

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を搭載した拡張型Super Dragonにおける伸展・収縮動作の実現 |
| Title(English) | Demonstration of Extension and Contraction in Extended Super Dragon with Elastic Telescopic Arm |
| 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) | ロボティクス・メカトロニクス講演会2025講演論文集, , , |
| Citation(English) | , , , |
| 発行日 / Pub. date | 2025, 6 |

弾性テレスコピックアームを搭載した 拡張型 Super Dragon における伸展・収縮動作の実現

Demonstration of Extension and Contraction in Extended Super Dragon with Elastic Telescopic Arm

○学 長谷川航希 (Science Tokyo) 学 藤塚祐二 (Science Tokyo)
正 遠藤玄 (Science Tokyo)

Koki HASEGAWA, Institute of Science Tokyo, hasegawa.k.3fb7@m.isct.ac.jp
Yuji FUJITSUKA, Institute of Science Tokyo,
Gen ENDO, Institute of Science Tokyo

To investigate the bottom of reactor pressure vessels in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, we developed an extended “Super Dragon” by integrating a coupled tendon articulated arm “Super Dragon” with an elastic telescopic arm (ETA), achieving an upward extension of 7m. The ETA extends and contracts by pushing a flexible helical tube into the arm’s interior using a feed screw, requiring a mechanism to suppress tube twisting. However, spring-based twist suppression mechanism has challenge of reduced constraint force, preventing successful contraction after extension at extended Super Dragon’s experiment. In this research, we replaced the conventional spring-based twist suppression mechanism with a bolt-based constraint mechanism. Considering decommissioning operations, we also introduced a conduit along the Super Dragon’s link to store the helical tube. Based on these improvements, driving experiments successfully achieved both extension and contraction to approximately 7m.

Key Words: Decommissioning, Long-reach manipulator, Telescopic structure

1 緒言

福島第一原子力発電所の廃炉作業のため、原子炉圧力容器 (Reactor Pressure Vessel, RPV) 内部の状況調査が強く求められている。RPV 内部の調査法として、手先に調査機器を搭載したアームを原子炉格納容器 (Primary Containment Vessel, PCV) の外部から挿入し、約 5 m 上方の RPV 底部の穴を通過させて内部に進入させる下部アクセス調査工法が提案されている [1]。そこで、図 1 に示すように、多関節アームの先端に細径な上方伸縮式アームを取り付け、先端に調査機器を搭載して RPV 内部に進入させることで、この工法を実現できると考えられており、上方伸縮式アームの開発が進められている [2][3]。このような伸縮式アームとして、筆者らは弾性テレスコピックアーム (Elastic Telescopic Arm, ETA) を開発している [4]。ETA は金属製の柔軟な螺旋導管を送りねじによりアーム内部に押し込むことで伸展・収縮を行うことができ、8.7 m の伸展を実現することに成功している。

また筆者らは ETA をワイヤ干渉駆動型多関節アーム Super Dragon の手先に取り付けた拡張型 Super Dragon の開発を行っている [5][6]。図 2 に示すように、Super Dragon の最先端リンクと ETA を交換することで統合し、Super Dragon を水平姿勢に保った状態で、ETA を上方に約 7 m 伸展させることに成功している [7]。しかし、ETA を駆動する際、送りねじによる螺旋導管のねじれを抑制する機構が必要となるが、この実験ではこの抑制の不足により、動作の途中で螺旋導管がうまく送り出されなかった。そのため、伸展動作は実現できたものの、収縮動作については未達成である。実際の RPV 調査への適用を考慮すると、アームを原子炉内部に進入させて調査を実施した後、アームを原子炉外部へ安全に撤収させるプロセスが不可欠となる。そのため、アームの伸展動作に続く収縮動作は、装置の回収可能性を担保する上で必要な技術的要件である。また、この実験において、ETA の駆動に用いる螺旋導管は手先近傍の床面に置いた状態でアームを駆動させていた。しかし、RPV 調査での実用を考慮する場合、アーム全体を PCV 外部から進入させるため、螺旋導管をアームの構造内部に収納することが必要となる。

そこで、本研究では螺旋導管を収納するための管路を拡張型 Super Dragon に導入するとともに、上方 5 m 以上の伸展及び収縮動作の実現を目的とする。

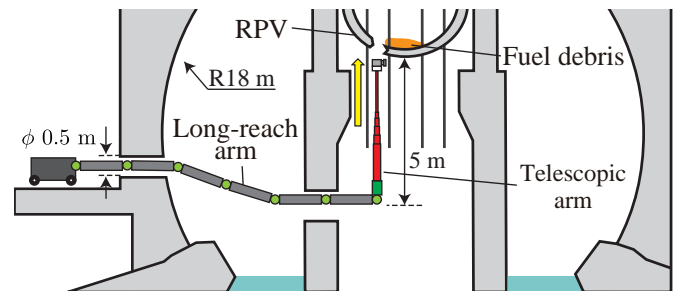


Fig.1 Planned robotic RPV investigation in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant.

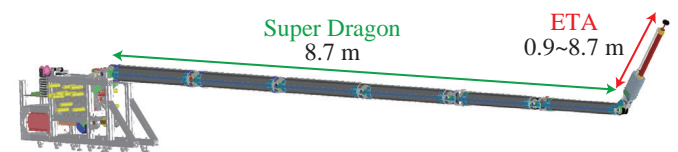


Fig.2 Extended Super Dragon with ETA.

2 ETA

ETA は GFRP の中空パイプによるテレスコピック構造を有しており、最大半径 53 mm、収納時長さ 0.9 m、最大伸展時長さ 8.7 m である。アーム全体が外力や自重により弾性変形して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る。そのため、未知の障害物の存在が想定される廃炉作業において有用であると考えられる。

図 3 に ETA とその内部機構を示す。ETA の駆動には柔軟な螺旋導管を用いており、螺旋導管の螺旋溝に嵌合するめねじ構造を有するギヤを回転させることで螺旋導管をアーム内部に送り出し、アームを伸展・収縮させる。

また、めねじ構造を持つギヤの上下にゴムローラが 2 個ずつ配置され、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

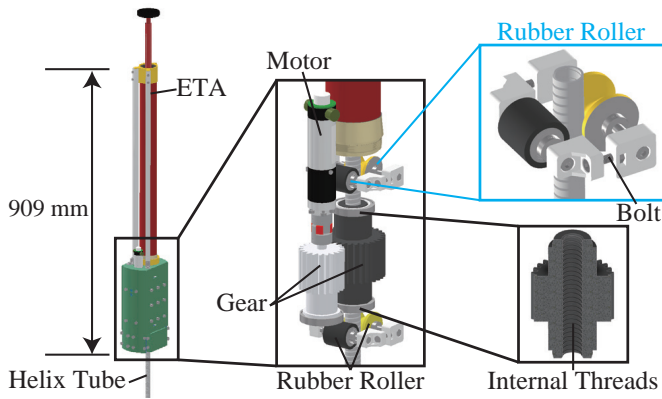


Fig.3 Developed ETA and internal mechanism.

Weight: 3.63 kg, Length: 0.9~8.7 m

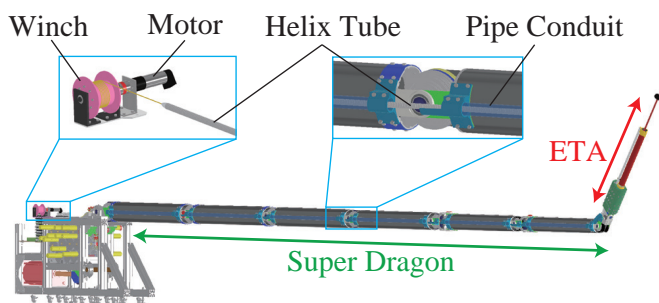


Fig.4 Pipe conduit to store the helix tube driving ETA

機能を有している。従来の ETA ではバネの張力を用いて螺旋導管を拘束する機構を採用していたが、バネの塑性変形による拘束力の低下が課題点であった [4]。過去の駆動実験では収縮動作時に拘束力の不足によりうまく螺旋導管が引き込まれず、収縮動作の実現には至ってない [7]。そこで、本研究では拘束力の低下を防ぐため、図 3 に示すようなボルトによる拘束を用いたねじれ抑制機構を採用した。バネによる拘束機構と比較した場合、拘束力の低下が小さいことや、仮に拘束力が低下したとしても再度ボルトを締めることで解消されるという利点が考えられる。

3 螺旋導管の収納管路の導入

拡張型 Super Dragon を駆動する際は、ETA の駆動に用いる約 10 m の螺旋導管をアームの構造内部に収納することが必要となる。ここで、RPV 調査では狭隘空間の通過や障害物回避といった動作が求められるため、アーム全体の細径化を目指す必要がある。本来なら Super Dragon のリンク内部に螺旋導管の経路を作るべきであるが、本稿では実験上の都合から、図 4 に示すように Super Dragon 体幹に沿うように設置されたアクリルパイプの管路を導入し、螺旋導管を収納する。ここで、Super Dragon の関節自由度を損なわないように、Super Dragon の各リンクに分割して管路を設置する。

ここで、螺旋導管の送り出しを行うモータは図 3 に示すように ETA の機構内部に位置し、アーム全体の中で手先に近い位置に存在する。そのため、ETA 伸展動作時はこのモータを駆動することで、螺旋導管を手先側に送り出すことができる。しかし、収縮動作の場合、このモータを駆動させるのみでは、螺旋導管が管路との摩擦と自身の柔軟性により座屈し、基部側にうまく引き込むことができない。そこで、図 4 に示すように、螺旋導管の基部側の端部にロープを固定し、このロープを巻き取るウィンチを基部に設置する。これにより、ETA 収縮動作時はこのウィンチでロープを巻き取ることで、螺旋導管が座屈することなく基部側に送り出されるようになる。ここで、ウィンチに過大なトルクをかけると螺旋導管の破損につながる恐れがあり、かつ ETA 機構内部にあるモータとの連動が難しいため、ウィンチを駆動するモータについては定電流制御を行い、ロープに一定の張力を印可する。

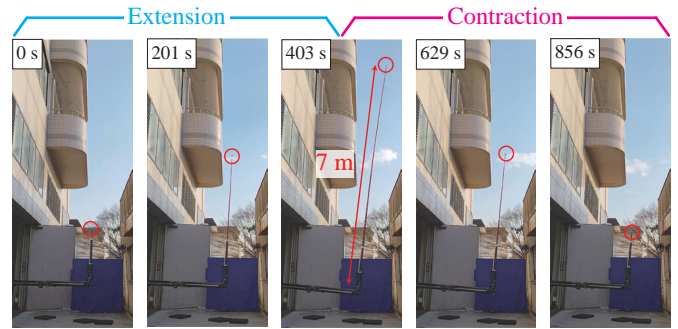


Fig.5 Experiment to keep the Super Dragon in a horizontal posture and extend and contract the ETA.

4 拡張型 Super Dragon の伸展・収縮実験

以上の改良を行った拡張型 Super Dragon を用いて、圧力容器底部への伸展及び収縮を模擬した駆動実験を行った (図 5)。本実験ではアームが床面に脱力して設置されている状態を初期状態とした。拡張型 Super Dragon を水平姿勢に保持した後、Super Dragon の最先端ピッチ関節である第 9 関節を 90 deg まで駆動させて ETA を直立させ、その状態で ETA を伸展及び収縮させた。ETA 手先には 1 m おきの間隔で目印を付けた紐を固定しており、ETA を伸展させた際におおよその伸展量を目視で計測できる。実験の結果、ETA を約 7 m まで伸展させたのち、収縮動作を達成したことを確認できた。

5 結言

ETA の駆動に用いる螺旋導管のねじれ抑制機構を改良し、また螺旋導管を収納する管路を導入した。この改良のもと、拡張型 Super Dragon の駆動実験を行い、上方 7 m への伸展と収縮を実現した。今後はペイロードを搭載した際の動作実験や、斜方への伸展を実現することを検討する。

謝辞

本研究は 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, “廃炉・汚染水対策事業費補助金 原子炉圧力容器内部調査技術の開発”, 2022. https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2022/08/2022005_RPVnaibuchosa.pdf (Accessed on 05/16/2025).
- [2] International Research Institute for Nuclear Decommissioning (IRID). Development of Technology for Investigation inside the Reactor Pressure Vessel (RPV). Available: <https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2022/08/2021004Fen5final.pdf> (Accessed on 02/24/2025).
- [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”, 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] Yuji Fujitsuka and Ryosuke Kiyohara and Toshiya Nagai and Hideharu Takahashi and Hiroshige Kikura and Gen Endo, “Elastic Telescopic Arm Extension/Contraction Mechanism using a Helically Grooved Flexible Conduit”, *Proceedings of the 2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, 2025.
- [5] 広瀬茂男, 馬書根, “ワイヤ干涉駆動型マニピュレータの開発”, 計測自動制御学会文集, vol.26, No.11, pp.1291-1296, 1990.
- [6] 遠藤玄, 高田敦, 堀米篤史, “ワイヤ干涉駆動型超長尺多関節アーム Super Dragon の開発”, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.75, pp.19-75, 2019.
- [7] 長谷川航希, 藤塚祐二, 遠藤玄, “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-”, 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 (SI2024), 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, 公益社団法人 計測自動制御学会, pp. 2394-2395, 2024.