**فصل طراحی ربات دلتا**

**مقدمه**

در این فصل از پایان‌نامه ابتدا به توضیحاتی در مورد ربات دلتا و ویژگی‌های آن پرداخته شده است. در ادامة فصل، به مفاهیم اولیه و پایه برای طراحی یک ربات پرداخته شده است.

در این فصل، دو روش به‌دست‌آوردن تکینگی و فضای کار ربات توضیح داده شده و اهمیت بررسی آن بیان شده است. سپس مفهوم برنامه‌ریزی مسیر توضیح داده شده است.

در آخر، به شبیه‌سازی دینامیکی ربات و اهمیت آن در مراحل طراحی ربات پرداخته شده است. در این فصل مراحل طراحی ربات دلتا و مقایسة آن‌ها نشان‌داده‌شده است.

**سورس این بخش:** [ربات دلتا چیست؟ | فروش | قیمت | کاربرد | ساخت (famcocorp.com)](https://www.famcocorp.com/pcat/170916/%D8%B1%D8%A8%D8%A7%D8%AA-%D8%AF%D9%84%D8%AA%D8%A7-delta)

**ربات دلتا چیست؟**

ربات دلتا یک ربات صنعتی موازی است. این ربات از انواع جدید ربات‌های صنعتی است که جای خود را در صنعت برای انجام کاربری‌های سریع پیدا کرده است. ربات موازی دلتا در مقایسه با سایر ربات‌های صنعتی ثابت، طراحی منحصربه‌فردی دارد. نام دلتا (حرف یونانی Δ) از شکل مثلثی وارونه آن گرفته شده است. ربات‌های دلتا در بالای منطقه کاری نصب می‌شوند. به طور معمول، این منطقه کاری یک نوار نقاله است که محصولات را به سمت پایین خط تولید منتقل می‌کند. ابزار گیره (gripper) ربات به اتصالات مکانیکی بلند و باریک متصل است. این اتصالات به سه یا چهار موتور بزرگ در پایه ربات منتهی می‌شوند. گاهی اوقات موتورهای اضافی وجود دارند که درجات آزادی بیشتری را در گیره ایجاد می‌کنند. ربات دلتا از قسمت پایه خود و بالای منطقه تولید نصب می‌شوند و درحالی‌که این امکان برای انواع دیگر ربات‌ها وجود دارد، برای ربات‌های دلتا یک استاندارد است.

**ویژگی‌های ربات موازی دلتا**

اصلی‌ترین ویژگی ربات‌های دلتا، سرعت بی‌نظیر آنهاست. به عبارت ساده، قرارگیری موتورها و بازوهای سبک‌وزن به ربات دلتا اجازه می‌دهد به سرعت‌هایی برسد که دیگر انواع ربات‌ها امکان آن را ندارند. در برخی از کاربری‌ها، سرعت در اولویت قرار دارد؛ بنابراین، منطقی است که از سریع‌ترین ربات ممکن استفاده شود.

یکی از مزایای ربات موازی دلتا که اغلب نادیده گرفته می‌شود، استفاده کارآمد آنها از فضای کف است. بیشتر ربات‌های ثابت، روی زمین نزدیک محل کار نصب می‌شوند. ربات ممکن است با یک قفس ایمنی و سایر تجهیزات احاطه شود و ده‌ها مترمربع را اشغال کند. ربات موازی دلتا در بالای فضای کاری نصب می‌شود و به دلیل این طراحی، می‌تواند از فضای عمودی که معمولاً بلااستفاده هستند در تأسیسات تولیدی استفاده کند. استفاده بهتر از فضای عمودی فضای بیشتری را برای تجهیزات اضافی و انبار آزاد می‌کند.

**محدودیت‌های ربات دلتا**

البته ربات موازی دلتا محدودیت‌هایی هم دارد. در ربات دلتا، دسترسی و بار فدای سرعت زیاد می‌شود. طراحی مکانیکی به ربات دلتا اجازه نمی‌دهد بارهای بسیار سنگین را جابه‌جا کند. بیشتر ربات‌های دلتا قابلیت حمل وزنی در حدود چند کیلوگرم دارند که دامنه کاربرد ربات دلتا را مقداری محدود می‌کند.

دسترسی یکی دیگر از محدودیت‌های دیگر ربات دلتا است. به دلیل ساختار مکانیکی، دامنه حرکت به طور قابل‌توجهی برای دلتا محدود است. فضای کار ربات دلتا مخروطی شکل بوده و این بدان معنی است که هر چه دلتا به سمت پایین‌تر حرکت می‌کند، توانایی حرکت پهلو به پهلوی کمتری دارد. این موارد باعث می‌شود ربات دلتا فقط برای کارهای کوچک و سبک‌وزن قابل‌استقرار باشد.

**سینماتیک ربات دلتا**

**سورس تعاریف این بخش:** [سینماتیک مستقیم و معکوس در رباتیک – انجام پروژه‌های حرفه‌ای مهندسی برق (barghtech.ir)](http://barghtech.ir/%D8%B3%DB%8C%D9%86%D9%85%D8%A7%D8%AA%DB%8C%DA%A9-%D9%85%D8%B3%D8%AA%D9%82%DB%8C%D9%85-%D9%88-%D9%85%D8%B9%DA%A9%D9%88%D8%B3-%D8%B1%D8%A8%D8%A7%D8%AA%DB%8C%DA%A9/)

**تعریف سینماتیک در رباتیک**

سینماتیک شاخه‌ای از مکانیک است که به توصیف حرکت اجسام و مایعات بدون درنظرگرفتن نیروهای تولیدکننده حرکت می‌پردازد. سینماتیک مستقیم و معکوس در رباتیک به بررسی موقعیت اندفکتور و تغییرات آن نسبت به تغییرات زوایای مفاصل می‌پردازد. هنگام بررسی مکانیزم‌های مفصل‌دار همانند انواع ربات‌ها، علم سینماتیک به تحلیل هر یک از رابط‌های ربات نسبت به یک چهارچوب مرجع می‌پردازد.

**تعریف سینماتیک مستقیم و معکوس**

هدف از سینماتیک مستقیم، به‌دست‌آوردن موقعیت و جهت‌گیری مجری نهایی باتوجه‌به پیکربندی رابط‌های میانی ربات است. هدف از سینماتیک معکوس، به‌دست‌آوردن موقعیت و جهت‌گیری رابط‌های میانی ربات باتوجه‌به موقعیت و جهت‌گیری مجری نهایی است. برای توصیف موقعیت ربات، چهارچوب‌های مختلفی را می‌توان به کاربرد. به‌عنوان‌مثال می‌توان از دستگاه‌های مختصات کارتزین، استوانه‌ای و کروی استفاده کرد. انتخاب نوع دستگاه مختصات به ساختار سینماتیک ربات بستگی دارد.

**شبه کد سینماتیک مستقیم**

(psudo code FPK)

**شبه کد سینماتیک معکوس**

(psudo code IPK)

**تکینگی و فضای کار ربات دلتا**

**تعریف تکینگی یا سینگولاریتی**

هر ربات دارای مجموعه‌ای از نقاط در فضا است که هنگام واردشدن به این نقاط، مشکلات اساسی می‌تواند برای ربات به وجود بیاورد. هنگام ورود به این نقاط، ممکن است ربات حرکتی غیرقابل‌پیش‌بینی انجام دهد که منجر به آسیب‌دیدن مفاصل و موتورها و همچنین برخورد با موانع را داشته باشد. به همین سبب لازم است هنگام طراحی ربات، این نقاط موردنظر قرار گیرند و از ورود ربات به این نقاط جلوگیری شود.

**انواع تکینگی در ربات**

در حالت کلی 2 نوع تکینگی در ربات‌ها وجود دارد که به صورت زیر می‌باشند:

1. تکینگی مرز فضای کار
2. تکینگی داخل فضای کار

تکینگی نوع اول در همة ربات‌ها وجود دارد درحالی‌که تکینگی حالت دوم باتوجه‌به نوع ربات می‌تواند متفاوت باشد. در بیشتر مواقع تکینگی نوع دوم در ربات‌های سری ناشی از تکینگی در معادلات سینماتیک معکوس است و باعث حرکات غیرقابل‌پیش‌بینی در ربات می‌شود.

منشأ تکینگی نوع دوم در ربات‌های موازی اغلب مربوط به تکینگی در معادلات سینماتیک مستقیم است و منجر به آزاد بودن و متحرک بودن برخی از بازوها و اندافکتور می‌شود.

**تعریف فضای کار ربات**

فضای کار ربات به فضایی گفته می‌شود که ربات می‌تواند بدون خطر واردشدن به نقاط تکینگی در آن مانور دهد.

**تشخیص تکینگی و فضای کار با استفاده از ماتریس ژاکوبی**

روش اصلی پیداکردن تکینگی ربات‌ها با استفاده از تحلیل ماتریس ژاکوبی آن‌ها است. ماتریس ژاکوبی به مشتق ماتریس انتقال فضای دکارتی به فضای مفصلی گفته می‌شود. در معادلة 1، Q ماتریس مفصل مانند زاویه موتور و X ماتریس موقعیت اندافکتور در فضای دکارتی و J ماتریس ژاکوبی هستند.

در این روش با استفاده از تحلیل ماتریس ژاکوبی ربات و بررسی نقاط منفرد در این ماتریس می‌توان فضای کار ربات را به دست آورد. در این روش، با پیچیده‌شدن مدل، بررسی تکینگی ربات هم پیچیده‌تر می‌شود.

روش مبتنی بر ماتریس‌های واسطه برای تحلیل ماتریس ژاکوبی ربات دلتا باهدف ساده‌سازی معادلات صورت‌گرفته است. متغیرهای مورد بررسی در این روش تتا 1، تتا2 و تتا3 هستند که در شکل 1 مشخص شده اند.

با پیداکردن نقاط منفرد در معادلة 1 می توان تکینگی ربات دلتا را بررسی کرد. شکل 1 نتیجه حل عددی در حالتی که phi برابر 0 و 120 و -120 درجه است را نشان میدهد.

پیداکردن فضای کاری ربات با استفاده از نمودارهای به‌دست‌آمده عملی دشوار است به همین دلیل در ادامه روشی جایگزین استفاده شده است که بعد از شبه کد حل عددی این بخش آورده شده است.

**شبه کد یافتن نقاط منفرد در ماتریس ژاکوبی با حل عددی**

**تشخیص تکینگی و فضای کار با استفاده از روش‌های عددی**

در روش‌های عددی، با استفاده از جای‌گذاری متغیرها در معادلات ربات در بازه‌های مختلف، سعی بر این است تا به طور تقریبی نقاط نزدیک به نقاط منفرد در ربات پیدا شوند. با پیچیده‌شدن مدل ربات، روش‌های عددی می‌توانند بسیار پر هزینه و در مواردی غیردقیق باشند.

**تشخیص تکینگی و فضای کار ربات دلتا با استفاده از روش‌های عددی**

در سال‌های اخیر، روش‌های عددی بهینه نیز برای ربات دلتا توسعه داده شده است که یکی از آن‌ها مورد بررسی و استفاده قرار گرفته شده است. در این روش برخلاف روش‌های عددی دیگر، روش حرکت بر روی فضای کار برای پیداکردن نقاط تقریبی فضای کار استفاده شده است.

در این روش، از مختصات کروی برای جستجوی نقاط اولیه استفاده شده است. باهدف پیداکردن نقطه‌ای بر روی فضای کار، مقدار اپسیلون به‌عنوان بازة خطا در نظر گرفته می‌شود. نقطة موردنظر در معادلة سینماتیک زیر قرار می‌گیرد. مقدار تابع اگر برابر صفر باشد، به این معناست که این نقطه دقیقاً بر روی مرز فضای کاری است. درصورتی‌که مقدار تابع مثبت باشد، بدین معنا است که این نقطه داخل فضای کاری است و اگر مقدار تابع منفی باشد بدین معنا است که خارج از فضای کاری است. (تابع استفاده شده در مقاله)

هنگامی که نقطه‌ای پیدا شود که مقدار تابع آن کمتر از مثبت منفی نصف خطای اپسیلون باشد، این نقطه به‌عنوان مرز فضای کار در نظر گرفته می‌شود سپس الگوریتم با تغییر در زوایای مختصات کروی به جستجوی نقاط بعدی می‌پردازد. در صورت خارج یا داخل بودن نقطه نسبت به فضای کاری، شعاع این نقطه در مختصات کروی افزایش یا کاهش می‌یابد تا مقدار تابع ارضا شود. برای اطلاعات بیشتر دررابطه‌با این الگوریتم به مقالة مربوطه مراجعه کنید.

**شبه کد جستجوی فضای کار**

(psudo code workspace)

**الگوریتم برنامه‌ریزی مسیر**

**تعریف برنامه‌ریزی مسیر**

مسئله طراحی مسیر عبارت است از یافتن مسیری برای بازوی ربات بین دو پیکربندی ابتدایی و انتهایی بدون اینکه برخوردی با موانع محیط رخ دهد. حل این مسئله در حالت کلی پیچیده است و پیچیدگی آن با افزایش تعداد درجات آزادی به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. روش‌های متعددی برای طراحی مسیر ارائه شده‌اند نظیر میدان پتانسیل مصنوعی و نقشه راه احتمالی.

**تعریف برنامه‌ریزی مسیر زمانی**

برنامه‌ریزی مسیر زمانی یا ترجکتوری به مسیری گفته می‌شود که ربات به‌صورت تابعی از زمان طی می‌کند. یکی از معروف‌ترین الگوریتم‌ها، روش LSPB است که در ادامه توضیح داده شده است.

**ترجکتوری LSPB**

این ترجکتوری ترکیبی از ترجکتوری‌های سهموی و خطی است که نمودار سرعت آن ذوزنقه‌ای است و هنگامی استفاده می‌شود که لازم است ربات یک سرعت ثابتی را در طول مسیر داشته باشد. بخش اول ترجکتوری یک سهمی با سرعت افزایشی و شتاب ثابت مثبت است. بخش دوم، یک ترجکتوری خطی با سرعت ثابت است و نهایتاً در بخش سوم، یک ترجکتوری خطی با شتاب منفی و سرعت‌کاهشی است.

(یک شکل مثال از نمودار)

**ترجکتوری‌های منتخب**

در شبیه‌سازی دینامیکی ربات که در جلوتر اشاره شده است، نیاز به تعریف ترجکتوری‌هایی است که ربات را در سخت‌ترین شرایط ممکن و درعین‌حال معقول مورد آزمایش و شبیه‌سازی قرار داده شود. در این پروژه، دو نوع ترجکتوری مورد بررسی قرار گرفته شده‌اند. اولین ترجکتوری، ترجکتوری جابه‌جایی اشیا است و دومین ترجکتوری، حرکات دوار با استفاده از توابع مثلثاتی است.

ترجکتوری‌های انتخاب شده، در زمان‌ها و مختصات های مختلف مورد آزمایش قرار داده شده‌اند. همچنین ترجکتوری‌هایی در مرز فضای کاری ربات انتخاب شده‌اند؛ زیرا حرکت در این نواحی ربات را زیر فشار بالاتری قرار می‌دهد.

**شبه کد ترجکتوری جابه‌جایی اشیا**

(psudo code pick and place)

**شبه کد ترجکتوری حرکت دوار**

(psudo code circular)

**بررسی دینامیک ربات دلتا**

**تعریف دینامیک در رباتیک**

دینامیک به علم تحلیل فیزیکی نیرو و حرکت در اجسام گفته می‌شود. دینامیک در رباتیک به بررسی نیروها و گشتاورهای وارده بر مفصل‌ها و بازوهای ربات در هنگام حرکت گفته می‌شود.

هدف از تحلیل دینامیکی ربات می‌تواند دلایل متنوعی داشته باشد. از رایج‌ترین دلایل آن می‌توان به کنترل نیرو و گشتاور ربات اشاره کرد. در این پروژه، هدف از تحلیل دینامیکی ربات، پیش‌بینی گشتاورهای لازم برای موتورها در مانورهای مختلف ربات است.

**شبیه‌سازی دینامیک ربات دلتا**

باهدف شبیه‌سازی ربات طراحی شده، بعد از هر طراحی، مدل 3 بعدی آن در نرم افزار SolidWorks طراحی شده و سپس مدل طراحی شده به نرم افزار simscape multibody منتقل شده و مدل دینامیکی آن تولید شده. سپس کدهای مربوط به سینماتیک معکوس و مسیریابی ربات، با توجه به نوع مانور، زوایای موتورهای ربات را در هر لحظة زمانی تولید می‌کنند. سپس داده‌های تولید شده با نرم افزار شبیه سازی هماهنگ شده و نتیجة شبیه سازی که شامل نمودارهای مربوط به گشتاور، سرعت زاویه، شتاب زاویه ای و توان موتورها می‌باشد، ذخیره می‌شود.

(تصاویر مربوط سیم اسکیپ – ربات دلتا – کل سیستم – شبیه سازی متلب)

**فرایند طراحی ربات دلتا**

**طراحی دلتا 1**

در طراحی دلتا-1 از ربات دلتای فلکس پیکر ساخت شرکت ای بی بی الگو برداری شده است. با هدف کاهش هزینه‌های ساخت و امکان پذیر شدن ساخت ربات در آزمایشگاه، ابعاد این ربات در ضریب 5/0 ضرب شده اند. نوع مدل کاملاً ساده و بدون در نظر گرفتن امکان ساخت ربات، طراحی شده است. جنس مفاصل از آلومنیوم و بازوها از فیبر کربن تعیین شده است. وزن 750 گرم برای مجموعة صفحة اندافکتور و گریپر و بار آن در نظر گرفته شده است.

(تصاویر سالیدورکز و نقشه دلتا 1)

**طراحی دلتا 2**

هدف در طراحی دلتا-2، نزدیک شدن مدل دلتا-1 به مدل واقعی برای ساخت بوده است. به همین سبب قطعات واقعی موجود در بازار در این مدل استفاده شده است. مفصل به کار رفته در این مدل، قطعة PHS5mm می‌باشد که موجب افزایش ابعاد اندافکتور نیز شده است. در هنگام طراحی دلتا-2، موتور دی‌سی ساخت شرکت کروزه مورد هدف قرار گرفته شده است و به همین دلیل مدل 3 بعدی این موتور در طراحی دلتا-2 در نظر گرفته شده است. در طراحی دلتا-2 از فیبر کربن برای بازوها و استیل برای مفصل‌ها و وزن 750 گرم برای مجموعة صفحة اندافکتور و گریپر و بار آن در نظر گرفته شده است.

طراحی صفحة اندافکتور در اشکال 1 و 2 قابل‌مشاهده هستند.

(تصاویر سالیدورکز و نقشه دلتا 2)

**طراحی دلتا 3**

هدف از طراحی دلتا-3 رفع نقوص احتمالی دلتا-2 بوده است. طبق مشورت‌های انجام شده، ابعاد 5 میلی متر برای قطر بازوهای ربات بسیار نازک بوده و به همین سبب ابعاد قطر بازوها به 8 میلی متر تغییر یافته اند که شامل تغییر نوع مفصل به PHS8mm نیز شده است. همچنین برای بازوهای بالایی ربات، قطعه ای جدید از جنس آلومینیوم با قطری بیشتر با هدف استحکام بیشتر طراحی شده است که در شکل فلان قابل‌مشاهده‌است. هنگام طراحی دلتا-3 با توجه به نتایج شبیه سازی بدست آمده از مدل‌های قبلی نتیجه گیری شده است که استپ‌موتورها موتورهای مناسب‌تری برای مدل دلتا-3 می‌باشند. به همین سبب در مدل دلتا-3 از استپ‌موتورهای سری 46 میلیمتری شرکت لیدشاین استفاده شده است. وزن‌های 750 گرم و 1 کیلوگرم برای مجموعة صفحة اندافکتور و گریپر و بار آن در نظر گرفته شده است.

(تصاویر سالیدورکز و نقشه دلتا 3)

**معرفی مدل پایة دلتا**

مدل و نام‌های مربوط به هر بخش مدل ربات دلتا در تصویر نشان‌داده‌شده‌اند.

(تصویر دیاگرام ربات دلتا)

**مقایسة ابعاد مدل‌های مختلف دلتا**

ابعاد هر بخش برای هر مدل دلتا پس از هر طراحی در جدول زیر آورده شده است. ابعاد قرار گرفته در پرانتز، ابعاد قطعه در مدل واقعی هستند که با ابعاد مدل سینماتیکی متفاوت هستند.

(جدول ابعاد مدل‌های دلتا)

**جمع‌بندی**

**فضای کار ربات دلتا**

نقاط آبی، به‌منظور محدودة فضای کاری دلتا-1 می باشند که با روش عدد گذاری به دست آمده اند. همچنین تقارن 120 درجه در شکل به علت تقارن مثلثی در ربات دلتا به وجود آمده است. خط های قرمز، دایره هایی هستند که شامل کوچکترین شعاع در بین نقاط به دست آمده در فاصله های 5 سانتی متری می باشند. همچنین نمودار دو بعدی کوچکترین شعاع فضای کاری بر حسب ارتفاع رسم شده است.

باتوجه‌به یکی بودن طول بازوها و صفحه‌ها در دلتا-2 و دلتا-3 نمودار ها یکی می باشند. همچنین این بار، مرز بالای فضای کاری هم با رنگ سبز در نمودار سه بعدی و رنگ نارنجی در نمودار دو بعدی در نظر گرفته شده است.

(تصاویر فضای کاری ربات)

**شبیه‌سازی دینامیکی ربات دلتا**

(تصاویر نمودارهای موتور ربات)

**نتیجة شبیه‌سازی**

باتوجه‌به نمودارهای مربوطه، مشخص می‌شود که باهدف ساخت ربات دلتا برای جابه‌جایی میوه‌هایی با اندازه متوسط، به موتورهایی با گشتاور تقریبی 4.5 نیوتون متر و سرعت زاویه ای تقریبی 5 رادیان بر ثانیه نیاز می‌باشد.