up} نشانگر گشتاور بیشینه و کمینه موتورها است. رابطه (۴-۵) نشان‌دهنده چندین محدوده در صفحه سرعت‌ها است؛ که در حقیقت مرزهای کارکرد ساختار را، بنا بر بیشینه و کمینه گشتاور نشان می‌دهند. اشتراک تمامی این مرزها، نشان‌دهنده سطوح حداکثری شتاب است. در هر وضعیت هندسی از ربات، این معادلات تغییر می‌کند؛ و در کل حالات یک حالات اشتراک موجود است؛ که بدترین وضعیت موجود را به تصویر می‌کشد.^۱ حال بدترین وضعیت موجود برای یک وضعیت از جرم‌ها و ناهمواری‌های گوناگونی است؛ که می‌تواند روی ربات اعمال شود. نمودار نوعی وضعیت‌های گوناگون، در شکل ۲-۵ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۵ محدوده قابل پذیرش شتاب سرعت

هرچه مساحت قسمت مشترک بیشتر باشد، ربات با گشتاور بیشینه موجود، توان بیشتری در ایجاد شتاب دارد. این امر به راحتی با تمرکز بر روی شکل ۲-۵ قابل درک است. در مورد ربات

^۱ Worst case

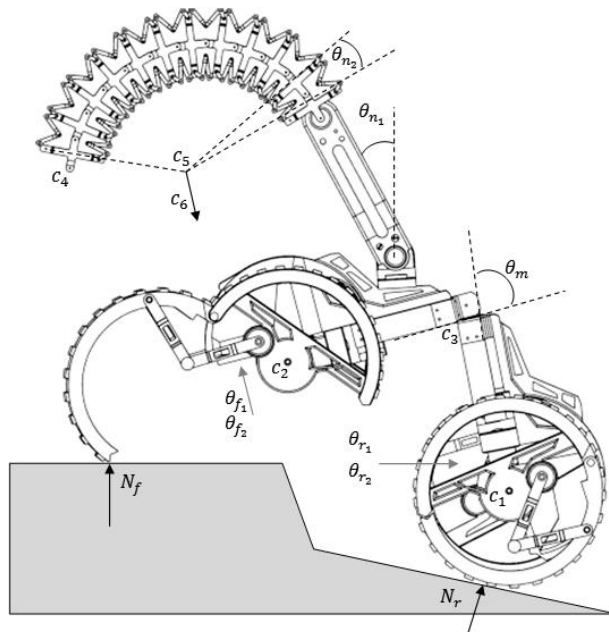
بازو، از جمله دیگر پارامترها سطوح نیروی اعمالی به انتهای بازو است. در رابطه (۵-۵)، v_c سرعت خطی نقطه انتهای ربات و ω_c سرعت دورانی نقطه انتهایی است.

$$\begin{bmatrix} E_{v_c} \\ E_{\omega_c} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{\omega}_c \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} + g + J^T F = \tau \quad (۵-۵)$$

با در نظر گرفتن یک سطح بیشینه و کمینه برای گشتاور موتورها، منحنی‌های پارامتری سطوح شتاب نقطه انتها به دست می‌آید. [۲۰-۱۹-۱۸] مراحل استخراج این منحنی‌ها به خوبی پیموده است. رابطه (۶-۵) نشانگر این محدوده است.

$$\begin{bmatrix} \|E_v\| |\dot{v}_c| + \|E_\omega\| |\dot{\omega}_c| + \|g\| + \|J^T\| \|F\| \\ \|E_v\| |\dot{v}_c| + \|E_\omega\| |\dot{\omega}_c| + \|g\| + \|J^T\| \|F\| \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \tau_{up} \\ -\tau_{low} \end{bmatrix} \quad (۶-۵)$$

که τ_{low} و τ_{up} نشانگر گشتاور بیشینه و کمینه موتورها است. رابطه (۶-۵) نشان‌دهنده چندین محدوده در فضای سرعت‌ها و نیروها است؛ که در حقیقت مرزهای کارکرد ساختار را بنا بر بیشینه و کمینه گشتاور نشان می‌دهند. اشتراک تمامی این مرزها نشان‌دهنده سطوح حداکثری شتاب و نیرو است. در هر وضعیت هندسی از ربات، این معادلات تغییر می‌کند و در کل حالات یک حالات اشتراک موجود است؛ که بدترین وضعیت موجود را به تصویر می‌کشد. در شکل ۳-۵ پارامترهای دینامیک دو بعدی نمایش داده شده است



شکل ۳-۵ پارامترهای دینامیک در محاسبه دو بعدی

متغیرهای ربات در حالت ساده شده دو بعدی، در رابطه (۷-۵) بیان شده‌اند. تعداد اجزای ربات، نوزده است. و هر جز دارای سه درجه آزادی صفحه‌ای است. جدول ۱-۵ دربردارنده یک سمبل برای هر بخش ربات است. رابطه (۹-۵)، بیان کننده معادله دینامیک ساده شده در صفحه است. و معادله (۱۰-۵) بیان کننده معادله دینامیک ربات نسبت به نقاط انتهایی اعضای خارجی است.

جدول ۱-۵ مشخصات دو بعدی

نماد	نام بخش ربات
γ_{rb}	مرکز بدنه عقب
γ_{fb}	مرکز بدنه جلو
γ_{r1}	لینک اول پای عقب
γ_{f1}	لینک اول پای جلو
γ_{r2}	لینک دوم پای عقب
γ_{f2}	لینک دوم پای جلو
γ_{n0}	لینک اول گردن
γ_{ni}	لینک i ام قسمت گردن مهره‌ای

رابطه (۷-۵)، متغیرهای فضای حالت ربات را می‌دهد.

$$\varphi = [x_{c_3} y_{c_3} \theta_{c_3} \theta_{r_1} \theta_{r_2} \theta_{f_1} \theta_{f_2} \theta_m \theta_{m_{n_1}} \theta_{m_{n_2}}]^T \in R^{10 \times 1}$$

(۷-۵)

رابطه (۸-۵)، مختصات مراکز جرم اجزا را نشان می‌دهد.

$$\vartheta = [\gamma_{r_b}, \dots, \gamma_{n_i}]^T, \gamma \in R^{3 \times 1}, \vartheta \in R^{57 \times 1}$$

(۸-۵)

رابطه (۹-۵)، معادلات دینامیک ساختار را با متغیرهای فضای حالت، نشان می‌دهد؛ و رابطه

(۱۰-۵) معادلات دینامیک را با مختصات تعمیم یافته انتهای اعضای در تماس با محیط نشان

می‌دهد.

$$\begin{cases} H\ddot{\phi} + C\dot{\phi} + g + J^T R_e F = G\tau \\ H \in R^{10 \times 10}, C \in R^{10 \times 10}, g \in R^{10 \times 1}, F \in R^{9 \times 1} \\ J \in R^{9 \times 10}, R_e \in R^{9 \times 9}, G \in R^{10 \times 7}, \tau \in R^{7 \times 1} \end{cases}$$

(۹-۵)

$$\begin{cases} E\ddot{\psi} + D\dot{\psi} + g + J^T R_e F = G\tau \\ \psi \in R^{9 \times 1}, E = H(J^T R_e)^{-1} \in R^{10 \times 9} \\ D = H(J^T R_e)^{-1}(\dot{J}^T R_e) \in R^{10 \times 9} \end{cases}$$

(۱۰-۵)

$$\begin{cases} E_g \ddot{\psi} + D_g \dot{\psi} + g_g + J_g F = \tau \\ E_g = G^{-1} H (J^T R_e)^{-1} \in R^{7 \times 9}, D_g = G^{-1} H (J^T R_e)^{-1} (\dot{J}^T R_e) \in R^{7 \times 9} \\ g_g = G^{-1} g \in R^{7 \times 1}, J_g = G^{-1} J^T R_e \in R^{7 \times 9} \end{cases}$$

(۱۱-۵)

معادلات توانایی مکانیکی، در صورت وجود معادلات بالا، به صورت رابطه (۱۲-۵) ساده‌سازی

می‌شوند.

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} E_g \\ E_g \\ M_7 \end{bmatrix} \ddot{\psi} + \begin{bmatrix} P_2 J_t \\ P_2 J_t \\ 0 \end{bmatrix} F \leq \begin{bmatrix} \tau_{pick} + k - D_g v - g_g \\ -\tau_{pick} - k - D_g v - g_g \\ 0 \end{bmatrix} \\ \tau_{up} = \tau_{pick} + k \\ \tau_{do} = -\tau_{pick} - k \end{cases}$$

(۱۲-۵)

رابطه (۱۳-۵)، چگونگی جداسازی نیروهای عمودی و تماسی، و یا نیروهای تماس دو چرخ را از

یکدیگر نشان می‌دهد؛ و رابطه (۱۴-۵) معادلات نهایی توانمندی دینامیکی را به تصویر می‌کشد.

$$\left\{ \begin{array}{l} E_g \dot{v} + D_g v + g_g + J_t F_t \leq \begin{bmatrix} \tau_{up} \\ \tau_{low} \end{bmatrix} \\ M_7 \dot{v} + M_8 \leq 0 \\ J_t F_t = J_{tt} F_{tt} + J_{tf} F_{tf} = P_1 J_t F_t + P_2 J_t F_t \\ P_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ P_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ E_g \dot{v} + D_g v + g_g + P_1 J_t F_t + P_2 J_t F_t \leq \begin{bmatrix} \tau_{up} \\ \tau_{low} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (13-5)$$

$$\begin{aligned} & \| E_{d1} \| |\dot{v}_{rr_l}| + \| E_{d2} \| |\dot{v}_{fl_l}| + \| E_{d3} \| |\dot{v}_{rr_l}| + \| E_{d4} \| |\dot{v}_{rl_l}| + \| E_{d5} \\ & \| |\dot{v}_{ar_l}| + \| E_{d6} \| |\dot{v}_{fr_r}| + \| E_{d7} \| |\dot{v}_{fl_r}| + \| E_{d8} \| |\dot{v}_{rr_r}| + \| E_{d9} \| |\dot{v}_{rl_r}| \\ & \leq \begin{bmatrix} \tau_{pick} + k - D_g v - g_g \\ \tau_{pick} - k - D_g v - g_g \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14-5)$$

۴-۵ طراحی مسیر برای چرخ دار

۱-۴-۵ طراحی مسیر برای نقطه میانی بدنه ربات

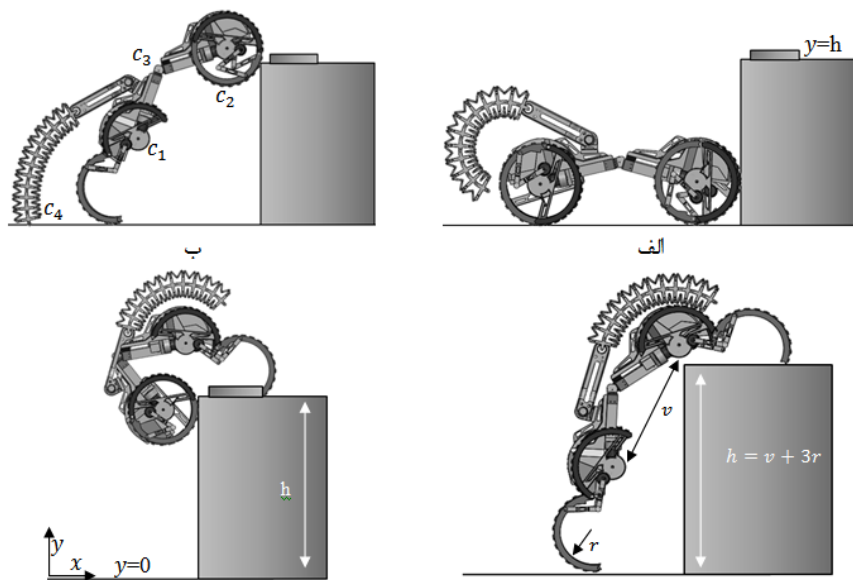
یکی از اهداف اصلی این پژوهش طراحی مسیر برای نقطه میانی ربات، باهدف طی مسیر و یا رفع اغتشاش است؛ که در بخش کنترل نیز به آن اشاره شد. طراحی مسیر باید تابع قواعد حقیقی دنیای مکانیک باشد. این بدان معناست که با توجه به فرض‌های عدم لغزش و دو بعدی بودن تحلیل در این مد کاری و مرز گشتاور موتورها، یک سطح شتاب و سرعت خاص برای نقطه میانی ربات وجود دارد؛ که در طراحی مسیر این نقطه باید در نظر گرفته شود. در بخش تحلیل‌های توانایی مکانیکی، مرزهای شتاب و سرعت، استخراج شده است. در رابطه (۱۵-۵) مرزهای شتاب دورانی و خطی نقطه میانی به نمایش درآمده است.

$$\left[\begin{array}{l} \| |E_v| \| |\dot{v}_c| + \| |E_\omega| \| |\dot{\omega}_c| + \| |g| \| \\ \| |E_v| \| |\dot{v}_c| + \| |E_\omega| \| |\dot{\omega}_c| + \| |g| \| \end{array} \right] \leq \begin{bmatrix} \tau_{up} \\ -\tau_{low} \end{bmatrix} \quad (15-5)$$

در بخش شبیه‌سازی، مسیر مورد بررسی به گونه‌ای طراحی می‌گردد؛ که ملاحظات توانایی مکانیکی در آن منظور گردد.

۵-۵ طراحی مسیر برای چرخ قلاب

یکی از دشوارترین مراحل طراحی مسیر، طراحی مسیر برای کارکرد چرخ قلاب است. این طراحی مسیر دارای ملاحظات و مرحله‌بندی فراوان است. مرزهای شتاب با توجه به معادلات توانایی دینامیکی محدود می‌گردد و نیروهای عمودی نیز همچنین. در ابتدا یک مانع به ارتفاع مطلوب تعریف می‌شود. و ربات تا پای آن مانع با مد کاری چهارچرخ می‌رود (شکل ۴-۵ الف). در ادامه ربات با استفاده از پاهای عقب و چرخش چرخ‌های جلو، از بدنه مانع بالا می‌رود (شکل ۴-۵ ب). سپس ربات با استفاده از پاهای جلو، در قسمت بالایی مانع یک حالت قلاب مانند برای کشیده شدن به بالا ایجاد می‌کند (شکل ۴-۵ ج). در مرحله نهایی، ربات خود را بر روی مانع قرار می‌دهد.



شکل ۴-۵ چیرگی بر مانع در کارکرد چرخ قلاب

متغیر قابل تغییر مسیر، زمان انتهای یک حرکت است. در این صورت، با در نظر گرفتن یک زمان ابتدایی برای طی مسیر، اهداف مورد نظر بررسی می‌شوند. رابطه (۴-۵) فرایند بیان معادله

دینامیک نسبت به فضای کار و تبدیل آن به معادله‌ای که متغیر پارامترهای سینماتیک و تابع پارامترهای دینامیک باشند؛ است.

$$\begin{cases} E\ddot{\psi} + D\dot{\psi} + g + J^T R_e F = G\tau \\ \psi \in R^{9 \times 1}, E = H(J^T R_e)^{-1} \in R^{10 \times 9} \\ D = H(J^T R_e)^{-1} (J^T \dot{R}_e) \in R^{10 \times 9} \\ E\ddot{\psi} + D\dot{\psi} + g = [-J^T R_e \quad G][F \quad \tau]^T \end{cases} \quad (16-5)$$

در رابطه (16-5)، ده شتاب معلوم و شانزده نیرو و گشتاور مجهول وجود دارد. در این معادله، تعداد مجهولات بیش از معادلات است. در نتیجه مقادیری از مجهولات به صورت پیش فرض باید مشخص باشند. در دنیای کنترل، تنها گشتاورها تحت کنترل هستند. در این میان، سه گشتاور نقاط انتهایی برابر صفر فرض می‌گردند. با این فرض تعداد مجهولات به سیزده کاهش می‌یابد. سه مجهول دیگر نیز برای به دست آوردن پاسخ منحصر به فرد نیاز است. سه نیروی عمودی را اعدادی بیش از صفر فرض می‌کنیم. با این کار هم تعداد مجهولات کاهش می‌یابد و هم شرایط تماس کامل با زمین در هر سه نقطه برخورد فراهم می‌گردد. با این فرض، سه نیروی مماسی و هفت گشتاور، ده مجهول معادله هستند. برای جدا کردن نیروهای عمودی و گشتاور انتها، نخست معادله دینامیک رابطه (16-5) به معادله (17-5) ساده می‌شود.

$$\begin{cases} E\ddot{\psi} + D\dot{\psi} + g + J_n F_n + J_t F_t + J_\tau F_\tau = G\tau \\ J_n = J^T R_e \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\ J_t = J^T R_e \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \\ J_\tau = J^T R_e \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \\ F_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} F \\ F_t = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} F \\ F_\tau = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} F \end{cases} \quad (17-5)$$

با توجه به رابطه (۵-۱۶) و (۵-۱۷)، حال معادله را با توجه به شرایط تماس، بازنویسی می‌کنیم. این بدان معناست که؛ اگر عضوی در تماس با زمین نیست، نباید نیروهای آن در معادلات وارد شوند. این فرایند را آقای بولینگ، معادلات تقید^۱ نامیده است [۷۰]. به این منظور ابتدا ماتریس تقید^۲ را تعریف می‌کنیم. به این منظور رابطه (۵-۱۵)، بیان‌کننده ماتریس تقید است. اگر تعداد اعضای قابل تماس با محیط سه و تعداد اعضای در تماس با محیط برابر $n_c \leq 3$ باشد؛ ابعاد ماتریس برابر خواهد بود با $M_G \in R^{3 \times n_c}$ که M_G ماتریس تقید است. برای مثال اگر انتهای عضو اول و سوم در تماس باشد و عضو دوم در تماس نباشد؛ در نتیجه باید نیروهای عضو دوم از معادلات حذف گردد. در نتیجه M_G از رابطه (۳-۳۹) به دست می‌آید. با ضرب ماتریس به صورت رابطه (۵-۱۹)، معادلات تنها به نیروهایی محدود می‌شود که در واقعیت وجود دارند.

$$M_G = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(۵-۱۸)

$$\begin{cases} E\ddot{\psi} + D\dot{\psi} + g + J_{nG}F_{nG} + J_{tG}F_{tG} = G\tau \\ J_{nG} = J_n M_G^T \\ J_{tG} = J_t M_G^T \\ J_{\tau G} = J_\tau M_G^T \\ F_{nG} = M_G F_n \\ F_{tG} = M_G F_t \end{cases}$$

(۵-۱۹)

با توجه به رابطه (۵-۱۹)، نیروهای متناظر با اعضای معلق، خودبه‌خود از معادلات حذف می‌شوند. با توجه به معادلات نهایی، ابتدا باید از برخی ترم‌هایی که در فرض مسئله نادیده گرفته شده است، مانند گشتاور نقطه انتهایی، صرف‌نظر شود. در رابطه (۵-۲۰) این کار انجام شده است. حال تعداد مجهولات باقیمانده برابر است با $13 - 6 + 2n_c$ که ۱۳ تعداد کل مجهولات ممکن، ۶ تعداد کل نیروهای انتهایی ممکن و n_c تعداد اعضای در تماس با محیط است. اگر این عدد از تعداد معادلات

^۱ governing equations

^۲ governing

بیشتر باشد، نیاز به از پیش تعیین شدن برخی نیروها است. اما اگر این عدد از مجهولات کمتر باشد، به راحتی تمامی مجهولات به دست می‌آید. اگر ربات فقط بر روی دو پا در تماس با زمین باشد، ۱۱ مجهول و ده معادله وجود دارد که با فرض یک نیروی معلوم عمودی مثبت معلوم، معادلات و مجهولات هم اندازه شده و به راحتی حل می‌گردند. حال اگر هر سه عضو با زمین در تماس باشند، ۱۳ مجهول داریم که با فرض هر سه نیروی تماس مشخص؛ هم شرط تماس داریم با زمین بر قرار می‌گردد و هم معادلات و مجهولات هم تعداد می‌شوند. در کل به وسیله این روش، فضای پوچی معادلات، با نیروها و یا گشتاورهای معلوم، پر می‌گردد [۷۱].

اگر پس از به دست آوردن گشتاورها و نیروهای مجهول، گشتاور بیرون از مرز توانایی موتورها و نیروی تماسی منفی و شرط لغزش بر قرار بود باید مجهولاتی که از پیش تعیین می‌شوند؛ تغییر کنند؛ تا شرایط مورد نظر بر قرار شود. رابطه (۵-۲۰)، نیروها و گشتاورهای مجهول را در نقش تابع پارامترهای سینماتیک و نیروهای معلوم قرار می‌دهد. رابطه (۵-۲۰) برای شرایطی است که مجهولات کمتر از معلوم‌ها باشد و یا برابر آن‌ها گردند.

$$\begin{cases} E\dot{\psi} + D\dot{\psi} + g + J_{nG}F_{nG} + J_{tG}F_{tG} = G\tau \\ [F_{nG} \ F_{tG} \ \tau]^T = [-J_{nG} \ -J_{tG} \ G]^{\dagger} (E\dot{\psi} + D\dot{\psi} + g) \\ F_{nG} \in R^{n_c \times 1}, F_{tG} \in R^{n_c \times 1}, \tau \in R^{7 \times 1} \\ (E\dot{\psi} + D\dot{\psi} + g) \in R^{10 \times 1}, [-J_{nG} \ -J_{tG} \ G]^{\dagger} \in R^{(2n_c+7) \times 10} \end{cases}$$

(۵-۲۰)

ولی اگر تعداد مجهولات بیش از معلوم‌ها باشد، ابتدا باید مجهولات را از هم جدا کنیم. این کار در رابطه (۵-۲۱) انجام شده است. هدف جداسازی نیروهای عمودی از یکدیگر است. این کار وابسته به ابعاد ماتریس گاورنینگ (تقید) است. در نتیجه معادله رابطه (۵-۲۲) به صورت نوعی استخراج می‌گردد. حال اگر سه نقطه تماس وجود داشته باشد، معادله به صورت رابطه (۵-۲۲) نوشته می‌شود. و اگر دو نقطه تماس موجود باشد، رابطه (۵-۲۳) بیان کننده معادله است.

$$E\dot{\psi} + D\dot{\psi} + g + J_{nG1}F_{nG1} + J_{nG2}F_{nG2} + J_{nG3}F_{nG3} + J_{tG}F_{tG} = G\tau$$

(۵-۲۱)

$$\left\{ \begin{array}{l} E\ddot{\psi} + D\dot{\psi} + g + J_{nG1}F_{nG1} + J_{nG2}F_{nG2} + J_{nG3}F_{nG3} + J_{tG}F_{tG} = G\tau \\ [F_{tG} \ \tau]^T = [-J_{tG} \ G]^{\dagger}(E\ddot{\psi} + D\dot{\psi} + g - J_{nG1}F_{nG1} - J_{nG2}F_{nG2} - J_{nG3}F_{nG3}) \\ F_{nGi} \in R^{1 \times 1}, F_{tG} \in R^{n_c \times 1}, \tau \in R^{7 \times 1} \\ (E\ddot{\psi} + D\dot{\psi} + g) \in R^{10 \times 1}, [-J_{tG} \ G]^{\dagger} \in R^{(n_c+7) \times 10} \end{array} \right. \quad (22-5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E\ddot{\psi} + D\dot{\psi} + g + J_{nG1}F_{nG1} + J_{nG2}F_{nG2} + J_{tG}F_{tG} = G\tau \\ [F_{nG1} \ F_{tG} \ \tau]^T = [-J_{nG1} \ -J_{tG} \ G]^{\dagger}(E\ddot{\psi} + D\dot{\psi} + g - J_{nG2}F_{nG2}) \\ F_{nGi} \in R^{1 \times 1}, F_{tG} \in R^{n_c \times 1}, \tau \in R^{7 \times 1} \\ (E\ddot{\psi} + D\dot{\psi} + g) \in R^{10 \times 1}, [-J_{nG1} \ -J_{tG} \ G]^{\dagger} \in R^{(2n_c+7) \times 10} \end{array} \right. \quad (23-5)$$

اگر مدل تماس بر روی ربات اعمال شود، دیگر نیروهای عمودی، مجهولات مسئله نخواهند بود. دلیل این امر مشخص بودن این نیروها با تماس آنها با سطح است. در فصل ۳ گفته شد؛ که می‌توان برخورد با سطح را به صورت یک فنر نمونه کرد. این فنر که به خاطر خاصیت الاستیک سطح در تماس با ربات به وجود می‌آید؛ متناسب با میزان فرورفتگی^۱ ربات در سطح، نیرو ایجاد می‌کند. از این رو نیروی عمودی در هر لحظه مشخص خواهد بود. با فرض تماس با زمین در حالت الاستیک، تنها نیروهای مماسی و گشتاور موتورها مجهول می‌باشند. اگر ربات بیش از سه نقطه تماس با محیط (در تماس با بازو، مرکز ربات و منحنی چرخ‌ها) داشته باشد. مجهولات افزایش می‌یابند. باید تا رساندن مجهولات به عدد ده، از تعداد آنها کاست. یکی از فرض‌های کارساز، مشخص بودن گشتاورها در هر لحظه است. این یک امر بدیهی است که در دنیای واقعی ابتدا بر روی موتورها گشتاور مشخص اعمال می‌گردد، سپس حرکت اعضا و نیروهای تماسی تغییر می‌کند. در نتیجه هر هفت گشتاور مشخص فرض می‌شوند. تنها مجهول معادلات نیروی تماس با سطح است. یکی دیگر از فرض‌ها این است که؛ اگر نقطه‌ای که بر روی یک عضو با سطح قرار دارد و با محیط هم در تماس است، بلغزد این به معنای لغزش دیگر نقاط نیز که بر روی آن عضو با سطح در آن محدوده در تماس‌اند نیز می‌باشد. با این فرض، نیروهای مماسی بر روی هر سطح یا کاملاً به واسطه نیروهای عمودی مشخص می‌شوند (فرض لغزش).

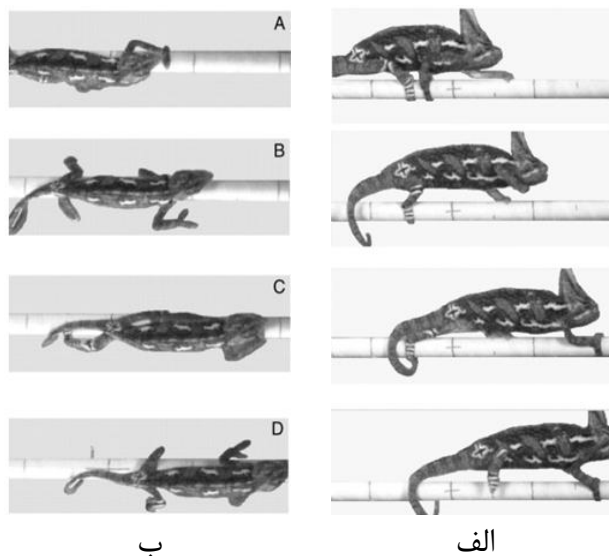
^۱penetration

۵-۶ طراحی مسیر برای پا دار

در فرایند طراحی حرکت برای کارکرد پا، گامزنی موجودات زنده بهره گرفته شده است. در این گامزنی، خرچنگ، آفتاب پرست و مارمولک به عنوان سه مورد مقایسه انتخاب شده‌اند؛ و در نهایت با بهره گیری از حرکات شبه طبیعی، یک فرایند گامزنی چند جهته به دست می‌آید.

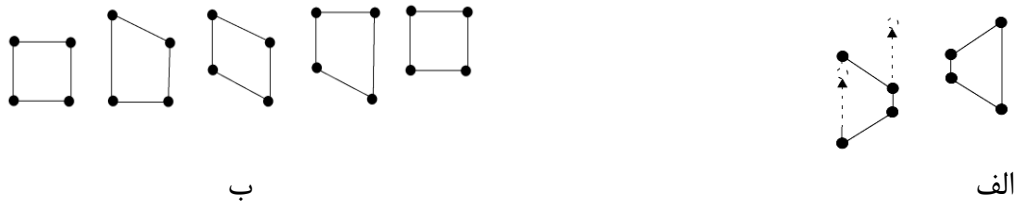
۵-۷ مروری بر حرکت چند پایان در طبیعت

با توجه به ساختار ربات موجود، توانایی گام زنی برای آن فراهم شده است. ولی در این ربات و ربات‌هایی با ساختار پیش رو با استفاده از فرایند سینماتیک مناسب که از روی حرکت موجودات زنده الهام گرفته شده است، به راحتی می‌توان حرکاتی فراتر از حرکات موجود در ربات‌های چهار پا را فراهم آورد. در ربات‌های چهار پا اغلب حرکت یک جهت در جریان است. این بدان معناست؛ که ربات‌های چهار پا، برای حرکت در جهتی متفاوت از جهت روبه جلوی ربات، نیازمند تغییر جهت بدنه هستند. این نوع حرکت در خزندگان همچون مارمولک و آفتاب پرست مشاهده می‌شود. شکل ۵-۵ نوع گام زنی یک آفتاب پرست را نشان می‌دهد. در این نوع گام زنی جهت‌گیری رو به جلو است.



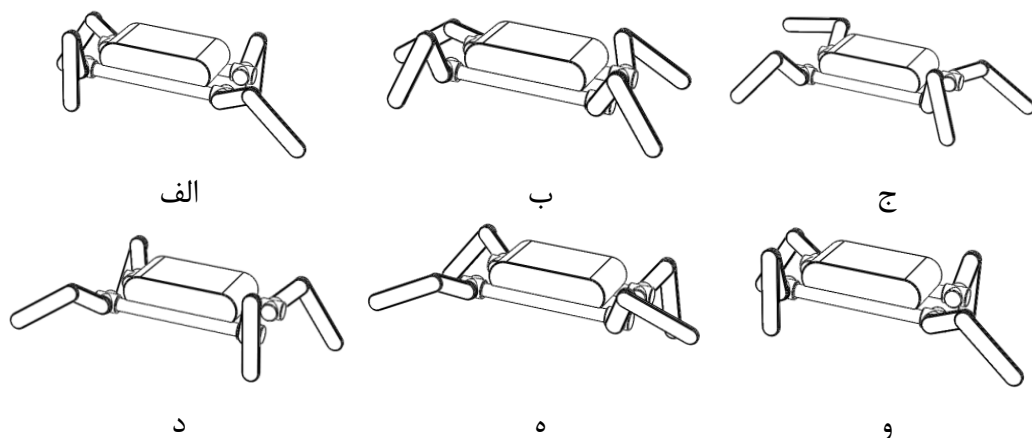
شکل ۵-۵ حرکت آفتاب پرست [۵]

در گام زنی رو به جلو، موجوداتی همانند مارمولک در دو مرحله و موجوداتی همانند آفتاب‌پرست در چهار مرحله گام زنی می‌کنند. نوع شماتیک گام زنی این دو موجود در شکل ۵-۶ نشان داده شده است.



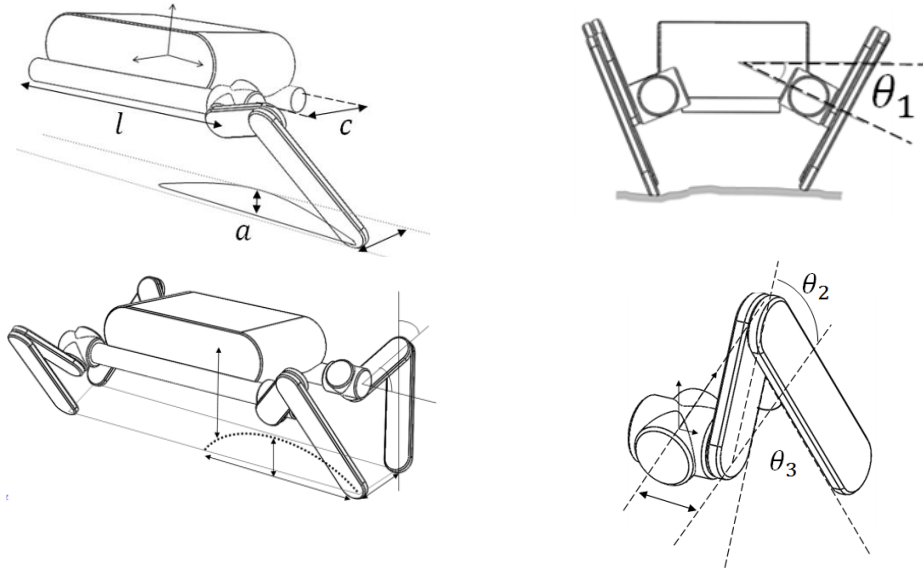
شکل ۵-۶ الگوریتم گام زنی

در قسمت اول گام زنی مارمولک و در قسمت دوم گام زنی آفتاب‌پرست نمایش داده شده است. حرکات خزندگان تند رو بیشتر بر مبنای پرتاب عضو رو به جلو و در خزندگان کند رو بیشتر حرکات تماماً کنترلی می‌باشند. در مورد آفتاب‌پرست معمولاً حرکات در سه بعد، می‌توانند به حرکات در دو بعد ساده شوند؛ و پا رو به بیرون بدنه حرکت نمی‌کند؛ ولی در مورد مارمولک حرکات در سه بعد انجام می‌گیرد به گونه‌ای که پا از طرف جانب نیز از بدنه موجود فاصله می‌گیرد. در جدول زیر الگوریتم گام زنی یک طرفه برای آفتاب‌پرست نشان داده شده است. البته در شکل ۵-۷، نمایش حرکت بر روی ربات انجام گرفته است؛ و با حفظ حرکت در دو بعد، با افزایش مراحل به شش مرحله، درک حرکت آسانتر گردد.



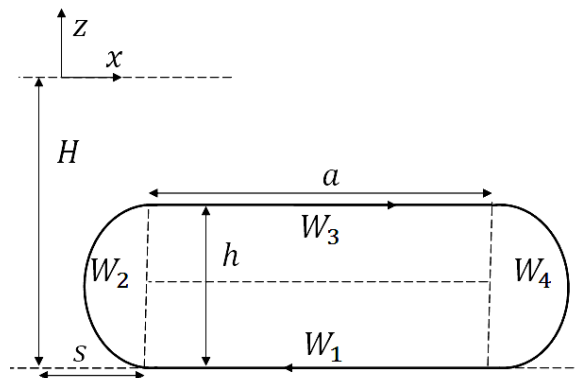
شکل ۵-۷ گام زنی آفتاب‌پرست

برای انتخاب نوع گام زنی بهتر که توسط آفتاب‌پرست و مارمولک انجام می‌شود؛ نیازمند شبیه‌سازی گام زنی بر روی یک مسیر خاص می‌باشیم. به این منظور در ابتدا پارامترهای گام زنی در شکل ۸-۵ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۸-۵ پارامترهای سینماتیک گام زنی

با توجه به فرایند گام زنی، برای مسیر انتهایی پا در گام زنی نسبت به نقطه اتصال پا به بدنه، مسیر شکل ۹-۵ در نظر گرفته شده است.



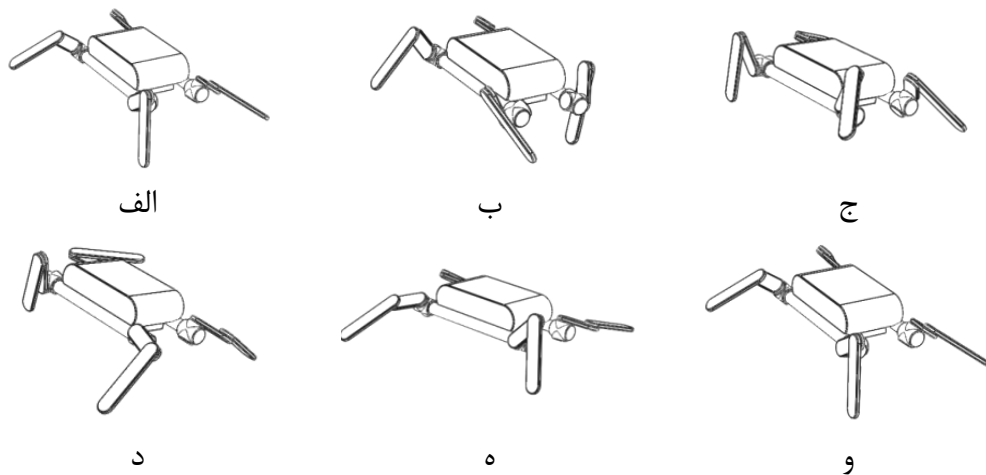
شکل ۹-۵ مسیر مناسب گام زنی

بنا بر هر قسمت از چهار بخش مسیر، سه چندجمله‌ای در سه راستای کارتیزین طراحی می‌شود؛ که هر کدام از این چندجمله‌ای‌ها باید شرایط زیر را فراهم کنند، پا به سطح زمین می‌رسد سرعت عمودی \dot{z} باشد تا برخوردی صورت نگیرد. زمان معلق بودن هر پا نباید بیش از زمانی

باشد که پای دیگر به حالت تعلیق می‌رود. گام زنی در جهت لاگاهی وجود دارد (در بررسی گام زنی مارمولک) و گاهی وجود ندارد (بررسی حرکت آفتاب‌پرست).

۵-۸ پیشنهاد گام زنی جانبی

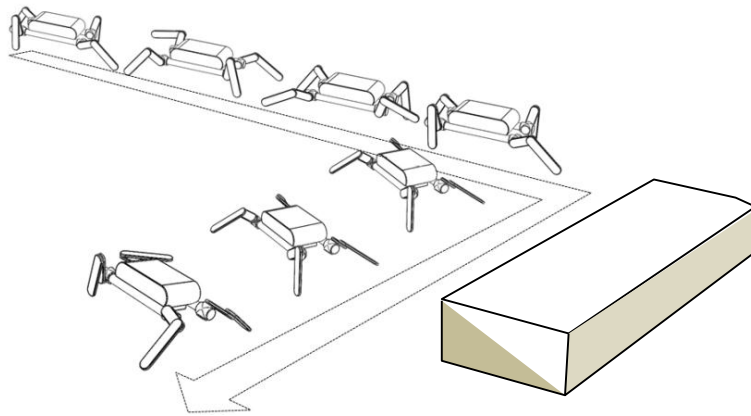
اگر حرکات خرچنگ بررسی شود، خرچنگ می‌تواند بدون تغییر جهت در بدنه در دو جهت حرکت کند. به این نوع حرکت، حرکت چند جهت گفته می‌شود. اگر بتوان گام زنی جانبی را بر روی بدنه روتوپود^۱ اعمال نمود؛ در هنگام حرکات جانبی دیگر نیازی به دور زدن نیست و ربات می‌تواند در هر جهت مطلوب، بدون چرخش در بدنه، حرکت کند. در بخش شبیه‌سازی حرکت در جهات عمود بر هم به صورت ترکیبی در نظر گرفته شده است. در شکل ۵-۱۰ حرکت جانبی بدنه در حالت گام زنی خرچنگ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰ گام زنی خرچنگ

با ترکیب دو حرکت آفتاب‌پرست و خرچنگ، به یک الگوریتم حرکت چند جهت بدون نیاز به دوران در بدنه می‌رسیم. این نحوه حرکت، به صورت شماتیک در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود؛ ربات بدون نیاز به هیچ‌گونه پیچشی در بدنه، می‌تواند؛ در امتداد مانع حرکتی در جهتی متفاوت را کنترل کند.

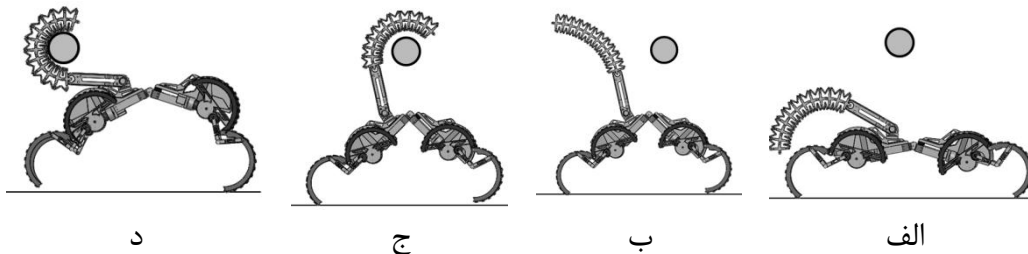
^۱ROTOPOD



شکل ۵-۱۱ روباترویی با مانع و تغییر مسیر جانبی

۵-۹ طراحی مسیر ربات سری موازی

روتوپود می‌تواند در کارکرد سری موازی نیز ایفای نقش کند. بازوی ساختار پیوسته در این حالت می‌تواند در گرفتن یک جسم ایفای نقش کند. شکل ۵-۱۲، نشان‌دهنده این فرایند است. در ابتدا بازو شعاع انحنای خود را به مقداری بیش از نصف قطر جسم می‌رساند. سپس مرکز انحنای خود را به سمت جسم می‌برد؛ در حالی که دهانه بازو به سمت جسم باشد. در این پس از نزدیک شدن دهانه به مقدار مطلوب به جسم؛ شعاع انحنا تا رسیدن بازو به جسم کاهش می‌یابد.



شکل ۵-۱۲ الگوریتم نوعی گرفتن جسم خارجی

در این کارکرد، اهداف ماتریس کنترل در فضای کار (اشاره شده در فصل سینماتیک)، مرکز انحنای بازوی ساختار پیوسته، جهت دهانه بازو، شعاع انحنای بازو، است. و با این فرض انجام می‌شود که ربات به حالت چرخ دار نخواهد رفت. به عبارتی انتهای پا بر زمین ثابت خواهد بود. حل سینماتیک معکوس با این اهداف، چند جواب خواهد داشت. برای آنکه روتوپود توان پیمایش و حرکت

قابل قبول را داشته باشد؛ دو معیار باید در محاسبات توانایی دینامیکی^۱ به کار گرفته شود که یکی از این معیارها، معیار پیشنهادی پایداری استاتیک است و دیگری معیار عدم لغزش. با در نظر گرفتن این دو معیار مرزهای توانایی ربات با توجه به پایداری و ثبات به دست می‌آید.

$$E\ddot{\psi} + D\dot{\psi} + g + J_{nn}F_{nn} + J_{nt}F_{nt} + J_{rn}F_{rn} + J_{rt}F_{rt} + J_{fn}F_{fn} + J_{ft}F_{ft} = G\tau \quad (24-5)$$

با توجه به اینکه در حرکت سری موازی، سرعت انتهای چرخ‌ها صفر است؛ در نتیجه معادله (24-5)، باید به تفکیک کامل، در پارامترهای سرعت بیان گردد. معادلات توانایی بر مبنای بیشینه گشتاور موتورها و متغیرهای شتاب‌های انتهای لینک‌ها و نیروهای انتهای آن‌ها به دست می‌آید.

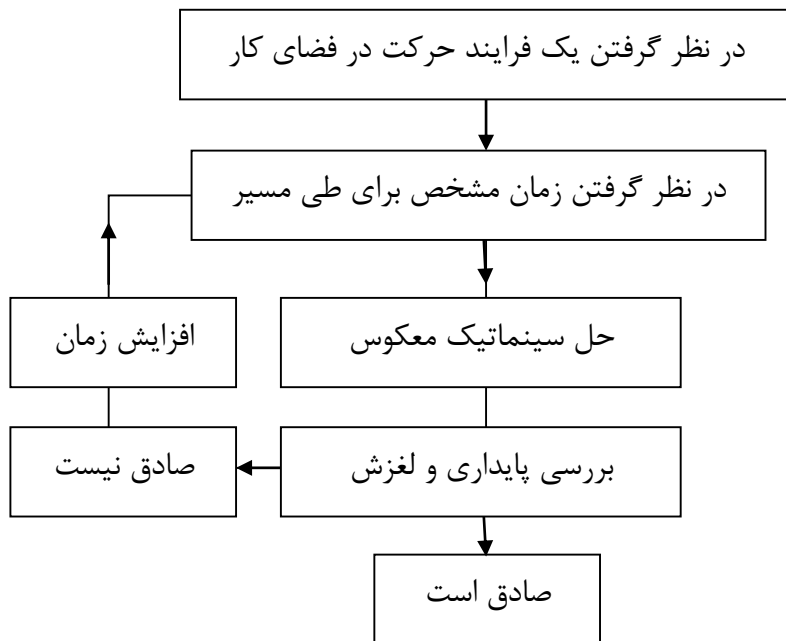
$$E_{fr}\ddot{\omega}_f + E_{rr}\ddot{\omega}_r + E_{nr}\ddot{\omega}_n + E_{nl}\ddot{v}_n + D\dot{\psi} + g + J_{nn}F_{nn} + J_{nt}F_{nt} + J_{rn}F_{rn} + J_{rt}F_{rt} + J_{fn}F_{fn} + J_{ft}F_{ft} = G\tau \quad (25-5)$$

با این فرض که نیروی هر نقطه تماس به محیط، باید شرایط عدم لغزش را داشته باشد؛ در نهایت معادلات توانایی به گونه‌ای شکل می‌گیرد که این شرایط در آن‌ها حاکم باشد. اگر بخواهیم بهترین شرایط را داشته باشیم؛ به گونه‌ای که پایداری و عدم لغزش به وجود آید. مرکز پایداری را در معادلات وارد می‌کنیم، که طی آن، پارامتر پایداری در یک بازه مناسب قرار می‌گردد. در نمودار نهایی با حذف فضاهایی که لغزش را شامل می‌شوند؛ شرایط عدم لغزش را هم فراهم می‌کنیم.

باید در نظر گرفت که میزان نیروی عمودی برداشت، به وسیله گیره دانه ریز، آن‌گونه که از آزمایش‌ها عملی محاسبه می‌شود؛ در معادلات توانایی جایگزین می‌گردد. در طراحی مسیر، می‌توان از الگوریتم زیر که یک حلقه بهینه‌ساز بر مبنای قیود گشتاور موتور و لغزش است، استفاده کرد. این طراحی مسیر معین می‌کند، که جابجایی یک نقطه در صفحه باید چگونه باشد. در هر نقطه از مکان باید بیشینه شتاب‌ها که از نمودارهای توانایی به دست می‌آید. در نظر گرفته شود. این بدان معناست که روی یک مسیر مشخص، سینماتیک معکوس حل می‌گردد و در هر

^۱ Dynamic capability equation

نقطه از آن معادلات توانایی بررسی می‌گردند. مسیر مورد نظر دارای شتاب و سرعت مشخصی نسبت به زمان است. در نتیجه با به دست آوردن زمان کمینه می‌توان در مرزهای قیود و روی مکان مطلوب حرکت کرد. دیاگرام شکل ۵-۱۳ بیان‌کننده این موضوع است.



شکل ۵-۱۳ دیاگرام طراحی مسیر بهینه و پایدار

فصل هشتم: ساخت و شیشه سازی

۱-۶ دیباچه

در این بخش، بهینه‌سازی‌ها با استفاده از الگوریتم‌های تکراری و معیارهای ذکر شده در فصل ۵، انجام می‌گیرد. در ادامه به بررسی برخی کارکردهای ساختار که نیاز به کنترل و استفاده از کنترلرهای پیشرفته دارد، به وسیله نرم‌افزارهای شبیه‌ساز دینامیکی پرداخته شده است. مشخصات سینماتیک و دینامیک ربات در پیوست به طور کلی آورده شده است.

۲-۶ مقدار دهی پارامترها

در جدول ۱-۶ مقادیر پارامترهای دینامیک و سینماتیک نشان داده شده‌اند.

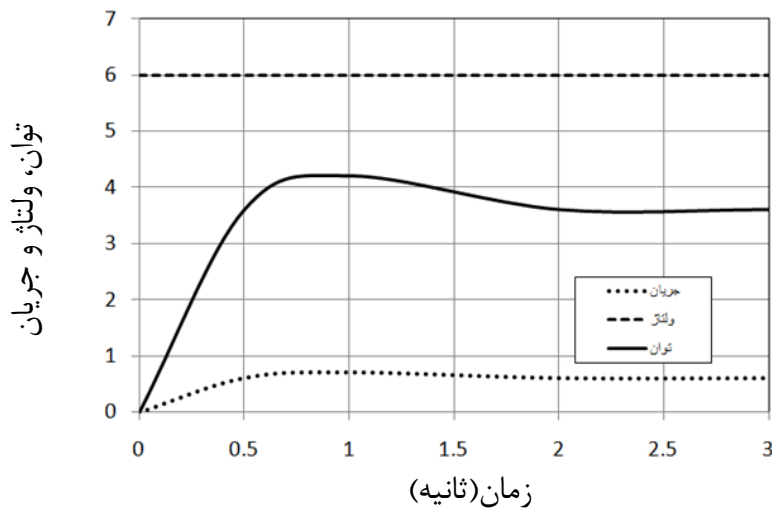
جدول ۱-۶. مقدار دهی پارامترهای سینماتیک و دینامیک

پارامتر	مقدار
شعاع چرخ جلو و عقب	۲۰ سانتی متر
طول پل جلو و عقب	۵۰ سانتی متر
عرض پل جلو	۶۰ سانتی متر
عرض پل عقب	۳۰ سانتی متر
طول لینک اول بازو	۵۰ سانتی متر
طول هر مهره	۳ سانتی متر
عرض هر مهره	۳ سانتی متر
تعداد مهره‌ها	۱۲ عدد
وزن چرخ جلو و عقب	۵۰۰ گرم
وزن هر پل با تجهیزات	۴ کیلوگرم
وزن لینک اول بازو	۵۰۰ گرم
وزن هر مهره	۴۰ گرم
وزن گیره	۳۰۰ گرم
اینرسی چرخ جلو و عقب	۰,۲ کیلوگرم در مجذور متر
اینرسی هر پل با تجهیزات	۱,۱ کیلوگرم در مجذور متر
اینرسی لینک اول بازو	۰,۲۵ کیلوگرم در مجذور متر
اینرسی هر مهره	۰,۰۳ کیلوگرم در مجذور متر
اینرسی گیره	۰,۱ کیلوگرم در مجذور متر

۳-۶ ساخت و داده برداری پا

۱-۳-۶ کارکرد چرخ

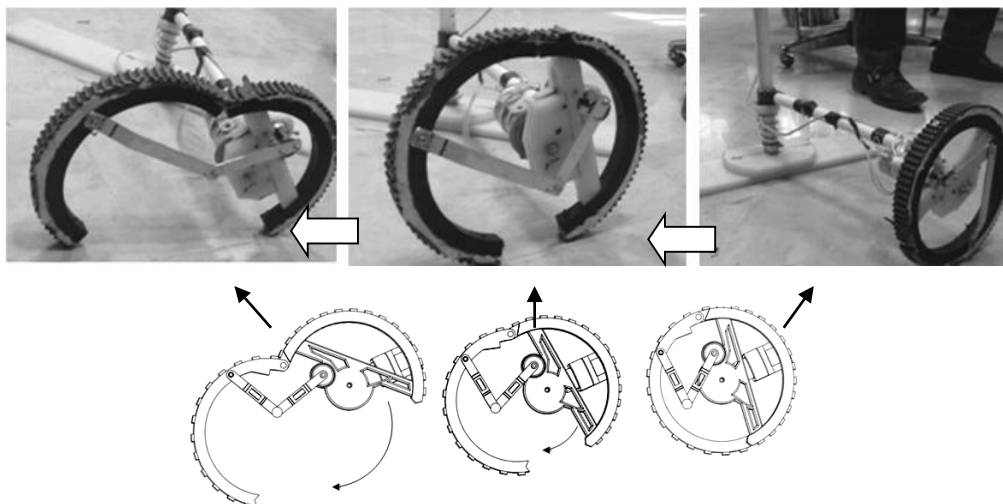
کارکرد چرخ در حرکت چرخ حول محور عمودی انجام می‌گیرد. در این حالت موتور دوم فعال و در حالت چرخش و موتور سوم فعال و در حالت لینک بسته قرار می‌گیرد (شکل ۲-۵ ساده‌سازی شماتیک پا). نمودار توان این موتور بنا بر مشاهدات ولتاژ جریان در شکل ۱-۶ آورده شده است.



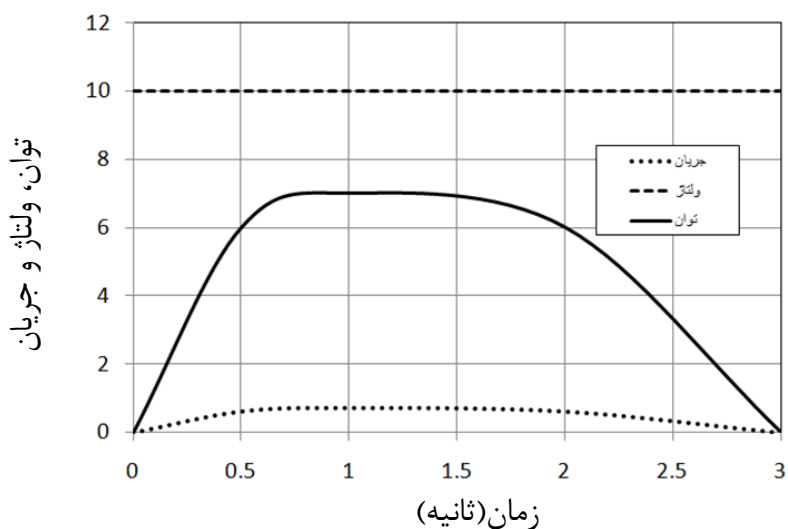
شکل ۱-۶ پارامترهای آزمایش کارکرد چرخ برای موتور اول

۲-۳-۶ کارکرد پا

برای سنجش توانایی پای ساخته شده، دو آزمایش مطرح شده است. یکی آزمایش باز شدن کامل و دیگری آزمایش قلاب شدن. در آزمایش گشایش پا، چرخ به تدریج باز می‌گردد؛ که نتیجه آن در شکل ۲-۶ نمایش داده شده است. نتیجه توان موتور دوم در شکل ۳-۶ آورده شده است.

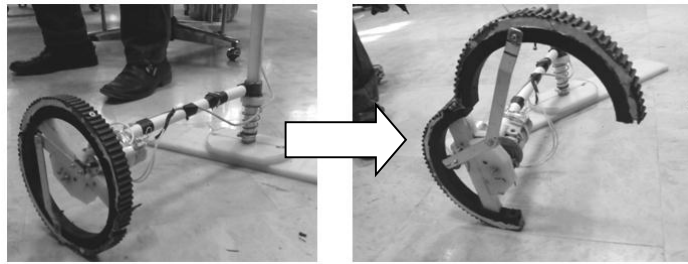


شکل ۲-۶ نمونه پا در هنگام باز شدن

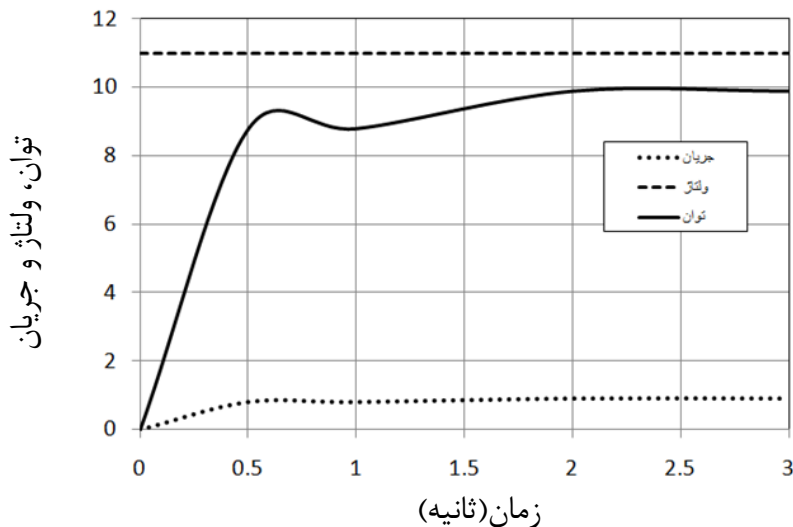


شکل ۳-۶ پارامترهای کارکرد پا برای موتور اول

در آزمایش سوم، چرخ به صورت یک قلاب در می‌آید که این حالت در پیمایش شیب‌های تند با ناهمواری‌های سنگلاخ کاربرد زیادی پیدا می‌کند. در بالا رفتن از تنظیم ارتفاع هم این حالت کاربرد دارد؛ که در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. نتیجه توان آن در شکل ۵-۶ آورده شده است.



شکل ۴-۶ کارکرد باز شدن قلاب



شکل ۵-۶ پارامترهای دینامیک قلاب

۴-۶ ساخت و داده برداری گیره

۴-۶-۱ آزمایش سنجش تأثیر هندسه بر موفقیت برداشت.

در این آزمایش، هندسه‌های گوناگون، تقسیم‌بندی شده‌اند. نمونه‌هایی در هر گروه انتخاب شده و از هر نمونه ۱۰ بار آزمایش گرفته شده است تا موفقیت بر مبنای هندسه به دست آید. در اینجا سطح دید از بالا و از کنار در نظر گرفته شده است؛ و هر کدام بر مبنای شکل تصویر شده از بالا و کنار از نظر موفقیت بررسی شده‌اند. در نهایت به هر کدام از تقسیم‌بندی‌های هندسه، نمره‌ای داده شده که نشان‌دهنده تعداد دفعاتی است که این جسم با موفقیت گرفته شده است. با ضرب اعداد مربوطه در هم، پارامتری به نام پارامتر شکل برای حجم نمونه به دست می‌آید که نمره بالاتر، نشانگر احتمال موفقیت بیشتر است. شکل ۴-۶ گزارش نتایج آزمایش‌ها است. آزمایش‌ها با گیره بدون بالن جانبی انجام شده است. دلیل این کار نیاز به بررسی نتایج برداشت بدون توجه به

امکانات اضافه شده است. تأثیر بالن جانبی در ادامه بررسی خواهد شد که آن هم به صورت مستقل انجام می‌گیرد. مفهوم اعداد این جدول رابطه مستقیمی با موفقیت دارد. به طور مثال در ستون و سطر اول عدد یک قرار گرفته که نشان‌دهنده آن است؛ که این نوع هندسه از جانب نمره‌ی یک و از بالا نیز همین نمره را می‌گیرد. به عبارتی از هر ده آزمایش که بر روی جسمی با این هندسه جانبی انجام شده فقط یک آزمایش موفق بوده و ده آزمایش هم بر روی جسمی با همین هندسه این بار از بالا انجام شده است؛ که آن هم از هر ده آزمایش یک موفقیت داشته است. عدد کلی که نشان‌دهنده موفقیت هندسی برداشت است، با ضرب این دو عدد به دست آمده است.

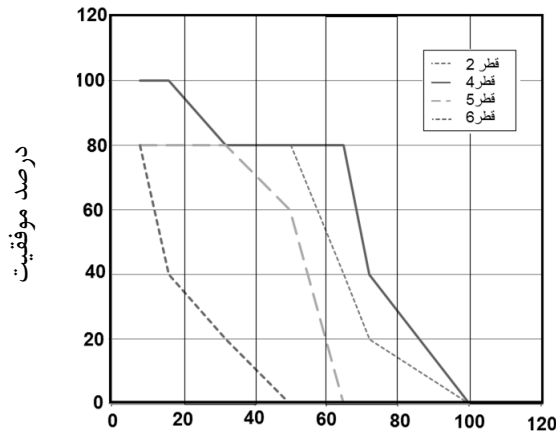
		دید بالا		2	3	4	5	6	7	8	9	10
دید کنار		دید از کنار										
1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
2		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	
3		3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	
4		4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	
5		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
6		6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	
7		7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	
8		8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	
9		9	18	27	36	45	54	63	72	81	90	
10		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	

شکل ۶-۶ نمره دهی تأثیر هندسی

۶-۴-۲ آزمایش سنجش تأثیر قطر بالن بر موفقیت برداشت

در این آزمایش، نمونه‌ها، با هندسه‌های متفاوت، با بالن‌هایی به قطرهای مختلف برداشته شده‌اند. این آزمایش بر روی نمونه‌های هندسی مختلف، از جمله خانواده پیچ‌ها، بوش‌ها، سنگ‌های متوسط، اجسام با ساختار ناهمگون، اجسام کروی و استوانه‌ای و اجسام مسطح انجام شد؛ و درصد موفقیت در هر کدام از آزمایش‌ها بر مبنای درصد قطر نمونه به بالن، مد نظر قرار گرفت. نتیجه

این آزمایش در شکل ۶-۷ آورده شده و مشاهده می‌شود که درصد موفقیت کل، با بالا رفتن قطر بالن افزایش می‌یابد. این مورد می‌تواند مشخصات دقیق‌تری از گیره رباتیکی در این مقاله ارائه بدهد.



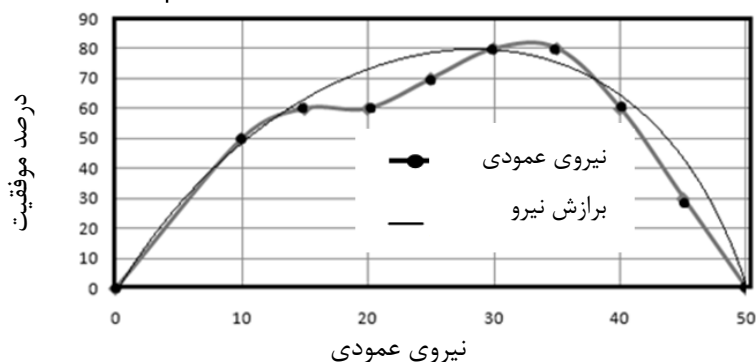
شکل ۶-۷ درصد موفقیت بر مبنای نسبت قطر قطر نمونه بر قطر بالن اصلی گیره بر حسب درصد

دلیل اینکه قطر چهار، در شکل به درصد کامل رسیده است و بقیه نرسیده‌اند، این است که زمان مکش برای همه بالن‌ها مشابه در نظر گرفته شده است، در صورتی که با افزایش قطر بالن‌ها، حجم آن‌ها و هوای موجود افزایش می‌یابد. مکش کامل برای بالن‌های بزرگ‌تر نیاز به زمان بیشتری دارد. با توجه به عدم دخالت زمان مکش در پارامترها و روابط، زمان برای همه برابر بوده که بالن با قطر چهار تمام هوای خود را از دست داده ولی قطرهای بالاتر این‌گونه نبوده‌اند. در نتیجه می‌توان این داده نمودار را به این خاطر نادیده گرفت. کاهش قطر گیره، از رابطه نمایی پیروی می‌کند. وابستگی پارامتر در موفقیت عملیات، به صورت رابطه (۶-۱) به دست می‌آید؛ که درصد موفقیت از میانگین درصدهای موفقیت هر قطر حاصل شده است.

$$S_{do} = 5.4 \times \sqrt[3]{D(e^{do} - 1)} \quad (۶-۱)$$

رابطه (۶-۱) نشان‌دهنده تأثیر نسبت قطر بالن D و نسبت قطر نمونه به قطر بالن اصلی (do) بدون دخالت بقیه پارامترها، بر درصد موفقیت است. مقادیر نمودارها بنا به قطر، در راستای افق

نمودار افزایش می‌یابد. این افزایش بر نمودار ریشه سوم منطبق است. به علاوه روی هر نمودار، مقدار نمودار بیشتر تابع نمایی از متغیر نسبت قطر است.



شکل ۶-۸ تأثیر نیروی عمودی بر موفقیت حمل نمونه استوانه‌ای

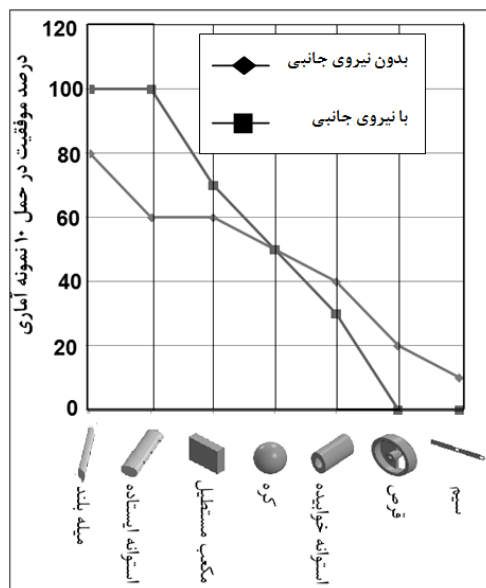
شکل ۶-۸ نشان‌دهنده آن است که نیروی عمودی تا جایی مفید است؛ که نمودار به نقطه حداکثر ۳۵ نیوتن خود برسد. رفتار نمودار غیرخطی است. دلیل غیرخطی بودن نمودار این است؛ که در صورت عدم وجود نیرو، هیچ گیرشی صورت نمی‌گیرد، ولی با افزایش نیرو گیرش انجام می‌گیرد. با افزایش نیرو، بالن دور جسم را به خوبی می‌گیرد؛ اما با افزایش بیش از حد نیروی عمودی، نیروی اصطکاک چنان بین بدنه و بالن زیاد می‌شود، که از حرکت پوسته بالن و جای گیری آن میان فضاها مناسب گیرش جلوگیری می‌کند. در نتیجه نمودار دارای یک حد بهینه کارکرد است؛ که خودبه‌خود به رفتار غیرخطی می‌انجامد. این نمودار به صورت چندجمله‌ای پیشنهاد می‌گردد؛ که در رابطه (۶-۲) بر اساس F_V نیروی عمودی نشان داده شده است.

$$S_{FV} = 0.03F_V^2 + 1.5F_V$$

(۶-۲)

۶-۴-۳ آزمایش سنجش تأثیر نیروی جانبی بر موفقیت برداشت

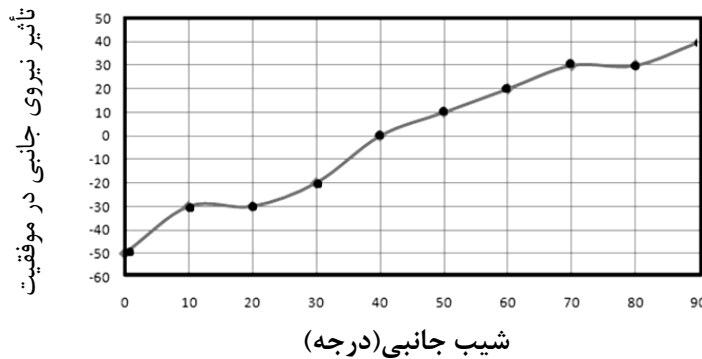
در این پژوهش تلاش شده تا نیروی جانبی، با استفاده از یک حلقه منبسط شونده به بالن اصلی وارد گردد. در این آزمایش، گیره به بالن جانبی مجهز شده و نمونه‌ها دوباره سنجیده می‌شوند. نتیجه این آزمایش، در نمودار موجود در شکل ۶-۹ ترسیم شده است.



شکل ۹-۶ مقایسه موفقیت بالن جانبی با بالن اصلی

شکل ۹-۶ بیان کننده این است؛ که بالن جانبی برای برخی هندسه‌ها مفید و برای برخی نامناسب است. در واقع هر چه نمونه بیشتر در عمق بالن اصلی فرو رود؛ اعمال نیروی جانبی نیز تأثیر بهتری بر عمل برداشت می‌گذارد. این نیروی جانبی برای اجسامی که هندسه کلی آن‌ها بیشتر کفه‌ای شکل است در مقایسه با اجسامی که شکل ایستاده‌تری دارند، نامناسب‌تر است. تأثیر نیروی جانبی به هندسه بستگی دارد و در رابطه نهایی به کار گرفته خواهد شد. نیروی به دست آمده در شکل ۹-۶ رابطه‌ای مستقیم با دید از کنار هندسه جسم، مطابق سطرهای شکل ۶-۶ دارد. در مواردی این نیرو نه تنها مثبت نیست، بلکه در رهايش جسم هم تأثیر دارد. آنچه به تأثیر بیشتر این نیرو کمک می‌کند، تغییرات حجمی بیشتر بالن است؛ که طبق [۲] ارتباطی همسان با تنش و نیروی گیرش دارد. در اینجا نیاز به تعریف پارامتری احساس می‌شود که شیب دید از کنار جسم را وارد مسئله کند. این شیب هر چه بیشتر باشد، نیروی جانبی تأثیرگذارتر است؛ و شیب کمتر باعث می‌شود که نیروی جانبی تأثیر منفی بیشتری بر درصد موفقیت عملیات برداشت، داشته باشد. برای مثال، این نیرو برای شیب روی کره تأثیر صفر دارد و اگر شیب جانبی دارای میانگین ۴۵ درجه باشد این نیرو تأثیری نخواهد داشت. رابطه‌ای بین پارامتر شیب جانبی، ضریب اصطکاک و نیروی جانبی مطابق شکل ۹-۶ برقرار است. اگر ضریب اصطکاک را ثابت فرض

کنیم، پارامتر شیب جانبی و نیروی جانبی طبق شکل ۶-۱۰ نسبت به هم تغییر می‌کنند. به گونه‌ای که در شیب ۴۵ درجه به پایین این تأثیر منفی خواهد بود. نمودار بیان‌کننده آزمایشی روی نمونه‌های شکل ۶-۹ است که با توجه به مقدار تأثیر نیروی جانبی در درصد موفقیت، صورت پذیرفته است.



شکل ۶-۱۰ میزان تأثیر شیب جانبی بر تأثیر نیروی جانبی روی موفقیت برداشت نمونه

تأثیر نیروی جانبی بر درصد موفقیت برداشت اجسام، به میزان شیب جانبی R وابسته است؛ که بایستی در رابطه نهایی محسوب شود. دلیل عدم موفقیت در شیب‌های پایین و منفی، ایجاد یک مؤلفه نیروی عمود بر سطح است؛ که سطح را رو به داخل خودش می‌فشرود. حال اگر شیب به گونه‌ای باشد؛ که مؤلفه نیرو در راستای جاذبه نیز مؤلفه‌ای پیدا کند، جسم به جای ماندن در گیره، میل به بیرون جهیدن پیدا می‌کند. نتایج شکل ۶-۱۰ در رابطه (۶-۳) آورده شده است.

$$\Delta S_{FH} = \frac{4}{5}R - 32$$

(۶-۳)

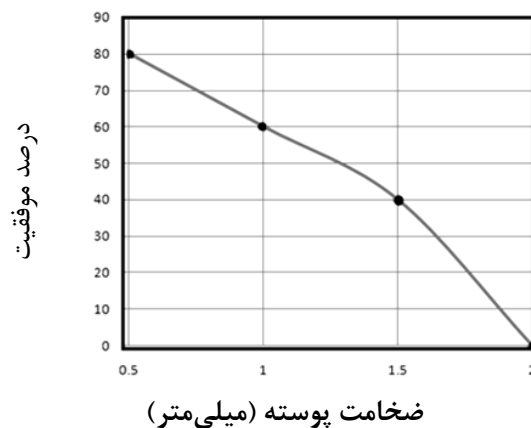
۶-۴-۴ آزمایش سنجش تأثیر قطر دانه‌ها بر موفقیت برداشت

یکی از عوامل مؤثر بر دقت برداشت، اندازه ریزدانه‌های موجود در بالن اصلی است. هرچه ذرات ریزتر باشند، برداشت راحت‌تر صورت می‌گیرد و جسم بهتر در بالن گرفتار می‌شود. درحالی‌که کوچک بودن بیش از حد دانه‌ها جدایش دانه‌ها از هم را در مرحله رهایی دشوارتر کرده و دستگاه

در مرحله نهایی کار دچار مشکل می‌گردد. از آنجا که اصولاً اندازه ذرات مواد دانه ریز، مورد نظر در این طرح نزدیک به هم در نظر گرفته شده است، می‌توان در اینجا از تأثیر این پارامتر در رابطه کلی صرف نظر کرد.

۵-۴-۶ آزمایش سنجش تأثیر ضخامت پوسته بر موفقیت برداشت

یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار، ضخامت پوسته کیسه اصلی است که برای گیرش از آن استفاده می‌شود. برای استخراج تأثیر این پارامتر، از چند پوسته با کشش‌های برابر و ترکیب آن‌ها برای داده برداری استفاده شده است. انتظار می‌رود که افزایش ضخامت تأثیری منفی داشته باشد و عملکرد گیرش را کاهش دهد. برای اعمال این پارامتر در رابطه نهایی چهار نمونه در چهار ضخامت مختلف آزمایش شده‌اند.



شکل ۱۱-۶ تأثیر ضخامت پوسته بر درصد موفقیت

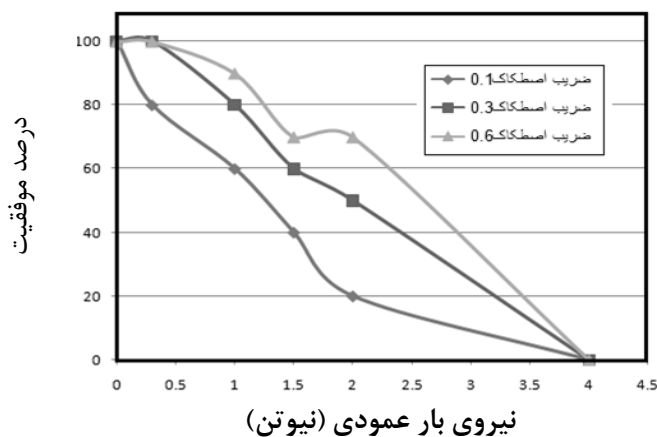
نمودار شکل ۱۱-۶ نشان‌دهنده درستی این فرضیه است که با افزایش ضخامت پوسته، موفقیت کاهش می‌یابد. چرا که با افزایش ضخامت پوسته، توان جای‌گیری پوسته در حفره‌ها و تو رفتگی‌ها که عاملی مهم در برداشت است کاهش می‌یابد. با یک برآزش مناسب، تابع چندجمله‌ای بر حسب ضخامت پوسته بالن L به دست آمده است.

$$S_L = -20L^2 - 2L + 85$$

(۴-۶)

۶-۴-۶ تأثیر پارامتر چگالی در توان برداشت

روشن است که با افزایش وزن، امکان موفقیت کاهش می‌یابد. در نتیجه برای یک نمونه در یک حجم ثابت هر چه چگالی بیشتر باشد امکان حمل کاهش می‌یابد. برای سنجش تأثیر وزن نمونه در درصد موفقیت، نمونه‌ای واحد با جرم ثابت، ولی با جرم‌های جانبی الحاق شده به انتهای آن، مورد آزمایش قرار گرفته است. یک استوانه ایستاده که هیچ گیرش دندان به دندان‌های با بالن ندارد، به عنوان نمونه آزمایش استاندارد انتخاب شد. ضریب اصطکاک خشک ایستایی بالن با نمونه هم، با آزمایش‌های جانبی معین شده است. برای سه ضریب اصطکاک، چهار وزن نمونه آزمایش گردید؛ تا نموداری بر مبنای نیروی بار عمودی و درصد موفقیت در گیرش به دست آید.



شکل ۶-۱۲ تأثیر ضریب اصطکاک و بار عمودی بر توان گیرش و حمل و درصد موفقیت

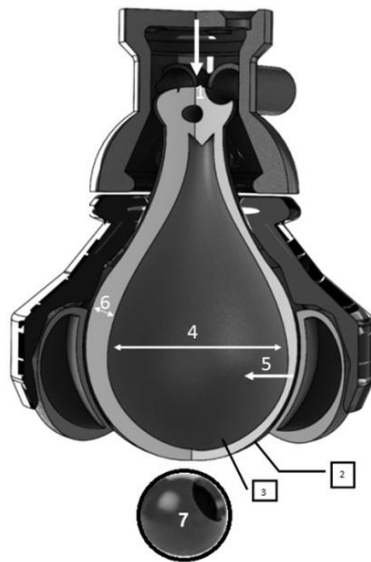
نمودار شکل ۶-۱۲ بیان‌کننده این موضوع است؛ که توانایی گیرش با نیروی عمودی رابطه مستقیمی دارد و ضریب اصطکاک در آن دخیل است. عدم موفقیت برداشت در ضرایب پایین اصطکاک، به این دلیل است که تأثیر نیروی جانبی در گیرش و برداشت جسم برای مقابله با نیروی جاذبه کاهش می‌یابد.

$$s_{fl} = -25\sqrt{f_l} + 200\mu f_h$$

(۵-۶)

۶-۴-۷ تدوین رابطه نهایی

آنچه از مجموعه آزمایش‌ها حاصل شد، تعیین نحوه ارتباط پارامترهای طراحی گیره بر فرایند برداشت است. نمودارهای حاصله می‌تواند مبنای استخراج مقادیر عددی برای روابط ریاضی باشد. هر کدام از روابط، دامنه‌ای از خطاها در گستره کاری گیره را ایجاد می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که رابطه نهایی، امکان طراحی را با تقریب مطلوبی فراهم آورده است. روابط با دقت برازش مطلوب انتخاب شده‌اند و به طراح کمک می‌کند تا تخمین صحیحی از عملکرد گیره بالنی رباتیک داشته باشد.



الف



ه



د



ج



ب

شکل ۶-۱۳ پارامترهای مؤثر در گیرش و حمل و نمونه ساخته شده. توضیحات شمارگان بخش (الف) در ادامه آورده شده است. ۱- نیروی عمودی، ۲- جنس و کشش پوسته، ۳- قطر ریزدانه‌ها، ۴- قطر پوسته، ۵- نیروی جانبی، ۶- ضخامت پوسته و ۷- مشخصات هندسی بار. (ب) مدل ساده ساخته شده، (ج) مدل ساده ابتدایی، (د) مدل با بالن جانبی و (ه) نحوه سنجش نیروی عمودی

پارامترهای مؤثر در قابلیت گیرش، در شکل ۶-۱۳، نمایش داده شده است. رابطه نهایی، برای احتمال موفقیت این گیره رباتیک، بر مبنای خروجی آزمایش‌ها قابل تدوین است. این رابطه به صورت رابطه (۶-۶) پیشنهاد می‌گردد:

$$S = \sqrt{\left(\sqrt[3]{(S_L \cdot S_{dO} \cdot S_{FV}) + \Delta S_{FH}^3} \right) \cdot H \cdot V} \cdot S_{fl} \quad (6-6)$$

در رابطه بالا S_L از رابطه (۶-۶) به دست آمده است که نشان‌دهنده تأثیر ضخامت پوسته بالن است. S_{dO} از رابطه (۶-۱) به دست آمده که نشانگر تأثیر قطر بالن بر موفقیت برداشت است. S_{FV} که نشان‌دهنده نیروی عمودی است از رابطه (۶-۲) به دست می‌آید. ΔS_{FH} که از رابطه (۶-۳) به دست می‌آید. تأثیر شیب جانبی نمونه را بر میزان تأثیر نیروی جانبی که در رابطه (۶-۴) آمده است بیان می‌کند در همین رابطه نیروی جانبی هم وارد شده است. $H \cdot V$ نیز بیان گر پارامتر برتری هندسی است که در شکل ۶-۶ آمده است. S_{fl} میزان تأثیر نیروی اصطکاک است که در رابطه (۶-۵) تشریح شده است. توجه شود که در میانه متن، دلیل عدم دخالت قطر ریزدانه‌ها در معادلات آورده شده است. بیشینه مقدار عددی حاصله از این فرمول، عدد ۱۰۰ است که نشان‌دهنده بالاترین درصد موفقیت گیرش محسوب می‌شود. عدم موفقیت قطعی نیز با مقدار حداقلی صفر بازگو می‌گردد.

۶-۴-۸ بررسی صحت رابطه (۶-۶) به وسیله نتایج موجود در مقالات دیگر

حال برای نشان دادن کارکرد فرمول، درصد موفقیت چند آزمایش، توسط مقالات مرجع بررسی می‌شود. برای نمونه با در نظر گرفتن تمام پارامترها طبق [17] با توجه به مقاله مورد نظر جسم کره را با جدایش خودبه‌خودی در نظر می‌گیریم. بنابراین طبق شکل ۷ منبع، نیرو ۱۰ نیوتن است. و نیروی جانبی را صفر در نظر می‌گیریم چون این نیروی جانبی به پژوهش پیش رو اختصاص دارد. بنابراین مقدار S_{FV} برابر با ۱۸ نیوتن است. با توجه به جنس به‌کاررفته برای کره قابل حمل که چوب است، وزن را ۱۰۰ گرم که برابر ۱ نیوتن است در نظر گرفته که در

نتیجه مقدار S_{fl} برابر با 25- است. با در نظر گرفتن ضخامت پوسته بالن برابر با ۱ میلی‌متر، S_L برابر با ۶۱ می‌شود. با در نظر گرفتن شیب متوسط نیم کره که برابر ۴۵ درجه است، ΔS_{FH} برابر است با ۴. فاصله جسم از گیره را که در [17] با پارامتر G نمایش داده‌اند، در این گمانه زنی برابر صفر است. قطر نمونه طبق توضیحات شکل چهارم بین ۵ تا ۳۸ میلی متر متغیر است. قطر بالن اصلی برابر با ۶ سانتی‌متر است و قطر آزمایشی نمونه در میانه گستره شعاع نمونه‌ها، یعنی ۲۰ میلی متر در نظر می‌گیریم. با این فرضیات، مقدار S_{do} برابر ۰,۴۲۱ است. چون جسم یک نیم کره است، پارامتر برتری هندسی که با نماد $H.V$ در رابطه (۶) آورده شده است، برابر است با ۴۹. در کل با جایگذاری این نتایج در رابطه (۶)، مقدار موفقیت برابر با ۸۲,۴۶۲٪ که در شکل ۶ مقاله قسمت ۶ مقاله قسمت b این مقدار برابر است با ۸۰ درصد. که بسیار به عدد به دست آمده نزدیک است.

جدول ۶-۲ مشخصات فرمول (۶)

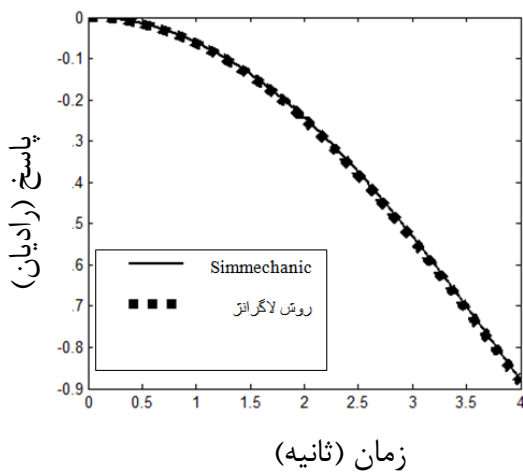
پارامتر	توضیح	واحد	پارامتر	توضیح	واحد
S	پارامتر موفقیت	-	f_v	نیروی عمودی	N
μ	ضریب اصطکاک ایستا	-	f_h	نیروی افقی	N
V	نمره هندسی دید از بالا	-	f_l	نیروی بار عمودی	N
H	نمره هندسی دید از کنار	-	S_L	تأثیر ضخامت پوسته	-
R	شیب جانبی	درجه	S_{do}	تأثیر قطر بالن	-
do	نسبت قطر نمونه	-	S_{FV}	تأثیر نیروی عمودی	-
D	قطر بالن	Cm	ΔS_{FH}	تأثیر شیب جانبی	-
$H.V$	پارامتر هندسی بار	-	-	-	-

۵-۶ راستی آزمایشی معادلات

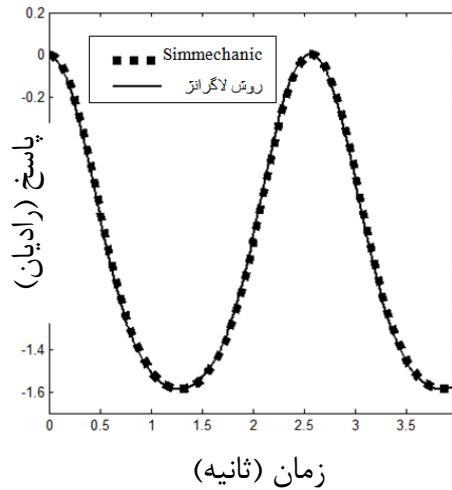
۱-۵-۶ راستی آزمایشی روش استخراج معادلات قسمت بازو

برای صحت سنجی از نرم‌افزار سیم مکانیک در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. نتایج راستی سنجی معادلات دینامیک در سه وضعیت بررسی شده است. یکی با اعمال گشتاور ثابت ۰/۳

نیوتون متر بر ساختار، یکی با نیروی ثابت ۳ نیوتن بر انتها در راستای عمودی و رو به بالا و دیگری در سقوط آزاد. نمودارهای شکل ۶-۱۴ به ترتیب بیان کننده این وضعیت‌ها هستند.



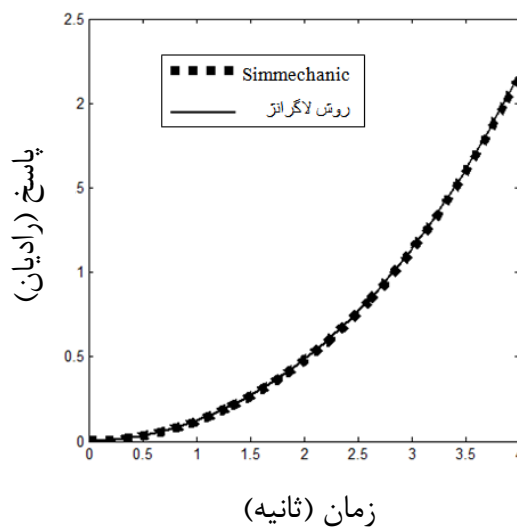
زمان (ثانیه)



زمان (ثانیه)

اعمال نیروی خارجی ۳ نیوتن به صورت ثابت در چهار ثانیه به انتهای ربات رو به بالا

سقوط آزاد در چهار ثانیه



زمان (ثانیه)

اعمال گشتاور ۳/۰ نیوتن متر بر موتور در چهار ثانیه

شکل ۶-۱۴ راستی آزمایشی

۶-۶ دسته آزمون‌های ۱

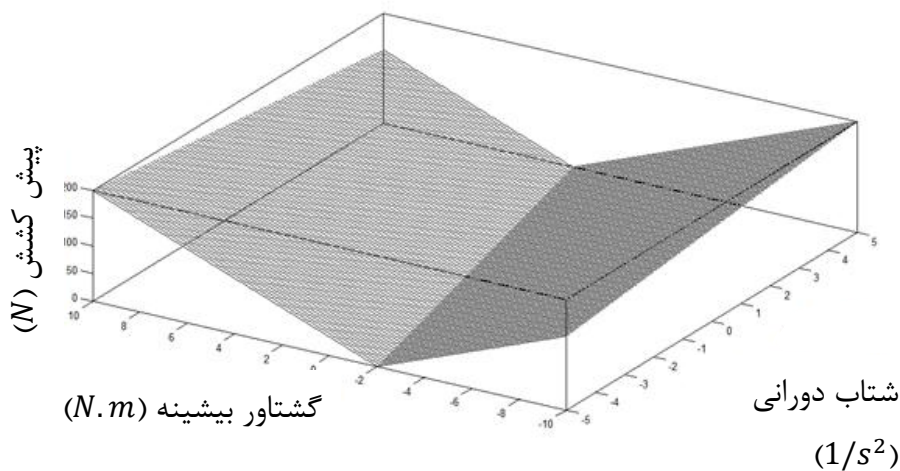
هدف این دسته آزمون‌ها، به دست آوردن میزان پیش کشش مناسب برای یک ربات مهره‌ای مرکب است؛ که در کاوش‌گر نوین به عنوان یک بازو استفاده می‌شود. در ابتدا با استفاده از معادلات توانمندی دینامیکی، بیشینه شتاب دورانی ربات با توجه به بیشینه گشتاور ممکن برای

موتورها، یک پیش کشش به دست می‌دهد. با استفاده از نمودار جامع به دست آمده، مسیری در نظر گرفته می‌شود و با پیش کشش مورد نیاز، که از نمودارهای آزمون نخست به دست آمده، توانمندی ربات در نگه‌داشتن کابل‌ها در شرایط کشش دائمی بررسی می‌گردد.

۶-۶-۱ آزمون به دست آوردن رابطه پیش کشش و شتاب بیشینه موتور و

گشتاور بیشینه موتور

نمودار شکل ۶-۱۵ نشان‌گر این رابطه است؛ که در بدترین وضعیت به دست آمده است.

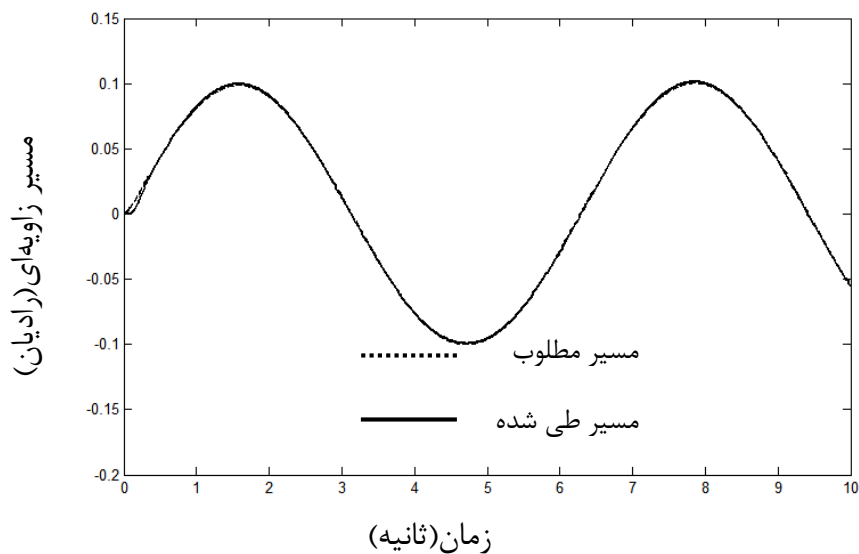


شکل ۶-۱۵ رابطه گشتاور-شتاب-پیش کشش

۶-۶-۲ آزمون شبیه‌سازی ربات دو درجه آزادی بازو

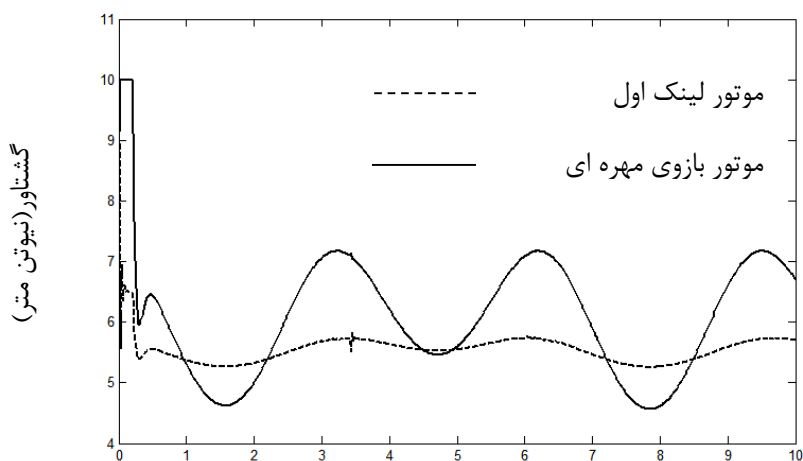
با استفاده از نمودار شکل ۶-۱۵ یک پیش کشش برای ربات انتخاب می‌شود که تضمین‌کننده کشش دائمی کابل‌ها است. به این ترتیب در آزمون نخست شبیه‌سازی، با استفاده از یک مسیر مطلوب با بیشینه شتاب زاویه $2/5$ و بیشینه گشتاور موتور 10 از شکل ۶-۱۵، کمینه پیش کشش 200 انتخاب می‌شود. باید توجه شود که این میزان پیش کشش، کمینه است و برای اطمینان، چیزی بیش از این پیش کشش نیاز است. شکل ۶-۱۶، مسیر مطلوب و مسیر حقیقی ربات را نشان می‌دهد. با استفاده از یک کنترلر^۱ با ضرایب به ترتیب 1000 ، 800 و 95 ، کنترل به خوبی انجام شده است.

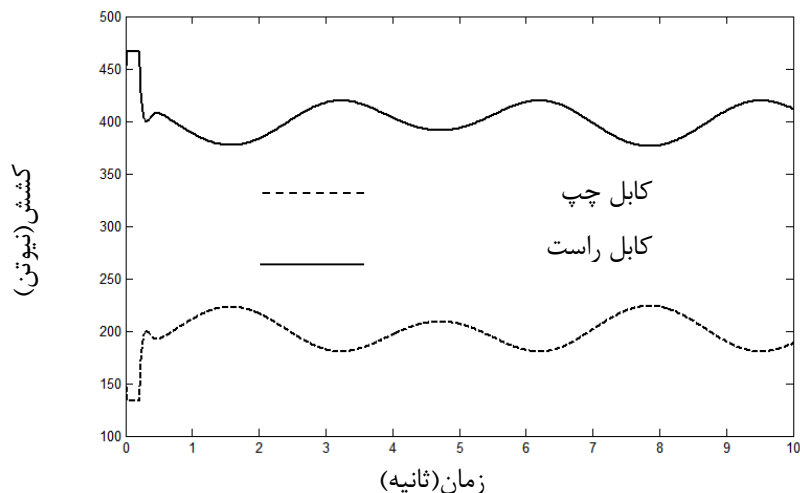
^۱ PID



شکل ۶-۱۶ مسیر پیروی بدون نیروی خارجی

در ادامه میزان گشتاور مورد نیاز دو موتور را با بیشینه گشتاور ۱۰ نیوتن متر در شکل ۶-۱۷ نمایش می‌دهیم. در این نمودار در بخش بازه زمانی ۱ ثانیه موتور به حالت گشتاور اشباع رسیده است. در بخش اصلی نمودارها، شکل ۶-۱۷-ب بیان گر کشش کابل‌ها با پیش کشش به دست آمده ۳۰۰ است.

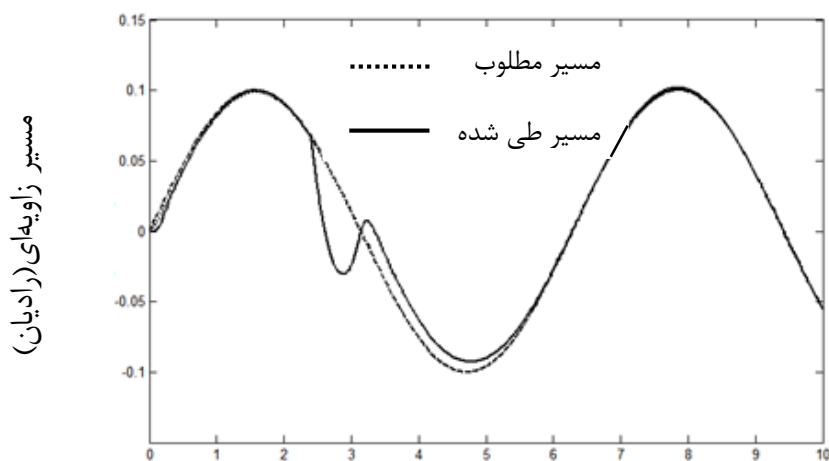




شکل ۶-۱۷ کشش کابل و گشتاور موتور ربات مهره‌ای

در شکل ۶-۱۷ کارایی نمودار شکل ۶-۱۵ برای انتخاب پیش کشش اثبات می‌گردد. در این شکل، که شبیه‌سازی دینامیکی را نشان می‌دهد، کشش دائمی کابل‌ها نشان داده شده است. حال این سؤال پیش می‌آید؛ که آیا با اعمال نیروی خارجی به صورت یک ضربه نیز، کابل‌ها در وضعیت کشش دائمی باقی می‌مانند؟

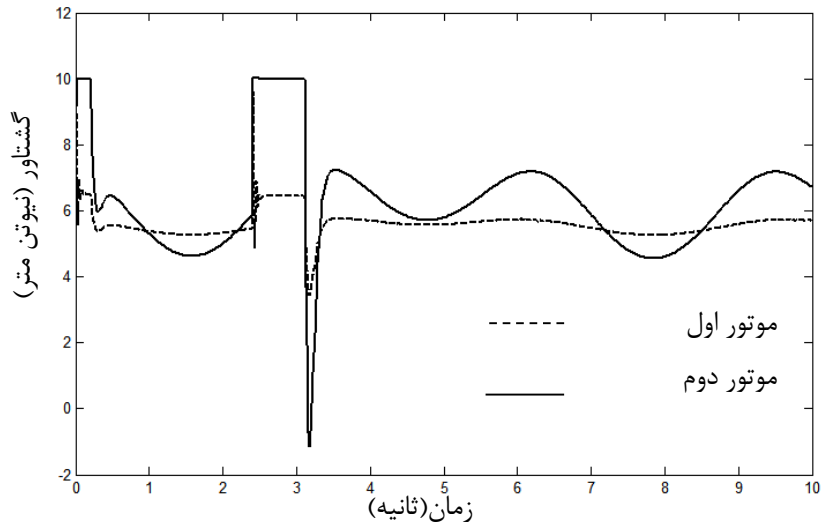
به این منظور بدنه ربات در حال حرکت بر روی مسیر مطلوب گذشته در ثانیه ۲ به یک جسم خارجی برخورد می‌کند. که سبب اغتشاش در حرکت می‌گردد. با استفاده از معادلات نفوذ، میزان نیروی برخورد در حالت دینامیک به دست می‌آید. پاسخ به این برخورد در شکل ۶-۱۸ نشان داده شده است.



زمان (ثانیه)

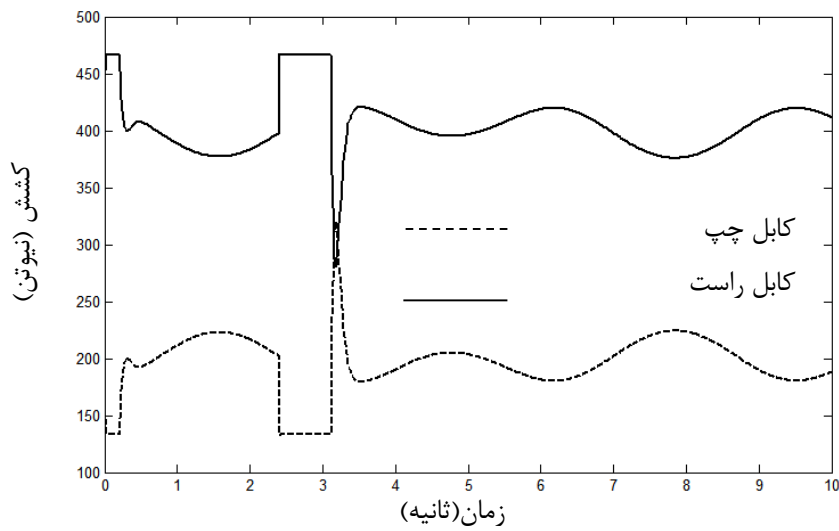
شکل ۱۸-۶ مسیر زاویه‌ای با نیروی خارجی

در ادامه نمودار شکل ۱۹-۶ بیان‌کننده گشتاور موتورها و شکل ۲۰-۶ بیان‌کننده کشش کابل‌ها است.



شکل ۱۹-۶ گشتاور موتورها

در این حرکت نیز گشتاورها به محدوده توان موتور محدود شده‌اند و شکل ۲۰-۶ کشش دائمی را در شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

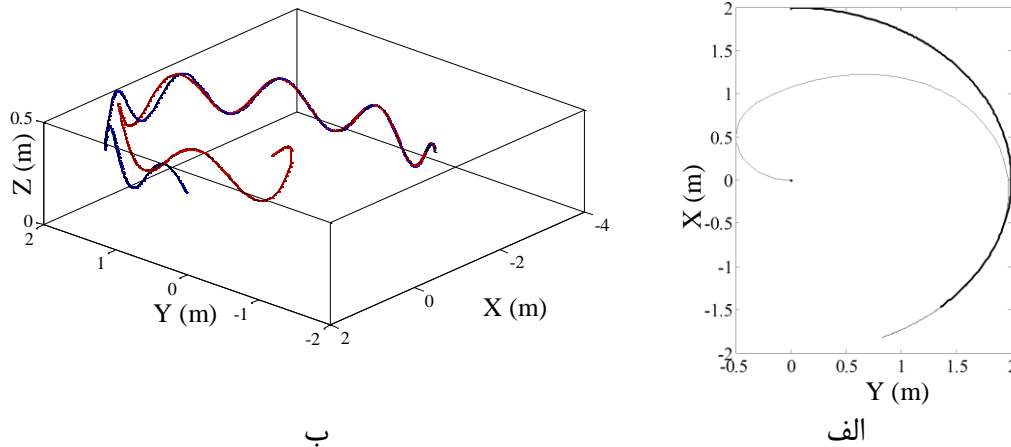


شکل ۲۰-۶ کشش کابل‌ها

۷-۶ دسته آزمون‌های ۲

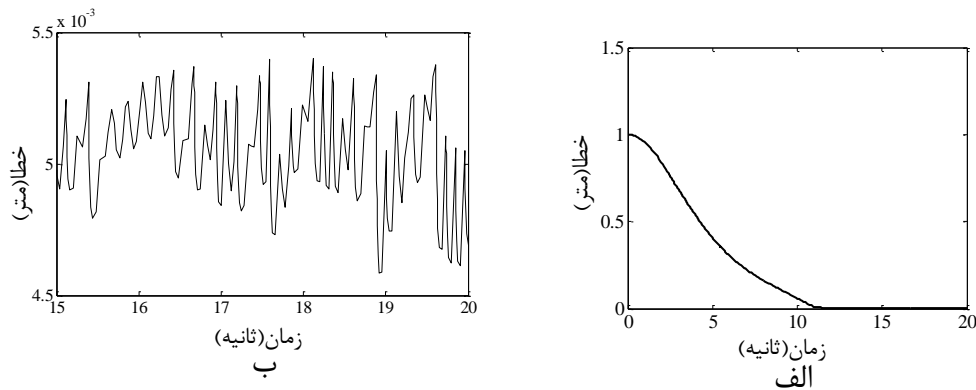
۱-۷-۶ آزمون شبیه‌سازی ربات در سه بعد

یکی از برتری‌های ربات نوین، توانایی کنترل ارتفاع، بدون نیاز به موتوری است؛ که برای ارتفاع به کاررفته است. در این زمینه فرمان دوران روی یک مسیر دایره‌ای برای پایه چهارچرخ و مسیر موجی برای ارتفاع در نظر گرفته شده است. شکل ۶-۲۱ نشانگر این پیمایش در صفحه است.



شکل ۶-۲۱ مسیر سه بعدی طی شده توسط ربات

در ادامه با انجام یک طراحی مسیر مناسب، که با شتاب و سرعت صفر شروع و به شتاب و سرعت صفر تمام می‌شود؛ خطای کنترلی به دست می‌آید و شکل ۶-۲۲، نشان داده شده است.

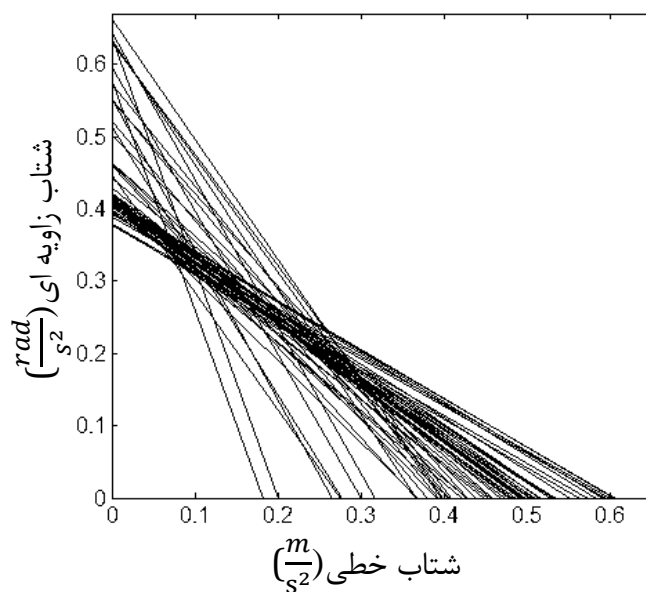


شکل ۶-۲۲ خطای کنترل

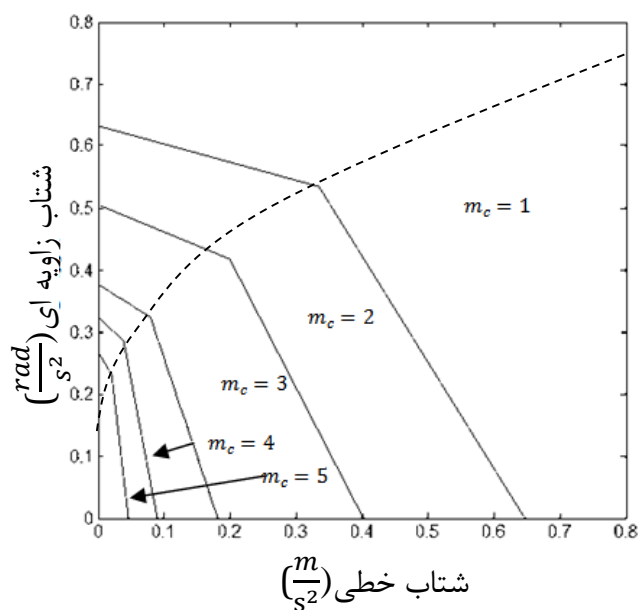
در شکل ۶-۲۲-الف، خطا در ۲۰ ثانیه و در ب، خطای بزرگ‌نمایی شده در ۵ ثانیه نشان داده شده است.

۶-۷-۲ آزمون ملاحظات شتاب-گشتاور دو بعدی روی سطح ناهموار

در این محاسبات، بازو به عنوان یک بار خارجی بر روی انتهای میانه در نظر گرفته شده است. و با جرم‌های گوناگون، در محاسبات دیده شده است. در شکل ۶-۲۳ نتیجه محاسبات توانایی دینامیکی قابل مشاهده است. در شکل ۶-۲۳، هر خط نمایش گر توانایی ربات در رسیدن به شتاب‌های خطی و زاویه‌ای، در یک وضعیت خاص هندسی است. با توجه به شکل ۶-۲۴، وضعیت پذیرفته شده برای ربات، فضای مشترک تمامی خطوط است.

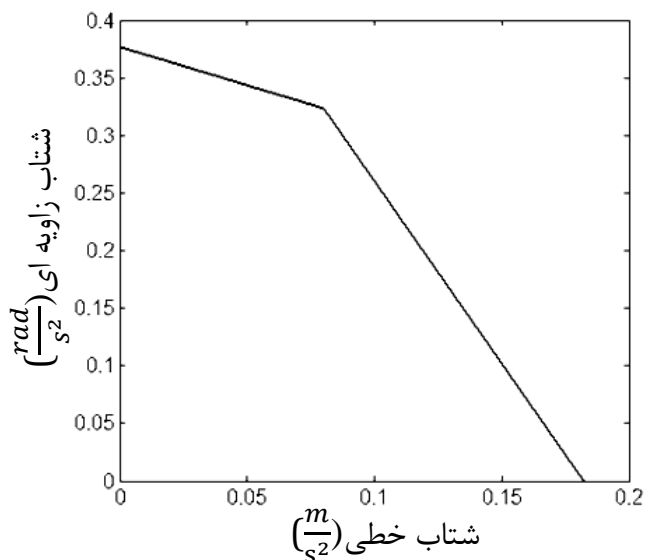


شکل ۶-۲۳ نتایج معادلات توانمندی مکانیکی برای پا



شکل ۶-۲۴ تأثیر جرم بازو و محموله در حرکت پایه

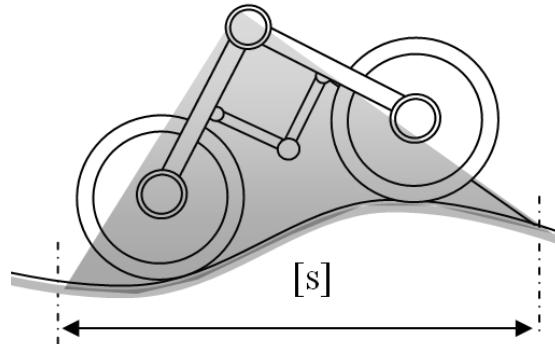
در شکل ۶-۲۴ نیز محدوده قابل پذیرش بنا بر جرم‌های گوناگون به دست آمده است. اگر جرم کل بازو با محموله آن چهار کیلوگرم بیشتر نباشد؛ در نتیجه بنا بر محاسبات توانمندی مکانیکی، محدود شتاب‌های قابل ایجاد به صورت شکل ۶-۲۵ نشان داده می‌شود.



شکل ۶-۲۵ محدودیت شتاب‌ها با وجود جرم چهار کیلوگرم

در ربات‌هایی، که با سطوح ناشناخته دست و پنجه نرم می‌کنند؛ امکان تصور یک سطح کاری مشخص وجود ندارد. حسگرهای متنوعی برای هدایت ربات سیار، می‌توانند به کار گرفته شوند. سامانه بینایی در این پژوهش استفاده شده است. اگرچه جایگزین کردن دوربین با حسگرهای شتاب چرخ‌ها برای یافتن مشخصات حرکتی نظیر موقعیت ربات سیار امکان‌پذیر است، لیکن دریافت اطلاعات سطح با شتاب سنج میسر نیست. دلیل اصلی استفاده از اسکن سطح، این است؛ که ربات در الگوریتم حرکتی به شعاع انحنا و نرمال سطح نیز نیاز دارد. یک دوربین جفت شده (دو دوربین در کنار هم بافاصله‌ای معین) با قانون اختلاف منظر، تمام داده‌های سطح را استخراج می‌کند. تجهیزات شناسایی شامل حسگرها و سیستم بینایی ربات کاوشگر روی نقطه‌ی اتصال دو میله میانی قرار می‌گیرند. حسگرها در هر لحظه، سطح را مطابق شکل ۶-۲۶ اسکن کرده و داده‌ها را برای حرکت کنترل شده، فراهم می‌کنند. هدایت نقطه میانی در مسیر مطلوب نیز

نیازمند شناسایی سطح است. در نمونه‌سازی انجام‌شده، داده‌های سطح در یک ماتریس با نام ماتریس اسکن [S] ذخیره می‌گردد؛ که در محاسبات به کار گرفته می‌شود.



شکل ۶-۲۶ نمایش ناحیه اسکن شده

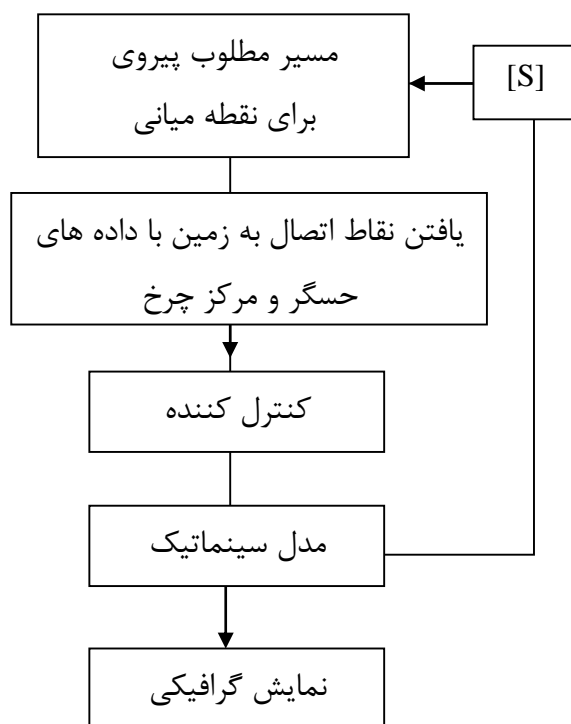
تحلیل حرکت ربات‌های سیار در یک محیط هموار و با فرض عدم لغزش چرخ‌ها به خودی خود، و یا حتی در فضای سه بعدی دشوار نیست. در این مقاله، سطح حرکت ناشناخته و ناهموار است؛ و همچنین حرکت مفصل غیرفعال متأثر از دیگر مفاصل فعال تحلیل می‌شود. هدف از طرح جدید، کنترل موقعیت مفصل میانی در فضای کاری ربات سیار است. مقادیر عددی پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۶-۳ مقادیر عددی پارامترها آورده شده است. مطابق الگوریتم، ابتدا محیط اطراف ربات اسکن می‌شود؛ و پس از استخراج داده‌های سطح و محاسبات تکمیلی، در یک ماتریس ذخیره می‌گردد. مطابق با مسیر مطلوب نقطه میانی حامل دوربین، محل استقرار مرکز چرخ‌ها شناسایی می‌شود. در ادامه سرعت‌های زاویه محاسبه و به موتورهای ربات اعمال می‌شود.

جدول ۶-۳ مقادیر عددی پارامترها

پارامتر	توضیح
شعاع چرخ‌های ربات	۱۰ سانتی‌متر
طول بازوی عقب و جلو	۵۰ سانتی‌متر
فاصله چرخ‌های جلو	۶۰ سانتی‌متر
فاصله چرخ‌های عقب	۳۰ سانتی‌متر
اینرسی بازو	۰/۰۱ مترمربع کیلوگرم
اینرسی چرخ	۰/۹۵ مترمربع کیلوگرم
حداکثر گشتاور موتورها	۱۰ نیوتون متر

وزن چرخ‌ها	۵۰۰ گرم
وزن بازوها	۴۰۰۰ گرم

کنترلر مختصات مکان هندسی مرکز چرخ‌ها را دریافت می‌کند و با مقادیر لحظه‌ای که از حل سینماتیک به دست می‌آید، مقایسه می‌کند. در نتیجه پیروی از مسیر مناسب حاصل می‌شود. برای کنترل از کنترلر خطی ساز پسخورد استفاده می‌شود. ورودی این کنترلر تفاوت مقادیر مکانی مسیر ردگیری در لحظه با مقدار دریافت شده از نمونه سینماتیک است؛ و خروجی آن سرعت زاویه‌ای چرخ‌های جلو و عقب است.



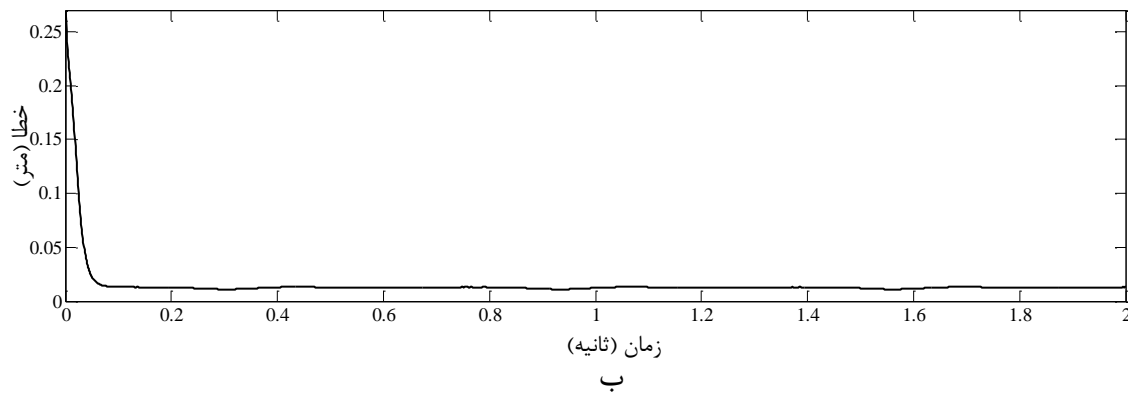
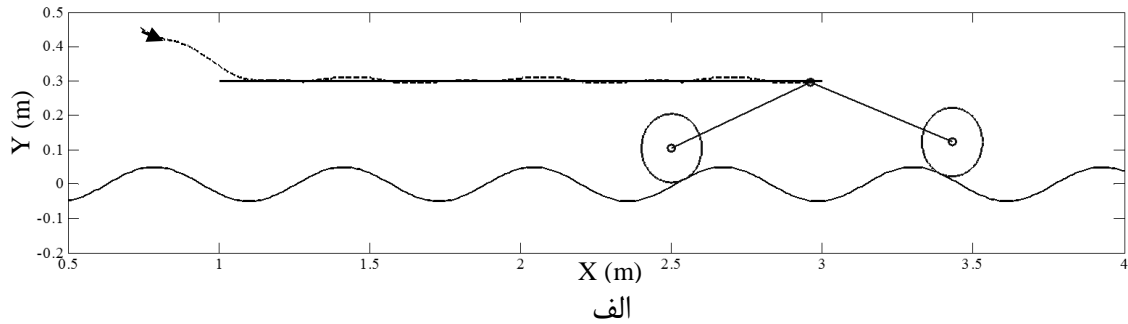
شکل ۶-۲۷ الگوریتم محاسبات سطح

در شکل ۶-۲۷ برنامه طراحی شده در واقع یک شبیه‌سازی از محیط حقیقی است. در ابتدا، سطحی فرضی در نظر گرفته می‌شود؛ که معادله آن در رابطه (۶-۷) بیان شده است.

$$y = 0.05\sin(2x)$$

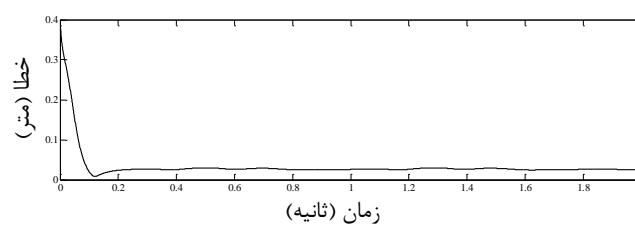
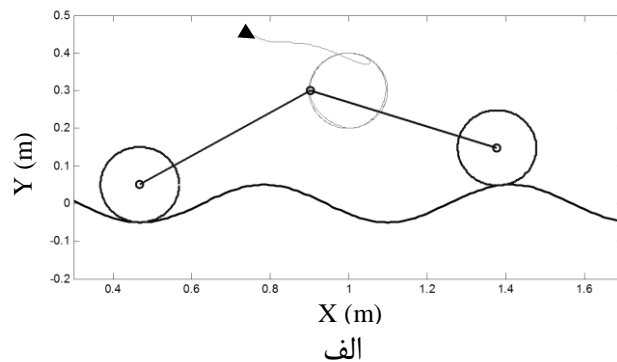
(۶-۷)

در آزمون نخست سعی شده است، تا با در نظر گرفتن یک مسیر مستقیم تأثیرات سطح را از بین برد. نتیجه این آزمون در شکل ۶-۲۸ بیان شده است.



شکل ۶-۲۸ نمودارهای خطا و پیمایش در رفع اغتشاش

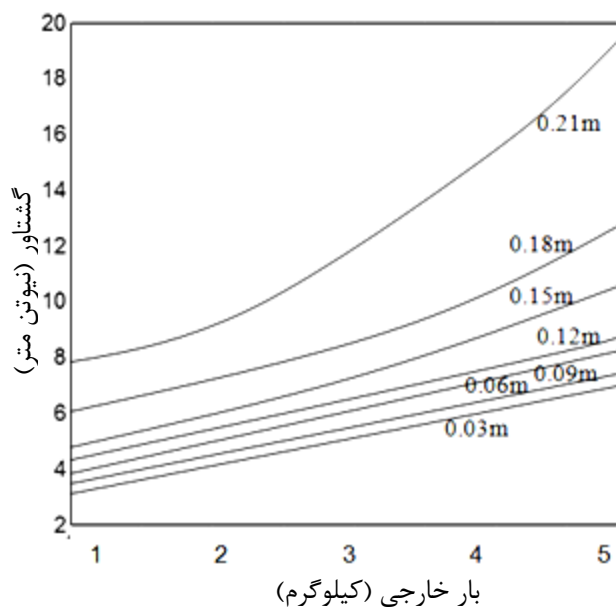
در آزمایشی دیگر، مسیر دایره‌ای به شعاع ۰/۱ متر برای نقطه C طراحی شده که در شکل ۶-۲۹ به نمایش درآمده است. نتایج در شکل ۶-۲۹ نمایش داده شده است.



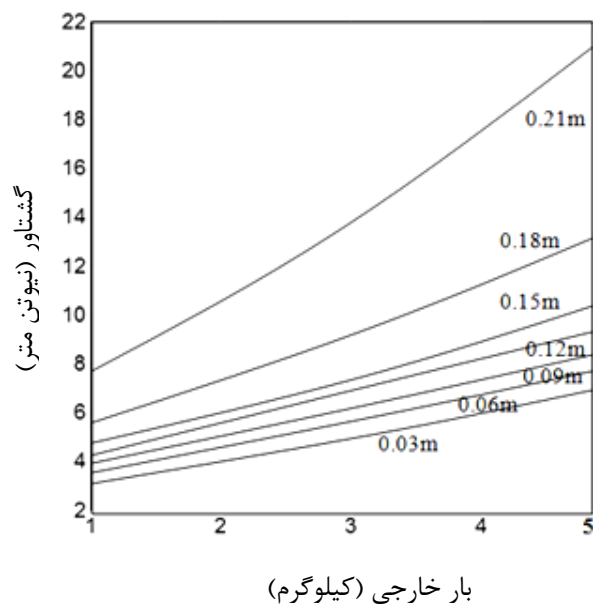
ب

شکل ۶-۲۹ نمودارهای خطا و پیمایش در مسیر پیمایی

در ادامه، با توجه به استخراج معادلات دینامیک، می‌توان گشتاور محاسبه‌شده، روی مسیر مورد نظر را بر مبنای داده‌های سینماتیک استخراج‌شده از آزمون‌های گذشته به دست آورد. این امر وابستگی زیادی به میزان بار نصب‌شده بر روی نقطه میانی دارد که مبنای کنترل و تحلیل‌های این پژوهش است. در این تحلیل حذف اغتشاش سطح مد نظر قرار گرفته است. در این آزمون بارهای مختلف از ۱ کیلوگرم تا ۵ کیلوگرم، بر روی ناهمواری‌های گوناگون با دامنه اغتشاش گوناگون از ۳ سانتی‌متر تا ۲۱ سانتی‌متر آزمایش می‌شود؛ و میزان بیشینه گشتاور موتور چرخ‌ها برای غلبه بر ناهمواری‌ها بررسی می‌گردد. در شکل ۶-۳۰، بیشینه گشتاور محاسبه‌شده برای چرخ جلو در شرایط گوناگون به نمایش درآمده است؛ و شکل ۶-۳۱ گشتاور در بارهای مختلف برای چرخ عقب است.

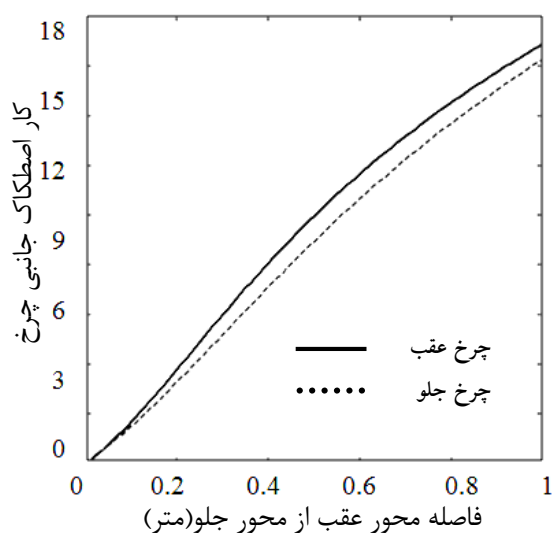


شکل ۶-۳۰ تأثیر ناهمواری و بارهای گوناگون بر گشتاور موتور جلو



شکل ۳۱-۶ تأثیر ناهمواری و بارهای گوناگون بر گشتاور موتور عقب

در شکل ۳۰-۶ و شکل ۳۱-۶ به خوبی تأثیر وزن اضافه شده بر روی نقطه میانی در ناهمواری‌های گوناگون، نمایان است. در حقیقت با استفاده از این نمودارها می‌توان تعیین کرد؛ که برای بار نصب شده بر روی نقطه میانی و با دامنه نوسانات سطح مشخص، چه بیشینه گشتاور موتوری نیاز است. کار نیروی اصطکاک جانبی که در متن ادعا شده است؛ برای فاصله محورهای بیشتر، بیشتر است در شکل ۳۲-۶ بررسی شده است.



شکل ۳۲-۶ رابطه کار اصطکاک جانبی بافاصله محورها

۸-۶ دسته آزمون‌های ۳

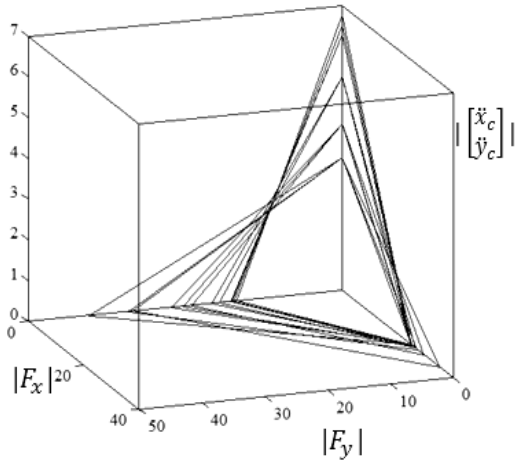
۱-۸-۶ بررسی مرزهای توانایی پا

در مرحله شبیه‌سازی، با استفاده از معادلات به دست آمده دی سی ای، نمودارهای توانمندی استخراج می‌گردد. مشخصات عددی مورد نیاز برای شبیه‌سازی در جدول ۴-۶ آورده شده است.

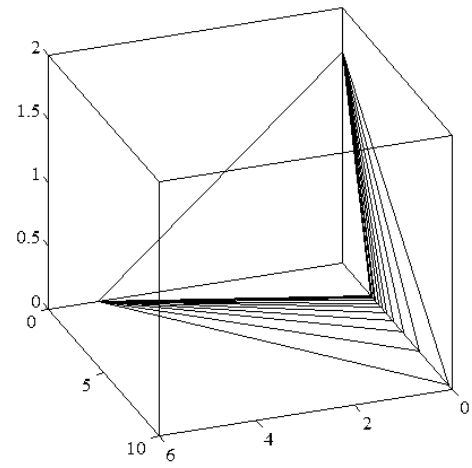
جدول ۴-۶ مقادیر عددی پا

پارامتر	اندازه
شعاع (r)	۰/۲
جرم موثر بدنه ربات	۲/۲۵
جرم لینک اول پا	۰/۳
اینرسی لینک اول	۰/۰۸
جرم لینک دوم پا	۰/۲
اینرسی لینک دوم	۰/۰۶
گشتاور بیشینه	۱۰
گشتاور کمینه	۱۰
ضریب اصطکاک ایستای تماس با زمین	۰/۶

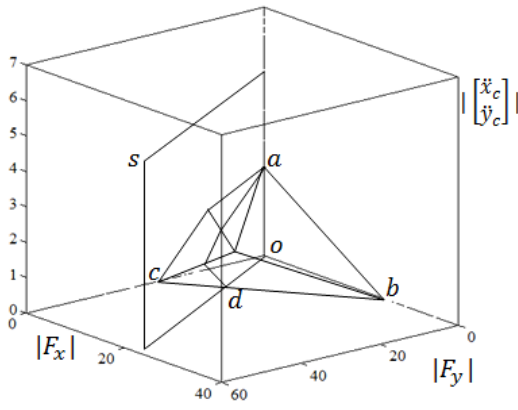
با توجه به مشخصات عددی جدول ۴-۶ و روابط به دست آمده، نتایج اولیه محاسبه توانایی دینامیکی با فرض عدم لغزش در شکل ۶-۳۳ نمایش داده شده است. قسمت الف شکل ۶-۳۳، مربوط به حالت پا و قسمت ب، مربوط به حالت چرخ است. منشور قابل پذیرش که اشتراک فضای تمامی وضعیت‌ها است؛ در بخش د نمایش داده شده است. در بخش ج نحوه کاستن بخش‌های شرایط لغزش را نشان می‌دهد و بخش ه محدوده فضایی قابل پذیرش در گام زنی و حمل بار پا، در برخورد با زمین، برای ارضای بیشینه گشتاورها و عدم لغزش را بیان می‌کند.



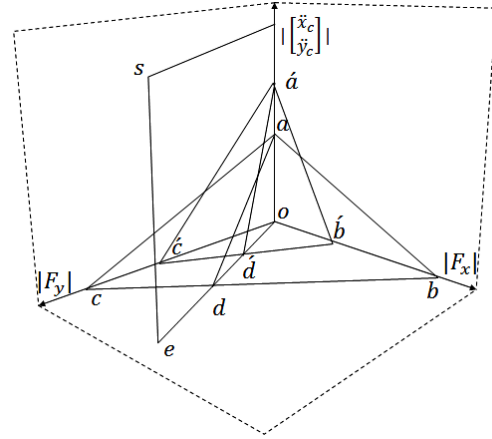
ب



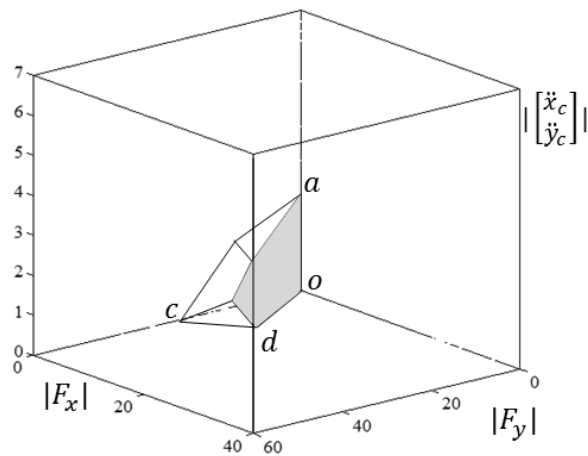
الف



د



ج



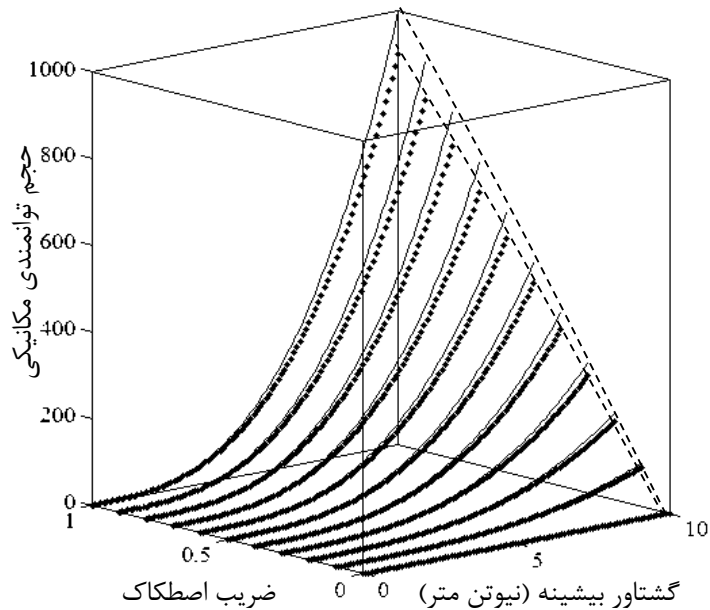
ه

شکل ۳۳-۶ محاسبات توانمندی دینامیکی چرخ

در این شکل، تقاطع دو فضای توانایی دینامیکی و شرایط عدم لغزش؛ به نمایش گذاشته شده است. در شکل ۶-۳۳-د نیز منشور *cdoa* نمایان گر بخش قابل پذیرش فضای پارامترها است که هم شرایط عدم لغزش را برآورده می‌کند و هم شرایط گشتاور بیشینه را در نظر می‌گیرد. در ادامه پژوهش تلاش شده تا معیاری عمومی برای داوری در مورد توانایی مکانیکی ساختارهای مشابه پیشنهاد گردد. این پیشنهاد، حجم توانایی مکانیکی نام گذاری شده است. در این معیار، ابتدا به تعداد متغیرهای محور، ضرایب اهمیت معرفی می‌شود. این ضرایب اجازه می‌دهند، که اهمیت پارامتر مورد نظر برای طراح نیز، در نظر گرفته شود. مثلاً اگر در یک طراحی، شتاب اهمیت بیشتری یابد؛ در نتیجه ضریب بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد. در شکل ۶-۳۳-ج نیروها از اهمیت کمتری نسبت به شتاب برخوردار هستند. به همین دلیل، ضریب شتاب بیشتر و ضریب نیروها کمتر هستند. منشور *cba0* نشانگر مقدار اولیه محاسبات توانایی مکانیکی است و منشور *éba0* نشانگر منشور با اعمال ضرایب اهمیت است. حجم منشور *éda0* نشان گر توانایی عمومی ساختار است. شکل ۶-۳۴ نشانگر این حجم توانایی برای مقادیر گوناگون ضریب اصطکاک و بیشینه گشتاور است. شکل ۶-۳۴ با ضرایب اهمیت مطلوب جدول ۶-۵ به دست آمده است.

جدول ۶-۵ ضرایب تصحیح حجم

اندازه	پارامتر
۲	ضریب اهمیت اندازه شتاب
۱	ضریب اهمیت اندازه نیروی مماسی
۱	ضریب اهمیت اندازه نیروی عمودی



شکل ۳۴-۶ حجم توانمندی مکانیکی و ارتباط آن با گشتاور بیشینه و ضریب اصطکاک. نقطه چین نمایش گر توانمندی پای جدید و خط نمایش گر توانمندی یک پای معمولی است.

این مقیاس برای مقایسه ساختارهای با کارکردهای مشابه و شرایط محیطی و هندسی گوناگون، می تواند وسیله داوری خوبی باشد. شکل ۳۴-۶ نشان گر آن است؛ که ساختار نوین، از دیدگاه دینامیک، توانایی هایی مشابه توانایی های پاهای گذشته دارد. این امر با بررسی معیار پیشنهادی حجم توانایی مکانیکی قابل بررسی است.

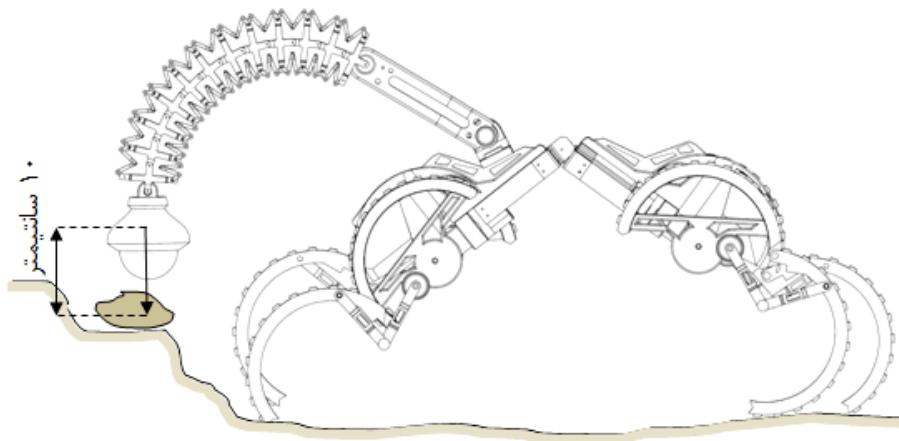
۹-۶ دسته آزمون های ۴

بررسی سینماتیک و دینامیک دو بعدی ربات ترکیبی (هیبرید)

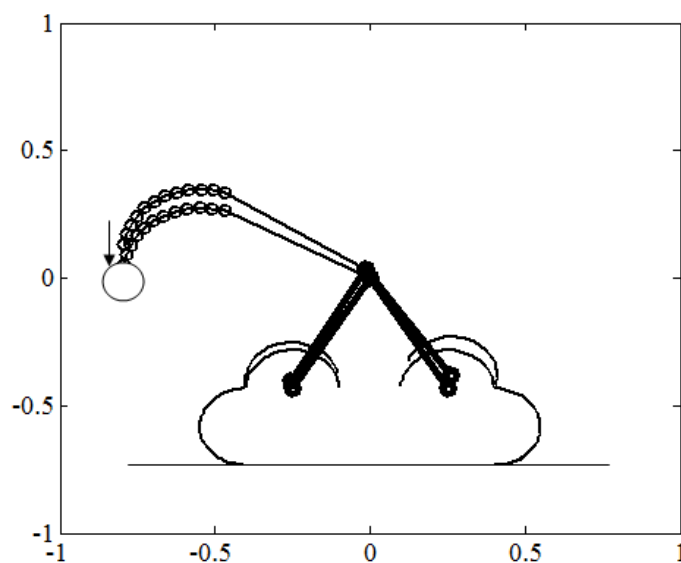
۱-۹-۶ آزمون استفاده از گیره

طراحی مسیر برای گیره، با دو فرض عدم لغزش پاها، در هنگام گرفتن و فشار گیره روی جسم و حرکات ربات انجام شده است. در کنار آن معیار پایداری، در بهترین وضعیت قرار گرفته است. مسیر در نظر گرفته شده برای گرفتن جسم توسط گیره، یک حرکت عمودی است که پس از برخورد انتهای گیره با جسم، نیروی ثابت ۳۰ نیوتن عمودی بدون نیروی جانبی را بر روی جسم اعمال می کند. این نیرو از نتایج آزمایش عملی گیره به دست آمده است.

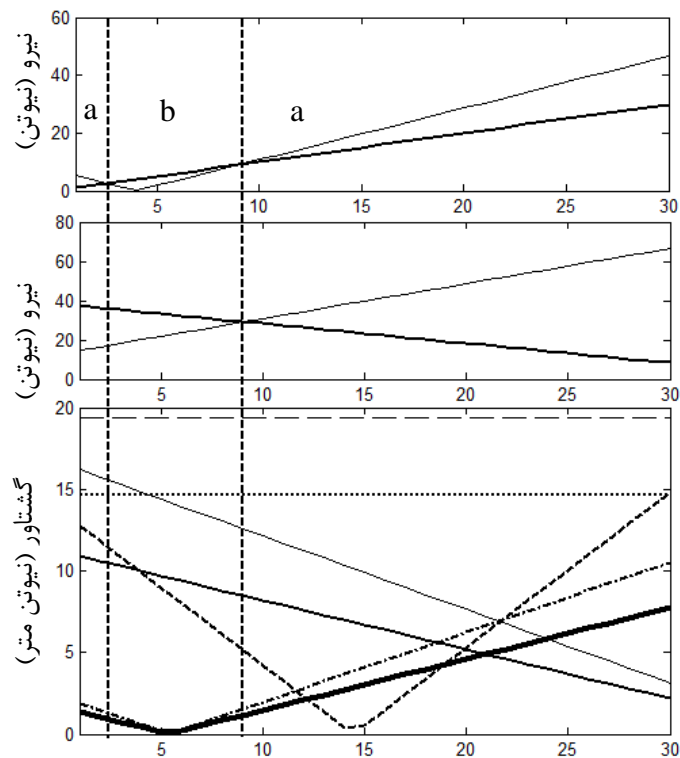
سرعت و شتاب شروع و پایان مسیر برابر صفر در نظر گرفته شده است. شکل ۳۵-۶ بیان گر شماتیک آزمون است؛ و شکل ۳۶-۶ ربات را در محیط شبیه سازی نشان می دهد. شکل ۳۷-۶ نتایج سینماتیک و دینامیک را بیان می کند. نمودارهای شکل ۳۷-۶، بیان کننده تمامی حل های ممکن با تغییر مقدار فضای یک بعدی پوچی (که نیروی عمودی پای عقب انتخاب شده است)، می باشند.



شکل ۳۵-۶ آزمون گرفتن جسم توسط گیره در کارکرد سری موازی



شکل ۳۶-۶ نتیجه شبیه سازی



نیروی عمودی پای عقب (نیوتن)

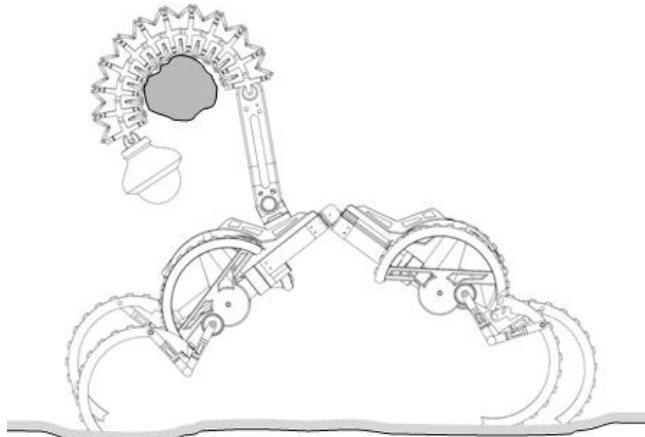
شکل ۶-۳۷ نتایج دینامیک و سینماتیک آزمون گیره

ناحیه a غیر قابل پذیرش بوده و در آن جسم دچار لغزش می‌گردد و ناحیه b قابل پذیرش است. در این ناحیه از ارتباط نیروها و گشتاورها، گشتاوری که بتواند استقرار را در وضعیت مورد نظر اعمال کند، ۱۷ نیوتن متر است. این بدان معناست که موتورها باید توان فراهم آوردن این گشتاور را داشته باشند.

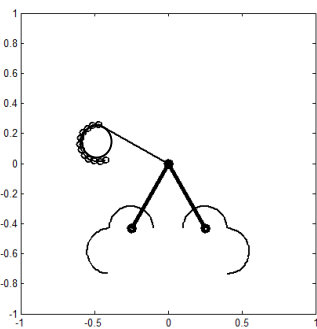
۶-۹-۲ آزمون استفاده از خرطوم

در این آزمون توانایی ربات در گرفتن یک جسم خارجی با خرطوم یا همان بدن بازوی مهره‌ای بررسی می‌شود. در این حالت یک جسم خارجی توسط بدنه بازو گرفته می‌شود و سپس شروع به حرکت دورانی می‌کند. این کارکرد به صورت شماتیک در شکل ۶-۳۸ نمایش داده شده است. و

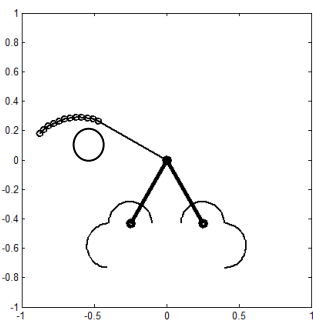
نتایج این شبیه‌سازی در شکل ۳۹-۶ و نتایج گشتاور دو موتور گردن در شکل ۴۰-۶ در وضعیت گرفتن و حرکت دادن نمونه نمایش داده شده‌اند.



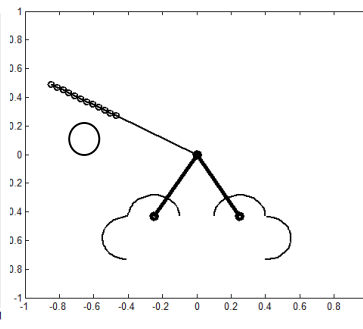
شکل ۳۸-۶ شماتیک کارکرد سری موازی-خرطوم



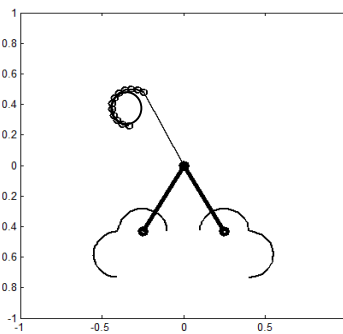
ج



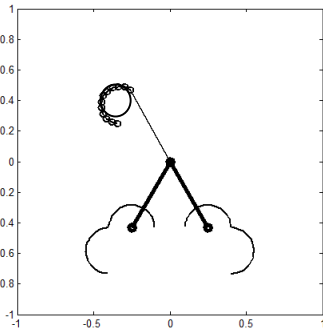
ب



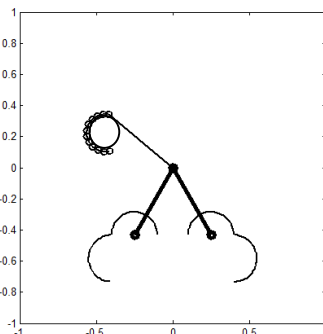
الف



و

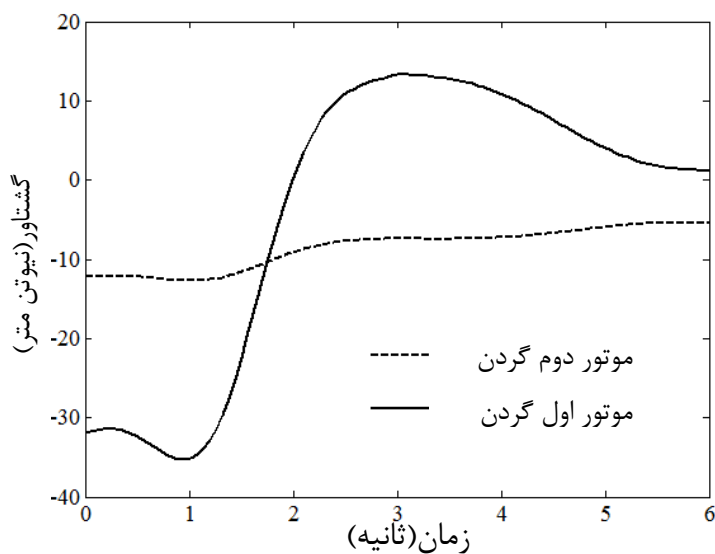


ه



د

شکل ۳۹-۶ نتیجه شبیه‌سازی گیرش و برداشت در کارکرد خرطوم

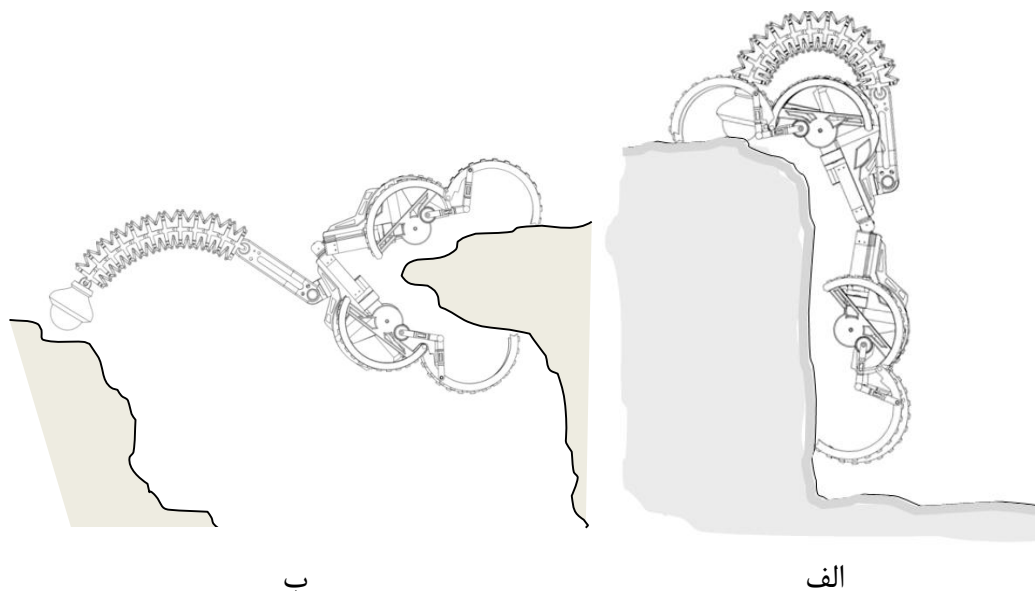


شکل ۴۰-۶ گشتاور موتورهای گردن در برداشت نمونه

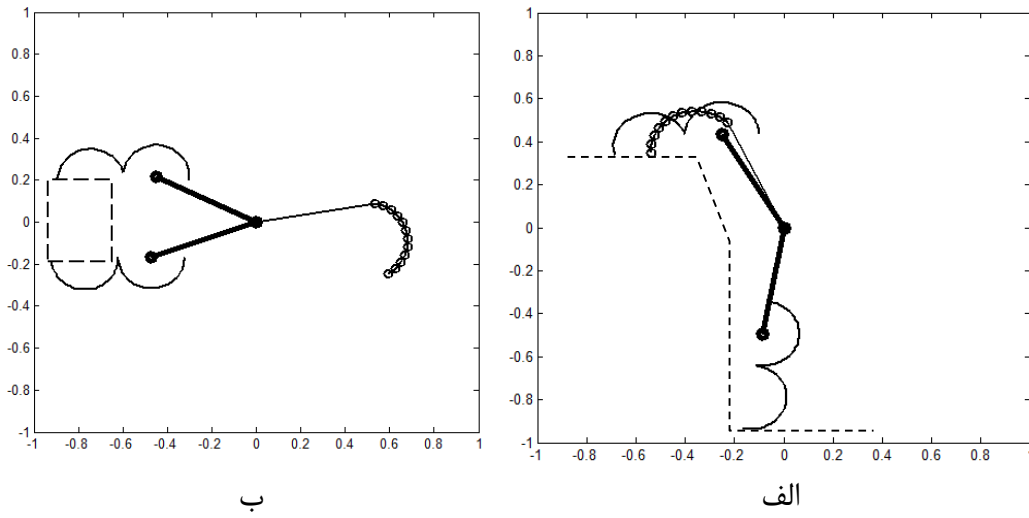
۱۰-۶ دسته آزمون‌های ۵

بررسی توانمندی دو بعدی کارکرد قلاب گیره در برخی وضعیت‌ها

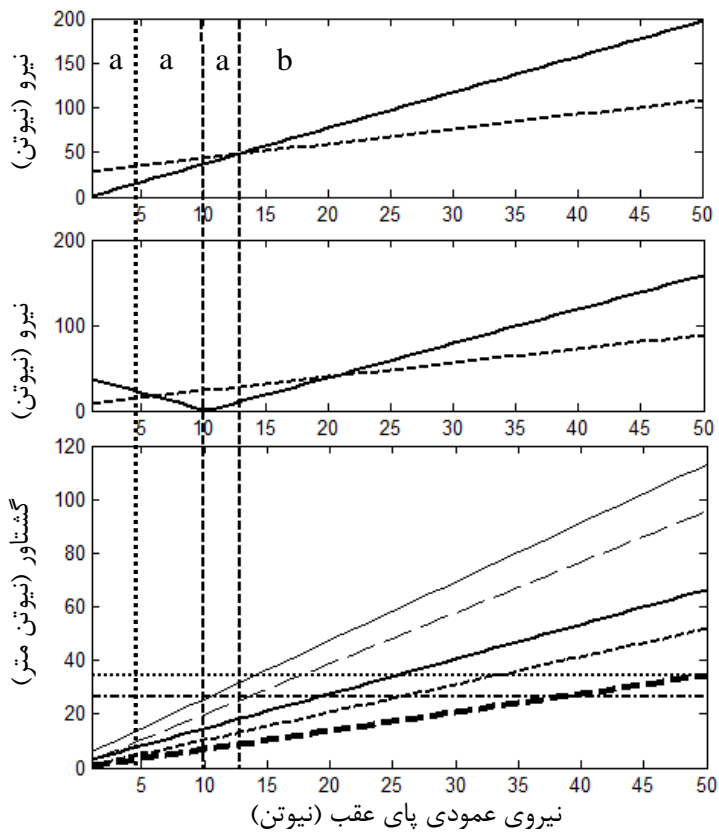
در این دسته از آزمون‌ها، روتوپود در وضعیت نامناسبی که احتمال لغزش دارد قرار می‌گیرد و در این وضعیت محاسبات گشتاور برای وجود شرایط عدم لغزش بررسی می‌گردد. شکل ۴۱-۶ شماتیک وضعیت را نشان می‌دهد و شکل ۴۲-۶ نتیجه شبیه‌سازی را بیان می‌کند.



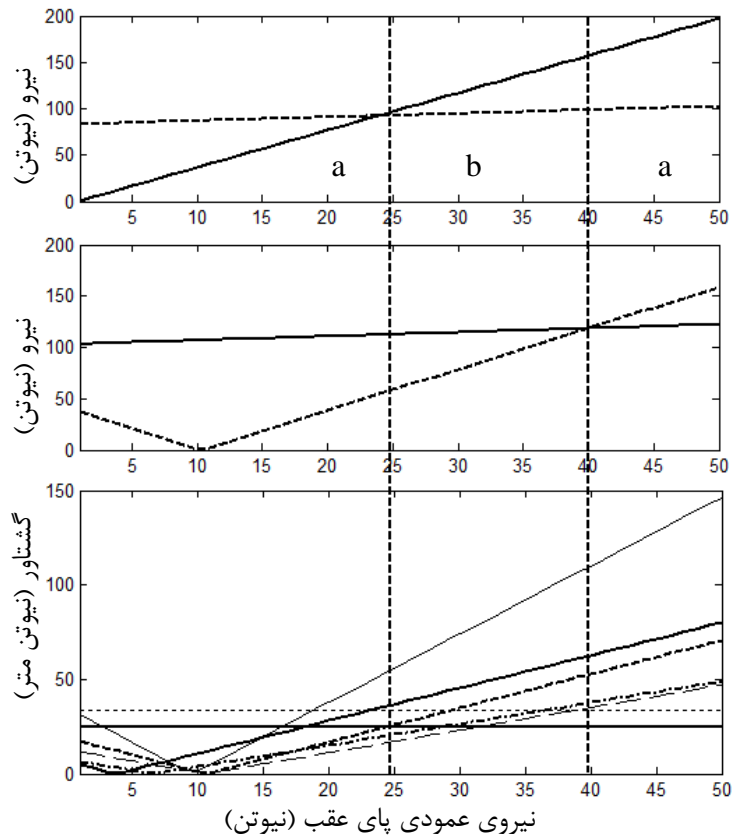
شکل ۴۱-۶ ماتیک چیرگی بر مانع مرتفع و کارکرد قیچی



شکل ۴۲-۶ وضعیت چیرگی بر مانع در شبیه‌سازی



شکل ۴۳-۶ بررسی در معیار لغزش و گشتاور



شکل ۶-۴۴ بررسی در معیار لغزش و گشتاور و پایداری. الف لغزش و گشتاور ب پایداری

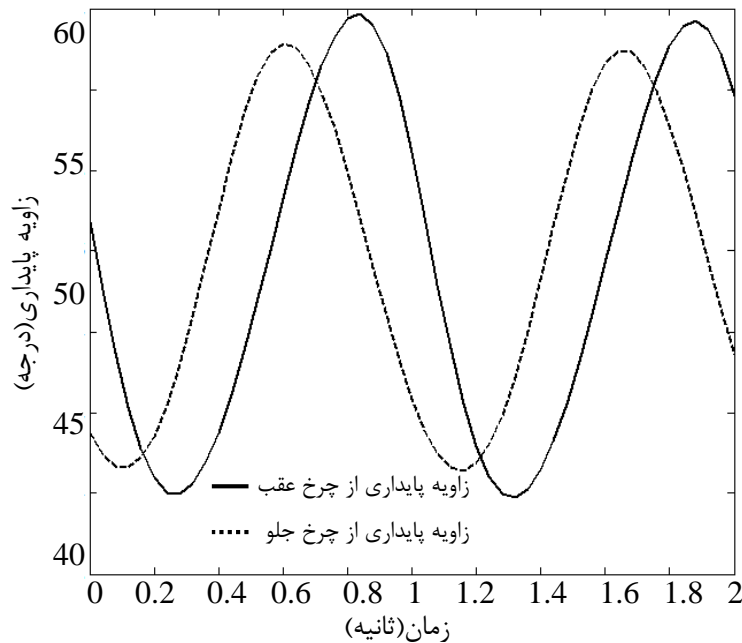
همانگونه که از شکل ۶-۴۴ نمایان است؛ دو بازه وجود داد؛ که در آنها ربات می تواند در کارکرد- های نشان داده شده استقرار یابد. ناحیه a غیر قابل پذیرش بوده و در آن جسم دچار لغزش می گردد و ناحیه b قابل پذیرش است. در این ناحیه از ارتباط نیروها و گشتاورها، گشتاوری که بتواند استقرار را در وضعیت مورد نظر اعمال کند، ۱۷ نیوتن متر است. سطح گشتاور موتورها نیز در حد مناسبی بوده و در بدترین وضعیت گشتاور ۵۰ نیوتن متر نیاز می باشد.

۱۱-۶ دسته آزمون های ۶

در این دسته آزمون ها به پایداری ربات نوین و برتری های ساختار مکانیکی، در مرزهای پایداری پرداخته خواهد شد. به این منظور، چهار آزمون برای بررسی پایداری پیشنهاد شده است.

۶-۱۱-۱ بررسی معیار زاویه مرزی پایداری برای ربات در کارکرد پل

در این آزمون، طی مسیر اول آزمون ۶-۷-۲ مد نظر بوده است. در این بررسی تعادل، زاویه تا مرز پایداری سنجیده شده است. شکل ۶-۴۵. نشان گر این مهم است.



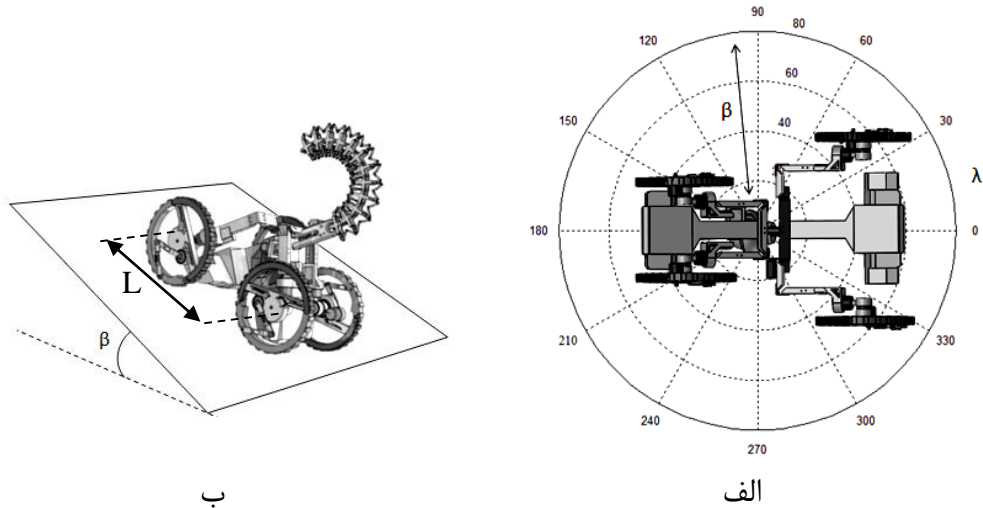
شکل ۶-۴۵ بررسی پایداری در طی مسیر دو بعدی

در شکل ۶-۴۵، نقطه چین، زاویه پایداری تا آستانه پایداری عقب و خط، زاویه پایداری تا آستانه پایداری جلو می باشد. ربات در حرکت تا آستانه پایداری، از سمت عقب و جلو که برابر صفر درجه است؛ فاصله مناسبی دارد.

۶-۱۱-۲ مقایسه ساختار نوین و ساختارهای موجود از دیدگاه پایداری

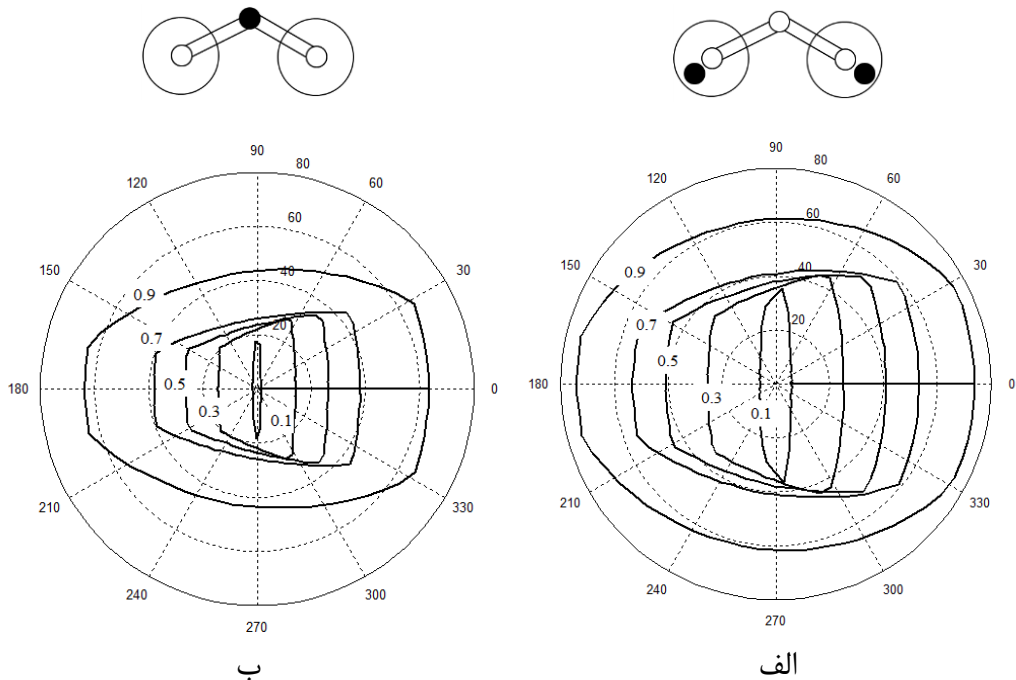
در آزمونی دیگر، مدل دو ربات، یکی با جایگیری مرکز جرم‌های موجود و معمول و دیگری با جایگیری نوین، در سه بعد مورد بررسی قرار گرفته اند. در این بررسی ربات، بر روی یک شیب قرار داده می شود و با تغییر موقعیت ربات روی شیب و فاصله محورها، آستانه پایداری، بررسی می گردد. شکل ۶-۴۶ الف، نشان گر این موضوع است که، اگر ربات، به گونه ای روی شیب قرار گیرد؛ که از طرف زاویه نسبی λ نسبت به مرکز هندسی، در راستای شیب باشد، آنگاه یک بازه

پایداری زاویه ای β ایجاد می‌گردد؛ که طی آن، ربات در آستانه ناپایداری و واژگونی قرار می‌گیرد (با فرض عدم لغزش).



شکل ۶-۴۶ بررسی آستانه پایداری بر روی شیب

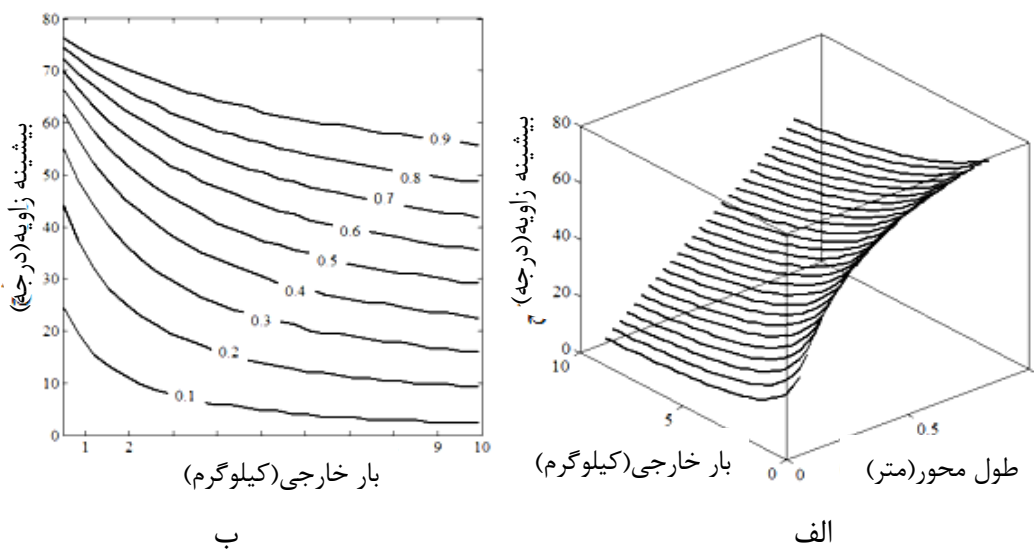
در شکل ۶-۴۷ دو نوع ربات نوین و موجود از نظر مرزهای زاویه پایداری، بررسی شده‌اند. همان گونه که مشاهده می‌شود، مرزهای پایداری روتوپود نسبت به یک ربات موجود، بزرگ‌تر بوده و توانایی پیمایش پایدارتری را روی سطوح ناهموار فراهم آورده است.



شکل ۶-۴۷ نتایج مقایسه مرزهای پایداری در ربات‌های موجود و روتوپود در سه بعد روی شیب. الف روتوپود ب ربات‌های مدل موجود.

۳-۱۱-۶ بررسی تاثیر بار بر روی پایداری ساختار نوین در زوایای خاص

با توجه به اینکه در آزمون ۶-۱۱-۲، برتری چیدمان نوین آشکار شد؛ به بررسی تاثیر بار خارجی اعمال شده بر روی نقطه میانی پرداخته شده است. در این آزمون بارهای گوناگون از صفر کیلوگرم تا ۱۰ کیلوگرم مورد بررسی قرار گرفته اند و فاصله‌های گوناگون محور هم بررسی شده است. شکل ۶-۴۸ نشان گر زاویه شیب بیشینه قابل پذیرش در معیار پایداری، نسبت به فاصله محور و جرم می‌باشد.



شکل ۶-۴۸ تاثیر بار و فاصله محور بر مرز زاویه پایداری روی شیب

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و برآیند

۱-۷ نتایج

یکی از مهم‌ترین مشکلات ربات‌های متحرک، عدم توانمندی در پیمایش همه سطوح می‌باشد. برای برطرف کردن این کاستی ربات‌های چند کارکرد ابداع شده‌اند و این پژوهش نیز رباتی را طراحی و پیشنهاد کرده که با داشتن برتری‌های خاص خود، می‌تواند مشکلات کاوش‌گرها را به حداقل برساند.

مهم‌ترین برتری ربات نوین، دارا بودن توانایی گامزنی همزمان با کارکردهای چرخ و قلاب و گیره است که توانایی‌های یک کاوش‌گر را برای چیرگی بر میدان عملیات، بالاتر می‌برد. (شکل ۶-۴۱). توانمندی ربات در تا شدن بدنه، به ربات این امکان را داده تا علاوه بر بودن در دو کارکرد دو چرخ و چهار چرخ (شکل ۲-۱) بتواند برای نقطه میانی کنترل داشته باشد (شکل ۶-۲۹). این قابلیت، افزون بر توانایی کنترل به ربات کمک می‌کند تا بتواند؛ تاثیر اغتشاشات سطح را تا دامنه مشخص تحت بار بیشینه مشخص از میان بردارد (شکل ۶-۲۸ و شکل ۶-۳۰). با نصب تجهیزات بر بازو، که نیاز به کم بودن اغتشاشات دارند، به اهمیت طرح پی برده می‌شود.

چرخ از نظر توانایی‌های آزمایشگاهی سنجیده شده است؛ و نشان می‌دهد؛ که کارا می‌باشد و سطوح گشتاور و ولتاژ مناسبی را بر روی موتورهای ایجاد می‌کند (شکل ۲-۶ و شکل ۶-۴ و شکل ۶-۲). گیره ساخته شده نیز برای استفاده شدن در انتهای کاوش‌گر مناسب بوده؛ و با تخمین خوبی بیشتر هندسه‌های موجود را با درصد موفقیت بالا برداشت می‌کند (شکل ۶-۶).

با توجه به بدنه نوین، پایداری، یکی از مسائلی است که به خصوص در کارکرد دو چرخ به چهار چرخ و فاصله کم محورها اهمیت می‌یابد. در این طرح، یک جایگیری نوین در اجزا ربات ارائه شده است؛ که به پایداری دستگاه کمک می‌کند (شکل ۲-۷). نتایج آزمون‌های پایداری تضمین کننده صحت کارکرد ربات نوین، در شرایط به مراتب پایدارتر از ربات‌های موجود است (شکل ۶-۴۵ و شکل ۶-۴۶ و شکل ۶-۴۷).

ربات نوین، در بازه پایداری خود، توان حمل بارهای گوناگون و قابل قبولی را دارد. این توانایی تا رسیدن فاصله محورها به نزدیک صفر کاهش می‌یابد (شکل ۶-۴۸).

از دیگر توانایی‌های ربات، استفاده از بازوی مهره‌ای به گونه‌ای است؛ که هم توان گیرش خرطوم مانند و هم توان برداشت از طریق انتهای بازو را دارا می‌باشد (شکل ۶-۳۸ و شکل ۶-۳۹). به دلیل هم طول انتخاب شدن بازو و پاها؛ بازو در مواقع خاص می‌تواند همچون یک پای کامل و مستقل، اعمال نیرو کند و به تعادل کمک کند (شکل ۶-۴۱). به علاوه به دلیل توانایی تا شدن بدنه، ربات می‌تواند از بدنه خود در مواقع خاص به عنوان یک گیره کارا استفاده کند (شکل ۶-۴۱). این امر از دیدگاه شبیه سازی، مستلزم وجود یک موتور قوی در میانه ربات است (شکل ۶-۴۲). در یک جمع بندی نهایی می‌توان گفت که کارایی ربات چند کارکرد نوین، و توانایی چیرگی بر میدان‌های گوناگون، در نمودارهای امکان سنجی کارکرد به نمایش در آمده‌اند.

پیشنهادات

می‌توان با اندکی تغییر بیشتر، در هندسه و دینامیک ربات، این توانایی را نیز فراهم آورد؛ که ربات در مواقع خاص به فرم شبه کروی برسد.

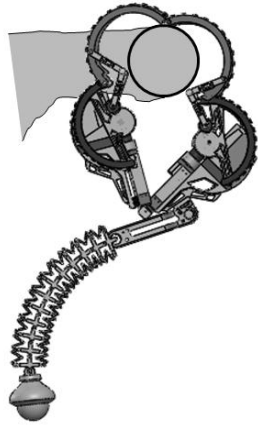
می‌توان دو قسمت پا را نیز به فرم ربات مهره‌ای تغییر داد. این کار به ربات کمک می‌کند که هم پاهای مناسب و هم گیره‌ها و خرطوم‌های قدرت مندی داشته باشد.

کاملاً روشن است که هدف اصلی این پژوهش طراحی و سنجش مکانیکی توانایی‌های ساختار نوین با معیارهای ویژه است. جای خالی الگوریتم‌های کنترلی در کارکردهای گوناگون، برای کمک به کارایی این ربات، احساس می‌شود.

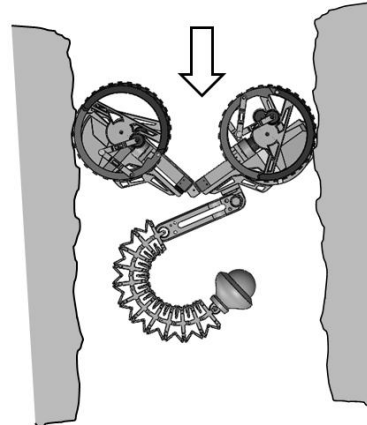
یکی از کاربردهای بالقوه این ربات، در کاوش‌های فضایی می‌باشد. طرح اصلی ربات نیز با این هدف به ذهن رسیده است. می‌توان با بهینه سازی بیشتر ساختار، نمونه یک ربات کامل کاوش گر را طراحی کرد و ساخت.

در جدول ۷-۱ کارکردهای گوناگون پیشنهادی دستگاه نشان داده شده است.

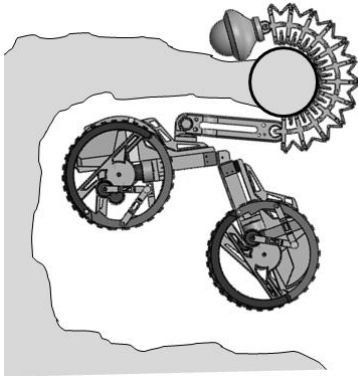
جدول ۷-۱. کارکرد های پیشنهادی



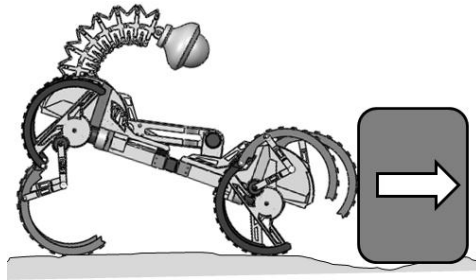
قلاب شدن برای نمونه برداری وارونه



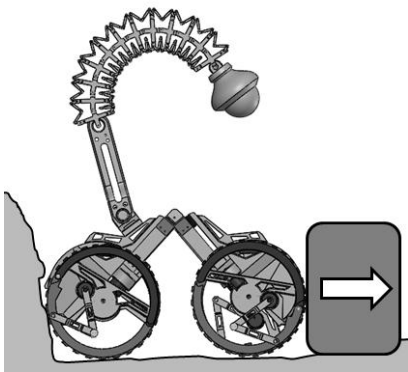
پایین رفتن از میان دیواره های سنگی



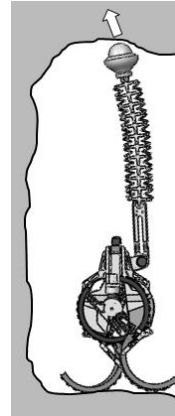
استفاده از بازوی مهره ای برای تعلیق



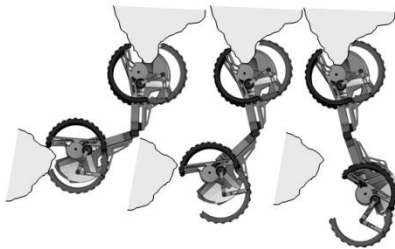
اعمال نیرو برای جابجایی جسم ها



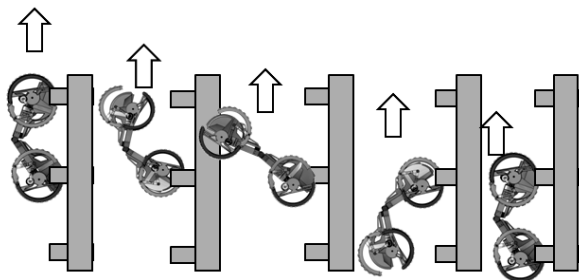
اعمال نیرو با موتور میانی



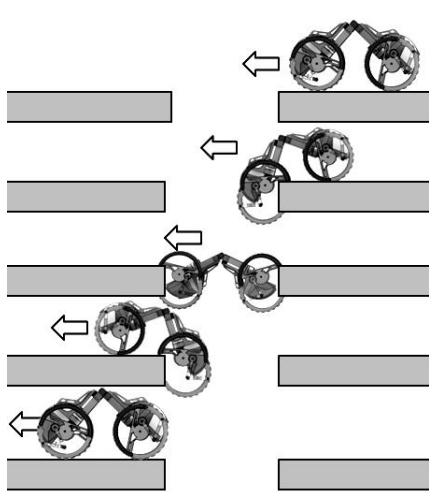
حداکثر ارتفاع برابر با ۲ متر برای نمونه برداری از بالا



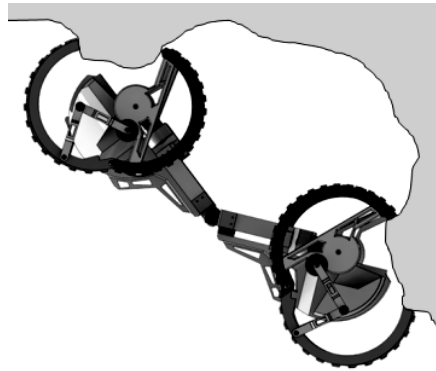
گیره آرواره برای جابجایی



گیره آرواره برای بالا رفتن



عبور از ناپیوستگی‌ها



گیره آرواره دو طرفه برای تعلیق

- [١] Novara M., Putz P., Marechal L. and Losito S. (1998) "Robotics for lunar surface exploration" *Robotics and autonomous systems*, 23, 1, pp 53-63
- [٢] Bares J. and Whittaker W. (1989) "Configuration of an autonomous robot for mars exploration" *1988 Year End Report Autonomous Planetary Rover at Carnegie Mellon*, pp 43
- [٣] Sharkey N. (2008) "Cassandra or false prophet of doom: AI robots and war" *Intelligent Systems, IEEE*, 23, 4, pp 14-17
- [٤] Corke P.I., Winstanley G.J. and Roberts J.M. (1998), Modeling and Control of a 3500 tonne Mining Robot, pp. 262-274, In: "*Experimental Robotics V*", Springer ,
- [٥] Quinn R.D., Nelson G.M., Bachmann R.J. and Ritzmann R.E. (2001) "Toward mission Capable legged robots through biological inspiration" *Autonomous robots* ,٣ ,١١ ,pp 215-220
- [٦] Higham T.E. and Jayne B.C. (2004) "Locomotion of lizards on inclines and perches: hindlimb kinematics of an arboreal specialist and a terrestrial generalist" *Journal of experimental biology*, 207, 2, pp 233-248
- [٧] Irschick D.J .and Jayne B.C. (1999) "Comparative three-dimensional kinematics of the hindlimb for high-speed bipedal and quadrupedal locomotion of lizards" *Journal of experimental biology*, 202, 9, pp 1047-1065
- [٨] Buehler M. (2005). Dynamic locomotion with one, four and six-legged robots: DTIC Document.
- [٩] García C., Cárdenas P.F., Puglisi L.J. and Saltaren R. (2012) "Design and modeling of the multi-agent robotic system: SMART" *Robotics and autonomous systems*, 60, 2, pp 143-153
- [١٠] Tsujita K., Tsuchiya K. and Onat A. (2001), "Adaptive gait pattern control of a quadruped locomotion robot", *Intelligent Robots and Systems*, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on, pp 2318-2325 ,
- [١١] Hardarson F. (2002) "Stability analysis and synthesis of statically balanced walking for quadruped robots" *Royal Institute of Technology*, pp
- [١٢] Kim Y., Kim S.H. and Kwak Y.K. (2005) "Dynamic analysis of a nonholonomic two-wheeled inverted pendulum robot" *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 44, 1, pp ٢٤-٢٥
- [١٣] Halme A., Schonberg T. and Wang Y. (1996), "Motion control of a spherical mobile robot", *Advanced Motion Control*, 1996. AMC'96-MIE. Proceedings., 1996 4th International Workshop on, pp 259-264 ,

- [١٤]Cohen R., Lipton M., Dai M. and Benhabib B" (١٩٩٢) .Conceptual design of a modular robot" *Journal of Mechanical Design*, 114, 1, pp 117-125
- [١٥]Endo G. and Hirose S. (2011), "Study on roller-walker-energy efficiency of roller-walk", Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on, pp 5050-5055 ,
- [١٦]Saranli U., Buehler M. and Koditschek D.E. (2001) "RHex: A simple and highly mobile hexapod robot" *The International Journal of Robotics Research*, 20, 7, pp 616-631
- [١٧]Altendorfer R., Moore N., Komsuoglu H., Buehler M., Brown Jr H.B., McMordie D., Saranli U., Full R. and Koditschek D.E. (2001) "RHex: a biologically inspired hexapod runner" *Autonomous robots*, 11, 3, pp 207-213
- [١٨]Moore E., Campbell D., Grimminger F. and Buehler M. (2002), "Reliable stair climbing in the simple hexapod'RHex'", Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on, pp 2222-2227 ,
- [١٩]Vadakkepat P., Peng X., Quek B.K. and Lee T.H. (2007) "Evolution of fuzzy behaviors for multi-robotic system" *Robotics and autonomous systems*, 55, 2, pp 146-161
- [٢٠]Dalvand M.M. and Moghadam M.M. (2006) "Stair climber smart mobile robot (MSRox)" *Autonomous Robots*, 20, pp 3-14
- [٢١]Grady R., Groß R., Christensen A.L. and Dorigo M. (2010) "Self-assembly strategies in a group of autonomous mobile robots" *Autonomous Robots*, 28, pp 439-455
- [٢٢]Armour R.H. and Vincent J.F. (2006) "Rolling in nature and robotics: a review" *Journal of Bionic Engineering*, 3, 4, pp 195-208
- [٢٣]Klaassen B. and Paap K.L. (1999) "GMD-SNAKE2: a snake-like robot driven by wheels and a method for motion control " *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference*, 4, pp 3014-3019
- [٢٤]Bamdad M. and Faroghi S. (2013) "Stability measure for a parallel cable driven robot" *Modares Mechanical Engineering*, 13, pp 23-34
- [٢٥]Lee J.J. and Lee Y.H. (2003) "Dynamic analysis of tendon driven robotic mechanisms" *Journal of Robotic Systems*, 20, pp 229-238
- [٢٦]Meckl P.H. and Kinceler R. (1994) "Trajectory determination for vibration-free motions of a flexible-joint robot" *American Control Conference*, pp 2521-2525
- [٢٧]Ozawa R., Hashirii K., Yoshimura Y., Moriya M. and Kobayashi H. (2014) "Design and control of a three-fingered tendon-driven robotic hand with active and passive tendons" *Autonomous Robots*, 36, pp 67-78

- [٢٨]Matsuoka Y. (1997) "The mechanisms in a humanoid robot hand " *Autonomous Robots*, 4, pp 199-209
- [٢٩]Chang S.L., Lee J.J. and Yen H.C. (2005) "Kinematic and compliance analysis for tendon-driven robotic mechanisms with flexible tendons" *Mechanism and machine theory*, 40, pp 728-739
- [٣٠]Wimbock T., Ott C. and Hirzinger (2010) "GImmersion and invariance control for an antagonistic joint with nonlinear mechanical stiffness" *Decision and Control (CDC), 20٢٩ ١٠th IEEE Conference* pp 1128-1135
- [٣١]Mori S., Komada S. and Hirai J. (2011), "Simple tension distribution converting workspace commands for 2-joint arm with 3 pairs of 6 tendons", *Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2011 IEEE International Conference on, pp 1795-1800 ,
- [٣٢]Sawada D. and Ozawa R. (2012), "Joint control of tendon-driven mechanisms with branching tendons", *Robotics and Automation (ICRA)*, 2012 IEEE International Conference on, pp 1501-1507 ,
- [٣٣]Ma S., Hirose S. and Yoshinada H. (1993) "Design and experiments for a coupled tendon-driven manipulator" *Control Systems, IEEE*, 13, pp 30-36
- [٣٤]Deshpande A.D., Ko J., Fox D. and Matsuoka Y. (2013) "Control strategies for the index finger of a tendon-driven hand" *The International Journal of Robotics Research*, 32, pp 115-128
- [٣٥]Jacobsen S.C., Ko H., Iversen E.K. and Davis C.C. (1990) "Control strategies for tendon-driven manipulators" *Control Systems Magazine*, 10, pp 23-28
- [٣٦]Routhier F. "On the Design of a Mechanically Programmable Underactuated Anthropomorphic Prosthetic Gripper", pp
- [٣٧]Mcmahan W., Chitrakaran V., Csencsits M., Dawson D., Walker I.D., Jones B.A. and Rahn C.D. (2006) "Field trials and testing of the OctArm continuum manipulator" *Robotics and Automation. ICRA .٢٠٠٦ Proceedings 2006 IEEE International Conference*, pp 2336-2341
- [٣٨]Monkman G.J., Hesse S. and Steinmann R. (2007) "Robot grippers" *Wiley-VCH*, pp
- [٣٩]Kaneko M., Higashimori M., Takenaka R. and Namiki A. (2003) "The 100 G capturing robot-too fast to see" *Mechatronics , IEEE/ASME Transactions*, 8, pp 37-44
- [٤٠]Tsourveloudis N., Valavanis K. and Kolluru R. (1999) "Position and suction control of a reconfigurable robotic gripper" *Machine Intelligence and Robotic Control*, 11, pp 53-62
- [٤١]Roy.D" (٢٠٠٦) Design and Developmental Metrics of a ‘Skin-Like’Multi-Input Quasi-Compliant Robotic Gripper Sensor Using Tactile Matrix" *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 46, pp 305-337

- [٤٢] D N.J., H D.K. and T M.E. (2001) "Tongue-based electrotactile feedback to perceive objects grasped by a robotic manipulator" *IEEE Conf. On EMBS*, pp
- [٤٣] Rienmüller.T (1988) "A shape adaptive gripper finger for robots" *Proc 18th International Symposium on Industrial Robots, Switzerland*, pp 241–250
- [٤٤] Selles.M A. and Perez-Bernabeu.E (2012) "A design approach to a standard manipulator" *Scientific Bulletin of the , Petru Maior, University of Tîrgu Mure, 9*, pp 2
- [٤٥] Ap P. (1980) "Universal grippers for industrial robots" *Russ Eng J*, 60, pp 3-4
- [٤٦] Korayem.Mh, .M B. and M S. (2007) "Workspace analysis of cable-suspended robots with elastic cable" *IEEE Robotics and Biomimetics*, pp
- [٤٧] Schmidt I. (1978) "Flexible moulding jaws for grippers. Industrial Robot" *An International Journal*, 5, pp 24-26
- [٤٨] Majmudar.Ts, Sperl.M, .S L. and .Rp B. (2007) "Jamming transition in granular Systems", pp
- [٤٩] Ei C. and .Hm J. (2005) "Structural signature of jamming in granular media" 435, pp 1075–1078
- [٥٠] Jaeger.Hm, .Sr N. and .Rp B. (1996) "Granular solids ,liquids, and gases" 68, pp 1259–1273
- [٥١] Aj L. and .Sr N. (1998) "Jamming is not just cool any more" *Nature*, 396, pp 21–22
- [٥٢] Amend J.R., Brown E.M., Rodenberg N., Jaeger H.M. and Lipson H. (2012) "A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material" *Robotics, IEEE Transactions on*, 28, pp 341-350
- [٥٣] Brown E., Rodenberg N., Amend J., Mozeika A., Steltz E., Zakin M.R. and Jaeger H.M. (2010) "Universal robotic gripper based on the jamming of granular material" *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 44, pp 18809-18814
- [٥٤] Kumar A. and Waldron K. (1981) "The workspaces of a mechanical manipulator" *Journal of Mechanical Design*, 103, 3, pp 665-672
- [٥٥] Hoffman K. (2013) "Analysis in Euclidean space" *Courier Dover Publications*, pp
- [٥٦] Yang D.C.H. and Lee T.W. (1983) "On the workspace of mechanical manipulators" *Journal of Mechanical Design*, 105, pp 62-69
- [٥٧] Gupta K.C. and Roth B. (1982) "Design considerations for manipulator workspace" *Journal of Mechanical Design*, 104, pp 704-711
- [٥٨] Gupta K.C. (1986) "On the nature of robot workspace" *The International Journal of Robotics Research*, 5, pp 112-121

- [٥٩] Salisbury J.K. and Craig J.J. (1982) "Articulated hands force Control and Kinematic issues" *The International Journal of Robotics Research*, 1, pp 4-17
- [٦٠] Asada H. (1983) "A geometrical representation of manipulator dynamics and its application to arm design" *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 105, pp 131-142
- [٦١] Yoshikawa T. (1985) "Dynamic manipulability of robot manipulators. In Robotics and Automation. Proceedings" *IEEE International Conference*, 2, pp 1033-1038
- [٦٢] Voglewede P.A. and Ebert-Uphoff I. (2004) "Measuring" closeness" to singularities for parallel manipulators" *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04*, 5, pp 4539-4544
- [٦٣] Bowling A. and Khatib O. (2005) "The dynamic capability equations: a new tool for analyzing robotic manipulator performance" *Robotics, IEEE Transactions on*, 21, pp 115-123
- [٦٤] Loncaric J. (1985) "Geometrical analysis of compliant mechanisms in robotics" *euclidean group, elastic systems, generalized springs*, pp
- [٦٥] Paden B. and Sastry S. (1988) "Optimal kinematic design of 6R manipulators" *The International Journal of Robotics Research*, 7, pp 43-61
- [٦٦] Meirovitch L. and Parker R.G. (2001) "Fundamentals of vibrations" *Applied Mechanics Reviews*, pp 54-100
- [٦٧] Papadopoulos E. and Rey D.A. (2000) "The force-angle measure of tipover stability margin for mobile manipulators" *Vehicle System Dynamics*, 33, pp 29-48
- [٦٨] Papadopoulos E.G. and Rey D.A. (1996) "A new measure of tipover stability margin for mobile manipulators. In Robotics and Automation" *1996 IEEE International Conference*, 4, pp 3111-3116(
- [٦٩] Schilling R. (2013) "Fundamentals of robotics", pp
- [٧٠] Bowling A.P. (2006) "Dynamic performance, mobility, and agility of multilegged robots" *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 128, pp 765-777
- [٧١] Nakamura Y. (1990), "*Advanced robotics :redundancy and optimization* ", مترجم: Reprinted from: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., pp
- [٧٢] Khulief Y.A. and Shabana A.A. (1987) "A continuous force model for the impact analysis of flexible multibody systems" *Mechanism and machine theory* , ٢٢ ,pp 213-224
- [٧٣] Borello L., Maggiore P., Villero G. and Dalla Vedova M.D.L. (2010) "a comparison between dry friction discontinuous computational algorithm", pp

- [٧٤] Flickinger D.M. and Bowling A. (2010) "Simultaneous oblique impacts and contacts in multibody systems with friction" *Multibody System Dynamics*, 23, pp 249-261
- [٧٥] Bowling A. and Khatib O. (2005) "The dynamic capability equations: a new tool for analyzing robotic manipulator performance" *Robotics, IEEE Transactions on*, 21, 1, pp ١٢٣-١١٥
- [٧٦] Korayem M. and Bamdad M. (2009) "Dynamic load-carrying capacity of cable-suspended parallel manipulators" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44, 7-8, pp 829-840

Abstract

Explorer robot, is the one of more important once in exploration activities. They have been built in various type like legged robot and wheeled driven robots and have been shaped in various structure according to different missions. Different structures provide some disadvantages and problems. For example, some restrictions of action can be mentioned. Multimode robots have more ability in exploring than other simple mode robots. Using an assistant arm for exploring can be helpful for improving the ability of exploring robots. If the robot faces ambiguous and complex surfaces, it must be able to hold various objects and move on the uneven surface. In this research, it is considered by innovating new mobile robot and combining it by new continuum robot, more mechanical ability will be obtained. On the other hand, the stability is one of more important matters in new robot actions. So in this new case, a more level of stability is provided in comparison with the other robots. Proofing the ability of the new structure and advantages of the novel robot is provided by dynamic equation extracting by langrage method, dynamic capability equations, stability margins investigated in 3D space, proposing new index (volume of ability). Demonstrating some advantages have not been limited to theoretical proofs and simulations. There are some experimental tests and producing some new parts that are innovated for the first time. On the other hand, the experimental results can be used in correction of formulations and determination of some constant forces. New robot is named ROTOPOD which is inspired by ability of being in legged and wheeled modes. This idea is expanded by this phenomenon that no new element is added to robot. The advantages are provided not only by no new elements but also by exchanging geometrical form of robot.

Keywords: Multimode robots, Granual gripper, Back bone robots, Continuum robots, Dynamic Capabilities equation, Stability.



Shahrood University of Technology
Faculty of mechanic engineering
Department of mechatronic Engineering

M.S Thesis

Motion planning for a continuum mobile manipulator.

ArmanMardany

Supervisor:

Dr.Mahdi bamdad

September 2014