ワイヤ干渉駆動型多関節マニピュレータの動的制御法*

馬 書 根*¹, 広 瀬 茂 男*²

Dynamic Control Approaches for a Coupled Tendon-Driven Manipulator

Shugen MA and Shigeo HIROSE

Dynamic control approaches (decoupled algorithms) for a Coupled Tendon-Driven Manipulator Arm (or CT Arm) are presented in this paper, in which the dynamics of a manipulator arm also the dynamics of a tendon-driven system are considered for the case of high speed motion. The mechanism for the CT Arm is a special tendon traction transmission mechanism, in which a pair of tendons used to drive a joint are pulled from base actuators via pulleys mounted on the base-side joints. The mechanism can optimally utilize the coupled drive function of the tendon traction forces and thus enables the lightweight manipulator to exhibit enormous payload capability. Its properties will be elucidated by the proposed dynamic control approaches. Computer simulation was also executed in this study to verify the validity of the proposed control approaches.

Key Words: Robot, Manipulator, Motion Control, Optimal Control, CT Arm (Coupled Tendon-Driven Manipulator Arm), Dynamic Control, Decoupled Algorithm

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⁾のための動的制御法(ワイヤ張力決定手法)を提案し、その有効性について検討を行う。

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狭い環境の作業において有効であるにもかかわらず、その実現には幾つかの大きな技術的な問題点を残している。最大の問題は、通常の設計においてマニピュレータ重量が過大になってしまうことである。この問題に対して従来、i) 特殊な回転関節を使用し軽量化を図ろうとしたもの^{(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行なおうとするもの⁽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し軽量化を図ろうとしたもの^{(5)~(7)}などが提案されているが、これらだけでは実用的な多関節マニピュレータを実現することができない。よって筆者らは干渉駆動⁽⁸⁾と連結差動駆動機構⁽⁹⁾を基にワイヤ干渉駆動型多関節マニピュレータ(「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用いてCTアームの有効性を確認した⁽¹⁰⁾。

CTアームは全く新しい機構であり、その制御法についてはこれまで検討されていない。CTアームの制御には、ワイヤ張力の決定手法とその張力を実現するモータサー

ボ系が含まれる。実際のワイヤ駆動ロボットを動作させる際、モータサーボ系が非常に重要であり、これについて様々な研究がなされている^{(11),(12)}。しかしそれと同時にCTアームの有効性を最大限に発揮するためには、この機構特有のワイヤ張力決定法を新しく開発する必要がある。本論文では、CTアーム特有の制御として、動的な効果も考慮する多くの冗長自由度を有するワイヤ干渉駆動系のワイヤ張力決定法を提案し、その有効性を計算機シミュレーションによって検討する。

2. CTアームの機構

本節では、CTアーム機構を簡単に紹介する。多関節マニピュレータアームは一般には任意の節数 n からなるが、ここでは、 $n = 3$ の場合の機構を示す。

2.1 タイプ1のCTアーム 図1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。

2.2 タイプ2のCTアーム 図2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

* 原稿受付 1995年2月24日。

*¹ 正員、茨城大学工学部 (〒316 日立市中成沢町4-12-1)。*² 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

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している。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*。

図1: タイプ1のCTアームの機構

図2: タイプ2のCTアームの機構

3. CTアームの動的制御法

CTアームの動的制御を検討するに当たって、アーム自身の動的な効果だけでなく、各関節に軸着されているプーリーやワイヤなどの効果も考慮すべきである。この点がCTアームの動的制御を検討する上での特徴とも言える。一般にワイヤの重量がアーム自身の重量より遥かに軽いので、ワイヤ重量の効果を見捨てる。本論文でもワイヤ重力の効果を見捨てる。

3.1 基本制御関係式の導入

CTアームの動的制御特性を解析するため、まずCTアームにおける基本制御関係式の導入を述べる。

3.1.1 CTアームの運動方程式 CTアームにおいて、アーム先端と関節との加速度レベルでの関係式は

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} \quad (1)$$

*注: 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。

と表せる。ここで $\ddot{\mathbf{x}} \in R^m$ はアーム先端の加速度、 $\dot{\mathbf{q}} \in R^n$ は関節回転角速度、 $\mathbf{J} \in R^{m \times n}$ はアーム先端と関節に関係付けるヤコビ行列、そして $\dot{\mathbf{J}} \in R^{m \times n}$ はヤコビ行列 $\mathbf{J}$ の時間微分である。

またCTアームの動力学方程式を、

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \quad (2)$$

と表すことができる。ここで $\boldsymbol{\tau} \in R^n$ は各リンクに作用する関節トルク、 $\mathbf{H} \in R^{n \times n}$ は各関節に装備するプーリーの効果も考慮したアームの慣性行列、 $\mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^n$ はプーリーの運動効果も含むアームのコリオリ力と向心力による関節トルク、そして $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in R^n$ はプーリーの重力と共にアームの重力による関節トルクである。

CTアームの場合、その動特性にはワイヤ駆動系のプーリーの効果が含まれる。この点がCTアームの動特性を検討する上での特徴と考えられる。

CTアームの慣性行列 $\mathbf{H}$ には、各関節上にプーリー質量が追加される効果と、関節の屈曲運動にプーリーが運動して回転しなければならないことで生じる慣性モーメントが追加される効果の二つが含まれている。プーリーの回転慣性モーメントがアームの慣性と比較するとはるかに小さいので、それによってアーム全体の慣性に与える影響は無視することができる。本論文では、後者のプーリーの慣性効果を見捨てる。前者の質量効果は、タイプ1のCTアーム機構では第 i 関節の追加質量 m_i が

$$m_i = (n - i + 1)m_P$$

タイプ2のCTアームでは、

$$m_i = \{2(n - i) + 1\}m_P$$

となる。ここで m_P はプーリー単体の質量である。

なお、 $\mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ と $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ へのプーリー存在の効果は、その質量を各関節上に加算する形式で考慮している。

3.1.2 ワイヤと関節との関係 CTアームにおいて、ワイヤと関節との加速度レベルでの運動学関係式は

$$\ddot{\mathbf{s}} = \mathbf{D}\ddot{\mathbf{q}} \quad (3)$$

と示す。ただし、 $\ddot{\mathbf{s}} \in R^{2n}$ はワイヤ移動加速度である。ここでワイヤは各関節に一対あるので $2n$ 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。

さらに(3)式の $\mathbf{D} \in R^{2n \times n}$ は駆動系の運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

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} r_1 & -r_1 & r_1 & -r_1 & \dots & r_1 & -r_1 \\ 0 & 0 & r_2 & -r_2 & \dots & r_2 & -r_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & r_n & -r_n \end{bmatrix}^T \in R^{2n \times n} \quad (4)$$

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。

そして、タイプ2のCTアームは、

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} r_1 & -r_1 & r_1 & r_1 & \dots & r_1 & r_1 \\ 0 & 0 & r_2 & -r_2 & \dots & r_2 & r_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & r_n & -r_n \end{bmatrix}^T \in R^{2n \times n} \quad (5)$$

と示し、ただし、 r_i は(4)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。

またワイヤの張力 $\mathbf{f} \in R^{2n}$ と関節トルク $\boldsymbol{\tau} \in R^n$ との関係は、

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D}^T \mathbf{f} \quad (6)$$

と示す。ここで、 $\mathbf{D}^T \in R^{n \times 2n}$ は係数行列 $\mathbf{D}$ の転値である。

3.1.3 アクチュエータの消費パワー特性 アクチュエータにDCモーターを想定する場合の検討を行っておく。DCモーターの消費パワー P は一般に次のように

$$P = \boldsymbol{\tau}_A^T \dot{\mathbf{q}}_A + k_A \boldsymbol{\tau}_A^T \boldsymbol{\tau}_A \quad (7)$$

と示される。ここで $\boldsymbol{\tau}_A \in R^{2n}$ はモーター発生トルク、 $\dot{\mathbf{q}}_A (= \mathbf{D}_A \dot{\mathbf{q}}) \in R^{2n}$ はモーター発生回転角速度、 k_A はモーターの特性を示す係数である。DCモーターは負のエネルギーを回収できないことを考慮すると、消費パワー P は

$$P = [\boldsymbol{\tau}_A^T \dot{\mathbf{q}}_A] + k_A \boldsymbol{\tau}_A^T \boldsymbol{\tau}_A \quad (8)$$

となり、ここで、

$$[X] = \begin{cases} X & X > 0 \\ 0 & X \leq 0 \end{cases}$$

である。

またモーター発生トルク $\boldsymbol{\tau}$ とワイヤ張力 $\mathbf{f}$ の静力学関係

$$\mathbf{f} = \mathbf{D}_A \boldsymbol{\tau}_A$$

と示す。ここで、 $\mathbf{D}_A = \text{diag}\{1/r_{A(j)}\} \in R^{2n \times 2n}$ であり、 $r_{A(j)}$ は第 j モーター軸プーリー半径である。

DCモーターの回転角加速度 $\ddot{\mathbf{q}}_A \in R^{2n}$ を

$$\ddot{\mathbf{q}}_A = \mathbf{D}_A \ddot{\mathbf{s}} = \mathbf{D}_A \mathbf{D} \ddot{\mathbf{q}} \quad (9)$$

と示すと、モーター発生トルク $\boldsymbol{\tau}$ とワイヤ張力 $\mathbf{f}$ の動力学関係は

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_A &= \mathbf{H}_A \ddot{\mathbf{q}}_A + \mathbf{D}_A^{-1} \mathbf{f} \\ &= \mathbf{H}_A \mathbf{D}_A \mathbf{D} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}_A^{-1} \mathbf{f} \end{aligned} \quad (10)$$

となる。ここで、モーターの慣性行列 $\mathbf{H}_A$ は

$$\mathbf{H}_A = \text{diag}\{I_{A(j)}\} \in R^{2n \times 2n}$$

と与え、 $I_{A(j)}$ は第 j モーターの慣性モーメントである。

3.1.4 ワイヤの力学特性 ワイヤは張力しか生成できない。そのため、本論文では、

$$\mathbf{f} \geq \mathbf{f}_{\min} \quad (11)$$

$$\mathbf{f}_{\min} = \{f_{\min}\} \in R^{2n}, \quad f_{\min} \geq 0$$

と設定する。ここで $\mathbf{f}_{\min}$ はワイヤ張力の下限値である。

4. CTアームの動的制御方法の誘導

アームの先端自由度が m であり、ワイヤが $2n$ ($2n > m$)本あるとすると、ワイヤ張力の制御法は、冗長自由度 $2n - m$ の制御問題(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)となる。そしてワイヤ張力最小制御問題は、冗長自由度を利用して、評価基準(例えば、 $\|\mathbf{f} - \mathbf{f}_0\|$ 、 $\mathbf{f}_0$ はワイヤのバイアス張力)を、拘束条件(式(1)、(2)、(6))のもとで最適化する解を求めるものとなる。

4.1 手法その1: 関節トルク最小化制御のもとでワイヤ張力を先端から根本へ向かって逐次的に誘導する方法

CTアームの最も単純な制御法としては、アーム系の運動学冗長性とワイヤ駆動系の駆動冗長性を分けて、冗長アームの関節トルクの導出とそのトルクを実現するためのワイヤ張力の決定を別々に行なう方法である。冗長アームの関節トルクの決定に当たって、ゼロ空間手法⁽¹³⁾やラグランジェ手法⁽¹⁴⁾が考えられる。しかし、ゼロ空間手法やラグランジェ手法は関節トルクだけを最小にしようとする、過大な関節回転角速度による不安定なアームの運動を生じることが既に指摘されている^{(13),(14),(15),(16)}。安定な関節トルク最小化制御を行なうため、筆者らは、DSTOと呼ぶ冗長マニピュレータの制御法を提案している⁽¹⁵⁾。関節トルクの決定に当たって、この手法を用いる。また必要な関節トルクを生成するワイヤ張力は、低いワイヤ張力をその下限値とし、先端から根本に向かって逐次的に誘導される。

つまり、与えられたアーム先端の動き $\ddot{\mathbf{x}}$ を生成する関節トルク $\boldsymbol{\tau}$ を誘導するにあたって、評価基準

$$\alpha \|\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}_{\min}\|^2 + (1 - \alpha) \|\ddot{\mathbf{q}}\|$$

を、最小化する関節回転各加速度をまず求める。これは、

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_B^+ (\ddot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{q}}) + \alpha (\mathbf{I} - \mathbf{J}_B^+ \mathbf{J}) \mathbf{B}^{-1} \mathbf{H} (\boldsymbol{\tau}_{\min} - \mathbf{c} - \mathbf{g}) \quad (12)$$

となる。ただし、

$$\mathbf{J}_B^+ = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{J}^T)^{-1}, \quad \mathbf{B} = [(1 - \alpha) \mathbf{I} + \alpha \mathbf{H}^T \mathbf{H}]$$

である。

そしてこの(12)式を(2)式に代入すれば関節トルクが求められる。次に、(6)式の逆問題を解きワイヤ張力を求める。ワイヤは張力だけしか生成できず推力は生成できない問題を考慮した(6)式の逆解を以下のような簡単な手法で逐次的に求める。これは、まず先端の第 n 関節トルク $\tau_{(n)}$ を生成するワイヤ張力 $f_{(2n-1)}, f_{(2n)}$ を、

$$f_{(2n-1)} = \begin{cases} \tau_{(n)} / D_{(2n-1,n)} + f_{\min} & \tau_{(n)} > 0 \\ f_{\min} & \tau_{(n)} \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$f_{(2n)} = \begin{cases} f_{\min} & \tau_{(n)} > 0 \\ \tau_{(n)} / D_{(2n,n)} + f_{\min} & \tau_{(n)} \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

のように決める。引続き、第 $n-1$ 関節トルク $\tau_{(n-1)}$ を実現するワイヤ張力 $f_{(2n-3)}, f_{(2n-2)}$ を、

$$f_{(2n-3)} = \begin{cases} \frac{\tau_{(n-1)} - \sum_{j=2n-1}^{2n} f_{(j)} D_{(j,n-1)}}{D_{(2n-3,n-1)}} + f_{\min} & \tau_{(n-1)} > 0 \\ f_{\min} & \tau_{(n-1)} \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$f_{(2n-2)} = \begin{cases} f_{\min} & \tau_{(n-1)} > 0 \\ \frac{\tau_{(n-1)} - \sum_{j=2n-1}^{2n} f_{(j)} D_{(j,n-1)}}{D_{(2n-2,n-1)}} + f_{\min} & \tau_{(n-1)} \leq 0 \end{cases} \quad (16)$$

で定める。同様に第 i 関節トルク $\tau_{(i)}$ を生成するワイヤ張力 $f_{(2i-1)}, f_{(2i)}$ を、

$$f_{(2i-1)} = \begin{cases} \frac{\tau_{(i)} - \sum_{j=2i+1}^{2n} f_{(j)} D_{(j,i)}}{D_{(2i-1,i)}} + f_{\min} & \tau_{(i)} > 0 \\ f_{\min} & \tau_{(i)} \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$f_{(2i)} = \begin{cases} f_{\min} & \tau_{(i)} > 0 \\ \frac{\tau_{(i-1)} - \sum_{j=2i+1}^{2n} f_{(j)} D_{(j,i)}}{D_{(2i,i)}} + f_{\min} & \tau_{(i)} \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

と求めることができる。このように逐次的に先端から根本へ向かって、関節トルクを実現するためのワイヤ張力を簡単に定めることができる。ただし、式(13)~式(18)中の $D_{(i,j)}$ は係数行列 $\mathbf{D}$ の第 i 行 j 列の要素を指す。

4.2 手法その2: 関節トルク最小化制御のもとでワイヤ張力の最小化制御手法 手法その1と同じ方法で関節トルクを求める。(6)式の逆解の誘導を行うに対しては、ワイヤ張力の2乗和最小化という評価基準を実現する解を誘導する。この評価に基づく解は、一部のワイヤへの張力の集中を防ぐものであり、同時に全体としてのエネルギー消費最小化を実現する最適制御法に対応する。さらにワイヤ駆動特有の制約(ワイヤは張力だけしか生成できず推力は生成できないこと)を考慮しなければならない。これらを考慮した(6)式の逆解の誘導法を以下に示す⁽¹⁾。

- a) まず(11)式の不等式拘束条件を考慮せず(6)式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求める。これは、ラグランジェの未定係数を含む関数

$$L = \|\mathbf{f} - \mathbf{f}_0\|^2 + \lambda^T (\boldsymbol{\tau} - \mathbf{D}^T \mathbf{f}) \quad (19)$$

を最小にする解として求められる。ここで $\mathbf{f}_0 \in R^{2n}$ 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、(11)式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(11)式の制約条件下ではある程度の正值を設定した方がよい場合もある。これは正值の $\mathbf{f}_0$ を与えると(11)式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。(19)式の解は、

$$\mathbf{f} = (\mathbf{D}^T)^+ \boldsymbol{\tau} + [\mathbf{I} - (\mathbf{D}^T)^+ \mathbf{D}^T] \mathbf{f}_0 \quad (20)$$

となる。ここで $\mathbf{I} \in R^{2n \times 2n}$ は単位行列である。また $(\mathbf{D}^T)^+$ は係数行列 $\mathbf{D}^T$ の擬似逆行列であり、

$$(\mathbf{D}^T)^+ = \mathbf{D}(\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \in R^{2n \times n} \quad (21)$$

と与えられる。

- b) ワイヤ張力についての(20)式の解が、(11)式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) (11)式を満足しない(20)式の解を $\mathbf{f}_k \in R^k$ とする。ただし番号 k は(11)式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、 $\mathbf{f}_k = \mathbf{f}_{\min} \in R^k$ と設定した条件下で $\mathbf{f}_k$ 以外のワイヤ張力の計算を行う。この計算は、

$${}^0 \mathbf{D}^T = ({}^0 \mathbf{d}_j^T) \in R^{n \times 2n} \quad (22)$$

$${}^0 \mathbf{d}_j^T = \begin{cases} \mathbf{d}_j^T & j \neq k \\ 0 & j = k \end{cases}$$

$${}^0 \mathbf{f} = ({}^0 f_j) \in R^{2n} \quad (23)$$

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

$${}^0 \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau} - (\mathbf{D}^T - {}^0 \mathbf{D}^T) \mathbf{f}_{\min} \quad (24)$$

$${}^0 \mathbf{f}_0 = ({}^0 f_{0(j)}) \in R^{2n} \quad (25)$$

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

を求め、これらの ${}^0 \mathbf{D}^T$, ${}^0 \boldsymbol{\tau}$, ${}^0 \mathbf{f}$, と ${}^0 \mathbf{f}_0$ を(20)式における $\mathbf{D}^T$, $\boldsymbol{\tau}$, $\mathbf{f}$, と $\mathbf{f}_0$ に置換することで実行する。

4.3 手法その3: ワイヤ張力の最小化制御手法 手法その1とその2では、CTアームの冗長性をアームの運動学冗長性とワイヤ駆動系の駆動冗長性に分けて、別々に冗長性制御を行った。冗長性制御をCTアームの全冗長自由度に対し同時に行うと、さらに良い結果が得られる可能性がある。そこで、CTアームの全ての冗長自由度を同時に扱う手法を開発する。この手法は、与えられたアーム先端の動きを生成する(1)式、(2)式と(6)式の条件下で評価基準

$$\|\mathbf{f} - \mathbf{f}_0\|^2$$

を最小化するワイヤ張力をラグランジェ手法で直接的に誘導するものである。得られる解(即ち、ワイヤ張力と関節回転角加速度)は

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_0 + \mathbf{A} \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{W} \mathbf{J}^T)^{-1} (\ddot{\mathbf{x}}_0 - \mathbf{J} \mathbf{H}^{-1} \boldsymbol{\tau}^*) \quad (26)$$

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_W^+ \ddot{\mathbf{x}}_0 + (\mathbf{I} - \mathbf{J}_W^+ \mathbf{J}) \mathbf{H}^{-1} \boldsymbol{\tau}^* \quad (27)$$

と示し、ここで

$$\mathbf{J}_W^+ = \mathbf{W} \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{W} \mathbf{J}^T)^{-1}$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{A}$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{D}(\mathbf{H}^T)^{-1}$$

$$\ddot{\mathbf{x}}_0 = \ddot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{q}}$$

$$\boldsymbol{\tau}^* = \mathbf{D}^T \mathbf{f}_0 - \mathbf{c} - \mathbf{g}$$

と表せる。ただし、ここで示された解は(11)式の不等式拘束条件を考慮していない。この条件を満足させる解は、手法その2に示されているアプローチで誘導できる。

5. 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制御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3関節CTアームであり、その関節に装備するプーリーの質量は全て $m_P = 0.05$ [kg]、直径は $r = 0.2$ [m]とする。またアクチュエータとしてのDCモーター軸のプーリー直径は $r_A = 0.05$ [m]とし、その慣性モーメントは $I_A = 0.02$ [kg $\cdot$ m²]とする。アーム先端の軌道運動は、始点と終点とで静止しておりその間三角形の加減速 1 [m/s²]で切り替えるものとする。関節の回転角速度と角度は関節の回転角加速度が求まった後に 10 ms ごとのテーラー展開法による積分演算で誘導した。そして、先端質量 M は 5.0 [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 0.0 [N]とした。

(a) 手法その1とその2

(b) 手法その3

図3: タイプ1のCTアームの運動

図4: 図3に示すタイプ1のCTアーム運動に対応するワイヤ張力2乗和の時間変化

図3 (a)は手法その1とその2によるタイプ1のCTアームの動き(重み係数 $\alpha = 0.001$)を、図3 (b)は手法その3によるアームの動きを示している。また図4はそのワイヤ張力2乗和の時間変化を、図5はアクチュエータとしてのDCモーターの消費パワーの時間変化を示す。図4と図5からわかるように、手法その3は、ワイヤ張力2乗和の最大値もアクチュエータ消費パワーの最大値もその他の2手法のものより小さく、タイプ1のCTアームの制御に有効である。また手法その1とその2とは、全く同じ結果を得ることがわかる。つまり直接にワイヤ張力を最小にすると、有効であるが、関節トルクを決定した後、ワイヤ張力を最小化する効果が無くなり、最も単純な逐次決定手法を使用する方が有効であると考えられる。

図5: 図3に示すタイプ1のCTアーム運動に対応するアクチュエータ消費パワーの時間変化

(a) 手法その1とその2

(b) 手法その3

図6: タイプ2のCTアームの運動

図6 (a)は手法その1とその2によるタイプ2のCTアームの動き(重み係数 $\alpha = 0.001$)を、図6 (b)は手法その3によるアームの動きを示している。また図7はその

ワイヤ張力2乗和の時間変化を、図8はアクチュエータの消費パワーの時間変化を示している。タイプ1のCTアームと同様、手法その3の結果ではワイヤ張力2乗和も、アクチュエータの消費パワーも小さい。また関節トルクが決められても、ワイヤ張力を最小化する効果があり、逐次決定手法より良い結果が得られていることがわかる。

図7: 図6に示すタイプ2のCTアーム運動に対応するワイヤ張力2乗和の時間変化

図8: 図6に示すタイプ2のCTアーム運動に対応するアクチュエータ消費パワーの時間変化

6. 結論とまとめ

本論文では、CTアームのための動的制御法(ワイヤ張力決定手法)を提案した。本手法はワイヤの牽引で駆動する機構の特性を考慮しながらワイヤ張力の2乗和を最小化するものである。さらに計算機シミュレーションによりその有効性を検討し、アームの運動冗長性とワイヤ駆動系の駆動冗長性を同時に扱う方法(手法その3)がCTアームの制御法として最も有効であるという結果を得た。

今後、現在開発中のCTアーム機械モデルの制御に本手法を適用し、実モデルによる検討を行っていく。

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), 1291-1298.
- (2) K. Asano, et al., *Multijoint inspection robot*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.IE-30, No.3, (1983), 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), 395-407.
- (4) 広瀬・馬, 多関節マニピュレータのモレイ駆動, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.1, (1990), 9-16.
- (5) S. Hirose, T. Kado and Y. Umetani, *Tenser actuated elastic manipulator*, in Proc. 6th IFToMM World Congress, Vol.2, (1983), 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), 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. Hirose and M. Sato, *Coupled drive of the multi-DOF robot*, in Proc. 1989 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.3, (1989), 1610-1616.
- (9) S. Hirose, *Connected differential mechanism and its application*, int Proc. 1985 Int. Conf. on Advanced Robotics, (1985), 319-326.
- (10) S. Ma, S. Hirose, and H. Yoshinada, *Design and experiments for a coupled tendon-driven manipulators*, IEEE Control System Magazine, Vol.13, No.1, (1993), 30-36.
- (11) H. Ko, C. C. Davis, E. K. Iversen, and S. C. Jacobsen, *High stiffness and low slew drag in an antagonistic control system*, in Proc. 1990 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.3, (1990), 1879-1885.
- (12) W. T. Townsend, *The effect of transmission design on force-controlled manipulator performance*, Ph. D. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, MIT, Cambridge, (1988).
- (13) K. C. Suh and J. M. Hollerbach, *Local versus global torque optimization of redundant manipulators*, in Proc. 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.1, (1987), 619-624.
- (14) K. Kazerooni and A. Nedungadi, *Redundancy resolution of robotic manipulators at the acceleration level*, in Proc. 7th IFToMM World Congress, (1987), 1207-1211.
- (15) S. Ma, D. N. Nenchev, and S. Hirose, *Improving local torque optimization techniques for redundant robotic mechanisms*, Int. J. of Robotics Systems, Vol.8, No.1, (1991), 75-91.
- (16) 馬・ネンチェフ, 冗長マニピュレータのための実時間冗長性制御法, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.5, (1994), 704-710.