

燃料デブリ回収を志向したロボットグリッパの設計アプローチ

○中島慎介（東京大学） 小松廉（東京大学） Alessandro Moro（RITECS Inc.）
Angela Faragasso（東京大学） 禹ハンウル（工学院大学） 松日楽信人（東京大学）
山下淳（東京大学） 浅間一（東京大学）

1. 序論

福島第一原子力発電所（以下、1F）における燃料デブリ回収は、廃炉措置の為に重要なステップとして知られる。1Fにおいて燃料デブリの存在する原子炉格納容器（PCV: Primary Containment Vessel）内部は高放射線環境であり、デブリ回収工程は人手でなくロボット遠隔操作の活用が不可欠となる。近年の調査により、PCV内部の開口部付近やその直下をはじめとする領域の状況や燃料デブリ分布がだまかに明らかとなりつつある[1]。一方で、燃料デブリの存在するPCV底部・奥の領域の探索は未だ挑戦的課題である（図1）。本研究では、燃料デブリ回収を目的とする長尺ロボットアームの為にグリッパ部構成アプローチを説明する。ペイロードとしての燃料デブリが備える性質を示し、把持運搬試行の為に模擬デブリ作製手法について説明する。構築したグリッパ試験機の構造や駆動系、ソフトウェアの構成を述べ、動作検証実験の結果を説明する。最後に結論を示す。

2. 燃料デブリ

2.1 ペイロードとしての性質

本研究での把持回収対象の燃料デブリについて説明する。燃料デブリ（以下デブリ）は、原子力発電における燃料が、PCV構造を巻き込みながら融け落ちる過程を経て生成された物体であり、融解された構造物の材質の違いに伴い、密度や弾性率、破壊靱性などの観点から、異なる性質を備える[2]。現時点では、冷却水の継続的投入による冷却が進められており、PCV底部は浅い水にデブリが浸かった状況となっている。デブリのさまざまな性状としては

- (1) 小石状
- (2) 半熔融金属状
- (3) プレート状

が知られている[3]。本研究では、特に(1)を回収対象とし、ペイロードを最大500[g]と設定した。

2.2 模擬デブリの作製

今後のグリッパやロボットアーム開発工程において、実環境での試験を進める為に模擬環境や模擬デブリが必要となる。模擬デブリの作製工程について説明する。先行研究において、燃料デブリの性状予測や把握に向けた模擬デブリ構築が行われており、PCV構造物や燃料の組成と反応の模擬による生成物の組成解析などが進められてきた[2]。本研究では、ロボットによる把持回収対象物として備えるべき性質に着目した。具体的には、サイズスケールや密度、圧縮強度などを再現させる

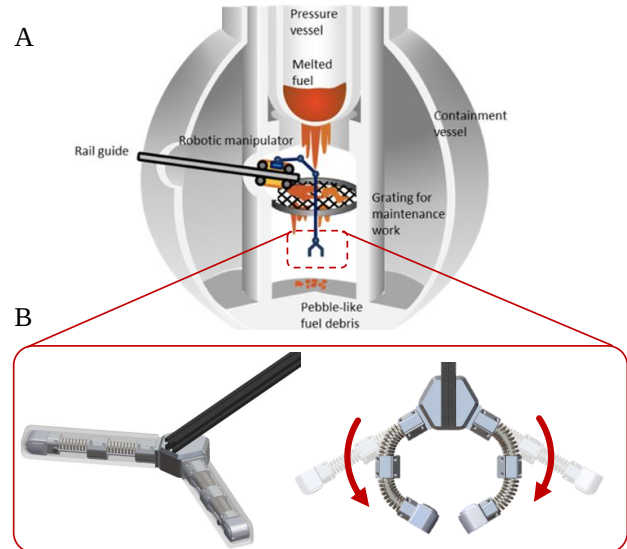


図1 Fuel debris retrieval task. A) Robotic manipulator enters the PCV through a rail guide. The robot arm extends the structure of 4 [m] to approach and grasp the target: Pebble-like fuel debris. B) Robot gripper at the tip of the robot arm. The gripper is characterised by adaptivity, robustness, underwater performance and radiation tolerance.

ことでアプローチ・把持シミュレーションへの活用を意図したモデルとした。

まず、実機とシミュレーションモデルにて同一形状を活用できることを狙った。手順を図2に示す。形状は、3次元モデリングソフトウェア“Blender”[4]のアドオンである“Rock generator”[5]により生成する。所望の寸法や凹凸などのプロパティを備える岩石モデルをバッチ形式で生成可能である。形状ファイルをシミュレータにインポートしたり、3Dプリンタを活用して樹脂モデルを出力することが可能となる。加えて、本樹脂モデルを型取りすることで、セラミックや低融点金属で複製、様々な密度や強度特性を備える模擬デブリを作製することが可能となると考えられる。

3. グリッパシステム構成

ハードウェア構成を図3に示す。

3.1 関節構造

デブリ回収グリッパの把持部機構として、真空吸着グリッパや剛体リンクを備える多指ハンド[6]、ソフトグリッパ[7]など様々な形式が候補として挙げられる。本

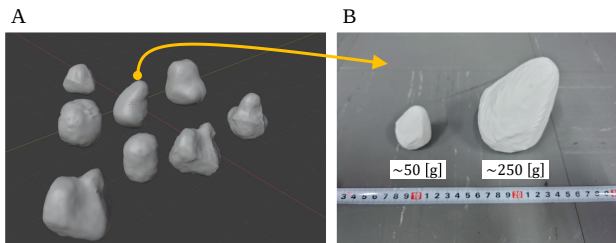


図 2 Debris simulant. A) Output of Blender Rock Generator [5]. The software generates random rock shapes with different properties. B) 3D printed resin model made from tough PLA filament.

研究では、構造頑健性と把持対象物体への適応性と、衝突などに伴う構造破壊や把持物リリースを防ぐ目的で、多指ハンドかつ軸関節を持たない構成を導入した。先行研究 [8, 9] をベースとし、ばね関節と繊維拘束を活用した曲げ運動を発生させる。第一段階として、ばね関節形状を含めた大半の構造を、3D プリンタを活用した樹脂構造により構成した。把持安定等の為の指本数の増加や、機械強度等の確保の為の金属部材への置換は今後の課題とする。

3.2 駆動機構

指構造内部に高分子ワイヤ “Dyneema” [10] のモータ駆動腱が搭載されており、グリップ本体から離れたブラシレスモータにより巻き取られる。腱駆動方式の採用により、駆動源を駆動対象を分離させることが可能となった。デブリの存在するペデスタル底部は、ガンマ線及び浅い水が存在する環境であり、駆動用の最低限の電装系をグリップ本体から離すことは、本ロボットグリップの防水性及び耐放射線性の向上に寄与する。また、ブラシレスモータの駆動系として、“Moteus open-source brushless DC controller” [11] を用いた。

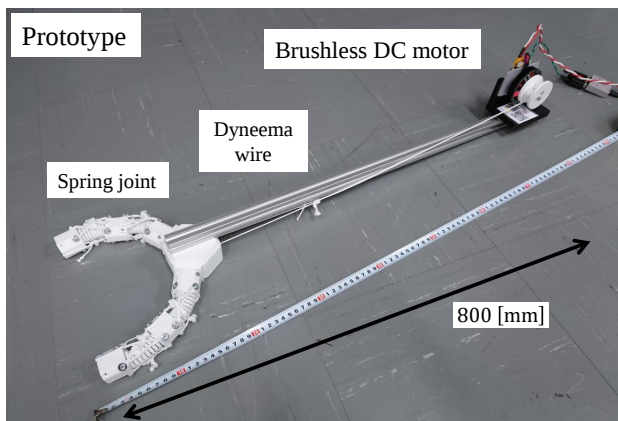


図 3 Gripper overview. Overall size is 800 [mm]. The gripper's fingers are equipped with two spring joints. The brushless motor pulls the tendon wire, which generates the bending motion of the fingers.

3.3 ソフトウェア構成

ソフトウェア構成を図 4 に示す。モータ制御の為の公式提供されたファームウェア及び PythonAPI に対し、ROS [12] を用いた通信の為のノードを追加することで、上位ソフトウェアとの連携を可能としている。

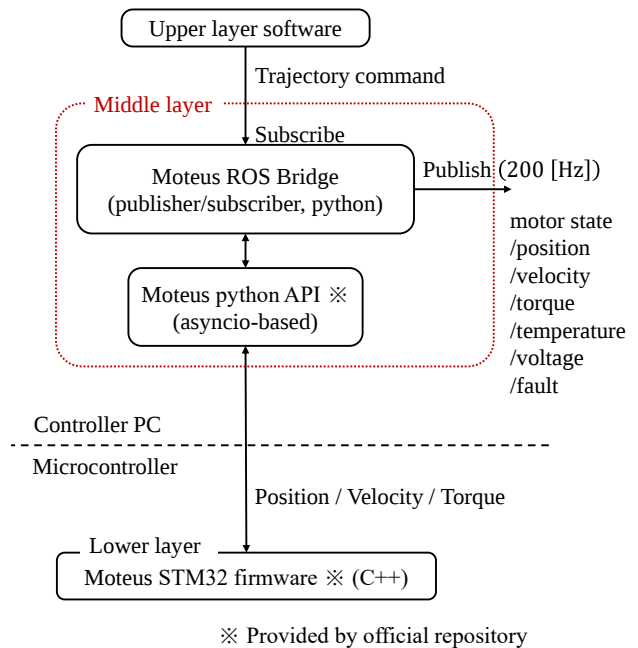


図 4 Software system. Middle layer program consists of the official python API and “Moteus ROS Bridge”. The latter connects the motor controller program to the ROS-based upper layer programs.

4. グリップ動作検証

ロボットグリップの動作試験の様子を図 5 に示す。モータに対して正弦波状の角度指令を与えた実験であり、グリップは開閉を繰り返した。動作実行中において、樹脂ばね構造の柔軟性により、自重によるたわみが生じた他、モータ駆動腱の巻き取りによる屈曲が大きな姿勢では、ばねの曲げ変形のみならず芯線のオフセットなども引き起こされた。

動作試験時におけるモータ角度、角速度、トルクの値を図 6 に示す。周期的に各値が変化し、トルク値が巻き取りと巻き出しで非対称な変化を示した。これは高分子ワイヤのヒステリシスに起因すると考えられる。実際の把持動作においては、精緻な指先位置制御や把持調整よりも、ON/OFF での把持動作実行が有効となると考えられる。

5. 結論

本論文では、燃料デブリ回収を志向したロボットグリップの設計アプローチを紹介した。半導体部品点数を削減し、障害物、狭隘環境における活動継続を目的に、柔軟構造による衝撃吸収と防水性を備えた関節構造と駆動様式を採用した。今後の課題としては、多自由度ロボットとのシステム統合や模擬環境におけるデブリ把持試験、電装系の耐放射線性検証等が挙げられる。

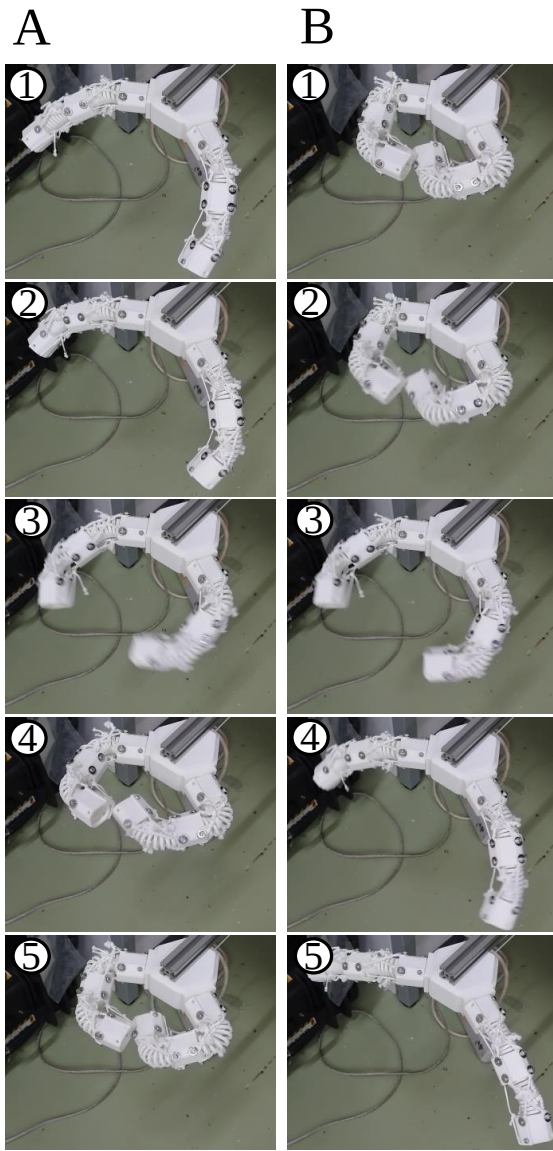


図 5 Sequential photo of the gripper's motion. A) Grasping behaviour. B) Releasing behaviour.

謝 辞 本研究は、J A E A英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業 JPJA21P21476297 の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- [1] 東京電力ホールディングス. 福島第一原子力発電所にて取得した試料の分析, 2022. <https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2022/04/3-3-6.pdf>.
- [2] 忠博鷺谷, 英樹荻野, 直也鍛冶, 泰明宮本, 昌平川野. 燃料デブリの性状把握. 日本原子力学会秋の大会予稿集, 2005.
- [3] 東京電力ホールディングス. 福島第一原子力発電所 2 号機 原子炉格納容器内部調査 実施結果, 2019. <https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2019/02/3-3-3.pdf>.
- [4] Blender Online Community. *Blender - a 3D modelling and rendering package*. Blender Foundation, Stichting Blender Foundation, Amsterdam, 2018.

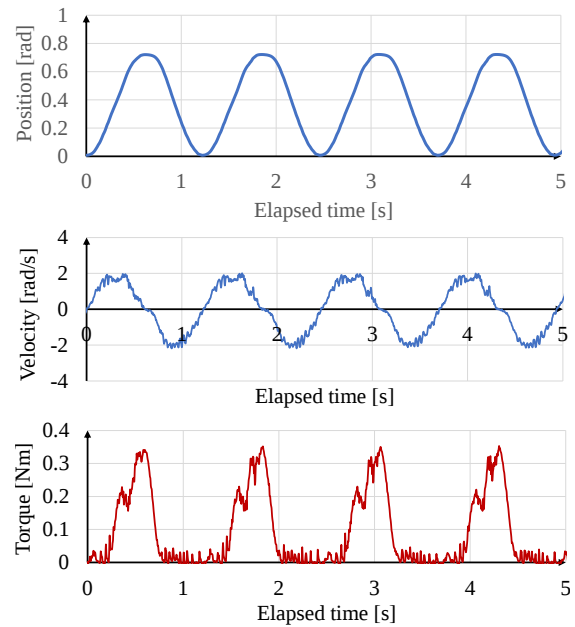


図 6 Result of gripper test. The torque value shows the asymmetric change due to wire hysteresis.

- [5] Jay Versluis. Rock generator for blender. <https://github.com/versluis/Rock-Generator>, 2018.
- [6] Shun Hasegawa, Kentaro Wada, Yusuke Niitani, Kei Okada, and Masayuki Inaba. A three-fingered hand with a suction gripping system for picking various objects in cluttered narrow space. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1164–1171, 2017.
- [7] Josie Hughes, Utku Culha, Fabio Giardina, Fabian Guenther, Andre Rosendo, and Fumiya Iida. Soft manipulators and grippers: A review. *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 3, , 2016.
- [8] Toshinori Hirose, Shingo Kitagawa, Shun Hasegawa, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, and Masayuki Inaba. Waterproof soft robot hand with variable stiffness wire-driven finger mechanism using low melting point alloy for contact pressure distribution and concentration. In *2022 IEEE 5th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, pp. 109–116, 2022.
- [9] Shogo Makino, Kento Kawaharazuka, Ayaka Fujii, Masaya Kawamura, Tasuku Makabe, Moritaka Onitsuka, Yuki Asano, Kei Okada, Koji Kawasaki, and Masayuki Inaba. Five-fingered hand with wide range of thumb using combination of machined springs and variable stiffness joints. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 4562–4567, 2018.
- [10] 東洋紡. Izanas 超高分子量ポリエチレン繊維, 2022. https://www.toyobo.co.jp/products/hp_fiber/category/dn_izanas/index.html.
- [11] MJBOTS. Moteus r4.11 controller, 2022. <https://mjbots.com/products/moteus-r4-11>.
- [12] Morgan Quigley, Ken Conley, Brian Gerkey, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Rob Wheeler, Andrew Y Ng, et al. Ros: an open-source robot operating system. In *ICRA workshop on open source software*, Vol. 3, p. 5. Kobe, Japan, 2009.