

Dynamic Analysis and Control of Distributed Manipulation Systems

Ali

Elahidoost

Elahidoost@me.iut.ac
.ir

10/12/20

08

Department of Mechanical
Engineering

Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111,
Iran

Dr. Mehdi Keshmiri,

mehdik@cc.iut.ac.ir

**Dr. Mohammad Jafar
Sadigh**

**Dr. Mehdi
Keshmiri**

چکیده

سیستم‌های انتقال‌دهنده توزیع شده عموماً از تعداد زیادی محرک مشابه در تعامل با یکدیگر تشکیل شده که با یک استراتژی کنترل، شیء یا اشیائی را حرکت می‌دهند. هدف اغلب سیستم‌های انتقال‌دهنده توزیع شده موقعیت‌دهی دقیق اشیاء صفحه‌ای از تمام وضعیت‌های آغازین است. در این پایان‌نامه ابتدا به دینامیک یک سیستم انتقال‌دهنده با تعداد n محرک توزیع شده پرداخته شده است. مدل کردن این سیستم‌ها مشکل است؛ قسمتی از آن به این دلیل است که دینامیک سیستم هم غیر یکنواخت و هم نامعین است. نامعینی‌های سیستم با فرضیات معقولی حل شده و برای حالت خاص چهار چرخ بررسی و جایگذاری شده است.

پس از تحلیل دینامیک سیستم، نوع کنترل‌کننده‌ای که قرار است مورد استفاده قرار بگیرد، بحث و بررسی شده است. مزیت‌ها و معایب کنترل‌کننده‌های فازی در مقایسه با کنترل‌کننده‌های مرسوم بیان گردیده و در نهایت به جزئیات طراحی کنترل‌کننده فازی و تعیین پارامترهای آن پرداخته شده است. برای تعیین این پارامترها کنترل موقعیت، کنترل موقعیت و جهت و کنترل جسم در تعقیب مسیر هر کدام به صورت جداگانه برای حالت چرخ دارای دو درجه آزادی و چرخ دارای یک درجه آزادی مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای آنها تعیین شده است.

برای ارزیابی نتایج نظری به صورت عملی یک مجموعه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است. ساختار سخت‌افزاری و نرم‌افزاری سیستم آزمایشگاهی و جایگاه هر یک از اجزاء آن در کارکرد کل سیستم در این پایان‌نامه بیان گردیده و معایب و مزایای آنها مطالعه و بررسی شده است. همچنین در این قسمت در مورد تأثیر دقت اندازه‌گیری پارامترهای سیستم توسط سیستم پردازش تصویر بر کنترل جسم و موقعیت‌دهی آن توضیحاتی داده شده است.

مقایسه نتایج تست‌های عملی با شبیه‌سازی‌های عددی آخرین بخش کارهای انجام شده در این تحقیق را تشکیل می‌دهد. این مقایسه برای یک مورد کنترل موقعیت و دو مورد تعقیب مسیر صورت گرفته و مشابهت‌ها و دلیل تفاوت‌های نمودارهای حاصل از داده‌های شبیه‌سازی و داده‌های تجربی بیان شده است.

در انتها به جمع‌بندی نتایج و ارائه پیشنهاداتی در جهت بررسی همه‌جانبه‌تر این نوع سیستم‌ها در حالت کلی و بهبود کنترل و بهینه‌سازی پارامترهای آن در مورد نمونه آزمایشگاهی ساخته شده، پرداخته شده است.

فصل اول

مقدمه

۱ + پیشگفتار

در بسیاری از فرآیندها نیاز به جابجایی و انتقال اشیاء در صفحه وجود دارد. دو نمونه از این کاربردها ساخت انعطاف پذیر^۱ و انتقال بسته بندی ها است. ساخت انعطاف پذیر مستلزم این است که مسیرهای قطعات کاری به صورت دلخواه مشخص شوند و این مسیرها بلافاصله توسط برنامه نویس کارخانه به هنگام شوند. در سیستم های انتقال بسته بندی، مانند انتقال بار مسافری در فرودگاه ها، بسته ها بایستی مرتب شده، به جهت معین هدایت شده و سپس به یکی از جایگاه ها انتقال داده شوند.

دو نمونه از انتقال دهنده های پر کاربرد در صنعت نوار نقاله ها و ربات ها هستند [۱].

۱ + + ربات

کلمه ربات برای اولین بار توسط یک نمایشنامه نویس اهل چک به نام Karel Čapek در سال ۱۹۲۰ به کار برده شد. کلمه ربات در زبان چک به معنی «کار» است. در دهه ۱۹۶۰ ربات ها امیدهای فراوانی را برای ایجاد انقلابی یک شبه در صنعت به وجود آوردند. با این وجود، بسیاری از این امیدهای دور و دراز محقق نشده اند. برای مثال، در مونتاژهای زیر سطح آب و حفاری نفت، کار با ربات های کنترل از راه دور بسیار مشکل است. با این وجود، مهندسان با طراحی های خوب و توجه فوق العاده به جزئیات، موفق به کارگیری سیستم های رباتیک در عرصه های گوناگون

¹ Flexible Manufacturing

تولیدی و صنعتی در محیط‌های ساختاریافته و قابل پیش‌بینی شده‌اند. امروزه، با پیشرفت‌هایی که در رایانه‌ها و تکنیک‌های هوش مصنوعی حاصل شده است، ما بار دیگر در مرز تحولی در رباتیک قرار گرفته‌ایم که بعضی از درجات خودگردانی را در محیط‌های فاقد ساختار مشخص امکان‌پذیر می‌سازد.

در عمل، ربات‌ها از دیگر وسایل متحرک الکترومکانیکی به دلیل قابلیت تحرک و جابه‌جایی ماهرانه و پیچیده‌شان متمایز می‌شوند؛ بدین معنا که ربات‌ها با مهارت و چالاکی بسیار بیشتری نسبت به دیگر ماشین‌های موجود در کارخانه می‌توانند کار کنند، موقعیت‌دهی نمایند یا ابزارها و دیگر اشیاء را حمل کنند. سیستم‌های رباتیک کاربردی دارای اجزایی همچون گریپر^۱ (گیره)، end effector، حسگر و ابزار کار هستند که با انجام مجموعه‌ای از وظایف یک فرآیند را به اتمام می‌رسانند و به سیستم‌های کنترلی پیچیده‌ای نیاز دارند [۲].

مؤسسه رباتیک آمریکا^۲ (RIA) ربات‌ها را به چهار دسته تقسیم‌بندی کرده است:

- ۱) وسایل متحرک یا انتقال‌دهنده با کنترل دستی
- ۲) وسایل متحرک یا انتقال‌دهنده خودکار با چرخه‌های از پیش تعیین شده
- ۳) ربات‌های قابل برنامه‌ریزی کنترل سرو با خط سیر^۳ پیوسته نقطه به نقطه
- ۴) ربات‌های با ویژگی‌های نوع C که برای حرکت هوشمند اطلاعات از محیط دریافت می‌کنند [۳]

علیرغم تمامی محاسن و مزایایی که گفته شد، ربات‌ها معایبی نیز دارند. عموماً ربات‌ها در هر بار تنها قادر به برداشتن یک جسم هستند که خود می‌تواند عامل مهمی در کاهش سرعت برخی فرآیندهای صنعتی باشد. دیگر اینکه به خاطر اینکه ربات‌ها اجسام و ابزارها را حمل می‌کنند، به توان و گشتاور بسیار زیادی برای بلند کردن اجسام سنگین نیاز دارند که استفاده از آنها را با محدودیت مواجه می‌کند.

۱ + ۴ نوارنقاله

نوارنقاله‌ها قادرند عملاً تعداد زیادی شیء حجیم و سنگین را در مسیرهای طولانی حمل کنند، اما فاقد قابلیت جهت‌دهی دقیق هستند و عملاً نمی‌توانند اشیاء را مرتب کنند. علاوه بر این، در عین حال که نوارنقاله‌ها این اجازه را به اجسام می‌دهند که به سمت مقصدهای مختلف تغییر مسیر دهند، برای ادغام و ترکیب اشیاء از منابع متفاوت مناسب نیستند. سیستم انتقال‌دهنده توزیع شده مزایای سیستم نوارنقاله و رباتیک، هر دو را دارد، در عین حال که بر محدودیت‌های آنها فایز آمده است [۴].

۱ + ۴ سیستم انتقال‌دهنده توزیع شده

سیستم انتقال‌دهنده توزیع شده عموماً شامل تعداد زیادی محرک مشابه است که در یک صفحه چیده شده‌اند و دارای

¹ Gripper

² Robotics Institute of America

³ Trajectory

یک استراتژی کنترل برای حرکت شیئی یا اشیائی که بر روی آن قرار داده می‌شوند، است. بسیاری از سیستم‌های انتقال‌دهنده توزیع شده به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که توانایی موقعیت‌دهی دقیق اشیاء صفحه‌ای از موقعیت اولیه دلخواه را دارند. با این قابلیت، یک انتقال‌دهنده توزیع شده یک حامل هوشمند است که می‌توان از آن برای جداسازی قطعات و موقعیت‌دهی دقیق آنها به منظور مونتاژ استفاده کرد. از سیستم‌های انتقال‌دهنده توزیع شده می‌توان در میکرومونتاژ به وسیله MEMS بهره برد [۵]. محرک سیستم‌های انتقال‌دهنده توزیع شده از جت‌های هوا و چرخ در مقیاس ماکرو تا سیستم‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS) و محرک‌های مژده‌ای شکل منعطف در مقیاس میکرو تنوع دارند.

مدل کردن این سیستم‌ها به‌دلیل دینامیک غیر یکنواخت سیستم و نامعین بودن آن، مشکل است [۶]. ساخت این ماشین‌ها عموماً آسان است، اما کنترل سیستماتیک چنین وسایلی می‌تواند بسیار سخت باشد. همین امر موجب افزایش در مطالعات مربوط به کنترل سیستم‌های انتقال‌دهنده توزیع شده، گردیده است. تعداد محرک‌های سیستم‌های انتقال‌دهنده توزیع شده بسیار زیاد است. این سیستم‌ها به صورت بالقوه می‌توانند دارای هزاران ورودی باشند (گرچه عموماً تنها بخشی از محرک‌ها در هر لحظه بر روی شیئی متحرک تأثیر می‌گذارند)، در حالی که خروجی شامل فضای حالت شیئی انتقال‌یافته است [۷].

۴ ۱ تاریخچه کارهای انجام شده

مفهوم کنترل حرکت همکارانه در گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. رینولدز حرکت دسته‌جمعی پرندگان را با استفاده از قوانین ساده بین عامل‌های مستقل که به محیط اطراف واکنش نشان می‌دهند، شبیه‌سازی کرد (۱۹۸۷). ایده رباتیک سلولی که توسط ونگ و بنی شرح داده شده از این جهت شبیه به سیستم حمل و نقل مجازی است که آرایه ثابتی از ربات‌ها با یکدیگر همکاری می‌کنند تا قطعات را برای ساخت جابه‌جا کنند، اما در رباتیک سلولی قطعات تنها توسط یک ربات در هر زمان جابه‌جا می‌شوند. برخلاف وسیله نقلیه مجازی، قطعات کوچک‌تر از ربات‌ها هستند (۱۹۹۱).

Donald ، Bohringer و دیگران در ۱۹۹۹ نوعی از انتقال بدون حسگر را با استفاده از آرایه‌ای از محرک‌های میکرومکانیکی آزمایش کردند که در آن اشیاء بسیار ریز جابه‌جا می‌شد. شایان ذکر است که گرچه کار این گروه ارزشمند بوده و سبب تحقیقات اساسی در این زمینه شده است، از روش شبه استاتیک برای تحلیل مسئله استفاده می‌کند و به‌خاطر مقیاس کوچکش از دینامیک آن صرف‌نظر می‌کند.

Kavraki در ۱۹۹۷ تحلیل بیشتری از سیستم‌های دارای میکرومحرک با استفاده از میدان پتانسیل ارائه کرد که این میدان، جسم را بدون استفاده از حسگر به جهت مورد نظر هدایت می‌کند.

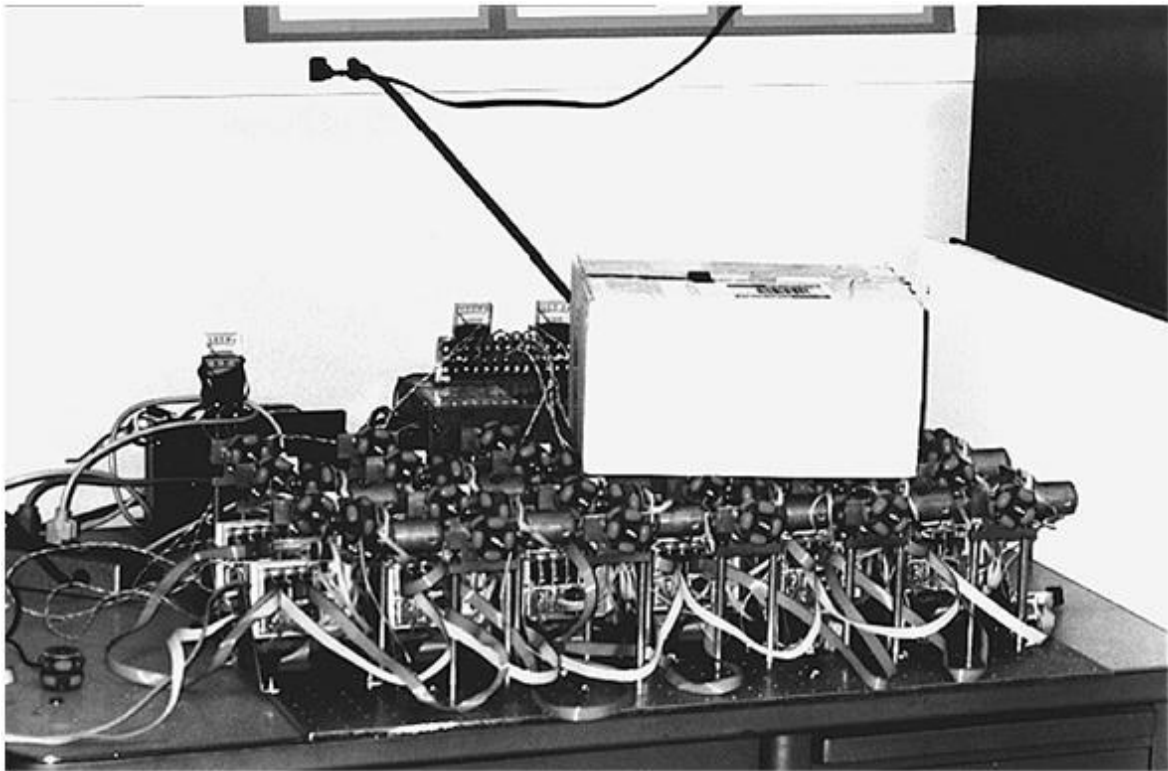
توابع پتانسیل برای پیش‌بینی هیئت‌های پایدار اجسام مورد استفاده قرار می‌گیرند. توابع پتانسیل پیوسته تقریب مناسبی

برای سیستم‌های Karavaki و Bohringer هستند، زیرا تعداد زیادی سلول‌های میکرو یک شیء بزرگ‌تر را حمل می‌کنند. از تئوری میدان پتانسیل نمی‌توان برای طراحی حرکت سیستم‌هایی استفاده کرد که در آنها اندازه محرک‌ها در مقایسه با جسم به اندازه کافی کوچک و تعداد آنها به اندازه کافی زیاد نیست [۱].

تحقیقاتی که از اواسط دهه ۱۹۹۰ به بعد انجام گرفته شامل تمامی ابعاد و اندازه‌ها می‌شود. در مقیاس ماکروسکوپیک، خطوط گرهی بر روی صفحات مرتعش، مانند میدان‌های فشار برای جابه‌جایی توسط کنترل حلقه‌باز عمل می‌کنند [۸]. ارتعاش ورق‌ها درون یک صفحه برای انتقال اشیاء توسط کنترل حلقه‌بسته با استفاده از فیدبک سیستم‌های تصویری مورد استفاده قرار گرفته است [۹]. آرایه‌ای از مکانیزم‌های پایی شکل برای جابه‌جایی اشیاء بزرگ اما سبک ساخته شده است [۱۰]. آرایه‌ای از چرخ‌های متصل به موتور که توسط کنترل توزیع‌شده کار می‌کنند، اشیاء بزرگ و سنگین‌تر را جابه‌جا می‌کنند [۱۱]. در مقیاسی کوچک‌تر، آرایه‌ای از جت‌های هوای کنترل‌پذیر برای جابه‌جایی کاغذ مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰]. آرایه‌ای از محرک‌های ژلاتینی پلیمری الکترواکتیو کوچک، نرم و مژه‌ای شکل برای جابه‌جایی ورق‌های کوچک غوطه‌ور در آب استفاده شده است [۱۲]. در مقیاس تقریباً میکروسکوپیک، آرایه‌های میکروالکترومکانیکی الکترواستاتیکی ارتعاشی و دمایی بیومورف^۱ برای انتقال اشیاء بسیار ریز به کار گرفته شده‌اند [۱۳].

در زمینه چرخ‌های متصل به موتور در مقیاس ماکروسکوپیک دو گروه کارهای مهمی انجام داده‌اند. گروه اول که شامل Luntz، Messner و Choset می‌شود ابتدا کار خود را بر روی سیستمی به نام وسیله نقلیه مجازی متمرکز کردند که شامل تعداد زیادی چرخ متصل به موتور همراه با میکرو کنترلر بود [۱۴] (شکل ۱-۱). در ابتدا سعی این گروه بر این بود که بتوانند جعبه‌ای را با استفاده از کنترل حلقه‌باز به مکان مورد نظر انتقال دهند و در نهایت آن را به جهت مورد نظر هدایت کنند [۴].

¹ Thermal Biomorph



شکل ۱-۱: وسیله نقلیه مجازی ساخته شده توسط گروه آقای Luntz

مزیت کنترل حلقه باز در کم هزینه بودن و سادگی آن در مقایسه با کنترل حلقه بسته است. هر چه اندازه موتورها نسبت به جسم کوچکتر و تعداد آنها بیشتر باشد، دقت موقعیت و جهت نهایی جسم بیشتر خواهد بود. در عمل کنترل حلقه باز دقت کمی در جهت دهی جسم دارد، در حالی که در موقعیت دهی آن دقت قابل قبولی دارد [۱۱]. این گروه همچنین سعی کردند که با آرایش‌های مختلفی که به موتورها می‌دهند انتقال جسم را در مسیرهای پیچیده بررسی کنند. در بررسی دینامیک مسئله به خاطر زیاد بودن تعداد موتورها و اندازه کوچک آنها در مقایسه با جعبه، فرض کرده‌اند که نیروی عمودی وارد بر سطح به صورت خطی از آخرین چرخ در تماس با جعبه تا اولین چرخ در تماس با آن تغییر می‌کند [۱]. در دینامیک مسئله فرض بر آن بوده که در سرتاسر زمان حرکت یک نوع اصطکاک بر جسم حاکم است (ویسکوز یا غلظشی یا لغزشی کولمب) و اثر هر کدام را جداگانه بررسی کرده‌اند. در نهایت به گونه‌ای کنترلر را طراحی کرده‌اند که سرعت مرکز جسم بسیار پایین باشد به طوری که جسم در هر لحظه در حالت تعادل باشد و آنگاه فرض شبه استاتیک بودن را در مورد آن نموده‌اند. این گروه ابتدا کار خود را بر روی حرکت یک جعبه بعدی آغاز کردند و سپس آن را به دو بعد تعمیم دادند [۱۵]. سعی آنها بر این بوده که در حالت حلقه باز جعبه بر روی چرخ‌ها بلغزد تا بتوانند از مدل دینامیکی جرم و فنر بهره ببرند [۱۶].

این گروه در کارهای بعدی خود کنترل حلقه بسته را مد نظر قرار داده‌اند. در کنترل حلقه بسته بر عکس کنترل حلقه باز، سرعت هر چرخ در طول زمان می‌تواند متغیر باشد. بدین منظور از کنترل غیر متمرکز استفاده کرده‌اند. در

این نوع کنترل هر چرخ یک میکروکنترلر جداگانه برای خود دارد و تنها از حرکت و تماس جسم با چرخ‌های کناری خود اطلاع دارد. دلیل استفاده از این نوع کنترلر این است که استفاده از کنترلر متمرکز برای کنترل دهها یا شاید صدها چرخ کار دشواری است. اما عیب آن نسبت به کنترلر متمرکز این است که جهت دهی با آن دارای دقت کمتری است. در سیستم حلقه بسته جدید که با اصلاح سیستم حلقه باز قبلی به دست آمده، برای گرفتن فیدبک از سیستم از سنسورهای باینری برای تشخیص موقعیت و جهت جسم استفاده می‌شد. در کنترل حلقه بسته می‌توان جسم را با دقت بسیار زیادتری نسبت به کنترل حلقه باز به موقعیت و جهت دلخواه هدایت کرد. همچنین می‌توان از آن کارکردهایی انتظار داشت که در کنترل حلقه باز امکان آن وجود ندارد. برای مثال فرض کنید که چند قطعه داشته باشیم که به صورت تصادفی بر روی این چرخ‌ها ریخته شوند. برای اینکه این قطعات با یکدیگر تصادم نکنند، به جز در موارد خاصی نمی‌توان از کنترل حلقه باز استفاده کرد. در صورتی که با استفاده از کنترل حلقه بسته می‌توان موقعیت این اجسام را شناسایی کرد و از تصادم آنها با یکدیگر جلوگیری نمود.

نکته بارز در کارهای گروه آقای Luntz این است که در هر دو حالت سعی می‌کند با استفاده از میدان‌های فشار (ثابت یا متغیر) جسم را به موقعیت و جهت مورد نظر هدایت کند.

فرد دیگری که در این زمینه کار کرده، Murphey است. او در [۱۷]، [۱۸]، [۷]، [۱۹] و [۲۰] به بررسی دینامیک، پایداری و طراحی کنترل سیستم‌های انتقال‌دهنده توزیع شده پرداخته است. Murphey به غیر از کارهای انجام شده قبلی سه موضوع جدید را مطرح و بررسی کرده است. اول این که زمانی که طبیعت گسسته آرایه محرک‌ها و مدل دینامیکی تماس محرک با شیئی با استفاده از Power Dissipation Method (روش اتلاف انرژی) در نظر گرفته شود، سیستم‌های کنترلی طراحی شده توسط روش‌های تقریب پیوسته (مانند میدان برداری پیوسته نیروها) ناپایدار خواهند بود. گرچه این مسئله قبلاً توسط Luntz بررسی و اثبات شده بود، Murphey آن را تعمیم داده است.

دوم این که از یک روش اتلاف انرژی (PDM) برای مدل کردن تماس شیئی با محرک‌ها استفاده می‌کند. این روش که از کار Alexander و Maddocks [۲۱] اقتباس شده، بر این اساس بنا شده است که یک شیئی در جهتی حرکت می‌کند که انرژی تلف شده مربوط به آن مینیمم گردد. بر این مبنا مدل‌های تماس محرک و جسم به شکل یک سیستم کنترلی هیبرید چند ضابطه‌ای در می‌آید و سبب می‌شود به جای داشتن یک میدان نیرویی تعریف شده در صفحه، بتوان یک میدان سرعت در صفحه تعریف نمود.

در نهایت او نشان می‌دهد زمانی که فیدبک به چنین سیستمی اضافه شود، آنگاه این سیستم پایدار خواهد بود. سپس یک قانون کنترلی بر اساس روش کنترل لیاپانوف^۱ طراحی می‌کند. او روش میدان نیروی قابل برنامه‌ریزی را با یک

^۱ Lyapunov

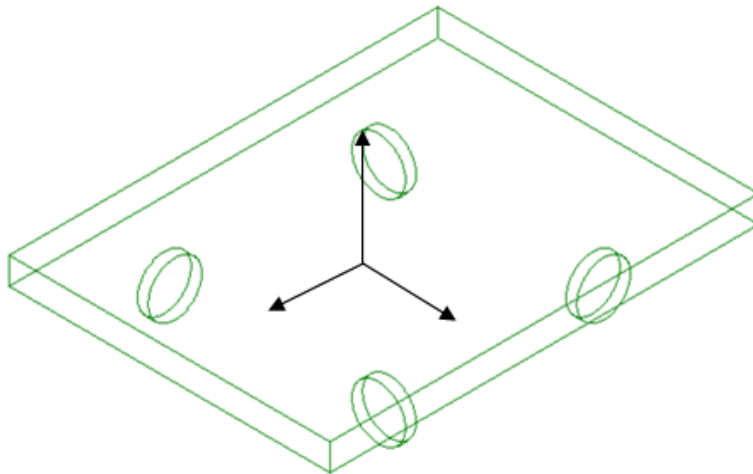
روش فیدبک ترکیب می کند و یک کنترلر پایدار به دست می آورد که تنها در همسایگی مبدأ فیدبک دارد. فرض اساسی در به دست آوردن معادلات دینامیکی سیستم Murphey در نزدیکی مبدأ این است که سیستم به صورت شبه استاتیک رفتار می کند. این فرض در صورتی درست است که سرعت جسم کم و شتاب آن نزدیک به صفر باشد.



شکل ۱-۲: سیستم انتقال دهنده توزیع شده ساخته شده توسط آقای Murphey

۳ ۱ تعریف مسئله

یک سیستم انتقال دهنده شامل چهار چرخ وجود دارد. هر چرخ می تواند یک یا دو درجه آزادی داشته باشد و هر کدام یک یا دو محرک جداگانه دارند. هر محرک یک موتور DC است که مستقیماً توسط رایانه مرکزی کنترل می شود. نقطه وسط چرخها ثابت است و هر چرخ علاوه بر دوران حول محور خود، می تواند حول محور عمود بر صفحه شامل محورهای چرخها نیز دوران کند (شکل ۱-۳). یک شیء با کف مسطح بر روی این چهار چرخ قرار می گیرد. انتقال نیرو بین جسم و چرخها به صورت اصطکاکی است. هدف ما در این مسئله، انتقال جسم به موقعیت و جهت مورد نظر با استفاده از اصطکاک بین چرخها و جسم است. در این مسئله فرض شده است که اصطکاک بین چرخها و صفحه به صورت نقطه ای و در تمام جهات یکسان است. انعطاف پذیری بین چرخها و صفحه به صورت خطی مدل شده است. چرخها همگی با صفحه در تماس هستند و در یک صفحه افقی بدون اعوجاج قرار دارند و صفحه صلب و همگن می باشد.



شکل ۱-۳: مدل شماتیک از مسئله

۱-۴ روند تدوین پایان نامه

پس از بیان نکاتی به عنوان مقدمه و مروری بر کارهای انجام شده و تعریف مسئله و روند تدوین پایان نامه در این فصل، در فصل دوم به معادلات دینامیکی حاکم بر جسم و چرخ‌ها پرداخته می‌شود. بدین منظور علاوه بر معادلات نیوتن، معادلات اصطکاک هم که به صورت چند ضابطه‌ای هستند باید در نظر گرفته شود. در آنجا نشان داده خواهد شد که در هر لحظه جسم می‌تواند یکی از ۲۱۶ حالت ممکن برای اصطکاک را اختیار کند که هر کدام از این حالات باید مورد بررسی قرار گیرند. بنابراین معادلات دینامیکی حاکم بر جسم غیر یکنواخت خواهد بود. برای به دست آوردن یک تصویر روشن از دینامیک سیستم ابتدا سیستمی صفحه‌ای با وجود دو چرخ و یک جسم بر روی آن را در نظر گرفته و معادلات حاکم بر سیستم به دست آورده می‌شود. سپس به حالت چهار چرخ پرداخته شده و معادلات سیستم به دست می‌آید.

در فصل سوم به کنترل جسم پرداخته خواهد شد. در ابتدا مروری مختصر بر روی کنترل کننده‌های فازی خواهیم داشت. سپس به کنترل چهار چرخ که هر کدام دارای دو درجه آزادی باشند با استفاده از کنترلر فازی پرداخته شده است. کنترل موقعیت، کنترل موقعیت و جهت و کنترل مرکز جسم روی یک مسیر زمانی^۱ بررسی می‌شود. پس از آن برای چهار چرخ که هر کدام دارای یک درجه آزادی باشند کنترل کننده طراحی می‌گردد. عملیات‌های پیشین برای این مورد هم تکرار می‌شود.

در فصل چهارم درباره نمونه آزمایشگاهی که ساخته شده توضیح داده شده است. نمونه آزمایشگاهی شامل بخش‌های زیر است:

الف) قسمت‌های مکانیکی، که عبارت از چرخ‌ها، موتورها، کوپلینگ‌ها، بلبرینگ‌ها و جسم است.

¹ Trajectory

ب) قطعات الکترونیکی و الکتریکی که برای گرفتن فیدبک، تحلیل داده‌ها و دادن فرمان و جریان برق به موتورها مورد استفاده قرار گرفته است. این قطعات شامل Encoderها، Webcam، درایور Magellan، رایانه و Amplifier است.

ج) نرم افزار واسط که فیدبک تصویری از Webcam و فیدبک موقعیت و سرعت از Encoder ها گرفته، آن را تحلیل کرده، و با استفاده از کنترلر فازی طراحی شده برای آن خروجی را محاسبه و سپس به موتورها فرمان مورد نیاز را ارسال می کند. این نرم افزار در زبان برنامه نویسی Visual C++ نوشته شده است.

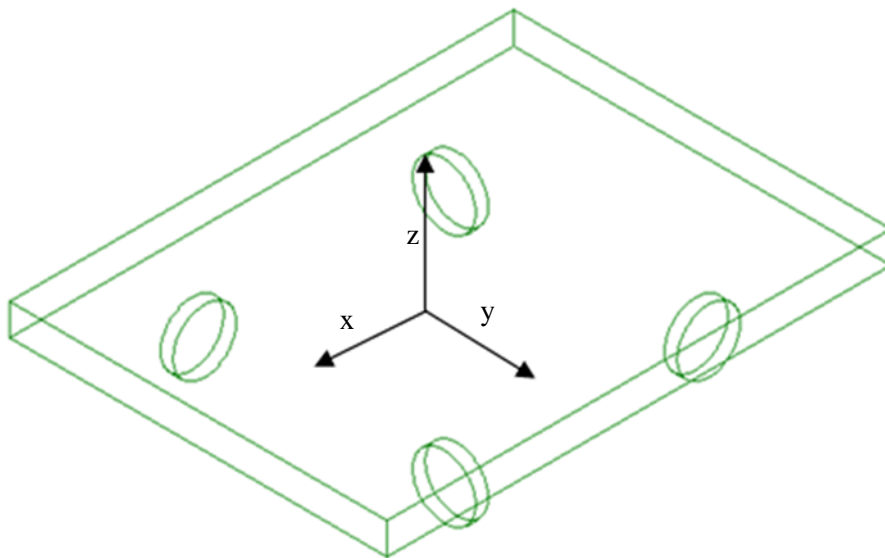
فصل پنجم به بررسی نتایج تجربی و مقایسه آن با نتایج تئوری پرداخته شده و اختلاف احتمالی نتایج با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل ششم نتایج فصل‌های قبل به صورت مختصر جمع بندی شده است و پیشنهادهایی در مورد کارهای بیشتری که در این زمینه می تواند صورت بگیرد، شده است.

فصل دوم مدل سازی دینامیکی

۲ + مقدمه

سیستم مورد مطالعه دارای چهار چرخ است که هر کدام در یک نقطه با صفحه‌ای که بر روی آنها قرار دارد، در تماس هستند (شکل ۱-۲). صفحه‌ای که بر روی چرخ‌ها قرار دارد، صلب است. چرخ‌ها جسم را به وسیله نیروی اصطکاکی حرکت می‌دهند. در نتیجه تعیین یک مدل اصطکاکی برای مدل دینامیکی جسم ضروری است.



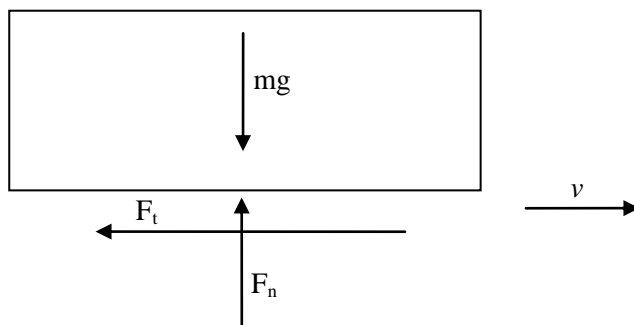
شکل ۱-۲: مدل شماتیک از سیستم

۴ ۲ مدل اصطکاکی مسئله

در بررسی دینامیک مربوط به دوجسمی که با هم تماس دارند یک مدل اصطکاکی مورد نیاز است. مدل اصطکاکی مورد استفاده در بررسی اصطکاک بین چرخ‌ها و صفحه، مدل اصطکاک کولمب است. با فرض اینکه بین چرخ و صفحه اصطکاک استاندارد کولمبی وجود دارد و تماس به صورت نقطه‌ای است، نیروی اصطکاک وارد شده بر جسم از طرف سطح تماس برابر است با:

$$\begin{cases} F_t = -\mu F_n \text{sign}(v) & \text{if } v \neq 0 \\ |F_t| \leq \mu F_n & \text{if } v = 0 \text{ and } \dot{v} = 0 \\ F_t = 0 & \text{if } v = 0 \text{ and } \dot{v} \neq 0 \end{cases} \quad (1-2)$$

که در آن μ ضریب اصطکاک، v سرعت نسبی بین جسم و نقطه تماس بر روی چرخ، F_t نیروی اصطکاک و F_n نیروی عمود بر سطح است. نیروی F_n مثبت فرض شده است. در این مدل فرض شده که ضریب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی با یکدیگر برابر هستند.



شکل ۲-۲: مدل تماس بین جسم و سطح خارجی

ذکر این نکته ضروری است که معادله دوم در (۱-۲) سه حالت متفاوت را بیان می‌کند؛ حرکت در حال شروع رو به جلو، حرکت در حال آغاز رو به عقب و حالت ثابت. می‌توان شرایط بالا را به صورت زیر فرمول‌بندی نمود:

$$\alpha_1 \dot{v} + \alpha_2 F_t + \alpha_3 \mu F_n = 0 \quad (2-2)$$

که α_i ضرایب مستقل حالت هستند که از جدول ۱-۲ به دست می‌آیند [۲۲].

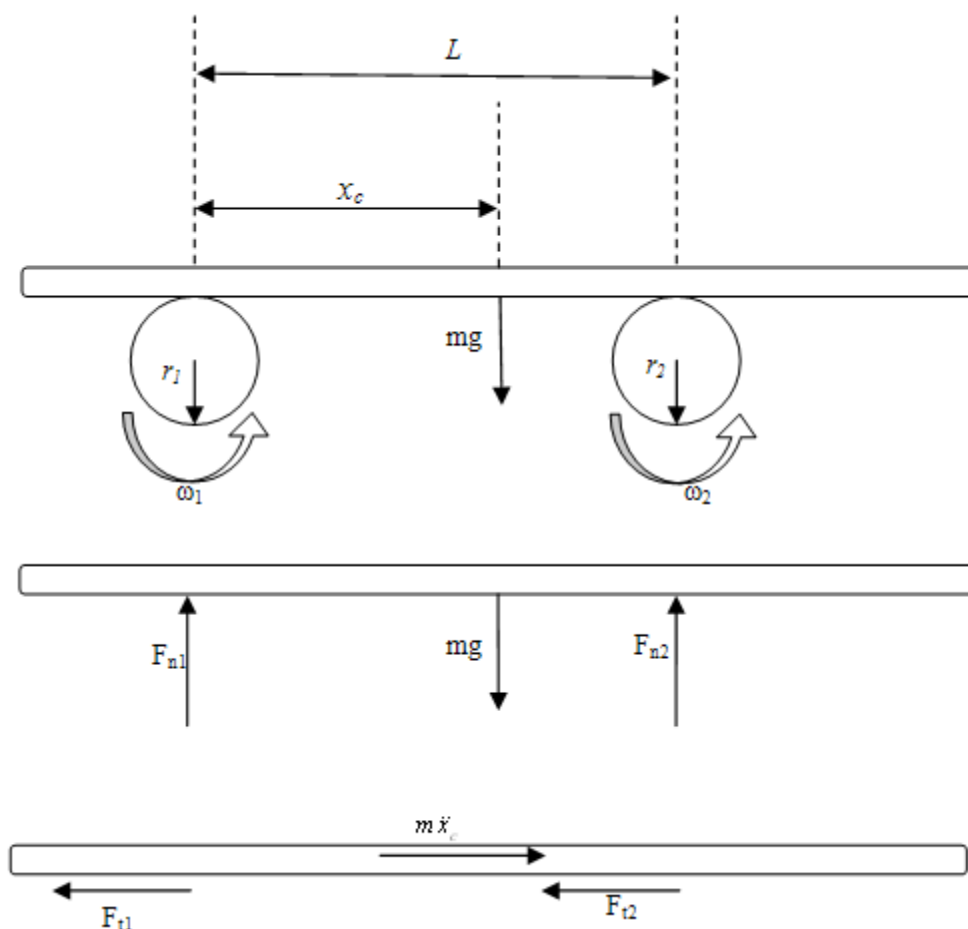
جدول ۱-۲: جدول تعیین ضرایب مدل اصطکاکی استفاده شده در مدل دینامیکی

α_i	v	$v=0$				
		$v \neq 0$	$\dot{v}^- \neq 0$		$\dot{v}^- = 0$	
		حرکت	حرکت معکوس	بدون حرکت	بدون حرکت	شروع حرکت روبه جلو
α_1	0	0	1	1	0	0
α_2	1	1	0	0	1	1
α_3	$sign(v)$	0	0	0	1	-1

اگر بیش از یک انتخاب برای α_i وجود داشته باشد، یک مجموعه از جدول ۱-۲ را انتخاب کرده و سازگاری این انتخاب با نتیجه حاصل از تحلیل دینامیکی بررسی می‌گردد.

۲-۳ نوشتن معادلات دینامیک برای حالت دو چرخ

فرض کنیم که میله‌ای بر روی دو چرخ مانند شکل ۲-۳ قرار دارد. فاصله بین دو چرخ برابر L و فاصله مرکز جرم میله تا چرخ اول برابر x_c است.



شکل ۲-۳: مدل دینامیکی دو چرخ و میله واقع بر روی آنها

معادلات نیوتن را برای میله به صورت زیر می توان نوشت:

$$\begin{cases} \sum F_y = 0 \\ \sum F_x = m\ddot{x}_c \\ \sum M_z = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} F_{n1} + F_{n2} - mg = 0 \\ -F_{t1} - F_{t2} = m\ddot{x}_c \\ F_{n2}L - mgx_c = 0 \end{cases} \quad (3-2)$$

که در آن نیروی اصطکاک وارد بر میله از طرف چرخ ها، F_{n_i} نیروی عمود وارد بر میله از طرف چرخ ها و \ddot{x}_c شتاب مرکز جرم میله است. همانطور که ملاحظه می شود سه معادله و پنج مجهول وجود دارد. دو معادله دیگر از (۲-۲) به دست می آید:

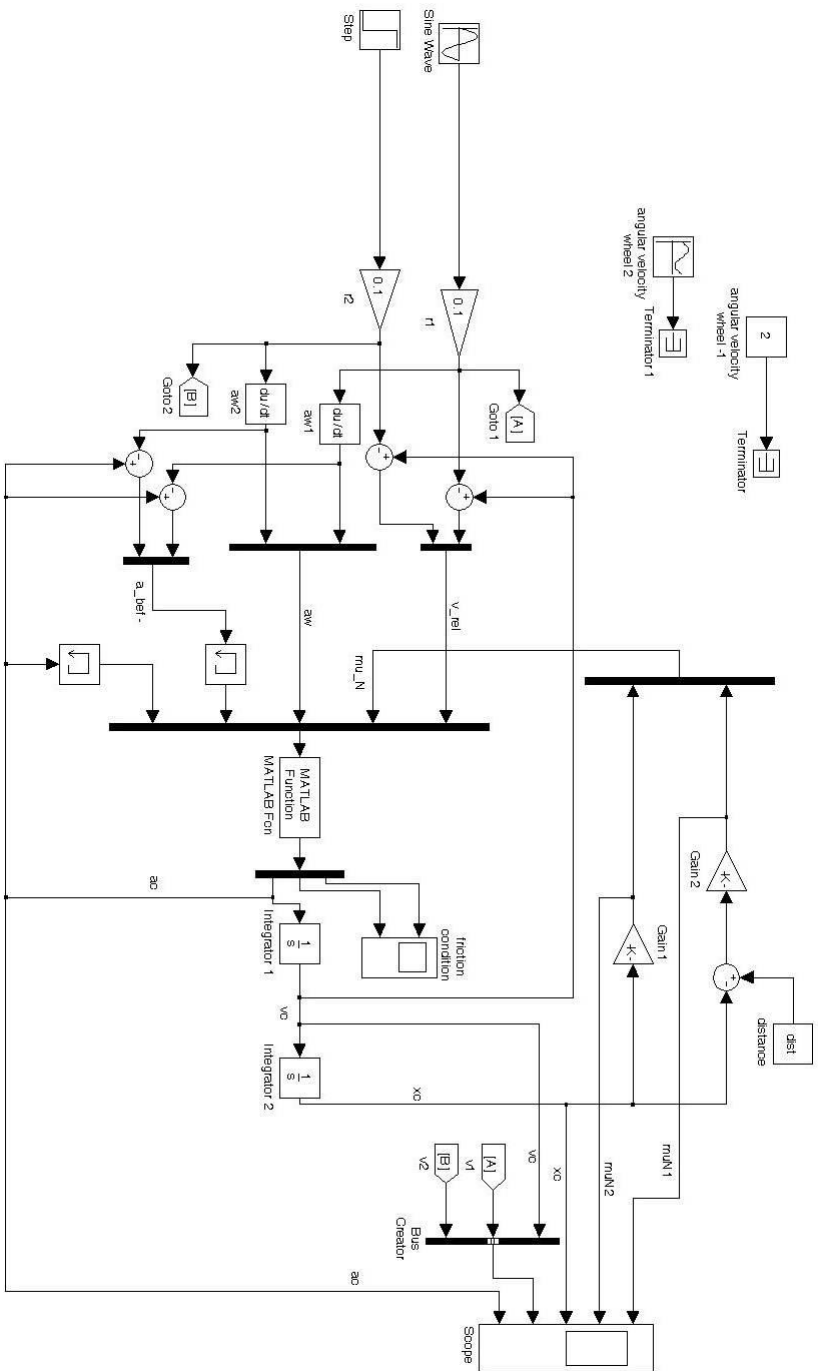
$$\begin{cases} \alpha_{11}\dot{v}_1 + \alpha_{12}F_{t1} + \alpha_{13}\mu F_{n1} = 0 \\ \alpha_{21}\dot{v}_2 + \alpha_{22}F_{t2} + \alpha_{23}\mu F_{n2} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha_{11}(\ddot{x}_c + r_1\dot{\omega}_1) + \alpha_{12}F_{t1} + \alpha_{13}\mu F_{n1} = 0 \\ \alpha_{21}(\ddot{x}_c + r_2\dot{\omega}_2) + \alpha_{22}F_{t2} + \alpha_{23}\mu F_{n2} = 0 \end{cases} \quad (4-2)$$

اگر معادلات (۳-۲) و (۴-۲) را به صورت ماتریسی مرتب کنیم، به صورت زیر درمی آید:

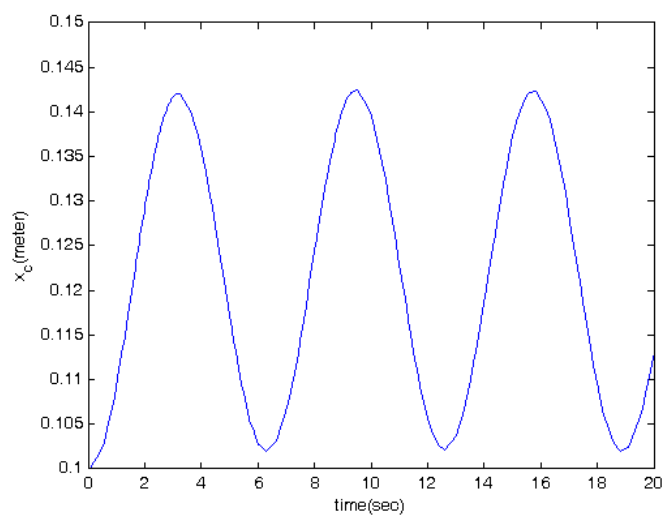
$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & -m \\ \alpha_{13}\mu & 0 & \alpha_{12} & 0 & \alpha_{11} \\ 0 & \alpha_{23}\mu & 0 & \alpha_{22} & \alpha_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{n_1} \\ F_{n_2} \\ F_{t_1} \\ F_{t_2} \\ \ddot{x}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mg \\ mgx_c \\ 0 \\ -\alpha_{11}r_1\dot{\omega}_1 \\ -\alpha_{22}r_2\dot{\omega}_2 \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

که در آن شعاع چرخ‌ها و ω_i سرعت زاویه‌ای آنها است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود حل این معادله بستگی به پارامترهای α_{ij} دارد که از جدول ۱-۲ تعیین می‌گردد. برای این کار دو مجموعه از جدول ۱-۲ انتخاب شده و معادله ماتریسی (۵-۲) حل می‌گردد. با استفاده از جواب‌های به دست آمده v و \dot{v} محاسبه شده و تطابق آنها با شرایط مندرج در جدول بررسی می‌گردد. در صورت مغایرت دو مجموعه دیگر انتخاب می‌شود. در این صورت حداکثر 5×5 حالت متفاوت بایستی بررسی گردد. برای ساده کردن ماتریس می‌توان مقادیر F_{n_1} و F_{n_2} را از دو معادله اول ماتریس به دست آورد و سپس آن را در معادلات چهارم و پنجم جایگزین نمود. بنابراین با فرض معلوم بودن سرعت و شتاب زاویه‌ای چرخ‌ها و مرکز جرم چرخ در هر لحظه نوع اصطکاک بین چرخ و میله را تعیین نمود.

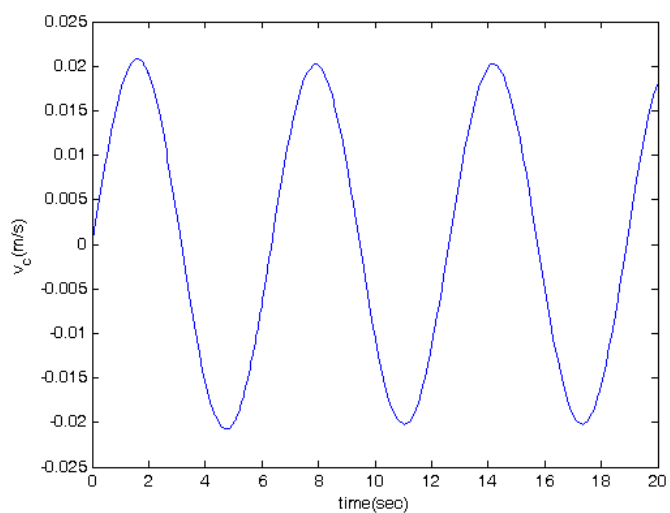
مدل دینامیکی این سیستم در SIMULINK ایجاد شده است (شکل ۲-۴). در شکل ۲-۵ نمودار پاسخ حرکت میله، زمانی که ورودی چرخ اول یک ورودی سینوسی با دامنه 0.2 و بسامد زاویه‌ای 1 rad/sec و ورودی چرخ دوم یک ورودی پله با دامنه 0.1 باشد نشان داده شده است. در شکل ۲-۶ سرعت مرکز جرم میله بر حسب زمان و در شکل ۲-۷ شتاب مرکز جرم میله بر حسب زمان نشان داده شده است.



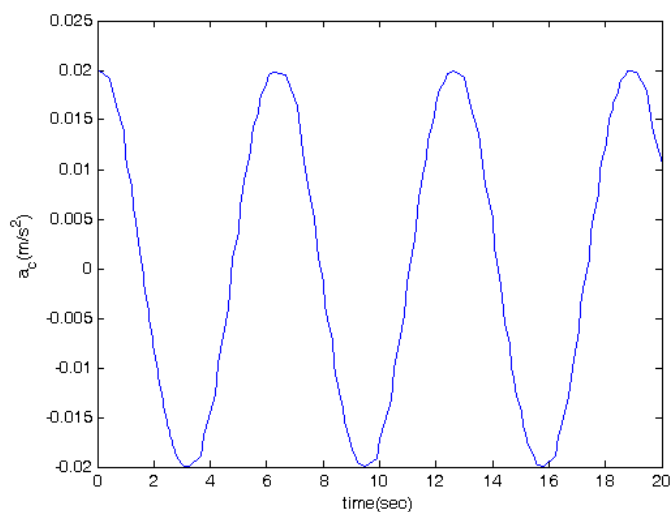
شکل ۲-۴: مدل دینامیکی حرکت میله بر روی دو چرخ



شکل ۲-۵: پاسخ مکانی میله برای ورودی سینوسی چرخ اول $\omega_1 = 0.2\sin(t)$ و ورودی پله چرخ دوم با دامنه 0.1

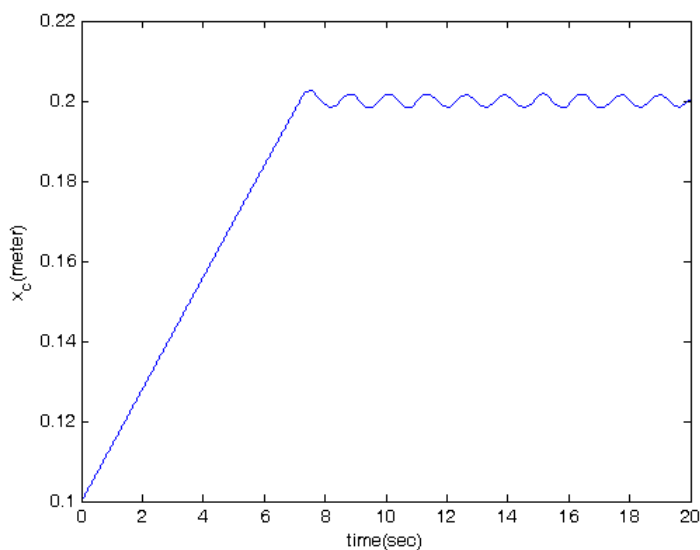


شکل ۲-۶: نمودار سرعت مرکز جرم میله برای سینوسی چرخ اول $\omega_1 = 0.2\sin(t)$ و ورودی پله چرخ دوم با دامنه 0.1

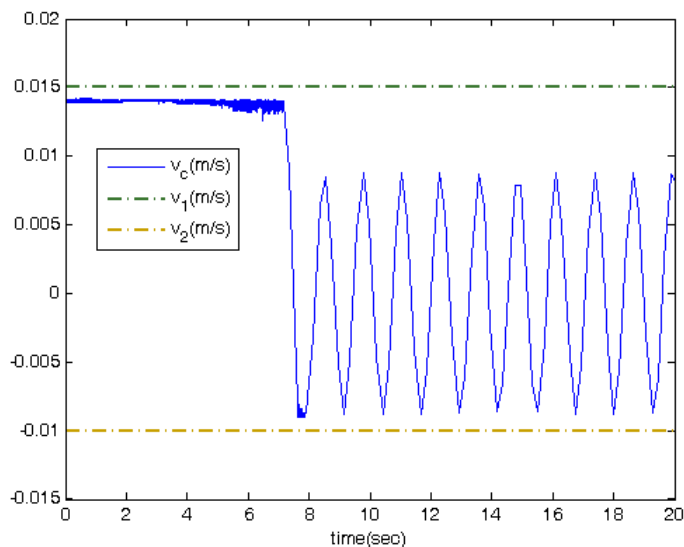


شکل ۲-۷: نمودار شتاب مرکز جرم میله برای سینوسی چرخ اول $\omega_1 = 0.2 \sin(t)$ و ورودی پله چرخ دوم با دامنه 0.1

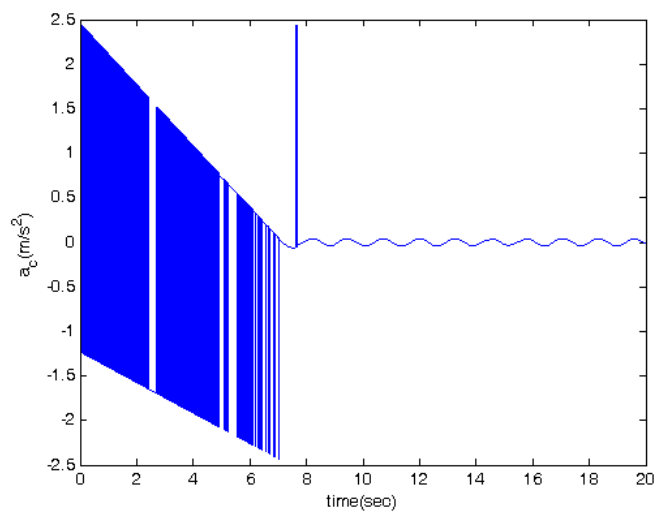
به خاطر اینکه شعاع چرخ‌ها ۰/۱ در نظر گرفته شده، سرعت چرخ در نقطه تماس ۰/۱ برابر ورودی است. پاسخ میله زمانی که ورودی چرخ اول پله با دامنه ۰/۱۵ و ورودی چرخ دوم پله با دامنه ۰/۱ باشد در شکل‌های ۲-۸، ۲-۹ و ۲-۱۰ نشان داده شده است. از آنجا که در لحظات اولیه سیستم هنوز به حالت پایدار خود نرسیده است، نمودار سرعت و شتاب بر حسب زمان نوسانات stick-slip دارند که با گذشت زمان میرا می‌شود.



شکل ۲-۸: موقعیت مرکز جرم میله زمانی که ورودی چرخ اول پله با دامنه 0.15 و ورودی چرخ دوم پله با دامنه 0.1 باشند



شکل ۲-۹: سرعت مرکز جرم میله زمانی که ورودی چرخ اول پله با دامنه 0.15 و ورودی چرخ دوم پله با دامنه 0.1- باشند



شکل ۲-۱۰: شتاب مرکز جرم میله زمانی که ورودی چرخ اول پله با دامنه 0.15 و ورودی چرخ دوم پله با دامنه 0.1- باشند

۲-۴ معادلات دینامیکی سیستمی با چهار چرخ و صفحه واقع بر روی آنها

۲-۴ محاسبه نیروهای عمودی

فرض کنید که صفحه‌ای صلب بر روی n چرخ قرار داشته باشد (شکل ۲-۱۱). این چرخ‌ها با صفحه در n نقطه تماس دارند که مختصات آنها به صورت زیر است:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}^T \\ \mathbf{y}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_n \\ y_1 & \cdots & y_n \end{bmatrix} = [\mathbf{X}_1 \quad \cdots \quad \mathbf{X}_n] \quad (2-6)$$