

令和元年6月13日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21033

研究課題名（和文）コンベックスバネを応用した適応的スペースデブリ把持機構の研究

研究課題名（英文）Dynamics analysis of gripper for space debris capture using convex spring

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）：本研究では、ロボットによるスペースデブリ捕獲の実現を目指し、電気アクチュエータ・センサを用いずともデブリとの初期接触を検知し自動的にこれを把持する機構について、ばね力を利用する手法について提案し、必要な力学・機構・設計法について明らかにした。特に、リストバンド等に用いられているコンベックスバネに着目し、これまで明らかにされていなかった同バネの力学特性について定式化し、自由に運動を設計する手法を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、これまで明らかにならなかったコンベックスバネの巻き付き運動が定式化され、バネの機械的特性と運動の関係が明らかになった。この知見は、コンベックスバネの運動を自由に設計することを可能とし、把持機構を始めとする様々な応用の道を開くものである。本研究により提案したスペースデブリ把持機構が実現すれば、喫緊の課題となっているスペースデブリの除去に向けた課題の一つが解決することとなり、人類の持続的な宇宙開発に大きく貢献できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, for capturing space debris by a robot, the researcher investigated a gripper mechanism that can automatically detects the initial contact with debris and capture it without using electric actuators and sensors. The necessary mechanics, mechanism and design method are clarified. In particular, focusing on the convex spring used in wristbands, the dynamics characteristics of the spring were formulated. Then the method of freely designing the motion of the spring for gripper was clarified.

研究分野：宇宙ロボティクス

キーワード：ロボット 宇宙工学 スペースデブリ コンベックスバネ 把持機構 人工衛星

1. 研究開始当初の背景

現在、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安全にデブリを把持する技術の確立である。スペースデブリの大半は、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デブリ全体を包み込む把持方法が有効であると考えられる。デブリの包み込み把持については、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、実現には至っていない。研究代表者は、過去に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、接触を維持する手法について研究成果を得ており、その応用先として軽く押し付けるだけで把持を完了できるような把持機構を模索している。その中で現在リストバンド等に利用されているコンベックスパネに着目している。コンベックスパネは楯状の板バネであり、真直ぐ伸ばすとその状態が保持されるが、力を加え、楯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る性質を持つ（図1）。この特性を利用し、デブリ全体を把持する（巻き付く）ことにより、デブリの形状によらず把持を達成できると考えられる（図2）。また、把持開始のタイミングも接触力がトリガとなるため、センサ類を用いた電気的な制御を必要とせず押し付けるだけで自動的に把持が完了するという利点がある。さらに膜や網の骨材として用いることにより、微小重力環境下においても、投網的な包み込み把持の実現が期待できる。但し、初期検討の中で、コンベックスパネがデブリに対して必ずしも接触部から順に巻き付いていくことを保証せず、先端から巻き上がり把持に失敗するケースが存在することが確認された。コンベックスパネの巻き付き運動について明らかにした研究例はこれまで無く、詳細な力学解析および設計法明らかにすることが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、スペースデブリの捕獲可能な機構を実現するためのコンベックスパネの動力学及び、設計法を明らかにすることを目的とする。研究期間内に、目的達成のために必要な以下の課題を解決する。第一に、様々なデブリに対する巻き付きや包み込み把持の運動評価等を行い、コンベックスパネや把持機構への設計要求を明らかにする。第二に、これらの要求を満たすコンベックスパネの力学を明らかにする。コンベックスパネは楯状断面が変形することによってバネ力による折れ曲がりが発現し、それが伝播していくことにより巻き付き状態となる。しかしそのダイナミクスは定式化されていないため、実験・数値モデルシミュレーション等を通じてこれを明らかにすると共に、デブリ把持に適した、巻き付き力および曲がり伝播特性を持つコンベックスパネを実現するための設計法を明らかにする。デブリに巻き付くのみならず、膜や網といった有効性が示唆されつつも形状のコントロールが困難なため実現されていなかった柔軟機構との組み合わせなどを検討し、より高機能なものを模索していく。

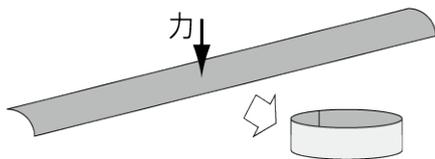


図1 コンベックスパネ

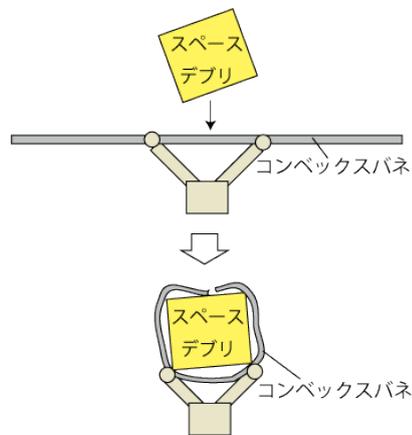


図2 コンベックスパネを用いたデブリ把持機構の基本コンセプト

3. 研究の方法

スペースデブリの形状に適した把持機構の基本構成の決定

把持機構の設計を行うに当たり、必要なスペックの策定を行う。基本的に想定しているデブリ把持戦略は、＜デブリへの接触→接触力をトリガとするコンベックスバネの作動＞→＜デブリへの巻き付きまたは包み込み＞→＜バネ力および接触部の摩擦によりデブリを固定＞、という流れである。これを実現するための接触力・形状・サイズ・把持力等の条件をいくつかの特徴的なスペースデブリを対象として同定する。検討に当たっては、簡易数値モデルによるシミュレーションや、市販品のコンベックスバネ、アルミ材、3Dプリンタ等を用いた模型実験を実施する。

コンベックスバネの力学解析

コンベックスバネは楕状断面が変形することによってバネ力による折れ曲がりが発現し、それが伝播していくことにより巻き付き状態となる。しかしそのダイナミクスは定式化されていないため、これを明らかにし、デブリ把持に適した、巻き付き力および曲がり伝播特性を持つコンベックスバネを実現する。複数種類のコンベックスバネを特注し、運動の高速動画撮影による観察を通じ、コンベックスバネ曲げ力の伝搬とバネのサイズや楕状構造の湾曲率との関係等について明らかにしていく。

4. 研究成果

平成 28 年度は、スペースデブリ把持機構の基本設計及び、コンベックスバネの力学解析を実施した。まず、スペースデブリ除去ミッションのシナリオの整理および、除去デバイス等の条件の整理を行い、開発すべき把持機構に対する要求について整理した。これに基づき、スペースデブリ把持に適した形状、サイズ、動作について検討を行った。本検討を基に、把持機構の基本的な構造設計を行い、コンベックスバネによる把持部の配置とこれに接触力を伝達して把持動作開始のトリガとなる初期接触部の形状・機構の設計を実施し、簡易機能モデルによる確認試験により有効性を確認した。特に初期接触部の形状については、実験結果より最適な形状を明らかにした。また、長大になるコンベックスバネの収納方法についてもねじり曲げにより巻き取りが可能であることを示し、打上時の搭載形状についても設計指針を示した。また、コンベックスバネ自身の動力学特性については、市販のコンベックスバネを用いて動作試験を実施し、購入したハイスピードカメラを用いて、その動作の観察を実施した。また、同バネを把持機構として用いた場合の把持力のモデル化を行い、板バネの力学モデルをベースとして新たなモデルを構築した。これらの知見を基に、コンピュータシミュレーションおよび、空気浮上実験装置と簡易把持機構モデルによる模擬微小重力実験を実施し、モデルの妥当性の検証を行い、良好な結果を得ることができた。(図 3)

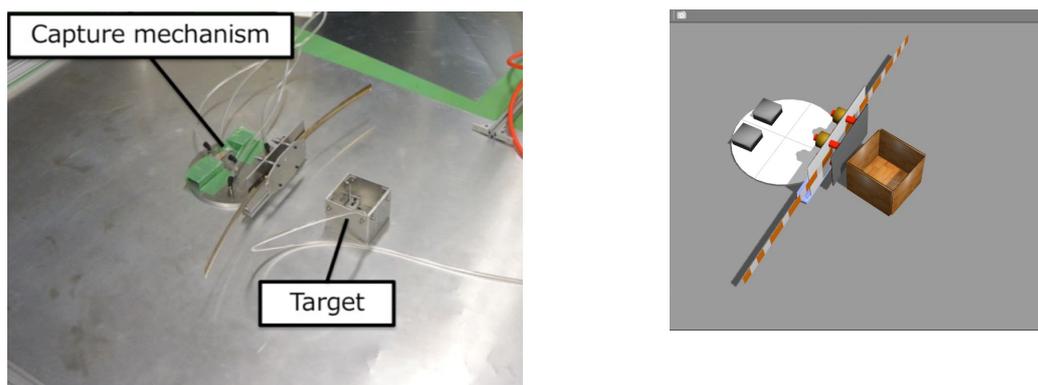


図 3 コンベックスバネを用いた把持機構プロトタイプ(左)及び、シミュレーションモデル(右)

平成 29 年度は、平成 28 年度に得られた知見をさらに発展させ、デブリ捕獲に適した動作を行うコンベックスバネの試作と把持機構の検討を実施した。28 年度ではコンベックスバネの把持力に対する力学特性の解析を実施したが、今年度はコンベックスバネの曲げ運動とコンベックス形状の関係および、デブリ把持に対して最適な把持力分布や曲げ動作の速度等の設計指針について実験を交えて検討を行った。数種の厚さ、楕状断面の曲率、長さのコンベックスバネを試作し、これらの変形動作をハイスピードカメラにより観察を行い、曲げ運動のモデル化を進めた(図 4, 図 5)。試作に当たり、異なる曲げ力が分布する高機能コンベックスバネについて、バネ製造業者へのヒアリング等を通じて、複数枚のコンベックスバネの重ね合わせで実現可能であることを明らかにした。また、実際のデブリ捕獲ミッションを想定した捕獲ターゲット、条件、および捕獲機構に対する要求について整理・検討を行い、これらの要求を満たす捕

獲機構について、一例としてばね力とリンク機構で実現できることを示し、試作・実験により良好な結果を得ることができた。本機構をコンベックスバネにより代替・簡略化する手法、および大型対象物の把持を見据えたバネの大型化、組み合わせ法について検討を実施した。さらに、超小型衛星 (CubeSat) を用いて本捕獲システムを軌道上で実証するために必要なミッションシナリオおよび実験プラットフォームとなるバスシステム等について検討を行った。本バスシステムの一部は2019年1月に打ち上げられた OrigamiSat-1 衛星のミッションとして検証される予定である。

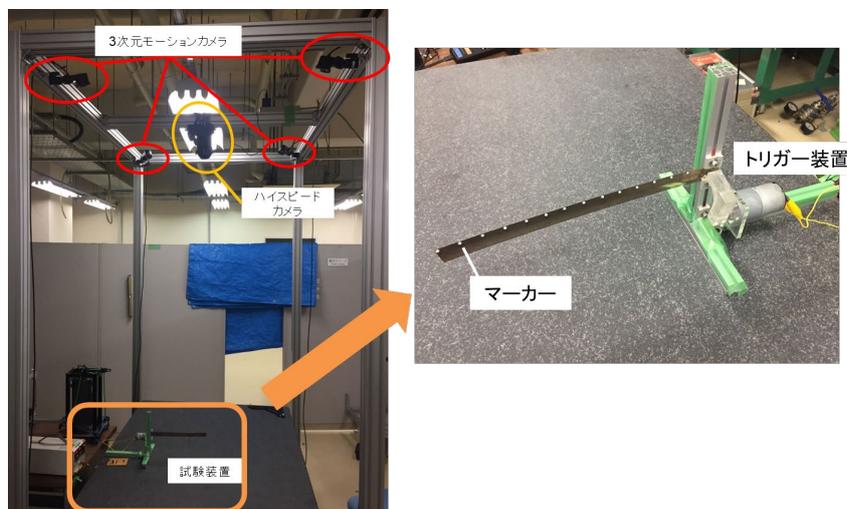


図4 コンベックスバネ計測用実験装置

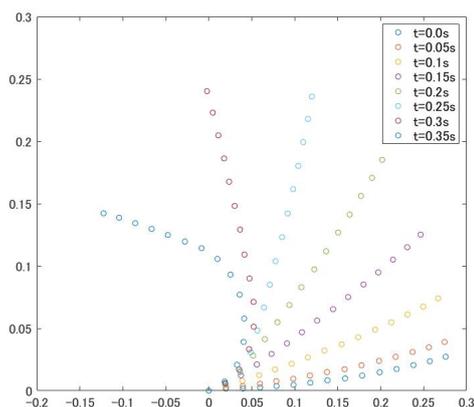


図5 コンベックスバネの巻き付き動作の計測例

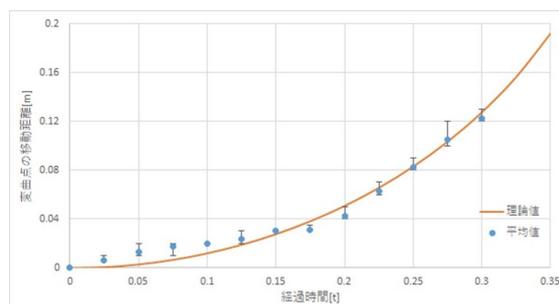


図6 バネの曲げ力伝搬特性に関する計測値と理論値の比較

平成30年度は、前年度に引き続き、コンベックスバネをスペースデブリ把持に利用する際の動力学特性の解明を目指し、バネの試作、動作実験を実施した。特に、これまで明らかになっていなかったコンベックスバネの曲げ力伝搬特性についてこれを定式化し、バネの形状、剛性等の設計パラメータとばねの運動の関係性を明らかにした (図6)。本成果と前年度まで得られていたコンベックスバネの曲げ力に関する知見を統合し、コンベックスバネの動力学特性を解析的に整理・定式化した。また、コンベックスバネ上の任意の位置へのターゲット接触を考慮した動力学シミュレーションを実現するため、ロボットアームや衛星のモデルと組み合わせ可能なバネの数値動力学モデルを多節リンク機構で近似することにより構築した。さらに、これらの関係式およびモデルを用いることにより、任意のばね動作を実現するためのコンベックスバネの設計手法について明らかにした。また、スペースデブリ捕獲に適したコンベックスバネの設計法について考察し、これを実現する手法について、上記力学モデル・設計法を基に明らかにした。

まとめ

本研究では、ロボットによるスペースデブリ捕獲の実現を目指し、電気アクチュエータ・センサを用いずともデブリとの初期接触を検知し自動的にこれを把持する機構について、ばね力を利用する手法について提案し、必要な力学・機構・設計法について明らかにした。特に、リストバンド等に用いられているコンベックスバネに着目し、これまで明らかにされていなかった同バネの力学特性について定式化し、自由に運動を設計する手法を明らかにした。今後は本

研究の知見を利用した、具体的なデブリ把持機構の設計開発が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計0件）

〔学会発表〕（計5件）

1. 小沢堯也, 中西洋喜, 小田光茂, コンベックスバネを用いた非協力衛星捕獲機構の動力学特性に関する研究, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 2016
2. 増田雄斗, 中西洋喜, コンベックスバネの力学特性を用いたデブリ把持機構の研究, 第62回宇宙科学技術連合講演会, 2018
3. 中西洋喜, スペースデブリ除去デバイス取り付けのための機構・制御の検討, 第8回スペースデブリワークショップ, 2018
4. 増田雄斗, 中西洋喜, デブリ捕獲機構のためのコンベックスバネの力学解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, 2019
5. Hiroki Nakanishi, Yuto Masuda, Takaya Ozawa, Development and evaluation of debris capturing system using bi-stable convex spring, JSASS International Symposium on Space Technology and Science, 2019

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者
なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：小田光茂, 小沢堯也, 増田雄斗

ローマ字氏名：Mitsushige ODA, Takaya OZAWA, Yuto MASUDA

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。