

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8報：可搬質量の実験的検討-
Title(English)	Study on Elastic Telescopic Arm - No.8 : Experimental Study of Paylaod -
著者(和文)	藤塚祐二, 遠藤玄
Authors(English)	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 8 報：可搬質量の実験的検討 -

○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.8 : Experimental Study of Payload -

○ 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 investigating in-vessel structures and 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. We have developed an extension/contraction mechanism that uses a helically grooved flexible conduit as a feed screw, enabling an elastic telescopic arm to extend a maximum of approx. 8.6 m. In this paper, we studied the arm's payload using the mechanism.

## 1. 緒言

東京電力福島第一原子力発電所の廃炉加速化に向けて、原子炉格納容器（Primary Containment Vessel, PCV）や原子炉圧力容器（Reactor Pressure Vessel, RPV）内部の構造物や燃料デブリの状況把握が重要である。現在、X-6 ペネトレーションと言われるアクセス孔を通り PCV 内部や RPV 底部に進入可能な長尺アームの開発が進められている<sup>1)~3)</sup>。また、長尺アームの先端にカメラや超音波センサなどの調査機器を搭載した伸縮式アームを取り付け、さらなる長尺化により RPV 底部の状況把握を可能にする技術が求められている（Fig. 1）。このような伸縮式アームはメルトダウンにより RPV 底部に開いたとされる穴を通り抜けるために、細径で高伸縮かつ調査機器を運搬する程度の可搬質量を有する必要がある。

本研究室では、テレスコピック構造を有し、外力や自重により弾性屈曲する弾性テレスコピックアーム（Elastic Telescopic Arm, ETA）を用い、その伸縮機構や屈曲機構を開発してきた。伸縮機構では電線や光ファイバーの保護に使用される螺旋溝を有する導管（螺旋導管）を、送りねじとしてアーム内部に送り出す機構を開発した<sup>4)</sup>。この機構では先端側から構造材が送り出されるように手で補助することで水平（0 deg）、斜め（45 deg）、上方（90 deg）へ約 7 m 以上の伸展を実現した。現段階では外径約 13.8 mm の螺旋導管 10 m を用い、アームを上方へ最大 8.6 m まで伸展させることが可能である。本稿では、この機構を用いてアーム先端に重りを載せ、アームの可搬質量を実験的に調査する。

## 2. 螺旋導管を用いた ETA の伸縮機構

アーム（DRXF-10000, DENSAN）は構造材に Glass Fiber Reinforced Plastic（GFRP）を採用しており、高伸縮、細径な構造を実現している。このアーム内部に螺旋導管（セミインターチューブ SA-11N/SA-15N, ハギテック）を送り出すことでアームの伸展を実現している。

Fig. 2 に螺旋導管を用いた ETA の伸縮機構を示す。Fig. 2 より、モータの回転により内部に導管の螺旋溝に嵌合するめねじを持つギアが回転する。ギアの前後には螺旋導管の軸周りの回転を抑制する回転抑制機構

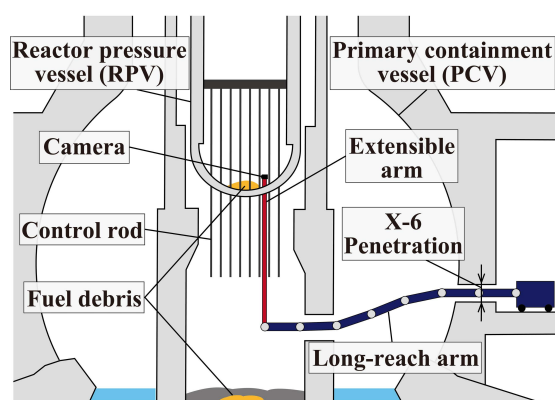


Fig. 1 Planned robotic RPV investigation in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant.

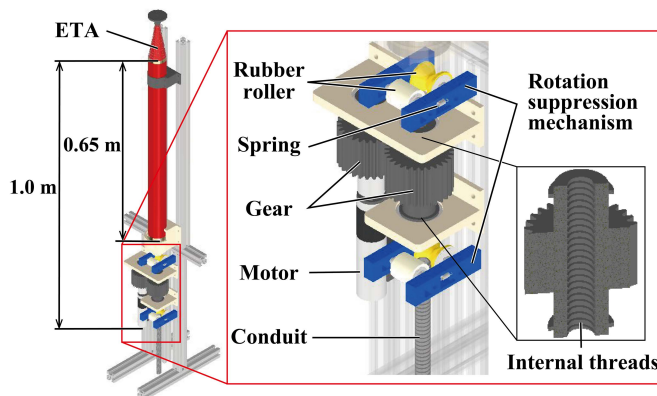


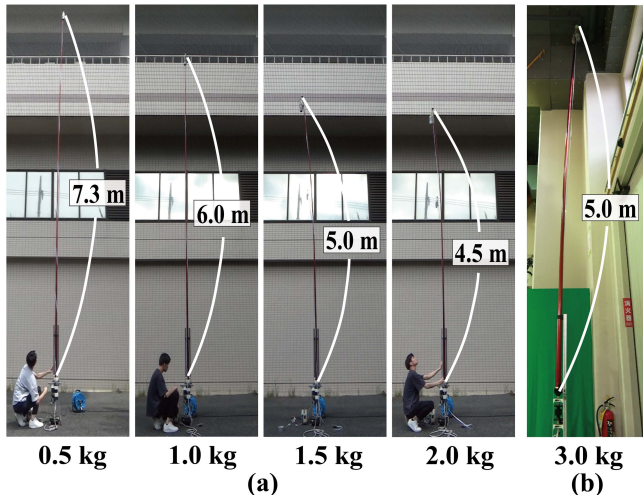
Fig. 2 Extension/contraction mechanism of the ETA using a conduit.

を取り付けている。回転抑制機構は回転自由なフラットなゴムローラと V 字溝付きゴムローラを利用し、ばねの力により導管を 3 点で押さえることで導管の回転を大幅に抑制することができる。モータには最大出力 90 W の電動工具用モータ（MM-26EH, 日報電機）を用い、ギアはカーボン短繊維強化ナイロン樹脂（Onyx, Markforged）を 3D プリンタ（Onyx One, Markforged）を用いて造形した。

**Table 1** Comparison between the ETA and similar extensible arms.

Arm name	Outer diameter [mm]	Weight [kg]	Max extension length [m] (*)	Max payload [kg]
ETA (conduit: $\varnothing$ 13.8 mm)	53	4.9	8.6 (13.2)	2.0
ETA (conduit: $\varnothing$ 18.8 mm)	53	4.7	5.3 (8.2)	3.0
14-stage telescopic pipe <sup>5)</sup>	97	-	7.3 (7.2)	2.0
Spiral Zipper <sup>6)</sup>	113.8	1.7	2.2 (-)	54
ZipperMast ZM-4 <sup>7)</sup>	240	7.0	2.5 (11.4)	3.5
RoboPole 5ESJ-200/800 <sup>8)</sup>	-	50	8.0 (4.0)	15
NK-9 <sup>9)</sup>	102.5	26	9.0 (3.9)	22

\* Extension-to-contraction ratio

**Fig. 3** Results of payload experiments. (a) When using  $\varnothing$  13.8 mm conduit. (b) When using  $\varnothing$  18.8 mm conduit.

### 3. 質量可搬実験

アーム先端に重りとして砂の入ったペットボトルを取り付け、上方への伸展/収縮実験を実施した。伸展長さは巻尺により測定した。

#### 3.1 外径 13.8 mm の螺旋導管による実験

0.5 kg ずつアーム先端に重りを取り付け、最大 2.0 kg の重りを載せ、外径約 13.8 mm の螺旋導管を用いてアームの伸展/収縮実験を実施した。

**Fig. 3 (a)** に外径 13.8 mm の螺旋導管による質量可搬実験の実験結果を示す。アームは伸展させすぎるとアームのしなりが大きくなり破壊したり、先端位置が不安定になったりしてしまうため、本実験ではこれらが起こらない範囲に留めた。

**Fig. 3 (a)** より、重りが増えると最大伸展長さが小さくなっており、1.0 kg 時で約 6.0 m、2.0 kg 時で約 4.5 m まで伸展したのち収縮が可能であった。一方で、外径 13.8 mm の螺旋導管を用いたアームの伸展ではアーム先端構造材円筒の外径が約 13.4 mm と断面二次モーメントが小さい。そのため、屈曲しやすく直線状に伸展させることが困難であった。より直線状に伸展かつ高可搬質量化するには、より太い螺旋導管を使用するとともに、アーム先端の構造材径を太くすることで改善できると考えられる。そこで、外径 13.8 mm よりも太い外径 18.8 mm の螺旋導管を用い、アーム先端構造材の直径を太くすることで実験を行った。

#### 3.2 外径 18.8 mm の螺旋導管による実験

アーム先端に 3.0 kg の重りを取り付け、外径約 18.8 mm の螺旋導管を用いてアームを上方に伸展/収縮させる実験を実施した。本実験ではアーム先端の断面二次モーメントを大きくするために、外径 18.8 mm の螺旋導管により押し出せる構造材よりもさらに 2 本構造材を抜いた。このとき、アーム先端構造材円筒の外径は約 23.3 mm であり、断面二次モーメントは約  $530 \text{ mm}^4$  から約  $2968 \text{ mm}^4$  に向上している。

**Fig. 3 (b)** に外径 18.8 mm の螺旋導管による質量可搬実験の実験結果を示す。本実験では、風によりアームが不安定な挙動を起こさないように屋内で実験を行った。

**Fig. 3 (b)** より、アームを約 5.0 m の高さまで伸展させたのち、収縮させることができた。外径 13.8 mm の螺旋導管を使用した時と比較して、アーム先端に取り付けた重りが大きく、荷重により螺旋導管がアーム内部で螺旋軌道を描いたり座屈したりする影響で、アームの振れ回り運動が生じてしまったが、アームのしなりが少なく、より安定した伸縮動作を実現できた。アームの振れ回り運動に関しては、回転抑制機構におけるゴムローラによる螺旋導管の締め付けを強くすることである程度は改善できると考えられる。

#### 4. 類似伸縮式アームとの比較

**Table 1** に ETA と類似伸縮式アームとの比較を示す。IRID の空圧駆動 14 段テレスコピックパイプ<sup>5)</sup> ではパイプ間の空圧シールの影響から傾いた状態での伸縮が難しく、zipper を活用したアーム<sup>6),7)</sup> は傾いた状態では曲げモーメントに耐えられず zipper のかみ合いがはずれてしまうと考えられる。一方で、ETA はある程度の荷重や自重を構造で受けつつ、傾いた状態での伸縮が可能である<sup>4)</sup>。また、コアテック社製 RoboPole<sup>8)</sup> やユアサ工機社製 NH/NK マストシリーズ<sup>9)</sup> と比較して、ETA は構造材一節の長さが 1 m 以下と短く、細径かつ軽量でありながら高伸縮なアームを実現しており、長尺アームとの統合の観点からも有用なアームであると考えられる。しかし、長軸方向における最大可搬質量が他のアームと比較して小さいため、さらなる改善が必要である。

#### 5. 結言

本稿では、螺旋導管を送りねじとして送り出す伸縮機構を用いて、ETA の可搬質量を実験的に調査した。その結果、外径 18.8 mm の螺旋導管による質量可搬実験では最大 3.0 kg の重りを約 5.0 m の高さまで伸展さ

せたのち収縮させられることが確認できた。

今後は可搬質量を向上させるとともに、ETA と長尺アームを統合し、アーム先端にカメラを搭載した状態でETA の伸縮実験を行うことで、ETA のさらなる有用性を示す。

## 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] 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.
- [2] T. Oka, N. Kimura, and S. Hirose. Truss Arm: The World's Longest Telescopic Arm with Highest Payload and with No Deflection for the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Advances in Mechanism and Machine Science*. Ed. by M. Okada. Cham: Springer Nature Switzerland, (2023), pp. 361–371.
- [3] 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.
- [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] 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.
- [6] F. Collins and M. Yim. Design of a spherical robot arm with the Spiral Zipper prismatic joint. *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. (2016), pp. 2137–2143. doi: 10.1109/ICRA.2016.7487363.
- [7] Obsima Technology AS. ZipperMast. [Online]. Available: [https://www.obsima.no/produkter/taktisk\\_elektronikk/mastsystemer-nyhet/zippermast](https://www.obsima.no/produkter/taktisk_elektronikk/mastsystemer-nyhet/zippermast). Accessed: Jul. 1, 2024.
- [8] Synthetech, Inc. CORETECH ROBOT POLE. [Online]. Available: chrome - extension : / / efaidnbmnnnibpajpcgiclfndmkaj/https://synthe.jp/wp-content/uploads/Cat\_RoboPoleV0021.pdf. Accessed: Jul. 1, 2024.
- [9] YUASA Co., Ltd. Portable Telescopic Mast Systems. [Online]. Available: <http://www.yuasakk.co.jp/eng/pole/nhnk.html>. Accessed: Jul. 1, 2024.