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)	自重補償機構を有するワイヤ干渉駆動型冗長マニピュレータの逆運動学
Title(English)	Inverse Kinematics of a Weight-compensated and Coupled Tendon-driven Redundant Manipulator
著者(和文)	髙田 敦, 難波江 裕之, 鈴森 康一, 遠藤 玄
Authors(English)	Atsushi Takata, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, Gen Endo
出典(和文)	第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 予稿集, , ,
Citation(English)	Proceedings of the 21th SICE System Integration Division Annual Conference, , ,
発行日 / Pub. date	2020, 12
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は公益社団法人計測自動制御学会に帰属します。 (c) 2020 The Society of Instrument and Control Engineers

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

自重補償機構を有するワイヤ干渉駆動型

冗長マニピュレータの逆運動学

○髙田　敦（東工大），難波江　裕之（東工大），鈴森　康一（東工大），遠藤　玄（東工大）

Inverse Kinematics of a Weight-compensated and Coupled Tendon-driven Redundant Manipulator

○ Atsushi TAKATA(Tokyo Tech), Hiroyuki NABAE (Tokyo Tech),
Koichi SUZUMORI (Tokyo Tech), and Gen ENDO (Tokyo Tech)

Abstract: In our previous work, a 10-m-long coupled tendon-driven manipulator was demonstrated. This manipulator has one thick tendon as a weight-compensation mechanism. It is expected that tension of joint control tendons is small, taking advantage of the weight-compensation. In this paper, tension of joint control tendons and joint angles were simulated in three cases where a target tip position is the same, and tension of the weight compensation tendon is different. Joint angles were determined using redundant inverse kinematics and tendon tension as an objective function. As a result, it was suggested that there is an appropriate value for tension of the weight compensation tendon. Excessive weight compensation increases tension of the joint control tendon.

1. 緒言

福島第一原発の格納容器探査は廃炉に向けて重大な課題である．現在，全長 22 m，質量 4600 kg の水平多関節型マニピュレータが三菱重工業と Veolia Nuclear Solutions によって開発中である[1]．このマニピュレータを格納容器側面の穴から差し込み，炉心にアクセスする計画である．一方，筆者らは図 1 に示す直径 0.2 m と痩身でありながら全長 10 m，10 関節を持ち，質量 50 kg と軽量，鉛直方向にも可動する多関節マニピュレータ，Super Dragon を開発した[2][3]．鉛直方向に可動する関節には自重による大きなトルクが負荷されるため，Super Dragon は，人の指を動かす腱にアナロジを持つワイヤ干渉駆動機構を用いている[4]．これによって，根本の関節ほど大きな重力トルクを複数の腱で分担して支えることができる．加えて 1 本の太い腱と二重プーリの組み合わせによるワイヤ干渉駆動と同原理の自重補償機構と組み合わせることで痩身な長尺多関節マニピュレータを実現している．

本稿は自重補償機構の腱の張力に注目する．Super Dragon を制御するには，所望の手先位置に対して関節角と，その時の重力トルクを支える腱張力を同時に決定する必要がある．この問題は運動学的冗長性と駆動冗長性により無数の解があるが，関節を駆動する腱の張力を低くすることが望ましい．この関節駆動腱の張力を左右する 2 つの主な要因は関節角と自重補償腱の張力である．関節角は逆運動学手法によって関節駆動腱の張力が低くなるように決定する．一方，自重補償腱の張力をどの程度にすれば関節駆動腱の張力を効果的に減じることができるのか検討する必要がある．従って，本稿では特定の先端位置に対して自重補償腱の張力が異なる複数の場合で解析し，関節角と関節駆動腱の張力を比較する．なお，自重による負荷を考え，外力などは考慮しない．

Fig. 1 Super Dragon: a 10 m-long coupled tendon-driven manipulator.

2. ワイヤ干渉駆動と自重補償機構を備えたマニピュレータ

図1に示すSuper Dragonについて説明する．図2に関節の構成を示す．関節角$\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^{10\times1}$は基部側から

$\theta_1, \theta_2, \cdots$とする．図3は腱と滑車の配置を示す．10個の関節は21本の腱で駆動され，腱を引くアクチュエータは全てアームの基部に設置されている．腱の一端はその腱が駆動するリンクに固定され，もう一端は駆動される関節より根本側の関節において回転自在な滑車に巻きかけられながら土台に導かれ，アクチュエータに固定される．青と赤の線は関節駆動腱(JCTs)であり，電磁モータで駆動され，関節角を制御する．関節駆動腱にはステンレススチールより高強度なUHPEの直径2 mmロープ(DB-96HSL，ハヤミ工産，強度4.2 kN)を用いている．緑の線は自重補償腱(WCT)であり，直径5.5 mmのポリフェニレンエーテル樹脂ロープ(ZB-15728，ハヤミ工産)を用いている．自重補償腱は最大牽引力30.2 kNの空圧シリンダで駆動される．

次に，この機構の力学について説明する[4]．図3の張力$f_1 \cdots f_{21}$をベクトルとして$\boldsymbol{f} \in \mathbb{R}^{21\times1}$とする．ただし，関節駆動腱の張力を$\boldsymbol{f_j} \in \mathbb{R}^{20\times1}$，自重補償腱の張力を$f_w$とし，$\boldsymbol{f} = [\boldsymbol{f_j}^T \ f_w]^T$とする．また，具体的には先行研究によるが，プーリ半径$\boldsymbol{R} \in \mathbb{R}^{10\times21}$とする[2]．関節トルク$\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{10\times1}$，腱の張力$\boldsymbol{f}$の関係式はアクチュエータと関節角$\boldsymbol{\theta}$について仮想仕事の原理を考えると式(1)のように表される．

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{R}\boldsymbol{f} \qquad \cdots(1)$$

プーリ半径$\boldsymbol{R}$は上三角行列となっており，根本の関節ほど多くの腱で支えることで負荷を小さくできる．この機構の貢献によって，関節駆動腱が支えるべき負荷を1 kN程度まで減じることができる．

3. 張力決定問題と逆運動学

本稿で用いるワイヤ張力分散制御を簡単に説明する[4]．式(1)の$\boldsymbol{R}$が逆行列を持たず，関節トルク$\boldsymbol{\tau}$から張力$\boldsymbol{f}$を求めるのは冗長問題である．互い拮抗する腱の拮抗張力を大きくすることで，関節トルク$\boldsymbol{\tau}$によらず大きな張力の解が存在するが，腱の強度の観点から張力$\boldsymbol{f}$が小さい解が好ましい．一方で，腱のたるみを防ぐために下限張力を与える式(2)も必要である．式(1)，(2)を満たす解は，$\boldsymbol{R}$の疑似逆行列$\boldsymbol{R}^+$，

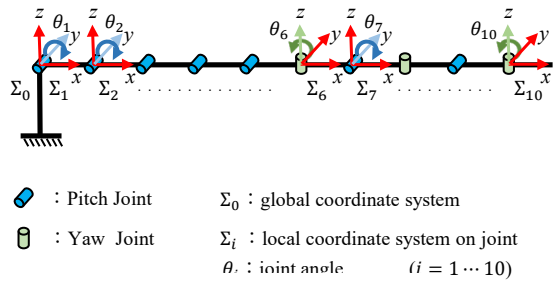

Fig. 2 Joint configuration.

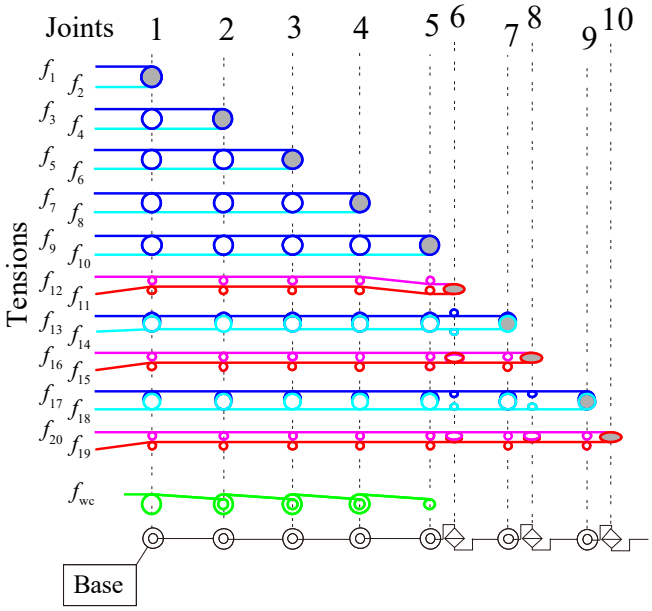

Fig. 3 Arrangement of tendons.

単位行列$\boldsymbol{E}$を用いて式(3)となる．$\boldsymbol{f_0} \in \mathbb{R}^{21\times1}$は正値を持つベクトルでバイアス張力と呼ばれ，式(2)を満たすために必要である．4章では自重補償腱のバイアス張力である$f_0(21)$の値を変えた場合の逆運動学解が比較される．

$$\boldsymbol{f} \geq \boldsymbol{f}_{\min} \geq \boldsymbol{0} \qquad \cdots(2)$$

$$\boldsymbol{f} = \boldsymbol{R}^+\boldsymbol{\tau} + (\boldsymbol{E} - \boldsymbol{R}^+\boldsymbol{R})\boldsymbol{f_0} \qquad \cdots(3)$$

冗長マニピュレータの逆運動学は1980sに盛んに研究された．代表的な先行研究として，花房らは多関節ロボットアームの冗長性をヤコビ行列の零空間を用いて分解し，マニピュレーションと任意の評価指標によるサブタスクを同時に行う運動生成に応用した[5]．本稿の場合では，先端位置の自由度を3，関節数を10として，マニピュレータの先端位置$\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^{3\times1}$，関節角$\boldsymbol{\theta}$，ヤコビ行列$\boldsymbol{J} \in \mathbb{R}^{3\times10}$を用いて微小変分$\delta\boldsymbol{x}, \delta\boldsymbol{\theta}$

の関係式は次のようになる：

$$\delta \boldsymbol{x} = \boldsymbol{J}\delta\boldsymbol{\theta}. \qquad \cdots(4)$$

目標値$\boldsymbol{x}_{\mathbf{ref}} \in \mathbb{R}^{3\times1}$を達成する関節角$\boldsymbol{\theta}$を求めるには式(4)で$\delta\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_{\mathbf{ref}} - \boldsymbol{x}$から$\delta\boldsymbol{\theta}$を求め，繰り返し関節角$\boldsymbol{\theta}$を更新し，収束計算する．しかし，これは冗長問題であるため，無数の解がある．例えば図4は先端位置 $\boldsymbol{x}_{\mathbf{ref}} = [7.4 \quad 3.6 \quad 2.2]$ m を満たす2つのマニピュレータ姿勢を示している．図4の右上は斜視図，他は三面図である．青で示された Case 1 の張力を図5に，赤で示された Case 2 の張力を図6に示す．図 5, 6 では張力f_1, f_3…に対して拮抗するf_2, f_4…を正負逆にして描いている．棒グラフの色は図3の腱の色と対応している．関節角が異なるため関節駆動腱の張力最大値$\max(\boldsymbol{f}_j)$はCase1よりCase2のほうが大きくなる．そこで任意のサブタスクとその評価指標$\psi(\boldsymbol{\theta})$を設定した式(5)を用いることで解を決定する．

$$\boldsymbol{\delta\theta} = \boldsymbol{J}^{+}\delta\boldsymbol{x} + (\boldsymbol{E} - \boldsymbol{J}^{+}\boldsymbol{J})\kappa\frac{\partial\psi}{\partial\boldsymbol{\theta}}. \qquad \cdots(5)$$

$\boldsymbol{J}^{+}$はヤコビ行列の疑似逆行列，κは微小定数である．サブタスクの評価指標としては障害物回避[6]や関節トルクの最小化[7]が選ばれることが多い．ワイヤ干渉駆動型マニピュレータの逆運動学に関する研究としては腱の張力の 2 乗ノルムの最小化を評価指標として駆動冗長性と運動学冗長性を有する逆運動学を解いたものがある[8]．

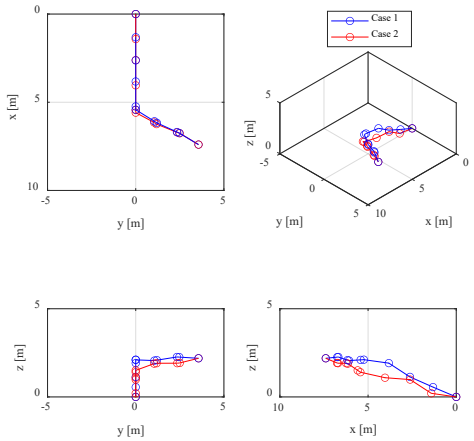

Fig. 4 Two redundant solutions achieve the same tip position.

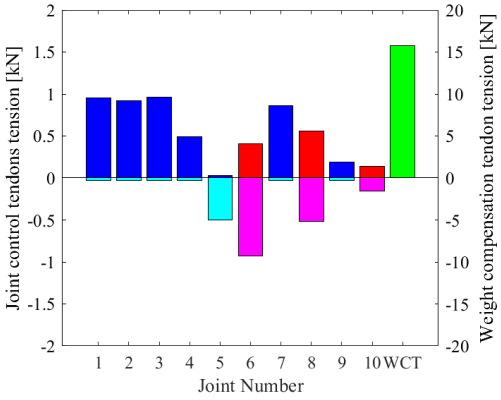

Fig. 5 Tension of tendons on the case 1.

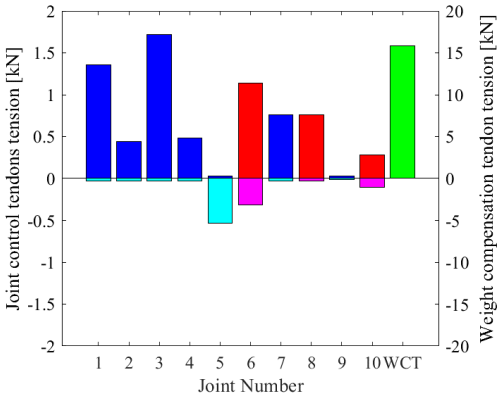

Fig. 6 Tension of tendons on the case 2.

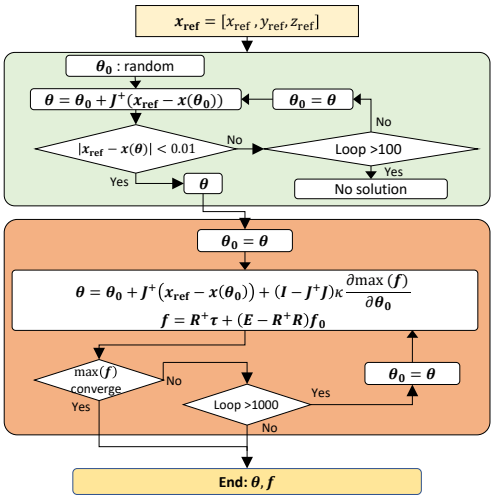

Fig. 7 Calculation flow

本稿は先行研究と異なり，自重補償機構を備えたSuper Dragonを対象として関節駆動腱の張力最大値$\max(\boldsymbol{f_j})$を評価指標として張力最大値を小さくするように逆運動学を解く．自重補償腱については十分な強度があるため除外する．評価関数を$\psi = \max(\boldsymbol{f_j})$とし，$\psi$が収束するまで式(5)を用いて繰り返し更新する．張力$\boldsymbol{f}$を求めるにはリンク長，重量を用いて計算される重力トルク$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\theta}) \in \mathbb{R}^{10\times1}$を式(3)の関節トルク$\boldsymbol{\tau}$に代入する．

本稿に限った計算テクニックを2つ用いた．1つ目は収束を確実にするために，$\psi = 0$として$|\delta\boldsymbol{x}|$が小さくなるまで関節角$\boldsymbol{\theta}$を更新するステップを用いた．図7は$\boldsymbol{x}_{\mathbf{ref}}$から$\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{f}$を求める計算フローを示す．緑色のブロックが$\psi = 0$として，$|\delta\boldsymbol{x}| < 0.01$になるまで$\boldsymbol{\theta}$を更新するステップを表し，関節角の初期値$\boldsymbol{\theta_0}$を$\pm10$ deg以内でランダムに設定する．緑色ブロックの後に続く橙色のブロックでは$\psi = \max(\boldsymbol{f_j})$とし，$\max(\boldsymbol{f_j})$が減少するように$\boldsymbol{\theta}$を更新し，同時に$\boldsymbol{f}$を得る．2つ目のテクニックは，1つの目標値$\boldsymbol{x}_{\mathbf{ref}}$について図7の手順を10回繰り返した．その理由は収束計算の結果が初期値に依存し得ることからである．10個の結果から最も$\max(\boldsymbol{f_j})$が小さかった$\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{f}$を解とした．

4. 自重補償張力が異なる場合の比較

1つの先端位置$\boldsymbol{x}_{\mathbf{ref}} = [7.4 \quad 3.6 \quad 2.2]$ mに対して，自重補償腱のバイアス張力$f_0(21)$を15 kN，20 kN，25 kNの3通りとした場合の逆運動学解を比較する．その他のバイアス張力$f_0(1) \cdots f_0(20)$は30 Nで一定とした．張力の下限張力$\boldsymbol{f}_{\mathbf{min}}$は次式の値を用いた．

$$\boldsymbol{f}_{\mathbf{min}} = [30 \quad 30 \quad \cdots \quad 30 \quad 1000]^{\mathrm{T}} \ [\mathrm{mm}] \qquad \cdots(6)$$

逆運動学解であるマニピュレータ姿勢を図8に示す．姿勢の色は，青がバイアス張力15 kNの場合を，緑が20 kNの場合を，赤が25 kNの場合を示している．これらはそれぞれの場合で最も関節駆動腱の張力最大値が小さくなる姿勢であるが，3つの結果を比べるといずれかの姿勢が他と大きく異なっていることはない．

続いて張力を比較する．図9はバイアス張力15 kNの場合，図10は20 kNの場合，図11は25 kNの場合の張力を示す．自重補償腱の張力$f(21)$はバイアス張力

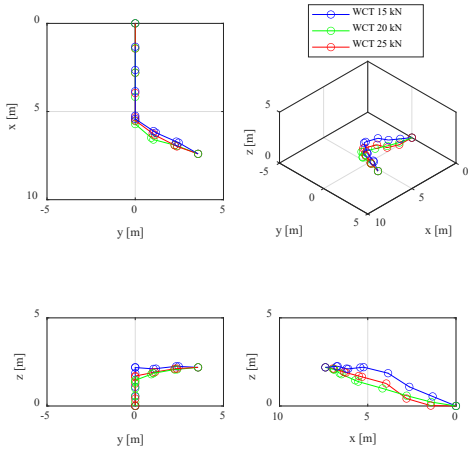

Fig. 8 Solutions of inverse kinematics: the blue, green, and red line represents the case when WCT is 15 kN, 20 kN, and 25 kN respectively.

15 kNの場合は15.74 kN，20 kNの場合は20.07 kN，25 kNの場合は24.03 kNとなり，バイアス張力に近い値であった．関節駆動腱の最大値はバイアス張力15 kNの場合はf_3 =0.98 kN，20 kNの場合はf_{13} =0.76 kN，25 kNの場合はf_2 =1.24 kNであった．

5. 考察

特定の先端位置に対して自重補償腱のバイアス張力$f_0(21)$を15 kN，20 kN，25 kNの3通りに変化させ逆運動学解を求めた結果，関節角に大きな差異は無い一方，張力には明確な差が見られた．

バイアス張力15 kNの場合，図9を見ると，根元側3関節を上に引くf_1, f_3, f_5が大きい．関節駆動腱の中でf_3 =0.98 kNが最大だった．これは根本側に大きな重力トルクが負荷されるためである．バイアス張力20 kNの場合，図10を見ると，自重補償によって根本側の重力トルクが支えられ，図9では大きかったf_1, f_3が小さくなった．関節駆動腱の張力最大値はf_{13} =0.76 kNとなった．これは3通りの解析の中で最小であった．バイアス張力25 kNの場合，図11を見ると，自重補償が重力ではなく，根本側の関節を下に引く腱と拮抗している．関節駆動腱の張力最大値はf_2 =1.24 kNであり，3通りの解析の中で最大となった．関節駆動腱の負荷を下げる目的の自重補償機構がかえって負荷を大きくしており，バイアス張力25 kNは過剰であると言える．

以上の3通りの結果の比較から，関節駆動腱の張力

を抑える自重補償腱の張力には適切な値があることが示唆された.

6. 結言

本稿は自重補償機構を有したワイヤ干渉駆動型冗長マニピュレータの関節角と張力の決定問題において，自重補償腱の張力に注目した．特定の先端位置に対して自重補償腱の張力を 3 通りに変えたそれぞれの場合で，最も関節駆動腱の張力が小さくなる逆運動学解を求め比較した．その結果，関節角には大きな差異は見られなかった．しかし，過剰な自重補償はかえって関節駆動腱の張力を大きくし，自重補償腱の張力には適切な値があることが示唆された．今後は様々な手先位置に対して同様の検討を行う．

謝辞

この成果は，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものです．また，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”，2020, https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/debris_3.html （2020/10/20 閲覧）

[2] G. Endo, A. Horigome, A. Takata. Super Dragon: A 10-m-Long-Coupled Tendon-Driven Articulated Manipulator, IEEE RA Letter, vol. 4, no. 2, pp. 934-941, Jan. 2019.

[3] 遠藤 玄，髙田 敦，堀米 篤史，ワイヤ干渉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，2019，85 巻，875 号，p. 19-00075.

[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，1990，26 巻，11 号，p. 1291-1298.

[5] 花房 秀郎，吉川 恒夫，中村 仁彦，関節形ロボットアームの冗長性の解析とその優先順位を有する作業への応用，計測自動制御学会論文集，1983，19 巻，5 号，p. 421-426.

[6] J. Baillieul, ″Avoiding obstacles and resolving kinematic redundancy,″ Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, USA, 1986, pp. 1698-1704.

[7] D. N. Nenchev, “Redundancy resolution through local optimization: a review”, Journal of Robotic Systems, 6-6, pp. 769-798, 1989

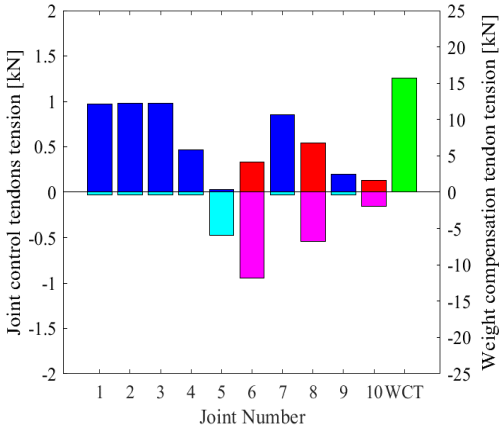

Fig. 9 Tension of tendons when WCT is 15 kN.

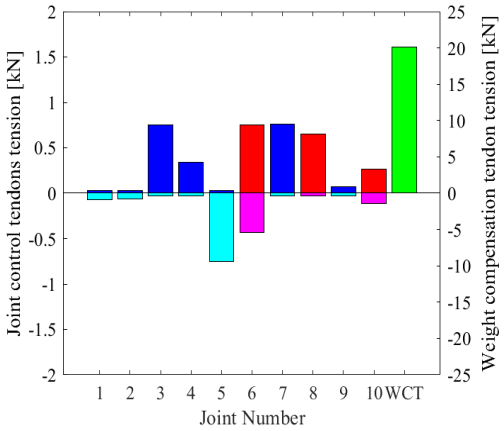

Fig. 10 Tension of tendons when WCT is 20 kN.

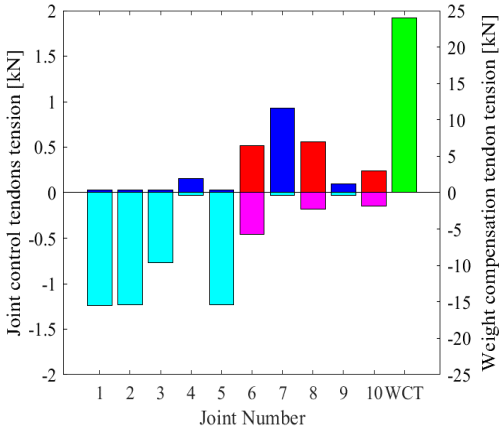

Fig. 11 Tension of tendons when WCT is 25 kN.

[8] 馬 書根，ワイヤ干渉駆動型多関節マニピュレータの最適姿勢とそのワイヤ張力の考察，日本機械学会論文集 C 編，1997，63 巻，609 号，p. 1665-1670.