



آشنایی با روش‌های جمع‌آوری زباله‌های فضایی

علیرضا نظری کراده^{۱*}، علیرضا علیخانی^۲، میلاد عظیمی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

۲- دانشیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

۳- استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

* نویسنده مخاطب: alireza_nazarikaradeh1984@Yahoo.com

زباله‌های فضایی به عنوان یک مشکل جدی برای مأموریت‌های عملیاتی فضایی در نظر گرفته می‌شود. بسیاری از روش‌های جمع‌آوری زباله‌های فضایی در دهه گذشته ارائه شده‌است و توسط روش‌های مختلف زمینی و پروازی زیرمرداری آزمایش شده‌است. زباله فضایی معمولاً یک جسم غیرمتعارف و ناشناخته است و گرفتن و جمع‌آوری آنها با اهداف مأموریت‌های فضایی متداول در مدار، متفاوت بوده و به‌طور قابل ملاحظه‌ای چالش‌برانگیز است. یکی از مهمترین ملاحظات این است که چگونه هدف غیرمتعارف و ناشناخته را بصورت ایمن جمع‌آوری و حذف نمود بدون آنکه باعث تولید زباله‌های فضایی دیگر شود. در این مقاله سعی شده‌است روش‌های مختلف و فعالیت‌های صورت گرفته برای جمع‌آوری زباله‌های فضایی به همراه مزایا و معایب آنها ارائه شود.

واژه‌های کلیدی: زباله‌های فضایی، روش‌های جمع‌آوری، رباتیک فضایی

Introduction to Space Debris Capturing Methods

A. Nazari Karadeh^{1*}, A. Alikhani², M. Azimi³

1* M. Sc. Student, Faculty of Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

2 Associate Professor Faculty of Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

3 Assistant Professor, Faculty of Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

*Corresponding Author: alireza_nazarikaradeh1984@Yahoo.com

Space debris is considered a serious problem for space operational missions. Many methods of capturing space debris have been proposed in the last decade and have been tested by various ground-based and sub-orbital flight methods. Space debris is usually an unusual and unknown object, and capturing and collecting them differs significantly from the objectives of conventional space missions in orbit and is considerably challenging. One of the most important considerations is how to safely capture and remove the unusual and unknown target without generating other space debris. In this article, we have tried to present the different methods and activities performed for the capturing of space debris along with their advantages and disadvantages.

Keywords: Space Debris, Capturing, Space Robotic.

۱ مقدمه

از زمان پرتاب اولین جسم به فضا توسط بشر (اسپوتنیک ۱^۱ در سال ۱۹۵۷ میلادی توسط شوروی)، بارها موفق به فرستادن انواع ماهواره، فضاپیما و موشک به فضا گردیده است. در حال حاضر حدود ۳۰۰۰ ماهواره، چه دولتی و چه خصوصی در حال انجام مأموریت خود می‌باشند (از این ۳۰۰۰ ماهواره فعال در مدارهای مختلف، به‌طور تقریبی ۲۰۰۰ ماهواره در مدار کم ارتفاع زمین^۲ قرار دارند). به‌علاوه حدود ۲۰۰۰ ماهواره وجود دارد که دیگر کار نمی‌کنند و به‌صورت سرگردان در فضا معلق می‌باشند. محیط فضایی اطراف زمین با زباله‌های فضایی در حال جوش خوردن است. این زباله‌ها بیشتر بقایای اجسام ساخته‌شده توسط انسان، مانند ماهواره‌های از کار افتاده، قسمت‌های بالایی^۳ موشک‌های استفاده‌شده و ذرات ناشی از برخورد سایر زباله‌ها با هم است. زباله‌های فضایی تا ۵۰ سال پیش مورد توجه قرار نگرفته بود زیرا در مورد کاربردهای عملی فضای بالای استراتوسفر اطلاعات کمی وجود داشت. امروز جهان با آنچه که در آن زمان می‌شناختیم متفاوت است. به‌عنوان مثال شبکه‌های ماهواره‌ای، بخش اساسی زندگی ما هستند و بیشتر ماهواره‌ها برای تقویت پوشش آنها لازم است. با وجود پیشرفت‌های بسیار در دنیای فضا به مسئله انباشت زباله‌های فضایی در کمربندهای مداری ماهواره‌های موجود، پرداخته نشده است. در واقع این خطر برای ماهواره‌های موجود به دلیل افزایش احتمال برخورد با این اجسام سرگردان و پرسرعت، ایجاد گشته که خود سبب به‌وجود آمدن بیشتر زباله‌های فضایی و آسیب‌پذیرتر شدن مدارهای موجود در اطراف زمین می‌گردد. این مجموعه به عنوان سندرم کسلر^۴ طبقه‌بندی شده است که در صورت عدم حل شدن ممکن است بدتر شود. در واقع کسلر و همکاران^۵ خطر برخورد ناشی از مدارهای ماهواره‌های زمین و بزرگی این خطر را در سال ۱۹۷۸ میلادی پیش‌بینی کردند. آنها در مقاله‌ای تجمیع و اثر پشت‌سرهمی^۶ که به اصطلاح "سندرم کسلر" معروف شده است را بیان کردند، که معمولاً به ایجاد زباله‌های فضایی در مدار و تکثیر آن توسط برخورد زباله‌های فضایی باهم است، مربوط می‌شود. برای روشن کردن تعریف مورد نظر از اصطلاح گفته شده در بالا، آنها درباره تعداد دفعات برخورد و عواقب ناشی از آن، که می‌تواند تأثیر عمده‌ای در سراسر جهان داشته باشد، بحث کرده‌اند. آنها همچنین اقدامات تسکین‌دهنده و راه‌حل‌های کاربردی مشترک را برای جلوگیری از هرگونه فاجعه در آینده توصیف می‌کنند [۱-۳]. در فصل ۱۰ استاندارد فضایی^۷، تعریف علمی از زباله‌های فضایی را این‌گونه

شرح داده شده است، زباله‌های فضایی اشیاء ساخته شده توسط انسان که باقی‌مانده از فعالیت‌های پرواز فضایی انسان هستند و عبارتند از برخورد یا برخوردهای اجسام مختلف در فضا، انفجار فضاپیما یا قسمت‌های مختلف فضاپیماها و قسمت‌های بالایی جداشده از ماهواره‌ها و موشک‌ها. در واقع زباله‌های فضایی به روش‌های مختلفی از جمله ضربه‌ای که در سرعت‌های بالا به بدنه فضاپیما وارد می‌شود، انفجار با شدت زیاد یا انفجار با شدت کم در فضا که توسط انواع آزمایشات موشکی به‌وجود می‌آید، ماهواره‌های ناکارآمد و بازنشسته و قسمت‌های بالایی رها شده موشک، تولید می‌گردند. در این استاندارد تخمین زده شده که تعداد اشیاء سرگردان بزرگ‌تر از ۱ سانتی‌متر به در محدوده ۵۰۰۰۰۰ تا ۷۰۰۰۰۰ است [۴]. ناسا در اوایل سال ۱۹۷۵، تا به امروز در مورد توزیع جرم زباله‌های فضایی تحقیق کرده و چندین آزمایش را بر روی زمین انجام داده است. برای تخمین توزیع جرم زباله‌های فضایی بکار رفته از مدل‌های نمایی و توانی استفاده شده است. توزیع فضایی و جرمی زباله‌های فضایی توسط لیو معرفی شده است که از منظر آن در ارتفاع کم زمین، ارتفاع نزدیک به ۸۰۰ کیلومتر که شلوغ‌ترین مدار است و ارتفاعات نزدیک به ۶۰۰ کیلومتر، ۸۰۰ کیلومتر و ۱۰۰۰ کیلومتر، پر جرم‌ترین مدارها هستند زیرا بیشتر زباله‌های فضایی با جرم بیش از ۵۰ کیلوگرم در آن مناطق قرار دارند. زباله‌های فضایی در مدار با شیب ۸۲/۵-۸۳/۵ درجه و ارتفاع بین ۹۰۰ کیلومتر و ۱۰۵۰ کیلومتر به عنوان اهداف قابل حذف^۸ در نظر گرفته می‌شوند. بونال^۹ همچنین اظهار داشت که زباله‌های فضایی که شیب آنها از ۸۲/۸۳ تا ۸۲/۹۹۱ درجه و ارتفاعات نزدیک به ۱۰۰۰ کیلومتر است باید در اولویت قرار گیرند. هر ذره از زباله‌های فضایی پتانسیل جابجایی با سرعت ۳۰۰۰۰ کیلومتر در ساعت را دارد و می‌تواند خسارات زیادی را به بار آورد. از آنجاکه تعداد ماهواره‌ها در مدارهای زمین به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد، زباله‌های فضایی می‌تواند یک مشکل جدی برای فعالیت‌های فضایی نزدیک به زمین باشد، بنابراین اقدامات مؤثر برای کاهش آن بسیار اهمیت می‌یابد. در میان این اهداف تهدیدآمیز، بسیاری از آنها به دلیل مونتوم زاویه‌ای باقی‌مانده، در حال چرخش و غوطه‌وری هستند. بنابراین، تحقیق در مورد چگونگی رفتار این اهداف غوطه‌ور^{۱۰} نیز به همان اندازه سخت است. [۵-۷]. لیستی از بیست و دو هدف مهم از زباله‌های فضایی فعال قابل حذف توسط وایدمان^{۱۱} ارائه شده است که انویست^{۱۲} به عنوان خطرناک‌ترین هدف شناخته شده است. بقیه زباله‌های فضایی تهدیدآمیز اغلب قسمت‌های بالایی راکتی به نام

7. ECSS-E-ST-10-04C (15November2008)

8. Active Debris Removal (ADR)

9. Bonnal

10. Tumbling

11. Wiedemann

12. Envisat

1. Sputnik-1

2. LEO

3. Stages

4. Kessler Syndrome

5. Kessler et al.

6. Cascading effect

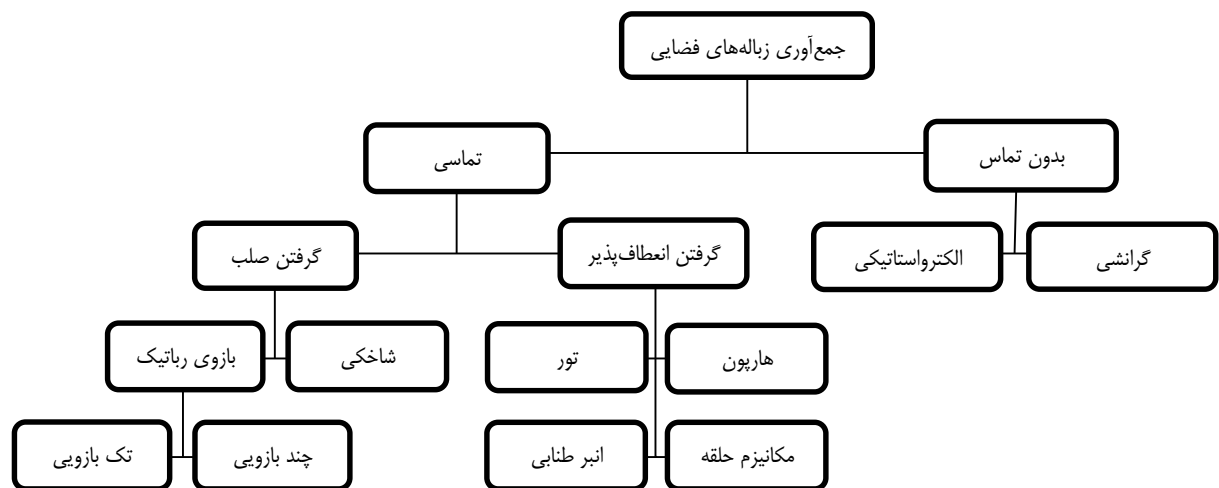
گیری از توانایی‌های روش‌های موجود در جمع‌آوری زباله‌های فضایی بیان می‌گردد.

۲ روش‌های جمع‌آوری زباله‌های فضایی

جهت جمع‌آوری زباله‌های فضایی، کشورها با تجربه‌های مختلفی که از فضا به‌دست آورده‌اند، توانسته‌اند ایده‌ها، روش‌ها، آزمایشات، فناوری و ساخت را تجربه کنند اما در عمل هنوز به دستاورد چشمگیر در جمع‌آوری و حذف زباله‌های فضایی دست پیدا نکرده‌اند. به طور کلی روش‌های جمع‌آوری زباله‌های فضایی را می‌توان به دو روش جمع‌آوری با تماس^{۱۶} و جمع‌آوری بدون تماس^{۱۷} تقسیم کرد و منظور از تماس این است که در هنگام گرفتن و جمع‌آوری زباله‌های فضایی، تماس فیزیکی وجود داشته باشد. که هرکدام از این روش‌ها، خود به انواع مختلفی از گرفتن زباله‌های فضایی تقسیم می‌شوند.

زینت-۱۳۲ است. قسمت بالایی این موشک استوانه‌ای با قطر ۳٫۹ متر، طول ۱۰٫۴ متر و جرم ۸۲۲۶ کیلوگرم است. از آنجا که پنج مورد از آن‌ها در یک شیب مشابه، صعود از راست گره صعودی مشابه^{۱۴} و ارتفاع مشابه قرار دارند، می‌توان آن‌ها را با یک مأموریت حذف، تنها با چند بسته^{۱۵} حذف کرد تا در هزینه صرفه‌جویی شود [۸، ۹].

چارچوب روش‌ها برای جمع‌آوری و گرفتن زباله‌های فضایی ایجاد شده است. مزایا و معایب مرتبط‌ترین روش‌های جمع‌آوری آورده شده است. مثال‌ها و فناوری‌های موجود مربوط به این روش‌ها به طور مفصل معرفی می‌شوند. این مقاله به این صورت مرتب‌سازی گردیده است: در قسمت ۱، به معرفی روش‌های مختلف جمع‌آوری و گرفتن زباله‌های فضایی پرداخته شده است. مثال‌ها و فناوری‌های موجود مربوط به این روش‌ها معرفی می‌شوند. در قسمت ۲، مزایا و معایب روش‌های جمع‌آوری آورده شده است. در قسمت ۳، نتیجه



شکل ۱- روش‌های گرفتن و جمع‌آوری زباله‌های فضایی [۱۰]

۱.۲ روش‌های بدون تماس

در مدل جمع‌آوری و گرفتن زباله‌های فضایی بدون تماس^{۱۸} هیچگونه تماسی بین هدف (یا اهداف) و ماهواره تعقیب‌کننده^{۱۹} وجود ندارد، بلکه با استفاده از نیروهای مغناطیسی و القایی سعی بر کنترل، جابجایی، تغییر سرعت و جهت در هدف می‌باشد. روش‌های گرانشی و الکترواستاتیکی توسط یک یا چند کِشنده^{۲۰} نیروی مورد نیاز را به زباله‌های فضایی هدایت کرده و با تغییر جهت و سرعت باعث جابجایی در مدار آنها می‌شود. در ادامه به بررسی این دو روش بطور جداگانه پرداخته می‌شود.

۱.۱.۲ روش کِشنده گرانشی

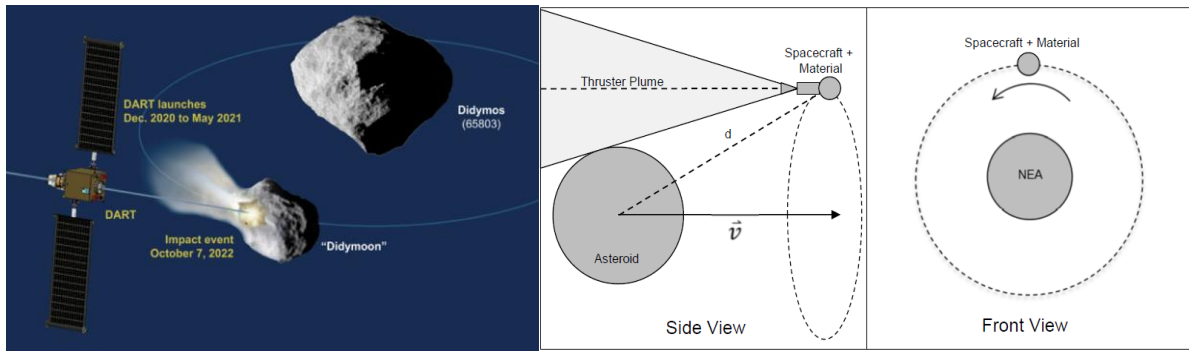
کِشنده گرانشی، فناوری‌ای است که از جاذبه یک فضایی‌مای ملاقات‌کننده جهت وارد کردن ضربه به هدف و همچنین به عنوان یک پیشرانده کم‌رانس با بازده بالا برای ایجاد تغییر تدریجی سرعت و مسیر هدف استفاده می‌کند، که در جمع‌آوری و گرفتن زباله‌ها و اجسام بزرگ فضایی کاربرد دارد. نوآوری در این روش، که معروف به کِشنده گرانشی پیشرفته است، از جرم جمع شده در محل برای افزایش جرم فضایی‌ما استفاده می‌کند، در نتیجه نیروی جاذبه بین اجسام را بسیار افزایش می‌دهد. مواد جمع‌آوری شده می‌تواند یک

17. Contactless Capturing
18. Contactless Capturing
19. Chaser Satellite
20. Tractor

13. Zenith-2
14. Similar Right Ascension of the Ascending Node (RAAN)
15. Kit
16. Contact Capturing

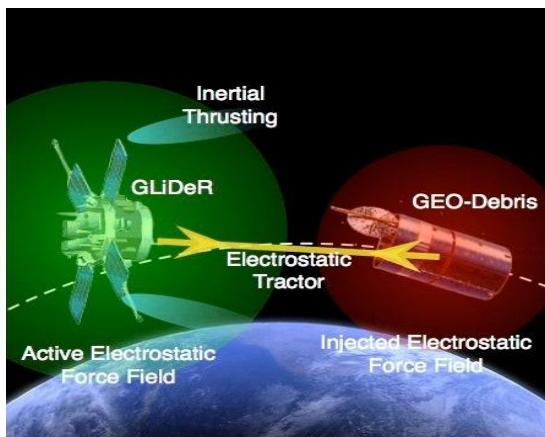
شکل‌گیری برای ایجاد تغییر سرعت لازم و کاهش بیشتر زمان مورد نیاز برای انحراف سیارک‌ها و ستاره‌های دنباله‌دار خطرناک، به دور هدف، دور بزنند [۱۱]. جوریس هلندی در مقاله‌ای توانست با استفاده از محاسبات ریاضی، طی دو مرحله، مسیر نزدیکی کُشنده گرانشی به هدف و انحرافِ کنترلی بهینه شده برای سیارک یا زباله فضایی بزرگ را محاسبه کند [۱۲].

تخته سنگ، چند تخته سنگ، لایه‌ای از مواد سنگی غیر تلفیقی که بستر را پوشش می‌دهد^{۲۱} یا ترکیبی از منابع مختلف مانند زباله‌های سرگردان در فضا باشد. با توجه به توانایی سیستم پیش‌رانه و جرم جمع‌آوری شده، این روش می‌تواند زمان انحراف را ده تا پنجاه بار یا بیشتر کاهش دهد، در نتیجه زمان انحراف چندین دهه، به سال یا کمتر کاهش می‌یابد. علاوه بر این، چندین فضاپیما می‌توانند در



شکل ۲- نمایی از مکانیزم گرانشی [۱۱]

اتصال مجدد، سوختی است که توسط رانشگرهای اینرسی روی کُشنده استفاده می‌شود [۱۴].



شکل ۳- جمع‌آوری زباله فضایی با استفاده از کُشنده الکترواستاتیکی [۱۴]

۲.۲ روش‌های تماسی

منظور از روش جمع‌آوری تماسی زباله‌های فضایی، این است که در این روش مکانیزم موجود با هدف یا همان زباله فضایی در تماس می‌باشد تا بتواند آن را بگیرد. روشهای تماسی جمع‌آوری زباله‌های فضایی به دو نوع اتصال سخت یا صلب^{۲۳} و اتصال انعطاف‌پذیر^{۲۴} تقسیم می‌گردد. هر کدام از روش‌های گرفتن اتصال سخت و گرفتن اتصال انعطاف‌پذیر نیز انواع مختلفی را در تحقیقات و آزمایشات مختلف تجربه کرده‌اند.

۲.۱.۲ روش کُشنده الکترواستاتیکی

منظور از کُشنده الکترواستاتیک^{۲۲} مفهومی برای تحریک از راه دور اجسام در فضا است. بیشترین کاربرد این روش، تغییر مداری زباله‌های فضایی در مدار ژئو است. با استفاده از نیروی کولن بین دو جسم باردار جاذب‌های به وجود می‌آید، سپس کُشنده الکترواستاتیک با استفاده از پیش‌رانه خود، هدف را تحت کنترل خود در می‌آورد و یا میتواند فاصله خود را در موقعیت موردنظر با هدف حفظ کند [۱۳]. شکل ۳ مفهوم کاربردی کُشنده‌های الکترواستاتیک را نشان می‌دهد. در این نمونه، یک ماهواره خدماتی به یک زباله فضایی، مانند ماهواره از کار افتاده یا بدنه موشک نزدیک می‌شود و یک پرتوی الکترونی را به سمت هدف هدایت می‌کند. هدف موردنظر، الکترون‌های اضافی را جمع می‌کند، بنابراین دارای بار منفی شده، در حالی که کُشنده به دلیل ازدست دادن الکترون، بار مثبت می‌گیرد. این منجر به ایجاد یک نیروی خالص جاذبه بین دو فضاپیما می‌شود که در امتداد خط دید بین دو مرکز بار قرار می‌گیرند. در حالی که این اختلاف بار حفظ می‌شود، با استفاده از جاذبه الکترواستاتیک بین ماهواره برای کشیدن هدف در طول مسیر کُشنده می‌تواند رانش‌های اینرسی خود را استفاده کند تا هدف را به آرامی به مدار جدیدی بکشد. انتقال بار از طریق پرتو الکترون اساساً بدون پیش‌رانه است، بنابراین تنها سوخت مورد استفاده برای

24. Flexible Connection

21. Regolith
22. Electrostatic Traction (ET)
23. Stiff Connection

۱.۲.۲ روش‌های اتصال سخت یا صلب

منظور از سختی یا صلبیت در روش جمع‌آوری تماسی زباله‌های فضایی، مدل اتصال به هدف در هنگام عمل گرفتن از نظر سختی و انعطاف‌پذیری است. تفاوت این مدل از جمع‌آوری با مدل انعطاف‌پذیر جمع‌آوری زباله‌های فضایی در این است که در اینجا دانستن جرم، اینرسی و سایر ارقام فیزیکی هدف یا اهداف هنگام گرفتن مورد نیاز است. این مدل از گرفتن زباله‌های فضایی نیز به دو نوع گرفتن شاخکی^{۲۵} و گرفتن با استفاده از بازوی رباتیک تقسیم می‌گردد. اینها روش‌هایی هستند که از نمونه آزمایشگاهی به نمونه عملیاتی بسیار نزدیک شده‌اند.

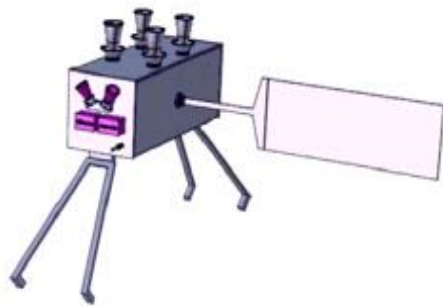
الف- مکانیزم شاخکی

در این مدل از جمع‌آوری زباله‌های فضایی، مکانیزم اقتباس شده از طبیعت استفاده می‌گردد. مکانیزمی برگرفته از جانداران همچون عنکبوت، هشتپا، اختاپوست و برخی گیاهان حشره‌خوار که به کمک آن به گرفتن اجسام یا جانداران دیگر اقدام می‌کنند. مدل شاخکی نیز خود نوعی بازو می‌باشد با این تفاوت که در این مدل، مجری نهایی وجود ندارد و تقریباً از تمام قسمت بازو یا بازوهای موجود، جهت جمع‌آوری و گرفتن زباله‌های فضایی استفاده می‌گردد اما در مدل بازوی رباتیک، عمل گرفتن تنها با استفاده از مجری نهایی بازو صورت می‌گیرد. در ادامه برخی پروژه‌هایی که از این ایده استفاده نموده‌اند آورده شده است.

• **پروژه ای. دی اوربیت مربوط به سازمان فضایی اروپا**
در پروژه ای. دی اوربیت مربوط به سازمان فضایی اروپا، گرفتن توسط شاخک‌ها می‌تواند با استفاده از بازوی رباتیک یا بدون بازوی رباتیک انجام شود. با استفاده از بازوی رباتیک، گرفتن شاخکی پس از نگهداشتن یک نقطه روی هدف توسط بازوی رباتیک، زباله‌های فضایی را با مکانیسم بستن^{۲۶} در آغوش می‌گیرد. سرانجام، افزایش سرعت توسط دستگاه تعقیب‌کننده باعث جابجایی جسم ترکیبی میشود [۱۵].



(الف)



(ب)

شکل ۴- (الف و ب) پروژه دی. آر بیت [۱۵]

بررسی‌ها نشان می‌دهد که گرفتن شاخکی با بازوی رباتیک منجر به هزینه، جرم و حجم بالاتر، خطرناک بودن و پیچیدگی طراحی در مقایسه با نوع بدون بازوی رباتیک می‌شود [۱۶]. شبیه‌سازی عمل گرفتن هدف بدون بازوی رباتیک با موفقیت انجام شده است، اما الزامات سامانه کنترل وضعیت^{۲۷} به دلیل الزامات با دقت بیشتر، سخت‌تر هستند. گرفتن شاخکی بدون بازوی رباتیک به دنبال گرفتن هدف قبل از تماس با هدف است، یعنی شاخک‌ها باید به طور ایده‌آل قبل از انجام تماس فیزیکی، هدف را در آغوش بگیرند. در این روش از هیکل و هییت ماهواره تعقیب‌کننده اجتناب می‌شود و به سیستم کنترل وضعیت اجازه داده می‌شود در حین گرفتن به حالت آماده‌باش بایستند. سپس مکانیزم در آغوش گرفتن، قفل شده و مجموعه تعقیب‌کننده و هدف پس از گرفتن، اساساً سفت می‌شود [۱۷].

• پروژه کادت

آویوسپیس^{۲۸} در حال کار بر روی پروژه کادت^{۲۹} است که با استفاده از شاخک‌ها، زباله فضایی را می‌گیرد. شاخک‌ها در یک پیکربندی بسته ساخته شده توسط کمر بند هستند تا تماس بین شاخک‌ها و هدف را نرم کنند. مواد کمر بندها می‌توانند به عنوان مثال زیلن^{۳۰} به اضافه ویتن^{۳۱} یا پیایاس باشند. زیلن (نام: پلی-پی-فنیلن-۲،۶-بنزویسوکسازول) یک نام تجاری است برای طیف وسیعی از پلی اکسازول مایع-کریستالی حرارتی. این ماده پلیمری مصنوعی در سال ۱۹۸۰ توسط اس‌آرای بین‌المللی^{۳۲} اختراع و توسعه یافت و توسط شرکت تیبو^{۳۳} تولید می‌شود. در مصارف عمومی، از فیبر به عنوان پی-بی^{۳۴} یاد می‌شود. همچنین ویتن نمونه‌ای از مارک اف‌کی‌ام^{۳۵} است، لاستیک مصنوعی و الاستومر فلئوپرلیمیر است که معمولاً در مهر و موم، دستکش‌های مقاوم در برابر مواد شیمیایی و سایر کالاهای قالب‌گیری یا اکستروژن شده استفاده می‌شود. این نام علامت تجاری

32. SRI International
33. Toyobo
34. PBO
35. FKM

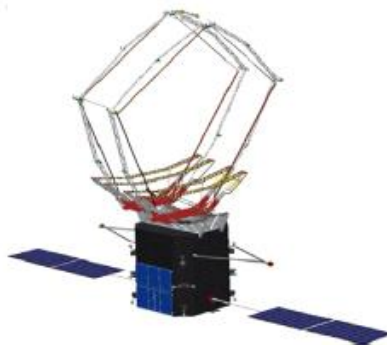
25. Tentacle
26. Clamping Mechanism After Holding
27. GNC
28. Aviospace
29. CADET
30. Zylon
31. VITON

یوشیدا و ناکانیسی^{۳۸} ایده‌ای از پروازکننده‌ی هماهنگ و مشارکتی با هدف تاکو ارائه داده‌اند که شامل یک ماهواره اصلی خدمات‌دهنده و یک گیره تاکو است. از آنجایی که بیشتر ماهواره‌های غیرعملیاتی به صورت غوطه‌ور و ازدست‌رفته^{۳۹} هستند و در ارائه اطلاعات وضعیتی خود در فضا به ماهواره تعقیب‌کننده^{۴۰} ناکام هستند، پروازکننده تاکو برای هماهنگ شدن و مشارکت با هدف با استفاده از گرفتن هدف و تثبیت حرکت غوطه‌وری آن از طریق چندین عملیات رانشگر نصب شده بر روی گیرنده تاکو طراحی شده است. نگهدارنده‌های قلاب و نشانگرهای نوری موجود در گیره تاکو باعث می‌شود تا بین هدف و ماهواره اصلی تعقیب‌کننده تعامل و هماهنگی ایجاد شود. گیره تاکو از چندین انگشت تشکیل شده است که بر اثر فشار گاز در بالشتک‌های نیوماتیکی رانده می‌شوند. با این حال، عملکرد این ایده هنوز نیاز به تأیید دارد [۱۹].

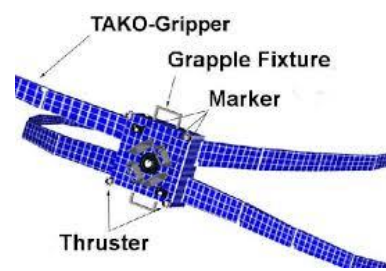
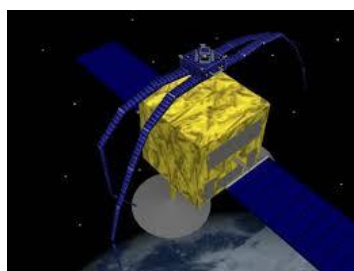
ثبت شده شرکت کمورس^{۳۶} قبلی است و در سال ۱۹۵۷ معرفی شد. در حالی که ویتن را گاهی اوقات می‌توان با رنگ سبز یا قهوه‌ای خود از سایر لاستیک‌ها متمایز کرد، اما آزمایش قابل اطمینان‌تر جهت تشخیص، چگالی بالای ۱۸۰۰ کیلوگرم در متر مکعب است، که به طور قابل توجهی بیشتر از اکثر انواع لاستیک می‌باشد (۱۰۱۰-۱۵۲۰ کیلوگرم در متر مکعب). مدل‌های المان محدود برای شبیه‌سازی فرایند گرفتن و ارزیابی رفتار پویا در طی فرایند جفت شدن هدف و تعقیب‌کننده مورد استفاده قرار گرفته است. چندین طرح آزمایشی مبتنی بر زمین ارائه شده است، و طرح تفصیلی از ژوئن ۲۰۱۴ در دست اجرا است [۱۸].

• پروژه تاکو

تاکو^{۳۷} نوع دیگری از شاخک‌هاست که از زیست‌شناسی الهام گرفته شده است، یعنی مربوط به چهره‌شناسی و عملکرد شبیه به مار، خرطوم فیل یا بازوی هشت پا است. در این مقاله دو مثال ارائه شده است.



شکل ۵- پروژه کادِت [۱۸]



شکل ۶- پروژه تاکو [۱۹]

با محرک‌های ماهیچه‌ای هوایی^{۴۳} ساخته شده است و قادر به خم شدن از دو محور و افزایش سطح محور با نه درجه آزادی است [۲۰]. مدل دینامیکی شاخک‌های انعطاف‌پذیر را می‌توان از معادلات لانگرانژ بدست آورد. اصطلاحات انرژی توسط اصول مبتنی بر عملکرد شکل به دست می‌آید [۲۱].

• پروژه بازوی پیوسته اختاپوست

مک ماهان^{۴۱} یک بازوی پیوسته (با درجه آزادی بالا) به نام بازوی اختاپوست^{۴۲} طراحی کرده است. آنها موفق به ساخت نسخه پنجم بازوی اختاپوست شده‌اند که شامل سه بخش است و توسط صفحات انتهایی بهم متصل می‌شوند. هر بخش

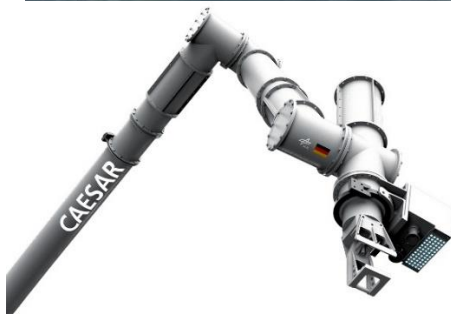
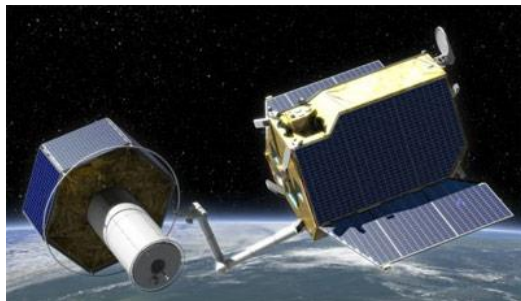
40. Chaser Satellite
41. McMahan
42. Continuum Manipulator OctArm
43. Air Muscle Actuators

36. Chemours
37. TAKO
38. Yoshida and Nakanishi
39. Tumbling and Failed



شکل ۷- پروژه بازوی اختاپوست [۲۰]

ناشناخته و غلتان^{۵۰} را شناسایی و نشان می‌دهد که هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد نقطه دیدار و گرفتن مشخص نیست. با این وجود، کل این فرایند از فاصله دور ملاقات کردن تا رسیدن در این مأموریت انجام می‌شود [۲۶].



شکل ۸- پروژه دی.ا.ای.اس [۲۶]

- **پروژه شبیه‌ساز عملیات تقرب اروپا (ای. پی. ا. ای. اس)**
به منظور شبیه‌سازی رفتارهای تماسی هنگام جمع‌آوری، گرفتن و اتصال لوله‌ای^{۵۱} در سیستم‌های فضایی، دی‌آل‌آر یک شبیه‌ساز به نام شبیه‌ساز عملیات تقرب اروپا^{۵۲} را توسعه داده است. ای. پی. ا. ای. اس یک مرکز سخت‌افزاری درون حلقه‌ای زمینی است تا تسهیلاتی برای تست‌هایی^{۵۳} همچون تست رفتار دینامیکی هنگام اتصال را به‌وجود بیاورد [۲۷]. این مرکز شبیه‌سازی قادر به شبیه‌سازی فرآیندهای اتصال و گرفتن از ۲۵ تا ۰ متر را می‌باشد. دو ربات صنعتی^{۵۴} به ترتیب

ب- گرفتن با بازوی ماهر رباتیک

فناوری بازوی رباتیک در بسیاری از مأموریت‌های خدماتی در فضا، بارها استفاده گردیده است که بالاترین حد اطمینان در عملکرد و ایمنی در شرایط فضایی را دارا بوده است، مانند پروژه ای‌تی‌اس-۷- جاکسا^{۴۴} [۲۲]، بازوی کانادا^{۴۵} [۲۳]، سفر مداری دارپا^{۴۶} [۲۴] و بسیاری دیگر [۲۵] که از بازوی ماهر رباتیک استفاده شده است. باید توجه داشت، اهداف در این مأموریت‌ها، اهدافی معمول و از قبل پیش‌بینی شده و مشخص می‌باشند. به عنوان مثال، چهار نشانگر برای ماهواره در هدف ای‌تی‌اس که در ماهواره هدف نصب شده است [۱۰]. خود این روش به دو نوع گرفتن و جمع‌آوری زباله‌های فضایی با تک بازوی ماهر رباتیک و چندبازویی تقسیم می‌گردد.

ب- ربات‌های ماهر تک بازویی

همانطور که در بالا مورد بحث قرار گرفته است، زباله‌های فضایی می‌توانند یک ماهواره غیرعملیاتی، قسمت بالایی موشک یا مواد باقیمانده از انفجار باشند. هیچ اطلاعاتی از وضعیت و موقعیت پروازی، نوع و مقدار نیروهای موجود در زباله فضایی، برای ماهواره تعقیب‌کننده مشخص نمی‌باشد. بنابراین، استفاده از بازوهای ماهر روباتیک در مأموریت‌های جمع‌آوری زباله‌ها در فضا نسبت به مأموریت‌های خدمات‌دهی در مدار چالش برانگیزتر است چرا که در مأموریت‌های خدمات‌دهی، موقعیت و وضعیت پروازی هدف در هر لحظه مشخص می‌باشد. در اینجا به نمونه‌هایی از گرفتن و جمع‌آوری زباله‌های فضایی با استفاده از تک بازوی ماهر رباتیک^{۴۷} اشاره می‌گردد.

- **پروژه مأموریت خدماتی مداری آلمان (دی.ا.ای.اس)**

برای تأیید روند گرفتن یک هدف غیرمعمول، غوطه‌ور و غلتان، دی‌آل‌آر^{۴۸} در مأموریتی با نام مأموریت خدماتی مداری آلمان^{۴۹} در حال توسعه فناوری‌های روباتیک است. ماهواره موردنظر که باید جمع‌آوری و عمل گرفتن را انجام دهد، یک هدف غیرمعمول،

50. Non-cooperative and Tumbling Target

51. Docking

52. European Proximity Operations Simulator (EPOS)

53. Ground-Based Hardware-in-the-Loop Facility to Test

54. KUKA Robot

44. JAXA ETS-7

45. Canadarm

46. Orbital Express DARPA

47. Single Arm

48. DLR

49. Deutsche Orbital Servicing Mission (DOES)

حالی که پایه دیگری ثابت می‌شود [۲۸]. این فناوری از گرفتن ماهواره غیرعملیاتی و از کارافتاده پشتیبانی می‌کند [۲۹].

ماهواره‌های خدماتی و مراجعه‌کننده^{۵۵} (مشرتی) را نشان می‌دهند و کشویی‌های^{۵۶} یکی از آنها بر روی یک جفت ریل که حرکات نزدیک‌کننده (تقرب) را انجام می‌دهد، قرار دارد در



شکل ۹- پروژه ای. پی. ا. اس [۲۷]



شکل ۱۰- ربات کوکا [۲۸]

با سفت و سخت کردن خود ابزار و سپس سفت و سخت کردن رباتیک‌های موقعیتی^{۵۹} هر دو فضاپیما را بهم متصل می‌کند. فرند به عنوان یک فناوری بازوی ماهر رباتیک توصیف شده است که روزی می‌تواند به طور بالقوه عملیاتی همچون سوخت‌رسانی و تعمیرات را انجام دهد و یا ماهواره‌ها را دوباره جایجا کرده [۳۰] و همچنین در جمع‌آوری و گرفتن زباله‌های فضایی مشارکت داشته باشد.

• پروژه فرند

وزارت دفاع آمریکا با نام اختصاری دارپا پروژه‌ای با نام فرند^{۵۷} با هدف ایجاد یک قابلیت اتصال کاملاً مستقل از یک یا دو بازوی ماهر رباتیک به ماهواره‌هایی که برای خدمات‌رسانی فضایی ساخته نشده‌اند را دنبال می‌کند، که در حال حاضر در آزمایشگاه تحقیقات دریایی ایالات متحده^{۵۸} تحت آزمایش است. ایده مأموریت فرند از بازوهای ماهر رباتیک برای قرار دادن ابزاری قلاب مانند، در محکم‌ترین قسمت سازه فضاپیمای موردنظر استفاده می‌کند و ابتدا

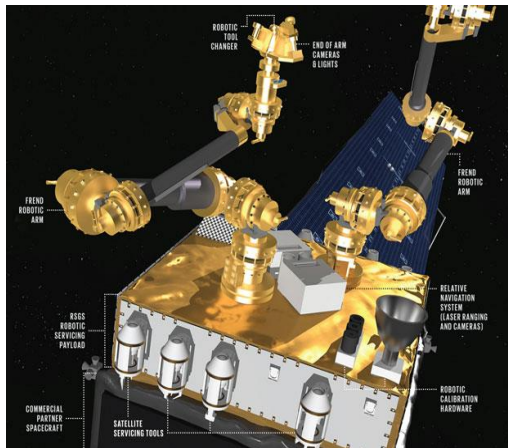


شکل ۱۱- بازوی رباتیک فرند [۳۰]

58. Navy Research Laboratory's Proximity Operations Test Facility
59. Positioning Robotics

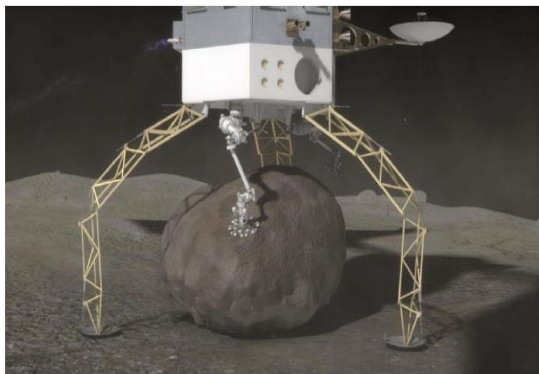
55. Service and Client Satellites
56. Slides
57. Front-End Robotics Enabling Near-Term Demonstration (FREND)

ماهوره‌هایی که برای سرویس ساخته نشده‌اند را در دست اقدام دارد. همانطور که در آزمایشگاه تحقیقات دریایی ایالات متحده در حال آزمایش است. دارپا با گسترش این پروژه تصمیم به توسعه گرفته تا با استفاده هم‌زمان از دو بازوی رباتیک جهت هماهنگی بیش‌تر در گرفتن، خدمت‌رسانی و همچنین جمع‌آوری زباله‌های فضایی گرفته است [۳۴].



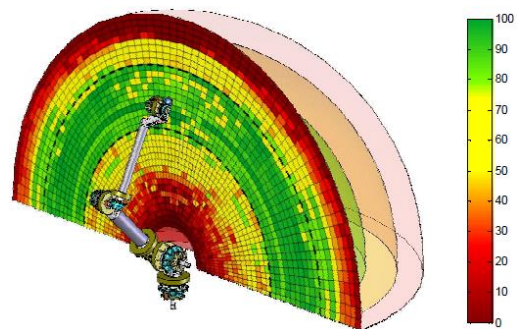
شکل ۱۳- دو بازوی رباتیک فرند [۳۴]

بخش رباتیک مأموریت تغییر مسیر سیارک ۶۶ ناسا با استفاده از این مدل از بازوی رباتیک که بر روی کَشنده الکترواستاتیک خود نصب می‌گردد یک تخته‌سنگ چند تُنی از سطح سیارکِ بزرگ در نزدیکی زمین جمع می‌کند و اولین نمایش از این روش را ارائه می‌دهد و یک روش جمع‌آوری جرم محل بر روی سیارکی با اندازه خطرناک را تأیید می‌کند [۱۱].



شکل ۱۴- دو بازوی فرند بر روی کَشنده الکترواستاتیک [۱۱].

دارپا برای نشان دادن فن‌آوری رباتیک و انجام عمل گرفتن هدف غیرمعمول، ناشناخته و از قبل هدف نبوده، برنامه ربات‌های فرند که قادر به نمایش موارد نزدیک هستند را توسعه داد. بازوی فرند طراحی، مونتاژ و آزمایش شده است. این مدل از بازوی رباتیک، سفتی و دقت بالاتری نسبت به بازوهای ماهر رباتیک برای مریخ‌نورد اکتشاف مریخ^{۶۵}، رونده ققنوس^{۶۶}، ایستگاه فضایی و شاتل فضایی^{۶۷} نشان می‌دهد [۳۶].



شکل ۱۲- فضای کاری بازوی رباتیک فرند [۳۶]

- ربات‌های چندبازویی ماهر

تا به امروز هنوز استفاده شایانی از رباتیک چندبازویی^{۶۳} در فضاپیماهای فرستاد شده به فضا صورت نگرفته است، اما همانطور که در قسمت جمع‌آوری و گرفتن شاخکی بیان شد، با استفاده از منابع موجود در طبیعت و بهره‌گیری از سیستم‌های طبیعی در کنترل، دانشمندان به این نتیجه دست پیدا کرده‌اند که همانند دست‌های انسان، پاهای پرندگان و دست و پاهای حشرات، می‌توان کنترل سریع‌تر و باکیفیت‌تری در انجام اموری همچون گرفتن، پایداری بیشتر، سرعت عمل و دقت بیش‌تر را داشت. در این بین دانشمندانی همچون یوشیدا، سینماتیک و دینامیک بازوی دوگانه را در یک ربات با پرواز آزاد بررسی کرده است و نتیجه گرفته است که بازوی دوم قادر است ماهواره را در انجام مأموریت خود، تثبیت کند. علاوه بر این، بازوی دوم نیز باعث انعطاف‌پذیری سیستم می‌شود زیرا با همکاری بازوی دیگر یک کار دشوار را انجام می‌دهد [۳۲، ۳۳]. نمونه‌هایی در زمینه گرفتن چندبازویی در ادامه نشان داده شده است.

• پروژه دارپا با استفاده از دو بازوی رباتیک فرند

دارپا^{۶۴} پروژه‌ای با نام اختصاری فرند^{۶۵} با توانایی نمایش موارد نزدیک را با هدف ایجاد یک قابلیت اتصال کاملاً مستقل جهت

65. Front-end Robotics Enabling Near-term Demonstration (FREND)
66. Asteroid Redirect Mission (ARM)
67. Near-Earth Asteroid (NEA)

60. Mars Exploration Rovers
61. Phoenix Lander
62. Space Station and Space Shuttle
63. Multiple Arms
64. DARPA

ارقام فیزیکی هنگام گرفتن نیست. نمونه‌هایی از پروژه‌های در حال پژوهش در مدل گرفتن با تور، در اینجا توضیح داده می‌شود.

• پروژه رُچر

سازمان فضایی اروپا^{۷۴} از پروژه برگرداندن مدار ژئو رباتیکی^{۷۵} پشتیبانی کرده است. هدف از این پروژه انتقال زباله‌های فضایی به عنوان هدف به داخل مدار قبرستان است. آن‌ها دو طرح را برای مجری‌نهایی در نظر گرفته‌اند، یکی مکانیزم گیره‌ای که به صورت چنگک عمل می‌کند و دیگری به صورت یک تور است که می‌تواند گسترده شود [۳۷].



شکل ۱۵- پروژه رُچر [۳۷]

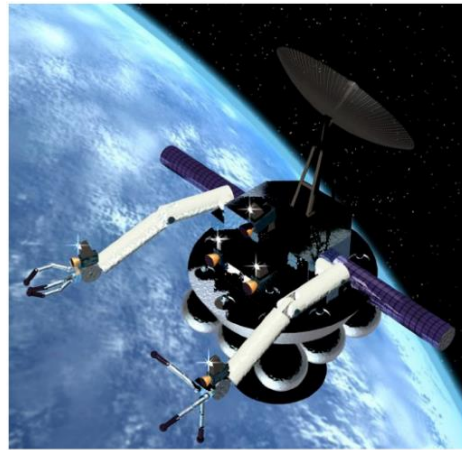
مکانیزم گرفتن با استفاده از تور از چهار وزنه پروازی در هر گوشه تور تشکیل شده است. وزنه پرنده همیشه گلوله^{۷۶} نامیده می‌شود، که توسط سیستم فنر شلیک می‌شود، به نام تفنگ تور^{۷۷} این چهار گلوله به گسترش تور بزرگ کمک می‌کنند.

• پروژه‌های دی آر بیت

سازمان فضایی اروپا همچنین پروژه ای.دی.آر.بیت^{۷۸} را در پیش گرفته است. این شاید اولین نمایش مأموریت زباله‌های فضایی فعال در پرواز باشد. روش گرفتن با تور یکی از چندین ایده‌های ای.دی.آر.بیت^{۷۹} است که در پروژه پیشنهاد شده است. اصل گرفتن با استفاده از تور در این پروژه مشابه پروژه رُچر است. شبیه‌سازی با پارامترهای مختلف از جمله موقعیت نسبی، چرخش، طول طناب، سختی اتصال و سایر ویژگی‌های دینامیکی یک تور را توصیف می‌کند. آزمایش‌های پروازی توسط جی.ام.وی^{۸۰} و ای.اس.ای^{۸۱} برای تأیید شبیه‌سازی استقرار و گرفتن با تور انجام شده است [۳۸].

• پروژه سیستم حرکتی تله‌رباتیک پیشرفته (اطلس)

سیستم راه‌اندازی و حرکتی پیشرفته کنترل از راه دور با استفاده از رباتیک (تله‌رباتیک^{۶۸}) با نام اطلس^{۶۹} برنامه‌ای از انگلستان، شامل دو بازوی رباتیک است که از طریق زمین از راه دور کنترل می‌شوند [۳۵]. آنها بیان داشته‌اند که از چند بازویی می‌توان در امورات فضایی همچون مونتاژ رباتیک یک ساختار فضایی، کار سوخت‌گیری رباتیک و جمع‌آوری و حذف زباله‌های فضایی استفاده کرد [۳۶].



شکل ۱۴- پروژه اطلس [۳۵]

۲.۲.۲ روش‌های اتصال منعطف

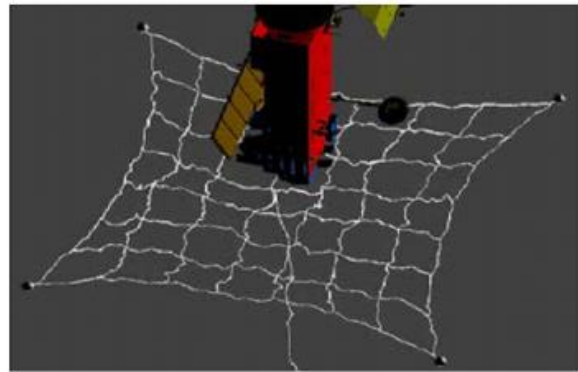
برای گرفتن شاخکی و گرفتن با استفاده از بازوی ماهر رباتیک، اتصالات بین ماهواره‌ی تعقیب‌کننده و هدف، سخت و صلب می‌باشد. که خود می‌تواند ترکیبی از کنترل‌پذیری و پایداری باشد. به هر حال جرم و حجم به طور چشمگیری در حال افزایش است. برای غلبه بر این عیوب، روش‌های انعطاف‌پذیر گرفتن زباله‌های فضایی^{۷۰} پیشنهاد می‌گردد که خود به چهار نوع گرفتن و جمع‌آوری، تقسیم می‌گردد.

الف- جمع‌آوری با استفاده از تور

در اینجا همانند آنچه در جمع‌آوری زباله‌های فضایی در قبل گفته شد، هدف، گرفتن و جمع‌آوری زباله‌های فضایی با کم‌ترین هزینه و بیش‌ترین کارایی است. مجری‌نهایی^{۷۱} در اینجا در واقع یک تور^{۷۲} می‌باشد و رابط این تور با ماهواره تعقیب‌کننده یک رابط طنابی^{۷۳} است. در این روش نیازی به دانستن جرم، اینرسی و سایر

75. Robotic Geostationary Orbit Restorer (ROGER)
76. Bullet
77. Net Gun
78. E. Deorbit
79. ADR
80. GMV
81. ESA

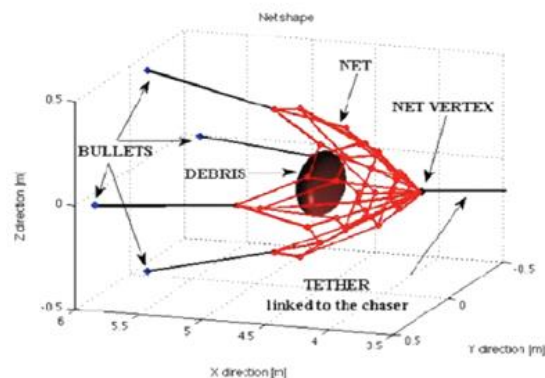
68. Telerobotic
69. ATLAS
70. Flexible Connection Capturing
71. End Effector
72. Net
73. Tether
74. ESA



شکل ۱۶- پروژه ای. دی اربیت [۳۸]

• پروژه دی. کُنه

در پُلّی-می-دیا^{۸۲} پروژه‌ای به نام تور جمع‌آوری زباله‌ها با نام دی.کُنه^{۸۳} ساخته شده است. تور به عنوان سیستم زنجیر-جرمی در شبیه‌ساز مدل‌سازی شده است و چندین آزمایش روی زمین با جرم‌های گلوله‌ای متفاوت و فشار گاز انجام شده است و نتیجه گرفته شده است که وقتی سرعت اولیه به اندازه کافی بالا است، می‌توان از نیروی جاذبه صرف نظر کرد [۳۹].

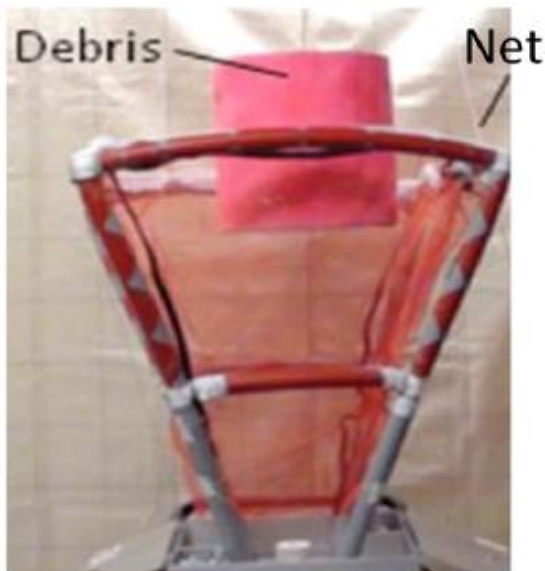


شکل ۱۷- پروژه [۳۹]

• پروژه ردکُرک

دانشگاه کلرادو در بولدر یک ایده برای تحقیق و توسعه تور، در گرفتن و حذف شلوعی مداری، به نام ردکُرک^{۸۴} ارائه داده است. سیستم ردکُرک از ساختار تیر کوچک بادی و تورهایی که در یک سمت تنظیم شده‌اند، تشکیل شده

است. مکانیسم گرفتن با تور در پروژه ردکُرک همراه با گُلد^{۸۵} کار می‌کند. با استفاده از این مکانیسم گرفتن نیازی به سیستم پیش‌رانه نیست. ابعاد و اندازه‌های هدف از یک جسم به عنوان زباله‌های فضایی در این پروژه ۳۰ سانتی‌متر قطر دارد و کل سیستم را می‌توان هنگام انتخاب زباله‌های بزرگ‌تر مقیاس بندی کرد [۴۰].



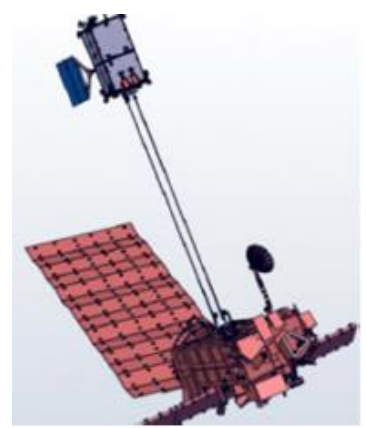
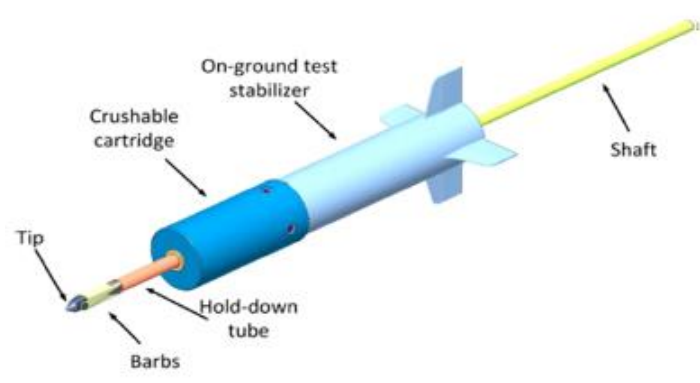
شکل ۱۸- پروژه ردکُرک [۴۰]

ب- جمع‌آوری با روش مکانیسم هارپون

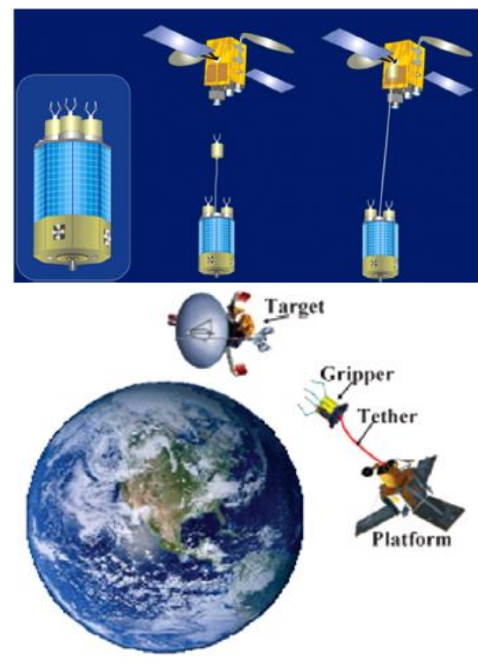
روش گرفتن هارپون^{۸۶} یک ایده از ای.دی اربیت^{۸۷} است. یک مکانیسم هارپون با نوک پیکان‌دار^{۸۸} خود می‌تواند در زباله‌های فضایی بزرگ به راحتی نفوذ کند. این روش به عنوان یک روش جذاب در نظر گرفته می‌شود چرا که این روش از گرفتن، سازگاری^{۸۹} بالایی با انواع مختلف زباله-های فضایی از نظر شکل دارد، فاصله مناسب و مطمئن را داراست و نیازی به نقطه گرفتن ندارد. اما از آنجا که نفوذ، در این روش رخ می‌دهد، ریسک تولید و به‌وجود آمدن دوباره زباله‌های فضایی تقریباً بالاست. با این وجود این روش برای هدف با نرخ غلتیدن بالا، عملی نیست. یک سیستم گرفتن^{۹۰} توسط آستریوم^{۹۱} پیشنهاد شده است (شکل ۱۹).

87. E. Deorbit
88. Barbs
89. Capability
90. Grappling System (GS)
91. Astrium

82. Politecnico di Milano Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale (PoliMi-DIA)
83. D-CoNe
84. REDCROC
85. GOLD
86. Harpoon Capturing



شکل ۱۹- هارپون [۴۱]



شکل ۲۰- مکانیزم انبر طنابی [۳۷، ۴۴]

تعدادی آزمایش و تست بر روی زمین انجام شده است. در این آزمایشات، تکه‌های کوچکی از پرتاب هارپون به سمت زباله‌های فضایی به‌وجود آمده است. در واقع اندازه‌های مختلفی از تکه‌های زباله‌های فضایی با زاویه‌های متفاوت پرتاب به سمت صفحه آلومینیومی صاف نیز به‌وجود می‌آید. از آنجا که این تکه‌های کوچک به‌وجود آمده باز هم در کنار همان زباله‌های فضایی، باقی می‌مانند، مجریان این طرح معتقدند که مشکل خاصی^{۹۲} نمی‌تواند باشد. که با بررسی‌ها و توافق با روش گرفتن با استفاده از تور که توسط انجمن فضایی اروپا دنبال می‌شود، به این نتیجه رسیده شد که مکانیزم هارپون به نمره بالاتری دست پیدا کرده است، چرا که این روش دارای بازدهی هزینه‌ای و سطح آمادگی تکنولوژی^{۹۳} بالاتری است. با این وجود روش گرفتن با تور، دارای عملکرد بهتر و محدودیت فیزیکی کمتری نسبت به هارپون است. روش هارپون هنوز هم توسط انجمن فضایی اروپا بخاطر راحت‌تر بودن در تست‌های زمینی، پیشنهاد می‌گردد [۴۱].

د- جمع‌آوری با روش مکانیزم انبر-طنابی

مفهوم انبر طنابی^{۹۴} استفاده شده در فضا، اولین بار در دهه ۱۹۶۰ با ایده آسانسور فضایی که توسط برج ایفل ساخته شده است ارائه شد [۴۲]. این یک بحث گسترده در مورد مواد موجود بود، که تا زمان کشف نانولوله کربن در سال ۱۹۹۱ غیرممکن تلقی می‌شد [۴۳]. با توسعه فن‌آوری فضایی، بسیاری از مفاهیم فضایی و/یا مأموریت‌ها با استفاده از ربات‌های فضایی گره خورده است، مانند انتقال بار بین وسایل فضایی، جمع‌آوری زباله‌های فضایی، تحقیقات جوی بالادستی و تحقیقات میدان ژئومغناطیسی، پیشنهاد یا اجرا شده‌اند. انبر طنابی مکانیزم دیگری است که علاوه بر تور در رچر معرفی شده است [۴۴].

اصل مکانیزم انبر طنابی^{۹۵} مشابه مکانیزم گرفتن با استفاده از تور است. مجری نهایی در مکانیزم انبر گیرنده به عنوان انبر ۳ انگشتی برای گرفتن هدف شلیک می‌شود. انبر ۳ انگشتی به گونه‌ای طراحی شده است که می‌تواند قسمت خاصی از هدف را به طور دقیق و پایدار بدست آورد که منجر به سخت‌تر و پیچیده‌تر الزامات برای مکانیزم انبر طناب نسبت به گرفتن و جمع‌آوری با استفاده از تور در حال کار می‌شود [۳۷، ۴۴]. هوانگ^{۹۶} یک سیستم مجهز به انبر طنابی به نام ربات فضایی مجهز به طناب^{۹۷} را پیشنهاد کرد [۴۴] همچنین او ربات فضایی گیرنده را برای حذف زباله‌های فعال در

95. Tether-gripper mechanism
96. Huang
97. Tethered Space Robot (TSR)

92. Fatal Issue
93. Technology Readiness Level (TRL)
94. Tether

که شامل برآورد جرم ناهنجار در زمان پس از گرفتن هدف، طرح تخمین جرم در مرحله اول بازیابی و برآورد اینرسی و جبران در مرحله میانی بازیابی است [۵۲]. هنگامی که ماهواره تعقیب کننده با هدف حرکت می‌کند تا با استفاده از سیستم اتصال مجدد دوباره وارد شود، اگر حرکت نامناسب انجام شود، برخورد بین ماهواره تعقیب کننده و هدف خطرناک است. پارامترهایی مانند خصوصیات فیزیکی اتصال دهنده به اینترنت، اینرسی هدف، نیروی کشش اتصال دهنده و شرایط اولیه بر ورود مجدد تأثیر می‌گذارد [۵۳]. بر اساس جستجوی انجام شده از آسانو^{۱۰} اتصال ثابت باید تمام مدت باشد تا اطمینان حاصل شود که یک حمل و نقل ایمن در هنگام ورود مجدد انجام می‌شود و بردار نیروی ماهواره تعقیب کننده باید با جهت اتصال اتصال همزمان باشد. با این حال، قابلیت اطمینان گرفتن گیرنده ابا افسار و اثر تماس بین گیرنده و هدف به اندازه کافی شناخته شده است. انتظار می‌رود تحقیقات بیش تری در رابطه با این موضوع انجام شود.

۳ مزایا و معایب روش‌های جمع‌آوری زباله‌های فضایی

تا به اینجای کار، روش‌های مختلف گرفتن و جمع‌آوری زباله‌های فضایی بطور کامل شرح داده شد و از هر روش، مثال‌های موجود عملی و آزمایشگاهی، آورده شد. همچنین مشخصات روش‌ها و نیازمندی‌های آنها نیز بیان گردید. جدول زیر، روش‌های گرفتن و جمع‌آوری زباله‌های فضایی را توضیح داده و مزایا و معایب آنها به صورت مقایسه‌ای در کنار هم نشان می‌دهد.

مناطق مختلف بررسی کرده است، که خود شامل فن‌آوری سروو تصویری^{۹۸} [۴۵]، مدار هماهنگ و کنترل وضعیت^{۹۹} [۴۷-۴۵]، کنترل پس از گرفتن و ثابت نگه‌داشتن مجموعه (هدف و گیرنده هدف) می‌باشد [۴۸]. وانگ^{۱۰۰} و هوانگ طرح جدیدی را برای تحقق این امر با تنظیم موقعیت نقطه اتصال و استفاده از رانش‌گرها ایجاد کرده‌اند. مسیر بهینه برای رسیدن به یک هدف بر اساس ضربه سرعت به ترتیب با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط^{۱۰۱} و روش طیفی شبه گاوس بهبود یافته است [۴۹]. مینگ^{۱۰۲} و هوانگ همچنین یک مدل نزدیک شده^{۱۰۳} و دو کنترل کننده برای ملاقات از نزدیک ارائه داده‌اند که یکی از آنها کنترل کننده حلقه باز بهینه و دیگری کنترل کننده بازخورد است [۵۰]. کنترل وضعیت پس از گرفتن نیز چالش برانگیز است زیرا حرکت سیستم ترکیبی (ماهواره تعقیب کننده و هدف) قابل پیش‌بینی نیست. در مرجع [۵۱]، یک کنترل کننده هماهنگ متشکل از دو کنترل کننده، طراحی شده است. این دو کنترل کننده را می‌توان تحت شرایط سوئیچینگ بهینه‌سازی شده برای کاهش مصرف سوخت روشن کرد. بر اساس شبیه‌سازی‌ها، حرکت‌های یا^{۱۰۴} و پیچ^{۱۰۵} سرعت همگرایی بیش تری نسبت به حرکت رول^{۱۰۶} دارند زیرا می‌توان گشتاور بیش تری از کشش طناب‌ها بدست آورد [۴۸]. علاوه بر این، ترکیب ربات و هدف فضایی که به صورت طناب شده‌اند و درحال غلتیدن هستند می‌تواند توسط این کنترل کننده نیز تثبیت شود. قبل از مرحله تغییر مداری، برآورد پارامترها، مانند پارامترهای جرم و اینرسی، از یک هدف نامشخص یک گام اساسی برای اطمینان از قابلیت کنترل است. ژانگ^{۱۰۷} طرحی از برآورد پارامترهای اینرسی را با استفاده از نیروی انبر طنابی معرفی می‌کند

جدول ۱- روش‌های گرفتن و جمع‌آوری زباله‌های فضایی

روش‌های جمع‌آوری	مزایا	معایب	مثال‌ها	کارفرما / ارائه‌دهنده
کُشنده گرانشی	۱- سازگاری با اندازه‌های بزرگ هدف ۲- نیازی به نقطه گرفتن نیست	۱- نیاز به محاسبه زمان باقی‌مانده جهت امکان پذیر بودن روش ۲- سخت بودن تست زمینی ۳- نیاز به ملاقات از نزدیک	ARM (Asteroid Redirect Mission)	NASA
کُشنده الکترواستاتیک	۱- سازگاری با اندازه‌های بزرگ هدف ۲- نیازی به نقطه گرفتن نیست ۳- داشتن فاصله زیاد تا هدف	۱- نیاز به محاسبه زمان باقی‌مانده جهت امکان پذیر بودن روش ۲- جرم و هزینه بیش تر نسبت به کُشنده الکترواستاتیک ۳- نیاز به پرتابگر الکترون و تعیین انرژی موردنیاز	Concept	USA-Colorado

104. Yaw
105. Pitch
106. Roll
107. Zhang
108. Aslanov

98. Visual servoing technology
99. Coordinated orbit and attitude control
100. Wang
101. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-2)
102. Meng
103. Approaching Model

ESA Aviospace Japan USA	e. Deorbit CADET TAKO OctArm	۱- مرحله ملاقات پیچیده ۲- احتمال جهش هدف ۳- دقت بالا برای تثبیت موقعیت و سرعت	۱- تشکیل مجموعه سخت ۲- تست آسان بر روی زمین ۳- سطح آمادگی فناوری بالاتر	شاخکی
DLR DLR USA-DARPA	DEOS EPOS FREND	۱- احتمال بیشتر برخورد ۲- نیاز به نقطه بر روی هدف جهت گرفتن ۳- نیاز به ملاقات از نزدیک و داشتن مسیر	۱- تشکیل مجموعه سخت ۲- تست آسان بر روی زمین ۳- سطح آمادگی فناوری بالاتر	تک‌بازوی ماهر رباتیک
UK USA-DARPA	ATLAS FREND	۱- سیستم کنترل پیچیده ۲- جرم و هزینه بیش‌تر ۳- نیاز به ملاقات از نزدیک	۱- تشکیل مجموعه سخت ۲- تست آسان بر روی زمین ۳- انعطاف در گرفتن	چندبازوی ماهر رباتیک
ESA ESA Italy USA- Colorado	ROGER e. Deorbit D-CoNe D-CoNe	۱- سخت بودن کنترل ۲- احتمال ایجاد نوسانات بحرانی ۳- سخت بودن تست زمینی	۱- داشتن فاصله زیاد تا هدف ۲- دقت کم‌تر موردنیاز ۳- سازگاری با اندازه‌های مختلف هدف	تور
ESA China	ROGER TSR	۱- نیاز به نقطه بر روی هدف جهت گرفتن ۲- قابلیت اطمینان کم‌تر ۳- سخت بودن تست زمینی	۱- داشتن فاصله زیاد تا هدف ۲- زمان موردنیاز کوتاه در گرفتن ۳- جرم و هزینه کم‌تر	انبر طنابی
Astrium ESA	GS e. Deorbit	۱- احتمال به‌وجود آوردن زباله فضایی ۲- احتما متلاشی شدن هدف ۳- سختی در پیش‌بینی حرکت هدف و نشانه‌گیری آن	۱- نیازی به نقطه گرفتن نیست ۲- داشتن فاصله ایمن تا هدف ۳- سازگار با انواع اهداف ۴- آسانی در تست زمینی	هارپون

فضایی دارد اما با سختی در کنترل و ایجاد نوسانات بحرانی مواجه است. بازوی رباتیک به عنوان دقیق‌ترین روش شناخته می‌شود و چون در کنار مأموریت گرفتن و جمع‌آوری زباله‌های فضایی، توانایی انجام خدمات در مأموریت‌های فضایی را دارا می‌باشد، بنابراین نسبت به هزینه صرف شده از راندمان عملیاتی بالای برخوردار است.

۵ مراجع

- [1] D. J. Kessler and B. G. Cour-Palais, "Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 83, no. A6, pp. 2637-2646, 1978.
- [2] N. S. Standard, "Guidelines and assessment procedures for limiting orbital debris," *NASA NSS*, vol. 1740, p. 14, 1995.
- [3] J.-C. Liou, "An active debris removal parametric study for LEO environment remediation," *Advances in Space Research*, vol. 47, no. 11, pp. 1865-1876, 2011.
- [4] T. D. Bess, "Mass distribution of orbiting man-made space debris," 1975.
- [5] J.-C. Liou, N. L. Johnson, and N. Hill, "Controlling the growth of future LEO debris populations with active debris removal," *Acta Astronautica*, vol. 66, no. 5-6, pp. 648-653, 2010.

۴ نتیجه‌گیری

با گذشت سه دهه ایده‌ها و روش‌های مختلفی برای جمع‌آوری زباله‌های فضایی توسعه یافته است. در این مقاله سعی شد تمامی روش‌های گرفتن و جمع‌آوری زباله‌های فضایی مورد بررسی قرار گیرد و مثال‌هایی از کارهای انجام گرفته بیان گردید. نیازمندی‌های هر کدام از روش‌ها و پیش‌بینی بهره‌برداری از آنها بررسی شد و مزایا و معایب هر یک در کنار هم مقایسه شد. همچنین بر چالش‌های مطرح در روش‌های گرفتن و جمع‌آوری زباله‌های فضایی نسبت به مأموریت‌های فضایی خدماتی متداول تأکید شد. به صورت کلی دو روش بدون تماسی و تماسی در گرفتن و جمع‌آوری زباله‌های فضایی مطرح شد. روش‌های بدون تماس از این نظر که نیازی به تماس فیزیکی با هدف و گرفتن از نزدیک را ندارند، در جمع‌آوری زباله‌های فضایی با اندازه‌های بزرگ‌تر مقرون به صرفه‌تر هستند. روش شاخکی نقاط مشترکی با روش‌های بازوی رباتیک داشته و در داشتن مجری نهایی متفاوت است. روش انبر طنابی هم در داشتن مجری نهایی با روش‌های بازوی رباتیک مشترک بوده اما در اتصالات متفاوت است. روش هارپون بسیار دقیق اما به جهت به‌وجود آمدن تکه‌های زباله فضایی، پر ریسک است. روش تور کم‌هزینه و سازگار با اندازه‌های مختلف زباله‌های

Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 2001, pp. 18-22.

[20] W. McMahan et al., "Field trials and testing of the OctArm continuum manipulator," in Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006., 2006: IEEE, pp. 2336-2341.

[21] I. S. Godage, D. T. Branson, E. Guglielmino, G. A. Medrano-Cerda, and D. G. Caldwell, "Shape function-based kinematics and dynamics for variable length continuum robotic arms," in 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011: IEEE, pp. 452-457.

[22] T. Kasai, M. Oda, and T. Suzuki, "Results of the ETS-7 Mission-Rendezvous docking and space robotics experiments," in Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 1999, vol. 440, p. 299.

[23] A. Kauderer, "NASA—Canadarm2 and the mobile servicing system," Internet: http://www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/elements/mss.html, 2008.

[24] D. A. Whelan, E. A. Adler, S. B. Wilson III, and G. M. Roesler Jr, "Darpa orbital express program: effecting a revolution in space-based systems," in Small Payloads in Space, 2000, vol. 4136: International Society for Optics and Photonics, pp. 48-56.

[25] A. Flores-Abad, O. Ma, K. Pham, and S. Ulrich, "A review of space robotics technologies for on-orbit servicing," Progress in Aerospace Sciences, vol. 68, pp. 1-26, 2014.

[26] D. Reintsema, J. Thaeter, A. Rathke, W. Naumann, P. Rank, and J. Sommer, "DEOS—the German robotics approach to secure and de-orbit malfunctioned satellites from low earth orbits," in Proceedings of the i-SAIRAS, 2010: Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) Japan, pp. 244-251.

[27] M. Zebenay, R. Lampariello, T. Boge, and D. Choukroun, "A new contact dynamics model tool for hardware-in-the-loop docking simulation," 2012.

[28] T. Boge, T. Wimmer, O. Ma, and M. Zebenay, "EPOS— A robotics-based hardware-in-the-loop simulator for simulating satellite RvD operations," 2010.

[29] M. Zebenay, "Development of a robotics-based satellites docking simulator," 2014.

[30] T. J. D. a. S. P. Dougherty² and Alliance Spacesystems, "Overview and Performance of the Front-End Robotics Enabling Near-Term Demonstration (FRIEND) Robotic Arm," 2009.

[31] T. Debus and S. Dougherty, "Overview and performance of the front-end robotics enabling near-term demonstration (FRIEND) robotic arm," in AIAA Infotech@ Aerospace Conference and AIAA Unmanned... Unlimited Conference, 2009, p. 1870.

[32] K. Yoshida, R. Kurazume, and Y. Umetani, "Dual arm coordination in space free-flying robot," in ICRA, 1991, pp. 2516-2521.

[6] C. Bonnal, J.-M. Ruault, and M.-C. Desjean, "Active debris removal: Recent progress and current trends," Acta Astronautica, vol. 85, pp. 51-60, 2013.

[7] J. Liou, "Modeling the large and small orbital debris populations for environment remediation," in 3rd European Workshop on Space Debris Modeling and Remediation, Paris, France, 2014.

[8] M. F. C. Wiedemann, M. Mockel, Activespacedebrisremoval, in: Deutscher and B. Luft- undRaumfahrtKongress, Germany “, Active space debris removal," 2012.

[9] J. L. N. VanderPas, C. Terhes, M. Bernabeu, W. Bauer, Targetselectionand, c. ofmissiondesignforspacedebrisremovalbydlr'sadvanc edstudy, and A. group, "Target selection and comparison of mission design for space debris removal," 2014.

[10] M. Shan, J. Guo, and E. Gill, "Review and comparison of active space debris capturing and removal methods," Progress in Aerospace Sciences, vol. 80, pp. 18-32, 2016.

[11] D. M. R. Daniel D. Mazanek (1), Joshua B. Hopkins (3), Darren W. Wade (4), Marco Tantardini (5), and Haijun Shen (6), "ENHANCED GRAVITY TRACTOR TECHNIQUE FOR PLANETARY DEFENSE," 4th IAA Planetary Defense Conference – PDC 201513-17 April 2015, Frascati, Roma, Italy, 2015.

[12] J. T. Olympio*, "Optimal Control of Gravity-Tractor Spacecraft for Asteroid Deflection," JOURNAL OF GUIDANCE, CONTROL, AND DYNAMICS, 2010.

[13] S. D. M. A. Alikhani¹*, I. Shafieenejad³, "Fault Tolerant Guidance of Under-Actuated Satellite Formation Flying Using Inter-Vehicle Coulomb Force," 2019.

[14] K. W. M. Bengtson (B), J. Hughes, and H. Schaub, "Survey of the electrostatic tractor research for reorbiting passive GEO space objects," Aerospace Engineering Sciences Department, University of Colorado Boulder, 431 UCB, Boulder, CO 80309, USA, 2018.

[15] R. Biesbroek, "The e. deorbit study in the concurrent design facility," in The CleanSpace: Workshop, Darmstadt, 2012.

[16] C. Saunders, A. Chiesa, J. Forshaw, B. Parreira, and R. Biesbroek, "Results of a system feasibility study on a heavy active debris removal mission," 2014.

[17] K. Wormnes et al., "ESA technologies for space debris remediation," in 6th European Conference on Space Debris, 2013, vol. 1: ESA Communications ESTEC Noordwijk, The Netherlands, pp. 1-8.

[18] A. Chiesa, F. Fossati, G. Gambacciani, and E. Pensavalle, "Enabling technologies for active space debris removal: The cadet project," in Space Safety is No Accident: Springer, 2015, pp. 29-38.

[19] K. Yoshida and H. Nakanishi, "The tako (target collaborativize) flyer: a new concept for future satellite servicing," in i-SAIRAS: Int. Symposium on

- [44] Y. Chen, R. Huang, X. Ren, L. He, and Y. He, "History of the tether concept and tether missions: a review," *International Scholarly Research Notices*, vol. 2013, 2013.
- [45] P. Huang, J. Cai, Z. Meng, Z. Hu, and D. Wang, "Novel method of monocular real-time feature point tracking for tethered space robots," *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 27, no. 6, p. 04014039, 2014.
- [46] D. Wang, P. Huang, and J. Cai, "Detumbling a tethered space robot-target combination using optimal control," in *2014 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology, 2014: IEEE*, pp. 453-456.
- [47] D. Wang, P. Huang, J. Cai, and Z. Meng, "Coordinated control of tethered space robot using mobile tether attachment point in approaching phase," *Advances in Space Research*, vol. 54, no. 6, pp. 1077-1091, 2014.
- [48] D. Wang, P. Huang, and Z. Meng, "Coordinated stabilization of tumbling targets using tethered space manipulators," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 51, no. 3, pp. 2420-2432, 2015.
- [49] P. Huang, X. Xu, and Z. Meng, "Optimal trajectory planning and coordinated tracking control method of tethered space robot based on velocity impulse," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 11, no. 9, p. 155, 2014.
- [50] Z. Meng and P. Huang, "Coordinated approach control method of tethered space robot system," in *2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013: IEEE*, pp. 1314-1318.
- [51] P. Huang, D. Wang, Z. Meng, and Z. Liu, "Post-capture attitude control for a tethered space robot-target combination system," *Robotica*, vol. 33, no. 4, p. 898, 2015.
- [52] F. Zhang, I. Sharf, A. Misra, and P. Huang, "On-line estimation of inertia parameters of space debris for its tether-assisted removal," *Acta astronautica*, vol. 107, pp. 150-162, 2015.
- [53] V. Aslanov and V. Yudinsev, "Dynamics of large space debris removal using tethered space tug," *Acta Astronautica*, vol. 91, pp. 149-156, 2013.
- [33] K. Yoshida and H. Nakanishi, "Impedance matching in capturing a satellite by a space robot," in *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No. 03CH37453), 2003, vol. 4: IEEE*, pp. 3059-3064.
- [34] P. M. Dr. Gordon Roesler and D. T. T. Office, "Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites (RSGS) Proposers Day," no. FRIEND, 2016.
- [35] A. Ellery, "A robotics perspective on human spaceflight," *Earth, Moon, and Planets*, vol. 87, no. 3, p. 173, 1999.
- [36] K. Yoshida, "Achievements in space robotics," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 16, no. 4, pp. 20-28, 2009.
- [37] B. Bischof, "ROGER-Robotic geostationary orbit restorer," in *54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law, 2003, p. IAA. 5.2. 08*.
- [38] C. Billot, S. Ferraris, R. Rembala, F. Cacciatore, A. Tomassini, and R. Biesbroek, "E. deorbit: feasibility study for an active debris removal," in *3rd European Workshop on Space Debris Modeling and Remediation, Paris, France, 2014*.
- [39] M. Lavagna, R. Armellini, R. Bombelli, and R. Benvenuto, "Debris removal mechanism based on tethered nets," in *Proceedings-International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space i-SAIRAS 2012, 4-6 September, Turin, Italy, 2012*.
- [40] N. Zinner et al., "Junk hunter: Autonomous rendezvous, capture, and de-orbit of orbital debris," in *AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition, 2011, p. 7292*.
- [41] J. Reed, J. Busquets, and C. White, "Grappling system for capturing heavy space debris," in *2nd European Workshop on Active Debris Removal, 2012: Centre National d'Etudes Spatiales Paris, France, pp. 18-19*.
- [42] V. Lvov, J. D. Issacs, H. Bradner, G. E. Backus, and A. C. Vine, "Sky-hook: Old idea," *Science*, vol. 158, no. 3803, pp. 946-947, 1967.
- [43] B. C. Edwards, "Design and deployment of a space elevator," *Acta Astronautica*, vol. 47, no. 10, pp. 735-744, 2000.