دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان

دانشکده‌ی فنی و مهندسی

گروه مکانیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد

رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

تحلیل سینماتیکی ربات‌های موازی سه درجه و پنج درجه آزادی با آرایش سینماتیکی یکسان

استاد راهنمای اول
دکتر فرهاد شیخ سامانی

استاد راهنمای دوم
دکتر مهدی طالع ماسوله

نگارنده
شقایق نصیری

اسفند۱۳۹۲

تشکر و قدردانی:

سپاس و ستایش مر خدای را جل و جلاله که آثار قدرت او بر چهره ی روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار درخشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ی ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید.

لازم می دانم از راهنمایی های عالمانه و مدبرانه ی اساتید ارجمندم جناب آقای دکتر شیخ سامانی و دکتر طالع ماسوله کمال تشکر و سپاسگزاری را داشته باشم که در کمال سعه ی صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و همواره با راهنمایی های خود، مرا یاری و راهنمایی نموده اند.

در پایان از همه ی دوستان و همکلاسی های خوبم به ویژه خانم مهندس مهدیه عبداللهی و آقایان علیرضا عباسی، پیام قاسمی و میلاد حسن وندکه در تدوین این پایان نامه مرا

یاری نمودند کمال تشکر را دارم.

تقدیم به:

مادر عزیزتر از جانم

دریای بیکران عشق و فداکاری، چشمه ی زلال مهربانی، به او که وجودم همه برایش رنج بوده و وجودش برایم همه مهر، که هرچه بکوشم قطره ای از دریای بیکران مهربانیش را سپاس نتوانم گویم.

پدر عزیزم که نمی دانم از بزرگی اش بگویم یا از مردانگی، از سخاوت یا مهربانی، به او که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه ی زندگی ایستادگی را تجربه کنم.

برادران عزیزم

نمی توانم معنایی بالاتر از تقدیر بر زبان جاری سازم، رهاوردی گران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم گونه غبار خستگیتان را بزداید.

چکیده

در این پایان‌نامه تحلیل سینماتیکی و استاتیکی ربات‌های سه و پنج درجه آزادی موازی متقارن ارائه شده است. این تحلیل‌ها برای ربات‌های ۳-RRR، ۳-RSR، ۳-RRS و ۳-RCC تا به امروز انجام نشده است. ربات موازی یک مکانیزم با زنجیره‌ی سینماتیکی بسته است که سکوی متحرک به‌وسیله‌ی چند زنجیره‌ی مستقل سینماتیکی به پایه متصل می‌باشد. ربات‌های سه درجه آزادی از یک صفحه‌ی پایینی(پایه ثابت)، صفحه‌ی بالایی (مجری نهایی) و سه بازو تشکیل شده‌اند. ربات‌های پنج درجه آزادی همانند سه درجه آزادی اما با پنج بازو هستند. درجه آزادی ربات‌ها با استفاده از تئوری پیچه محاسبه و معادلات سینماتیک مستقیم و معکوس آن‌ها بیان شده‌اند. همچنین ماتریس ژاکوبین محاسبه و تحلیل تکینگی ربات‌ها صورت گرفته است. با بررسی ماتریس ژاکوبین ربات‌ها این نتیجه برداشت شده است که سینماتیک ربات‌های سه درجه آزادی مورد مطالعه یکسان هستند. برای تحلیل استاتیکی، ربات‌ها در نرم‌افزار آدامز شبیه‌سازی شده‌اند و معادلات تعادل استاتیکی نیز نوشته شده و در نرم‌افزار متلب حل شده‌اند. نهایتا گشتاور موتورهای نصب شده در مفاصل عملگر در هر یک از دو نرم‌افزار محاسبه شده‌اند. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از نرم‌افزارها صحت تحلیل تایید شده است.

کلمات کلیدی: تحلیل سینماتیکی و استاتیکی، ربات‌های سه و پنج درجه آزادی، زنجیره‌ی سینماتیکی بسته، سکوی متحرک، درجه آزادی، تئوری پیچه، ماتریس ژاکوبین، تحلیل تکینگی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- تاریخچه‌ی ربات‌های موازی ۳

۱-۳- بیان مسئله و هدف از انجام پایان‌نامه ۱۴

فصل دوم: دسته‌بندی ربات‌ها

۲-۱- مقدمه ۱۵

۲-۲- دسته‌بندی ربات‌ها از چند منظر ۱۵

۲-۲-۱- از نظر سینماتیکی ۱۵

۲-۲-۲- از نظر نوع محرک ۲۱

۲-۲-۳- از نظر کنترلی ۲۱

۲-۳- مفاصل و درجات آزادیشان در ربات‌ها ۲۳

فصل سوم: روش پژوهش (تحلیل سینماتیکی ربات‌ها)

۳-۱- مقدمه ۲۷

۳-۲- سینماتیک معکوس ۲۸

۳-۲-۱- ..... استخراج معادلات سینماتیک معکوس ربات‌های RSR-۳ و RRS-۳ و RCC-۳ ..... ۲۹

۳-۳- سینماتیک مستقیم ۳۵

۳-۳-۱- استخراج معادلات سینماتیک مستقیم ربات‌های RSR-۳ و RRS-۳ و RCC-۳ ..... ۴۰

۳-۴- محاسبه‌ی درجه آزادی ۴۳

۳-۵- تئوری پیچه ۴۵

۳-۶- ضرب دوسویه‌ی پیچه و سیستم‌های ضرب دوسویه ۴۷

۳-۷- دستگاه توییست و رنچ ۴۸

۳-۸- ماتریس ژاکوبین ۵۶

۳-۹- به‌دست آوردن ماتریس ژاکوبین با استفاده از تئوری پیچه ۵۶

۳-۱۰- تحلیل تکینگی ربات ۵۸

عنوان **صفحه**

۳-۱۱- فضای کاری ربات‌های موازی ۵۹
۳-۱۲- تحلیل تکینگی و فضای کاری ربات‌های سه درجه آزادی مورد نظر ۶۲
فصل چهارم: روش پژوهش (معادلات استاتیکی ربات‌های سه و پنج درجه آزادی)
۴-۱- مقدمه ۶۶
۴-۲- ساختار هندسی ربات‌های موازی سه درجه آزادی ۶۷
۴-۲-۱- ساختار هندسی ربات موازی سه درجه آزادی ۳-RRR ۶۷
۴-۲-۲- ساختار هندسی ربات موازی سه درجه آزادی ۳-RSR ۶۸
۴-۲-۳- ساختار هندسی ربات موازی سه درجه آزادی ۳-RRS ۶۹
۴-۲-۴- ساختار هندسی ربات موازی سه درجه آزادی ۳-RCC ۷۰
۴-۳- تحلیل استاتیکی ربات‌های سه درجه آزادی ۷۱
۴-۳-۱- تحلیل استاتیکی ربات موازی سه درجه آزادی ۳-RRR ۷۱
۴-۳-۲- تحلیل استاتیکی ربات موازی سه درجه آزادی ۳-RSR ۷۶
۴-۳-۳- تحلیل استاتیکی ربات موازی سه درجه آزادی ۳-RRS ۷۹
۴-۳-۴- تحلیل استاتیکی ربات موازی سه درجه آزادی ۳-RCC ۸۲
۴-۳-۵- تحلیل استاتیکی ربات پنج درجه آزادی ۵-RRRRR ۸۵
فصل پنجم: بحث و نتایج عددی
۵-۱- مقدمه ۹۶
۵-۲- نتایج خروجی برای ربات‌های سه درجه آزادی ۹۶
۵-۳- نتایج خروجی برای ربات پنج درجه آزادی ۵-RRRRR ۱۰۱
۵-۴- نتیجه‌گیری و روند پیش رو ۱۱۴
۵-۵- پیشنهادها ۱۱۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- اولین ربات موازی سال ۱۹۴۲ ..... ۳
شکل ۱-۲- اولین مکانیزم با شش بازوی گاف ۴
شکل ۱-۳- آخرین نمونه از یک پلت فرم گاف در شرکت لاستیک Dunlop ۴
شکل ۱-۴- میز لرزنده برای شبیه‌سازی زلزله در دانشگاه مینه سوتا ۵
شکل ۱-۵- بالا: شبیه‌ساز اولیه که حرکت را از ۶ نازل نیتروژن می‌گیرد (۱۹۵۶). پایین: شبیه‌ساز rendez-vous با ۲ درجه آزادی (NASA) (۱۹۶۲) ۶
شکل ۱-۶- پلت فرم استوارت (۱۹۶۵) ۷
شکل ۱-۷- شبیه‌ساز پرواز برای اولین بار که در سال ۱۹۶۰ توسط کاپل طراحی شد ۸
شکل ۱-۸- طرحی کلی از ربات Delta ۹
شکل ۱-۹- ربات Adept Quattro s650 ..... ۹
شکل ۱-۱۰- ربات چشم‌چابک دانشگاه (Laval, Canada) ۱۱
شکل ۲-۱- نمونه‌ای از ربات سریال PUMA 500 ..... ۱۷
شکل ۲-۲- مکانیزم موازی، شبیه‌ساز پرواز (Courtesy of CAE) ۱۸
شکل ۲-۳- شماتیکی از مکانیزم هیبریدی Exechon ۱۹
شکل ۲-۴- (A) مفصل چرخشی (B) مفصل کشویی (C) مفصل هوک ۲۴
شکل ۲-۵- مفصل کروی و مفصل استوانه‌ای ۲۴
شکل ۳-۱- ربات صفحه‌ای سه درجه آزادی ۲۹
شکل ۳-۲- مدل کد ربات‌های سه درجه آزادی مورد مطالعه الف: مکانیزم RSR-۳ ب: مکانیزم RRS-۳ ج: مکانیزم RCC-۳ ..... ۳۱
شکل ۳-۳- ربات RRR-۳ در موقعیت اولیه‌ی خود ۳۲
شکل ۳-۴- مکانیزم ۴ میله و برخی از منحنی‌های متصل ۳۶
شکل ۳-۵- ربات RPR-۳ ..... ۳۷
شکل ۳-۶- چپ، شش حالات چیدمان یک ربات موازی صفحه‌ای. راست، منحنی متصل. ۳۸
شکل ۳-۷- یک پیچه ۴۶
شکل ۳-۸- بردار پیچه ۴۷
شکل ۳-۹- ضرب دوسویه‌ی پیچه ۴۸

عنوان **صفحه**

شکل ۳-۱۰- ضرب دوسویه‌ی پیچه برای (a) دو مفصل چرخشی (b) یک مفصل چرخشی و یک مفصل کشویی ۴۹
شکل ۳-۱۱- فضای کاری دوران ثابت ۶۰
شکل ۳-۱۲- فضای کاری موقعیت ثابت ۶۰
شکل ۳-۱۳- فضای کاری قابل دسترس ۶۱
شکل ۳-۱۴- فضای کاری ربات موازی سه درجه آزادی ۳-RRR ۶۲
شکل ۳-۱۵- شماتیک زوایای مربوط به ربات ۳-RRR ۶۳
شکل ۳-۱۶- فضای کاری (نقاط آبی رنگ) و منحنی تکینگی (نقاط مشکی رنگ) طراحی‌های پیشنهاد شده درجدول (۳-۳) ۶۴
شکل ۴-۱- مدل کد مکانیزم ۳-RRR ۶۸
شکل ۴-۲- مدل کد مکانیزم ۳-RSR ۶۹
شکل ۴-۳- مدل کد مکانیزم ۳-RRS ۷۰
شکل ۴-۴- مدل کد مکانیزم ۳-RCC ۷۱
شکل ۵-۱- نتایج خروجی برای ربات‌های سه درجه آزادی: (الف): مکانیزم ۳-RRR (ب): ۳-RSR (ج): ۳-RRS (د): ۳-RCC ۱۰۴
شکل ۵-۲- نتایج خروجی برای ربات پنج درجه آزادی ۵-RRRRR ۱۱۳

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱- مقایسه بین ربات سری و موازی ۲۰
جدول ۳-۱- الگوی حرکت در مکانیزم‌های موازی ۴۵
جدول ۳-۲- توییست و رنچ برای مفاصل ۴۸
جدول ۳-۳- طراحی‌های ربات ۳-RRR ۶۳
جدول ۵-۱- اندازه‌های مربوط به مکانیزم ۳-RRR ۹۷
جدول ۵-۲- اندازه‌های مربوط به مکانیزم ۳-RSR ۹۸
جدول ۵-۳- اندازه‌های مربوط به مکانیزم ۳-RRS ۹۹
جدول ۵-۴- اندازه‌های مربوط به مکانیزم ۳-RCC ۱۰۰
جدول ۵-۵ -تعاریف مربوط به وزن لینک‌های مکانیزم ۵-RRRRR ۱۰۱
جدول ۵-۶- تعاریف مربوط به فواصل مفاصل لینک‌های مکانیزم ۵-RRRRR از یکدیگر ۱۰۴
جدول ۵-۷- تعاریف مربوط به فواصل مرکز جرم لینک‌ها از مفصل ابتدایی همان لینک مکانیزم ۵-RRRRR ۱۰۵
جدول ۵-۸- تعاریف مربوط به زوایای بین محورهای مختصات هر مفصل با محورهای دستگاه مختصات اصلی مکانیزم ۵-RRRRR ۱۰۵
جدول ۵-۹- اندازه‌های مربوط به مکانیزم ۵-RRRRR ۱۰۶

فصل اول

کلیات پژوهش

۱-۱-مقدمه

کلمه‌ی ربات بعد از به صحنه درآمدن یک نمایش در سال ۱۹۲۰ میلادی در فرانسه متداول و مشهور گردید. در این نمایش که اثر«کارل کپک[1]» بود، موجودات مصنوعی شبیه انسان، وابستگی شدیدی نسبت به اربابان خویش از خود نشان می‌دادند. این موجودات مصنوعی شبیه انسان در آن نمایش، ربات نام داشتند.

ربات دستگاهی الکترومکانیکی برای انجام وظایف گوناگون است. یک ماشین که می‌تواند برای عمل به دستورهای گوناگون برنامه‌ریزی گردد و یا یک سری کارهای ویژه انجام دهد. به ویژه آن دسته از کارها که فراتر از توانایی‌های طبیعی و سرشتی بشر باشند. این ماشین‌های مکانیکی برای بهتر به انجام رساندن کارهایی چون احساس کردن، دریافت نمودن و جابجایی اشیا یا کارهای تکراری مانند جوشکاری فراوری می‌شوند.

به‌طور کلی ربات‌ها باید چندین ویژگی شاخص داشته باشند مانند:

- از مواد مصنوعی ساخته شده باشد.
- قادر به درک محیط خود باشد.
- بتواند در اشیای محیط خود تأثیر گذارد.
- درجه‌ای از هوش داشته باشد، یا توانایی انتخاب بر اساس محیط را داشته باشد، یا به‌صورت

[1] Karl kepek

کنترل خودکار برنامه‌ریزی مجدد شود.

- قابل برنامه‌ریزی باشد.

در حال حاضر ربات‌هایی را که در شاخه‌های مختلف صنایع مورد استفاده می‌باشند، می‌توان به‌عنوان « ماشین‌های مدرن، خودکار، قابل هدایت و برنامه‌ریزی» تعریف کرد. این ربات‌ها قادرند در محل‌های متفاوت خطوط تولید، به‌طور خودکار، وظایف گوناگون تولیدی را تحت یک برنامه از پیش نوشته شده انجام دهند.

گاهی ممکن است یک‌ربات، جای اپراتور را در خط تولید بگیرد و زمانی این امکان هم وجود دارد که یک کار مشکل و یا خطرناک به عهده‌ی ربات واگذار شود. همان‌طور که یک ربات می‌تواند بصورت منفرد یا مستقل به کار بپردازد، این احتمال نیز وجود دارد که چند ربات به‌صورت جمعی و به شکل رایانه‌ای در خط تولید به‌کار گرفته شوند.

مزایای ربات‌ها:

رباتیک و اتوماسیون در بسیاری از موارد می‌توانند ایمنی، میزان تولید، بهره و کیفیت محصولات را افزایش دهند.

- ربات‌ها می‌توانند در موقعیت‌های خطرناک کار کنند و با این کار جان هزاران انسان را نجات دهند. برای مثال امروزه برای بررسی وضعیت داخلی رآکتورها از ربات استفاده می‌شود تا تشعشعات رادیواکتیو به انسان‌ها صدمه نزند.
- ربات‌ها به‌راحتی محیط اطراف خود توجه ندارند و نیازهای انسانی برای آن‌ها مفهومی ندارد. ربات‌ها هیچ‌گاه خسته نمی‌شوند.
- دقت ربات‌ها خیلی بیشتر از انسان‌ها است آن‌ها در حد میلی یا حتی میکرو اینچ دقت دارند.
- ربات‌ها می‌توانند در یک لحظه چند کار را با هم انجام دهند.

معایب ربات‌ها:

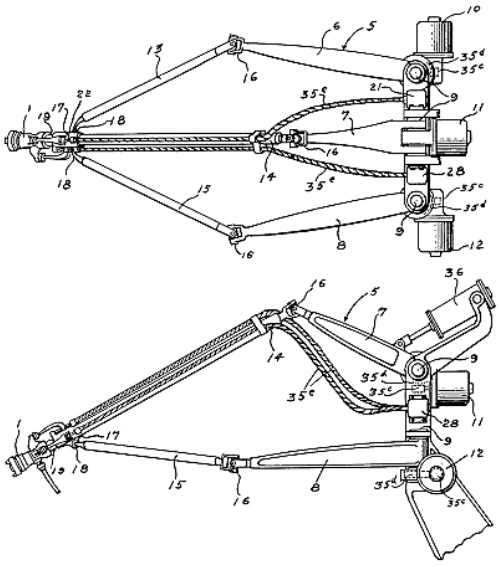
- ربات‌ها در موقعیت‌های اضطراری توانایی پاسخگویی مناسب ندارند که این مطلب می‌تواند بسیار خطرناک باشد.
- ربات‌ها هزینه‌بر هستند.
- قابلیت‌های محدود دارند یعنی فقط کاری که برای آن ساخته شده‌اند را انجام می‌دهند.

البته مشکلات دیگری هم هست. یک ربات مانند هر ماشین دیگری، می‌تواند بشکند یا به هر علتی خراب شود. ضمناً آن‌ها ماشین‌های قدرتمندی هستند که به ما اجازه می‌دهند کارهای معینی را کنترل کنیم. خوشبختانه خرابی ربات‌ها بسیار نادر است زیرا سیستم رباتیک با مشخصه‌های

امنیتی زیادی طراحی می‌شود که می‌تواند آسیب آن‌ها را محدود کند.

۱-۲-تاریخچه‌ی ربات‌های موازی

یکی از اولین شواهد مستند از یک مکانیزم پیچیده، یک مدل ساعت آبی قدیمی می‌باشد، که توسط سی‌تسیبیوس[1] فیزیکدان و مخترع یونانی ساخته شده است و می‌تواند به‌عنوان یکی از اولین ربات‌هایی که تاکنون در تاریخ بشر ساخته شده است در نظر گرفته شود (Vitruve *et al.*, 1999). در اواخر دهه‌ی هشتاد، رباتی که دارای اینرسی کمتر و استحکام بالاتر، سرعت حرکت و دقت، همراه با قابلیت جابجایی بارهای بزرگتر را داشته باشد، مورد نیاز واقع شد. این تقاضا، تحقیق و توسعه را به لحاظ کشف ساختاری جدید در ربات با ویژگی‌های عملکرد بالا، افزایش داد. همچنین ربات‌های موازی علاقه‌ی بیشتری را به خود جلب کردند، و باعث ایجاد یک مرکز تحقیقاتی رباتیک با چند بخش کاربردی مانند عملیات ماشینکاری و شبیه‌سازی هواپیما شدند. بسیاری از دانشمندان درباره‌ی این مکانیزم تحقیق کردند و انواعی از ربات‌های موازی جدید را اختراع کردند. در ذیل برخی از ربات‌های کاربردی را معرفی می‌کنیم.

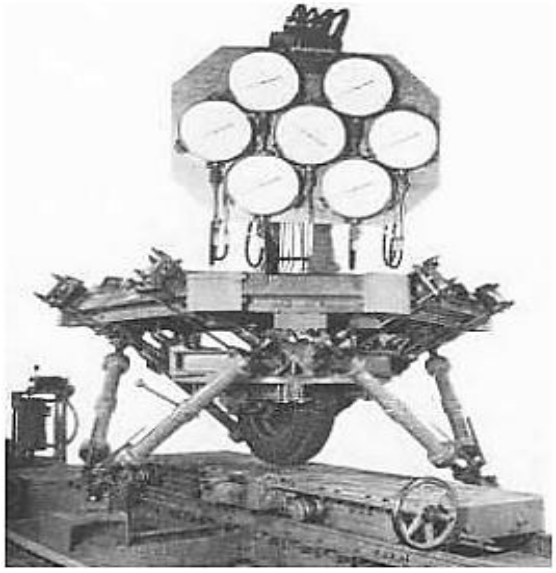


شکل ۱-۱: اولین ربات موازی سال ۱۹۴۲ (Pollard, ۱۹۴۲)

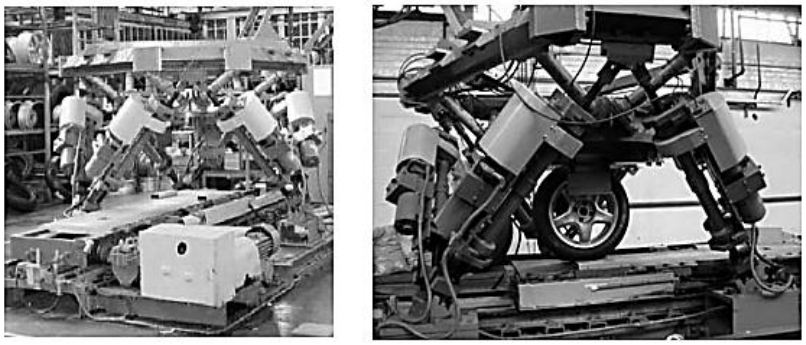
در جامعه‌ی سینماتیک موازی، ربات پولارد[2] به‌عنوان اولین طراحی صنعتی ربات موازی،

[1] Ctesibius
[2] Pollard

شناخته شده است. وی این ربات را در سال ۱۹۴۲ ساخت (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۲: اولین مکانیزم با شش بازوی گاف[1] (Gough and Whitehall, ۱۹۶۲)

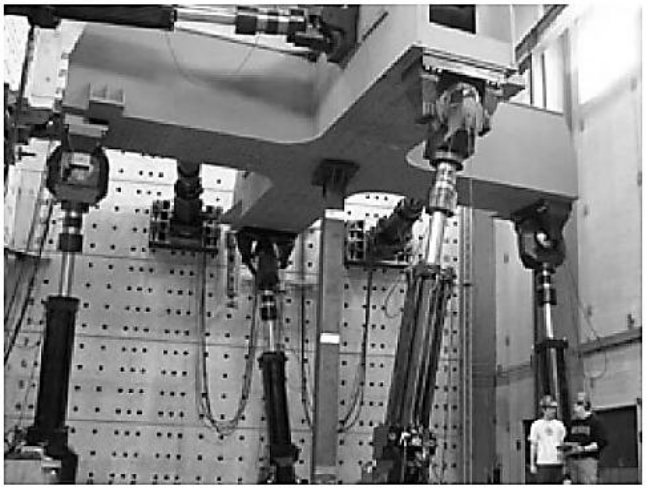


شکل ۱-۳: آخرین نمونه از یک پلت فرم گاف در شرکت لاستیک Dunlop . (Gough and Whitehall, ۱۹۶۲)

[1] Gough

در سال ۱۹۴۷ گاف (۱۹۵۶-۱۹۵۷) یک مکانیزم را با یک ساختار حرکتی حلقه بسته اختراع کرد (شکل ۱-۲)، که در آن از موقعیت و جهت صفحه‌ی متحرک[1] برای تست و فرسودگی لاستیک استفاده می‌شد. یک نمونه‌ی اولیه از این دستگاه در سال ۱۹۵۵ ساخته شده است (Gough and Whitehall, ۱۹۶۲). برای این ساختار، عضو متحرک یک صفحه‌ی شش ضلعی است، که رئوس هر لینک با یک مفصل گلوله-کاسه‌ای[2] به هم متصل شده‌اند و انتهای دیگر لینک توسط مفصل یونیورسال[3] به پایه متصل شده است. محرک خطی در این سیستم باعث تغییر طول لینک می‌شود، این مکانیزم یک ساختار سینماتیکی حلقه بسته است که به‌وسیله‌ی شش محرک خطی فعال می‌شود. این وسیله تا سال ۲۰۰۰ مورد استفاده قرار می‌گرفت (شکل ۱-۳).

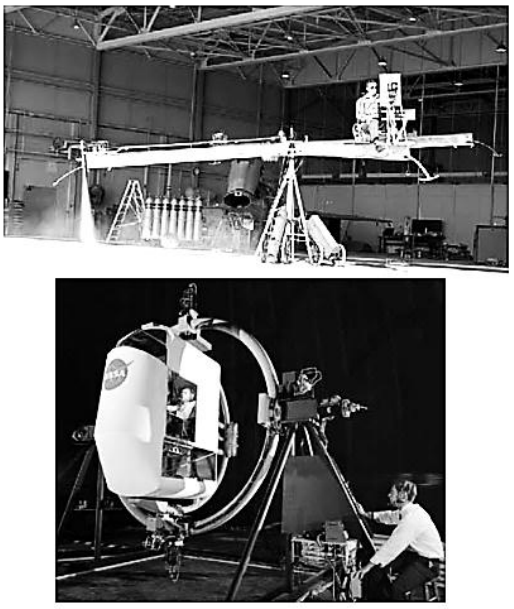
همان‌طور که در مقاله‌ی بونوی[4] (۲۰۰۱) اشاره شده است، گاف برای اولین بار طراح یک نمونه‌ی کاربردی از ربات موازی با شش پایه بود. این نوع سیستم بسیار شناخته شده است و بنام میز شبیه‌ساز یا میز لرزنده با موقعیت عمودی پایه‌ها نامگذاری شده است که در انجمن لرزه‌نگاری مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای این‌که کوچکترین لرزش در حرکت صفحه را می‌تواند به آسانی تفسیر کند (شکل ۱-۴).



شکل ۱-۴: میز لرزنده برای شبیه‌سازی زلزله در دانشگاه مینه سوتا. (Bonev, ۲۰۰۱)

[1] Platform
[2] Ball-and-socket joint
[3] Universal joint
[4] Bonev

از این نوع مکانیزم در زمانی که اولین شبیه‌ساز پرواز ساخته شد، استفاده کردند. در دهه‌ی ۱۹۶۰، توسعه‌ی صنعت هوانوردی، افزایش در هزینه‌های آموزش خلبانی، نیاز به تست تجهیزات جدید در پرواز، محققان را بر آن داشت تا نگاهی به مکانیزم‌هایی با درجات آزادی مختلف داشته باشند که می‌تواند یک سکوی به شدت بارگذاری شده را با دینامیک بالا شبیه‌سازی کند (برای مثال کابین خلبان هواپیما). تصاویری از شبیه‌سازی‌های اولیه در شکل ۱-۵ ارائه شده است. به دلیل کاهش اثرات مخرب (اثر کوریولیس)، جرم بازو برای دینامیک ربات مهم است. به همین دلیل استفاده از ربات سریال در همه‌ی این حالات سخت است.

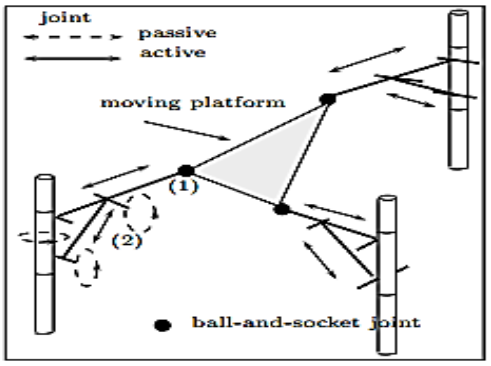


شکل ۱-۵: : بالا: شبیه‌ساز اولیه که حرکت را از ۶ نازل نیتروژن می‌گیرد (۱۹۵۶). پایین: شبیه‌ساز رندز ووس[1] با دو درجه آزادی (۱۹۶۲).

در سال ۱۹۶۵، استوارت[2] پیشنهادی داد مبنی بر این‌که شبیه‌سازها باید منطبق با مکانیزم نشان داده شده در شکل ۱-۶ شوند (Stewart, ۱۹۶۵). در این ساختار، عنصر حرکت یک صفحه‌ی مثلثی است که تمام رئوس آن متصل به مفصل کروی می‌باشد، انتهای هر یک از محرک‌ها توسط یک مفصل چرخشی به لینک محور عمودی متصل است و می‌تواند حول محور خود چرخش کند.

[1] Rendezvous
[2] Stewart

انتهای دیگر آن توسط یک مفصل کروی به صفحه‌ی متحرک متصل است.

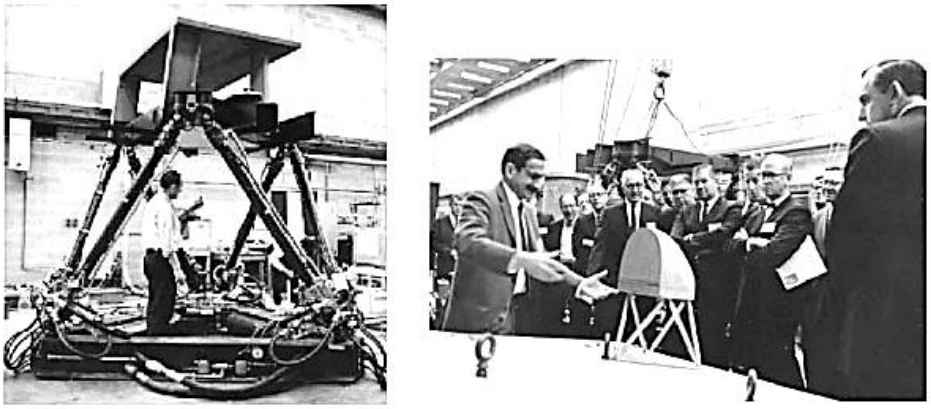


شکل ۱-۶: پلت فرم استوارت (Stewart, ۱۹۶۵).

همچنین استوارت بیان کرد که مکانیزم گاف-استوارت[1] باید برای سکوهای حفاری خارج از ساحل یا برای دستگاه فرز استفاده شود. این پیشنهاد به نوبه‌ی خود یک چشم‌انداز بسیار خوبی در آینده‌ی ربات موازی ایجاد کرد. با این‌که سکوی گاف، قبل از استوارت ساخته شده بود، به نظر می‌رسید که سکوی استوارت هنوز هیچ کاربرد عملی پیدا نکرده است، درحالی‌که سکوی گاف کاربردی‌تر می‌باشد.

در همان سال یک مهندس از موسسه فرانکلین[2] به نام کلوز کاپل[3]، ماموریت بهبود دستگاه حفاری را به عهده گرفت. او از همان طرح گاف هشت‌وجهی استفاده کرد. این دستگاه در سال ۱۹۶۷ ثبت اختراع شد (Cappel, ۱۹۶۷). این اختراع به‌عنوان یک شبیه‌ساز محرک در بخش هواپیمایی سیکوراسکای[4] که برای طراحی و ساخت شبیه‌ساز پرواز هلیکوپتر با شش درجه آزادی درخواست داده بودند، به‌کار گرفته شد (شکل ۱-۷).

[1] Gough-stewart
[2] Franklin institute
[3] Klaus cappel
[4] Sikorsky

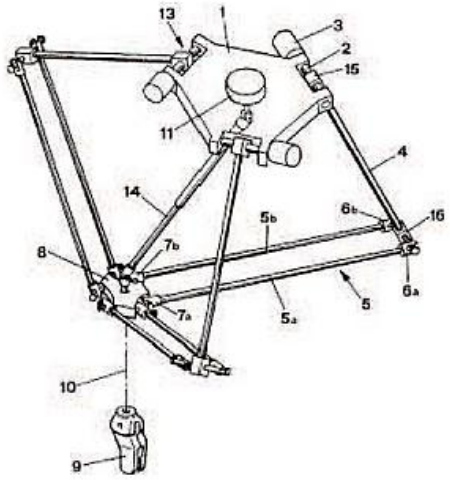


شکل ۱-۷: شبیه‌ساز پرواز برای اولین بار که در سال ۱۹۶۰ توسط کاپل طراحی شد. (Cappel, ۱۹۶۷)

در سال ۱۹۸۰، پیشرفت زیادی در توسعه بازوهای مکانیکی موازی به‌وجود آمد. کاربردهای زیادی از بازوی مکانیکی ماهر ارائه شد که شامل ماشین معدن‌کاری توسط کلیری[۱] و آرای[۲](۱۹۹۱)، آرای[۲](۱۹۹۱)، دستگاه بندکشی توسط گاسلین[۳] و آنجل[۴](۱۹۸۸)، و ماشین راه‌رونده توسط والدرون[۵]، ونوت[۶]، پری[۷] و مک جی[۸](۱۹۸۴) می‌شود.

در این سال ایده‌ی ربات دلتا[۹] توسط رایموند کلاول[۱۰] داده شد (۱۹۹۰) و او با استفاده از ساختار متوازی‌الاضلاع برای هر شاخه توانست این ربات را طراحی کند (شکل ۱-۸). در این ربات عملگرها روی پایه نصب می‌شوند. این مکانیزم قادر است به شتاب ۵۰g در محیط‌های آزمایشگاهی، و شتاب ۱۲g در کاربردهای صنعتی برسد. امروزه، ربات دلتا کاربردهای متعددی در صنعت پیدا کرده است.

[1] Cleary
[2] Arai
[3] Gosselin
[4] Angeles
[5] Waldron
[6] Vohnout
[7] Pery
[8] Mcghee
[9] Delta
[10] Raymond clavel



شکل ۱-۸: : طرحی کلی از ربات دلتا (Clavel ،۱۹۹۰).

در شکل ۱-۹ یک ربات دلتا که در صنعت استفاده می‌شود نشان داده شده است.

شکل ۱-۹: ربات Adept Quattro s650 (Aaron Saenz, ۲۰۱۱)

هانت[1] (۱۹۹۰) پیشنهاد کرد که از مکانیزم‌های موازی مانند شبیه‌ساز پرواز استوارت استفاده

[1] Hunt