T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	廃炉作業におけるオンサイト元素分析のためのワイヤ干渉駆動型マニピュレータ用エンドエフェクタの開発
Title(English)	Development of an End-effector for Coupled Tendon-driven Manipulator for On-site Elemental Analysis in Decommissioning Work
著者(和文)	鎮目結稀, 髙田敦, 難波江裕之, 鈴森康一, 大場弘則, 赤岡克昭, 若井田育夫, 木倉宏成, 高橋秀治, 遠藤玄
Authors(English)	Yuki Shizume, Atsushi Takata, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, Hironori Ohba, Katsuaki Akaoka, Ikuo Wakaida, 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 (Tokyo Institute Research Repository)

廃炉作業におけるオンサイト元素分析のための ワイヤ干渉駆動型マニピュレータ用エンドエフェクタの開発

Development of an End-effector for Coupled Tendon-driven Manipulator for On-site Elemental Analysis in Decommissioning Work

○学 鎮目 結稀（東工大） 学 髙田 敦（東工大） 正 難波江 裕之（東工大）
正 鈴森 康一（東工大） 正 大場 弘則（原子力機構） 赤岡 克昭（原子力機構）
若井田 育夫（原子力機構） 正 木倉 宏成（東工大） 正 高橋 秀治（東工大）
正 遠藤 玄（東工大）

Yuki SHIZUME, Tokyo Tech, shizume.y.aa@m.titech.ac.jp, Atsushi TAKATA, Tokyo Tech., Hiroyuki NABAE, Tokyo Tech., Koichi SUZUMORI, Tokyo Tech., Hironori OHBA, JAEA, Katsuaki AKAOKA, JAEA, Ikuo WAKAIDA, JAEA, Hiroshige KIKURA, Tokyo Tech., Hideharu TAKAHASHI, Tokyo Tech., Gen ENDO, Tokyo Tech.

One of the purposes of exploration and inspection of nuclear facilities is to understand the distribution of nuclear materials in reactor. This is because if the elements can be characterized on-site, decommissioning can be carried out efficiently. Therefore, it is necessary to attach a sensor to the tip of the long manipulator to perform on-site elemental analysis. However, the positioning accuracy of the long-reach manipulator is not sufficient due to structural deformation and joint control errors. Therefore, we propose an end-effector that can passively adapt orientation of the measurement device to the subject, and actively generates linear motion to the subject. The end-effector consists of a linear mechanism and a follower mechanism. The end-effector is mounted on a coupled tendon-driven manipulator and operated for an experiment. As a result, we succeeded in performing elemental analysis by LIBS probe even though there was an error in the target posture.

***Key Words*:** Long-reach manipulator, Wire-driven, Coupled tendon-mechanism, Remote Center Mechanism, LIBS probe

1. 緒言

福島第一原発の廃炉では，格納容器内の燃料デブリの状況把握が必要である．オンサイトで燃料デブリの性状，核燃料物質の有無等が把握出来れば，取り出しや運搬方法において，より適切な取り扱いが可能となることから，燃料デブリ取り出しを効率的に行うことが可能となる．オンサイト元素分析法として，レーザー誘起ブレークダウン分光（Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: LIBS）分析法が開発された[1]．LIBS は，光ファイバによりレーザー光を導き，対象物体に照射し，そのプラズマ反射光を再び光ファイバで導いて分析することで元素分析ができる．また，先端の計測部では半導体などを用いないことから，高い耐放射線性を実現出来る．測定には，レーザー照射部であるプローブを計測対象に精度よく近づける必要がある．LIBS プローブを長尺ロボットアームの先端に取り付けることにより，廃炉内の核物質の分布状況を広範囲に調査することが出来るが，一方で重力によるたわみなどが原因で詳細な位置姿勢の制御は困難である．

そこで，直動機構と倣い機構によって手先位置姿勢誤差を吸収する機能を持つエンドエフェクタを開発し，ワイヤ干渉駆動型マニピュレータ Mini 3D CT-Arm（図１）[2]を用いた実験によりその有効性を確認したので報告する．

2. エンドエフェクタの開発

本稿では，測定する対象は，ある程度面積をもった平面と仮定する．LIBS プローブと対象物との距離は 10 mm，レーザー照射角度は 30 deg 以内である必要がある．そこで測定対象平面との距離誤差を許容する直動機能，LIBS プローブの姿勢誤差を許容し測定対象平面に対して LIBS プローブを垂直配置させる倣い機能の 2 つの機能を持つエンドエフェクタを提案する．

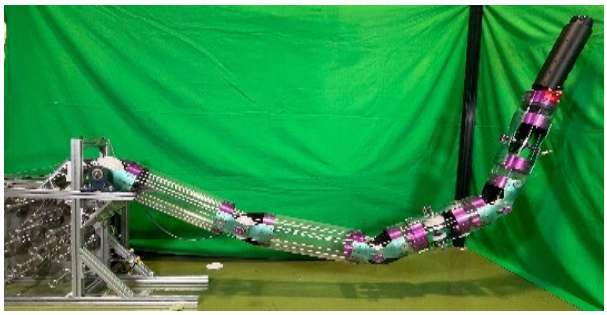

Fig.1 Coupled tendon-driven manipulator ‘Mini 3D CT-Arm’ with the proposed end-effector

2.1 リモートセンタ機構による倣い機構

姿勢誤差を吸収するため，Remote Center Mechanism を利用した．Remote Center Mechanism とは，回転軸が 1 点に交わることにより，位置は一定のままでその点周りの回転が可能である．したがって，LIBS プローブの焦点を Remote Center Mechanism の回転中心とすることで，角度誤差のみを吸収することが出来る．また Remote Center Mechanism を弾性支持した機構である Remote Center Compliance は，様々な機構が開発されており，最終関節の軸方向の回転に依らずに倣う方式のものにした[3]．製作したエンドエフェクタでは，測定対象面に押し付けることで，測定対象に倣う．

製作したエンドエフェクタを図２に示す．図２黄緑色が倣い機構で，図中橙色で示す LIBS プローブの焦点を中心として測定対象からの距離を一定にしつつ回転する．球面であるため固定された LIBS プローブは回転するが，測定対象からの距

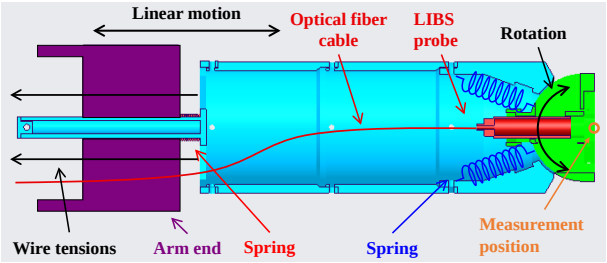

Fig. 2 Overview of the developed end-effector

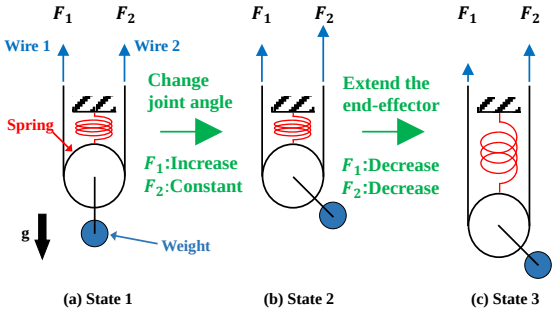

Fig. 3 Operation principle of the linear mechanism

離は一定とすることが可能である．また倣い機構は弾性体で支持されていることから先端が測定対象面から離れると中立姿勢に戻る．また，水色で示す部分では，倣い機構回転時に光ファイバの許容曲率半径約 150 mm を超えないようにスペースを空けている．光ファイバは長尺マニピュレータ体幹内部を通すことで基部に導かれる．Mini 3D CT-Arm の先端姿勢誤差は予備実験から最大 15 deg 程度になることから，これを吸収するため提案機構では最大 20 deg 回転可能とした．

エンドエフェクタは 3D プリンタ（Markforged 社製：Mark Two）とカーボン短繊維強化ナイロン樹脂を用いて製作した．

2.2 バイアス張力を用いた直動機構

2.1 節の倣い機構は測定対象面に倣うために，エンドエフェクタを押し付ける必要がある．そこでエンドエフェクタだけを直動させ測定対象面に押し付ける直動機構が必要である．

拮抗駆動系は，ワイヤにより駆動する関節にトルクを生成している．ワイヤは引張方向の力しか受けることが出来ないので，2 本のワイヤを用いて関節角度を制御している．さらに，ワイヤが弛まないようにバイアス張力を付加している．Mini 3D CT-Arm の制御では，先端関節のバイアス張力を各ワイヤの破断強度を超えない範囲において調整可能である．このことを利用し，直動機構の駆動は最終関節のバイアス張力を用いることを提案する．Mini 3D CT-Arm の最終関節を駆動するワイヤ 2 本をエンドエフェクタに接続し，バネによる反発力と拮抗させることでエンドエフェクタを伸縮することが出来る（図２）．

直動機構の駆動原理を図３に示す．状態 1 から状態 2 のようにバイアス張力を一定に保ったまま，張力F_1大きくすることで，直動機構を動かさずに，関節角のみを変化させることが出来る．次に状態 2 から状態 3 のように張力F_1, F_2の差を一定に保ったままバイアス張力を小さくすることで，関節角を変化させずに，直動機構のみを駆動することが出来る．

3. 統合計測実験

製作したエンドエフェクタを Mini 3D CT-Arm 先端に装備することで，天井面に張り付けたステンレス鋼板の LIBS による元素分析を行う統合計測実験を行った．

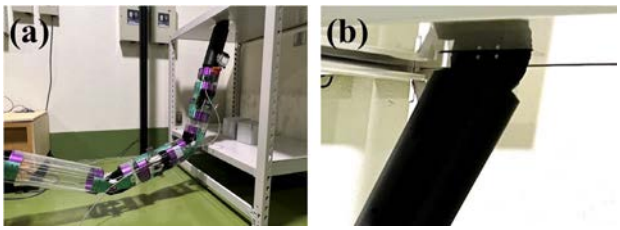

Fig. 4 Integrated measurement experiment for celling surface

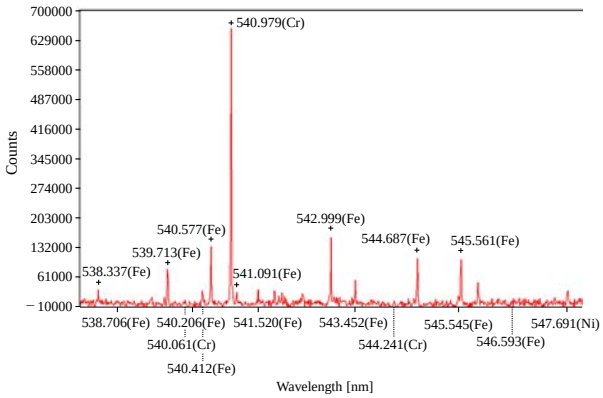

Fig. 5 LIBS spectrum for stainless steel on the ceiling surface

図 4(a)のように，エンドエフェクタをステンレス板に押し付けることで倣い機構が動作し，図 4(b)のようにステンレス板に対して密着していることが分かる．LIBS による分光分析の結果を，ステンレス鋼の代表的元素，鉄，クロム，ニッケルの発光スペクトル（波長 538-548 nm）範囲で表示する（図５）．鉄・クロム・ニッケル原子の発光スペクトルのピークが測定されており，元素分析に成功していることが分かる．

4. 結言

本稿では，オンサイト元素分析を長尺マニピュレータで可能にするためのエンドエフェクタを提案した．そして長尺マニピュレータに提案するエンドエフェクタを搭載して LIBS による計測実験を行い，実際に元素分析が出来ることを実証した．今後の課題として，開発したエンドエフェクタは直動機構の駆動時に，より根元側の関節トルクと干渉することにより，アームの姿勢に影響を及ぼしてしまうため，適切なワイヤ張力制御法を確立することである．

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 の助成を受けました．

参考文献

[1] Moriya, S., Iwanade, A., Ito, C., Blair, I., Sakka, T., and Ohda, H., “Development of a fiber induced breakdown spectroscopy instrument for analysis of underwater debris in a nuclear reactor core,” *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol.51, no.7-8, pp.930-938, 2014.

[2] 堀米篤史，山田哲也，洗津，広瀬茂男，遠藤玄，"ワイヤ干渉駆動型多関節３次元アームの開発（張力伝達率，リールの最大密度配置および先端位置精度の検討）"，日本機械学会論文集，vol.83，no.848, pp.16-270, 2017.

[3] Watson, C., “Remote center compliance system”, U.S.Patent, 4, 098, 001, 1978 7 4.