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*馬 書 根^{*1}Optimal Arm Posture Control and Tendon Traction Forces
of a Coupled Tendon-Driven Manipulator

Shugen MA

In this study, the optimum arm posture of a coupled tendon-driven multijoint manipulator arm (or CT Arm) at maximum payload output was derived and the corresponding tendon traction forces were also analyzed, during management of a heavy payload by the manipulator in a gravity environment. The CT Arm is special tendon traction transmission mechanism in which a pair of tendons used to drive a joint is pulled from base actuators via pulleys mounted on the base-side joints. This mechanism enables optimal utilization of the coupled drive function of tendon traction forces and thus enables the lightweight manipulator to exhibit large payload capability. The properties of the CT Arm mechanism are elucidated by the proposed optimal posture control scheme. Computer simulation was also executed to verify the validity of the proposed control scheme.

Key Words: Robot, Manipulator, Optimal Arm Posture Control, CT Arm, Redundant Degree of Freedom

1. 緒 言

本論文では、「CT アーム」と呼ばれるワイヤ干渉駆動型多関節マニピュレータ⁽¹⁾が重力環境で作業を行なう場合、その最適姿勢制御手法を提案する。なお計算機シミュレーションを用いて本手法の有効性について検討を行う。

図 1: Maintenance robot for nuclear reactor and highway

象の鼻のような多自由度を有する多関節マニピュレータは、アーム全体の姿勢も制御できるため障害物を回避しやすく、アーム全体としての運動性能を改善しやすいなどの特異な機能性を持っている。このようなマニピュレータは図1に示すように、原子炉内など機器が錯綜する複雑な環境での検査、点検作業や、高速道路点検メンテナンスなどにおいて非常に有効である。従来、i) 特殊な回転関節を使用したもの^{(2),(3)}、ii) 基台部に強力なスライダを設け、必要な駆動力をできるだけそのスライダに負担させることによりアームの軽量化を図ったもの⁽⁴⁾、iii) アクチュエータを基台部に設置し、その動力をワイヤや特殊な伝達機構で各関節に伝達する機構を利用したもの^{(5)~(7)}などの試みがなされている。しかし今に至っては実用的な多関節マニピュレータが実現されていない。そこで、筆者らはワイヤ干渉駆動型多関節マニピュレータ機構(「CT アーム」と呼ぶ)を提案し、その有効性を確認した⁽¹⁾。CT アームは、多く

の冗長自由度を持つワイヤ駆動系であり、各関節の駆動力を積極的に干渉させ、軽量・高出力な多関節マニピュレータの実現を可能にしている。さらに機械モデルをも用いてCT アームの有効性を確認した⁽⁸⁾。

このような多自由度を有する多関節マニピュレータアームを重力場で使用する場合、どのような姿勢を取ったら良いかという問題は、これまでほとんど議論されていない。本研究では、まず一般の多関節マニピュレータのため、山登り法を利用した姿勢最適化アルゴリズムを導入し、その検討を行なう。引続きその知見を基にCT アームの最適姿勢制御を検討する。そして、計算機シミュレーションを用いて本手法の有効性の検証を行なう。

2. 最適アーム姿勢決定法

余分(冗長)自由度を有する多関節マニピュレータは作業目的に応じてそのアーム姿勢をある程度自在に変形できる。障害物回避などの姿勢制御法には多くの研究があるが、自由空間でどのような姿勢を取らすべきかの研究はこれまでほとんどない。このような状況では多関節マニピュレータは重力に抗して姿勢を保持することが最大の仕事になる*。本章ではこのような静力学作業環境での最適姿勢の誘導を行なう。

2.1 基本定式化

多関節マニピュレータにおいてその先端の位置・姿勢と関節回転角との関係は

$$\mathbf{x} = \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) \quad (1)$$

*多関節マニピュレータの実際的な応用を考えると、重量物を支持しながらゆっくり動かすことが第1次的な応用であると考えられる。よって本論文で検討する最適姿勢制御法は多関節マニピュレータにより重い荷重を支持させるためのものであり、実用面でも非常に重要であると思われる。

* 原稿受付 1996年8月6日。

^{*1} 正員、茨城大学工学部 (〒316 日立市中成沢町4-12-1)。

図 2: Algorithm A to find out the optimum arm posture when the manipulator end-effector position and orientation are given

で与えられる。ここで、 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m$ はアーム先端位置・姿勢ベクトル、また $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^n$ は関節回転角ベクトルである。関節角 $\boldsymbol{\theta}$ には直動関節の変位も含めておく。冗長自由度を有する多関節マニピュレータの場合では、 $m < n$ である。アームの先端位置・姿勢座標 $\mathbf{x}$ が与えられた場合、アーム姿勢角 $\boldsymbol{\theta}$ を求める問題は $n - m$ 次元の非線形方程式の誘導問題となり簡単には解けない。ここでは、式 (1) の解を最急勾配的な手法で解くことにする。

アーム姿勢初期値 $\boldsymbol{\theta}^0$ におけるアームの先端座標の微小変量と関節角の微小変量との関係は、式 (1) の微分より

$$d\mathbf{x} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^0)d\boldsymbol{\theta} \quad (2)$$

のように、ヤコビ行列 $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^0) = \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ を用いて表すことができる。

式 (2) の解は擬似逆行列を用いて、

$$d\boldsymbol{\theta} = \mathbf{J}^+ d\mathbf{x} + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J})\mathbf{z} \quad (3)$$

と求めることができる⁽⁹⁾。ここで、 $\mathbf{J}^+ d\mathbf{x}$ はヤコビ行列 $\mathbf{J}$ の擬似逆行列 $\mathbf{J}^+ \in \mathbb{R}^{n \times m}$ による特殊解、 $(\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J})\mathbf{z}$ はゼロ空間での一般解である。与える評価基準 $\psi(\boldsymbol{\theta})$ を最適化していく角度変分 $d\boldsymbol{\theta}$ の誘導法の一つとしては、式 (3) のゼロ空間ベクトル $\mathbf{z}$ を評価基準の変動感度 $(\partial\psi/\partial\boldsymbol{\theta})$ に応じて設定する方式が考えられる。つまり、

$$\mathbf{z} = \kappa \frac{\partial \psi}{\partial \boldsymbol{\theta}} \quad (4)$$

によって任意ベクトル $\mathbf{z}$ を定めることにする。ここで κ は収束スケール係数である。

評価基準 $\psi(\boldsymbol{\theta})$ は自由に選択できるが、その一つの例として関節トルクの 2 乗和の最小化をあげることができる。この評価基準は、最大関節トルク（アクチュエータの最大ト

図 3: Algorithm B to derive the optimum arm posture for the manipulator end-effector to track the given end-point trajectory, which is based on the Algorithm A

ルク出力) が一定である場合、より重い荷重を支えるためのものであり、荷重を支えるために必要とする関節トルクをできるだけ各関節に分散させるためのものである。この場合、任意姿勢をなす n 関節の多関節マニピュレータの姿勢 $\boldsymbol{\theta}$ と各関節で生成すべき関節トルク $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$ の関係を

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\theta}) \quad (5)$$

で与える時、評価基準 $\psi(\boldsymbol{\theta})$ は

$$\psi(\boldsymbol{\theta}) = -\boldsymbol{\tau}^T \boldsymbol{\tau} \quad (6)$$

と表記できる。よって、式 (4) より任意ベクトル $\mathbf{z}$ は

$$\mathbf{z} = \kappa \frac{\partial \psi}{\partial \boldsymbol{\theta}} = -2\kappa \left(\frac{\partial \boldsymbol{\tau}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T \boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\theta}) \quad (7)$$

と与えられる。

そしてこの評価基準によると、ある初期のアーム姿勢角 $\boldsymbol{\theta}^0$ が与えられたときの、評価基準 $\psi(\boldsymbol{\theta})$ を最小にする方向への微小修正後の姿勢角 $\boldsymbol{\theta}$ は

$$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}^0 + \mathbf{J}^+(\boldsymbol{\theta}^0)d\mathbf{x} + \kappa(\mathbf{I} - \mathbf{J}^+(\boldsymbol{\theta}^0)\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^0)) \frac{\partial \psi}{\partial \boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\theta}^0) \quad (8)$$

と求められる。

ここで指摘すべきことは、アームの先端位置・姿勢が不動でも導入した手法は使用できるという点である。この場合に、式 (8) で $d\mathbf{x} = \mathbf{0}$ であり、ゼロ空間での一般解を用いて評価基準 $\psi(\boldsymbol{\theta})$ を最適にするアーム姿勢が誘導できる。

2.2 計算アルゴリズム

導入した計算手法によれば、任意の軌道運動を行なう冗長マニピュレータアームの静力学的最適姿勢の誘導は図 2 と

図3のように行なうことができる。図2は、アームの先端位置・姿勢が一定の時（この時、 $d\mathbf{x} = \mathbf{0}$ ）のトルク2乗和を最小にする最適アーム姿勢の誘導法を示している。一方図3は、図2に示す最適アーム姿勢誘導法による任意の先端軌道を追従する多関節マニピュレータアームの静力学的な姿勢最適化アルゴリズムを示している。

2.3 計算機シミュレーション実験

提案するアルゴリズムの有効性を検討するため、簡単なモデルによる計算機シミュレーションを行なった。使用するモデルは、長さや質量が $\ell = 1.0$ [m], $m = 5.0$ [kg] の均質なリンクからなり、各関節にアクチュエータが装備された4関節マニピュレータである。そして先端荷重質量を $M = 2.0$ [kg]、評価基準を関節トルクの2乗和の最小化とした。

図4: Obtained arm postures and corresponding profile of the square-sum of joint torques

図4には、シミュレーション結果を示している。提案するアルゴリズムの有効性を明らかにするため、ここでは姿勢最適化を全く行なわない(式(8)の右辺第3項がゼロである)、擬似逆行列アルゴリズムによる結果との比較を示している。図4(a), (b)は両手法でのアーム姿勢変化を示し、図4(c)にはそのトルク2乗和の変化を示す(横軸は軌道追従距離、縦

軸はトルクの2乗和を示す)。図4(b)から、本論文で提案する姿勢最適化アルゴリズム(アルゴリズムB)によれば明らかにアームはできるだけ根元側に近づける姿勢を取り、関節トルクの増大の防ぐ動作を生じることが分かる。これは、アームの重心を出来る限り根元側に近づきアーム自重による関節トルクを減らすためと考えられる。また、図4(c)に示す関節トルク2乗和から、細線の姿勢最適化を行なうアルゴリズムBは太線の姿勢を最適化しない擬似逆行列アルゴリズムより関節トルクを低く抑えていることが分かる。

3. CTアームの最適姿勢とその最適ワイヤ張力

本節では、CTアーム機構を簡単に紹介し⁽¹⁾、そのための最適姿勢制御法を検討する。ここでは、 $n = 3$ の場合の機構を示す。

図5: CT Arm Mechanisms

3.1 CTアームの機構

タイプ1のCTアーム 図5(a)に示しているタイプ1のCTアーム機構では、全てのリンクは相互に回転自在に連結されている。リンク i ($i = 1 \sim n$) を関節 i 回りに回転するための一対のワイヤは、関節 i に回転自在に軸着し、リンク i に固着されたプーリーにその一端が固定されている。そしてこの一対のワイヤは、関節 $i-1$ から関節1に回転自在に軸着されたプーリーに互いに逆向きに一回転ずつ巻架しながら基台部に導かれている。この機構は従来の機構の考え方とは逆に、各関節の駆動力を積極的に干渉させる構造となっている。

タイプ2のCTアーム 図5(b)に示すタイプ2のCTアーム機構の基本構成はタイプ1とほぼ同じである。ただし、ある関節 i を駆動するための一対のワイヤを根本側の関節 $i-1$ から関節1のプーリーに巻架するとき、それらの関節に二つのプーリーを回転自在に設置しておき、両方のワイヤともそれぞれのプーリーに同じ回転方向へ巻架する点が異なる。全ての関節の駆動ワイヤをこのように張ると、ワイヤはアームの一方の側面にまとまって張られることになる。このタイプ2のCTアームでは、常にワイヤの張られる側面を重力に対して上側になる姿勢を取るようになっている。タイプ2のCTアームの機構特徴は、一対のワイヤの両方の張力各々が干渉駆動に有効に使用できる点である[†]。

[†]タイプ1のCTアームの場合においては、一対のワイヤの張力の差のみが生成すべき支持トルクに影響を及ぼす。

3.2 基本定式化⁽¹⁾

CT アームにおいて、ワイヤ張力と関節トルクとの静力学関係式は

$$\tau = Df \quad (9)$$

と示される。ただし、 $f \in R^{2n}$ はワイヤ張力である。ここでワイヤは各関節に1対あるので $2n$ 本となっている。ワイヤ番号 j ($j = 1 \sim 2n$) は、関節1から関節 n までのワイヤを示し、同じ関節については上側のワイヤを初めに、下側のワイヤをその次に並べるものとする。なお、式(9)の $D \in R^{n \times 2n}$ は駆動系の駆動特徴を表現する係数行列である。タイプ1のCTアームの機構において

$$D = \{d_j\} = \begin{bmatrix} r_1 & -r_1 & r_1 & -r_1 & \dots & r_1 & -r_1 \\ 0 & 0 & r_2 & -r_2 & \dots & r_2 & -r_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & r_n & -r_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

となり、ただし、 r_i は関節 i に回転自在に軸着された全てのプーリーの半径である。またタイプ2のCTアームは、

$$D = \{d_j\} = \begin{bmatrix} r_1 & -r_1 & r_1 & r_1 & \dots & r_1 & r_1 \\ 0 & 0 & r_2 & -r_2 & \dots & r_2 & r_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & r_n & -r_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

と示し、ただし、 r_i は(10)式と同じように、関節 i に回転自在に軸着された全てのプーリーの半径である。

さらに、ワイヤの駆動特性の一つとして、ワイヤは張力しか生成できないことも考慮すべきである。そのため、本論文では、

$$f \geq f_{\min} \quad (12)$$

$$f_{\min} = \{f_{\min(j)}\} \in R^{2n}, \quad f_{\min(j)} \geq 0$$

と設定する。ここで $f_{\min}$ はワイヤ張力の下限値である。

CTアームの場合、最も基本的な評価基準 $\psi(\theta)$ はワイヤ張力の2乗和の最小化、つまり

$$\psi(\theta) = -(f - f_0)^T (f - f_0) \quad (13)$$

であると考えられる。

次節で、ワイヤ張力2乗和((13)式)を最小にするCTアーム最適姿勢の誘導を行なう。

3.3 CTアーム最適姿勢の誘導

アーム先端の自由度が m であり、駆動ワイヤが $2n$ ($2n > m$) 本ある。よってCTアーム機構は、アーム系の運動学冗長性 $n-m$ とワイヤ駆動系の駆動冗長性 n より冗長自由度 $2n-m$ を有するシステムとなる。運動冗長性は式(3)より分解され、ワイヤ駆動系の駆動冗長性は拘束条件(式(9)と式(12))のもとで、評価基準(式(13))を最適化することより分解される⁽¹⁾。ワイヤ駆動系の駆動冗長自由度を以下に示すアルゴリズム⁽¹⁾によって分解することができる。

- a) まず式(12)の不等式拘束条件を考慮せず式(9)の等式拘束条件を満たしワイヤ張力2乗和を最小化する解を

$$f = D^+ \tau + (I - D^+ D) f_0 \quad (14)$$

と求めることができる。ここで、 $I \in R^{2n \times 2n}$ は単位行列である。また D^+ は係数行列 D の擬似逆行列であり、

$$D^+ = D^T (DD^T)^{-1} \in R^{2n \times n} \quad (15)$$

と与えられる。なお、 $f_0 \in R^{2n}$ はワイヤ張力に加えるべきバイアス張力の目標値である。このバイアス張力は、式(12)のような拘束条件がない場合は当然ゼロであることが望ましい。しかし式(12)の制約条件下ではある程度の正值を設定した方が良い場合もある。これは正值の f_0 を与えると式(12)に制約されない張力が生成されやすくなり、より良い解を引き出せるからである。

- b) ワイヤ張力についての式(14)の解が、式(12)の不等式条件を満たし全て下限値 $f_{\min}$ 以上であればこれを最終解とする。もしも一本のワイヤでもこの不等式条件を満足しなければ、ステップc)を実行する。

- c) 式(12)を満足しない式(14)の解を $f_k \in R^k$ とする。ただし番号 k は式(12)の不等式条件を満足しない全てのワイヤ番号を示す。そして、 $f_k = f_{\min} \in R^k$ と設定した条件下で f_k 以外のワイヤ張力の計算を行う。この計算は、

$${}^0 D = \{{}^0 d_j\} \in R^{n \times 2n} \quad (16)$$

$${}^0 d_j = \begin{cases} d_j & j \neq k \\ 0 & j = k \end{cases}$$

$${}^0 f = \{{}^0 f_j\} \in R^{2n} \quad (17)$$

$${}^0 f_j = \begin{cases} f_j & j \neq k \\ f_{\min(j)} & j = k \end{cases}$$

$${}^0 \tau = \tau - (D - {}^0 D) f_{\min} \quad (18)$$

$${}^0 f_0 = \{{}^0 f_{0(j)}\} \in R^{2n} \quad (19)$$

$${}^0 f_{0(j)} = \begin{cases} f_{0(j)} & j \neq k \\ f_{\min(j)} & j = k \end{cases}$$

を求め、これらの ${}^0 D$, ${}^0 \tau$, ${}^0 f$, と ${}^0 f_0$ を式(14)における D , τ , f , と f_0 に置換することで実行する。

また、アーム系の運動冗長性を、ワイヤ張力2乗和(13)式の最小化における変動感度 $\partial \psi / \partial \theta$ を式(4)に代入することで分解することができる。

関節回転角変動におけるワイヤ張力の勾配は、式(14)の両辺を関節角 θ に関して微分することによって、

$$\frac{\partial f}{\partial \theta} = D^+ \frac{\partial \tau}{\partial \theta} \quad (20)$$

と求められる。この場合、ワイヤ張力の2乗和という評価基準の最小化に対する角度変動の感度 $\partial \psi / \partial \theta$ は、式(13)の微分に式(14), (20)を代入することで、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} &= -2 \left(\frac{\partial f}{\partial \theta} \right)^T (f - f_0) \\ &= -2 \left[D^+ \left(\frac{\partial \tau}{\partial \theta} \right) \right]^T D^+ (\tau(\theta) - D f_0) \end{aligned} \quad (21)$$

と求まる。

式(13)の評価基準とその勾配(21)式を用いて、図2と図3に示すアルゴリズムの演算を行えば、ワイヤ張力2乗和を最小化する姿勢の誘導ができ、アーム系の運動学冗長性が分解できる。

3.4 計算機シミュレーション実験

CTアームのために導入した最適姿勢決定法の有効性を検討するため、簡単なモデルによる計算機シミュレーションを行った。使用するモデルは、長さ $\ell = 1.0$ [m]と $m = 5.0$ [kg]の均質な節からなる4関節CTアームであり、その関節に装備するプーリーの直径は $r = 0.2$ [m]とする。そして、先端質量 M は 2.0 [kg]、ワイヤ最小張力 f_{min} を 10.0 [N]、ワイヤのバイアス張力 $f_{0(j)}$ を 50.0 [N]とした。

(a) Arm motion by the pseudoinverse algorithm

(b) Arm motion by the proposed algorithm

(c) Profiles of the square-sum of tendon tractions

図6: Comparison of the arm postures and the required tendon tractions for the CT Arm type 1

図6と図7にアーム先端が直線軌道に沿って運動する場合のアーム姿勢とワイヤ張力2乗和の結果[†]を示す。これらの図にはタイプ1及びタイプ2のCTアームについて、姿勢を最適化しない擬似逆行列アルゴリズムによるアーム姿勢(a)、本論文で提案した姿勢最適化を行なうアルゴリズムBによるアーム姿勢(b)、そしてそれらの動作におけるワイヤ

[†]CTアームの場合、アクチュエータが基台部に設置されるため、各関節にアクチュエータが設置される従来の機構よりアームが軽く、アーム自重による関節トルクは小さくなる。しかもアクチュエータは直径50[mm]程のプーリーを通じてワイヤ張力を生成するため、図6(c)と図7(c)に示すワイヤ張力2乗和をトルクに変換し図4(c)に示すトルク2乗和と比較すると、遥かに小さい値となることは明らかである。

張力2乗和の変化(c)(横軸は軌道追従距離、縦軸はワイヤ張力2乗和)を示している。結果として、姿勢の最適化を行なうことの効果が大きいことが分かる。

姿勢を最適化しない場合、図6(c)と図7(c)からタイプ2のCTアームはタイプ1の機構よりワイヤ張力の2乗和を低く抑えている(2倍以上)ことが分かる。しかし、姿勢最適化制御を行なうと、図8に示すようにタイプ1のCTアームはタイプ2のCTアームと大差のない特性(1.25倍以下)まで動作特性が改善される。このため、姿勢最適化制御を行なう場合、機構が単純で適応性の高いタイプ1のCTアーム[‡]が有効であり、しかし一般に姿勢最適化制御を行なわない場合、タイプ2のCTアームが有効であることが明確化できたと考えられる。

(a) Arm motion by the pseudoinverse algorithm

(b) Arm motion by the proposed algorithm

(c) Profiles of the square-sum of tendon tractions

図7: Comparison of the arm postures and the required tendon tractions for the CT Arm type 2

本論文で提案した姿勢最適化アルゴリズムは繰り返し演算であるため、最適解と遠く離れた初期値が与えられた場

[‡]タイプ2の機構では、マニピュレータのワイヤの張られている側面を常に上方に保つ。こうすることで、重力に対する荷重支持トルクの生成に使用でき、干渉駆動の効果がさらに大きく発揮できる。ただし、この場合、アームの取り得る姿勢が若干制約されることになる。一方、タイプ1のCTアームの場合はこのような拘束を受けない。したがって、タイプ2のCTアームはタイプ1より大きく干渉効果を発揮できるが、タイプ1のCTアームは動作範囲が広くより適応性が高い。

合(特に軌道の起点)多くの計算時間が必要となることを指摘しておきたい。本論文で用いた例では、起点において最適姿勢の誘導は約8秒間(CPU: DX2-66)かかり、その他の場合(最適解に近い、前状態の最適姿勢を初期値としている)において約1秒間かかる。初期姿勢を図2に示す本論文のアルゴリズムAを用いてまずオフラインで調整・決定し、後に擬似逆行列アルゴリズムを用いてロボットの軌道追従制御をオンラインで行なうことで、この問題が解決される。この手法による計算機シミュレーションの結果を図9に示す。これを図6と図7と比較することにより、本手法は、姿勢を全く最適化しない手法よりワイヤ張力を低く抑えている。一方、初期姿勢だけでなくアーム運動途中の姿勢も最適化を行なう本論文のアルゴリズムBより大きなワイヤ張力を必要とする。しかし必要なワイヤ張力の差は小さく、初期姿勢を最適化するだけでも大きな効果が得られていることが分かる。

図8: Comparison of the square-sum of tendon tractions between the CT Arm type 1 and Type 2

4. 結論とまとめ

本論文では、多関節マニピュレータの最適姿勢制御法を提案し、姿勢最適化アルゴリズムを開発した。本手法の有効性は、まず簡単なマニピュレータモデルを用いた関節トルク2乗和の最小化問題により検討した。結果として、マニピュレータアームはできるだけ根元側に近づく姿勢を取り、関節トルクの増大を防ぐ動作が生成されることを示した。次いで、この姿勢最適化アルゴリズムを筆者らが提案したCTアーム⁽¹⁾に適用し、ワイヤ張力2乗和を最小化する静的な姿勢最適化アルゴリズムを構成した。なお、計算機シミュレーションを用いてその有効性を検証した。その結果、姿勢最適化制御を行なう場合、機構が単純で適応性の高いタイプ1のCTアームが有効であり、しかし一般に姿勢最適化制御を行なわない場合、タイプ2のCTアームが有効であることが明確化できた。

今後、アクチュエータの上限値も考慮した最適姿勢制御法を検討し、現在開発中のCTアーム機械モデルに適用し、実モデルによる検証を行っていく。

参考文献

- (1) 広瀬・馬, 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, (1990), pp.1291-1298.
- (2) K. Asano, et al., *Multijoint inspection robot*, IEEE Trans.

(a) Arm motion of the CT Arm type 1

(b) Arm motion of the CT Arm type 2

(c) Profiles of the square-sum of tendon tractions

図9: Comparison of the arm postures and the required tendon tractions by the pseudoinverse algorithm in the case of adjusting the arm initial posture

- on Industrial Electronics, Vol.IE-30, No.3, (1983), pp.277-281.
- (3) S. Hirose, S. Oda and Y. Umetani, *An active cord mechanism with oblique swivel joints and its control*, in Proc. 1981 ROMANSY, (1981), pp.395-407.
- (4) 広瀬・馬, 多関節マニピュレータのモレリ駆動, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.1, (1990), pp.9-16.
- (5) S. Hirose, T. Kado and Y. Umetani, *Tenser actuated elastic manipulator*, in Proc. 6th IFToMM World Congress, Vol.2, (1983), pp.978-981.
- (6) 和田, ほか, 柔軟性を有する多関節アームの試作, 第23回 SICE 学術講演会予稿集, (1984), pp.359-360.
- (7) S. C. Jacobsen, et al., *Design of the Utah/MIT dexterous hand*, in Proc. 1986 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.3, (1986), pp.1520-1534.
- (8) S. Ma, S. Hirose, and H. Yoshinada, *Design and experiments for a coupled tendon-driven manipulator*, IEEE Control System Magazine, Vol.13, No.1, (1993), pp.30-36.
- (9) A. Liegeois, *Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multi-body mechanisms*, IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, Vol.7, No.12, (1977), pp.868-871.