



دانشکده مهندسی مکانیک

گروه ساخت و تولید

رساله دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)

طراحی و تحلیل فضای کاری، نقاط تکین و پیکربندی ربات موازی چهار درجه آزادی

استاد راهنما:

دکتر مهران محبوب خواه

استاد مشاور:

دکتر کریم شلش نژاد

پژوهشگر:

نیما جعفرزاده

شهریور ۹۲



نام خانوادگی: جعفرزاده	نام: نیما
عنوان پایان‌نامه: طراحی و تحلیل فضای کاری، نقاط تکین و پیکربندی ربات موازی چهار درجه آزادی	
استاد راهنما: دکتر مهران محبوب‌خواه	استاد مشاور: دکتر کریم شلش‌نژاد
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی مکانیک گرایش: ساخت و تولید دانشگاه: تبریز	
تاریخ فارغ‌التحصیلی: تعداد صفحات: ۹۲	
کلید واژه‌ها: سینماتیک، فضای کاری، تکینگی، ترکیب بندی	
چکیده	
<p>مکانیزم‌های موازی در بسیاری از علوم مهندسی وزمین‌های صنعتی به صورت چشمگیری مورد استفاده قرار می‌گیرند. زمین‌هایی نظیر ماشین‌کاری، مترولوژی، شبیه‌ساز پرواز، شبیه‌ساز زلزله، تجهیزات پزشکی و غیره از آن جمله‌اند. مکانیزم پیشنهادی در این تحقیق نوعی ماشین‌ابزار با مکانیزم موازی چهار درجه آزادی (سه درجه خطی و یک درجه دورانی) می‌باشد که به‌عنوان ماشین اندازه‌گیری نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. مکانیزم‌های موازی در مقایسه با مکانیزم‌های سری دارای مزیت‌هایی همچون سفتی و دقت بیشتر، نسبت بار به وزن بیشتر و مانورپذیری دینامیکی بهتر هستند. از طرفی محدودیت‌هایی همچون فضای کاری کمتر، وجود نقاط تکین در فضای کاری و سیستم کنترلی پیچیده از جمله نقاط ضعف این مکانیزم‌ها محسوب می‌شود. در این پروژه هدف تحلیل فضای کاری و تکینگی مکانیزم پیشنهادی و انتخاب مناسب‌ترین ساختار برای آن است. بدین منظور ابتدا روابط سینماتیکی مستقیم و معکوس این مکانیزم به‌دست آمده و سپس الگوریتمی برای محاسبه فضای کاری و یافتن نقاط تکین مکانیزم پیشنهادی ارائه می‌شود. سپس با بررسی پیکربندی‌های مختلف برای مکانیزم و تحلیل فضای کاری و تکینگی این پیکربندی‌ها،</p>	

ساختاری که اهداف مورد نظر را ارضا نماید، به عنوان ترکیب‌بندی مناسب انتخاب می‌گردد و صحت محاسبات انجام گرفته، در نرم افزارهای Soidworks و Matlab بررسی می‌شود.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۲	فصل اول- بررسی منابع .....
۲	۱-۱- تعریف ربات موازی: .....
۲	۲-۱- تاریخچه مکانیزم‌های موازی .....
۶	۳-۱- مکانیزم موازی چهار درجه آزادی .....
۷	۱-۳-۱ مکانیزم قید گذرا .....
۷	۱-۳-۲- هندسه ویژه پایه‌ها .....
۹	۱-۳-۳- پایه‌هایی با زنجیره سینماتیکی غیر یکسان .....
۱۰	۱-۳-۴- استفاده از مکانیزمی که کمتر از چهار پایه دارد .....
۱۰	۱-۳-۵- طراحی مکانیکی ویژه .....
۱۱	۱-۴- پیشینه تحقیق در زمینه فضای کاری مکانیزم‌های موازی .....
۱۴	۱-۵- پیشینه تحقیق در زمینه تحلیل تکینگی مکانیزم‌های موازی .....
۱۷	۱-۶- انتخاب طرح .....
۱۹	۱-۷- معرفی روش‌های طراحی آزمایش .....
۲۰	۱-۷-۱- معرفی روش طراحی آزمایش تاگوچی .....
۲۱	۱-۷-۲- معرفی روش طراحی آزمایش سطح پاسخ .....
۲۳	۱-۷-۳- تحلیل واریانس (ANOVA) .....
۲۶	فصل دوم- مواد و روش‌ها .....
۲۶	۱-۲- محاسبات سینماتیکی .....

- ۲۷ ..... ۱-۱-۲- سینماتیک معکوس موقعیت پایه‌ها
- ۲۹ ..... ۲-۱-۲- محاسبه ماتریس دوران
- ۳۳ ..... ۴-۱-۲- سینماتیک معکوس سرعت پایه‌ها
- ۳۶ ..... ۵-۱-۲- سینماتیک معکوس شتاب پایه‌ها
- ۳۶ ..... ۶-۱-۲- سینماتیک مستقیم موقعیت سکو
- ۳۷ ..... ۲-۲- فضای کاری
- ۳۸ ..... ۱-۲-۲- شیوه تحلیل و مدل‌سازی فضای کاری
- ۳۹ ..... ۲-۲-۲- الگوریتم جستجو
- ۴۳ ..... ۳-۲-۲- محدودیتهای فیزیکی ماشین‌ابزار موازی پیشنهادشده
- ۴۳ ..... ۱-۳-۲-۲- محدودیت حرکتی پایه
- ۴۴ ..... ۲-۳-۲-۲- محدودیت زوایای مفاصل یونیورسال
- ۴۶ ..... ۳-۳-۲-۲- محدودیت دوران سکوی متحرک حول محور X
- ۴۷ ..... ۳-۲- تحلیل تکنیکی
- ۴۷ ..... ۱-۳-۲- مکان هندسی تکینی
- ۴۷ ..... ۱-۱-۳-۲- تکنیکی معکوس
- ۴۹ ..... ۲-۱-۳-۲- تکنیکی مستقیم
- ۵۰ ..... ۳-۱-۳-۲- موقعیت تکینی ترکیبی
- ۵۰ ..... ۴-۱-۳-۲- کیفیت تکنیکی
- ۵۱ ..... ۲-۳-۲- بررسی عددی تکنیکی مکانیزم پیشنهادی
- ۵۲ ..... ۴- طراحی آزمایش توسط روش پاسخ سطح
- ۵۸ ..... ۱-۴-۲- تابع هدف
- ۵۸ ..... ۱-۱-۴-۲- حجم فضای کاری

۶۱	..... ۲-۴-۱-۲- ضریب وضعیت کلی
۶۵	..... فصل سوم- نتایج و بحث
۶۵	..... ۳-۱- حجم فضای کاری
۶۸	..... ۳-۲- ضریب وضعیت کلی
۷۲	..... ۳-۳- شکل فضای کاری مکانیزم
۷۲	..... ۳-۳-۱- مرحله اول بررسی شکل فضای کاری
۷۴	..... ۳-۳-۲- مرحله دوم بررسی شکل فضای کاری
۸۱	..... ۳-۴- تحلیل تکینگی
۸۱	..... ۳-۴-۱- حالتی که مرکز ابزارگیر در صفحه $y=0$ قرار بگیرد و زاویه ابزارگیر، صفر باشد
۸۶	..... نتیجه گیری
۸۹	..... پیشنهادها
۹۰	..... منابع

## فهرست اشکال

شکل	صفحه
شکل ۱-۱. اولین مکانیزم موازی فضایی که در سال ۱۹۳۱ به ثبت رسیده است [۱].....	۳
شکل ۲-۱. اولین ربات موازی صنعتی که در سال ۱۹۴۲ به ثبت رسیده است [۱].....	۳
شکل ۳-۱. سکوی گوج اصلی در تاریخ ۱۹۵۴ [۱].....	۴
شکل ۴-۱. طرح شماتیکی از اولین و تنها "سکوی استوارت" [۱].....	۵
شکل ۵-۱. مکانیزم شبیه سازی پرواز کلاوس کپل [۱].....	۶
شکل ۶-۱. مکانیزم قید گذرا [۲].....	۸
شکل ۷-۱. هندسه ویژه پایه‌ها [۲].....	۸
شکل ۸-۱. پایه‌هایی با زنجیره سینماتیکی غیر یکسان [۲].....	۹
شکل ۹-۱. مکانیزم پیشنهادی توسط لیو [۲].....	۹
شکل ۱۰-۱. مکانیزمی که کمتر از چهار پایه دارد [۲].....	۱۰
شکل ۱۱-۱. طراحی مکانیکی ویژه [۲].....	۱۱
شکل ۱۲-۱. ربات هایی با قابلیت پیکربندی مجدد [۹].....	۱۳
شکل ۱۳-۱. مکانیزم بررسی شده توسط سعادتزی [۱۰].....	۱۴
شکل ۱۴-۱. مکانیزم پیشنهادی.....	۱۸
شکل ۱۵-۱. انواع متغیرهای ورودی و خروجی فرآیند [۲۲].....	۱۹
شکل ۱-۲. شماتیک مکانیزم پیشنهادی.....	۲۷
شکل ۲-۲. شماتیک دو بعدی مکانیزم پیشنهادی.....	۲۸
شکل ۳-۲. مکانیزم پیشنهادی در صفحه $y=0$ .....	۳۰
شکل ۴-۲. مکانیزم پیشنهادی $x=0$ .....	۳۰
شکل ۵-۲. فلوچارت مربوط به الگوریتم جستجو.....	۴۲
شکل ۶-۲. زاویه بین پایه و ریل.....	۴۵
شکل ۷-۲. مقدار مجاز حرکت پایه ها به کناره ها.....	۴۶
شکل ۸-۲. تکنیکی معکوس.....	۴۸
شکل ۹-۲. فلوچارت تحلیل تکنیکی مکانیزم پیشنهادی.....	۵۲



- شکل ۲-۱۰. پارامترهای مکانیکی مکانیزم پیشنهادی ..... ۵۳
- شکل ۲-۱۱. مکانیزم در حالتی که زاویه ریل نسبت به افق صفر درجه است ..... ۵۴
- شکل ۲-۱۲. مکانیزم در حالتی که زاویه ریل نسبت به افق ۹۰ درجه است ..... ۵۶
- شکل ۲-۱۳. یک لایه از فضای کاری ..... ۵۹
- شکل ۳-۱. تاثیر زاویه ریل و طول پایه بر روی حجم فضای کاری مکانیزم ..... ۶۷
- شکل ۳-۲. تاثیر زاویه ریل و کورس حرکتی واگن بر روی حجم فضای کاری مکانیزم ..... ۶۷
- شکل ۳-۳. تاثیر زاویه ریل و شعاع ابزارگیر بر روی حجم فضای کاری مکانیزم ..... ۶۷
- شکل ۳-۴. ترکیب به دست آمده توسط نرم افزار Minitab که بیشترین حجم فضای کاری را ارائه خواهد داد ..... ۶۸
- شکل ۳-۵. تاثیر زاویه ریل و طول پایه بر روی ضریب وضعیت کلی مکانیزم ..... ۷۰
- شکل ۳-۶. تاثیر زاویه ریل و کورس حرکتی واگن بر روی ضریب وضعیت کلی مکانیزم ..... ۷۰
- شکل ۳-۷. تاثیر زاویه ریل و شعاع ابزارگیر بر روی ضریب وضعیت کلی مکانیزم ..... ۷۰
- شکل ۳-۸. ترکیب به دست آمده توسط نرم افزار Minitab که بزرگترین ضریب وضعیت کلی را ارائه خواهد داد ..... ۷۱
- شکل ۳-۹. فضاهای کاری به دست آمده به ازای طول پایه ۸۵۰ میلیمتر ..... ۷۳
- شکل ۳-۱۰. فضاهای کاری به دست آمده به ازای طول پایه ۹۷۵ میلیمتر ..... ۷۳
- شکل ۳-۱۱. فضاهای کاری به دست آمده به ازای طول پایه ۱۱۰۰ میلیمتر ..... ۷۴
- شکل ۳-۱۲. فضاهای کاری به ازای مقدار ۵۰۰ میلی متر برای شعاع بدنه ..... ۷۶
- شکل ۳-۱۳. فضاهای کاری به ازای مقدار ۶۰۰ میلی متر برای شعاع بدنه ..... ۷۶
- شکل ۳-۱۴. فضاهای کاری به ازای مقدار ۷۰۰ میلی متر برای شعاع بدنه ..... ۷۷
- شکل ۳-۱۵. فضاهای کاری به ازای مقدار ۸۰۰ میلی متر برای شعاع بدنه ..... ۷۷
- شکل ۳-۱۶. نمای ایزومتریک فضای کاری ..... ۷۹
- شکل ۳-۱۷. نمای برش خورده فضای کاری (صفحه YZ) ..... ۷۹
- شکل ۳-۱۸. نمای برش خورده فضای کاری (صفحه XZ) ..... ۸۰
- شکل ۳-۱۹. نمای بالایی فضای کاری ..... ۸۰
- شکل ۳-۲۰. تکنیکی مستقیم در مکانیزم پیشنهادی ..... ۸۴
- شکل ۳-۲۱. نقاط تکیه مستقیم موجود در فضای کاری مکانیزم پیشنهادی ..... ۸۵

## فهرست جداول

صفحه

جدول

جدول ۱-۲. مقادیر پیشنهاد شده توسط نرم افزار Minitab 16 .....	۵۷
جدول ۲-۲. جوابهای به دست آمده از آزمایشات پیشنهادی .....	۶۰
جدول ۳-۲. جوابهای به دست آمده از آزمایشات پیشنهادی .....	۶۳
جدول ۱-۳. تحلیل واریانس مربوط به حجم فضای کاری مکانیزم .....	۶۵
جدول ۲-۳. تحلیل واریانس مربوط به ضریب وضعیت کلی .....	۶۹
جدول ۳-۳. ترکیب بندی های مورد بررسی به ازای $\alpha = 60^\circ$ .....	۷۵

## فهرست علائم

$a_i$	نقطه مفصلی $i$ امین اتصال سکوی ثابت به ریل‌ها در چارچوب مرجع $\{0\}$
$\dot{a}_i$	سرعت خطی نقطه مفصلی سکوی ثابت
$b_i$	نقطه مفصلی $i$ امین اتصال سکوی متحرک به پایه‌ها در چارچوب مرجع $\{0\}$
$\dot{b}_i$	سرعت خطی نقطه مفصلی سکوی متحرک
$d_i$	جابه‌جایی واگن $i$ ام در راستای DE
$\dot{d}_i$	سرعت خطی حرکت واگن در ریل
$\ddot{d}_i$	شتاب خطی واگن در ریل
$d_{i0}$	برداری یک‌ه‌ی ریل $i$ ام در راستای DE
$\dot{d}_{i0}$	سرعت خطی برداری یک‌ه‌ی ریل $i$ ام در راستای DE
$d(X)$	جابه‌جایی واگن به ازای نقطه حدسی
$d_{given}$	جابه‌جایی واگن معلوم
$D$	کورس حرکتی واگن در ریل
$E(X)$	تابع خطا
$J_x$	ماتریس ژاکوبین مستقیم
$J_q$	ماتریس ژاکوبین معکوس
$\dot{J}_x$	سرعت خطی ماتریس ژاکوبین مستقیم
$\dot{J}_q$	سرعت خطی ماتریس ژاکوبین معکوس
$J$	ماتریس ژاکوبین
$K(J)$	شماره وضعیت

$L_i$	بردار متصل کننده نقطه مفصلی سکوی ثابت به نقطه مفصلی سکوی متحرک.
$l$	طول پایه ها.
$l_{i0}$	بردار یکه پایه $i$ ام.
$\dot{l}_{i0}$	سرعت خطی بردار یکه پایه $i$ ام.
$p$	موقعیت نقطه ی وسط سکوی متحرک نسبت به در چارچوب مرجع $\{0\}$ .
${}^o q_i$	بردار متصل کننده چارچوب مرجع $\{0\}$ به مفصل سکوی متحرک.
$r_a$	شعاع سکوی ثابت (بدنه).
$r_b$	شعاع سکوع متحرک (ابزارگیر).
$r_i$	شعاع مرز فضای کاری در هر لایه.
$r_{step}$	تغییر شعاع استوانه ی فرضی در هر لایه.
$V$	حجم فضای کاری.
$V_p$	سرعت خطی مرکز سکوی متحرک.
$W$	تعداد نقاط موجود در فضای کاری.
$\dot{X}$	سرعت کلی مرکز سکوی متحرک.
$\ddot{X}$	شتاب خطی سکوی متحرک.
$X_i$	جواب تقریبی گرفته شده پس از $i$ مرحله تکرار.
$z_{step} = \Delta z$	تغییر ارتفاع استوانه ی فرضی در هر لایه.
$\alpha$	زاویه ی ریل با سطح افق.
$\alpha_0$	زاویه بردار هادی ریل با محور $x$ .
$\beta$	مقدار دوران ابزارگیر.
$\beta_0$	زاویه بردار هادی ریل با محور $y$ .
$\gamma$	زاویه ی بین ریل و پایه.

- $\gamma_o$  ..... زاویه بردار هادی ریل با محور z
- $\theta_{step} = \Delta\theta$  ..... تغییر زاویه‌ی شعاع با محور طولی در هر لایه از استوانه‌ی فرضی
- $\theta_q$  ..... زاویه‌ی دوران مفصل یونیورسال
- $\theta_p$  ..... زاویه‌ی دوران مفصل یونیورسال به کناره‌ها
- $\sigma_1$  ..... بزرگ‌ترین مقدار تکین ماتریس ژاکوبین
- $\sigma_s$  ..... کوچک‌ترین مقدار تکین ماتریس ژاکوبین
- $\omega_p$  ..... سرعت زاویه‌ای سکوی متحرک
- $\omega_i$  ..... سرعت زاویه‌ای بردار یکه پایه

## مقدمه

ربات‌های موازی، آن دسته از مکانیزم‌هایی هستند که شامل تعدادی پایه، بدنه‌ی ثابت و یک سکوی متحرک می‌باشند و ارتباط سکوی ثابت و سکوی متحرک توسط پایه‌ها برقرار می‌گردد. فضای کاری مکانیزم‌های موازی یک حجم یا فضای بسته‌ای است که توسط نقاط قابل دسترس موضع انتهایی ماشین و یا ربات بدست می‌آید. در مکانیزم‌های موازی تعیین محدوده‌ی فضای کاری بسیار مشکل است زیرا هیچ محور ثابت متعامدی وجود ندارد و فضای کاری ربات موازی بوسیله‌ پارامترها و یا قیدهای سینماتیکی، حدود تغییر طول پایه‌ها، حدود زوایای چرخشی، قیدهای جلوگیری از تقاطع پایه‌ها و سایر قیدهای لازم برای ممانعت از تقاطع قطعات اضافی بدست می‌آید. یکی از محدودیت‌های مهم مکانیزم‌های موازی قرار گرفتن آنها در موقعیت‌های تکین می‌باشد. به عبارت دیگر در نقاط تکین، ممکن است در حالی که تمامی محرکه‌ها قفل و ثابت هستند سکوی متحرک دارای حرکات بسیار کوچکی در بعضی از جهات باشد و یا عکس این موضوع اتفاق بیافتد یعنی باتوجه به ثابت ماندن سکوی متحرک در فضا، محرکه‌ها دارای حرکات بسیار ریزی باشند. در این پایان‌نامه ابتدا به تعریف و تاریخچه مکانیزم‌های موازی اشاره شده و پیشینه تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه تحلیل فضای کاری و تکینگی ربات‌های موازی بیان گردیده است. سپس در فصل دوم، محاسبات سینماتیکی اولیه برای یافتن روابط بین پارامترهای مکانیکی مکانیزم انجام شده و الگوریتمی برای محاسبه فضای کاری مکانیزم پیشنهادی و نیز برای یافتن نقاط تکین ارائه گردیده است. این الگوریتم به ازای ترکیب‌بندی‌های متفاوت برای مکانیزم پیشنهادی اجرا شده و نتایج آن در فصل سوم بیان شده است. در نهایت در فصل سوم ترکیب‌بندی‌ای که اهداف مورد نظر از لحاظ حجم و شکل فضای کاری، ضریب عملکرد سینماتیکی و تکینگی را ارضا نماید به عنوان ترکیب‌بندی نهایی معرفی شده است.

فصل اول:

بررسی منابع

فصل اول - بررسی منابع

۱-۱- تعریف ربات موازی:

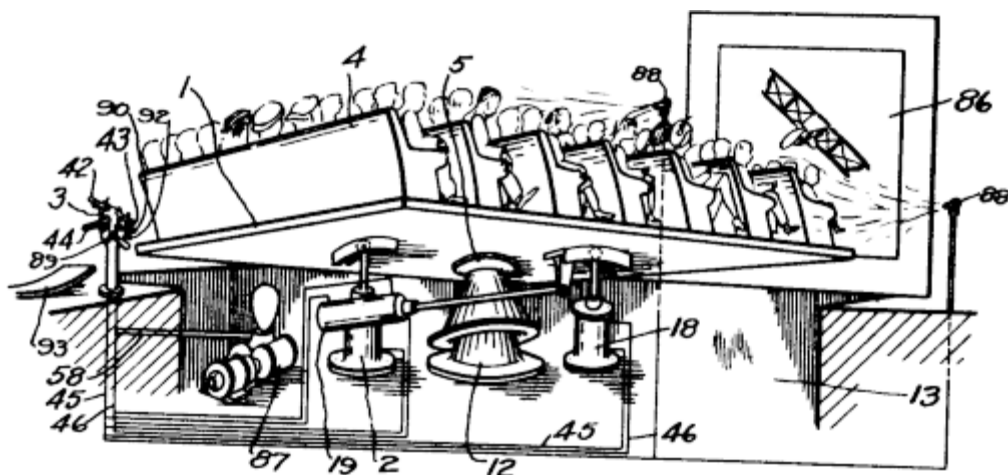
ربات‌های موازی، آن دسته از مکانیزم‌هایی هستند که شامل تعدادی پایه، بدنه‌ی ثابت و یک سکوی متحرک می‌باشند و ارتباط سکوی ثابت و سکوی متحرک توسط پایه‌ها برقرار می‌گردد. کنترل و موقعیت‌دهی سکوی متحرک با روش‌های مختلف می‌تواند صورت پذیرد. مکانیزم‌های موازی از لحاظ ترکیب‌بندی و ساختار حرکتی به دو نوع پایه با طول ثابت و پایه با طول متغیر تقسیم می‌شوند. در نوع اول، از پایه با طول ثابت استفاده شده است که هر یک در قسمت انتهایی به یک لغزنده متصل است و خود لغزنده‌ها بر روی راهنماهایی در حرکتند و این حرکت را از عملگرهای خطی یا دورانی می‌گیرند. در نوع دوم، مفاصل روی سکوهایی ثابت و متحرک ثابت شده و تنها پارامتر متغیر طول پایه‌ها است. با تغییر طول پایه‌ها موقعیت و جهت سکوی متحرک مشخص می‌گردد. مکانیزم‌های موازی در مقایسه با مکانیزم‌های سری دارای مزیت‌هایی همچون سفتی ودقت بیشتر، نسبت بار به وزن بیشتر و مانورپذیری دینامیکی بهتر هستند. از طرفی محدودیت‌هایی همچون فضای کاری کمتر، وجود نقاط تکین در فضای کاری و سیستم کنترلی پیچیده از جمله نقاط ضعف این مکانیزم‌ها محسوب می‌شود. [۱]

۱-۲- تاریخچه مکانیزم‌های موازی

فکر ساخت یک سکوی متحرک در ابتدا در صنعت تهیه و تولید وسایل و تجهیزات سرگرمی به صورت یک ایده و خیال خام مطرح گردید. اولین بار این وسیله‌ی سرگرم‌کننده بوسیله جیمز ای جوینت<sup>۱</sup> طراحی شد. او آن را به عنوان یک اختراع در سال ۱۹۳۱ ثبت کرد (شکل ۱-۱). مساله شگفت‌آور این است که در آن زمان این وسیله برپایه مکانیزم موازی کروی بنا شد.

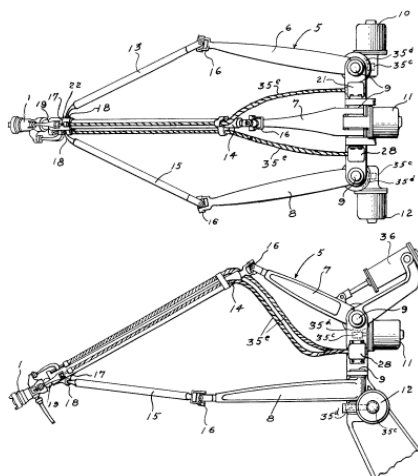
<sup>1</sup> - James E. Gwinnett





شکل ۱-۱. اولین مکانیزم موازی فضایی که در سال ۱۹۳۱ به ثبت رسیده است [۱]

در حدود یازده سال بعد از ارائه اولین ربات، یک ربات موازی جدید برای رنگزنی اتوماتیک توسط ویلارد ال.وی. پلارد<sup>۱</sup> ارائه شد که در انجمن سینماتیک موازی نیز، ربات موازی پلارد به عنوان اولین ربات صنعتی، مطرح است (شکل ۱-۲). اختراع این مبتکر یک ربات پنج درجه آزادی با سه بازوی موازی بود.



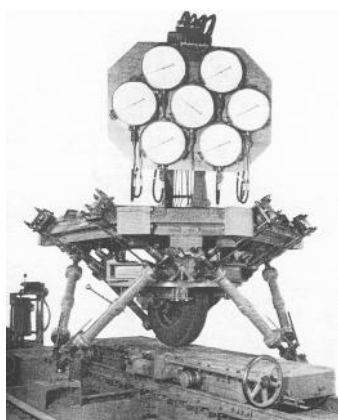
شکل ۱-۲. اولین ربات موازی صنعتی که در سال ۱۹۴۲ به ثبت رسیده است [۱]

ربات موازی پلارد برای رنگزنی پاششی اتوماتیک طراحی شده بود ولی متأسفانه هرگز ساخته نشد. با اینکه اولین ربات صنعتی که ساخته شد ربات موازی پلارد نبود اما مهندسی که اولین ربات صنعتی

<sup>۱</sup> - Willard L. V. Pollard.

را دوباره طراحی کرد پسر ویلارد ال وی پلارد یعنی ویلارد جی پلارد<sup>۱</sup> بود. ویلارد ال. جی. پلارد در حال حاضر ۹۲ سال عمر دارد و آخرین اختراع او در سال ۱۹۹۵ به ثبت رسید که یک ربات موازی سه بازویی است که بوسیله عملگرهای پیچی حرکت می کند.

چند سال بعد از ساخت اختراع پلارد، در سال ۱۹۴۷ مکانیزم موازی جدیدی اختراع شد که این مکانیزم، هشت وجهی بوده و دارای پایه‌هایی با طول قابل تغییر بود. (شکل ۱-۳).



شکل ۱-۳. سکوی گوج اصلی در تاریخ ۱۹۵۴ [۱]

دکتر اریک گوج<sup>۲</sup>، کسی که اولین بار این مکانیزم هشت وجهی را ساخت، مهندس برجسته اتوماسیون شرکت لاستیک دانلپ<sup>۳</sup>، بیرمنگام انگلیس بود و مکانیزم او جهت تست تایر با شبیه‌سازی شرایط جاده تحت اثر بارهای اعمالی به تایر مورد استفاده و توجه فراوانی قرار گرفت. ولی مطلب جدید در مورد سکوی متحرک گوج، ترتیب قرارگیری پایه‌ها بود. با توجه به اینکه اریک گوج به فضای حرکتی نسبتاً زیادی احتیاج داشت به طور طبیعی ترتیب متقارنی برای شکل هشت وجهی انتخاب کرد. این ماشین در حدود سال ۱۹۵۰ ساخته شده بود و بعداً در سال ۱۹۵۴ به صورت نهایی،

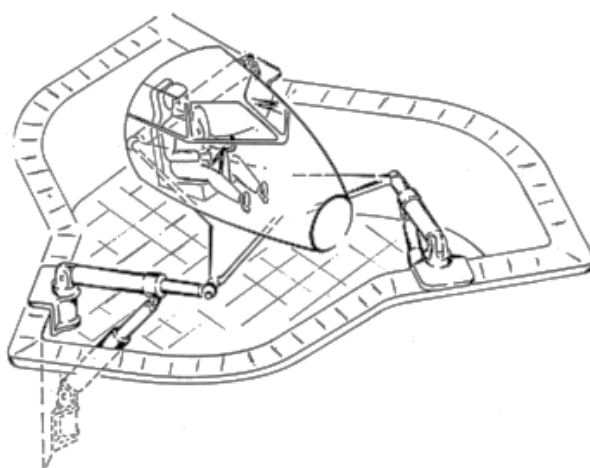
<sup>۱</sup>-Willard L.G. Pollard Jr.

<sup>۲</sup>-Dr. Eric Gough.

<sup>۳</sup>-Dunlop Rubber Co.

تکمیل و راه اندازی شد. با توجه به طراحی، پایه‌ها توسط مفاصل یونیورسال<sup>۱</sup> به سکوی متحرک و ثابت متصل شده بودند.

در سال ۱۹۶۵ مقاله مشهوری از استوارت<sup>۲</sup> در مجموعه مقالات مهندسی مکانیک انگلستان مشاهده شد. در آن مقاله استوارت یک سکوی حرکتی با شش درجه آزادی را به عنوان یک شبیه‌ساز پرواز معرفی کرده بود (شکل ۱-۵). با اینکه مکانیزم موازی پیشنهاد شده توسط استوارت از هر نظر با هگزاپاد هشت‌وجهی گوج متفاوت بود ولی همواره به اشتباه هگزاپاد هشت‌وجهی گوج با نام مستعار سکوی متحرک استوارت معرفی می‌شود.



شکل ۱-۴. طرح شماتیکی از اولین و تنها "سکوی استوارت"<sup>[۱]</sup>

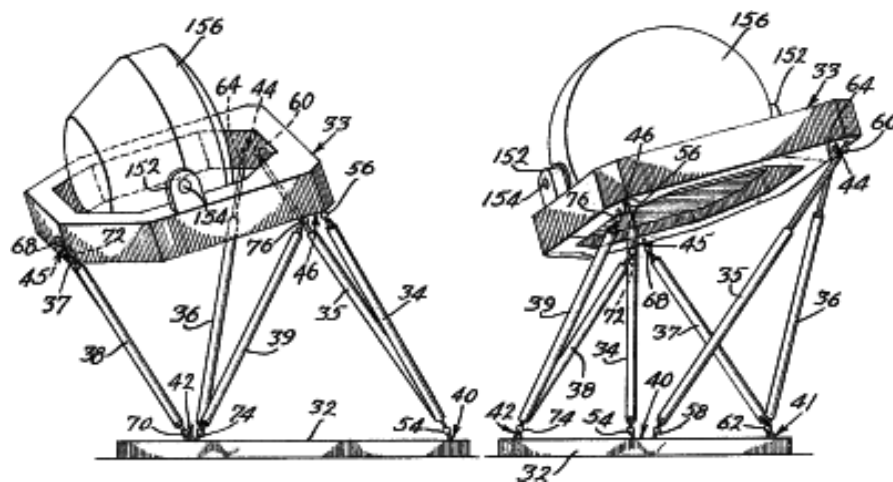
در هفتم دسامبر ۱۹۶۴ مهندسی آمریکایی با نام کلاوس کپل<sup>۳</sup> مکانیزمی برای شبیه‌سازی پرواز به ثبت رساند (شکل ۱-۵). و در سال ۱۹۷۱ سازمان یو.اس. پتنت<sup>۴</sup> نشان اختراع را به مهندس کلاوس کپل برای مکانیزم شبیه‌ساز پرواز او و کاربرد آن در صنعت اعطا کرد<sup>[۱]</sup>.

<sup>۱</sup> - Universal join.

<sup>۲</sup> - Stewart

<sup>۳</sup> - Klaus Cappel

<sup>۴</sup> - U.S. Patent



شکل ۱-۵. مکانیزم شبیه سازی پرواز کلاوس کپل [۱]

مکانیزم‌های ۶ درجه آزادی دارای معایبی همچون فضای کاری کوچک، طراحی مکانیکی پیچیده، سخت بودن سیستم کنترل و نیز پیچیده بودن آنالیز سینماتیکی است [۲]. برای غلبه بر این معایب مکانیزم‌هایی که کمتر از ۶ درجه آزادی دارند مورد بررسی قرار گرفته اند. امروزه بیشترین توجه به مکانیزم‌های دارای ۳ درجه آزادی معطوف شده است. به هر حال در بسیاری از کاربردهای صنعتی به مکانیزم‌هایی که دارای بیشتر از سه درجه آزادی هستند نیاز می‌باشد. در این پروژه یک مکانیزم ۴ درجه آزادی که دارای سه حرکت انتقالی و یک حرکت چرخشی می‌باشد، پیشنهاد شده است و مواردی همچون تحلیل سینماتیکی، فضای کاری و تکینگی در آن بررسی گردیده است. در ادامه به انواع ربات‌های موازی چهار درجه آزادی و پیشینه‌ی تحقیقات انجام گرفته در زمینه فضای کاری و تکینگی مکانیزم‌های چهار درجه آزادی اشاره می‌شود.

### ۳-۱- مکانیزم موازی چهار درجه آزادی

از لحاظ تئوری طراحی یک مکانیزم موازی چهار درجه آزادی با پایه‌هایی که از لحاظ سیستم مفصلی و عملگر یکسان هستند، امکان پذیر نیست. برای طراحی چنین مکانیزمی روش‌های زیر وجود دارد: