بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

تحلیل دینامیکی و کنترل موقعیت‌دهی یک سازه فضایی توسط یک ربات فضایی متصل به تتر

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک – طراحی کاربردی

مهرزاد سلطانی

استاد راهنما

دکتر مهدی کشمیری

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک – طراحی کاربردی خانم مهرزاد سلطانی

تحت عنوان

تحلیل دینامیکی و کنترل ربات متصل به تتر فضایی برای قرار دادن سازه‌ی فضایی

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۰/۲۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱. استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر مهدی کشمیری
۲. استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر محمدجعفر صدیق
۳. استاد مشاور پایان‌نامه	Prof. Arun. K. Misra
۴. استاد داور	دکتر محمد دانش
۵. استاد داور	دکتر سعید بهبهانی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر محمدرضا سلیم‌پور

تشکر و قدردانی

خدایا، حکمت قدم‌هایی را که برایم برمی‌داری بر من آشکار کن، تا درهایی را که به سویم می‌گشایی، ندانسته نبندم و درهایی که به رویم می‌بندی ، به اصرار نگشایم.

حمد و سپاس خداوند منان را که با لطف بیکرانش در همه مراحل زندگی مرا از رحمت خود بهره‌مند ساخته. در ابتدا بر خود لازم می‌دانم که از زحمات و فداکاری‌های بی‌دریغ پدر و مادر مهربانم که در تمام طول زندگی یار و یاور من بودند کمال تشکر و سپاسگذاری را داشته باشم. همچنین از زحمات و راهنمایی‌های استاد گرانقدر جناب آقای دکتر مهدی کشمیری که در همه مراحل انجام این پایان‌نامه مرا از راهنمایی‌های ارزشمند خود بهره‌مند ساختند و دلسوزانه مرا در به ثمر رساندن این پژوهش یاری رساندند، کمال تشکر را دارم. از خداوند رحمان آرزوی سلامتی برای همه این عزیزان دارم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و

نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه

متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به پدر و مادر مهربانم

فهرست مطالب

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه ۲

۱-۱- پیشگفتار ۳

۱-۲- کاربرد ربات‌های فضایی ۳

۱-۳- تاریخچه و کاربرد تتر در فضا ۵

۱-۴- ربات متصل شده به تتر ۶

۱-۴-۱- نمونه‌هایی از ربات‌های فضایی متصل به تتر ۷

۱-۴-۲-مزایا و معایب ربات‌های متصل به تتر ۹

۱-۵- اهداف کلی پروژه ۱۰

۱-۶- مروری بر مطالعات انجام شده ۱۰

۱-۶-۱- تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی دینامیک و کنترل ربات‌های فضایی ۱۱

۱-۶-۲- تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل ۱۳

۱-۷- تعریف مسئله ۱۴

۱-۸- روند تدوین پایان‌نامه ۱۶

فصل دوم:مدل‌سازی دینامیکی ۱۸

۲-۱- مقدمه ۱۸

۲-۲- معادلات لاگرانژ ۱۹

۲-۳- معادلات دینامیکی سیستم یک درجه آزادی ۲۰

۲-۳-۱- انرژی جنبشی سیستم ۲۱

۲-۳-۲- انرژی پتانسیل سیستم ۲۲

۲-۳-۳- معادله حرکت و فرم بدون بعد آن ۲۳

۲-۴- سیستم سه درجه آزادی ۲۳

۲-۴-۱- انرژی جنبشی سیستم سه درجه آزادی ۲۴

۲-۴-۲- انرژی پتانسیل سیستم سه درجه آزادی ۲۶

۲-۴-۳- معادلات دینامیکی سیستم سه درجه آزادی ۲۷

۲-۴-۴- شرایط سیستم سه درجه آزادی در یک وضعیت ثابت ۲۸

۲-۵- سیستم چهار درجه آزادی ۲۸

۲-۵-۱- انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم چهار درجه آزادی ۲۹

۲-۵-۲- معادلات دینامیکی سیستم چهار درجه آزادی ۳۰

۲-۵-۳- شرایط سیستم برای نگه‌داشتن سازه در یک وضعیت ثابت ۳۱

فصل سوم: مروری بر کنترل مبتنی برپیش‌بینی مدل ۳۳

۳-۱- اصول کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل ۳۴
۳-۲- تابع هزینه ۳۶
۳-۳- کنترل مبتنی برپیش‌بینی مدل غیرخطی NMPC ۳۸
۳-۳-۱- پیش‌بینی رفتار سیستم ۳۸
۳-۳-۲- تابع هزینه‌ی مورد بررسی در روش کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل ۳۹
۳-۳-۳- قیود فیزیکی حاکم بر سیستم ۴۰
۳-۳-۴- ساده‌سازی قیود مسئله در مدل NMPC ۴۰
۳-۳-۵- پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی NMPC در MATLAB ۴۲
۳-۴- بررسی پایداری کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل غیرخطی NMPC ۴۳
فصل چهارم: طراحی کنترل‌کننده‌ی هیبرید MPC-CTM ٤٧
۴-۱- ساختار کلی کنترل‌کننده‌ی هیبرید ۴۸
۴-۲- پایدارسازی سیستم یک درجه آزادی و ارائه‌ی نتایج شبیه‌سازی ۴۹
۴-۳- کنترل سیستم سه درجه آزادی ۵۱
۴-۳-۱- کنترل سیستم سه درجه آزادی در مسئله‌ی انتقال از نقطه ابتدایی به نقطه انتهایی ۵۳
۴-۳-۲- کنترل سیستم سه درجه آزادی در مسئله‌ی تعقیب مسیر و ارائه‌ی نتایج شبیه‌سازی ۵۷
۴-۴- کنترل سیستم چهار درجه آزادی ۶۰
۴-۴-۱- کنترل سیستم چهار درجه آزادی در مسئله‌ی انتقال از نقطه ابتدایی به نقطه انتهایی و ارائه‌ی نتایج شبیه‌سازی ۶۰
۴-۴-۲- کنترل سیستم چهار درجه آزادی در مسئله‌ی تعقیب مسیر و ارائه‌ی نتایج شبیه‌سازی ۶۳
۴-۵- بررسی پایداری کنترل‌کننده‌ی هیبرید ۶۵
فصل پنجم: بررسی اثر انعطاف‌پذیری تتر در دینامیک و کنترل سیستم ٦٧
۵-۱- مقدمه ۶۷
۵-۲- تحلیل دینامیک سیستم با تتر انعطاف‌پذیر دارای ارتعاش طولی ۶۸
۵-۲-۱- گسسته‌سازی تتر پیوسته با ارتعاش طولی ۶۹
۵-۲-۲- انرژی جنبشی سیستم انعطاف‌پذیر ۶۹
۵-۲-۳- انرژی پتانسیل سیستم انعطاف‌پذیر ۷۰
۵-۲-۴- استخراج معادلات دینامیکی و بی‌بعدسازی معادلات برای سیستم انعطاف‌پذیر ۷۱
۵-۳- ارزیابی اثر انعطاف‌پذیری تتر در کنترل سیستم ۷۲
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ٧٦
۶-۱- جمع‌بندی ۷۶
۶-۲- پیشنهادات ۷۷
مراجع ۷۸

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: بازوی مکانیکی متصل به شاتل فضایی[۴]..... ۴
شکل ۱-۲: نمونه‌ای از یک بالابر فضایی[۱۰]..... ۶
شکل ۱-۳: یک فایمر ربات با هد free flying[۱۲]..... ۸
شکل ۱-۴: ماهواره مادر و دختر[۱۳]..... ۸
شکل ۱-۵: نمونه‌ای از تورهای فضایی[۱۵]و[۱۹]..... ۹
شکل ۱-۶: شماتیک سیستم مورد بررسی..... ۱۵
شکل ۲-۱: شماتیک هندسی از سیستم یک درجه آزادی..... ۲۰
شکل ۲-۲: شماتیک هندسی از سیستم سه درجه آزادی..... ۲۴
شکل ۲-۳: شماتیک هندسی از سیستم چهار درجه آزادی..... ۲۹
شکل ۳-۱: اصول روش کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل[۴۳]..... ۳۵
شکل ۳-۲: بازه‌های زمانی مورد مطالعه..... ۴۴
شکل ۴-۱: ساختار کلی کنترل‌کننده‌ی ترکیبی پیشنهادی..... ۴۸
شکل ۴-۲: کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی سیستم یک درجه آزادی..... ۴۹
شکل ۴-۳: نتایج شبیه‌سازی سیستم یک درجه آزادی..... ۵۱
شکل ۴-۴: کنترل‌کننده‌ی هیبرید NMPC-CTM پیشنهادی برای سیستم سه درجه آزادی..... ۵۲
شکل ۴-۵: تاریخچه زمانی تغییرات طول تتر سیستم سه درجه آزادی در مسئله‌ی تعقیب نقطه به نقطه..... ۵۵
شکل ۴-۶: تاریخچه زمانی موقعیت پنجه‌ی ربات سیستم سه درجه آزادی درمسئله‌ی تعقیب نقطه به نقطه..... ۵۵
شکل ۴-۷: تاریخچه زمانی نرخ تغییرات طول تتر و گشتاورهای اعمالی به سیستم سه درجه آزادی در مسئله‌ی تعقیب نقطه به نقطه..... ۵۶
شکل ۴-۸: تاریخچه زمانی تغییرات طول تتر سیستم سه درجه آزادی در مسئله‌ی تعقیب مسیر..... ۵۷
شکل ۴-۹: تاریخچه زمانی تعقیب مسیر پنجه‌ی ربات سیستم سه درجه آزادی..... ۵۸
شکل ۴-۱۰: تاریخچه زمانی نرخ تغییرات طول تتر و گشتاورهای اعمالی به سیستم سه درجه آزادی در مسئله‌ی تعقیب مسیر..... ۵۹
شکل ۴-۱۱: کنترل‌کننده‌ی هیبرید MPC-CTM پیشنهادی برای سیستم چهار درجه آزادی..... ۶۰
شکل ۴-۱۲: تاریخچه زمانی تغییرات طول تتر سیستم اصلی در مسئله‌ی تعقیب نقطه به نقطه..... ۶۱
شکل ۴-۱۳: تاریخچه زمانی موقعیت مرکز جرم سازه در مسئله‌ی تعقیب نقطه به نقطه..... ۶۱
شکل ۴-۱۴: تاریخچه زمانی نرخ تغییرات طول تتر و گشتاورهای اعمالی به سیستم اصلی در مسئله‌ی تعقیب نقطه به نقطه ۶۲
شکل ۴-۱۵: تاریخچه زمانی تغییرات طول تتر سیستم اصلی در مسئله‌ی تعقیب مسیر..... ۶۳
شکل ۴-۱۶: تاریخچه زمانی تعقیب مسیر مرکز جرم سازه..... ۶۴
شکل ۴-۱۷: تاریخچه زمانی نرخ تغییرات طول تتر و گشتاورهای اعمالی به سیستم اصلی در مسئله‌ی تعقیب مسیر..... ۶۵

شکل ۵-۱: شماتیک سیستم چهار درجه آزادی با تتر انعطاف‌پذیر دارای ارتعاش طولی ۶۸
شکل ۵-۲: ایده‌ی پیشنهادی برای کنترل سیستم انعطاف‌پذیر ۷۳
شکل ۵-۳: تاریخچه زمانی تغییرات طول تتر ۷۴
شکل ۵-۴: تاریخچه زمانی موقعیت مرکز جرم سازه ۷۴
شکل ۵-۵: تاریخچه زمانی نرخ تغییرات طول تتر و گشتاورهای اعمالی روی سیستم ۷۵

چکیده

سیستمی که در این پایان‌نامه به تحلیل دینامیکی آن پرداخته شده، از یک ماهواره‌ی اصلی در حال گردش به دور زمین در مداری دایره‌ای با حرکتی از پیش تعریف شده تشکیل شده، که بیشتر جرم سیستم ناشی از ماهواره است. در این ماهواره، مکانیزم قرقره‌ی تعبیه شده، با تولید سرعت خطی در طنابی که به دور آن پیچیده شده تغییر طول ایجاد می‌کند. به انتهای تتر یک بازویی دو عضوی متصل شده و پنجه‌ی ربات سازه‌ای صلب و همگن را حمل می‌کند. موقعیت‌دهی سازه و انتقال آن در روی یک مسیر داده شده، ماموریت این سیستم را تشکیل می‌دهند. روش‌های کنترلی معمول به دلیل بازه‌ی محدود تغییرات طول تتر در حین عملیات کارآمد نیستند و کنترل سیستم چالش اصلی این پژوهش است.

ابتدا با در نظر گرفتن فرضیاتی مشخص، معادلات دینامیکی سیستم با تتر صلب استخراج شده است. سپس برای سیستم صلب کنترل‌کننده‌ای که پاسخ‌گوی اهداف پایان‌نامه باشد طراحی شده است و در انتها اثر انعطاف‌پذیری تتر در دینامیک سیستم کنترل‌شده ارزیابی شده است. تمرکز اصلی این پژوهش بر مسئله کنترل سیستم با توجه به محدویت تغییر طول تتر است. با تفکیک دینامیک سیستم به دو بخش حرکت نوسانی-دورانی تتر و حرکت بازوی رباتیکی، کنترل سیستم تجزیه وتحلیل شده است. از آنجا که به دلیل گشتاورهای اعمالی روی مفاصل ربات و سازه، کنترل این دو بخش راحت‌تر انجام می‌گیرد، ایده‌ی به کار رفته در حل مسئله کنترل سیستم این است که حرکت دروانی تتر مستقل از زوایای مفاصل ربات و سازه کنترل شوند و اثر تداخل دینامیکی حرکت بازو بر حرکت تتر به صورت اختلال در کنترل تتر در نظر گرفته شود. کنترل‌کننده‌ای که برای کنترل زوایای مفاصل ربات و سازه پیشنهاد شده، کنترل‌کننده‌ی گشتاورهای محاسبه شده است. کنترل چالش برانگیز زاویه‌ای تتر با حفظ طول تتر در یک رنج محدود ابتدا برای یک سیستم ساده تتر فضایی به عنوان الگو، با استفاده از روش کنترلی مبتنی بر پیش‌بین مدل، Model Predictive Control، بررسی شده است. سپس با بکارگیری یک کنترل‌کننده‌ی ترکیبی NMPC-CTM مسئله کنترل سیستم اصلی در دو حالت حمل سازه و ربات بدون سازه بررسی و شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم در نتیجه‌ی اعمال کنترل‌کننده‌های طراحی شده نشان-دهنده عملکرد خوب این کنترل‌کننده‌ها است. در آخر اثر انعطاف‌پذیری تتر به فرضیات مسئله اضافه شده معادلات سیستم برای این شرایط استخراج شده‌اند. تاثیر این انعطاف‌پذیری در کنترل سیستم به عنوان اغتشاش ساختاری برای سیستم در مدل دینامیکی در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای کنترل سیستم در انتقال سازه به نقطه‌ی هدف ارائه شده است.

کلمات کلیدی: کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل، تعقیب مسیر، کنترل‌کننده‌ی هیبرید، ربات فضایی متصل به تتر.

فصل اول

مقدمه

۱-۱-پیشگفتار

از آنجایی که انرژی خورشید جزء پیوسته‌ای از زندگی روزانه در روی کره‌ی زمین است، بشر از طلوع عصر تکنولوژی سعی کرده که توان این انرژی را برای اهداف مفید مهار نماید. روش‌های گوناگونی به وجود آمده است و طرح‌های بسیاری آزمایش شده که منجر به تأسیس صنایع و اقتصاد جدید شده‌اند. با روند رو به رشدِ استفاده از انرژی در سراسر جهان، فشار عظیمی بر منابع انرژی ناشی از سوخت‌های فسیلی (ذغال سنگ، گاز طبیعی و نفت) با سهمی در حدود ۸۵ درصد، وجود دارد که باقیمانده‌ی آن از انرژی‌های تجدیدپذیر (باد، آب، خورشید و زمین گرمایی) تامین می‌شود. سوخت‌های فسیلی از نظر کمی محدودند و ممکن نیست تا ابد باقی بمانند. انرژی خورشید، انرژی سبز و ماندنی برای تولید الکتریسیته محسوب می‌شود. البته شدت تابش آن به سطح زمین با تغییر فصل، عرض جغرافیایی، وضعیت آب و هوایی، و در طول روز در ساعات متفاوت تغییر می‌کند. لیکن انرژی خورشید در فضا شدت تقریباً ثابتی دارد و بیشتر از ۹۶ درصد اوقات در دسترس است.

به دلیل شدت ثابت و دسترسی بالای انرژی خورشید در فضا، مناسب است که سیستم تولید انرژی در فضا قرار داده شود و انرژی تولید شده به هر مکانی در روی زمین صرف نظر از شرایط سیاسی و جغرافیایی آن تابانده شود. استقرار

سیستم تولید انرژی در فضا تجهیزات ویژه‌ای را می‌طلبد که نصب آنها منجر به استفاده از ربات‌های فضایی می‌شود. در این پایان‌نامه دینامیک و کنترل نمونه‌ای از ربات‌های فضایی به هنگام حمل سازه بررسی شده است.

۱-۲-کاربرد ربات‌های فضایی

امروزه یکی از ایده‌های جدید تولید انرژی، انتقال انرژی خورشیدی از سطح ماه به صورت بدون سیم است. اصول اولیه‌ی این طرح توسط دکتر دیوید کریسول[1] محقق دانشگاه هیوستون تگزاس و مدیر مؤسسه‌ی Space Systems Operations ارائه شده است. بر اساس این طرح، مجموعه‌ای بسیار وسیع از سلول‌های خورشیدی بر بخشی از سطح ماه، که همیشه به طرف زمین است، قرار داده می‌شوند تا نور خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند.

گلیزر[2] [۱] در سال ۱۹۶۸ مفهوم ماهواره‌ی خورشیدی (SPS)[3] را در مدار معین ژئو پیشنهاد کرد. ژاپن، امریکا و آژانس هوایی اروپا به صورت فعال در زمینه‌ی جنبه‌های مختلف ماهواره‌های خورشیدی تحقیقات گسترده‌ای را انجام دادند. آژانس هوایی ژاپن[4] فعالانه روی جمع‌آوری انرژی از فضای خارجی کار می‌کنند و برای پرتاب مجموعه‌ای از تجهیزات SPS برنامه‌ریزی کرده است. هر پرتو انرژی با پهنای $1,8\,mile$در پایگاه دریافت کننده، $1\,GW$ انرژی الکتریسیته تولید خواهد کرد، که انرژی ۵۰۰,۰۰۰ خانه را شامل می‌شود[۲].

سیستم ماهواره‌ی خورشیدی از هر سیستم فضایی دیگری که در فضا است، بزرگ‌تر است. از این رو انتقال آسان تجهیزات آن به فضا مسئله‌ی حائز اهمیتی است. در مرجع[۳]، نیز در زمینه‌ی اولین گام‌ها برای دریافت انرژی خورشیدی از فضا و آزمایش استقرار آنتن‌های بزرگ و ساخت ساختارهای بسیار سبک، در ابعاد بزرگ کار شده است. کانادا نقش مهمی را در زمینه‌ی استفاده از SPS، طراحی ربات‌های فضایی و تجهیزات فضایی بازی می‌کند. آنجا به عنوان بارزترین ناحیه‌ای است که تأمین منابع انرژی آن بر اساس سوخت‌های فسیلی است که باید به یک حامی برای انرژی‌های سبز برای تولید الکتریسیته تبدیل شود.

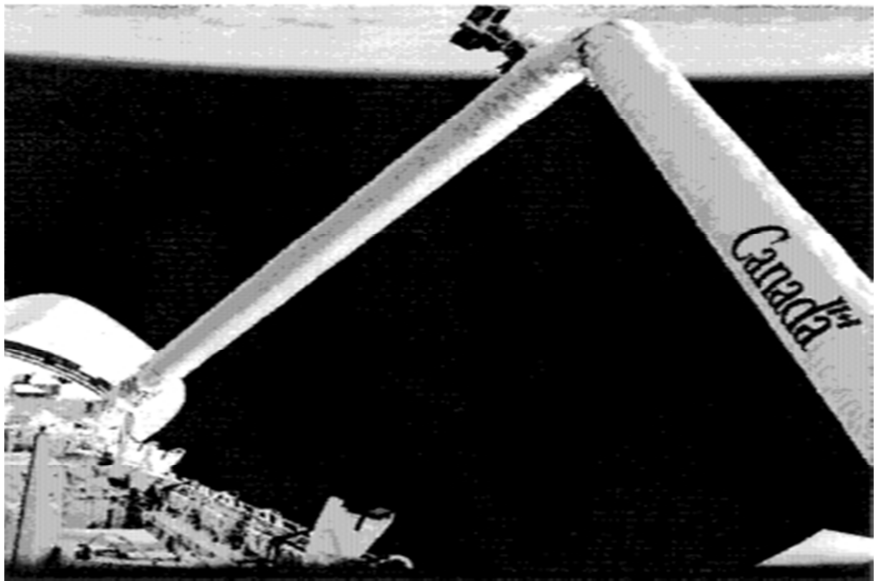
در اکثر مواقع حمل سازه‌های بسیار بزرگ به فضا به صورت اسمبل شده دشوار و یا غیرممکن است و یا نیاز به صرف هزینه‌های بالا دارد. از این رو نیاز است سرهم‌کردن اجزا برای ساخت سازه‌های بزرگ مانند صفحات خورشیدی گسترده، در فضا صورت گیرد. به دلیل شرایط حاکم در فضا انجام این مأموریت توسط فضانوردان پرخطر و در بعضی مواقع غیرممکن است و همین عامل نقش استفاده از ربات‌های فضایی را پررنگ می‌کند. ربات‌ها کارها را سریع، دقیق و بدون نقص انجام داده و خستگی‌ناپذیرند.

---

1 David Criswell
2 Glaser
3 Solar Power Satellite
4 JAXA

ماموریت یک ربات فضایی بعد از استقرار ماهواره در مدار معین آغاز می‌شود. ماهواره یا هر سیاره‌ی دیگری که به دور زمین در گردش است به دلیل تعادل نیروی گریز از مرکز و اثر جاذبه‌ی زمین این توانایی را دارد که در مدار مشخصی قرار بگیرد. شاتل‌های فضایی توانایی حمل چند ماهواره را به فضا دارند، با این وجود بیشتر ماهواره‌ها به وسیله‌ی موشک به فضا پرتاب می‌شوند.

اگرچه ربات‌های فضایی[1] کاربردهای زیادی دارند و در چند دهه‌ی اخیر از آن‌ها در صنعت بسیار استفاده شده است، ولی در این سیستم‌ها با محدودیت‌هایی مواجه هستیم. به دلیل اتصال مستقیم ربات به ماهواره، برد دسترسی ربات محدود است و حرکت ربات و ماهواره الزاماً به هم وابسته هستند به این مفهوم که برای اینکه ربات در وضعیت مطلوبی برای انجام وظایفش قرار گیرد نیازمند حرکت مناسب ماهواره است، که شاید این تغییر وضعیت برای ماهواره مطلوب نباشد و یا ممکن است عکس این موضوع اتفاق بیفتد. در (شکل ۱-۱) نمونه‌ای از یک بازوی رباتیکی[2] دیده می‌شود که مستقیماً به ایستگاه فضایی متصل شده است.



شکل ۱-۱: بازوی مکانیکی متصل به شاتل فضایی[۴]

محدودیت‌های ذکر شده در مورد ربات‌های فضایی باعث شده است که گونه‌ی دیگری از ربات‌های فضایی با عنوان ربات فضایی متصل به تتر[3] در مطالعات فضایی حضور پیدا کنند. در این پایان‌نامه نمونه‌ای از این ربات‌ها بررسی و تحلیل شده است. در این پایان‌نامه، دینامیک و کنترل ربات فضایی دومیله‌ای که با تتر به ماهواره متصل شده در حالیکه سازه‌ای را حمل می‌کند، مورد مطالعه قرار گرفته شده است. سیستم مورد مطالعه شامل ماهواره، یک ربات دوعضوی، سازه‌ای صلب، و تتری انعطاف‌پذیر با طول متغیر است.

---

1 Space Robot
2 Space Shuttle Remote Manipulator System
3 Tethered Space Robot

۱-۳-تاریخچه و کاربرد تتر در فضا

تتر کابلی طولانی است که برای اتصال سفینه‌ای به سفینه‌ی دیگر، یا اشیای دیگر در فضا و یا حتی زمین به کار می‌رود. از زمان مطرح شدن ایده‌ی استفاده از تتر بیش از یک قرن می‌گذرد. سیولکاوسکی[۱] پیشگام در تئوری کیهان‌نوردی[۲] بود و پدر علم کیهان‌نوردی نام گرفت. وی فرضیاتی را پیرامون سفرهای فضایی ارائه کرد. برج ایفل توجه سیولکاوسکی را به خود جلب کرد و با الهام از آن تصور می‌کرد بتواند به برجی بلندتر از برج ایفل در فضا دست یابد[۵]. استفاده از تتر که رشته‌ای بسیار ظریف و طولانی است توسط سیولکاوسکی[۶] در سال ۱۸۹۵ برای اتصال اجرام بزرگ پیشنهاد داده شد. اسراسوتناو[۳]، مهندس روسی و دانشجوی سیولکاوسکی[۷] ایده‌ی اتصال ماهواره در مدار ژئو به سطح زمین را به کمک تتر در سال ۱۹۶۰ پیشنهاد داد. آزمایشات اولیه‌ی تتر فضایی در دهه‌ی ۱۹۶۰ روی گرانش مصنوعی متمرکز بودند. جاذبه‌ی پژوهشی استفاده از تتر در فضا باعث انجام دو آزمایش Gemini XI و Gemini XII در سال ۱۹۶۶ شد، که در این آزمایشات طول تتر به کار گرفته شده ۱۰۰ فوت بوده است. کاربرد تتر در فضا با انجام آزمایش سیستم متصل به تتر (TSE)[۴] در اتحادیه‌ی فضایی اروپا شناخته شده است[۸].

تتر فضایی برخلاف راکت‌ها، کاوشگرهای فضایی و مفاهیمی از این قبیل، در بین عموم مردم موضوع مأنوسی نیست. در صورتی که در چند دهه‌ی اخیر به آن توجه ویژه‌ای شده است. تتر ریسمانی با استحکام کششی بالا است که معمولاً از جنس کولار[۵] ساخته می‌شود. کولار اولین بار در سال ۱۹۷۰ توسط دپانت[۶] معرفی شد و جز اولین دسته از الیاف‌ها با قدرت کششی بالا است. تتر برای اتصال اجرام و بالا کشیدن و پایین آوردن آن‌ها استفاده می‌شود. در ادامه تنها به چند مورد از کاربرد تترها در فضا به اختصار اشاره می‌شود.

- STEPS[۷]

مسیری برای برگشت بار[۸] کم از ایستگاه فضایی به زمین فراهم می‌شود که طول تتر به طور معمول ۳۳-۳۰ کیلومتر و جرم بار ۳۰ کیلوگرم است و نیاز به راکت برای تأمین نیروی پیش‌رانش وجود ندارد. بار در این مأموریت به انتهای کپسول متصل به آپولو بسته شده است وکپسول به سمت بیرون پرتاب می‌شود و انتهای تتر که به ایستگاه متصل است بریده شده و تتر کپسول را تا قبل از اتمام انرژی به سمت نقطه‌ی مورد نظر می‌برد.

- اتصال مشاهده‌گر به ماهواره

---

1 Tsiolkovsky
2 Astronautics Theory
3 Asrtsutanov
4 Tether System Experiment
5 Kevlar
6 Dupont
7 Station Tethered Express Payload System
8 Payload

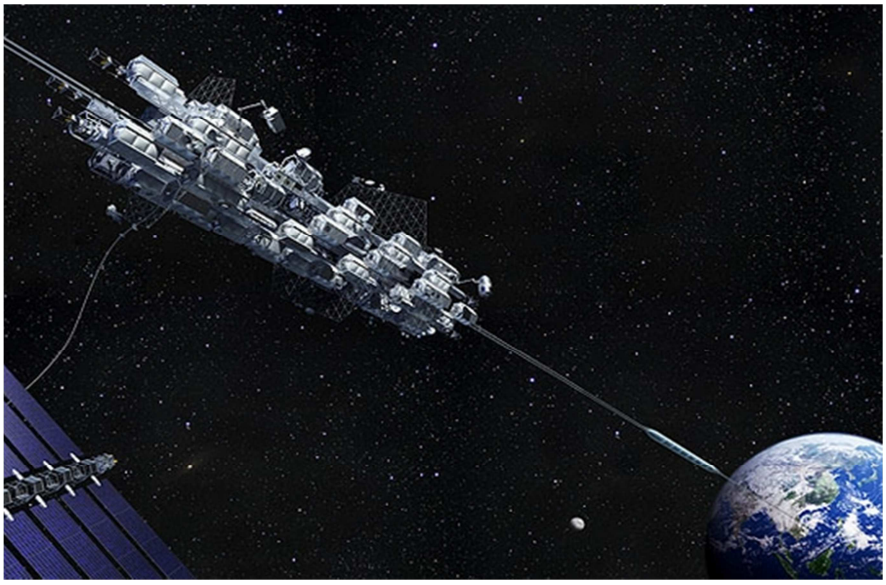
بسته‌ای از تجهیزات مورد نیاز برای مشاهده و ثبت وقایع در اطراف مریخ، به تتری به طول ۳۰۰ کیلومتر بسته می‌شود و عملکرد این سیستم برای ارتفاعات متفاوت بررسی می‌شود. هدف از این مأموریت تحلیل ترکیبات اتمسفر اطراف مریخ است. تتر این اجازه را می‌دهد که تجهیزات در محل تعیین‌شده برای اندازه‌گیری پایین آیند و از گردوغبار اطراف مریخ نمونه‌برداری کنند.

- ارسال کاوشگر برای بررسی جو

کاوشگرها در موقعیت‌های متفاوت، برای ثبت اطلاعات، به طور هم‌زمان، روی تتر قرار داده می‌شوند و به وسیله‌ی شاتل یا ایستگاه فضایی در ارتفاعات مختلف پایین آورده می‌شوند. این سیستم‌ها از نظر اندازه‌گیری پارامترها در ارتفاعات مختلف به طور هم‌زمان حائز اهمیت هستند.

- بالابر فضایی[1]

این بالابرها اغلب برای آسان کردن دست‌یابی به سطوح مختلف گرانش به کار می‌روند. این سیستم‌ها، توانایی دارند در طول تتر به صورت کنترل‌شده با تجهیزات مناسبی هدایت شوند و در ارتفاع مطلوب قرار گیرند. (شکل ۱-۲) نمونه‌ای از این بالابرها است[۹].



شکل ۱-۲: نمونه‌ای از یک بالابر فضایی[۱۰]

۱-٤-ربات متصل شده به تتر

این کارکرد از ربات‌ها زمینه‌ی جدیدی را برای انجام تحقیقات فراهم کرده است که تنها به بهبود عملکرد ربات‌ها در فضا محدود نمی‌شود. به این مفهوم که اگر ربات‌ها را، از نظر محیطی که برای انجام وظایفشان در آن حضور دارند به

1 Space Elevator

دو دسته‌ی ربات فضایی و ربات زمینی[1] دسته‌بندی کنیم، می‌توان ربات متصل به تتر را نیز به دو نوع تقسیم‌بندی کرد: ربات فضایی متصل به تتر که نمونه‌ای از ربات‌های فضایی است و ربات زمینی متصل به تتر. وسایل زیرآبی نمونه‌ای از ربات‌های زمینی متصل به تتر هستند[۴].

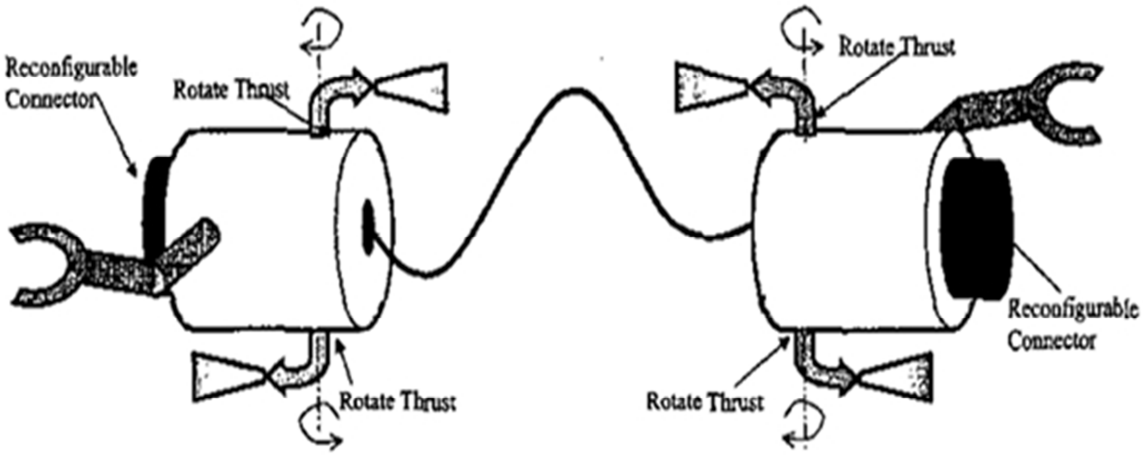
استفاده از تتر در فضا و توجه به آن قدمت زیادی دارد که TSRها کاربرد جدیدی از آنها را تشکیل می‌دهد. از جمله کاربردهای تتر در فضا استفاده از تتر برای اتصال چند ماهواره به هم است. اولین ماموریتی که توسط چنین سیستمی انجام شد توسط شاتل فضایی آتلانتیس و به سال ۱۹۹۲ برمی‌گردد، و دومین ماموریت توسط شاتل فضایی کلمبیا در ۲۲ فوریه‌ی سال ۱۹۹۶ انجام شد. طول باز شده‌ی تتر در این ماموریت در حدود ۲۰,۷-۱۹,۷ کیلومتر بود.

نوهومی[2] در مقاله‌اش[۱۱] تفاوت‌های میان یک سیستم فضایی تتر شده TSS[3] و یک ربات فضایی تتر شده TSR را بیان کرد. از جمله تفاوت‌های ذکر شده این است که در سیستم‌های TSR، تتر برای مسافت نسبی کوتاه در حدود ۱۰۰-۱۰ متر باز می‌شود، درحالیکه برای سیستم‌های TSS این طول در امتداد راستای عمودی محلی در حدود ۱۰۰-۲۰ کیلومتر است. البته در کاربردهای پیشنهادی اخیر استفاده از تترهایی با طول به مراتب بیشتر از صد متر و در حدود کیلومتر یا چند کیلومتر نیز برای TSR پیشنهاد شده است.

۱-٤-۱- نمونه‌هایی از ربات‌های فضایی متصل به تتر

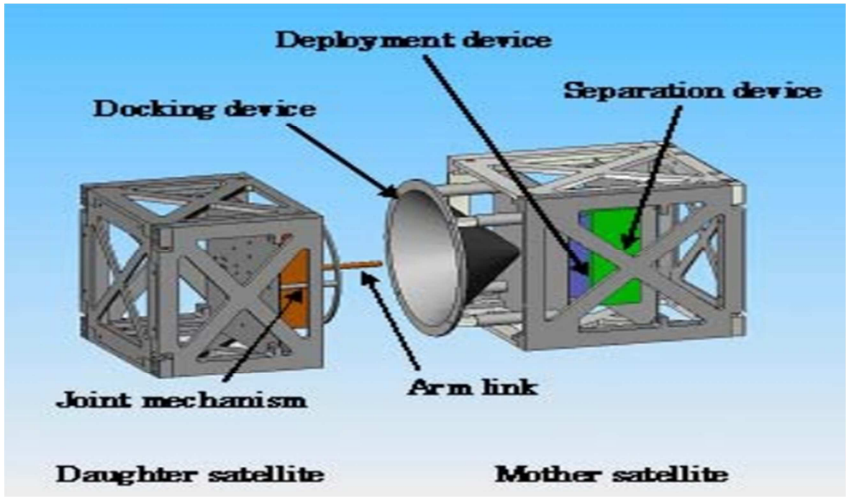
به دلیل وجود مشکلات برای اسمبل کردن سازه‌های بزرگ در فضا، می‌توان از ربات‌های خوداتکا و free flying استفاده کرد. فایمر ربات (FIMER) [۱۲][4] که در (شکل۱-۳) نشان داده شده است نمونه‌ای از این دسته از ربات‌ها است. فایمر ربات شامل دو free flying است که به آنها هد نیز گفته می‌شود. این دو هد با تتر به هم وصل شده‌اند. پنجه-ی فوقانی سازه را می‌گیرد و رابطی[5] که روی هر هد قرار دارد به رابط موجود روی سازه قفل می‌شود، سپس سازه به موقعیت از پیش تعیین شده انتقال داده می‌شود و به این ترتیب فرآیند سرهم کردن تکمیل می‌شود.

1 Terrestrial Robots
2 Nohmi
3 Tethered Satellite System
4 Free Flying Intelligent Fiber/Rope Match Maker Robot
5 Connector



شکل۱-۳: یک فایمر ربات با هد free flying[۱۲]

ماهواره‌ی مادر و دختر[۱][۱۳] یا همان STARS که در (شکل ۱-۴) نشان داده شده است، نوعی دیگر از ربات‌های فضایی متصل به تتر است. انتهای میله‌ی متصل به ماهواره‌ی دختر به تتر متصل است. تتر به وسیله‌ی مکانیزمی که در ماهواره‌ی مادر تعبیه شده، به دور یک قرقره پیچیده شده است و عکس‌های گرفته شده توسط دوربینی که بر روی ماهواره‌ی دختر نصب شده را به ایستگاه زمینی ارسال می‌کند.

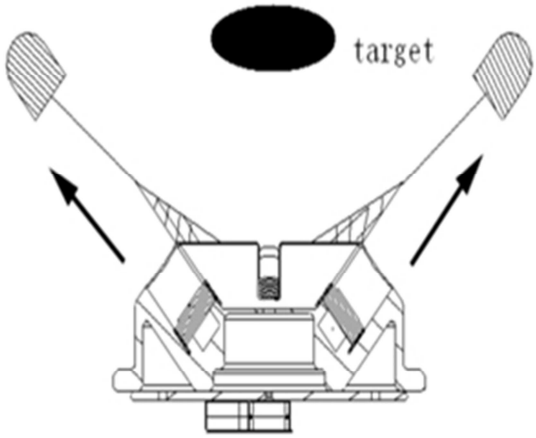


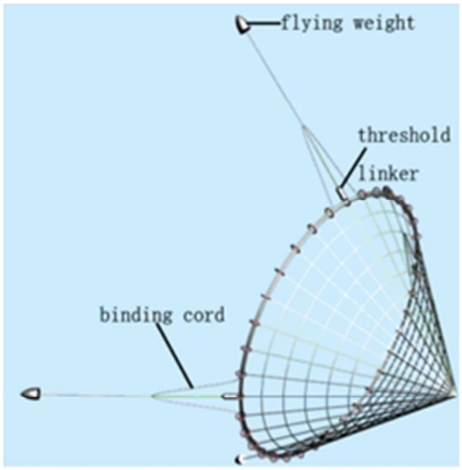
شکل ۱-۴: ماهواره مادر و دختر[۱۳]

ماموریت جمع‌آوری پسماندهای فضایی[۲] نوعی کاربرد ازسیستم‌های متصل به تتر است[۱۴]. (شکل ۱-۵) نمونه‌ای از تورهای فضایی را نشان می‌دهد. وزنه‌های متصل به تور[۳] که در شکل مشخص شده‌اند به بیرون پرتاب شده و باعث خارج شدن تور از پلتفرم و باز شدن آن برای گرفتن هدف می‌شود. دو ماموریت ویژه برای این ربات متصل به تتر می‌توان نام برد[۱۵]. در اولین نوع از این ماموریت‌ها فرض می‌شود که پروسه در غیاب تغییرات گرانش انجام می‌شود[۱۶]،[۱۷]، که

1 Daughter and Mother Satellite
2 Space Debris
3 Flying Weight

این حالت برای زمانی که فاصله‌ی ربات متصل به تتر و سفینه‌ی فضایی کوتاه است و ماموریت دیگر نیز در حضور گـرانش انجام می‌شود[۱۸].





شکل ۱-۵: نمونه‌ای از تورهای فضایی[۱۵]و[۱۹]

۱-٤-۲-مزایا و معایب ربات‌های متصل به تتر

از جمله مزایای ربات‌های متصل به تتر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- انتقال تجهیزات و فضانوردان در طول تتر.
- تعمیر و بازبینی ماهواره یا سازه‌ی قرار داده شده دور از فضاپیما.
- کارکردن ربات در مسافت طولانی و دور بدون نیاز به حمل منبع انرژی و کاهش مصرف سوخت.
- افزایش برد دسترسی و فضای دست‌یابی ربات و اجازه دادن به بازو برای کار کردن در فواصل دورتر.
- کاهش ریسک برخورد ربات با ماهواره.

به‌دلیل مزایایی که این ربات‌ها دارند امروزه از آن‌ها به صورت گسترده در صنعت هوا و فضا استفاده می‌شود. بـا ایـن وجود این سیستم‌ها نیز با مشکلاتی مواجه هستند که مهمترین آنها عبارتند از:

- مشکل در کنترل سیستم در صورت وجود مانع بین سفینه و مقصد.
- احتمال گره در تتر به دلیل حرکت پیچیده‌ی ربات.

۱-۵-اهداف کلی پروژه

در این پایان‌نامه برای یک مدل نسبتاً جامع برای یک بازوی مکانیکی فضایی متصل به تتر مدل‌سازی دینامیکی و تجزیه و تحلیل کنترلی انجام می‌شود. همانطور که قبلاً ذکر شد، سیستم مورد مطالعه شامل ماهواره، یک بازوی مکانیکی دوعضوی، سازه‌ای صلب، و تتری با طول متغیر است. کل سیستم در مداری از پیش تعیین شده به دور زمین در حال گردش است. یک مکانیزم قرقره برای بازکردن و جمع‌کردن و هم‌چنین کنترل وضعیت حرکت زاویه‌ای تتر مورد نیاز است. بعد از قرارگیری ماهواره در مدار مورد نظر، ماهواره با ربات متصل به تتر سازه را در مکان از پیش تعیین شده قرار می‌دهد. در طول این عملیات، نرخ تغییرات طول تتر و هم‌چنین محرک‌های بازوی مکانیکی به عنوان ابزارهای کنترلی باید محاسبه و کنترل شوند تا قرارگیری سازه در مکان در نظر گرفته شده انجام شود. برای کنترل حرکت زاویه‌ی تتر، از تغییر طول تتر و از یک کنترل‌کننده‌ی مبتنی بر پیش‌بینی مدل[1] استفاده می‌شود.

در اکثر مطالعاتی که تا کنون انجام شده‌اند تتر به صورت عضوی صلب مدل شده و کمتر به تحلیل سیستم با تتر انعطاف‌پذیر پرداخته شده است. در این مطالعه، ابتدا بررسی‌ها برای سیستم با تتر صلب انجام می‌گیرد و پس از آن اثرات انعطاف‌پذیری تتر به صورت اثرات اختلالی بر روی مدلِ استخراج شده، بررسی می‌شود و روش‌های کنترلی پیشنهادی برای انتقال سازه‌ی صلب از شرایط اولیه به موقعیت نهایی ارائه می‌شود.

۱-۶-مروری بر مطالعات انجام شده

در ادامه سعی شده مروری بر کارهای مرتبط با انواع مختلف ربات‌های فضایی و تحقیقاتی که در زمینه‌ی کنترل-کننده‌ی انتخابی برای سیستم، یعنی کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل انجام شده است، ارائه شود. اهم تحقیقات انجام شده بر روی ربات‌های فضایی متصل به تتر که نمونه‌هایی از آنها در بخش‌های قبلی معرفی شدند، دینامیکی متفاوت با بازوی رباتیکی متصل به تتر دارند. در ادامه سعی شده بیشتر به کارهایی پرداخته شود که دینامیکی نزدیک به مسئله‌ی مورد بررسی در این پایان‌نامه دارند.

---

1 Model Predictive Control