

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11報：鉛直5m,可搬5kgの伸縮動作の実現
Title(English)	
著者(和文)	塚原一裕, 有賀嵩紘, 遠藤玄, 志賀倫哉, 松村良太, 小西洸, 佐藤政幸
Authors(English)	Kazuhiro Tsukahara, Takahiro Aruga, Gen Endo, Tomoya Shiga, Ryota Matsumura, Hiroshi Konishi, Masayuki Sato
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.

弾性テレスコピックアームに関する研究

—第11報：鉛直5m、可搬5kgの伸縮動作の実現—

○塚原 一裕 (科学大) 有賀 嵩紘 (科学大) 遠藤 玄 (科学大) 志賀 倫哉 (Decom.Tech)
松村 良太 (Decom.Tech) 小西 洸 (IHI) 佐藤 政幸 (IHI)

In the internal investigation of the Reactor Pressure Vessel at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, a long arm capable of lifting the investigation equipment vertically upward is required. Elastic Telescopic Arm we are developing is an arm that can be flexibly bent and extended up to a maximum of 8.6 m. Previous studies could only lift up to 3.0 kg, which was insufficient for use in inspections. In this study, we improved the transportable mass of this arm and achieved 5.0 m extension with a payload of 5.0 kg by changing mechanisms.

1. 緒言

現在、福島第一原子力発電所の廃炉作業が進められている。廃炉作業を進めるうえで原子炉格納容器の内部状況を調査する必要があるが、格納容器内は高放射線環境下であり、人が内部に入り直接作業することは困難である。2018年時点において圧力容器下部には直径数百mm以上の穴があいていることが推定されており、この穴から圧力容器内にアクセス可能であると考えられている [1]。そこで図1に示すように格納容器外部から長尺アームを導入させ、圧力容器直下からさらに上方に伸展させることで調査を行う工法が検討されており、そのために外径100mm、収縮時長さ1m、伸展時長さ7m以上を実現する展開式アームが求められている [2]。これを実現するため、当研究室では弾性テレスコピックアーム [3] を開発している。

このアームを調査に用いる際、アーム先端にカメラやセンサなどの調査機器を搭載し上方に伸展させることが求められる。これを達成するため、弾性テレスコピックアームの可搬質量を向上させるための改良を行い、実験を行った。本稿ではこの弾性テレスコピックアームの可搬質量の向上について述べる。

2. 先行研究

弾性テレスコピックアーム (Elastic Telescopic Arm : ETA) とは、釣竿のように、複数の異径円筒が入れ子状になっているテレスコピック構造を有し、弾性屈曲が可能なアームである。これにより収縮時にはコンパクトに収納可能ながらも伸縮比を大きくすることができたり、外部環境に沿うように受動的に屈曲できるなど、簡素でありながら他の機構には無い著しい特長を持つ。現在までに鉛直上方へ最大8.6mの人手を介さない自動伸縮 [3]、先端付加質量3kg時における鉛直上方方向5mの自動伸縮 [4] が実現されている。

ETAの伸展方法の原理を図2に示す。ETAはテレスコピック構造内部に、外側に螺旋溝のついた金属製フレキシブルチューブ (以下、螺旋導管) を押し込んでいくことにより伸展させることができる。螺旋導管はこれに嵌合するナットをモータにより回転させることで、送りねじ同様の原理で押し出し/引込みが可能となる。螺旋導管の先端とテレスコピック構造の先端を接続することで、螺旋導管の引き込みに連動してETAの収縮を行うことができる。また、ナットの回転時にナツ

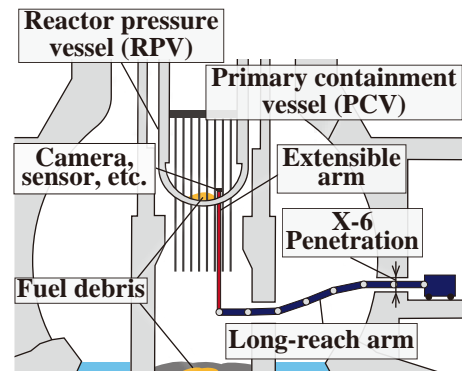


図1 Planned robotic RPV investigation and structure of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station.

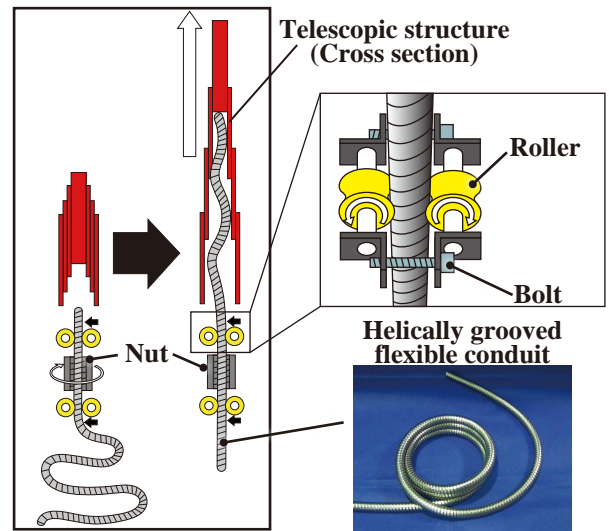


図2 Extension mechanism of ETA.

トと螺旋導管の摩擦により、螺旋導管が軸回りに回転するためにアーム内部での蛇行が起きてしまう。これにより螺旋導管を押し込む力が管壁を押し広げる方向の力に分解されてしまうため、可搬質量の低下につながる。これを抑制するため、ETAは螺旋導管を二つのローラで挟み込むことで螺旋導管の軸回りの回転を抑制する機構を備えている。これらの二つのローラはボルトにより締め付けられており、ボルトの締め具合の

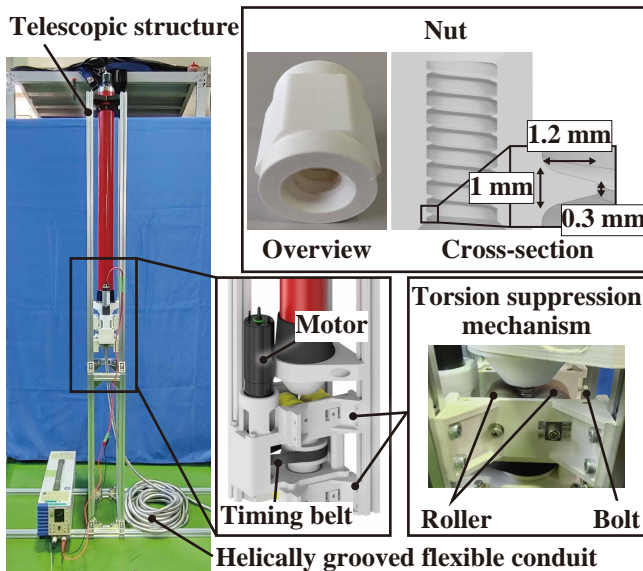


図3 Overview of an improved ETA.

調整により挟み込む力を調整可能である。

藤塚ら [4] は ETA を用いた可搬質量の測定実験を行った。これはアーム先端に重りを付加し、重りの質量に対して伸縮が可能な距離を実験的に求めるものである。なお、本実験ではアームの過伸展により装置の破損が起らないように伸展範囲を制限して実験を行っている。外径 13.8 mm の螺旋導管を用いた場合ではアーム先端荷重が 1.0 kg 時に 6.0 m、2.0 kg 時は 4.5 m の伸展と収縮、外径 18.8 mm の螺旋導管を用いた場合では先端荷重 5.0 kg で 5.0 m の伸展に成功しているが収縮動作は実現されていない。

3. 機構の改良

先行研究において判明している課題として以下の項目が挙げられる。

- 先端の荷重を増やした際にアームが大きいたわむことにより、テレスコピック構造のパイプ間の摺動抵抗が大きくなること。
- 先端荷重を増やした際に螺旋導管がナットに詰まること。

これらの課題に対し、次のように改良を行った。

- (1) アーム先端の径の細い節を数本削減することでアーム先端側の断面二次モーメントを大きくし、しなりにくくした。
- (2) ナットを回転させるトルクを向上した。
- (3) 螺旋導管がナットに引っ掛かりにくくするため、ナットの軸方向の長さを短くし、螺旋導管とかみ合う山数を減らした。
- (4) ナットのねじ山の破損を防ぐため、ねじ山の断面形状を修正した。

これらの点を改良した ETA を図 3 に示す。アーム部には GFRP 製のケーブル牽引具 (DRF-10000L, DENSAN) を使用した。先端側の節を抜いているため、構造上の最大伸展長さは約 8 m である。

螺旋導管を送り出すナットは POTICON フィラメント (NTL34M, 大塚化学) を用いた熱溶融積層式 3D プ

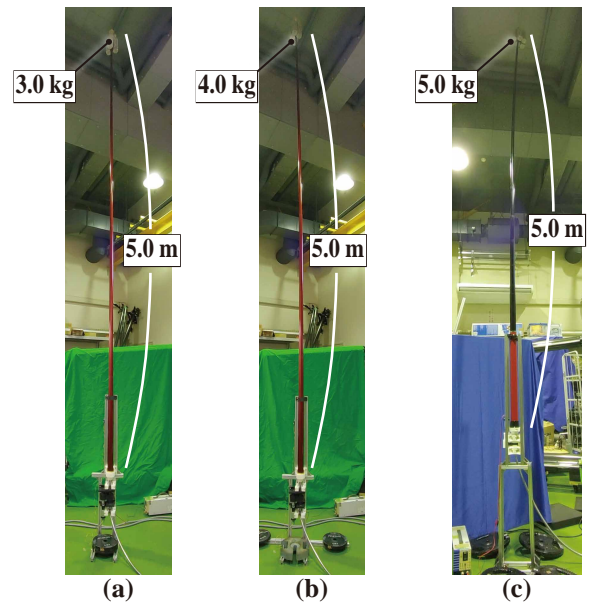


図4 Results of Payload experiment. (a) 5.0 m extension with payload 3.0 kg. (b) 5.0 m extension with payload 4.0 kg. (c) 5.0 m extension with payload 5.0 kg.

リントにより造形しており、これをモータ (MM-26EH, 日邦電機) によって回転させる。モータからの出力はタイミングベルトにより 1/3.2 に減速して伝達するようにし、ナットにかかるトルクを高めた。また、螺旋導管に噛み合うナットの歯数を 10 山に減らすことでナットと螺旋導管の接触面積を減少させた。さらにナットの断面形状を従来の三角形断面から台形断面に変更することでねじ山の剛性を高めた。

4. 可搬質量の測定実験

可搬質量の測定実験結果を図 4 に示す。先端荷重 3.0 kg、4.0 kg 時には改良点 (1) のみを改良したもので実験を行い (図 4(a)(b))、5.0 kg 時には (1)~(4) を改良して実験を行った (図 4(c))。この実験の結果、先端荷重 3.0 kg、4.0 kg、5.0 kg 全てにおいて 5.0 m の自動伸縮に成功した。また、5.0 kg 時には 5.0 m の伸縮を複数回行い、合計 10 回の動作に成功した。11 回目の収縮時にナットの空転が確認されたため分解して確認したところ、ねじ山がすり減っていることが確認された。螺旋導管との接触により摩耗したか、削れてしまったことが原因だと考える。

5. 結言

径の細い節を削減することで弾性テレスコピックアームのしなりを抑えたこと、螺旋導管を送り出すナットの形状変更、ナットにかかるトルク向上などの改良により、先端荷重 3.0、4.0、5.0 kg 付加時での 5.0 m の自動伸縮に成功した。また、5.0 kg 時には合計 10 回の伸縮を実現した。今後はさらに耐久性を向上させるべく、ナットの形状、歯数、材質を変更し最適な条件を検討していく。

謝辞 本論文の成果の一部は、経済産業省令和 6 年度開始「廃炉・汚染水・処理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（上部側面アクセス調査工法の技術開発、下部アクセス調査工法の技術開発）」にて実施したものである。ここに深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- [1] Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.: “福島第一原子力発電所事故発生後の原子炉圧力容器内・格納容器内の状態推定について.”, 2022. https://www.tepco.co.jp/decommission/information/accident_unconfirmed/pdf/20210719.pdf (Accessed on 05/20/2024).
- [2] International Research Institute for Nuclear De-commissioning: “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 05/20/2024).
- [3] Y. Fujitsuka, R. Kiyohara, T. Nagai, H. Takahashi, H. Kikura and G. Endo: “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.
- [4] 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8報: 可搬質量の実験的検討 -”, 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, 2F1-01.