

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	異径螺旋導管による直動を行う弾性テレスコピックアームの開発
Title(English)	Development of Elastic Telescopic Arm Using a Different-diameter Spiral Tube for Linear Motion
著者(和文)	永井敏也, 高橋秀治, 木倉宏成, 遠藤玄
Authors(English)	Toshiya Nagai, Hideharu Takahashi, Hiroshige Kikura, Gen Endo
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2023講演論文集, , , 2A1-A20
Citation(English)	, , , 2A1-A20
発行日 / Pub. date	2023, 6

# 異径螺旋導管による直動を行う 弾性テレスコピックアームの開発

## Development of Elastic Telescopic Arm Using a Different-diameter Spiral Tube for Linear Motion

学 永井 敏也 (東工大) 正 高橋 秀治 (東工大)  
正 木倉 宏成 (東工大) ○正 遠藤 玄 (東工大)

Toshiya NAGAI, Tokyo Tech  
Hideharu TAKAHASHI, Tokyo Tech, takahashi.h.av@m.titech.ac.jp  
Hiroshige KIKURA, Tokyo Tech, kikura@lane.iir.titech.ac.jp  
Gen ENDO, Tokyo Tech, endo.g.aa@m.titech.ac.jp

A long arm that can be extended upward with a small diameter is required to investigate. We proposed extending the arm by inserting a flexible spiral tube in this study. Passing electric wires, pneumatic tubes, and optical fibers through the spiral tube makes it possible to drive actuators at the arm tip and communicate with the arm tip. In addition, the use of spiral tubes with appropriate outer diameters prevented buckling. The arm achieved a horizontal extension of 8.0 m and a vertical extension of 7.9 m.

**Key Words:** Long-reach arm, Telescopic structure, Inspection

### 1 緒言

東京電力福島第一原子力発電所の廃炉に向けて、炉内構造物や燃料デブリの状況把握が進められている。Fig.1 に発電所内部の様子を示す。近年の放射線量調査によると、格納容器 (Pressure Containment Vessel: PCV) の下部の線量が想定以上に上昇しておらず、圧力容器 (Reactor Pressure Vessel: RPV) の底部に燃料デブリが多く残っている可能性がある [1]。2018 年の東京電力の報告によると、圧力容器底部に破損があり、数十センチ程度の穴が開いていることが示唆されている。さらに、格納容器から圧力容器底部の狭い穴を通り圧力容器内部に進入する調査工法が提案されており、細径かつ調査機器を上方に運搬する程度のペイロードを有するアームが必要とある。具体的な仕様として、外径 100 mm, 収縮時長さ約 1 m という制約があり、その中で 7 m 上方に調査機器を運搬する必要がある [2]。

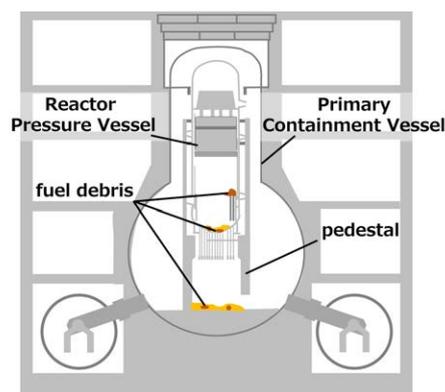
また、足場や壁面が整っていない環境下での調査を想定すると、正確に上方への伸展が必要となるアームよりも周囲の環境に合わせて、しなりながら伸展していくことが可能なアームが好ましい。本研究室で開発されている柔軟に屈曲することができる弾性テレスコピックアーム (Fig.2) を用いることによって、外部環境と干渉しながら伸展していくことが可能なアームが期待される。弾性テレスコピックアームの先行研究においては 4.1 m までの水平伸展を実現しているが、調査用のアームとしては十分な長さではない [3]。加えて上方への伸展を考慮すると推力不足が懸念される。

以上より、本研究では新たな伸展手法を提案し、上方に展開可能な細径かつ長尺なアームを実現することを目的とする。

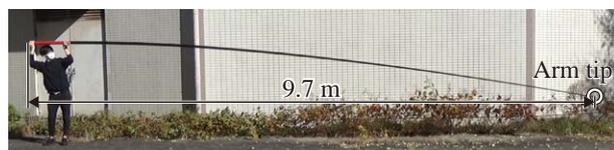
### 2 異径螺旋導管を用いた伸展手法の提案

細径アームの駆動を実現するために、アーム内部に複雑な機械要素を必要としない伸展手法が望ましい。また、上方伸展時の自重による圧縮力を受けた際においても収縮しない必要がある。そこで、柔軟な水道管やカメラスタンド等に使用されている螺旋導管に着目した。螺旋状の溝を有していることから本研究ではこの導管を螺旋導管と呼ぶこととする。螺旋導管は軸方向の大きな力を支えられる一方、径方向の力には柔軟に屈曲する構造体である。屈曲範囲は導管固有の最小曲げ半径によって決定される。

本研究では、柔軟な螺旋導管をアーム内部に押し込むことによりテレスコピックアームを伸展する手法を提案する。本手法は、アーム内部に複雑な機構を必要としないため、細径かつ軽量の



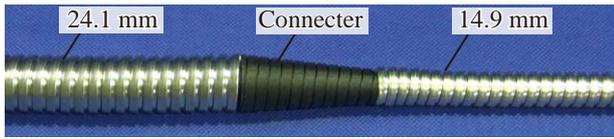
**Fig.1:** Distribution of fuel debris at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: Fuel debris is estimated to remain at the bottom of the RPV[1].



**Fig.2:** Cable towing device with elastic telescopic structure: (DANSEN-DRF-10000S)

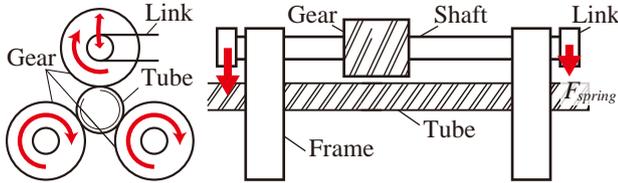
アームを実現できる。また、屈曲した導管の構造によって伸展時の圧縮力を受けることができる。

以前の研究において、導管外径がアーム内径に対して十分に小さいとき、導管が大きく屈曲し先端に推力が伝達されていなかった [3]。そこで本研究では、外径の異なる螺旋導管を 3D プリント製の部品で接続した異径螺旋導管 (Fig.3) を用いることにより、アーム内径が大きくなった際には外径の大きな導管をアーム内部に押し込むことができ、導管の座屈を抑制することができる。そのため十分な長さの伸展が実現できると考えられる。なお、本研究では螺旋導管の外径を 14.9 mm から 24.1 mm まで変化させている。



**Fig.3:** Tube with different diameters:

Tubes with diameter of 14.9 mm and 24.1 mm are joined by 3D printing part.



**Fig.4:** Extension mechanism:

This mechanism conveys the tube like a feed screw by gears that surround the outside surface of the tube.

### 3 伸展機構の開発

螺旋導管の繰出し手法として、螺旋導管の螺旋溝に嵌合する歯を持つギアを回転させることにより、送りネジのように導管を軸方向に繰出す手法を採用する [4]。本手法では、伸展時に導管に大きな圧縮力が加わることが想定されるが、送りネジのような繰出し手法を取ることで螺旋溝とギアの歯が噛み合うため、導管が滑らずにアームの伸展を行うことができると考えられる。

Fig.4 に伸展機構の簡易図を示す。一般的な送りネジのように螺旋導管の外周をギアが覆っていると異径螺旋導管の外径変化に対応できないため、3つのギアで導管を挟み込む手法を提案する。ギアの外周には螺旋導管の螺旋溝と嵌合する歯が備えられており、3つのギアが同期して回転することにより送りネジと同様の原理で導管を繰出すことが可能である。また、ギアの1つはリンクに搭載されている振りバネによって導管に押さえつけられており、導管の外径が変化した際にはギアが受動的に移動する。このように異径螺旋導管を繰出すことができる。

### 4 アームの動作実験

開発した伸展機構を用いて、水平伸展動作、上方への伸縮動作に加えて、外部環境とアーム先端が干渉している状態における伸縮動作の実験を行った。

#### 4.1 伸縮動作

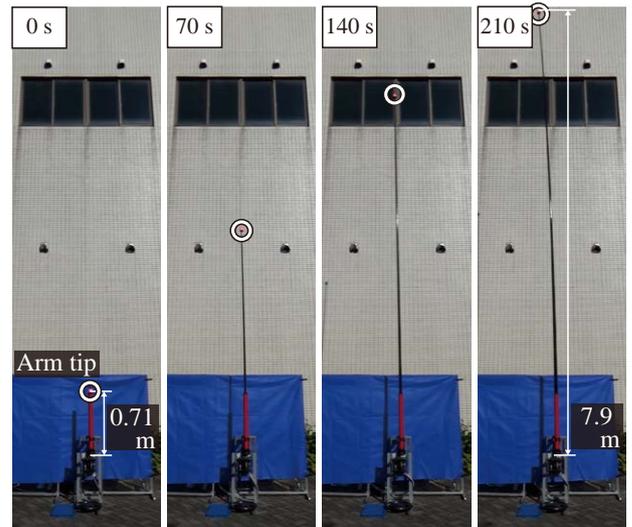
Figure 5 に上方伸展動作の様子を示す。アームは 0.71 m から 7.9 m まで、14 段の伸展動作を実現した。収縮実験においても、伸展動作と同様に 7.9 m から 0.71 m までの収縮動作を実現した。このときの伸縮比は約 11:1 である。伸展に 210 s、収縮に 170 s 要している。螺旋導管の外径を変化させずに上方へ伸展させた際の伸展量が 3.5 m であったため、異径螺旋導管を繰出してアームを伸展する手法の有効性を示すことができた。また、水平方向には 8.0 m 伸展することを確認した。

#### 4.2 外部環境との干渉

Figure 6 に外部環境との干渉実験の様子を示す。アーム上部にアクリルパイプを 30deg 傾けて固定し、アームの先端がアクリルパイプ左端と干渉するようにアームを伸展させる。このとき、アクリルパイプは内径 300 mm、長さ 500 mm であり、アーム根元とアクリルパイプ左端との距離は 4.0 m である。伸展するにつれてアームの先端がアクリルパイプ内壁に徐々にならびながら伸展している様子が確認された。

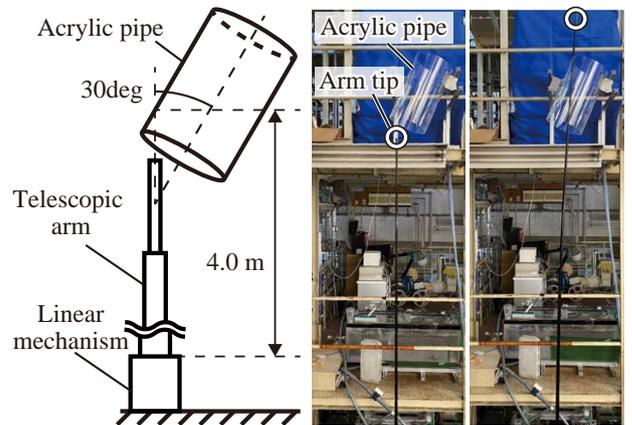
### 5 結言

本論文では、テレスコピック構造の形状が狭隘路、延いては上部の調査に適していることに着目し、柔軟なテレスコピック構造を持つアームを用いることで、外部環境と干渉した際に受動的な



**Fig.5:** Arm extension experiment:

The white circle shows the arm tip position.



**Fig.6:** Slope interference experiment:

Left: Overview, Right: Result of the experiment

The white circle shows the arm tip position.

屈曲が可能な、細径かつ長尺なアームを提案し、機構の検討、開発を行った。その結果、細径かつ柔軟なアーム特性を損なうことのない伸展手法を提案し、異径螺旋導管の螺旋溝を用いて直動駆動することで、長尺アームの伸縮、受動的な屈曲動作を実現し、提案手法の有効性を確認した。

### 謝辞

螺旋導管繰出し機構についてご教授くださった(株)安久工機田中隆様に感謝いたします。

### 参考文献

- [1] TEPCO. 燃料デブリ取り出しの状況. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., <https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/retrieval/> (Accessed on 01/31/2023).
- [2] IRID. 原子炉圧力容器内部調査技術の開発. International Research Institute for Nuclear Decommissioning, [https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2022/08/2022005\\_RPVnaibuchosa.pdf](https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2022/08/2022005_RPVnaibuchosa.pdf) (Accessed on 01/31/2023).
- [3] Takashi Fujioka, Gen Endo, Koichi Suzumori, and Hiroyuki Nabae. Proposal of tendon-driven elastic telescopic arm and initial bending experiment. In *2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 164–169, 2017.
- [4] 株式会社東芝. 蒸気乾燥器内部視点検査装置, 1996. 特許 2558942.