

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	弾性テレスコピックアームに関する研究 第9報：ワイヤ干涉駆動型超長尺多関節アームSuper Dragonとの統合
Title(English)	Study on Elastic Telescopic Arm No.9: Integration with the Coupled Tendon-driven Long-reach Articulated Arm " Super Dragon "
著者(和文)	長谷川航希, 藤塚祐二, 遠藤玄
Authors(English)	Koki Hasegawa, Yuji Fujitsuka, Gen Endo
出典(和文)	第25回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 予稿集, , ,
Citation(English)	Proceedings of the 25th SICE System Integration Division Annual Conference, , ,
発行日 / Pub. date	2024, 12
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は公益社団法人計測自動制御学会に帰属します。 (c) 2024 The Society of Instrument and Control Engineers

弾性テレスコピックアームに関する研究

—第9報：ワイヤ干渉駆動型超長尺多関節アーム Super Dragon との統合—

○長谷川 航希（東京科学大学），藤塚 祐二（東京科学大学），遠藤玄（東京科学大学）

Study on Elastic Telescopic Arm

—No.9: Integration with the Coupled Tendon-driven Long-reach Articulated Arm
"Super Dragon"—

○Koki HASEGAWA (Science Tokyo), Yuji FUJITSUKA (Science Tokyo),

and Gen ENDO (Science Tokyo)

Abstract: Thin and long-reach arms are effective for the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant for measuring in-vessel structures and removing fuel debris. Currently, there is a need for an arm that can investigate the bottom of the reactor pressure vessel by attaching a vertically extending arm equipped with investigation equipment to the tip of a horizontally extending long-reach arm. In response to this, we have successfully integrated an elastic telescopic arm with the tip of the coupled tendon-driven long-reach articulated arm "Super Dragon" which is being developed in our research group. We report the experimental results in which the telescopic arm was extended upwards by 7 meters while the Super Dragon was maintained in a horizontal posture.

1. 緒言

福島第一原子力発電所の廃炉作業を加速するため、原子炉圧力容器（Reactor Pressure Vessel, RPV）内部の損傷や燃料デブリの状況把握が重要である。そのため、原子炉格納容器（Primary Containment Vessel, PCV）からRPV底部の穴を通りRPV内部に進入する下部アクセス調査工法が提案されている。そこで、図1に示すように、多関節アームの先端に細径な伸縮式アームを取り付け、先端に調査機器を搭載することで、この工法を実現できると考えている。

このような伸縮式アームとして、IRIDは空圧駆動のテレスコピックパイプを開発しているが、パイプ間の空圧シールの影響から屈曲が困難であり、予期せぬ障害物が想定される廃炉作業において課題があると筆者らは考えている¹⁾。また、永井らはロープ駆動のテレスコピックブームを開発し、本研究室で開発している多関節アーム Super Dragon の手先に取り付けた^{2), 3)}。しかしこのブームは半径方向に複数のプーリを配置しなければならず、半径方向の構造が大きくなり多段化、細径化が難しいという課題がある。その結果、最も収縮した場合でも2.1 mの長さとなり、ペDESTAL内で水平から垂直に姿勢を変えることが困難となった。

そこで筆者らの研究グループは柔軟に屈曲可能な螺旋導管を内部に押し込むことによって伸縮可能な弾性テレスコピックアーム（Elastic Telescopic Arm, ETA）を開発している⁴⁾。収縮時長さ0.9 mであり、現時点では最大8.7 mまで伸展させることに成功している。

そこで、本研究ではETAをSuper Dragonの最先端の一節の代わりに取り付け、二つのアームを統合した最大アーム長17.4 mの拡張型Super Dragonを開発する。このアームを用いて上方へのアクセスを実現することを本研究の目的とする。

2. Elastic Telescopic Arm

Super Dragonと統合するため、本研究で開発したETAを図2に示す。アーム本体にはケーブル牽引用竿

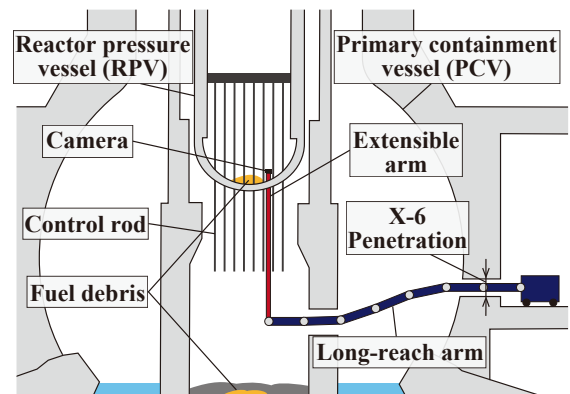


Fig. 1 Planned robotic RPV investigation in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant.

（DRXF-10000, DENSAN）を用いており、テレスコピック構造を成す16個のGFRP（Glass Fiber Reinforced Plastic）の中空パイプで構成されている。収納時長さ0.9 m、最大伸展時長さ8.7 m、最大半径53 mmであり、高伸縮比（約9.67 : 1）かつ、細径な構造を実現している。また、外力や自重により弾性変形し、しなる特徴があるため、障害物にぶつって伸展することができ、廃炉作業において有用であると考えている。このアームの内部に、柔軟な螺旋導管（セミインターチューブ SA-11N, ハギテック）を送り出すことでアームを伸展させる。図2に示すように、螺旋導管の螺旋溝に嵌合するめねじ構造を中心軸に持つギヤを回転させることで螺旋導管の送り出しを行っている。また、ゴムローラをギヤの上下に2個ずつ設置しており、ギヤの回転による螺旋導管の軸回りのねじれを抑制する機能を有している。

3. Super Dragon

Super Dragonは筆者らの研究グループで開発しているアーム長10 m、関節数10の長尺多関節アームである（図3）。関節はピッチ関節7個とヨー関節3個からなるため、3次元空間の手先運動が可能である。ここで本稿ではアームを水平方向に伸ばした時に回転軸が鉛直方向に

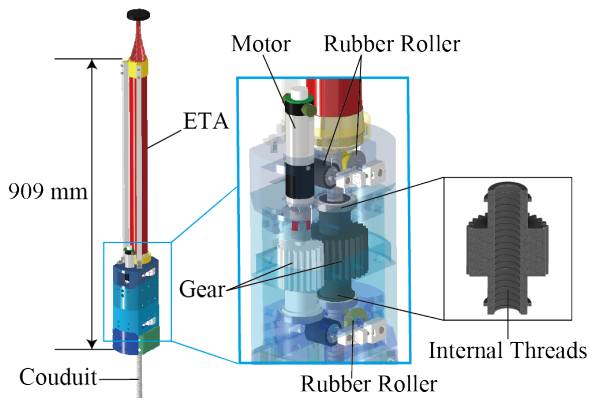


Fig. 2 Developed ETA and internal mechanism.
Weight: 3.63 kg, Length: 0.9~8.7 m, Number of Pipe: 16



Fig. 3 10 m-long coupled tendon-driven manipulator: Super Dragon

なる関節をヨー関節、回転軸が水平かつ長手方向と直交する関節をピッチ関節と定義する。Super Dragon では長尺化に伴って増大する自重のモーメントを補償するために広瀬らが提案したワイヤ干渉駆動を採用している⁵⁾。各関節の制御には化学繊維ロープを用いており、ロープの弾性により高いコンプライアンスを実現しており、未知の障害物と接触したとしても大きな損傷を避けることができる。

4. ETA と Super Dragon の統合

Super Dragon と ETA を統合したアーム長最大 17.4 m の拡張型 Super Dragon を開発した (図 4)。Super Dragon の最先端リンクである 10 節目を取り外し、第 10 関節に ETA を取り付けることで統合した。

開発した拡張型 Super Dragon を用いて、廃炉作業で必要となる圧力容器底部へのアクセスを模擬した駆動実験を行った (図 5)。本実験では、ETA が上方を向いた状態で Super Dragon のアーム部が床面に設置された状態を初期状態とした。手先が上方を向いたまま、Super Dragon の体幹を水平に保った後、ETA を上方に伸展させた。ETA の駆動に用いる螺旋導管がすべて送り出された段階で、手先に端部を固定した巻き尺を用いて計測したところ、約 7 m まで伸展できていることを確認した。ここで、第 10 関節回転軸から手先までの長さを計測した。なお、この実験以降に行われた ETA のみの上方伸展実験においてはより長い螺旋導管を用いて 8.7 m の伸展を実現できた。

先行研究³⁾ では Super Dragon と合わせた最大長さは 13.7 m であったが、本実験では約 15.7 m となり、従来より 2 m 程度高い伸展が得られた。

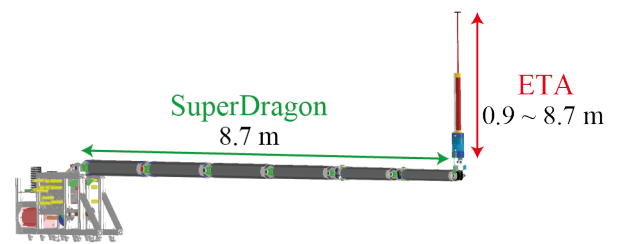


Fig. 4 Extended Super Dragon with ETA on the 10th joint.

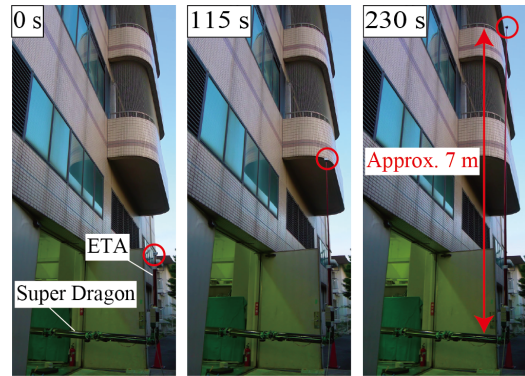


Fig. 5 Experiment to keep the Super Dragon in a horizontal posture and extend the ETA to the tip.

5. 結言

Super Dragon と ETA を統合し、拡張型 Super Dragon の開発を行った。Super Dragon を水平姿勢で維持した状態で弾性テレスコピックアームを約 7 m 伸展させた。今後はペイロードを搭載した際の動作実験や、斜方向への伸展を実現することを検討する。

謝辞

本研究は TEPCO 廃炉フロンティア技術創成協働研究拠点の活動の一部として実施されました。また一部は JSPS 科研費 JP22H03668 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] International Research Institute for Nuclear Decommissioning (IRID). Development of Technology for Investigation inside the Reactor Pressure Vessel (RPV). [Online]. Available: <https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2022/08/2021004Fen5final.pdf>. Accessed: Jul. 1, 2024.
- [2] G. Endo, A. Horigome, and A. Takata. Super Dragon: A 10-m-Long-Coupled Tendon-Driven Articulated Manipulator. *IEEE Robotics and Automation Letters* 4.2, pp. 934–941, (2019). doi: 10.1109/LRA.2019.2894855.
- [3] 永井敏也, 鄭冰, 高田敦, 木倉 宏成, 高橋 秀治, 遠藤 玄. 直動型テレスコピックブームによる拡張型 Super Dragon 多関節ロボットアームの開発. *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2022, 2P2-R04*, (2022).
- [4] 藤塚祐二, 清原遼介, 遠藤玄. 弾性テレスコピックアームに関する研究 - 第 7 報: 螺旋導管による多方向伸縮 -. *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024 講演論文集*, 1P2-A08, (2024).
- [5] S. Ma, S. Hirose, and H. Yoshinada. Design and experiments for a coupled tendon-driven manipulator. *IEEE Control Systems Magazine* 13.1, pp. 30–36, (1993). doi: 10.1109/37.184790.