

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	ワイヤ干渉駆動型多関節アームによる 3次元空間上の経路追従運動
Title(English)	Path following Motion in 3D Space by a Coupled Tendon-driven Articulated Arm
著者(和文)	長谷川航希, 鎮目結稀, 難波江裕之, 遠藤玄
Authors(English)	Koki Hasegawa, Yuki Shizume, Hiroyuki Nabae, Gen Endo
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2024講演論文集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2024, 5

# ワイヤ干渉駆動型多関節アームによる3次元空間上の経路追従運動

## Path following Motion in 3D Space by a Coupled Tendon-driven Articulated Arm

○学 長谷川航希 (東工大) 学 鎮目結稀 (東工大)

正 難波江裕之 (東工大) 正 遠藤玄 (東工大)

Koki HASEGAWA, Tokyo Tech, hasegawa.k.ar@m.titech.ac.jp

Yuki SHIZUME, Tokyo Tech, Hiroyuki NABAE, Tokyo Tech

Gen ENDO, Tokyo Tech

A long articulated arm is being developed to enable decommissioning work at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. In decommissioning work, the end-effector of the arm need to approach to a target position inside the containment vessel. If a target path can be set in 3D space and the entire arm can follow the path, the volume to be passed through can be minimized. This path-following motion is effective in decommissioning work because it is suitable for passing through narrow areas and avoiding obstacles. In this study, we proposed a method for calculating the target posture in path-following motion that matches the tip position and the target path more accurately than in previous studies. Using the proposed target posture calculation method, we also conducted an experiment of path-following motion to demonstrate its effectiveness.

**Key Words:** Long-reach manipulator, Wire driven, Coupled tendon-driven mechanism, Path following

### 1 緒言

福島第一原子力発電所の廃炉作業を可能にするために長尺多関節アームの開発が進められている。本研究ではワイヤ干渉駆動を採用した多関節アーム Mini 3D CT-Arm, Super Dragon を開発している [1][2][3]。ワイヤ干渉駆動では各関節を金属製ワイヤやロープなどの腱で駆動し、かつ腱を駆動するアクチュエータをすべて基部に搭載することでアーム部を軽量化できる。また手先側の関節の駆動トルクを根元側の関節の駆動に干渉させることによって根元側の関節に大きなトルクを発生させることができる。これによりアームの自重を多数の腱の張力によって支えることができるため、長尺多関節アームの駆動法として適している。

廃炉作業においては多関節アームのエンドエフェクタを格納容器内の目標位置まで到達させる必要がある。しかし格納容器内に進入させるにはアクセス孔などの狭隘空間を通過し、障害物を回避しながら進入させる必要がある。ここで図1に示すように多関節アームの基部に直動機構を取り付け、3次元空間上に設定された目標経路をアーム全体で追従する動きを考える。ヘビのように先端が通った経路を体幹が追従すれば、手先を目標位置に到達させるまでにアームが通過する体積を最小にすることができる。そのためアクセス孔などの狭隘空間の通過や障害物の回避に適しており、多関節アームを用いた廃炉作業において有用である。

そこで本稿では Mini 3D CT-Arm に直動機構を導入し、ワイヤ干渉駆動型多関節アームによる経路追従運動の原理検証実験を行った。

### 2 Mini 3D CT-Arm の直動機構の開発

Mini 3D CT-Arm の直動を可能にするためにメカナムホイールを搭載した全方向移動が可能な台車を開発した。全方向移動型台車を採用する利点としては、全方向移動が可能のため進入口での基部の微調整が可能であること、繰り返し実験することが容易であることが挙げられる。

また経路追従を行うには台車の直動位置  $X_{car}$  の変化に応じてアーム全体が目標経路に沿うような目標姿勢  $\theta_D(X_{car})$  をとる必要がある。そのため台車の各 DC モータに搭載されたロータリエンコーダでホイールの回転角度を読みとりホイール径で乗ずることで  $X_{car}$  を計測することが可能である。図2に台車を取り付けた Mini 3D CT-Arm を示す。



Fig.2 Mini 3D CT-Arm with the fabricated mobile attached.

Arm length: 2400 mm. Arm diameter: 150 mm.

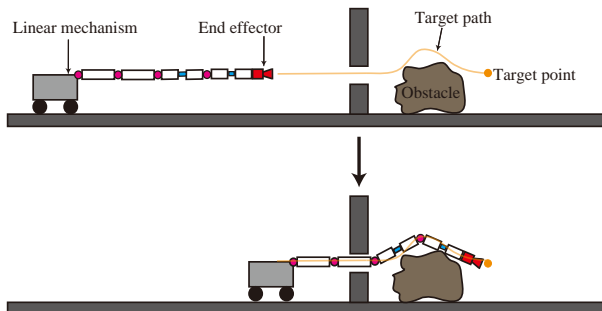


Fig.1 Following motion of an articulated arm on a target path.

### 3 経路追従のための目標姿勢の算出法

多関節アームは離散化された直線リンクと回転関節で構成されている場合折れ線形状となるため、連続曲線の目標経路に完全に一致することは不可能である。よって与えられた目標経路とアームの姿勢との誤差が小さくなるような目標姿勢をとる必要がある。従来の目標姿勢の算出法として目標経路を小区間に分け、小区間の偏角を関節角度に設定する方法がある [4]。しかしこの方法は手先位置と目標経路の誤差が大きくなるという課題がある。

よって本稿では以下に示すように、関節位置が目標経路上に最大限近づくように目標関節角を根元から決定し、手先位置と目標経路との誤差を小さくする目標姿勢の算出法を新たに提案する。まず図3に示すように、第1関節は常に目標経路上にあるとし、直交座標系における第1関節の座標を  $r_1$  とする。次に目標経路上で  $r_1$  より先端側に位置し、かつ  $\|r_2 - r_1\| = l$  を満たす点を第2関節の目標位置としてその座標を  $r_2$  とおく。ただし  $l$  はリ

リンク長である。このとき第1関節の目標関節角を式(1)で算出することで第2関節を目標経路上に一致させることができる。ただし第1関節における長手方向と第1関節の回転軸方向に直交した単位ベクトルを  $e_{o,1}$  とした。

$$\theta_{1D} = \sin^{-1} \left( \frac{(r_2 - r_1) \cdot e_{o,1}}{\|r_2 - r_1\|} \right) \quad (1)$$

これ以降の関節についても同様の方法で根元から順に目標関節角を算出する。すなわち、第  $i$  関節を式(2)で算出する。ただし第  $i$  関節と同方向の回転軸を有する関節の中で第  $i$  関節に最も近くかつ手先側に位置する関節の座標を  $r_i'$  とした。そのような関節がない場合には手先の座標を  $r_i'$  として扱う。基部の直動に応じて制御周期ごとに目標姿勢を更新することでアームを制御する。

$$\theta_{iD} = \sin^{-1} \left( \frac{(r_i' - r_i) \cdot e_{o,i}}{\|r_i' - r_i\|} \right) \quad (2)$$

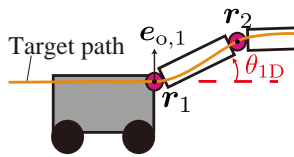


Fig.3 Proposed method for calculating the target joint angle with respect to the target path.

提案する算出法を用いた場合の手先位置の目標経路に対する一致精度を示すために、文献[4]で示される従来の算出法と提案する算出法を用いて経路追従運動の運動学シミュレーションをMATLABを用いて行った。目標経路を黒い点線、手先位置が描く軌道を赤い実線で図4に示す。図4に示すように、提案する算出法は従来の算出法と比して目標経路に対する手先位置の誤差を小さくすることが可能である。

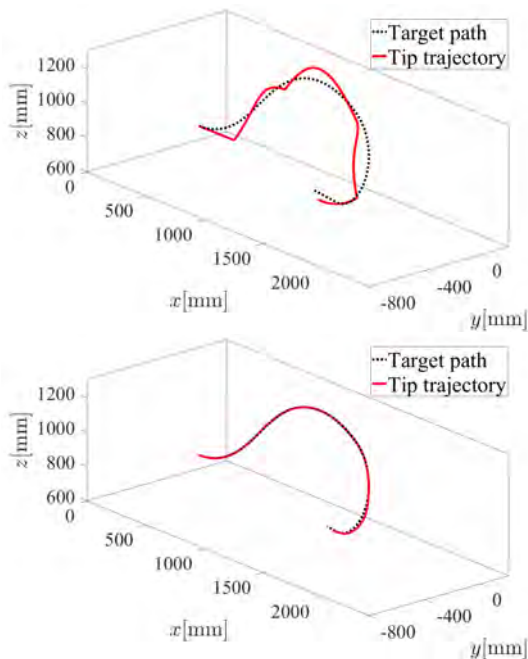


Fig.4 Trajectory drawn by tip position in kinematics simulations using MATLAB.

Top: Using conventional methods.

Bottom: Using proposed methods.

## 4 経路追従実験

提案する目標姿勢算出法を用いて、実際に Mini 3D CT-Arm の経路追従実験を行った。台車の直動位置  $X_{car}$  の位置分解能は 1 mm とした。目標経路としてピッチ方向にのみ曲がる経路、ヨー方向にのみ曲がる経路、ピッチ方向とヨー方向に同時に曲がる経路の3つの経路を設定し、それぞれに対し実験を行った。ただし図5に示すように、アームが水平姿勢をとった時に手先を上下に動かす関節駆動方向をピッチ方向、手先を左右に動かす関節駆動方向をヨー方向と呼称する。ピッチ方向とヨー方向に同時に曲がる経路に対する実験の様子を図5に示す。

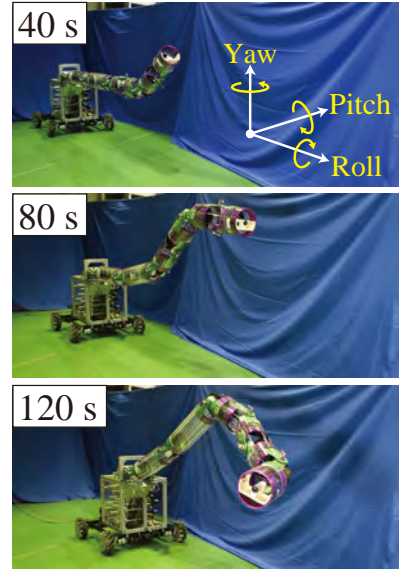


Fig.5 Experiments on path-following motion for paths that turn simultaneously in the pitch and yaw directions.

実験において得られた手先位置の軌道のデータから、各時刻における手先位置と目標経路との誤差を算出したところ、アーム径が 150 mm であるのに対し、全ての経路において手先位置は誤差範囲 120 mm 以内の追従精度を実現できていることがわかった。

## 5 結 言

本稿ではワイヤ干涉駆動型多関節アームの経路追従運動の原理検証実験を行った。経路追従運動を実装するにあたり、従来の方法と比較して目標経路に対する手先位置の一致精度が高くなるように目標姿勢を算出する新しい手法を提案した。実際に提案した目標姿勢算出法に基づく Mini 3D CT-Arm の経路追従実験を行い、120mm の誤差の範囲内で目標経路を追従できていることがわかった。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22H03668 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 広瀬茂男, 馬書根, “ワイヤ干涉駆動型マニピュレータの開発”, 計測自動制御学会文集, vol.26, No.11 (1990), pp.1291-1296.
- [2] 堀米篤史, 山田浩也, 洗津, 広瀬茂男, 遠藤玄, “ワイヤ干涉駆動型多関節 3 次元アームの開発 (張力伝達効率, 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 (2017), pp.16-270.
- [3] 遠藤玄, 高田敦, 堀米篤史, “ワイヤ干涉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, Vol.85, No.75(2019), pp.19-75.
- [4] 山田浩也, 広瀬茂男 “索状能動体の研究—多関節体幹による連続曲線近似法—”, 日本ロボット学会誌, Vol.26, No.1 (2008), pp.110-120.