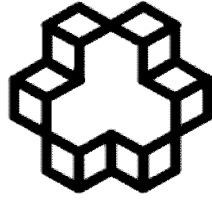


به نام خدا



1307

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

رساله کارشناسی ارشد طراحی کاربردی

دینامیک و کنترل پایدار وضعیت ماهواره

استاد راهنما: پروفسور سید علی اکبر موسویان

پژوهش و تدوین: مهدیه ترمه

1388

خداوندا

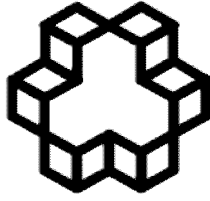
باران فضل و احسانت را بر کویرستان نادانی من بیار، دست امیدم را بگیر و گوش اجابت به نیایشم بسیار که تو کرامت محضی و بخشش و مهربانی شایسته توست. سپاس بیکران تو را که در این امر مهم مرا یاری نمودی .

تقدیم به :

آنان که در آسمان ها شهره ترند تا در زمین

پدرم؛ که بی نیازیم آموخت و

مادرم؛ که به من درس محبت داد .



1307

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

تأییدیه هیئت داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان :
دینامیک و کنترل پایدار وضعیت ماهواره توسط خانم : مهدیه ترمه صحت و کفایت تحقیق انجام شده را
برای اخذ درجه دکتری/کارشناسی ارشد در رشته : مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی با رتبه مورد
تأیید قرار می دهند .

- | | | |
|----------------------------------|--|-------|
| 1-استاد راهنما | جناب آقای پروفسور سید علی اکبر موسویان | امضاء |
| 2-استاد ممتحن | جناب آقای پروفسور علی غفاری | امضاء |
| 3-استاد ممتحن | جناب آقای دکتر علیرضا نوین زاده | امضاء |
| 4-نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده | آقای پروفسور علی غفاری | امضاء |

اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان نامه : دینامیک و کنترل پایدار ماهواره

استاد راهنما: دکتر سید علی اکبر موسویان

نام دانشجو: مهدیه ترمه

شماره دانشجویی: 8605024

اینجانب مهدیه ترمه دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده است و صحت مطالب نگارش شده مورد تأیید می‌باشد. همچنین در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. همچنین گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیاز توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

مهدیه ترمه

فرم حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده می‌باشد. هر گونه کپی برداری به صورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مکانیک دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از زحمات اساتید محترم دانشکده مکانیک به ویژه استاد فرزانه جناب آقای پروفیسور سید علی اکبر موسویان به دلیل راهنمایی های ارزنده شان که در طول دوره تحقیق این پایان نامه همانند نوری راهگشای مشکلاتم بود، قدردانی و تشکر می نمایم.

همچنین تشکر ویژه خود را از همسر عزیزم، جناب آقای مهندس ابوالفضل زارع برای فراهم نمودن شرایط بسیار مطلوب برای انجام پروژه و همیاری صمیمانه ایشان اعلام می دارم .

چکیده:

به منظور بهره گیری بهتر از خدمات ماهواره، بایستی ماهواره وضعیت خود را در مدار تثبیت نماید و علیرغم اغتشاشات خارجی، سمت گیری حقیقی داشته باشد. هدف اولیه این پایان نامه توسعه قوانین کنترلی برای پایداری سه محوره در ماهواره های دارای عملگرهای مغناطیسی و بوم گرادیان جاذبه می باشد. ماهواره می بایست دارای پایداری سه محوره، در حالتی که بوم فضا را نشانه رفته است، باشد. این عمل با بهره گیری از کنترلر های تناسبی- مشتق گیر و کنترلرهای فازی محقق شد. علاوه بر موارد تئوریک، این پایان نامه در بردارنده بخش هایی از ملاحظات عملی نیز می باشد.

تحلیل پایداری برای به دست آوردن مقادیر مناسب ممان های اینرسی ماهواره، به منظور دستیابی به کنترلر غیر فعال بوسیله بوم گرادیان جاذبه انجام شد. بیشترین کاربرد گشتاور دهنده های مغناطیسی برای تولید گشتاورهای کنترلی در ماهواره های کوچک می باشد. از آنجا که گشتاور دهنده های مغناطیسی، بر مبنای بر همکنش میان سه کویل مغناطیسی عمود بر هم و میدان مغناطیسی زمین عمل می کنند و بر این اساس قوانین کنترلی برای ایجاد گشتاور کنترلی بر روی ماهواره به دست آمده اند. گشتاوردهی مغناطیسی برای ایجاد گشتاور های کنترلی در ماهواره های کوچک مورد توجه قرار گرفته اند، چراکه سیستم های کنترلی نسبتاً سبک بوده، توان کمی نیاز داشته و ارزان قیمت هستند. رفتار این نوع عملگرهای مغناطیسی متغیر با زمان است، چراکه، سیستم کنترلی وابسته به تغییرات میدان مغناطیسی زمین در طول مدار ماهواره می باشد. بطور میانگین برای محدوده وسیعی از زوایای انحراف مدار، سیستم کنترل پذیر است و پایدار سازی وضعیت ممکن است. اگر مدار در نظر گرفته شده بتواند تغییرات میدان مغناطیسی زمین را که برای پایدارسازی ماهواره لازم است، شامل شود، پایدارسازی سه محوره امکان پذیر است. به همین منظور مدلی را برای میدان مغناطیسی در نظر گرفته که تغییرات میدان را در نقاط مختلف مدار شامل می شود و کنترلر های مغناطیسی طراحی شده و عملکرد آنها از طریق شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفت و در پایان نیز با بهره گیری از کنترلرهای فازی پایداری ماهواره را مورد بررسی قرار داده و نتایج حاصل از دو شبیه سازی را با هم مقایسه می نماییم.

فصل اول مقدمه ۲۲

۱-۱- مقدمه ۲۲

۲-۱- تاریخچه مختصر راهیابی بشر به فضا ۲۳

۳-۱- تاریخچه ماهواره های دانشجویی ۲۴

۴-۱- خدمات ماهواره ها (کاربردها) ۲۶

۵-۱- انواع ماهواره ها ۲۷

۱-۵- تقسیم بندی از نظر سرویس های ماهواره ای ۲۷

۱-۵-۲- تقسیم بندی از نظر وزن ۲۸

۱-۵-۳- تقسیم بندی از نظر مدار ۲۸

۱-۵-۳-۱- تقسیم بندی مدار های ماهواره ای از نظر شکل مدار ۲۹

الف) مدار های دایروی ۲۹

ب) مدار های بیضوی ۲۹

۱-۵-۳-۲- تقسیم بندی مدار های ماهواره ای از نظر ارتفاع مداری ۲۹

الف) مدار های ارتفاع پایین (LEO) ۲۹

ب) مدار های ارتفاع متوسط (MEO) ۳۰

ج) مدار های ارتفاع بالا ۳۰

۶-۱- اجزای ماهواره ۳۱

۷-۱- کنترل وضعیت ماهواره ۳۲

۱-۷- ضرورت کنترل وضعیت ماهواره ۳۲

۸-۱- تاریخچه ۳۲

۱-۸-۱- روش های طراحی خطی ۳۳

۱-۸-۱-۱- روش های کلاسیک ۳۴

۱-۸-۱-۲- روش های کنترل بهینه تناوبی ۳۴

۱-۸-۲- روش های طراحی غیر خطی ۳۵

۹-۱- تعریف مسئله ۳۶

۱-۹- مشخصات ماهواره ۳۶

۱-۹-۲- مدار ماهواره ۳۶

۱-۹-۴- مشخصات اساسی در طراحی سیستم کنترل وضعیت ۳۷

۱۰-۱- نتیجه گیری ۳۸

۱۱-۱- ساختار پایان نامه ۳۸

فصل ۲ مدل سازی حرکت ماهواره ۴۰

۱-۲ مقدمه ۴۰

۲-۲ دینامیک مدار ۴۱

۲-۲-۱ مدارهای کیلری ۴۱

۲-۲-۱-۱ آنومالی حقیقی و خارج از مرکز ۴۱

۲-۱-۲-۲ قوانین کیلر ۴۲

۲-۲-۳-۱ معادلات زمانی کیلر ۴۳

۳-۲ محورهای مختصات مرجع ۴۳

۳-۲-۱ دستگاه مختصات اینرسی زمین مرکز (XI, YI, ZI) ۴۴

۳-۲-۲ دستگاه مختصات مداری (XR, YR, ZR) ۴۶

۳-۳-۴ دستگاه مختصات بدنی ماهواره (XB, YB, ZB) ۴۷

۴-۲ جهت گیری ۴۸

در تعریف علمی، وضعیت ماهواره یک مجموعه چرخش از محورهای $XRYRZR$ به محورهای $XBYBZB$ با یک ترتیب خاص است. پایه ای ترین عمل در معرفی وضعیت هر ماهواره و هر جسم در فضا، تعیین جهت گیری دستگاه مختصات بدنی نسبت دستگاه مختصات مرجع است. ۴۸

۵-۲ زوایای اولر ۴۹

۶-۲ مدارهای کیلری در فضا ۵۰

۶-۲-۱ تعریف پارامترها ۵۰

۶-۲-۷ مدارهای تحریک شده، مدارهای غیر کیلری ۵۱

۷-۲-۱ معادلات حرکت تحت تاثیر اغتشاشات خارجی ۵۱

۸-۲ معادلات سینماتیکی حرکت دورانی ماهواره ۵۲

۸-۲-۱ بردار سرعت زاویه ای در مختصات چرخان ۵۲

۹-۲ سینماتیک و دینامیک حرکت دورانی ۵۴

۹-۲-۱ ممان زاویه ای و ماتریس اینرسی ۵۴

۹-۲-۲ معادلات گشتاور اولر ۵۵

۱۰-۲ مدل میدان گرانشی زمین ۵۷

۱۰-۲-۱ خطی سازی گشتاور گرادیان جاذبه ۵۷

۱۱-۲ مدل سازی میدان مغناطیسی زمین ۶۰

فصل ۳ گشتاورهای اغتشاشی ۶۱

۱-۳ مقدمه ۶۱

۱-۳-۱ گشتاور گرادیان جاذبه ۶۲

۱-۳-۲ گشتاور آیرودینامیکی ۶۴

- ۳-۱-۳ گشتاور فشار تابش خورشیدی..... ۶۵
- ۳-۱-۴ گشتاور پس ماند مغناطیسی..... ۶۶

فصل ۴ کنترل وضعیت و پایدارسازی ماهواره ۶۸

- ۴-۱-۴ مقدمه..... ۶۸
- ۴-۲-۴ مفاهیم سیستم کنترل وضعیت ۶۸
 - ۴-۲-۴-۱ وضعیت ۶۸
 - ۴-۲-۴-۱-۱ تعیین وضعیت..... ۶۹
 - ۴-۲-۴-۱-۲ پیش بینی وضعیت ۶۹
 - ۴-۲-۴-۱-۳ کنترل وضعیت ۶۹
- ۴-۲-۲-۴ دلایل استفاده از سیستم کنترل وضعیت ۶۹
- ۴-۳-۴ بلوک دیگرام سیستم کنترل وضعیت ۷۰
 - ۴-۳-۴-۱ دینامیک وضعیت ماهواره ۷۰
 - ۴-۳-۴-۲ حس گر ها ۷۰
 - ۴-۳-۴-۳ عمل گر ها ۷۱
 - ۴-۳-۴-۴ گشتاور های اختلالی ۷۱
- ۴-۴-۴ پایدارسازی ماهواره ۷۱
 - ۴-۴-۴-۱ پایدارسازی ماهواره ۷۱
 - ۴-۴-۴-۲ سیستم های کنترل فعال ۷۱
 - ۴-۴-۴-۱-۲ جابروی کنترل ممان (CMG) (CONTROL MOMENT GYRO) ۷۲
 - ۴-۴-۴-۲-۲ تراسترها ۷۲
 - ۴-۴-۴-۳-۲ چرخ های مومنت ۷۳
 - ۴-۴-۴-۴-۲ چرخ های عکس العملی ۷۳
 - ۴-۴-۴-۳ سیستم های کنترل غیرفعال ۷۳
 - ۴-۴-۴-۱-۳ پایدارسازی چرخشی ۷۴
 - ۴-۴-۴-۲-۳ پایدارسازی سه محوره ۷۵
 - ۴-۴-۴-۳-۳ پایدارسازی گرادیان جاذبه ای ۷۵
 - ۴-۴-۴-۴ کنترل با استفاده از گشتاور دهنده های مغناطیسی ۷۶

فصل ۵ پایدارسازی با استفاده از روش گرادیان جاذبه ای و گشتاور دهنده های مغناطیسی ۷۸

- پایدارسازی با استفاده از روش گرادیان جاذبه ای و گشتاور دهنده های مغناطیسی ۷۸
- ۵-۱-۴ مقدمه..... ۷۸
- ۵-۲-۴ معادله پایه ای کنترل حرکت دورانی ۷۹
- ۵-۳-۴ مزایا و معایب استفاده از روش گرادیان جاذبه ای ۷۹
- ۵-۴-۴ تکنیک گرادیان جاذبه ای ۸۰

۸۲	..... ۵-۵ آشنایی دقیق تر با پایدارسازی گرادیان جاذبه ای
۸۳	..... ۶-۵ پایداری سازی گرادیان جاذبه ای کاملا غیر فعال
۸۳	..... ۵-۶-۱ معادلات اساسی
۸۴	..... ۵-۶-۲ پایداری حول محور YB
۸۵	..... ۵-۶-۳ پایداری حول محورهای ZB و XB
۸۸	..... ۵-۶-۴ محدودیت های ممان اینرسی در ناحیه A
۸۸	..... ۵-۶-۵ محدودیت های ممان اینرسی در ناحیه B
۸۹	..... ۵-۶-۱ پاسخ زمانی حول محور YB (پیچ)
۹۰	..... ۵-۶-۲ ایده افزایش ممان اینرسی
۹۰	..... ۵-۶-۳ پاسخ زمانی در صفحه $ZB - XB$
۹۳	..... ۷-۵ پایدارسازی گرادیان جاذبه ای با میراکننده غیرفعال
۹۳	..... ۵-۷-۱ پایدارسازی گرادیان جاذبه ای با میراکننده غیرفعال
۹۳	..... ۵-۷-۲ میراگر جرم نقطه ای (جرم متمرکز)
۹۳	..... ۵-۷-۳ میراگرهای نصب شده بر روی بوم فتری
۹۳	..... ۵-۷-۴ میراگر میله ای با پسماند مغناطیسی
۹۴	..... ۵-۷-۵ میرایی با مفصل بوم
۹۴	..... ۵-۷-۶ میراگر چرخ (دیسکی)
۹۴	..... ۸-۵ پایدارسازی گرادیان جاذبه ای با میراکننده های فعال
۹۴	..... ۸-۵-۱ مقدمه
۹۹	..... فصل ۶ طراحی سیستم کنترلی
۹۹	..... طراحی سیستم کنترلی
۹۹	..... ۶-۱ مقدمه
۹۹	..... ۶-۲ سخت افزارهای سیستم کنترل وضعیت
۱۰۰	..... ۶-۲-۱ احس گر مغناطیس سنج ماهواره
۱۰۰	..... ۶-۲-۲ عمل گر های ماهواره
۱۰۰	..... ۶-۲-۳ اسیم پیچ های مغناطیسی
۱۰۲	..... ۶-۲-۴ بوم گرادیان جاذبه
۱۰۲	..... ۶-۳ الگوریتم تعیین وضعیت و کنترل
۱۰۳	..... ۶-۳-۱ روش کنترل کلاسیک
۱۰۴	..... ۶-۴ تحلیل خطی دینامیک ماهواره در حضور گشتاور مغناطیسی
۱۰۸	..... ۶-۵ تعیین تغییرات وضعیت ماهواره با زمان
۱۱۰	..... ۶-۶ انجام مانورهای وضعیت توسط گشتاوردهنده ها
۱۱۰	..... ۶-۷ روش کنترلی فازی
۱۱۰	..... ۶-۷-۱ طراحی کنترلر

۱۱۰	۲-۷-۶ فازای کننده
۱۱۱	۳-۷-۶ تعیین توابع عضویت
۱۱۵	۵-۷-۶ استنتاج فازای
۱۱۵	۶-۷-۶ غیر فازای کننده
۱۱۶	۷-۷-۶ سطوح فازای

فصل ۷ بررسی عملکرد سیستم ۱۱۷

۱۱۷	۱-۷ مقدمه
۱۱۷	۲-۷ شبیه سازی
۱۱۹	۲-۲-۷ شبیه سازی معادلات گشتاور اولر با اعمال گشتاورهای اغتشاشی
۱۱۹	۱-۲-۲-۷ شبیه سازی معادلات گشتاور اولر
۱۲۵	۳-۷ شبیه سازی مراحل کنترلی
۱۲۵	۱-۳-۷ نتایج حاصل از شبیه سازی کنترلرهای تناسبی-مشتق گیر (P-D)
۱۲۹	۲-۳-۷ نتایج حاصل از شبیه سازی کنترلرهای فازای
۱۳۱	۴-۷ مقایسه نتایج حاصل از کنترلرهای کلاسیک و فازای

فصل ۸ نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۳۴

۱۳۴	نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۳۴	۱-۸ مقدمه
۱۳۵	۲-۸ نتیجه گیری
۱۳۵	۳-۸ پیشنهادات
۱۳۶	پیوست ها

فهرست شکل هل و نمودارها

- شکل (۱-۱) نمایی از ماهواره با بوم گرادیان جاذبه ای ۳۸
- شکل (۱-۲) آنومالی حقیقی و خارج از مرکز ۴۱
- شکل (۲-۲) هندسه بکار رفته برای بیان قانون دوم کیپلر ۴۳
- شکل (۳-۲) حرکت زمین دور خورشید ۴۴
- شکل (۴-۲) پارامترهایی که موقعیت مدارها را در فضا تعریف می کنند. ۴۶
- شکل (۵-۲) تعریف دستگاه مختصات بدنه و مداری ۴۷
- شکل (۶-۲) تعریف دستگاه مختصات بدنه در دستگاه مداری ۴۷
- شکل (۷-۲) تعریف زوایای اولر ۴۸
- شکل (۸-۲) مجموعه دوران های زوایای اولر ۴۹
- شکل (۹-۲) گشتاور گرادیان جاذبه ای روی ماهواره نامتقارن ۵۸
- شکل (۱-۳) دستگاه مختصات برای محاسبه گشتاور گرادیان جاذبه ۶۲
- شکل (۱-۴) بلوک دیاگرام سیستم کنترل وضعیت ۷۰
- شکل (۱-۵) پایدارسازی گرادیان جاذبه ای با استفاده از نیروهای گرادیان جاذبه و گریز از مرکز ۸۱
- شکل (۲-۵) نواحی پایدار شده در ماهواره های پایدار شده به روش گرادیان جاذبه ای [1] ۸۷
- شکل (۳-۵) انواع مختلف گشتاور دهنده های مغناطیسی ، الف: نوع قابی ، ب: نوع استوانه ای ۹۵
- شکل (۴-۵) سیستم کنترل مغناطیسی-ساختار سخت افزاری ۹۶
- شکل (۵-۵) نمایی از میدان مغناطیسی زمین ۹۷
- شکل (۱-۶) :مغناطیس سنج سه محوره ۱۰۱
- شکل (۲-۶) :کویل مغناطیسی ۱۰۲

- شکل (۳-۶) بلوک دیاگرام کنترل ماهواره با گشتاوردهنده های مغناطیسی ۱۰۹
- شکل (۴-۶) بلوک دیاگرام کنترل ماهواره با کنترلرهای فازی ۱۱۱
- شکل (۵-۶) توابع عضویت مثلثی برای ورودی رول و پیچ به کنترلر ۱۱۲
- شکل (۶-۶) توابع عضویت مثلثی برای ورودی نرخ تغییرات رول و پیچ به کنترلر ۱۱۲
- شکل (۷-۶) توابع عضویت مثلثی برای ورودی یاو به کنترلر ۱۱۳
- شکل (۸-۶) توابع عضویت مثلثی برای ورودی نرخ تغییرات یاو به کنترلر ۱۱۳
- شکل (۹-۶) توابع عضویت مثلثی برای خروجی mz و my و mx از کنترلر ۱۱۳
- شکل (۱۰-۶) سطوح فازی تشکیل شده با توجه به قوانین فازی نوشته شده ۱۱۶
- نمودار (۱-۷) تغییرات میدان مغناطیسی زمین در راستای محور رول ۱۱۸
- نمودار (۲-۷) تغییرات میدان مغناطیسی زمین در راستای محور پیچ ۱۱۸
- نمودار (۳-۷) تغییرات میدان مغناطیسی زمین در راستای محور یاو ۱۱۹
- نمودار (۴-۷) نا پایداری زاویه اولر (رول) ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی در غیاب کنترلر و بوم گرادیان جاذبه ۱۲۰
- نمودار (۵-۷) نا پایداری زاویه اولر (پیچ) ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی در غیاب کنترلر و بوم گرادیان جاذبه ۱۲۰
- نمودار (۶-۷) نا پایداری زاویه اولر (یاو) ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی در غیاب کنترلر و بوم گرادیان جاذبه ۱۲۱
- نمودار (۷-۷) زاویه اولر (رول) مربوط به معادلات گشتاور اولر ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی بعد از بازشدن بوم ۱۲۱
- نمودار (۸-۷) زاویه اولر (پیچ) مربوط به معادلات گشتاور اولر ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی بعد از بازشدن بوم ۱۲۲
- نمودار (۹-۷) زاویه اولر (یاو) مربوط به معادلات گشتاور اولر ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی بعد از بازشدن بوم ۱۲۲

- نمودار (۷-۱۰) زوایای اولر (رول و پیچ و یاو) مربوط به معادلات ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی بعد از بازشدن بوم ۱۲۲
- نمودار (۷-۱۱) سرعت زاویه ای (رول) مربوط به معادلات گشتاور اولر ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی بعد از بازشدن بوم ۱۲۳
- نمودار (۷-۱۲) سرعت زاویه ای (پیچ) مربوط به معادلات گشتاور اولر ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی بعد از بازشدن بوم ۱۲۳
- نمودار (۷-۱۳) سرعت زاویه ای (یاو) مربوط به معادلات گشتاور اولر ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی بعد از بازشدن بوم ۱۲۴
- نمودار (۷-۱۴) گشتاور پسای آیرودینامیکی در جهت محور رول ۱۲۴
- نمودار (۷-۱۵) گشتاور پسای آیرودینامیکی در جهت محور پیچ ۱۲۴
- نمودار (۷-۱۶) گشتاور پسای آیرودینامیکی در جهت محور یاو ۱۲۴
- نمودار (۷-۱۷) زاویه اولر (رول) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولر ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی و گرادیان جاذبه و کنترلر PD ۱۲۵
- نمودار (۷-۱۸) زاویه اولر (پیچ) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولر ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی و گرادیان جاذبه و کنترلر PD ۱۲۶
- نمودار (۷-۱۹) زاویه اولر (یاو) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولر ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی و گرادیان جاذبه و کنترلر PD ۱۲۶
- نمودار (۷-۲۰) زوایای اولر (رول و پیچ و یاو) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولر ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی و گرادیان جاذبه و کنترلر PD ۱۲۶
- نمودار (۷-۲۱) سرعت زاویه ای (رول) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولر ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی و گرادیان جاذبه و کنترلر PD ۱۲۷
- نمودار (۷-۲۲) سرعت زاویه ای (پیچ) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولر ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی و گرادیان جاذبه و کنترلر PD ۱۲۷
- نمودار (۷-۲۳) سرعت زاویه ای (یاو) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولر ماهواره در حضور گشتاور پسای آیرودینامیکی و گرادیان جاذبه و کنترلر PD ۱۲۷
- نمودار (۷-۲۴) گشتاور دوقطبی مغناطیسی در راستای محور رول ۱۲۸
- نمودار (۷-۲۵) گشتاور دوقطبی مغناطیسی در راستای محور پیچ ۱۲۸

- نمودار (۷-۲۶) گشتاور دو قطبی مغناطیسی در راستای محور یاو ۱۲۸
- نمودار (۷-۲۷) زاویه اولر (رول) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولردر حضور اغتشاشات و با استفاده از کنترلر فازی ۱۲۹
- نمودار (۷-۲۸) زاویه اولر (پیچ) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولردر حضور اغتشاشات و با استفاده از کنترلر فازی ۱۲۹
- نمودار (۷-۲۹) زاویه اولر (یاو) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولردر حضور اغتشاشات و با استفاده از کنترلر فازی ۱۲۹
- نمودار (۷-۳۰) زوایای اولر (رول و پیچ و یاو) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولردر حضور اغتشاشات و با استفاده از کنترلر فازی ۱۳۰
- نمودار (۷-۳۱) سرعت زاویه ای (رول) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولردر حضور اغتشاشات و با استفاده از کنترلر فازی ۱۳۰
- نمودار (۷-۳۲) سرعت زاویه ای (پیچ) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولردر حضور اغتشاشات و با استفاده از کنترلر فازی ۱۳۱
- نمودار (۷-۳۳) سرعت زاویه ای (یاو) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولردر حضور اغتشاشات و با استفاده از کنترلر فازی ۱۳۱
- نمودار (۷-۳۴) زوایای اولر (رول و پیچ و یاو) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولر ماهواره در حضور اغتشاشات و کنترلر تناسبی-مشتق گیر ۱۳۱
- نمودار (۷-۳۵) زوایای اولر (رول و پیچ و یاو) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولر ماهواره در حضور اغتشاشات و کنترلر فازی ۱۳۲
- نمودار (۷-۳۶) سرعت زاویه ای (رول و پیچ و یاو) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولر ماهواره در حضور اغتشاشات و کنترلر تناسبی-مشتق گیر ۱۳۲
- نمودار (۷-۳۷) سرعت زاویه ای (رول و پیچ و یاو) مربوط به معادلات خطی شده گشتاور اولر ماهواره در حضور اغتشاشات و کنترلر فازی ۱۳۲

فهرست جدول ها

- جدول (۱-۱) مشخصات مدار ماهواره مورد نظر ۳۶
- جدول (۴-۴) مقایسه مزایا و معایب روشهای متعارف پایدارسازی ماهواره ۷۷
- جدول (۱-۶): مشخصات مغناطیس سنج ۱۰۰
- جدول (۲-۶) مشخصات کویل ها ۱۰۱
- جدول (۳-۶) ریشه های سیستم بدون در نظر گرفتن گشتاورهای کنترلی ۱۰۷
- جدول (۴-۶) پارامترهای مربوط به بردار B میدان مغناطیسی زمین ۱۰۸
- جدول (۵-۶) ریشه های سیستم با در نظر گرفتن گشتاوردهنده های مغناطیسی ۱۰۸
- جدول شماره (۶-۶) متغیرها و مجموعه های فازی ۱۱۲
- جدول شماره (۷-۶) پایگاه قواعد کنترلر فازی ۱۱۴
- جدول شماره (۸-۶) قواعد فازی مربوط به کنترلر فازی ۱۱۴

فهرست علائم و اختصارات

θ : آنومالی حقیقی

F: کانون اولیه

ψ : آنومالی خارج از مرکز

e: خروج از مرکز

n: متوسط حرکت

M: متوسط آنومالی

α : شعاع بزرگ بیضی

e: خروج از مرکز

i: شیب

Ω : زاویه بین خط گره و شعاع زمین نسبت به خورشید (محور X)

ω : آرگومان نقطه نزدیک به مرکز

ϕ : زاویه اولر یاو

θ : زاویه اولر پیچ

ψ : زاویه اولر رل

A: ماتریس تبدیل

$\vec{\omega}_{BR}$: سرعت زاویه ای دستگاه مختصات بدنه نسبت به دستگاه مختصات مرجع مداری

$\vec{\omega}_{RI}$: سرعت زاویه ای دستگاه مختصات مداری نسبت به دستگاه اینرسی

$\vec{\omega}_{BI}$: سرعت زاویه ای دستگاه مختصات بدنه نسبت به دستگاه مختصات اینرسی

[A]: ماتریس کسینوس های هادی

$A_{\alpha\beta\gamma}$: ماتریس کسینوس های هادی برای زوایای کوچک اولر

$\vec{\omega}_R$: بردار سرعت زاویه ای مداری در دستگاه مختصات مداری

T : انرژی جنبشی مربوط به چرخش جسم صلب

E_{Kin} : انرژی جنبشی حرکت چرخشی

E_{gg} : انرژی پتانسیل به دست آمده از گرادیان جاذبه

E_{gyro} : انرژی پتانسیل ناشی از گردش ماهواره حول زمین

ω : سرعت چرخشی ماهواره نسبت به بدنه

\vec{M} : گشتاور وارد بر بدنه ماهواره صلب

h : ممان زاویه ای ماهواره

T_c : گشتاور کنترلی که برای کنترل حرکت دورانی ماهواره

T_d : گشتاورهای اغتشاشی وارد بر ماهواره

ρ : فاصله بین مرکز جرم ماهواره و هر المان جرمی

G_x, G_y, G_z : مولفه های بردار گشتاور گرادیان جاذبه

V : یک تابع پتانسیل اسکالر

\mathbf{g}_n^m و \mathbf{h}_n^m : ضرایب گوس

a : شعاع زمین در استوا

k : مرتبه مدلسازی I.G.R.F

dF_i : نیروی گرانشی

μ : ثابت گرانشی زمین

I_x, I_y, I_z : ممان اینرسی ماهواره در راستای محور رول و پیچ و یاو

F_{aero} : نیروی پسای آیرودینامیکی

ρ : جرم حجمی اتمسفر

\mathbf{v} : سرعت ذرات محیط اطراف ماهواره

A : سطح تر شدن ماهواره¹

C_D : ثابت پسا

¹ Satellite wet area