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)	ワイヤ干渉駆動型長尺多関節アームのマニピュレーション動作計画
Title(English)	Path Planning of Long-reach Coupled Tendon-driven Manipulator
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)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2022講演論文集., Vol. , No. , pp.
Citation(English)	Proceedings of the 2022 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Vol. , No. , pp.
発行日 / Pub. date	2022, 6

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

ワイヤ干渉駆動型長尺多関節アームのマニピュレーション動作計画

Path Planning of Long-reach Coupled Tendon-driven Manipulator

○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　木倉宏成（東工大）　正　高橋秀治（東工大）　正　遠藤玄（東工大）

Atsushi TAKATA, Tokyo Tech, takata.a.ac@m.titech.ac.jp
Hiroyuki NABAE, Tokyo Tech
Koichi SUZUMORI, Tokyo Tech
Hiroshige KIKURA, Tokyo Tech
Hideharu TAKAHASHI, Tokyo Tech
Gen ENDO, Tokyo Tech

Tendon-driven mechanism enables to realize a long-reach robot arm to inspect in industrial plants. However, a large elastic elongation of tendons due to gravitational joint torque makes joint control unstable. In this paper, we proposed a planning method to search for a path that includes only stable postures. The stability of the joint angle was formulated using the balance between tendon elasticity and gravitational torque. As a planning algorithm, Rapidly exploring Random Tree was used. The effectiveness of the proposal was demonstrated by manipulation of 5 kg payload by 10-m-long robotic arm.

***Key Words*:** Tendon-drive, Manipulation, Path planing

1　緒言

福島原発廃炉に向けては格納容器内部の探査が課題である．長尺多関節ロボットアームは，格納容器に体幹が通れるだけの孔を開けて侵入し，広い範囲を調査できると期待される．このような長尺なロボットアームの場合，全長が長いほど自重によって関節に負荷されるトルクが大きくなり，これを支える関節駆動機構が必要である．我々の先行研究では，ワイヤ干渉駆動機構を用いることで複数の腱に自重を分担させ，全長 10 m，体幹径 0.2 m，10 関節を持つ腱駆動ロボットアーム試作機 Super Dragon を実現した [1]．自重を支える腱には鋼鉄製ワイヤロープよりも高強度な化学繊維ロープを用いている．

本稿で取り組む課題はアームの姿勢制御に関するものである．自重負荷トルクは機構の耐荷重，腱の強度にとって重要であるだけでなく，腱の大きな弾性伸びを引き起こし，関節角制御の課題となる．具体的には，自重負荷トルクが関節角の三角関数で変化するため，特にアーム体幹が上向きの姿勢では関節角制御を不安定化させる．腱の伸びが全く無視できる場合では自重負荷トルクの不安定性は問題にならない．一方，長尺な腱駆動ロボットアームでは，全長が長いほど腱の剛性が低くなり，関節角制御の不安定性が顕在化する．

このような場合での関節角制御方式として，腱を巻き取るアクチュエータはローカルに変位制御され，アームは力のつり合いをほぼ保ったままゆっくりと動作させる方式を採用している．すなわち，アクチュエータが動いていないとき，アームの関節角は自重負荷トルクと腱の弾性力がつり合った場所，すなわち平衡点となる．本稿で注目する問題は，関節角目標値が安定な平衡点ではなく，不安定な平衡点であると，たとえその関節角目標値が平衡点となるアクチュエータ変位であっても，外乱によって，近接する別の安定平衡点に落ち込んでいき，意図した関節角目標値には収束できないことである．図 1 はペイロード 5 kg を搭載した状態で，全長 10 m ロボットアームの根元から数えて第 9 番目の関節のみを上に向けて動かす指令を与えたときの様子である．ところが，192 sec に第 8, 10 関節がロープの伸びにより意図せず左右に動き，制御不能となってしまった．我々の全長 10 m ロボットアームで腱として用いている化学繊維ロープは同径の鋼鉄製ワイヤロープに劣らない剛性を持っているにもかかわらず [2]，固有値配置解析の結果では，関節角体幹上向きの姿勢が不安定平衡点となってしまう [3]．

そこで本稿では，このような不安定平衡点となる関節角を避けながら目標手先位置に到達する経路計画法を提案する．ここではオンラインで目標値を生成しながらそれに追従するような制御ではなく，事前にオフラインで生成された関節角経路に沿って追従する制御を考える．また，時間を含んだ軌道ではなく，位置のみの経路を考える．

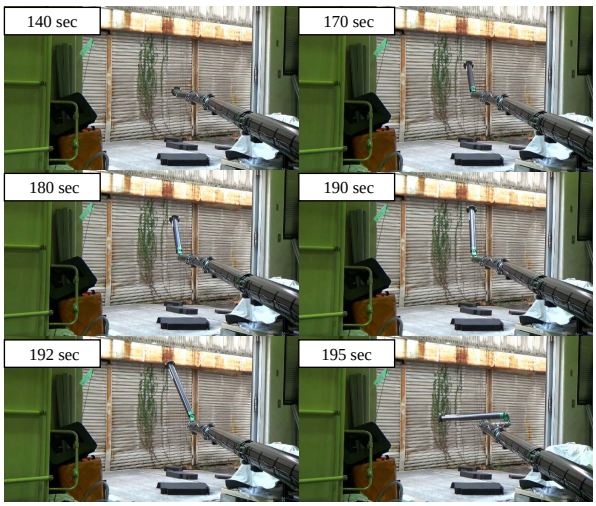

Fig.1 Joint angles were out of control on 192 sec.

2　ワイヤ干渉駆動型アームの力学と関節剛性

全長 10 m ロボットアームをモデルケースにワイヤ干渉駆動型アームの力学について記す．まず，腱の配置と関節配置を図 2 に示す．図の下部は 10 個の回転関節の配置を表しており，最も左側が土台である．本稿では，関節角は $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^{10\times 1}$，関節トルクは $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{10\times 1}$，自重負荷トルクは $\boldsymbol{g} \in \mathbb{R}^{10\times 1}$ と表記する．また，3 次元空間の位置などを表示する場合は，最も根本側の関節を原点とする絶対座標系から見たものである．

続いて，ワイヤ干渉駆動機構による腱張力と関節トルクの関係式を示す．図 2 の赤，青，緑の線が腱を示し，円となっている部分

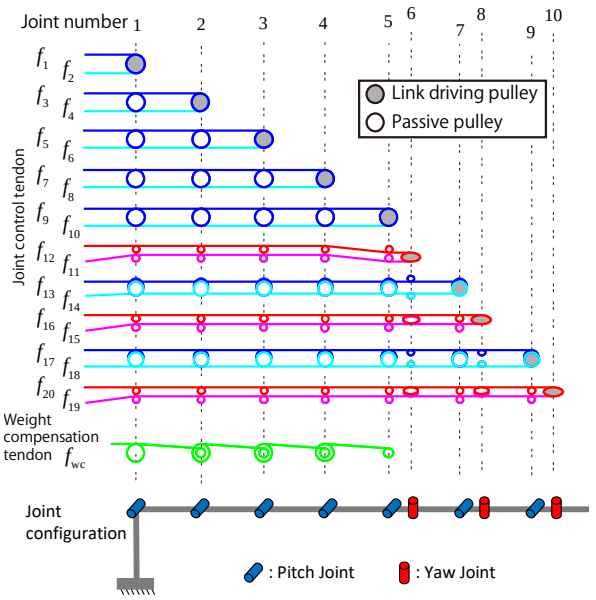

Fig.2 Joint configuration and arrangement of tendons.

はプーリに巻きかけられていることを表す．この巻きかけによってアクチュエータ発生力の干渉により関節トルクが生成される．青と赤の 20 本の線は関節制御腱と呼称し，張力を $\boldsymbol{f}_{\mathrm{j}} \in \mathbb{R}^{20\times 1}$ とする．これらの腱の一端は土台にあるアクチュエータで引かれ，もう一端は図 2 で網掛け円で示されたリンクと固定されたプーリに締結される．それらの中間で経由する関節では回転自由なプーリ (図 2 の中空円) に巻かけられている．緑色の線は自重補償腱と呼称し，その張力を f_{w} とする．この 1 本の腱と二重プーリの組み合わせによって，根本側 5 関節における自重負荷トルクの大部分を負担している [4]．関節制御腱の巻かけ方向と，それらが巻きかかったプーリ半径からプーリ行列 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{j}} \in \mathbb{R}^{10\times 20}$ が定義される．同様に，自重補償を行う腱についてもプーリ行列 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{w}} \in \mathbb{R}^{10\times 1}$ が定義される．プーリ行列の具体的な数値は先行研究の付録によるが [1]，これらを用いて関節トルク $\boldsymbol{\tau}$ とワイヤの張力の関係は式 (1) で定式化される．

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{\mathrm{j}} & \boldsymbol{R}_{\mathrm{w}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_{\mathrm{j}} \\ f_{\mathrm{w}} \end{bmatrix} \tag{1}$$

さらに，関節制御腱の腱張力と関節角，アクチュエータ変位 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{A}} \in \mathbb{R}^{20\times 1}$ の関係式を記す．まず，関節制御腱の腱の伸び量は関節角とアクチュエータ変位から $(\boldsymbol{x}_{\mathrm{A}} - \boldsymbol{R}_{\mathrm{j}}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta})$ 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 (2) 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．関節制御腱に用いている直径 2 mm 化学繊維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 [2]．

最後に，関節剛性を定式化する．アクチュエータ変位 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{A}}$ は固定され，関節角は平衡点な位置 $\boldsymbol{\theta}_0$ にあるロボットアームに対して，外力による関節トルク $\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{ext}}$ によって関節角が $\Delta\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{b}}$ だけバックドライブして再びつり合った状態を考える．関節剛性は外力による変形のしにくさであるから，バックドライブ変位 $\Delta\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{b}}$ を関節剛性に乗じたトルクが外的関節トルク $\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{ext}}$ と平衡する．バックドライブ変位による腱の弾性力は式 (2) から $-\boldsymbol{K}\boldsymbol{R}_{\mathrm{j}}{}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{b}}$ である．この腱の弾性力にプーリ行列を乗じたものが関節トルクであるから，つり合いの式は式 (3) となり，関節剛性は $\boldsymbol{R}_{\mathrm{j}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{R}_{\mathrm{j}}{}^{\top}$ となる．

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{j}} = \boldsymbol{K}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{A}} - \boldsymbol{R}_{\mathrm{j}}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta}) \tag{2}$$

$$\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{ext}} - \boldsymbol{R}_{\mathrm{j}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{R}_{\mathrm{j}}{}^{\top}\Delta\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{b}} = 0 \tag{3}$$

3 関節角安定性の指標

経路計画を行うには，腱弾性と重力のバランスで支配される関節角の安定性をなんらかの指標で表す必要があるが，小澤によるエネルギの観点からの解析が既にある [5]．本稿では，位置エネルギを $U(\boldsymbol{\theta})$，自重負荷トルクを $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{\theta}}$，腱の弾性エネルギを $E(\boldsymbol{\theta})$ と表記する．まず，関節角の平衡点 $\boldsymbol{\theta}_0$ では式 (4) が成り立つ．さらに安定平衡点であるとき，ポテンシャルの和 $U + E$ は $\boldsymbol{\theta}_0$ で極小値となっている．すなわち，式 (5) が成り立つ．

$$\frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{\theta}} + \frac{\partial E}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{0} \tag{4}$$

$$(U(\boldsymbol{\theta}_0 + \Delta\boldsymbol{\theta}) + E(\boldsymbol{\theta}_0 + \Delta\boldsymbol{\theta})) - (U(\boldsymbol{\theta}_0) + E(\boldsymbol{\theta}_0)) > 0 \tag{5}$$

U，E をそれぞれ $\boldsymbol{\theta}_0$ 近傍で 2 次の項までテイラー展開したものと式 (4) を式 (5) に代入整理すると，式 (6) が得られ，左辺の $\Delta\boldsymbol{\theta}$ の 2 次形式が正定値であれば関節角が安定であることが分かる．それは，式 (7) に示す行列 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{s}}$ の固有値 $\boldsymbol{\lambda} \in \mathbb{C}^{10\times 1}$ の実部が全て負であることに等しい．本稿では，この固有値 $\boldsymbol{\lambda}$ の実部の中で最大なものを安定化指数 $S = \max(\mathrm{real}(\boldsymbol{\lambda}))$ とする．

$$\frac{1}{2}\Delta\boldsymbol{\theta}\left(\boldsymbol{R}_{\mathrm{j}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{R}_{\mathrm{j}}{}^{\top} + \frac{\partial \boldsymbol{g}}{\partial \boldsymbol{\theta}_0}\right)\Delta\boldsymbol{\theta} > 0 \tag{6}$$

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{s}} = -\left(\boldsymbol{R}_{\mathrm{j}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{R}_{\mathrm{j}}{}^{\top} + \frac{\partial \boldsymbol{g}}{\partial \boldsymbol{\theta}_0}\right) \tag{7}$$

4 逆運動学を組み合わせた関節角経路探索

本稿で提案する経路生成は，不安定平衡点となる姿勢を避けてゴール地点まで手先位置を辿り着かせる関節角の経路を探索するものである．障害物を回避しながら経路計画を行う場合では，スタート地点からゴール地点の間にある様々な地点について，周囲の障害物と干渉なく手先位置をその地点に位置決めできる姿勢が存在するか逆運動学で判別し，干渉なく到達できる地点をスタートからゴールまで連ねる．障害物との干渉ではなく，関節角の不安定な姿勢を回避できるかを逆運動学で判別しながら経路を探索する．

逆運動学については中村による手法 [6] を用いて，式 (8) の収束計算を行う．ここで，手先位置 $\boldsymbol{x}$，目標手先位置 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{ref}}$，ヤコビ行列 $\boldsymbol{J} \in \mathbb{R}^{3\times 10}$，ヤコビ行列の擬似逆行列 $\boldsymbol{J}^{+}$，微小定数 κ である．$\Psi(\boldsymbol{\theta})$ は冗長な解を絞る評価指標である．同じ手先位置に対して複数ある逆運動学解のうち，関節角が安定かつ，腱張力が過大とならないものを解に選ぶ．そのため，収束計算の各ステップで，前章の安定性指標 S と，張力低減の指標として関節制御腱の張力最大値 $\max(f_{\mathrm{j}})$ を計算し，2 種の指標を閾値より小さくする関節角の更新値 $\delta\boldsymbol{\theta}$ を計算する．具体的な $\Psi(\boldsymbol{\theta})$ は式 (9) となる．ここで，S_{limit} は安定性指標の閾値，f_{limit} は張力低減の閾値である．β_1，β_2 は評価関数のスケールを合わせるための正の定数であり，今回は $\beta_1 = 1/100$，$\beta_2 = 1/10000$ とした．

$$\delta\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{J}^{+}\kappa(\boldsymbol{x}_{\mathrm{ref}} - \boldsymbol{x}) + (\boldsymbol{E} - \boldsymbol{J}^{+}\boldsymbol{J})\frac{\partial \Psi}{\partial \boldsymbol{\theta}} \tag{8}$$

$$\Psi = -\beta_1 \max(S - S_{\mathrm{limit}}, 0) - \beta_2 \max(\max(\boldsymbol{f}_{\mathrm{j}}) - f_{\mathrm{limit}}, 0) \tag{9}$$

この冗長逆運動学を多数の地点に対して解くことで，その地点が到達可能であるか判別する．関節制御腱の張力最大値 $\max(f_{\mathrm{j}})$，安定性指標 S を計算し，それぞれが閾値 $f_{\mathrm{limit}}, S_{\mathrm{limit}}$ を下回っているかで判定を行う．そして，経路探索アルゴリズムを用いて，腱張力が設計強度を超えない，かつ，安定な姿勢が存在する手先位置の経路を探索する．探索アルゴリズムには種々のものがあるが，次章では RRT(Rapidly exploring Random Trees) を採用した．

5 全長 10 m ロボットアームの経路生成と実証実験

前章の手法を用いて，全長 10 m ロボットアームによるペイロード 5 kg のマニピュレーション動作を計画した．スタート姿勢とゴール位置は図 1 の実験と同様とした．すなわち，図 3 に示す通り，スタート姿勢は全ての関節が 0 deg であり，スタート手先位置の座標は [10, 0, 0] m，ゴール地点の座標は，図 1 の実験で不安定化した第 7 関節のみを真上に向けた場合の手先位置座標

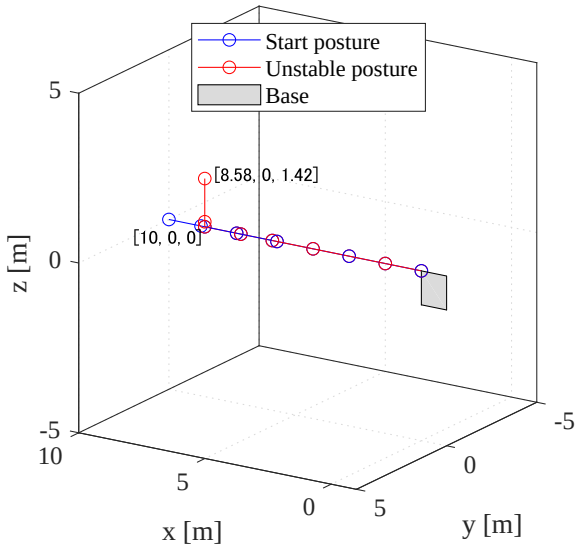

Fig.3 Goal point and start posture.

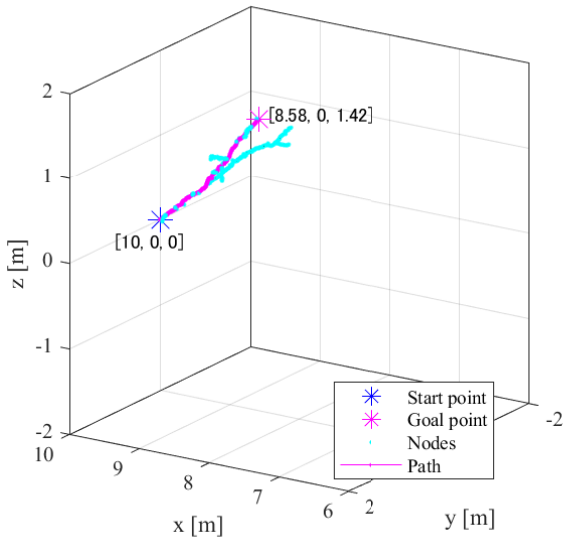

Fig.4 Graph of tip point.

である [8.58, 0, 1.42] m とした．RRT のノードが到達可能であるか判定に用いる閾値としては，張力低減の閾値を 3 kN とした．また，関節角安定性 S の閾値 S_{limit} は 20 とした．安定性指標である固有値実部の力学的意味を考えると $S < 0$ が漸近安定となるため $S_{\mathrm{limit}} \leq 0$ が望ましい．しかし，今回のゴール位置を達成する姿勢の中で $S < 0$ となる姿勢は存在しないことが分かっている．そのため，図 1 の実験から経験的に 20 と定めた．

図 4 が RRT によって探索した経路を手先位置で描画したものである．水色の点は，安定性指標，張力低減指標ともに閾値以下の姿勢が存在する手先位置である．これらをノード (節) として，水色の点の集合はいくつかの枝分かれがある木構造である．その中でも，ピンク色で上書きしたノードの連なりがゴールまで到達した経路である．この経路上のノード数は 283 であった．

計画された経路を用いて全長 10 m ロボットアームにて目的手先位置に到達できるか実証を行った．理想的にはそのまま関節角目標値とすべきである．しかし，運用上，実装上の都合から実験では下記に挙げる制限を受ける．

- 関節角経路は浮動小数点で計算されたが，実機の制御ソフトでは関節角目標値を 1 deg 刻みで指令する．
- 実験では安全に配慮し，操作者が 1 つの関節角ずつ目標値を変更する．
- 実験時間の観点から経路に含まれる 283 ノードの関節角を全て指令することはできない．

そのため，探索結果のノード系列を 1 deg 刻みに離散化し，さらに代表的な 8 ノードを用いた．その経路を図 5 に示す．実験では操作者が周囲との干渉などに注意しながら十分静的に関節角を更新した．図 6 に関節角の推移を示す．図 7 はロボットアームの動作を撮影した動画から 8 箇所抜き出し並べたものである．図 5 の関節角経路に関節角を一致させた時刻の様子を並べている．そのときの時刻は図 6 において黒縦線で示している．ロボットアームの挙動を見ながら操作者の判断で関節角の目標値を 1 つずつ更新したため，経路 (図 5) と時系列 (図 6) では見た目が大きく異なる．しかしながら，最後の目標値まで腱の破断と関節角の不安定挙動が起こることなくマニピュレーション動作を終えることができた．実験後に関節角推移から安定性指標の推移を計算したものを図 8 に示す．全ての時刻において安定性指標 S は $S_{\mathrm{limit}} = 20$ を下回っている．従って，実機での関節角軌道は完全に計画経路を追従するものではなかったものの，安定性指標としては不安定挙動が起こらない軌道であった．結果として，第 9 関節だけを安直に動かすだけでは到達できなかったゴール地点に経路計画を用いることで到達できることを実証した．

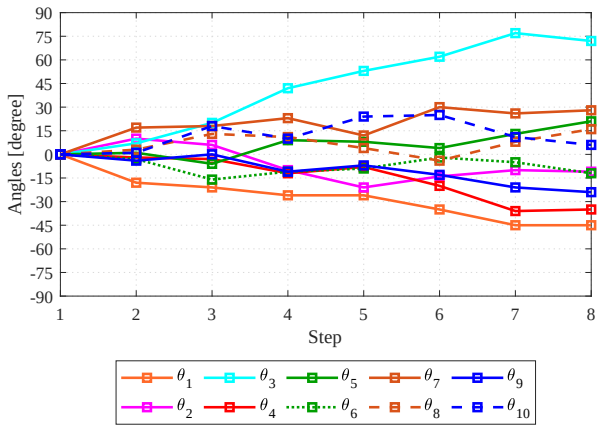

Fig.5 Selected joint angle path for an experiment.

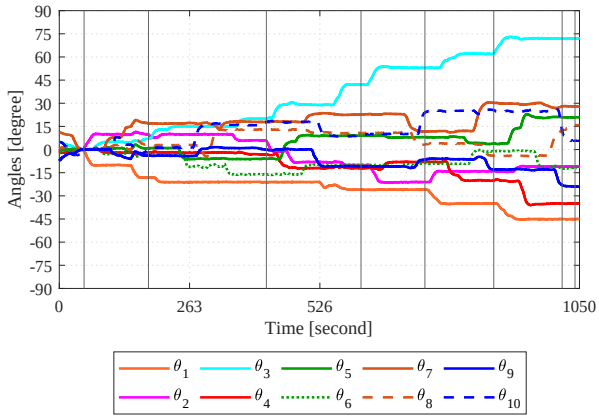

Fig.6 Time course of joint angles.

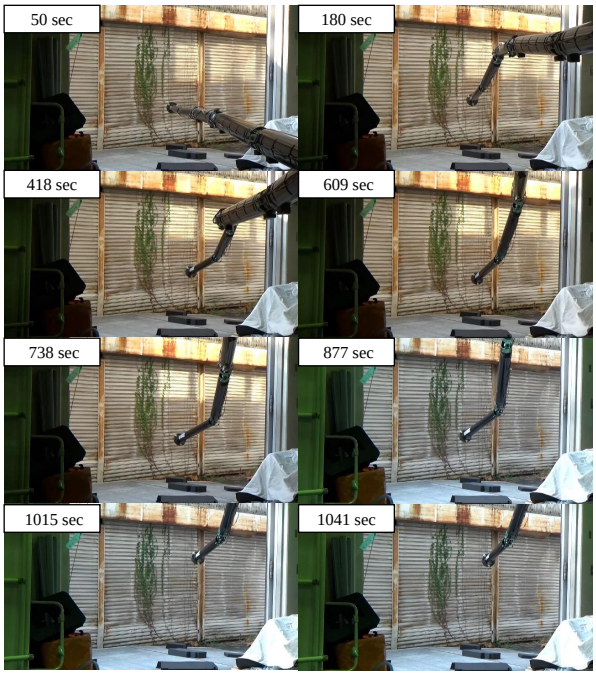

Fig.7 Manipulator successfully reached the target point.

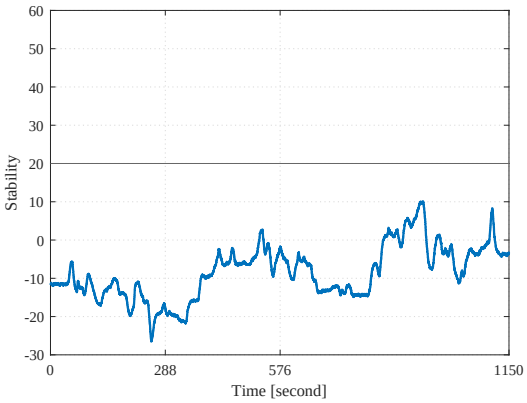

Fig.8 Time course of stability.

6 結言

本稿では，全長 10 m のワイヤ干渉駆動型長尺多関節アームについては自重による負荷トルクによって鋼に匹敵する高剛性腱であっても，任意の姿勢を支えるには十分でなく，重力による不安定性が腱弾性に優っている姿勢は不安定平衡点となってしまい，その姿勢を維持できないことを指摘した．そこで，このような不安定な姿勢を避けて目標位置に手先をマニピュレーションする関節角経路を探索する経路計画法を提案し，全長 10 m ロボットアームのマニピュレーション動作を計画，実験し，その有効性を示した．今後の課題として，オフラインで安定性指標の計算と経路計画を行うのではなく，オンラインでの経路生成を検討する．

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 の助成を受けた．また，本研究の一部は JSPS 特別研究員奨励費 (JP21J14027) の補助を受けて実施した．

参考文献

[1] G. Endo, A. Horigome, and A. Takata. Super dragon: A 10 m-long coupled tendon-driven articulated manipulator. *IEEE Robotics and Automation Letters*, pp. 1–1, 2019.

[2] Atsushi Takata, Gen Endo, Koichi Suzumori, Hiroyuki Nabae, Yoshihiro Mizutani, and Yoshiro Suzuki. Modeling of synthetic fiber ropes and frequency response of long-distance cable-pulley system. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018.

[3] 髙田敦, 難波江裕之, 鈴森康一, 木倉宏成, 高橋秀治, 遠藤玄. 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. 第 39 回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, 2021.

[4] Atsushi Horigome, Gen Endo, Koichi Suzumori, and Hiroyuki Nabae. Design of a weight-compensated and coupled tendon-driven articulated long-reach manipulator. *2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 598–603, 2016.

[5] 小澤隆太, 小林博明. 非線形弾性腱を持つ腱駆動ロボット機構の定力制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 3, pp. 372–379, 2001.

[6] Yoshihiko Nakamura, Hideo Hanafusa, and Tsuneo Yoshikawa. Task-priority based redundancy control of robot manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 3–15, 1987.