

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K06119

研究課題名（和文）宇宙ロボットの緩衝のための関節弾性機構と制御の基盤的研究

研究課題名（英文）Fundamental study of joint elasticity mechanism and control for buffering of space robots

研究代表者

西田 信一郎（Nishida, Shin-Ichiro）

鳥取大学・工学研究科・特任教授

研究者番号：50358529

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙デブリの軌道上捕獲においては、相互運動による動的荷重の発生が課題である。このため、ロボットには荷重の緩衝機能および制動動作機能が必要である。本研究では、新規の関節弾性機構を構成し、アーム先端部での弾性変形ストロークを確保し、関節出力軸トルクセンサによる関節コンプライアンス制御発展形態を適用し、センサとアクチュエータのコロケーションにより高い制御応答性を確保し、良好な緩衝性能を実現するシステムを構成した。また、軌道上重力環境を模擬した水平2関節ロボットおよび画像計測系、さらに技術を応用した走行ロボット操舵系を試作し、試験・評価により、本提案方式の有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙デブリの軌道上捕獲における相互運動による動的荷重の発生という課題に対し、対象の運動を画像計測し、捕獲するロボットアームの各関節に弾性機構を組み込み、高い制御帯域の緩衝制御や制動動作制御を行う方式を提案した。さらに、実際にターゲットとして想定されるロケット上段に対して過大な荷重を発生させることなく良好に捕獲するシステムを構築できることをテストベッドの試作、試験、評価により示し、軌道上技術実証プロジェクトの実現への道筋を示した。また、同じ技術を応用した惑星探査走行ロボットのサスペンションおよび操舵機構についても、試作・試験・評価により軽量のシステム構築の実現性を示した。

研究成果の概要（英文）：In orbital capture of space debris, the generation of dynamic loads due to mutual motion is a challenge. Therefore, the robot needs to have load cushioning and braking functions. In this study, a new joint elasticity mechanism was configured to secure the elastic deformation stroke at the arm tip, and a joint compliance control development form using a joint output shaft torque sensor was applied to configure a system that secures high control response and achieves good cushioning performance by collocation of the sensor and actuator. The system is configured to achieve good cushioning performance. In addition, a prototype of a horizontal two-joint robot that simulates an orbital gravity environment and an image measurement system, as well as a steering system for a traveling robot that applies the technology, were fabricated, and through testing and evaluation, the effectiveness of the proposed method was confirmed.

研究分野：宇宙ロボットの制御

キーワード：直列弾性機構 緩衝制御 画像計測 運動推定 操舵機構 サスペンション

1. 研究開始当初の背景

宇宙デブリは、姿勢制御されていない非協力ターゲットであり、回転運動している場合が多い。このような運動物体のロボットアームによる捕獲においては、動的な荷重が生じ、能動的なインピーダンス制御で対応できない高い周波数帯の動的荷重の緩衝のために弾性機構要素の組み込みが必須である。しかし、アーム先端部の弾性機構のみでは、変形ストロークを十分に確保できず、その柔軟性のため、非使用時の保持に苦慮するという問題がある。また、宇宙機搭載用のロボット関節は、限られた質量で大きな出力トルク性能を求められるため、高真空用グリース潤滑を施した高減速比の減速機を内蔵し、高いバックドライバビリティを確保することが難しい。そのため、能動的インピーダンス制御だけでは、十分な応答性を確保できず、宇宙デブリ捕獲に要求される高い緩衝特性も得られない。一方、アームの各関節に駆動軸周りの弾性機構を設ける方式は、アーム先端部について大きな変形ストロークを確保できるため有利であるが、関節弾性機構の適切な構成や設計手法が確立されていない。

宇宙デブリ捕獲アームでは、関節の能動的なインピーダンス制御の発展形と関節弾性機構、アーム構造、エンドエフェクタの機械的インピーダンスが連結した形態となる。また、アームの姿勢の変化により、各関節に要求される機械的インピーダンスが変化する。そして、ローカルな高周波の構造・機構振動を抑えるため、関節弾性機構には減衰特性の付加も必要であり、様々な姿勢において関節インピーダンス制御とマッチングできる特性の最適な配分が必要である。

2. 研究の目的

地球周回軌道上にロケット上段残滓などの宇宙デブリが数多く残留し、相互衝突により数が増える自然増殖状態（ケスラーシンドローム）に至っており、運用中の衛星との衝突の危険性が高まり、能動的な宇宙デブリ除去が急務となっている。しかし、姿勢制御されていない回転運動物体である宇宙デブリ捕獲において負荷側から急激にアームに加わる動的荷重を緩衝するロボットアームの機構および制御方式が確立されていない。これには、アームの関節インピーダンス制御の応答性の限界を関節弾性機構要素で補完した低い機械的インピーダンスで荷重を緩衝する方式が有望である。しかし、アーム姿勢の変化に対応して高次のローカルな振動を抑えて安定な捕獲を行うためには、インピーダンス制御系の設定可能な特性を考慮した各関節弾性機構に適切なインピーダンスを配分する要求設計手法および安定な減衰特性を有する関節弾性機構構成方式の構築が必要である。また、地上の介護ロボットにおいても同様の要求がある。

本研究は、宇宙デブリの捕獲ロボットや介護ロボットの緩衝および安定な制御に有効な関節弾性機構の特性配分と構成方式につき、基盤的に研究・開発し、確立することを目的とする。

3. 研究の方法

研究方法の詳細を以下に示す。

- ・ロケット上段残滓（図1）を捕獲対象として想定し、これを相対運動が残る状態で捕獲・制御するロボットアームをモデル対象とする。
- ・関節インピーダンス制御、関節機構、関節弾性機構、アームリンク、エンドエフェクタの各部の機械的インピーダンスが連結した形態で、アーム姿勢変化に応じた関節制御および関節弾性機構のマッチングを制御系解析・分析し、関節制御および関節弾性機構のインピーダンス特性の配分方式、要求設計方式を検討・設定する。併せて関節弾性機構要素に必要な弾性特性、減衰特性を明確にする。
- ・これら要求特性を踏まえ、FEM解析や大変形解析を繰り返して変形時の部材の応力を均一化すべく収斂を図り、詳細な設計・解析を行い、構成手法・設計手法を基盤的に確立する。
- ・弾性特性、減衰特性および、それらの安定性などの単体試験をトルクセンサや回転角度センサ、トルク印加装置を組込んだ単体試験装置を構成して評価する。
- ・水平2関節アームとハンド機構を試作し、アームとして関節制御、関節機構、関節弾性機構、アームリンク、エンドエフェクタの各部の機械的インピーダンスが連結した形態での機械的特性の試験および移動・緩衝・制動の各制御性能・特性試験を実施し、評価する。
- ・これらの試験結果、評価を踏まえて、基盤的技術として関節弾性機構の構成、設計手法を纏める。また、対応した関節インピーダンス制御の特性設定手法についても纏める。
- ・実際に作業機上に搭載したロボットアームでロケット上段残滓を軌道上で捕獲するために、軌道上近傍から、ロケット上段残滓の姿勢・運動を画像計測する手法の検討、ソフトウェア試作を行い、模型を用いた各種の計測実験を行って、提案手法の有効性を確認する。
- ・能動関節インピーダンス制御と組合せた単関節での緩衝性能・特性試験を行う。能動関節インピーダンス制御は、初年度に設定した特性配分に沿った特性に設定して関節弾性機構とのインピーダンスのマッチングを確認し、さらにパラメータを様々な特性に振って、関節弾性機構との連結特性を各々取得し、評価する。
- ・単関節の動力学シミュレーションとのコリレーション解析を行い、試験結果をベースとした関節機構の減速機特性や軸受の摩擦特性などの数学モデルのチューニングを実施する。
- ・実際に作業機上に搭載したロボットアームでロケット上段残滓を軌道上で捕獲するために、

軌道上近傍から、ロケット上段残滓の姿勢・運動を画像計測する手法の検討、ソフトウェア試作を行い、模型を用いた各種の計測実験を行って、提案手法の有効性を確認する。

- ・アームと同様に動作機構に弾性要素を組込んで簡素化した火星表面走行ロボットへの適用についても検討を行い、走行ロボットの試作機を構成し、実際に砂上や段差などの火星面模擬フィールドで弾性機構の有効性を確認する。

4. 研究成果

捕獲対象の宇宙デブリとしてロケット上段残滓(図1)を想定し、これを相対運動が残る状態で捕獲・制動する衛星搭載ロボットアームや対象の姿勢・運動や相対位置を計測する画像計測系に関して研究を行った。

宇宙デブリの軌道上捕獲においては、相互運動による動的荷重の発生が課題である。このため、ロボットには荷重の緩衝機能および制動動作機能が必要である。本研究では、トルクセンサを兼ねた関節振り弾性機構を各関節に組込む(図2)ことによりアーム先端部での弾性変形ストロークを確保し、トルクセンサによる関節コンプライアンス制御を適用し、センサとアクチュエータのコロケーションにより高い制御応答性を確保し、良好な緩衝性能を実現するシステムを提案し、設計した。(図3)

まず、単関節を試作し、単関節の動力学シミュレーションとのコリレーション解析を行い、試験結果をベースとした関節機構の減速機特性や軸受の摩擦特性などの数学モデル(図4)のチューニングを実施した。

続いて、水平2関節アームとハンド機構を試作し(図5)、アームとして関節制御、関節機構、関節弾性機構、アームリンク、エンドエフェクタの各部の機械的インピーダンスが連結した形態での機械的特性の試験および移動・緩衝・制動の各制御性能・特性試験を実施し、これらの試験結果、評価を踏まえて、基盤的技術として関節弾性機構の構成、設計手法を纏めた。

実際に作業機上に搭載したロボットアームでロケット上段残滓を軌道上で捕獲するために軌道上近傍から、ロケット上段残滓の姿勢・運動を画像計測する手法の検討、ソフトウェア試作を行い、CGによるシミュレーション画像(図6)を使用した計測実験を行って、提案手法の有効性を確認した。そして、対象の捕獲のための最終接近時の相対位置・姿勢の画像計測についても画像計測処理手法を提案し、ソフトウェアの試作および模型を用いた実験により、計測機能・性能および有効性を確認した。

さらに、アームと同様に動作機構に弾性要素を組込んで簡素化した火星表面走行ロボットへの適用についても検討を行い、走行ロボットの試作機(図7)を構成し、実際に砂上や段差などの火星面模擬フィールドで弾性機構の有効性を確認した。

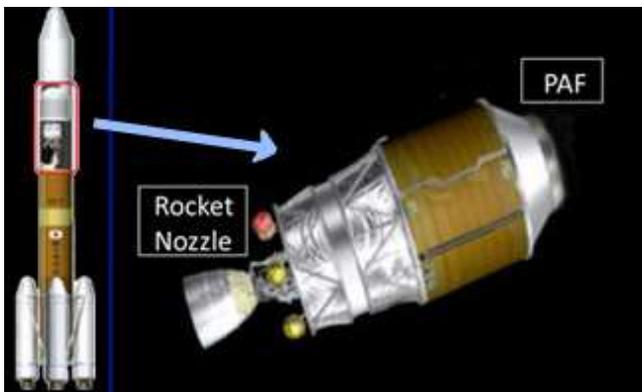


図1 Hシリーズロケット上段残滓

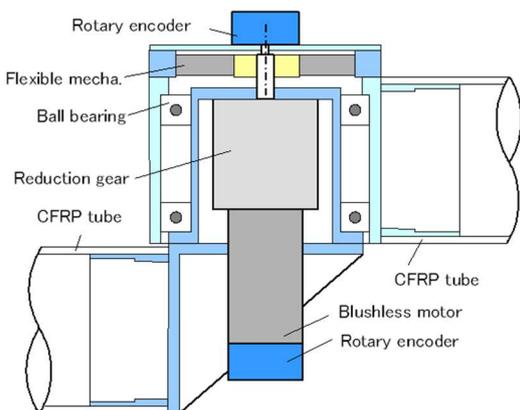


図2 トルクセンサ兼弾性機構付き関節の構成

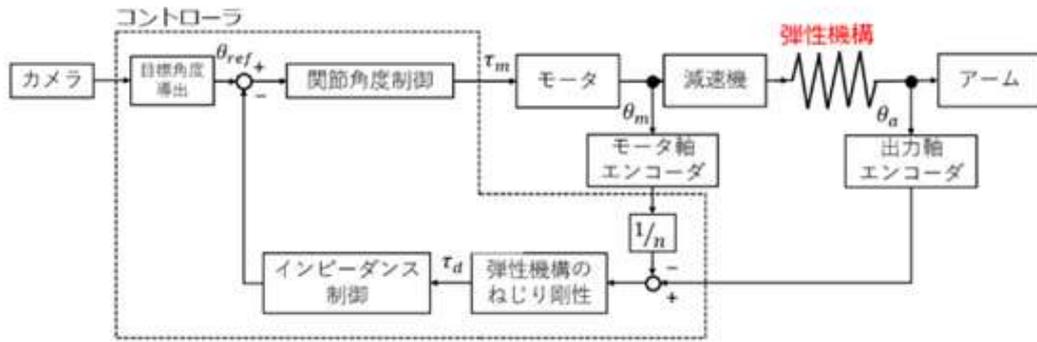


図3 提案システムの構成

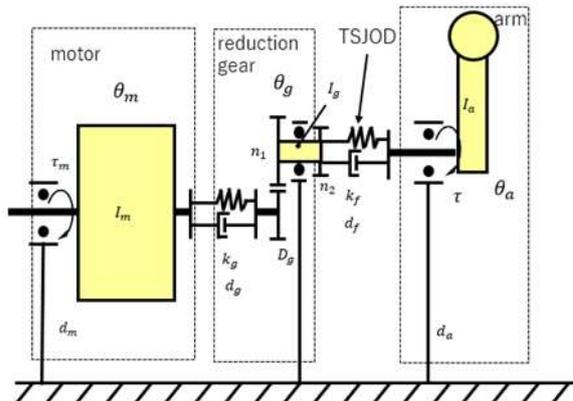


図4 関節の数学モデルの構成

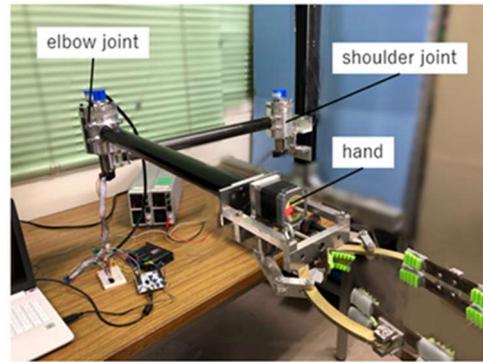


図5 2次元アーム試作機

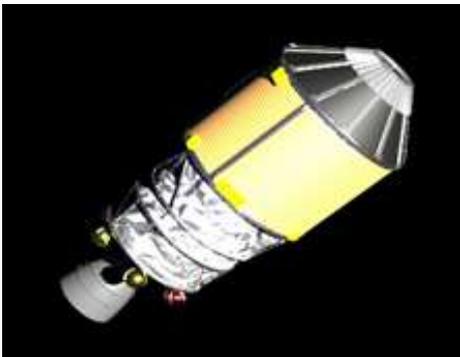


図6 CGによる捕獲対象のシミュレーション画像

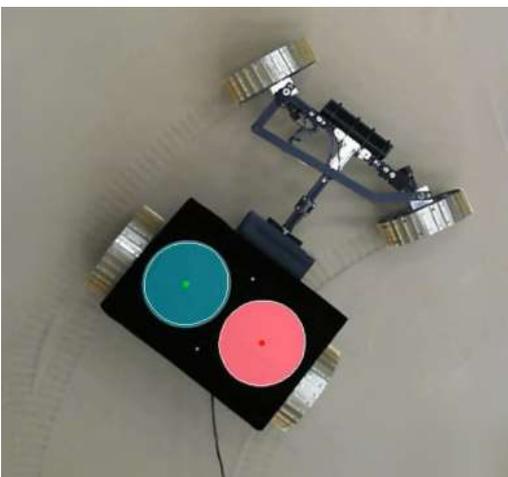


図7 弾性要素を組み込んだ走行ロボットの試作機

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shin-Ichiro Nishida, Daisuke Uenaka, Ryota Matsumoto, Shintaro Nakatani	4. 巻 6
2. 論文標題 Lightweight Robot Arm for Capturing Large Space Debris	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. of Electrical Engineering	6. 最初と最後の頁 271-280
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.17265/2328-2223/2018.06.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 合田伍、西田信一郎
2. 発表標題 ボルト締結作業ロボット用コンプライアンス機構
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 早川侑輝、西田信一郎、中谷真太郎
2. 発表標題 対象をアクティブセンシングにより識別するハンド
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸本健、西田信一郎
2. 発表標題 海底探掘ロボットの自己位置計測システムの研究
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高田晋伍、合田伍、西田信一郎
2. 発表標題 関節弾性機構を組み込んだ宇宙デブリ除去用ロボットアームの研究
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 大江朝陽、西田信一郎
2. 発表標題 火星探査ローバのパッシブステアリング機構による経路追従制御の研究
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 小林太一、西田信一郎
2. 発表標題 宇宙デブリ捕獲用画像センシングの研究
3. 学会等名 宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taichi Kobayashi, Shin-Ichiro Nishida, Shunsuke Nakamura, Shintaro Nakatani
2. 発表標題 Study of Image Processing Methods for Space Debris Capture
3. 学会等名 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高田晋伍、西田信一郎
2. 発表標題 関節に弾性機構を内蔵したロボットアームの研究
3. 学会等名 中国四国支部卒業研究発表会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西田信一郎、小林太一
2. 発表標題 宇宙デブリ追跡・捕獲用画像計測の研究
3. 学会等名 中国四国支部総会講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本峻太、西田信一郎
2. 発表標題 宇宙デブリ捕獲用アームの関節弾性機構の研究
3. 学会等名 日本設計工学会2019年度秋季大会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本峻太、西田信一郎
2. 発表標題 関節力覚制御マニピュレータを用いた宇宙デブリ捕獲システム
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本峻太、西田信一郎
2. 発表標題 マニピュレータによる宇宙デブリ捕獲システム
3. 学会等名 Si-2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上仲大輔、西田信一郎、中谷真太郎
2. 発表標題 柔軟機構を有する宇宙デブリ捕獲用ロボットアームを用いた衝撃緩衝の研究
3. 学会等名 Si-2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shin-ichiro Nishida, Daisuke Uenaka and Ryota Matsumoto
2. 発表標題 Study of Active Debris Remoal System with a Light Weight Robot Arm
3. 学会等名 第8回スペースデブリWS (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shin-ichiro Nishida*, Daisuke Uenaka, Atsufumi Shimizu and Shintaro Nakatani
2. 発表標題 Light Weight Robot Arm for Capturing Space Debris
3. 学会等名 68th International Astronautical Congress (IAC) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shin-Ichiro Nishida, Daisuke Uenaka, Atsufumi Shimizu and Shintaro Nakatani
2. 発表標題 Flexible Joint Arm and End-effector for Space Debris Capture
3. 学会等名 ISTS 2017 - 2017 International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大江朝陽、西田信一郎
2. 発表標題 火星探査ローバのパッシブステアリング機構を用いた走行制御の研究
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高田晋伍、西田信一郎
2. 発表標題 大質量宇宙デブリ捕獲用ロボットアームの研究
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Asahi Oe, Shin-Ichiro Nishida, Shintaro Nakatani
2. 発表標題 Study of Passive Steering Mechanism for Mars Surface Exploration Rovers
3. 学会等名 11th Asia-Pacific Regional Conference of the ISTVS (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高田晋伍、西田信一郎
2. 発表標題 弾性機構を内蔵した宇宙デブリ捕獲用ロボットアームの緩衝制御の研究
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部総会講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大江朝陽、西田信一郎、中谷真太郎
2. 発表標題 火星探査ローバのばねを付加したパッシブステアリング機構による経路追従制御の研究
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部総会講演会2023
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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------