

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	円弧状に伸展するテレスコピックアームの提案
Title(English)	Proposal of Arc-shaped Telescopic Arm
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26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 26th SICE System Integration Division Annual Conference, , ,
発行日 / Pub. date	2025, 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) 2025 The Society of Instrument and Control Engineers

円弧状に伸展するテレスコピックアームの提案

○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)

Proposal of Arc-shaped Telescopic Arm

○ Koki HASEGAWA (Science Tokyo), Takahiro ARUGA (Science Tokyo),
and Gen ENDO (Science Tokyo)

Abstract: In the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, long-reach articulated arms are required for internal inspections. The prismatic arms in addition to rotary joints are particularly advantageous for their simple control and compact stowability. However, a conventional telescopic arm has workspace limitations because the arm extends only in a straight line, which limits their applicability. This paper proposes a telescopic arm with an arc-shaped, curved telescoping structure. We show that a drive method using flexible tubes with helical grooves enables extension along curved paths. To validate the approach, we built a prototype that extends along an arc of radius 700 mm, achieving an angular reach of approximately 150 degrees.

1. 緒言

福島第一原子力発電所の廃炉作業において、原子炉内部を調査するための調査機器を手先に備えた、長尺なロボットアームが求められている。これまで、原子炉格納容器 (Primary Containment Vessel, PCV) 内部の調査のため 10 m を超える長尺多関節アームが開発されてきた^{1), 2)}。これらのアームでは、原子炉内部までの複雑な経路を追従するという動作を実現するため、多くの回転関節が直列に配置された関節構造を有していた。

また、回転関節だけでなく、一部に伸縮自由度を有した多関節アームは、制御の簡便性と収納性の観点から有用である。筆者らのグループでは原子炉圧力容器 (Reactor Pressure Vessel, RPV) の底部の調査のため、回転関節からなるアーム長 10 m の Super Dragon の先端に、約 1 m から 8 m まで伸縮するテレスコピックアームを備えた、拡張型 Super Dragon を開発している³⁾⁻⁵⁾。RPV 底部に到達するためには、貫通孔を通じて PCV 内部に進入した後 5 m 以上上方へ伸展する必要があるが、この先行研究では手先の伸縮アームを収縮した状態で貫通孔を通過した後、RPV 底部の直下で伸展させるという動作を想定している。伸縮アームは目標位置までの伸縮を 1 自由度で行えることから、回転関節のみからなる長尺アームと比して簡便な制御が実現できる。また、長尺なアームの全てを回転関節で構成するよりも、収縮時のアーム長を小さくできることから、収納性の観点から有用である。

しかし、従来の伸縮アームは直線経路上の動作のみを対象としており、大きな障害物のある領域など、屈曲する動作が必要となる状況への応用は難しい。そこで、図 1 に示すように、円弧状に屈曲したテレスコピック構造を有する新たな伸縮アームを提案する。この提案する伸縮アームは一定の曲率からなる円弧状の経路に沿って伸縮が可能であり、図 1 のようにグレーチングなどの大きな障害物を回避しながら目標位置まで到達するような動作が可能になると考えられる。

本稿の目的は、円弧状に屈曲したテレスコピックアームを提案し、その動作を可能にするための駆動方法について議論した後、実機を用いた原理検証実験によって有効性を検証することである。

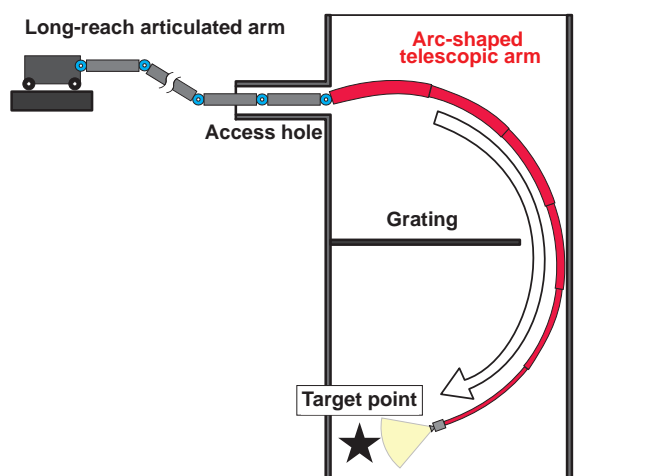


Fig. 1 Investigation using arc-shaped telescopic arm proposed in this research.

2. 駆動方法

提案するテレスコピックアームを実現するための駆動方法について考える。従来の直線上に動作するテレスコピックアームにおける動作方法としては、空圧によって駆動するものがあり、高出力かつ軽量なアームを実現できる利点がある⁶⁾。しかし、節間の空気漏れを防ぐため、各節の加工を精度良く行う必要があるが、提案するような屈曲した構造では難しいと考えられる。加えて、高精度な加工は CFRP や GFRP などの複合材料では特に難しく、金属製のパイプによってアームを構成する必要があり、軽量さを実現することは難しい。

また、はしご車と同様の原理で、ロープを引っ張ることで駆動する先行研究もある⁷⁾。しかし、円弧状のテレスコピック構造に適用すると、ロープと構造が干渉してしまうため、摺動摩擦が避けられず駆動不能となる可能性がある。また、この駆動方法においては、テレスコピック構造の各節の半径方向に小径なプーリを配置する必要があるため、一節の半径方向の寸法が大きくなり、アームの細径化を保った状態で多段化することが難しいという課題もある。

そこで本稿では、表面に螺旋状の溝を有する金属製フレキシブルチューブ (螺旋導管) をアーム内部に押し込むことで伸展させる駆動方法を採用する (図 2)。この駆

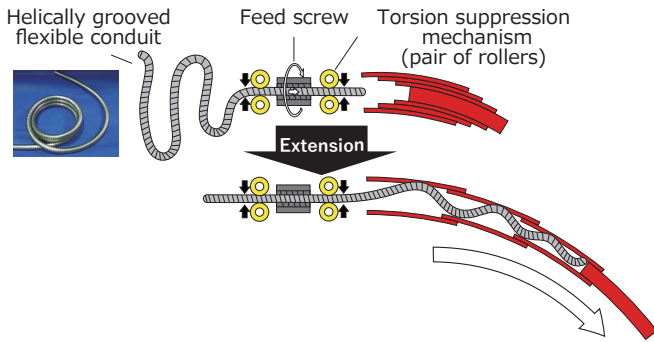


Fig. 2 Extending mechanism using helically grooved flexible conduit.

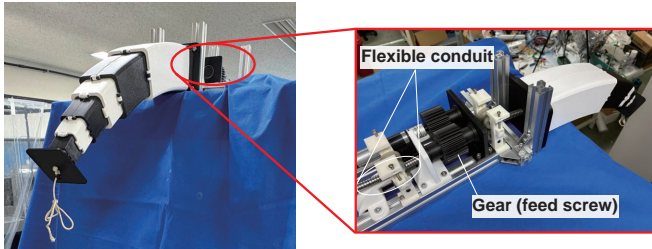


Fig. 3 Prototype arm developed in this research. Structure material: ABS and PLA. Pipe number: 9.

動方法は筆者らのグループで開発しているものであり⁸⁾、螺旋導管の表面の螺旋溝に嵌合するナットを回転させることで、送りねじの要領で螺旋導管を送り出し、アーム内部に押し込むことで伸展させるものである。また、ナットの回転による螺旋導管のねじれを防ぐため、一対のローラをナットの両端にそれぞれ配置し、螺旋導管を挟み込んでねじれを抑制している。この駆動方法を、提案する円弧状のテレスコピックアームに適用することを考えると、図2のように柔軟な螺旋導管であれば屈曲したテレスコピック構造にも押し込むことができると考えられる。

3. 試作機による原理検証実験

提案する円弧状のテレスコピックアームの有効性を示すため、半径 700 mm の円弧状に伸展する試作機を製作し、原理検証実験を行う。

製作した試作機を図3に示す。本試作機は最大進展時に半径 700 mm、角度 180 deg の円弧を成し、ABS 及び PLA からなる 9 つの節で構成される。また、伸縮アームの先行研究では各節が中空円筒で構成されているが^{6)–8)}、本試作機ではねじり方向への変位を防ぐため中空四角柱を円弧状に屈曲させた構造を採用した。駆動方法については前節で議論した螺旋導管を用いた手法を採用し、図3右に示すようにアームの根元に螺旋導管を押し込む機構を設置している。

実施した原理検証実験の様子を図4に示す。実験はアーム根元のギヤを等速回転させてアームを伸展させることで行った。図4に示すように、アームは約 150 deg 伸展させることができた。このように、円弧状に屈曲したテレスコピックアームを用いることで、曲線経路に沿いながら 1 自由度で伸展する動作が実現可能であるとわかった。

4. 結言

本稿では、福島第一原子力発電所の廃炉作業において、グレーチングなどの大きな障害物を回避しながら目標位

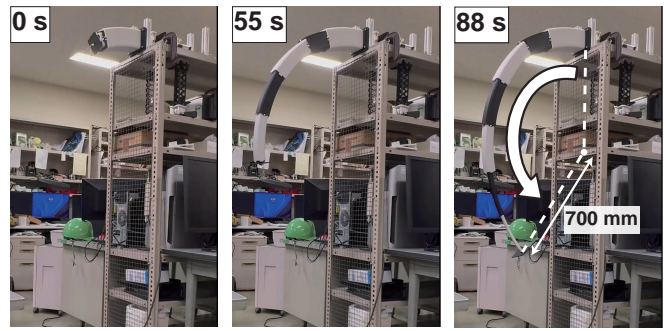


Fig. 4 Experiment to extend the arm by pushing in helically grooved flexible conduit.

置まで到達可能となる、円弧状に屈曲したテレスコピックアームを提案した。また、その動作を可能にするための駆動方法について、柔軟な螺旋導管による駆動方法の適用について議論した後、実機を用いた原理検証実験によって有効性を示した。

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。

参考文献

- [1] N. Okuzumi, K. Matsuzaki, and S. Okada: Development and Application of Robotics for Decommissioning of Fukushima Daiichi NPS by IRID, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 36.1, pp. 9–20 (2024), doi: 10.20965/jrm.2024.p0009.
- [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] 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 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).
- [4] 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).
- [5] 長谷川航希, 有賀高紘, 遠藤玄: 拡張型 Super Dragon における関節固定による姿勢安定性の向上, 第43回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2P1–02 (2025).
- [6] 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.
- [7] 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).
- [8] Y. Fujitsuka et al.: Elastic Telescopic Arm Extension/Contraction Mechanism using a Helically Grooved Flexible Conduit, 2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (2025), pp. 96–102.