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)	化学繊維ロープを用いたワイヤ干渉駆動型多関節アームの安定性解析
Title(English)	
著者(和文)	髙田敦, 難波江裕之, 鈴森康一, 木倉宏成, 高橋秀治, 遠藤玄
Authors(English)	Atsushi Takata, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, Hiroshige Kikura, Hideharu Takahashi, Gen Endo
出典(和文)	第39回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, Vol. , No. , pp.
Citation(English)	, Vol. , No. , pp.
発行日 / Pub. date	2021, 9
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

化学繊維ロープを用いたワイヤ干渉駆動型多関節アームの安定性解析

○髙田敦（東工大）　難波江裕之（東工大）　鈴森康一（東工大）
木倉宏成（東工大）　高橋秀治（東工大）　遠藤玄　（東工大）

1. 緒言

長尺アームは福島第一原発をはじめとする原子力施設内部の探査に有用である [1]，[2]．我々の先行研究では全長 10 m，10 関節，最大直径 194 mm と非常に長尺でありながら痩身な腱駆動長尺多関節マニピュレータ，Super Dragon が開発された (図 1)[3]．自重による巨大な曲げモーメントを支えるために，負荷が大きな根本側の関節ほど多くの腱で支えることができるワイヤ干渉駆動機構 [4] を用いている．それでも数 kN もの張力に耐える腱が必要であり，同径の鋼鉄製ワイヤより高強度で柔軟，軽量な化学繊維ロープを用いている．現段階では，準静的な速度で全ての関節を駆動を確認できている．

次なる課題はアーム姿勢の制御である．上で述べたように，化学繊維ロープによって強度的な問題は解決されたがロープの弾性による伸びが関節角制御の問題となる．化学繊維ロープの剛性は鋼鉄製ワイヤと比べても遜色ないが，大きな張力によって伸びが生じるためアクチュエータが止まっていても関節角が収束するか自明でない．

そこで本稿では関節角度が目標値に収束するかアーム全体の動力学的な解析を行う．ロープの伸びによって関節角が収束するかを扱うために，アクチュエータは目標関節角での姿勢を静的に支持する位置で動かないと仮定し，目標関節角から微小にずれた姿勢からの収束を対象とする．Super Dragon 実機と同じスケールの値を用いて，関節角の収束の是非を固有値配置と動力学シミュレーションで解析する．

2. ワイヤ干渉駆動型アームの力学

SuperDragon の動力学計算について記す．まず，絶対座標系の配置と関節角の正方向は図 2 の通りである．アームの運動方程式は，関節角を $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^{10\times1}$，関節トルクを $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{10\times1}$ として，式 (1) で表される．

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{H} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{G} = \boldsymbol{\tau} \tag{1}$$

なお，$\boldsymbol{M} \in \mathbb{R}^{10\times10}$ は慣性行列，$\boldsymbol{H} \in \mathbb{R}^{10\times1}$ はコリオリ力，遠心力による非線形項，$\boldsymbol{C} \in \mathbb{R}^{10\times10}$ は粘性抵抗の係数行列，$\boldsymbol{G} \in \mathbb{R}^{10\times1}$ は重力項である．粘性抵抗の係数行列 $\boldsymbol{C} \in \mathbb{R}^{10\times10}$ は各関節の粘性抵抗係数 (c_i) を対角成分とする対角行列である．解析では粘性を小さく見込んで $c_i = 10.0$ kgm^2/s とした．$\boldsymbol{C}$ 以外の式 (1) 中の値はアーム各部の重量，寸法，慣性テンソルを用いてニュートン・オイラー法で導出した．

続いて，ワイヤ干渉駆動機構の力学式を示す．腱とプーリの構成を図 3 に示す．青と赤色の 20 本の線が



図 1　全長 10 m 長尺多関節アーム: Super Dragon

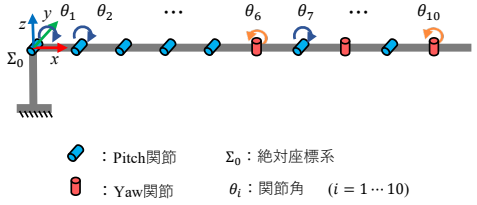


図 2　絶対座標系と関節配置

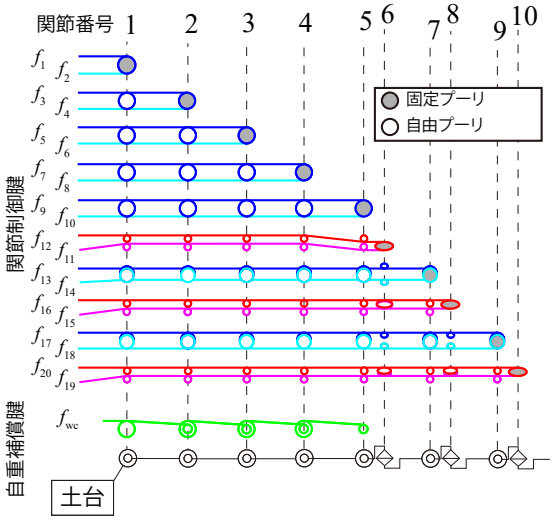


図 3　腱とプーリの配置

関節制御腱であり，これらの張力を $\boldsymbol{f}_{\mathrm{j}} \in \mathbb{R}^{20\times1}$ とする．関節制御腱それぞれの一端は駆動される関節の固定プーリに，もう一端は土台にあるアクチュエータに固定され，それらの中間で経由する関節では回転自由なプーリに巻かけられている．この巻きかけによって

アクチュエータ発生力が干渉して関節トルクが生成されるのがワイヤ干渉駆動機構である．緑色の線は自重補償腱を表し，その張力を f_{w} とする．この 1 本の自重補償腱と二重プーリの組み合わせによって，根本側 5 関節における重力トルクの大部分を 1 つのアクチュエータで支えている [5]．具体的な係数行列は先行研究の付録によるが [3]，関節駆動腱の巻かけ方向，プーリ半径から定まるプーリ係数行列 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{j}} \in \mathbb{R}^{10\times 20}$，自重補償プーリの係数行列 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{w}} \in \mathbb{R}^{10\times 1}$ を用いて，関節トルク $\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\theta})$ とワイヤの張力の関係は式 (2) で定式化される．

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{\mathrm{j}} & \boldsymbol{R}_{\mathrm{w}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_{\mathrm{j}} \\ f_{\mathrm{w}} \end{bmatrix} \tag{2}$$

最後に，腱の伸びを定式化する．姿勢 $\boldsymbol{\theta}$, アクチュエータ変位 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{A}} \in \mathbb{R}^{20\times 1}$ から計算でき，$(\boldsymbol{x}_{\mathrm{A}} - \boldsymbol{R}_{\mathrm{j}}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta})$ となる．続いて，関節制御腱の剛性を対角成分に持つ行列 $\boldsymbol{K} = \mathrm{diag}(k_i)$ $(i = 1 \cdots 20)$ を用いると，関節制御腱の張力 $\boldsymbol{f}_{\mathrm{j}}$ は式 (3) で表される．k_i は腱のひずみあたりの剛性係数をそれぞれの腱の長さで除することによって求めた．直径 2 mm ダイニーマロープのひずみあたりの剛性係数は我々の先行研究において測定された値をもとに 10.0×10^4 N とした [6]．

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{j}} = \boldsymbol{K}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{A}} - \boldsymbol{R}_{\mathrm{j}}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta}) \tag{3}$$

3. 安定性判別と動力学シミュレーション

安定性判別は関節角が目標関節角 $\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{ref}}$ に収束する場合を安定，そうでない場合を不安定とした．固有値解析の手順は，最初に目標関節角 $\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{ref}}$ の姿勢における重力 $\boldsymbol{G}$ を静的に支持するアクチュエータ変位 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{A}}$ を計算し，常に固定とする．続いて，目標姿勢において運動方程式 (1) を計算し，近傍での運動方程式を線形化する．微小変分 $\Delta\boldsymbol{\theta}$ として，$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{ref}} + \Delta\boldsymbol{\theta}$ を用いて，非線形な項 $\boldsymbol{H} + \boldsymbol{G}$ についてテイラー展開により近似線型化した結果が式 (4) となる．行列 $\boldsymbol{A}$ は式 (5) の通りである．収束性の判別は $\boldsymbol{A}$ を固有値分解し，得られた固有値を複素平面にプロットし，全ての固有値実部が負であれば微小変分 $\Delta\boldsymbol{\theta}$ は $\boldsymbol{0}$ に収束し，正のものがあれば収束しないと判定した．

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{pmatrix}\boldsymbol{\theta}\\ \dot{\boldsymbol{\theta}}\end{pmatrix} = \boldsymbol{A}\begin{pmatrix}\boldsymbol{\theta}\\ \dot{\boldsymbol{\theta}}\end{pmatrix} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{E} \\ -\boldsymbol{M}^{-1}\left(\boldsymbol{R}_{\mathrm{j}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{R}_{\mathrm{j}}{}^{\mathrm{T}} + \frac{\partial(\boldsymbol{H}+\boldsymbol{G})}{\partial\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{ref}}}\right) & -\boldsymbol{M}^{-1}\left(\boldsymbol{C} + \frac{\partial(\boldsymbol{H}+\boldsymbol{G})}{\partial\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{ref}}}\right) \end{pmatrix} \tag{5}$$

本稿では 2 通り解析結果を示す．解析のパラメータである目標関節角 $\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{ref}}$ と関節角の微小変分 $\Delta\boldsymbol{\theta}$ を 2 組用意し，それぞれ目標関節角 $\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{ref}}$ での姿勢における安定性判別と，初期値を $\boldsymbol{\theta}(0) = \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{ref}} + \Delta\boldsymbol{\theta}$, $\dot{\boldsymbol{\theta}}(0) = \boldsymbol{0}$ とした動力学シミュレーションを行った．

3.1 ケース 1

表 1 に示す目標関節角 $\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{ref}}$ と関節角の微小変分 $\Delta\boldsymbol{\theta}$ で解析を行った．図 4 の青線は目標関節角 $\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{ref}}$ のアーム姿勢を描画したものである． この姿勢での行列 $\boldsymbol{A}$ の固有値を複素平面にプロットしたものが，図 5 であり，固有値の実部は全て負で安定と判定された．続いて図 4 の赤線で描かれた姿勢を初期値として動力学シミュレーションした結果の関節角を図 6 に示す．5 sec の間に微小変分 $\Delta\boldsymbol{\theta}$ が無くなり，目標関節角 $\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{ref}}$ に収束している．固有値解析と動力学シミュレーションの結果に矛盾はなく，この目標姿勢には安定して収束することが分かった．

表 1　ケース 1 の目標関節角と微小変分

Joint number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
θ_{ref}[rad]	$\frac{\pi}{4}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta\theta$[rad]	0	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{\pi}{18}$	$\frac{\pi}{18}$

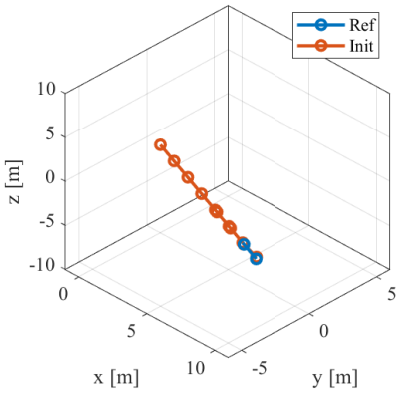


図 4 ケース 1 での目標姿勢と動力学シミュレーション初期値

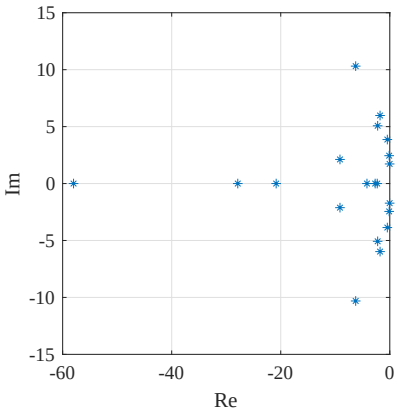


図 5　ケース 1 での固有値の配置．実部が負のものはない

3.2 ケース 2

表 2 に示す目標関節角 $\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{ref}}$ と関節角の微小変分 $\Delta\boldsymbol{\theta}$ で解析を行った．図 7 は図 4 と同様，青線が目標関節角，赤線が動力学シミュレーションの初期値である．行列 $\boldsymbol{A}$ の固有値配置を図 8 に示す．図中で赤で囲った 2 つの固有値の実部が正であり，収束しないと判定された．動力学シミュレーションによる関節角の推移が図 9 である． 5 sec の間に関節角度は発散し，目標関節角 $\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{ref}}$ に収束しない．固有値解析と動力学シミュレーションの結果に矛盾はなく，Super Dragon 実機のス

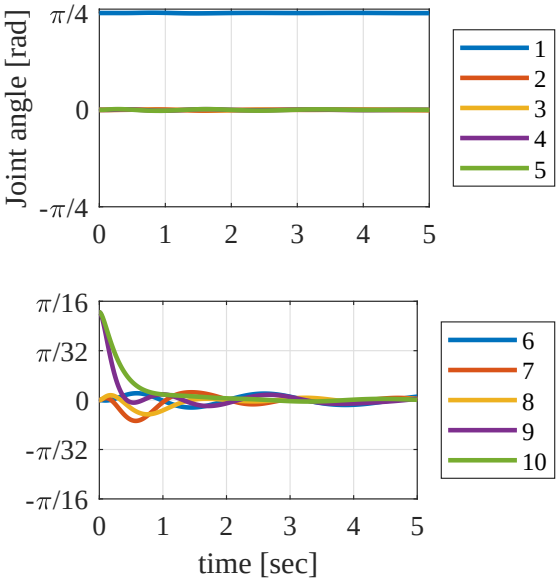


図 6　ケース 1 での関節角時系列は収束.

表 2　ケース 2 の目標関節角と微小変分

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
θ_{ref} [rad]	$-\frac{\pi}{10}$	$-\frac{\pi}{10}$	$-\frac{\pi}{10}$	0	0	$\frac{\pi}{4}$	0	0	0	0
$\Delta\theta$[rad]	0	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{\pi}{18}$	0

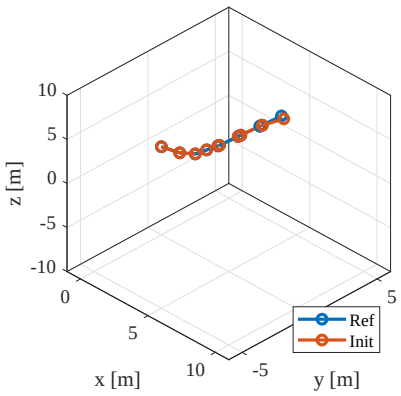


図 7 ケース 2 での目標姿勢と動力学シミュレーション初期値

ケールにおいては，入手可能な素材の中でも最も高強度な部類にある化学繊維ロープの剛性でも関節角が安定でない姿勢があることが示された．ケース 2 の姿勢はアーム体幹を上に持ち上げた状態であり，関節から見て各リンクが倒立振子のような状態である．倒立振子のように重力成分が関節角度を発散させる役割を果たしていると考えられる．

4.　発散抑制手法の考察

ケース 2 のように不安定な目標姿勢をアームの経路計画上，経由しなければならない場合の対応策について考察する．図 9 の動力学シミュレーションの結果から $\boldsymbol{\theta}(0) = \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{ref}} + \Delta\boldsymbol{\theta}$, $\dot{\boldsymbol{\theta}}(0) = \boldsymbol{0}$ から開始して $\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{ref}}$ に向

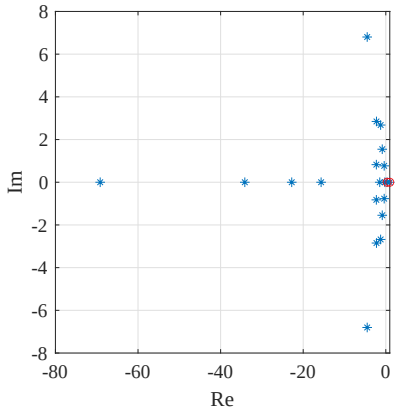


図 8 ケース 2 での固有値の配置．実部が負のものが 2 つあるため収束しない

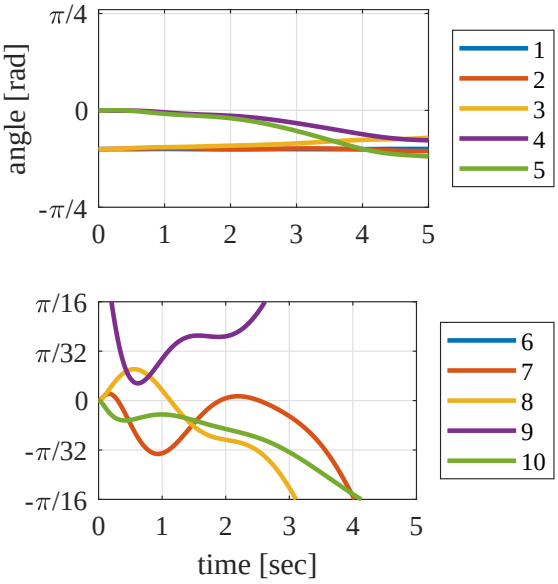


図 9　ケース 2 での関節角時系列は発散.

かうことはできないが，ほかの初期値では発散が抑えれる可能性がある．ここでは，恣意的ではあるが，図 8 の実部が正の固有値に対応する固有ベクトルを励起しないように $\Delta\boldsymbol{\theta}$ を修正することとする．式 (5) の行列 $\boldsymbol{A}$ を固有値分解する際に求まる固有ベクトルを $\boldsymbol{V}$ として，列ベクトル $\boldsymbol{b}$ を式 (6) のように変数変換する．次に，正の固有値に対応する列ベクトル $\boldsymbol{b}$ の要素を 0 に置き換える (式 (7))．固有ベクトルをならべる順番によるが，今回は 16 番目と 19 番目の固有値が発散の原因だったため，列ベクトル $\boldsymbol{b}$ の 16 番目と 19 番目の要素を 0 に置き換える．そして，式 (8) に従って固有ベクトル $\boldsymbol{V}$ を用いて元の次元に戻し，$\begin{pmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta}_S \\ \Delta\dot{\boldsymbol{\theta}}_S \end{pmatrix}$ を得る．

$$\boldsymbol{b} = \boldsymbol{V}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{0} \end{pmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{b}(16) = 0 \ , \ \boldsymbol{b}(19) = 0 \tag{7}$$

$$\begin{pmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta}_S \\ \Delta\dot{\boldsymbol{\theta}}_S \end{pmatrix} = \boldsymbol{V}\boldsymbol{b} \tag{8}$$

もとのケース 2 の微小変分と $\begin{pmatrix} \boldsymbol{\Delta\theta} \\ \boldsymbol{0} \end{pmatrix}$ と不安定な固有ベクトルを抑制した微小変分 $\begin{pmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta}_S \\ \Delta\dot{\boldsymbol{\theta}}_S \end{pmatrix}$ を比較したのが図 10 である．もとの初期値では $\Delta\theta_9$ 以外は全て 0 だったが，不安定な固有ベクトルを抑制した初期値では角速度も含めて値を持っている．これを動力学シミュレーションの初期値とした結果が図 11 である．図 9 に比べて発散が明らかに遅いことが分かる．このように目標関節角度への近づく方向を選択することで，発散しやすい関節角度をとらざるを得ない場合に，発散を抑えられる方向から近づくという戦略をとることができる．これはワイヤ干渉駆動型アームの先端経路計画や関節角度の軌道計画に役立つと思われる．

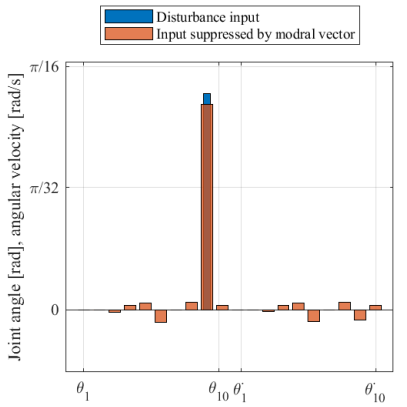


図 10　不安定な固有ベクトルを抑制した初期値

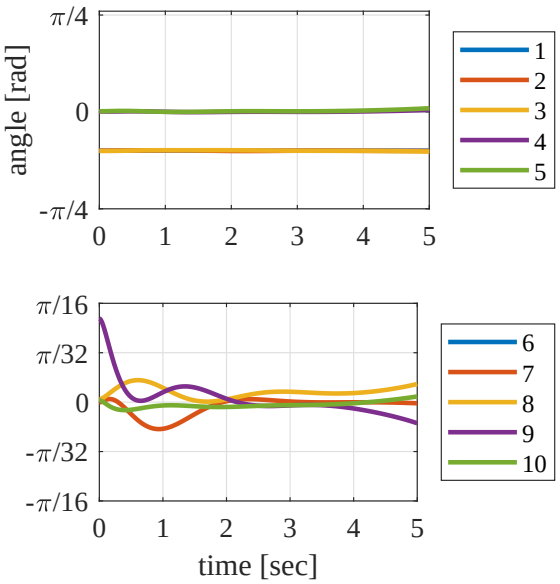


図 11　不安定な固有ベクトルが抑制された場合の関節角度

5.　結言

本稿では，全長 10 m スケールのワイヤ干渉駆動型アームについて，関節角度が目標値に収束するか固有値解析と動力学シミュレーションを行った．解析の結果，アーム体幹を水平より上に上げた姿勢では，固有値解析，動力学シミュレーションの結果は矛盾せず関節角は発散した．この発散を抑制するために，不安定な固有値に対応する固有ベクトルを励起しないように動力学シミュレーションの初期値を意図的に選択することで発散が遅延することを確認した．この方法は，関節角の不安定な挙動が想定される目標角度に対し，発散を抑えながら近づく制御戦略として期待できる．今後の課題として，解析結果の発散する挙動がアーム実機でも起こるのか調査する．また，発散する挙動の物理的な意味を考察する．

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] “福島第一原発「燃料デブリ」取り出しへの挑戦③～海外の協力も得て挑む技術開発の最前線,” `https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/debris_3.html`, (2021/07/08 閲覧).

[2] J. Chalfoun, C. Bidard, D. Keller, Y. Perrot and G. Piolain, “Design and flexible modeling of a long reach articulated carrier for inspection,” 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, USA, 2007, pp. 40134019, doi: 10.1109/IROS.2007.4399213.

[3] G. Endo, A. Horigome and A. Takata, “Super dragon: A 10-m-long-coupled tendon-driven articulated manipulator,” IEEE RA Letter, vol. 4, no. 2, pp. 934941, Jan. 2019, doi: 10.1109/LRA.2019.2894855.

[4] 広瀬茂男，馬書根 “ワイヤ干渉駆動型多関節マニピュレータの開発”，計測自動制御学会論文集，Vol. 26, No. 11, 1291/1296, 1990.

[5] A. Horigome, G. Endo, K. Suzumori and H. Nabae, “Design of a weight-compensated and coupled tendon-driven articulated long-reach manipulator,” 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Sapporo, Japan, 2016, pp. 598603, doi: 10.1109/SII.2016.7844064.

[6] A. Takata, G. Endo, K. Suzumori, H. Nabae, Y. Mizutani and Y. Suzuki, ”Modeling of Synthetic Fiber Ropes and Frequency Response of Long-Distance CablePulley System,” in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 3, no. 3, pp. 1743-1750, July 2018, doi: 10.1109/LRA.2018.2803204.