

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04396

研究課題名（和文）蔓植物を模倣した非協力的宇宙機捕獲のための絡付型超多自由度捕獲機構の研究

研究課題名（英文）A study of an super-multidegree-of-freedom capture mechanism for non-cooperative spacecraft capture that mimics a thigmotropism of vines.

研究代表者

中西 洋喜（Nakanishi, Hiroki）

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：90361120

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では既存スペースデブリを能動的に捕獲するための機構として、つる植物の接触屈性に着目したモジュラー型巻き付き機構を提案した。巻き付き機構を構成する単位モジュールはリンク、リンク回転軸、接触検知部から成り、単位モジュール同士を上積み重ねるように結合して、回転伸展していくことで植物の成長しながら伸展していく動作を再現し、捕獲対象の表面形状に沿わせながら巻き付き動作を実現した。また、捕獲対象を捕獲するための動作計画及びアルゴリズムを明らかにした。本機構について、実験及びシミュレーションにより捕獲対象の形状に沿って巻き付き把持が行えることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙デブリ（軌道上の使用済み衛星・ロケットおよびその残骸）の増加に伴う宇宙環境の悪化は加速度的に進んでおり、デブリの除去が急務となっているが、専用の被把持機構を持たないデブリの捕獲は今だ実現していない。デブリ全体を絡みつく捕獲手法は有望視されているものの一つだが、本研究は植物の動作を模倣した全く新しい絡みつき手法を提案し、実現するためのアルゴリズム、機構について明らかにするとともに、有効性を示した。本研究成果によりデブリ除去システムの新たな可能性を示すとともに、超多リンクでありながら非常にシンプルな動作アルゴリズムで動作するモジュラータイプのロボットアーム制御法研究へも寄与した。

研究成果の概要（英文）：In this research project, the research group proposed a modular type coiling mechanism that focuses on a thigmotropism of vines as a mechanism for actively capturing space debris. The unit module consists of a link with a joint and a contact detector. The capture mechanism consists of the unit modules. Each link rotates triggered by a contact force to mimic the coiling of a plant. The motion plan and algorithm for capturing the target were clarified. Then, a real capture mechanism is designed and developed a prototype. Experiments and simulations demonstrated that the mechanism is able to capture the target by wrapping around the free-flying target.

研究分野：宇宙工学，ロボット工学

キーワード：ロボット 宇宙 軌道上サービス 捕獲 蔓 接触屈性 スペースデブリ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙デブリ (軌道上の使用済み衛星・ロケットおよびその残骸) の増加に伴う宇宙環境の悪化は加速度的に進んでおり、運用中の衛星にデブリが衝突し、新たに大量のデブリが発生するという事故も起きている。近年の研究では、今後デブリを増加させないためには、既存のデブリを能動的に除去することが必須とされている。デブリの除去は危険かつ高コストな作業であり、宇宙ロボットを用いた作業の無人化が必須であるが、未だ実現していない。実現の大きな妨げとなっている課題の一つがデブリのような、専用被把持機構を持たず、運動しているターゲット (非協力ターゲットと呼ばれる) を安全に把持する技術の確立である。除去対象となるターゲットの大半は、把持できるような剛性を持つ突起等が少ない。また、反射光散乱の大きい金属蒸着断熱材に覆われていることが多く、レーザーや画像を用いた把持機構の突起部への誘導や把持開始のタイミング取りも困難である。これらの解決法の一つとして、詳細な位置合わせを必要としないターゲット全体を包み込む把持方法が有効であると考えられる。さらに包み込むだけではなく、ターゲットに対し、形状適応的に接触し把持を行うことにより、荷重集中を防ぎ対象を破壊することなく保持力を向上させることが期待される。このような捕獲・把持については、英国 Surrey 大学の RemoveDebris ミッション[文献 1]において、投網を用いた手法が提案されているが、地上では重力を利用して形状・運動をコントロールしている投網を微小重力環境下で制御することは困難であり、軌道上実験において捕獲に成功したものの、放出直後に投網が大きく変形し、ターゲットがかろうじて網の端部にかかる形となっており、捕獲法として確立したとは言い難い。



図 2 つる植物の巻き付き

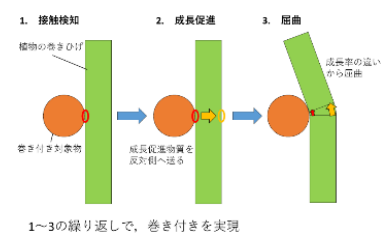


図 1 植物の接触屈性

研究代表者は、ターゲットへの接触前は従来のハンド型グリッパの様
に形が固定されるが、接触後に網の様なターゲットへ絡みつくと確実な保持を実現できるような捕獲機構を目指しており、これまでデブリ捕獲時に接触力を発生しつつも突き飛ばしを防ぎ、接触を維持する機械インピーダンス設計、及びターゲットに軽く押し付けるだけで把持動作をばね力により行う機構等について研究成果を得ていた。特に平成 28~30 年度に実施した科研費研究「コンベックスパネを応用した適応的スペースデブリ把持機構の研究」では、真直ぐ伸ばすとその状態が保持されるが、力を加え、樋状の断面を平面状にするとばね力を発揮して丸く巻き上がりターゲットを包むコンベックスパネの力学と設計法を明らかにし、把持機構への応用の可能性を示した。これは、センサや電気的な制御・アクチュエータを必要とせず、接触前の形状保持と接触後の囲い込みを実現可能とするものであるが、接触後にバネ全体が巻き上がるため、ターゲットへの十分な把持・固定を担保するものではなく、ターゲットが囲い込めない大きさの場合把持そのものが不可能であった。

本研究課題では、これを発展させ、当初の目的であるターゲットの絡みつきの実現可能な機構へ昇華することを目的とした。最小限の制御で対象形状に合わせた絡みつきの運動について、研究代表者は蔓植物の巻き付き動作より着想を得た。蔓植物は、蔓が支柱などに触れると接触した反対側の細胞が伸長し接触屈性を示すことにより絡みつきの実現している (図 1, 2)。関連する研究として、把持後にターゲットの形状に合わせて変形し、集中荷重を防ぐ機構として、広瀬のソフトグリッパ[文献 2]等が挙げられる。これらは、ワイヤ・プーリー系や、空圧アクチュエータと多関節機構の組合わせで、上記の運動を実現しているが、機構の各関節はあらかじめ一定トルクで駆動されており、接触部の検知し、その部分から絡みつくななどの機能は無い。また、本研究で把持機構の参考とする植物の蔓については、斉藤らによりその運動メカニズムのモデル化がなされている[文献 3]他、Kanik ら[文献 4]は、複数種の繊維の組合わせにより植物の巻きひげのらせん生成を再現している。しかしこれらは、申請者が求める物体を絡めとる動作を実現するものではない。本研究課題は、多関節型把持機構と植物の巻きひげメカニズムの融合を図り、宇宙用として実用化を目指すという点において、上記研究の空白を埋める新たな研究テーマとなっている。

[文献 1] Forshaw, Jason L, Guglielmo SAglietti, NimalNavarathinam et al. (2016) “RemoveDE-BRIS: An in-orbit active debris removal demonstration mission,” Acta Astronautica,
[文献 2] 広瀬 ”任意形状物体を柔軟に把握する機構の開発,” ロボット(日本産業用ロボット工業会編), 13, pp. 76-80, 1977

[文献 3] 齊藤, ”折紙の数理と生物模倣に基づく先進構造材料の開発に関する研究,” 折り紙の科学, 巻: 6 pp. 32-35

[文献 4] Mehmet Kanik et. al., “Strain-programmable fiber-based artificial muscle,” Science 12 Jul 2019: Vol. 365, Issue 6449, pp. 145-150

2. 研究の目的

本研究では、つる植物の接触屈性を参考にスペースデブリを始めとした、軌道上を浮遊する非協力ターゲットの捕獲を可能とする、ターゲットの形状に対し適応的に絡みつく捕獲・把持機構の力学及び設計法を明らかにすることを目的とした。接触の検知と屈曲という2つの動作の繰り返しのみにより、棒や板、網といった様々な形状に対して適応的に把持が行える機構を実現する。しかし植物の絡みつき対象は支持棒や壁など固定されたもののみであり、スペースデブリのような浮遊ターゲットを対象とする絡みつき動作を実現するには、以下の要素が不足している。

- 浮遊ターゲットを捕獲に適した絡みつきの力学と運動
- 理想的な絡みつき動作を実現するための力学・機構
- 宇宙機のパッケージとしての設計法

従って本研究課題では、上記の3つの問いについて明らかにすることを具体的な研究目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、前述の研究要素についてそれぞれ下記のアプローチで研究を実施した。

課題 1. 浮遊ターゲットを捕獲に適した絡みつきの力学と運動

まず、申請者が過去の研究で得ている浮遊ターゲットと接触を保つための力学条件を基に、提案する捕獲機構がターゲットへの初期接触後に接触を保ちつつ絡みつきを進めるための設計要求を明らかにした。植物の接触屈性を基に捕獲機構の動作アルゴリズムとその実現手法の確率を目指した。研究方法としては、まず、簡単な数値力学モデルを作成し、数値シミュレーションにより各力学パラメータを変えつつ浮遊物体捕獲に適した運動および、支配的となる力学パラメータを同定し、設計の核となる要素を明らかにすることとした。

課題 2. 理想的な絡みつき動作を実現するための力学・機構

課題 1. で同定した理想の捕獲動作について、これを実現可能な機構について、実際に試作を行いながら設計を行った。アクチュエータおよびセンサとして、申請者の前科研究費研究成果であるコンベックスパネを中心に、適切な力学特性、サイズ、配置法を検討した。また、これと組み合わせるべき機械構造については、シンプルな多関節リンクを中心に、申請者の研究成果の一つであるモーフアブルビーム（水道配管や電気スタンドの構造材として使用されている超多自由度変形部材。外力が一定以下の場合形状を保持し、それ以上の外力が加わると塑性状の変形を行う）やコンベックスばねとの組み合わせも含め検討を行った。機構設計の妥当性確認には数値シミュレーションおよび空気浮上テストベッドを用いた2次元微小重力模擬実験を行った。

課題 3. 宇宙機のパッケージとしての設計法の確立

課題 2. で明らかにした基本設計を基に、実用化に向けた実際の宇宙ミッションに耐えうる機構としての設計を明らかにする。本機構は、スペースデブリの捕獲のみならず、宇宙機の建設・補給等にも応用が可能であると考えており、これら想定される環境・ターゲットから設計要求をまとめ、これに合わせた設計手法とパッケージを検討する。また、つる植物の様に一軸方向に巻き上がる動作のみならず、箱状の物体を多方向に絡みついていくための発展手法についても検討を行った。

4. 研究成果

研究実施期間各年度における研究成果について以下にまとめる。

令和2年度は、本研究の1年目の課題としていた、浮遊ターゲット捕獲に適した絡みつきの力学と運動についての検討を実施した。植物の巻き付き原理である接触屈性についての理解を深め、これをスペースデブリ把持に応用するためのアルゴリズムおよび機構の基本構成について明らかにした(図3)。研究代表者は、植物の接触屈性は各細胞が刺激に対応して独自に成長することにより巻き付きを発現していることから、接触屈性を実現するアルゴリズムは群ロボットとの相性が良いことに着目し、スペースデブリに絡みつく多関節アームの各リンクを独立制御されるモジュラーロボットとし(図4)、デブリの大きさに合わせ容易に構成を変えられるシステムを提案した。本シス

テムは、接触センサとアクチュエータを搭載した同形状のモジュラーリンクを連結して構成され、各リンクは自身及び、隣接リンクの接触情報のみを用いて独立に運動を行うことにより、全体的な巻き付き動作をデザインせずともターゲットの形状に合わせて巻き付きを実現している。数値シミュレーションにより、本システムが植物の蔓の成長および接触屈性による巻き付き特性を持ち、浮遊しているターゲットに対して初期接触を与えるだけで、巻き付き把持を実現しうることを示した。さらに、ターゲットの形状と各リンク（モジュール）の形状が把持の可否に与える影響について明らかにし、機構設計の指針を示した。

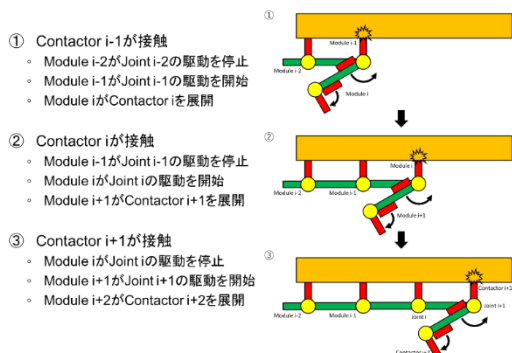


図 3 巻き付き動作のアルゴリズム

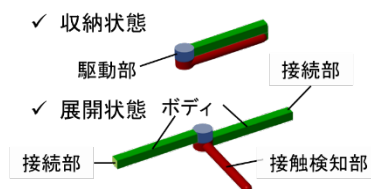


図 4 巻き付き機構の単位モジュール

令和 3 年度は、前年度の成果として得られた、接触屈性を応用した適応的巻き付きアルゴリズムおよび力学を基に、具体的な把持機構の設計について着手した。まず、前年度成果をベースとしたモジュラー型リンク機構設計について検討を行い、具体的なアクチュエータやセンサの選定、配置、およびこれらと組み合わせるべき機械構造について、1アクチュエータ、1センサと特殊な歯車構成により、展開と把持動作を両立可能な設計を明らかにし、提案するアルゴリズムおよび把持の基本コンセプトは把持機構として実現可能であることを示した(図5)。剛体リンクを用いた設計の他、研究代表者の研究対象としているコンベックスばねやモーフアブルビーム等の応用についても検討を進めたが、単純な剛体リンクによる機構が最も良好な結果が得られた。機構の有効性について確認を行うため、力学シミュレーションおよび空気浮上実験装置を用いた2次元微小重力環境模擬実験により、様々なターゲットに対する捕獲検証を実施した。検討の結果、単体の巻き付き機構では、典型的なスペースデブリ形状（円筒、箱型）に合わせて巻き付きが可能であることが確認された一方、相対角速度を持つターゲットに対し把持が困難であることを確認した。これらに対応するため、複数の巻き付き機構、または、途中で分岐する巻き付き機構等、モジュラーリンクの構成についての検討を実施した。

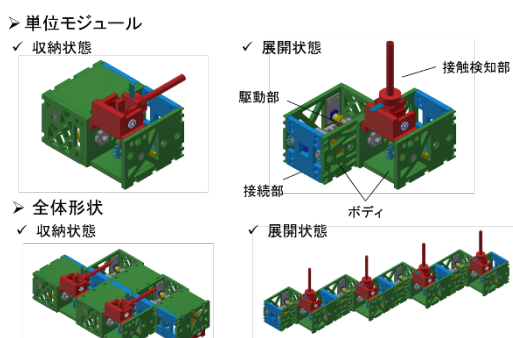


図 5 把持機構の詳細設計

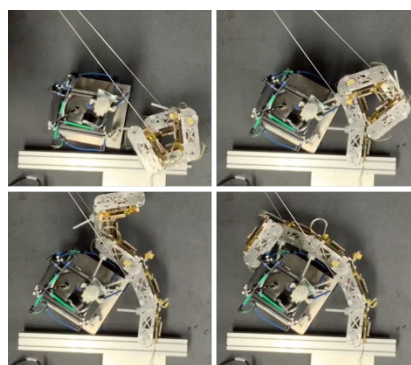


図 6 空気浮上装置による2次元微小重力環境下における浮遊ターゲット捕獲実験

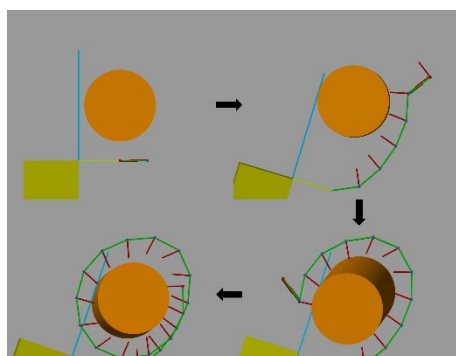


図 7 様々なデブリ形状に合わせた捕獲シミュレーション（円筒ターゲット）

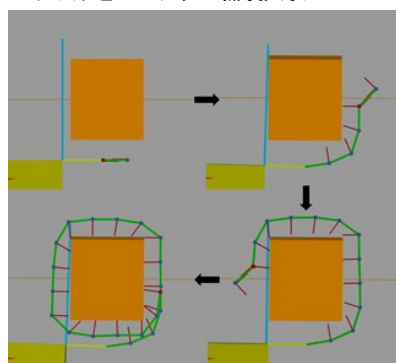


図 8 様々なデブリ形状に合わせた捕獲シミュレーション（箱型ターゲット）

令和4年度は、これまで一方向に限定していた巻き付きについて3次元に拡張し、ターゲットを絡めとるような動きの実現方法について提案し、スペースデブリ捕獲機構としてのシステム構成を明らかにするとともに本研究課題の総括を行った。前年度までの1種類のモジュラーリンクのみで構成される機構とアルゴリズムでは、棒状の物体に絡みついでいく蔓の動作は再現できていたが、一軸の巻き付きのみではスペースデブリを完全拘束したことにはならず、スペースデブリ捕獲としては課題を残していた。これを解決するため、複数本の巻き付き機構を使用した捕獲システムについて検討を行い、数値シミュレーションを通じて対象の形状に適応したアームの本数や形状の選択法について明らかにした。さらに、形状や回転軸の異なるモジュラーリンクの導入により対象形状に合わせ巻き付き方向を変更することや複数本に分岐させる構成を軌道上で再構成することを可能とするとともに、動作アルゴリズムについても捕獲対象に巻き付くのみならず、3次元的に絡めとるような動作を実現する手法を明らかにした(図9)。これらの機構について前年度の成果として得られた把持機構の設計法に加え、上記の接続機構の試作を行い機構とアルゴリズムの有効性を実験的にも確認した。さらにそこで得られた知見を基にさらなる機構の簡略化およびメンテナンス性の向上を実現する設計を明らかにすることが出来た。

以上、本研究課題では既存スペースデブリを能動的に捕獲するための機構として、つる植物の接触屈性に着目したモジュラー型巻き付き機構を提案した。巻き付き機構の要求を整理し、巻き付き機構の概念設計を行った。巻き付き機構を構成する単位モジュールはリンク、リンク回転軸、接触検知部から成り、単位モジュール同士を上積み重ねるように結合して、回転伸展していくことで植物の成長しながら伸展していく動作を再現した。そうすることで、従来の捕獲手法で課題となっていた捕獲対象の表面形状に沿わせながら巻き付く動作を実現できる機構の設計を行った。また、捕獲対象を捕獲するための動作要求を示し、動作計画を立てた。その動作計画を実現できるように機構を構成する各モジュールの動作アルゴリズムを示した。最後に、これまでに設計した巻き付き機構を用いて、シミュレーション上で想定した捕獲動作が行われるかどうかを確認し、捕獲対象の形状に沿って巻き付き把持が行えることを示した。

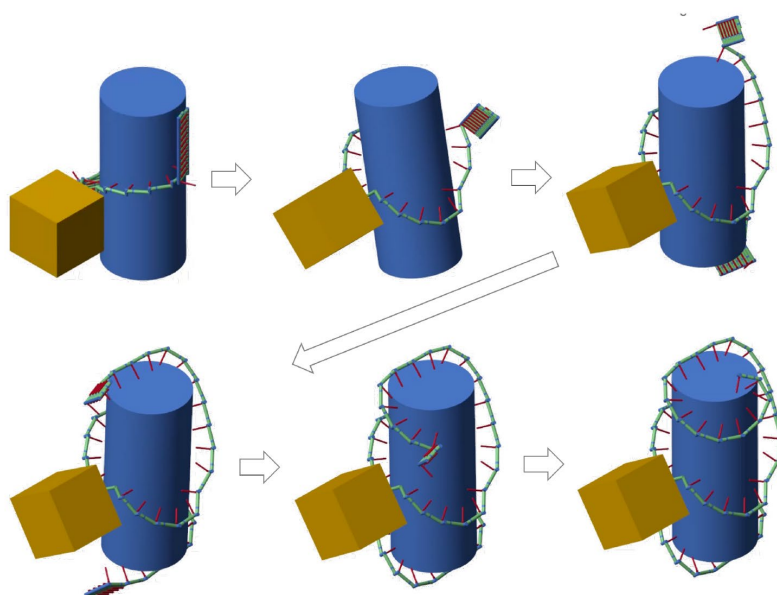


図9 複数の回転軸方向をもつモジュールにより構成された捕獲機構による浮遊物体に対する絡みつき動作のシミュレーション

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中西洋喜, 川口直毅, 林輝明, 鷲優希, 橋本拓哉, 増田雄斗
2. 発表標題 ADR作業の為に非協力的ターゲット捕獲・把持機構の検討
3. 学会等名 JAXA第9回スペースデブリワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林輝明, 中西洋喜
2. 発表標題 軌道上非協力物体捕獲のための接触屈性を応用した 適応的巻き付き機構の検討
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林輝明, 中西洋喜
2. 発表標題 接触検知型適応的巻き付きデバイスの研究
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋健一郎, 林輝明, 中西洋喜
2. 発表標題 軌道上非協力物体捕獲のための接触屈性を応用した適応的巻き付き機構の設計に関する研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中西洋喜, 高橋健一郎, 川口直毅, 橋本拓哉, 徳安彰大
2. 発表標題 非協力的ターゲット捕獲・把持機構の検討
3. 学会等名 JAXA第10回スペースデブリワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenichiro Takahashi, Teruaki Hayashi, Hiroki Nakanishi
2. 発表標題 A Study of Adaptive Capture Mechanism Based on Thigmotropism of Vine for Capturing NonCooperative Target
3. 学会等名 34th International Symposium on Space Technology and Science
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	林 輝明 (Hayashi Teruaki)	東京工業大学・工学院機械系・大学院生 (12608)	
研究協力者	高橋 健一郎 (Takahashi Kenichiro)	東京工業大学・工学院機械系・大学院生 (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------