

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	拡張型Super Dragonにおける関節固定による姿勢安定性の向上
Title(English)	
著者(和文)	長谷川航希, 有賀嵩紘, 遠藤玄
Authors(English)	Koki Hasegawa, Takahiro Aruga, Gen Endo
出典(和文)	第43回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2025, 9
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

拡張型 Super Dragon における関節固定による姿勢安定性の向上

○長谷川 航希 (東京科学大学) 有賀 嵩紘 (東京科学大学) 遠藤 玄 (東京科学大学)

A long reach articulated arm driven by a coupled tendon drive exhibits unstable behavior in certain postures due to the elasticity of the driving tendons. In particular, the "Extended Super Dragon", which employs a coupled tendon drive, was observed to display unstable behavior during the extension motion of telescopic arm mounted at the tip with payload. This study proposes to mechanically constrain the most unstable joint only in specific posture. Simulation results demonstrate that the introduction of this locking mechanism improves postural stability.

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アームを取り付け、さらにその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、このような複合型アームの開発が進められている [2]。

筆者らは伸縮アームである弾性テレスコピックアーム (Elastic Telescopic Arm, ETA) [3] をワイヤ干渉駆動型多関節アーム Super Dragon [4, 5] の手先に取り付けた拡張型 Super Dragon の開発を行っている [6, 7]。図 2 に示すように、Super Dragon の最先端リンクと ETA を交換することで二つのアームを統合しており、Super Dragon を水平姿勢に保った状態で ETA を上方に約 7 m 伸展・伸縮させることに成功している [6] [7]。

しかし、調査機器を手先に搭載した場合の駆動実験において、伸展時に ETA が横方向に倒れこむという不安定挙動が発生することが分かった。Super Dragon は、各関節を腱で引っ張って駆動する駆動法を採用しているが、この駆動腱が弾性的に伸びることに起因して不安定挙動が発生した。特に調査機器のような高ペイロードを搭載することでその挙動が顕著となるため、廃炉作業への実用のために解決すべき課題であると考えられる。

そこで、本研究では拡張型 Super Dragon の可搬重量を向上させるため、特定の姿勢で関節の自由度を拘束する機構を提案する。加えて、ワイヤ干渉駆動型多関節アームにおける姿勢安定性指標を用いて、関節ロック機構により安定性が向上することを解析的に示してその有効性を示すことを目的とする。

2. 拡張型 Super Dragon

拡張型 Super Dragon は図 2 に示すように、ETA と Super Dragon から構成される複合型アームである。先端側をなす ETA は GFRP のテレスコピック構造を有する伸縮アームであり、螺旋状の溝を表面に有する柔軟な金属製チューブを送りねじによってアーム内部に送り出すことで伸展動作を行う。また、根元側をなす Super Dragon は 10 個の回転関節を有しており、広瀬らが提案したワイヤ干渉駆動 [4] を採用している。ワイ

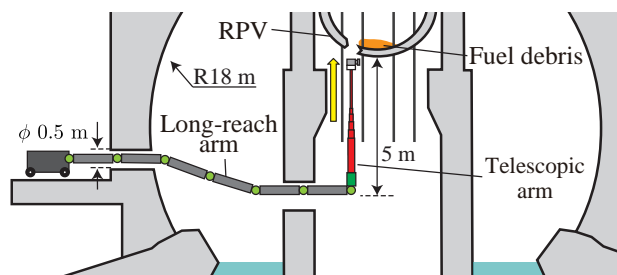


図 1 Robotic RPV investigation in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station.

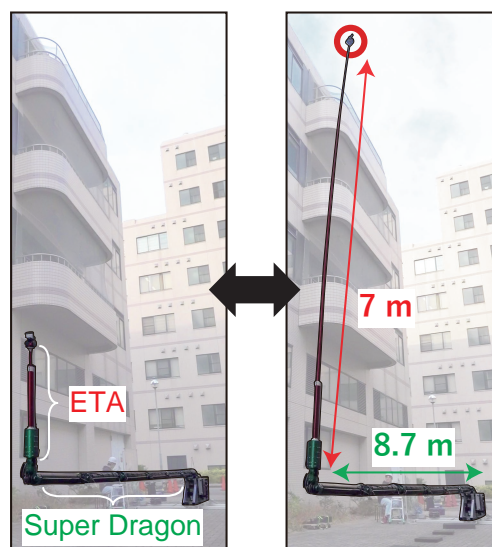


図 2 Extended Super Dragon with ETA.

ヤ干渉駆動は各関節をロープなどの腱で駆動し、多数の腱でアームの自重を支持するものである。高重量なアクチュエータを基部に配置できることでアームが軽量になることや、自重トルクが大きな根元の関節ほど多数の腱が巻きかけられて大きな発生トルクを実現できるなどの利点が存在する。

3. 提案する機構

拡張型 Super Dragon に高重量な調査機器を手先に搭載した実験において、伸展時に不安定な挙動を示すという課題点が明らかとなった。図 3 に拡張型 Super Dragon の根元から数えて第 9・10 関節を示す。ただし図 3 右はリンク・関節・駆動腱のみで簡略して示したものである。ワイヤ干渉駆動は根元側関節に駆動腱を多く巻きかけられる一方、先端側関節は巻きかけら

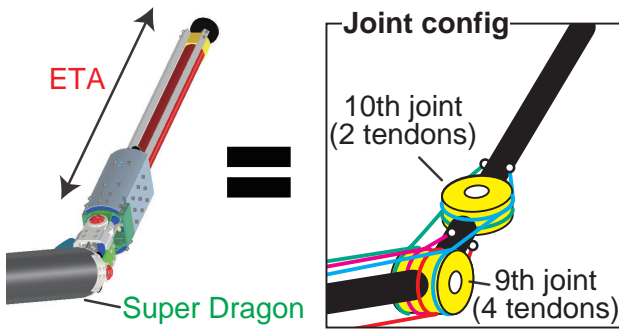


図3 9th and 10th joint of extended Super Dragon.

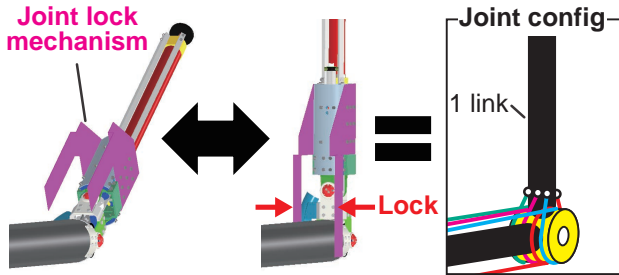


図4 Installation of joint lock mechanism at 10th joint.

れる駆動腱が少ないため関節剛性が小さい。そのため、図3に示すように、Super Dragonの最先端関節である第10関節は最も少ない2本の駆動腱のみで駆動する必要があり、ペイロード搭載時におけるETAの伸展時に関節剛性の不足により横方向に倒れる動作が発生していた。

本稿では、ETA伸展時の第10関節の関節剛性を補うため、図4のように、ETAの直立時にのみ第10関節の自由度を拘束する機構を提案する。これはETAに固定された2枚の板状の機構であり、ETA直立時にSuper Dragonの体幹を挟み込むことで第10関節を構造的に支えるものである。すなわち、この機構を導入することで、図4右に示すように、ETA直立時に第9関節以降の機構を一つのリンクを見なすことができる。拡張型Super Dragonを水平に展開してPCVに進入させる際は第10関節の開放により自由度を活用でき、PCV中央への到達後はETAを直立させて第10関節をロックすることで高重量な調査機器を先端に搭載していても安定して伸展動作を実現できると考えられる。

4. 姿勢安定性シミュレーション

提案する関節ロック機構の有用性を示すため、高田らが提案したワイヤ干渉駆動型多関節アームの姿勢安定性指標MRE [8]を用いて、姿勢安定性が向上することを示す。この安定性指標MREは関節のプーリ行列 R_j 、関節剛性行列 K 、重力項 G 、目標関節角 θ_0 によって式(1)のように表される行列 A_s に対し、その固有値 $\lambda \in \mathbb{C}^{10 \times 1}$ の実部の中での最大のものを示す(MRE= $\max(\text{real}(\lambda))$)。

$$A_s = - \left(R_j K R_j^T + \frac{\partial G}{\partial \theta_0} \right) \quad (1)$$

この指標はある姿勢において局所線形化した静力学的釣り合い式に対し、微小変位を与えた際に減衰振動となるかを固有値最大値を用いて判定するものである。値が大

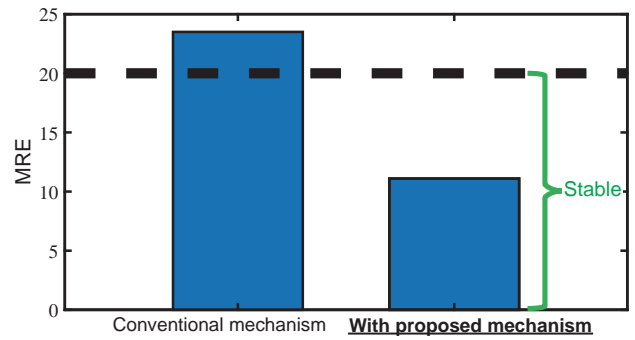


図5 MRE value of Extended Super Dragon

きほどその姿勢が不安定になることを示し、理論上はMREが0以上である場合に姿勢が不安定であることを示すが、実際は関節の摩擦などの影響で境界を示す値は異なり、Super Dragonにおいては複数の実験での経験から、MRE > 20となる姿勢において不安定挙動を示すことがわかっている [8]。実際、拡張型Super Dragonが不安定挙動を示した実験では、手先に0.75 kgの調査機器を搭載した状態でETAを7 m進展させた際にETAが倒れこんだが、その場合のMREの値は23.5と算出されるため、解析的にも不安定であることがわかる。

そこで、ペイロード0.75 kg、ETA伸展量7 mとして、提案する機構の導入後におけるMREの算出を行った。算出においては、図4右に示すように、第9関節以降の機構を一つのリンクとして見なす。ただし、ETAは重力でたわむ構造的な特性を有するが、直立姿勢時はその影響は少ないとみなし、ETAを含むリンクは剛体であると仮定する。算出の結果を図5に示す。図5のように、提案機構導入前のMRE値が23.5であるのに対し、導入後のMRE値は11.1となり、安定性が向上した。この数値は不安定性の基準値である20を下回っており、安定的に姿勢の維持が可能であることが分かった。

5. 結言

本稿では、拡張型Super Dragonにおける可搬重量向上のため、ETA伸展時にのみ第10関節の自由度を拘束する関節ロック機構を提案し、その有効性を安定性指標MREを用いて解析的に示した。今後は関節ロック機構のハードウェア実装を行い、実機を用いて安定性向上を確認する。

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
- [2] International Research Institute for Nuclear Decommissioning(IRID). Development of Technology for Investigation inside the Reactor PressureVessel (RPV). <https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2022/08/2021004Fen5final.pdf>
- [3] Y. Fujitsuka et al: “Elastic Telescopic Arm Extension /

Contraction Mechanism using a Helically Grooved Flexible Conduit”, Proceedings of the 2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp.96-102, 2025.

- [4] 広瀬茂男, 馬書根: “ワイヤ干渉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.
- [5] 遠藤玄, 高田敦, 堀米篤史: “ワイヤ干渉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.
- [6] 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: ワイヤ干渉駆動型超長尺多関節アーム SuperDragon 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 予稿集, pp. 2394-2395, 2024.
- [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を搭載した拡張型 Super Dragon における伸展・収縮動作の実現 “, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025 講演論文集, 1A1-N05, 2025.
- [8] A. Takata, and G. Endo: “Dynamics-Based Control and Path Planning Method for Long-Reach Coupled Tendon-Driven Manipulator “, Journal of Robotics and Mechatronics. Vol.36, No.1, 30-38. 2024