بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

تحلیل دینامیکی سه بعدی بازوی مکانیکی انعطاف‌پذیر سه درجه آزادی

استاد راهنما :

دکترمحمدعلی حاج‌عباسی

مؤلف :

اصلان عباسلو

شهریور ماه ۱۳۸۸

دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه

به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

گروه مکانیک

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچ گونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو : اصلان عباسلو

استاد راهنما : آقای دکتر محمد علی حاج عباسی

داور ۱ : آقای دکتر مجید فولادی

داور ۲ : آقای دکتر علیرضا سعیدی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی یا نماینده دانشکده: خانم دکتر فرشته بختیاری

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه است

تقدیم به :

پدر و مادر عزیزم به پاس زحماتشان و خواهران و برادرانم که همواره پشتیبان و مشوقم بودند.

تشکر و قدردانی :

اکنون که به یاری خداوند متعال این پایان‌نامه به اتمام رسیده است از تلاشها و راهنمائیهای خردمندانه جناب آقای دکتر حاج‌عباسی که هدایت این پایان‌نامه را به عهده داشتند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم.

از جناب آقای دکتر فولادی و جناب آقای دکتر سعیدی که زحمت داوری این پایان‌نامه را به عهده داشتند سپاسگذاری می‌کنم.

در اینجا لازم است از خانواده گرامیم، خصوصاً خواهر عزیزم سرکار خانم مهندس مهدیه عباسلو تقدیر و تشکر نمایم.

چکیده :

در این پایان‌نامه، با مدل‌سازی بازوی مکانیکی سه درجه آزادی با دو عضو انعطافپذیر که در فضای سه بعدی کار می‌کند، حرکات دینامیکی سه بعدی ناشی از انعطافپذیری اعضا مورد مطالعه قرار می‌گیرند. بدین منظور از روش مودهای فرضی برای مدل‌سازی بازوهای مکانیکی انعطافپذیر استفاده می‌شود. روش مودهای فرضی به گونه‌ای اعمال شده است که تغییر شکل اعضا در فضای سه‌بعدی توصیف شود. برای بدست آوردن معادلات حاکم بر سیستم از روش لاگرانژ استفاده شده است. در این روش انرژی‌های پتانسیل و جنبشی به نحوی در نظر گرفته شده‌اند که اثرات دینامیکی متقابل عضوهای بازوی مکانیکی لحاظ شوند. سپس با حل معادلات حاکم، پاسخ سیستم(میزان انحراف مچ از مسیر طرح شده) بدست می‌آید. نتایج برای حالتی که انعطافپذیری بازوی مکانیکی ناچیز باشد با حالتی که اعضای بازوی مکانیکی صلب باشند مقایسه می‌شوند. این مقایسه انطباق خوب رفتار دینامیکی بازوی مکانیکی در دو حالت را نشان می‌دهد. با کاهش انعطافپذیری، حرکات نوسانی بازوی مکانیکی هنگام پیمودن و پس از خاتمه یافتن مسیر، کاهش می‌یابد و بالعکس. با تغییر کمیاتی مانند جرم، طول، سختی خمشی و تعداد مودهای فرضی برای هر عضو تحلیلهای لازم برای پیمودن مسیر در حالتهای آرام، عادی و تند انجام می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که افزایش طول و جرم منجر به نوسانات با دامنه بیشتر و فرکانس کمتر می‌شود. همچنین افزایش سختی دامنه نوسانات را کم و فرکانس آن را زیاد می‌کند. . افزایش مدت زمان طی مسیر منجر به کاهش دامنه نوسانات می‌شود.

کلید واژه: روش مودهای فرضی، بازوی مکانیکی انعطاف‌پذیر، روش لاگرانژ، سختی خمشی.

فهرست مطالب :

فصل اول: مقدمه و مروری بر تحقیقات مربوطه

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ مروری بر تحقیقات انجام شده ۳

۱-۳ مروری بر کار حاضر ۷

فصل دوم: مفاهیم علمی

۲-۱ مقدمه ۱۰

۲-۲ نقش مهندسی مکانیک در علم رباتیک ۱۰

۲-۳ اهمیت بازوی مکانیکی انعطاف‌پذیر ۱۰

۲-٤ سینماتیک بازوهای مکانیکی ۱۱

۲-٥ دینامیک لاگرانژی ۱۲

۲-٦ روش مودهای فرضی ۱۲

فصل سوم: تحلیل دینامیکی بازوی مکانیکی با اعضای صلب

۳-۱ مقدمه ۱٥

۳-۲ طراحی مسیر مچ ۱٦

۳-۳ سینماتیک وارون ۱۷

۳-٤ معادلات دینامیکی و محاسبه گشتاورهای مفصلی ۲۱

۳-٤-۱ انرژی پتانسیل ۲۱

۳-٤-۲ انرژی جنبشی ۲۱

۳-٤-۳ گشتاورهای مفصلی ۲۳

فصل چهارم: استنتاج معادلات دینامیکی بازوهای مکانیکی انعطاف‌پذیر

٤-۱ مقدمه ۲۹

٤-۲ تعریف پارامترهای مسئله ۲۹

٤-۳ انرژی جنبشی ۳۱

٤-٤ انرژی پتانسیل ۳٤

٤-٥ بکارگیری روش مودهای فرضی ۳۷

٤-٦ معادلات دینامیکی ٣٨
فصل پنجم: تحلیل دینامیکی بازوی مکانیکی انعطاف‌پذیر ربات سه درجه آزادی
٥-١ مقدمه ٤١
٥-٢ بررسی اثر افزایش تعداد مودهای فرضی شرکت کننده در روش مودهای فرضی ٤١
٥-٣ مطالعه پارامترهای موثر بر انعطاف‌پذیری ٤٣
٥-٣-١ بررسی اثر مدت زمان طی مسیر (T) ٤٤
٥-٣-٢ بررسی اثر مدول الاستیسیته(سفتی خمشی) ٥٣
٥-٣-٣ بررسی اثر چگالی و جرم بر نوسانات مچ ٥٧
٥-٣-٤ بررسی اثر طول بازوها ٦٠
فصل ششم: نتایج و جمع‌بندی
٦-١ جمع‌بندی ٦٦
٦-٢ نتایج ٦٧
٦-٣ پیشنهادات ٦٧
مراجع ٦٨

فصل اول

مقدمه و مروری بر تحقیقات مربوطه

۱-۱ مقدمه

یک ربات[۱] از قسمتهای مختلفی همچون بازوی مکانیکی[۲]، سیستم کنترلی، سنسورها، موتورها، رایانه و ... تشکیل شده است. شاخه‌های مهندسی از جمله مکانیک، برق، الکترونیک، کنترل، مواد و سایر علوم مانند ریاضی برای تحلیل و طراحی رباتها بکار می‌آیند. اصول و قواعد مهندسی مکانیک به تجزیه و تحلیل قسمت مکانیکی ربات توجه دارد و مهندسی مکانیک در شاخه‌های مختلفی همچون سینماتیک، دینامیک، طراحی مسیر حرکت ربات، کنترل و ... به تحلیل و طراحی رباتها می‌پردازد. بازوی مکانیکی مجموعه‌ای از عضوها، چرخدنده‌ها، مفاصل و اتصالات دیگر می‌باشد که وقتی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند آنها را زنجیره سینماتیکی می‌نامند. در برخی کاربردهای مهندسی مکانیک می‌توان عضوها و مفاصل را صلب فرض کرد و به تحلیل ربات پرداخت. بدین ترتیب با مسائل رباتهای صلب روبرو هستیم. در تحلیلی دقیقتر می‌توان اثرات انعطافپذیری عضوها را در نظر گرفت که در این حالت با مسائل رباتهای انعطافپذیر روبرو هستیم. در مقایسه‌ای بین رباتهای صلب و انعطافپذیر می‌توان رباتهای انعطافپذیر را بسیار مفیدتر یافت چرا که رباتهای انعطافپذیر نسبت به رباتهای صلب دارای مواد کمتر در ساخت، مصرف انرژی کمتر، وزن کمتر، موتورهای کوچکتر، قدرت مانور بیشتر و ... می‌باشند [۱]. همچنین در مواقعی که عضوهای ربات بلند و یا عضوها دارای شتاب و سرعت زیاد باشند دیگر نمی‌توان عضوها و مفاصل را صلب فرض کرد.

هنگامی که می‌خواهیم یک بازوی ربات سریع با وزن کم طراحی کنیم، مسائلی مانند محدودیت بار، مصرف انرژی کمتر، تحرک بیشتر بازوی ربات، استفاده از عملگرهای کوچکتر و داشتن فضای کاری بزرگتر قابل توجه هستند. استفاده از بازوی سبک و سریع مزایای زیادی دارد ولی مدل دینامیکی آن بسیار پیچیده است و بدست آوردن مدل دینامیکی دقیق برای بازوی مکانیکی انعطاف-پذیر نیازمند بسیاری از زمینه‌های مهندسی میباشد [۲].

تحقیق در مورد بازوی مکانیکی انعطافپذیر در دهه اخیر مزایای آن را نسبت به بازوهای صلب آشکار می‌کند. یکی ازمسائل مهم مرتبط به بازوهای مکانیکی و رباتها وزن اعضای آن است. برای کنترل صحیح و دقیق موقعیت ربات اعضای آن را صلب طراحی می‌کنند که منجر به وزن زیاد بازوی مکانیکی می‌شود. وزن زیاد باعث استفاده از بکاراندازهای بزرگتر و مفاصل بزرگتر می‌شود.

---

[۱] Robot

[۲] Manipulator

بکارگیری اعضای بزرگ در ربات قیمت ربات را افزایش می‌دهد و نیازمند انرژی و توان بیشتر می-باشد. در بعضی از کاربردهای ربات که سرعت خیلی زیاد است لازم است مقادیر ترمهای اینرسی که اثرات دینامیکی نامطلوبی دارند، کوچک باشند. افزایش درخواست عملکرد خیلی سریع و مصرف انرژی کم توام با داشتن فضای کاری بیشتر، صنعت را ناگزیر به طراحی و ساخت بازوی مکانیکی انعطافپذیر می‌کند. واضح است که درخواست برای افزایش بازدهی توسط رباتها می‌تواند با استفاده از رباتهای سبک و سریع برآورده شود، که برای داشتن چنین رباتهایی اعضا سفتی خیلی زیادی ندارند. انعطافپذیری اعضا یک نتیجه منطقی از وزن کم اعضا در بازوی مکانیکی می‌باشد. این موضوع باعث می‌شود که تغییر شکلهای الاستیک افزایش یابند و کارایی ربات در اثر ارتعاشات مکانیکی اعضا کاهش یابد، در نتیجه کنترل آن با مشکل مواجه می‌شود. لذا در دهه اخیر تحقیقاتی در زمینه کنترل مسیر اینگونه رباتها صورت گرفته است. بازوهای مکانیکی انعطافپذیر ترکیبی از حرکت صلب و انعطافپذیر دارند. به دلیل اثر متقابل حرکتهای صلب و انعطافپذیر، معادلات دینامیکی حاکم بر بازوهای انعطافپذیر پیچیده می‌شود و عملیات کنترل این بازو در مقایسه با بازوی صلب با چالشهای زیادی روبرو خواهد بود. بنابراین به منظور طراحی یک استراتژی کنترل موثر لازم است مدل دینامیکی دقیقی که حرکت اعضا را بدرستی توصیف کند، تهیه شود [۳].

از آنجایی که نیاز صنعت امروز به رباتهای سریع و دقیق رو به افزایش است تکنیکهای صنعتی در صنایع مختلف ناگزیر به حذف ارتعاشات در بازوی مکانیکی هستند. هرچند تا کنون کارهای زیادی در زمینه کنترل ارتعاشات بازوی مکانیکی انجام شده است [۴].

۱-۲ مروری بر تحقیقات انجام شده

در این قسمت با توجه به شناخت حاصله از جایگاه بازوهای مکانیکی انعطافپذیر، بررسی تعدادی از مقالات ارائه شده در این زمینه انجام می‌شود. تا کنون تحقیقات وسیعی در مورد بازوهای مکانیکی انعطافپذیر انجام شده که جمع‌آوری همه آنها در حوصله این پایان‌نامه نمی‌گنجد لذا در زیر به برخی از آنها اشاره می‌شود.

چن[۱] تغییر شکلها در هر عضو را با روش مودهای فرضی مدلسازی کرده است. او فرض کرده که عضو انعطافپذیر همانند یک تیر اویلر برنولی رفتار نماید و از اینرسی چرخشی و تغییر شکلهای برشی

[۱] Chen

چشم پوشی کرده است و به روش لاگرانژ معادلات سیستم را استنتاج نمود. سپس معادلات حرکت صلب ازتغییر شکلهای انعطافپذیر بوسیله خطی سازی معادلات حول مسیر حرکت صلب جدا شده است. در پایان این روش برای شبیه سازی دینامیکی و طراحی کنترلی پیشنهاد شده است [۵].

عابدی یک بازوی مکانیکی صفحه‌ای با دو عضو انعطافپذیر را در نظر گرفت. وی عضوها را همانند تیر تحت خمش در نظر گرفت و با استفاده از روش اجزا محدود و محاسبه انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل هر المان و بکارگیری اصل همیلتون، بازوی مکانیکی مدلسازی شده است. و در نهایت اثر پارامترهای مختلف همچون سفتی، چگالی و سرعت طی مسیر بر روی ارتعاشات مچ بررسی شده است [۶].

ظهور[۱] و خرسندی‌جو مدل دینامیکی بازوی ربات چرخان با دو لینک انعطافپذیر را تحلیل کرده‌اند. در کار مذکور مدل دینامیکی غیر خطی یک بازوی ربات متحرک با دو مفصل و دو لینک انعطافپذیر بزرگ انجام شده است. برای بدست آوردن معادلات حاکمه از اصل همیلتون استفاده کرده‌اند و تنش در اعضا را تنش سه بعدی در جسم همسانگرد الاستیک خطی در نظرگرفته‌اند، همچنین از برش عرضی صرفنظر شده است [۲].

محمد حفیظ[۲] مدلسازی دینامیکی بازوی مکانیکی با دو لینک انعطافپذیر را انجام داده است. این مدلسازی مربوط به یک بازوی ربات دوبعدی است و مدل ریاضی آن با استفاده از روش اجزا محدود گسترش داده شده است [۷].

ابه اکیرا[۳] مسیر بهینه برای یک بازوی مکانیکی دو عضوی صفحه‌ای که عضو دوم آن انعطافپذیر است را انجام داده است. آنها معیار بهینه سازی را کاهش ارتعاشات مچ در نظر گرفتند و برای مدل دینامیکی بازو، تغییر شکل محوری و خمشی را در نظر گرفتند. در کار مذکور برای بدست آوردن معادلات حرکت از روش مودهای فرضی و معادلات لاگرانژ استفاده شده است. پاسخ دینامیکی بدست آمده با روشهای عددی بهینه بودن مسیر مذکور را تصدیق می‌کند [۴].

میت کلایونسو[٤] مدل ریاضی و پاسخ دینامیکی یک ربات با یک عضو انعطافپذیر و اتصال کشویی چرخان را انجام داده است. در مطالعه مذکور بازوی انعطافپذیر یک تیر اویلر برنولی درنظر گرفته شده است و اثرات اینرسی چرخشی، میرایی حاصل از روانکاری محوری و نیروی وزن در نظر گرفته شده-

[۱] Zohoor
[۲] Mohammad Hafiz
[۳] Abe Akira
[٤] Mete Klayoncu

اند. معادلات حرکت با استفاده از روش لاگرانژ بدست آمده‌اند و با استفاده از روش رانک‌کاتا مرتبه ۴ حل شده‌اند [۳].

لیانفانگ[۱] تیان کنترل یک بازوی مکانیکی با اعضای صلب و انعطاف‌پذیر را مورد بررسی قرار داده است. در پروژه مذکور دینامیک مسئله مجهول و متغیر با زمان است که برای آن یک کنترلر حلقه بسته بر پایه فازی (FLC) و یک کنترلر حلقه باز بر مبنای شبکه عصبی (DRNN) پیشنهاد شده است. (DRNN) که توانایی نزدیک شدن به توابع غیر خطی را دارد، برای تقریب زدن دینامیک معکوس بازوی مکانیکی بکار گرفته شده است. تحلیل پایداری سیستک نیز انجام شده است و در نهایت شبیه-سازی گسترده‌ای در حالتهای مختلف انجام شده است و نتایج بدست آمده کارایی کنترلر مذکور را نشان داده است [۸].

مین گو[۲] کنترل یک ربات سه‌بعدی سنسوردار با اعضای انعطاف‌پذیر را مورد بررسی قرار داده است. انعطاف‌پذیری در مسئله مذکور حاصل از برخورد مچ ربات به محیط اطراف و نیروی استاتیکی حاصل از آن است، یعنی نیروهای دینامیکی در انعطاف‌پذیری آن اثری ندارند. با استفاده از کرنش-سنج تغییر شکلهای بازوی مکانیکی انعطاف‌پذیر بدست آمده است و با استفاده از آن موقعیت و جهتگیری مچ ربات مشخص شده است، همچنین نیروی وارده از طرف محیط اندازه‌گیری شده است. در ادامه الگوریتمی ترتیب داده شده است که توسط آن نیروهای مفصلی لازم برای ایجاد موقعیت و جهت‌گیری مورد نیاز برای مچ و نیروی لازم وارد بر محیط توسط مچ، محاسبه می‌شود. همچنین نشان داده شده است که نتایج الگوریتم مذکور با نتایج آزمایشگاهی انطباق خوبی دارد [۹].

کاراگول[۳] تحلیل ارتعاشات نقطه عمل یک بازوی مکانیکی انعطاف‌پذیر دو لینکی را با استفاده از روش انتگرالگیری (CAD/CAE) را انجام داده است و اثرات انعطاف‌پذیری روی مسیر طی شده توسط بازوی مکانیکی انعطاف‌پذیر صفحه‌ای دو لینکی را بررسی کرده است. در کار مذکور ابتدا گشتاورهای مفصلی لازم برای طی مسیر دلخواه توسط بازوی مکانیکی صلب محاسبه شده‌اند سپس این گشتاورها برای بازوی مکانیکی انعطاف‌پذیر بکار رفته‌اند. مسئله برای مسیرهای مختلف حل شده است و انحراف مچ از مسیر محاسبه شده است. در این کار نشان داده شده است که با کاهش شتاب مسیر انحراف مچ از مسیر کمتر خواهد شد [۱۰].

---

[۱] Lianfang
[۲] Min Gu
[۳] Karagulle

کورایم[1] تحلیل دینامیکی بازوی مکانیکی انعطاف‌پذیر چرخان به همراه بررسی ظرفیت ماکسیمم بار را انجام داده است. در کار مذکور مسیر مچ بازو به گونه‌ای محاسبه شده است که ظرفیت بار تحمل ماکسیمم شود. در بازوهای مکانیکی قدیمی (صلب) ظرفیت بار محدود به ظرفیت بکاراندازها و مفاصل است. اما در این مسئله انعطاف‌پذیری اعضا کار را پیچیده می‌کند. معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم انعطاف‌پذیر مشابه با یک سیستم صلب به شکل بسته بدست آمده‌اند و در فضای حالت بازنویسی شده‌اند سپس با استفاده از روش (ILP) ظرفیت بار بهینه (ماکسیمم) شده است. متغییر بهینه-سازی، مسیر حرکت مچ درنظر گرفته شده است. در نهایت مسئله برای یک تیر چرخان که پایه آن حرکت مستقیم الخط دارد، حل شده است [۱۱].

فرید[2] مدل دینامیکی یک بازوی مکانیکی خاص با اعضا و مفاصل انعطلف‌پذیر را انجام داده است. در کار مذکور برای مدل‌سازی دینامیکی از روش لاگرانژ و روش اجزا محدود استفاده شده است و اعضا انعطاپذیر در نظر گرفته شده‌اند، این انعطاف‌پذیری شامل خمش و پیچش اعضا می‌باشد و تغییر شکلهای الاستیک هر لینک در دستگاه مماسی متصل به جسم توصیف شده‌است. همچنین معادلات قید مربوط به اتصالات نیز به معادلات حرکت اضافه شده‌اند و در نهایت معادلات حاکم حل شده‌اند و رفتار سیستم پیش‌بینی شده‌است [۱۲].

آل-بیدور[3] تحلیل دینامیکی یک بازوی مکانیکی انعطاف‌پذیر با مفصل انعطاف‌پذیر که یک بار با اینرسی چرخشی در انتها حمل می‌کند را انجام داده است. معادلات حرکت با فرض اینکه تغییر شکلها کوچکند و با استفاده از روش لاگرانژ و روش اجزا محدود بدست آمده‌اند. تغییرشکل پیچشی برای مفصل و تغییر شکل خمشی برای اعضا در نظر گرفته شده‌اند.اثر اینرسی چرخشی بار انتهای تیر، اثر روانکاری و اثرات زیراسکوپی در معادلات دینامیکی در نظر گرفته شده است.نتایج نشان می‌دهد که نمی‌توان از اثر انعطاف‌پذیری مفاصل صرف‌نظر کرد. در نهایت نتایج حاصل از مدل خطی و غیرخطی با هم مقایسه شده‌اند، همچنین نتایج نشان می‌دهند که وجود بار انتهای تیر باعث افزایش دامنه ارتعاشات و کاهش فرکانس ارتعاشات می‌شود. به سبب اینکه مدل غیر خطی است، انتظار می‌رود ترکیبهای مختلف از پارامترهای سیستم اثرات متفاوتی را گسترش دهد. در این کار ارائه یک مدل صحیح در مرحله طراحی و ارزیابی کارایی پیشنهاد می‌شود [۱۳].

---

[1] Korayem
[2] Farid
[3] Al-Bedoor

وکیلی[۱] و همکارانش یک کنترلر جدید برای کنترل ارتعاشات بازوی مکانیکی انعطاف‌پذیر ارائه کرده‌اند. کنترلر مذکور با بکارگیری مفهوم انتگرال‌گیری معادلات حرکت در نقاط تکین بدست آمده است. در پایان نشان داده شده است که با بکارگیری این روش کنترلی ارتعاشات مچ بازوی مکانیکی کاهش پیدا می‌کند [۱۴].

ژانگ[۲] و همکارش کنترل حرکت بازوی مکانیکی انعطاف‌پذیر به وسیله بهینه سازی ساختار ربات را انجام داده‌اند. کنترل حرکت بازوهای مکانیکی انعطاف‌پذیر یک موضوع مهم در زمینه علم رباتیک است. برای افزایش دقت بازوی مکانیکی انعطاف‌پذیر لازم است انحراف نقطه پایانی از مسیر طراحی مینیمم شود. در این کار سه آرایش مختلف برای پیکربندی بازوی مکانیکی انعطاف‌پذیر با درجه آزادی اضافی ارائه شده است. در ادامه مفهوم افزونگی درجه آزادی توضیح داده شده است. با بهینه-سازی موقعیت اولیه مفاصل و حرکت بازوی مکانیکی به طور همزمان، به طور قابل توجهی خطای نقطه پایانی کاهش می‌یابد [۱۵].

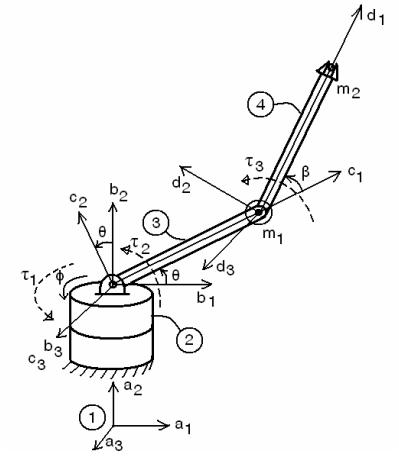
چورا[۳] و همکارانش مدل دینامیک یک تیر چرخان را به همراه کنرتل حلقه‌باز آن انجام داده‌اند. در کار مذکور معادلات دینامیک حاکم بر یک تیر نازک چرخان بدست آمده‌اند و جنس تیر ماده الاستیک خطی فرض شده است. تیر متصل به یک پایه صلب است که توسط یک موتور زاویه‌ای تحریک می‌شود. اثرات اینرسی چرخشی و اینرسی محوری در معادلات در نظر گرفته شده اند. معادلات با استفاده از روش مودهای فرضی بدست آمده‌اند. شکل مودهایی که در این روش بکار رفته‌اند، شکل مودهای تیر اویلر–برنولی یک سر گیردار و تیر اویلر–برنولی دو سر ساده‌می‌باشند.در این کار یک عملیات کنترل حلقه باز روی ارتعاشات تیر انجام شده است [۱۶].

۱-۳ مروری بر کار حاضر

در این پژوهش یک ربات سه درجه آزادی با دو عضو انعطافپذیر مطابق شکل (۱-۱) در نظر گرفته شده است. عضوها همانند تیر تحت خمش در نظر گرفته شده‌اند. از آنجایی که اعضا در فضای سه بعدی حرکت می‌کنند، در دو جهت عمود بر هم تحت خمش دوجانبه قرار می‌گیرند. همچنین از مدل تیر اویلر برنولی استفاده شده است.

---

[۱] Vakili
[۲] Zhang
[۳] Choura



شکل ۱-۱- شکل شماتیک ربات سه درجه آزادی

از ممان اینرسی پیچشی اعضا به دلیل کوچک بودن سطح مقطع صرف‌نظر شده است. بنابراین در عضو شماره چهار پیچش قابل صرف‌نظر کردن است، اما در عضو شماره سه به دلیل اثر دینامیکی عضو شماره چهار نمی‌توان از پیچش صرف‌نظر کرد. با استفاده از روش مودهای فرضی و محاسبه انرژی جنبشی و پتانسیل و بکارگیری معادلات لاگرانژ، بازوی مکانیکی مدل‌سازی شده است. همچنین برنامه رایانه‌ای تهیه شده که تحلیل دینامیکی بازوی انعطافپذیر را بطورکامل انجام می‌دهد. بدین منظور در فصل دوم مطالب علمی مورد نیاز (سینماتیک وارون، دینامیک وارون، روش مودهای فرضی و معادله لاگرانژ) بیان شده است. در فصل سوم تحلیل دینامیکی ربات با فرض صلب بودن اعضا انجام شده است. در این فصل سینماتیک معکوس و دینامیک معکوس برای یک مسیر فرضی انجام شده و گشتاورهای مورد نیاز برای تولید مسیر مذکور محاسبه شده‌اند. در فصل چهارم مدل دینامیکی برای ربات با اعضای انعطافپذیر بدست آمده است. انرژی پتانسیل و جنبشی سیستم محاسبه شده و با استفاده از روش مودهای فرضی و معادله لاگرانژ، معادلات حاکم بر سیستم بدست آمده‌اند. در فصل پنجم پارامترهای موثر بر حرکات دینامیکی بازوی مکانیکی انعطافپذیر مشخص و تاثیر هر کدام بر ارتعاش بازوی مکانیکی در حین حرکت بر روی یک مسیر معین مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. درادامه نشان داده شده است که مچ بازوی مکانیکی چگونه حول مسیر مورد نظر ارتعاش می‌کند و چگونه از دقت کار بازوهای مکانیکی با صرف‌نظر از انعطافپذیری اعضا کاسته می‌شود. در فصل ششم به جمعبندی و نتایج حاصل از این کار پرداخته شده است. در نهایت، مدل دینامیکی بدست آمده برای طراحی کنترلی پیشنهاد می‌شود تا بر دقت کار بازوهای مکانیکی انعطافپذیر افزوده شود و بتوان بازوهای مکانیکی را با دقت و سرعت بیشتری در بکار گرفت.

فصل دوم

اصول و مفاهیم علمی رباتیک

۲-۱ مقدمه

در این فصل تعاریف و مفاهیم اساسی مورد نیاز برای مطالعه بازوهای مکانیکی انعطافپذیر بیان می‌شوند. لذا مختصری از موضوعات مطرح در مورد رباتها مثل سینماتیک مستقیم و سینماتیک وارون جهت آشنایی بیشتر آورده می‌شوند. همچنین اهمیت رباتهای انعطافپذیر و علل توجه به آنها و پیچیدگی‌های مربوط به تحلیل آنها مورد توجه قرار می‌گیرد. سپس در مورد روش مودهای فرضی و روش لاگرانژ که در این کار مورد استفاده قرار گرفته‌اند توضیحات لازم داده شده است.

۲-۲ نقش مهندسی مکانیک در علم رباتیک

از جمله مباحثی که مهندسی مکانیک در مورد بازوهای مکانیکی مورد مطالعه قرار می‌دهد بدین شرح است، از آنجا که در بازوهای مکانیکی حرکت اجسام در فضای سه بعدی مطرح است، درباره هندسه بازوی مکانیکی، به مقوله مکان و جهتگیری در شاخه‌ای به نام سینماتیک مستقیم[۱] و سینماتیک وارون[۲] می‌پردازد، در شاخه‌ای به بررسی سرعت و نیروهای استاتیکی عضوها می-پردازد، و برخی از موضوعات دیگر مورد مطالعه مهندسی مکانیک عبارتند از، نیروها و گشتاورهای لازم برای حرکت عضوها، توصیف حرکت عضوها بر اساس مسیر حرکت مچ[۳] درفضا، مسائل طراحی بازوهای مکانیکی و روشهای کنترل بازوی مکانیکی. در ادامه به توضیح سینماتیک مستقیم و سینماتیک وارون (به جهت اهمیت موضوعات در مباحث بعدی) پرداخته می‌شود.

۲-۳ اهمیت بازوهای مکانیکی انعطافپذیر

بسیاری از صنایع امروز از رباتها کارهای سریع و دقیق انتظار دارند که هزینه کمتری هم داشته باشد. حال اگر از رباتها شتاب و سرعت زیادی خواسته شود، برای اجتناب از آثار دینامیکی نا مطلوب ناگزیر به استفاده از اعضای سبک هستیم، این موضوع در طراحی باعث محدودیت ضخامت اعضا می‌شود. در این صورت نمی‌توان اعضا را صلب در نظر گرفت و از انعطافپذیری آنها صرف‌نظر کرد، چون سختی خمشی و پیچشی لازم را ندارند. از طرفی اگر از ربات کار دقیق توام با سرعت زیاد خواسته شود ارتعاشات مچ اجتناب ناپذیر است. بنابراین نیاز است مدل کامل دینامیکی برای این بازوی مکانیکی بدست آورده شود که با استفاده از آن بتوان حرکت اعضا را تحت سرعتهای بالا به خوبی کنترل کرد.

---

[۱] Forward Kinematic
[۲] Invers Kinematic
[۳] End point

در مقایسه‌ای بین بازوهای مکانیکی صلب و انعطافپذیرمی‌توان اختلافاتی را دریافت که مزایای بازوهای مکانیکی انعطافپذیر عبارتند از مصرف انرژی کمتر، وزن کمتر، بکار اندازهای کوچکتر، قدت مانور بیشتر، دقت بالاتر و تحرک و سرعت عمل بیشتر.

روشهایی که برای کنترل رباتهای صلب بکار می‌رود برای بازوهای سبک و سریع(انعطافپذیر) مناسب نیست، بنابراین مدلهای کامل دینامیکی برای بازوهای مکانیکی انعطافپذیر پیشنهاد می‌شود که تاثیرات انعطافپذیری عضوها در آن لحاظ شده است و یک سیستم کنترلی پیشرفته برای انجام دادن یک مانور کارا باید توسعه داده شود. در این ضمینه بسیار پسندیده است که یک شکل کامل و صحیح از مدل دینامیکی در دست باشد.

انعطافپذیری در هر یک از قسمتهای بازوی مکانیکی، نسبت به کاربرد ربات می‌تواند متغیر باشد. مثلا در یک بازوی مکانیکی دارای عضوهای بلند اثرات انعطافپذیری عضو بیشتر است که این اختلاف در انعطافپذیری اعضا باعث تقسیم بندی بازوهای مکانیکی انعطافپذیر می‌شود که عبارتند از بازوهای مکانیکی دارای اعضای انعطافپذیر[۱]، بازوهای مکانیکی دارای مفاصل انعطافپذیر[۲] و بازوهای مکانیکی دارای عضوها ومفاصل انعطافپذیر که در این پایان‌نامه به انعطافپذیری حاصل از عضوها پرداخته می‌شود.

۲-۴ سینماتیک بازوهای مکانیکی

سینماتیک علمی است که به حرکت اجسام بدون درنظر گرفتن عوامل بوجود آورنده آن می-پردازد و سینماتیک یک بازوی مکانیکی در واقع مطالعه هندسه حرکت عضوهای بازوی مکانیکی می‌باشد. از آنجایی که انجام وظایف مشخص به وسیله حرکت عضوها میسر می‌شود، علم سینماتیک جز ابزار مهم در طراحی و کنترل بازوهای مکانیکی می‌باشد. در این علم مکان، سرعت، شتاب و مشتقات بالاتر آن بررسی می‌شوند. مسئله اساسی در این علم موقعیت و جهتگیری یک جسم صلب در فضا می‌باشد که در زیر به توضیح این مفهوم پرداخته می‌شود.

در محیط کار بازوی مکانیکی، عضوها، مفاصل، مچ و سایر اجسام قرار دارند، همچنین عضوها را می‌توان به صورت صلب مدل‌سازی کرد. مهندسی مکانیک در ابتدا باید موقعیت مکانی هر یک از عضوهای صلب در فضای سه بعدی را به گونه‌ای که ارجاع دادن به هر یک از نقاط عضو صلب براحتی امکان‌پذیر باشد مشخص کند چرا که این مبحث زیر بنای مباحث بعدی می‌باشد. به این منظور برای توصیف موقعیت و جهت‌گیری هر یک از عضوها در فضا همواره یک دستگاه مختصات به صورت صلب به ابتدای عضو متصل می‌شود و سپس به توصیف موقعیت و جهت‌گیری این

[۱]- Flexible Link
[۲]- Flexible Joint

دستگاه مرجع پرداخته می‌شود [۱]. نکته حائز اهمیت دیگر تعداد درجات آزادی بازوی مکانیکی می‌باشد که چون بازوی مکانیکی یک زنجیره‌ای باز از عضوها می‌باشد، و درجه آزادی هر عضو معمولا تنها با یک متغیر توصیف می‌شود (چون هر عضو به‌تنهایی فقط می‌تواند دوران داشته باشد) تعداد درجات آزادی در بازوی مکانیکی با تعداد مفصلها برابر خواهد بود.

حال که مفهوم مکان و جهت‌گیری مشخص شد مسئله سینماتیک بازوهای مکانیکی ادامه داده می‌شود. سینماتیک شامل دو بخش سینماتیک مستقیم و سینماتیک وارون می‌باشد که سینماتیک مستقیم بازوهای مکانیکی در واقع مسئله هندسی-استاتیکی محاسبه مکان و جهت‌گیری مچ بازوی مکانیکی است. این مسئله اینطور بیان می‌شود چنانچه یک دسته زاویه مفصلی داده شده باشد، مکان و جهت‌گیری مچ بازوی مکانیکی را بیابید که در این علم به حل این مسئله پرداخته می‌شود. مسائل سینماتیک وارون این چنین مطرح می‌شود که چنانچه مکان و جهت‌گیری مچ بازوی مکانیکی داده شده باشد، کلیه مجموعه‌های زوایای مفصلی ممکن را که می‌توانند برای رساندن بازوی مکانیکی به مکان و جهت‌گیری مفروض مورد استفاده قرار گیرد محاسبه کنید. که این مسئله‌ای اساسی در کاربرد علمی بازوهای مکانیکی است. حل مسئله سینماتیک وارون به سادگی حل مسئله سینماتیک مستقیم نیست. چون معادله‌های سینماتیکی غیر خطی‌اند و حل آنها در اکثر موارد به سادگی امکان ندارد و در برخی موارد نیز غیر ممکن است. ولی با کارهایی که جدیداً روی این مسئله شده، برای هر بازوی مکانیکی یک روش خاص خود که ساده‌ترین روش حل این مسئله می‌باشد ابداع شده است. همچنین این مسئله می‌تواند یک یا چند جواب داشته و یا اصلاً جواب نداشته باشد. فقدان جواب بدین معناست که مچ بازوی مکانیکی نمی‌تواند به مکان و جهت-گیری مطلوب دست یابد زیرا چنین مکان و جهت‌گیری مچ در خارج از فضای کاری بازوی مکانیکی قرار دارد.

۲-۵ دینامیک لاگرانژی

در این روش بعد از استنتاج ترمهای انرژی جنبشی کل سیستم T_T و انرژی پتانسیل کل سیستم U و بکارگیری معادله زیر که به آن معادله لاگرانژ گفته می‌شود، معادلات حاکم استنتاج می‌شوند.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \qquad (۱-۲)$$

که در رابطه فوق چنین است:

$$L = T_T - U$$