T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title(English)	Development of Extended Super Dragon Articulated Robot Arm with a Linear Telescopic Boom
著者(和文)	永井 敏也, 鄭 冰, 髙田 敦, 木倉 宏成, 高橋 秀治, 遠藤 玄
Authors(English)	Toshiya Nagai, Hyo Tei, Atsushi Takata, HIROSHIGE KIKURA, Hideharu Takahashi, Gen Endo
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2022講演論文集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2022, 6

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

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

Development of Extended Super Dragon
Articulated Robot Arm with a Linear Telescopic Boom

○学　永井　敏也 (東工大)　　鄭　冰 (東工大)
学　髙田　敦 (東工大)　　正　木倉　宏成 (東工大)
正　高橋　秀治 (東工大)　　正　遠藤 玄 (東工大)

Toshiya NAGAI, Tokyo Tech, nagai.t.ah@m.titech.ac.jp
Bing ZHENG, Tokyo Tech, tei.h.ac@m.titech.ac.jp
Atsushi TAKATA, Tokyo Tech, takata.a.ac@m.titech.ac.jp
Hiroshige KIKURA, Tokyo Tech, kikura@lane.iir.titech.ac.jp
Hideharu TAKAHASHI, Tokyo Tech, htakahashi@lane.iir.titech.ac.jp
Gen ENDO, Tokyo Tech, endo.g.aa@m.titech.ac.jp

It is necessary to explore the bottom of the RPV in order to accelerate the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. A coupled tendon-driven articulated robot arm, Super Dragon, has been developed to deploy the investigation equipment into the containment vessel. In this paper, we developed an extended Super Dragon with a length of 15.4 m by modifying and integrating the telescopic boom so that it can be mounted on the Super Dragon. Experiments were conducted to raise the telescopic boom vertically and to lift and hold the deployed telescopic boom horizontally. We confirmed the basic movements required to explore the bottom of the RPV.

***Key Words*:** Coupled Tendon-driven Manipulator, Decommisioning, 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．近年の放射線量調査によると，Fig.1 に示す格納容器の下部の線量が想定以上に上昇しておらず，圧力容器 (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]．筆者らは長尺ロボットアームの手先の位置姿勢を制御しながら，カメラの SfM(Structure from Motion) 技術や超音波計測技術を用いて構造物の状況を把握するとともに，レーザー誘起ブレークダウン分光法 (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: LIBS) により元素組成分析を行い，燃料デブリの位置や成分を把握する遠隔探査手法を開発している．

本研究室では，格納容器内部に調査機器を運ぶことを想定して，Fig.2 に示す，ワイヤ干渉駆動型多関節ロボットアーム Super Dragon を開発している [2]．Super Dragon は全長 10 m，直径 0.2 m，全質量 300 kg であり，手先部は 10 kg の可搬質量を持つ．高さ 5 m の位置に圧力容器底部があることから，Super Dragon では長さが足りないため，当該部分の調査は不可能である．そこで，測定機器を上部に運搬する機構を備えたアームを Super Dragon 先端に搭載することで，アームの長さを補い，圧力容器底部の調査が可能となると考えられる．

以前の研究において，上方への展開機構を備えたテレスコピックブームが試作されている [3]．テレスコピックブームを Super Dragon に搭載するにあたって，振動によってブームが展開しロープが外れること，剛性が低いことが課題となると考えられる．そこで，本研究の目的はテレスコピックブームを改良し，Super Dragon に搭載した際にも安定して駆動できるようにすることである．加えて，テレスコピックブームと Super Dragon を統合して全長 15m のロボットアームを構成し，圧力容器底部の探査に向けた基本的動作を実現することである．

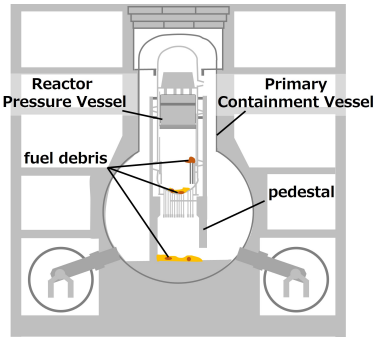

Fig.1 Distribution of fuel debris at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: Fuel debris is estimated to remain at the bottom of the RPV.

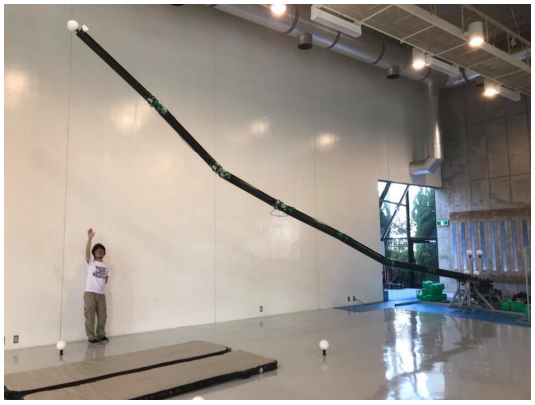

Fig.2 Long articulated robot arm - Super Dragon[2]

2　テレスコピックブームの改良

改良したテレスコピックブームを Fig.3 に示す．テレスコピックブームは全 4 本の CFRP パイプで構成されており，質量 6.3 kg，収縮時長さ 2100 mm，最大展開時長さ 6300 mm，展開部の最外径 82 mm，先端のパイプ外径 52 mm となっている．中央

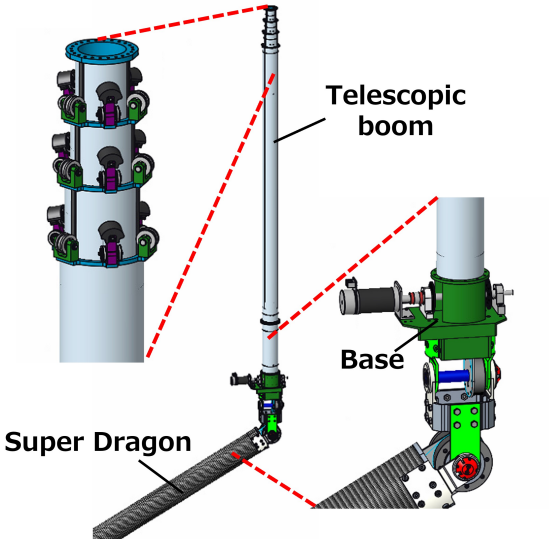

Fig.3 Mechanical design of the improved telescopic boom: Overview of the boom tip and the base structure with rope driving mechanism

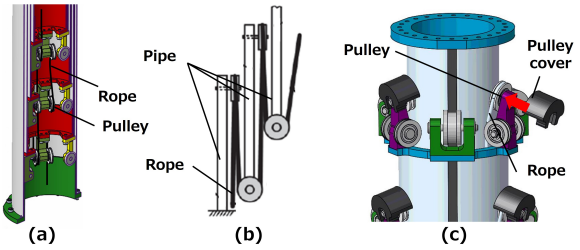

Fig.4 Wire pulley arrangement
(a) Cross section of the telescopic boom
(b) Concept of wire arrangement
(c) Installation of pulley cover

には観測機器のケーブルを通すための 20 mm の穴が開いている．駆動方式はワイヤ駆動であり，3 本の高強度化学繊維ロープが 120° に等配されている．Fig.4 に示すように，ロープ経路は根元と先端を往復して配置され，収縮時が経路長最大，最大展開時が経路長最小となっている．展開時にはロープを巻き取って展開させ，収縮時にはロープを送り出して自重により収縮させる．

テレスコピックブームと Super Dragon を統合するにあたり，振動によりブームが予期しない展開をすることが想定される．それに伴い，ロープが緩み，プーリから外れる恐れがある．そこで，ブーム先端に弾性体の一端を取り付け，もう一端を基部に固定することで，ブームに常に収縮力が働くように改良した．弾性体にはソフトスプリング特性をもつ天然ゴムを使用することで，展開して十分伸びた際でも張力が過大にならないよう工夫している．加えて，Fig.4(c) に示すように上部のプーリにカバーを取り付け，ロープが外れないようにしている．

また，テレスコピックブームのセンサ搭載部の剛性が課題となっている．従来のテレスコピックブームでは展開用のロープを張力制御するために張力センサを搭載しており，これを配置するために基部の剛性が低下していた．そこでロープ駆動方法を巻き取り用モータのエンコーダによる位置制御に変えて張力センサを廃し，大径のパイプ材で基部の剛性を向上した．これらの改良により，Super Dragon の先端にテレスコピックブームを取り付けた際にも信頼性高く駆動できると想定される．

3 拡張型 Super Dragon の動作実験

本章では拡張型 Super Dragon の機構構成と基本的動作実験について述べる．Super Dragon の先端 7 節目のリンクを取り外し，先端にテレスコピックブームを取り付け，圧力容器底部を探査するために必要とされる基本的動作を実験した．

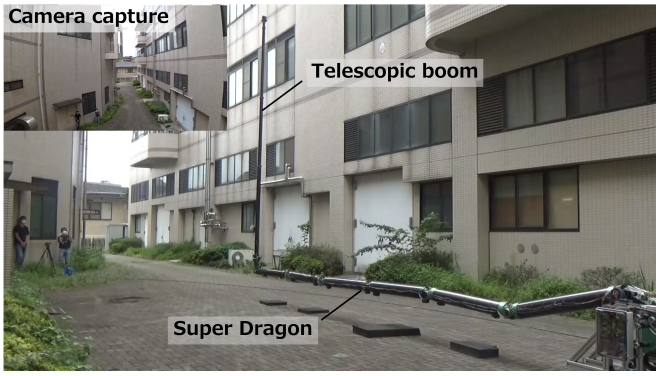

Fig.5 Extended Super Dragon Arm: The telescopic boom was deployed vertically, the arm was lifted and held horizontal.

3.1 機構構成

全長 9.1 m の Super Dragon の先端に展開時長さ 6.3 m のテレスコピックブームを取り付け，述べ長さ 15.4 m の拡張型スーパードラゴンを開発した．Super Dragon 先端の Yaw 関節の剛性が低く，テレスコピックブームを取り付けた際に関節位置制御が安定しなかったため，先端の Yaw 関節にはゴムを用いた補剛機構を取り付けている．補剛機構の復元力により，テレスコピックブームを取り付けて展開させた際でも安定した動作を実現した．

3.2 動作実験

圧力容器底部に到達するためには，格納容器内に水平に侵入し，ペデスタルから垂直上方に測定機器を運搬する必要がある．そこで，拡張型スーパードラゴンが水平に設置された状態からテレスコピックブームを垂直に立てる動作，およびテレスコピックブームを垂直に立てた状態で 2 段まで展開し，Super Dragon を駆動してアーム全体を持ち上げ，水平に保持する動作を検証した．Fig.5 に水平保持の実験の様子を示す．このときのアーム長さは 13.7 m であり，アーム先端のカメラで周囲環境を撮影している．この実験により，ペデスタルから圧力容器底部に侵入する姿勢が機構的に実現可能であることを確認した．

4 結言

Super Dragon を拡張し，アーム先端にテレスコピックブームを付加することで全長 15.4 m のアームを開発した．拡張型スーパードラゴンを水平に設置した状態から，テレスコピックブームを垂直に向けて展開した後，アーム全体を持ち上げて，水平保持する実験を行い，圧力容器底部の探査に必要とされる基本的動作を実現した．今後はテレスコピックブームを 3 段まで展開させて 15.4 m のアームを駆動させる予定である．

謝辞

本研究は，JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業 JPJA19P 19210348 の助成を受けた．

参考文献

[1] TEPCO. 燃料デブリ取り出しの状況. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., Retrieved January 30, 2021, https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/retrieval/(参照 2021-02-16).

[2] 遠藤玄, 髙田敦, 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, pp. 19–00075, 2019.

[3] 鄭冰, 難波江裕之, 鈴森康一, 木倉宏成, 高橋秀治, 遠藤玄. 原子炉圧力容器調査のための軽量テレスコピックブームの開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2021, pp. 2A1–O02. 一般社団法人 日本機械学会, 2021.