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)	
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

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 高田敦(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5kgを搭載した状 態で,全長10m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10m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



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

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.

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 $\theta \in \mathbb{R}^{10 \times 1}$,関節トルクは $\tau \in \mathbb{R}^{10 \times 1}$,自重負荷トルクは $g \in \mathbb{R}^{10 \times 1}$ 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 $f_j \in \mathbb{R}^{20 \times 1}$ 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 $\mathbf{R}_j \in \mathbb{R}^{10 \times 20}$ 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 $\mathbf{R}_w \in \mathbb{R}^{10 \times 11}$ 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 τ とワイヤの張力の関係は式 (1) で定式化される.

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{j} \ \boldsymbol{R}_{w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_{j} \\ \boldsymbol{f}_{w} \end{bmatrix}$$
(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 $x_A \in \mathbb{R}^{20 \times 1}$ 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 $(x_A - R_j^T \theta)$ となる.続いて,関節 制御腱の剛性を対角成分に持つ行列 $K = \text{diag}(k_i)$ $(i = 1 \cdots 20)$ を用いると、関節制御腱の張力 f_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 × 10⁴ 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 x_A は固定され、関節角は平衡点な位置 θ_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 τ_{ext} によって関節角が $\Delta \theta_b$ 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 $\Delta \theta_b$ を関節剛性に乗じたトルクが外的関節トルク τ_{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 $-KR_j^T\Delta \theta_b$ 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 $R_jKR_j^T$ となる.

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

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

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 $U(\theta)$,自重負荷トルクを $g(\theta) = \frac{\partial U}{\partial \theta}$,腱の弾性エネルギ を $E(\theta)$ と表記する.まず,関節角の平衡点 θ_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 θ_0 で極小値となっている.すなわち,式(5)が成り立つ.

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

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

U, *E*をそれぞれ θ_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 $\Delta \theta$ 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 A_s の固有値 $\lambda \in \mathbb{C}^{10 \times 1}$ 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 λ の実部の中 で最大なものを安定化指数 *S* = max(real(λ)) とする.

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

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

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 x,目標手先位置 x_{ref} ,ヤコビ 行列 $J \in \mathbb{R}^{3 \times 10}$,ヤコビ行列の擬似逆行列 J^+ ,微小定数 κ であ る. $\Psi(\theta)$ 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 $S \geq$,張力低減の指標として関節制御腱 の張力最大値 $\max(f_i)$ 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 $\delta\theta$ を計算する.具体的な $\Psi(\theta)$ 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.

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

 $\Psi = -\beta_1 \max(S - S_{\text{limit}}, 0) - \beta_2 \max(\max(\boldsymbol{f}_{\text{i}}) - f_{\text{limit}}, 0) \quad (9)$

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_j)、 安定性指標 S を計算し、それぞれが閾値 f_{limit}, S_{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10m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.

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 $S_{\text{limit}} \leq 0$ 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10m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1deg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1deg 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 $S_{\text{limit}}=20$ 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.4 Graph of tip point.



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10m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10m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

- 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] 高田敦,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 tendondriven 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.