

卒業論文

遊星歯車と外乱オブザーバを用いた
二関節同時駆動機構の実現

平成22年2月16日提出
指導教員 堀 洋一 教授

電気工学科
03080405 木村 康人

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 研究の目的.....	2
第2章 二関節筋の説明	3
2.1 従来型のロボットアームと生物の四肢モデルとの違い.....	3
2.2 二関節同時駆動機構をもつロボットアームの特性.....	3
2.2.1 筋の非線形粘弾性.....	3
2.2.2 拮抗駆動.....	4
2.2.3 関節トルクと筋肉トルクの関係.....	5
2.3 二関節同時駆動機構を有するロボット.....	5
2.3.1 二関節同時駆動機構を忠実に模擬したロボット「HIPRO」.....	6
2.3.2 油圧アクチュエータを利用したロボット「GORRIRA」.....	6
2.3.3 空気圧アクチュエータを利用したロボット「空脚K」.....	6
2.3.4 タイミングベルトを利用したロボットアーム.....	6
2.4 既存研究との比較.....	7
第3章 遊星歯車の原理	8
3.1 遊星歯車と二関節同軸同機構との対応.....	8
3.1.1 遊星歯車の構成.....	8
3.1.2 遊星歯車と各筋肉との対応.....	9
3.2 遊星歯車の運動方程式.....	9
3.2.1 遊星歯車の拘束条件.....	9
3.2.2 遊星歯車の運動方程式.....	9
第4章 外乱オブザーバによる制御手法	11
4.1 遊星歯車のブロック線図.....	11
4.2 外乱オブザーバを装備したブロック線図.....	12
第5章 シミュレーション結果と考察	14
5.1 外乱オブザーバを用いない場合の結果.....	14
5.2 外乱オブザーバを装備した場合の結果.....	15
5.3 考察.....	15
第6章 ロボットアームの実装	16
6.1 ロボットアームの構造.....	16
6.2 ロボットアームの緒元.....	17
第7章 トルク分離と等分配の実験結果	18
7.1 外乱オブザーバを用いない場合の結果.....	18

7.2 外乱オブザーバを装備した場合の結果.....	19
7.2.1 伸展姿勢における実験結果.....	19
7.2.2 屈曲姿勢における実験結果.....	20
7.3 考察とまとめ.....	21
7.3.1 考察.....	21
7.3.2 まとめ.....	21
第8章 静力学的条件における手先出力特性解析の検討と課題.....	22
8.1 二関節筋を備えたロボットアームの手先出力特性.....	22
8.1.1 手先出力の解析.....	22
8.1.2 絶対値ヤコビヤンの導入による筋トルク指定の簡単化.....	23
8.2 実験.....	23
8.2.1 手先固定時のロボットアームの動作.....	23
8.2.2 実験結果.....	24
8.3 考察.....	25
第9章 まとめ.....	26
9.1 結論.....	26
9.2 今後の課題.....	26
参考文献	27
発表文献	27
謝辞	28

第1章 序論

1.1 研究の背景

現在、先進国における少子高齢化は深刻な状況にある。特に我が国では2008年での高齢者の割合は22.1%に達しており、2013年には5人に1人が高齢者になると言われている。これに対し、我が国での15歳から64歳の生産年齢人口と呼ばれる人々の割合は減少の一途を辿っており、1960年では高齢者1人に対する生産年齢人口の数は11.2人であったのに対し、2005年では3.3人となっている(図1.1)。この状況は、労働者数の減少や介護者に対する負担の増加、老人が老人を介護する老老介護、年金制度の崩壊などといった様々な問題を引き起こす^[1]。

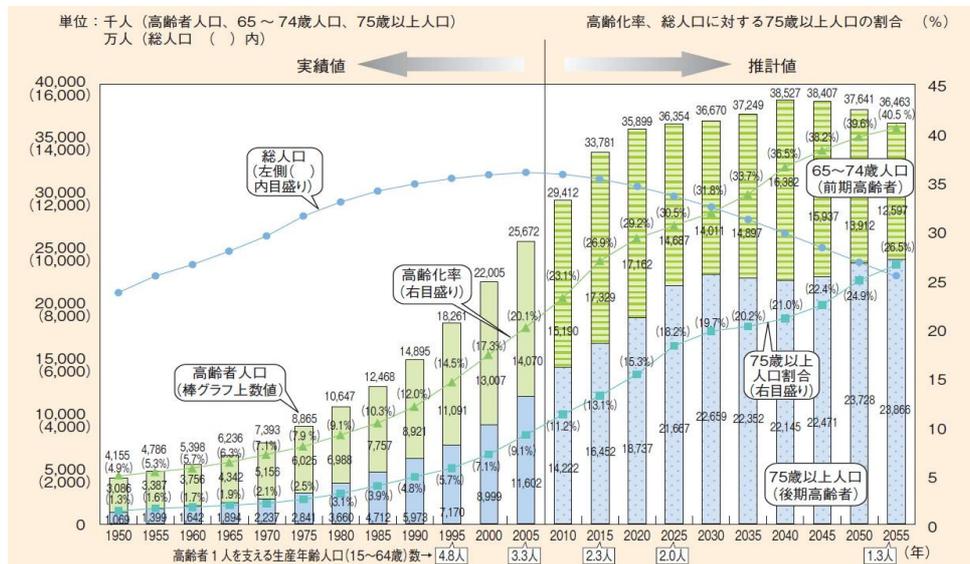


図 1.1: 高齢者人口とそれに対する生産年齢人口の推移^[1]

この少子高齢化への対策としてロボット技術の発展が期待されており、ロボット技術を応用したパワーアシストや生活支援によって、要介護者数を減らし、生産者数を増加させることができると考えられている。このように今後必要となる福祉機器やロボットスーツなどの人間の生活の中で利用されるロボットは、これまで工場の中をその活動領域としていたロボットとは異なる特徴を持つ必要があると考えられる。それは、

1. 膨大な計算による極めて正確な動作は不要であり、人間と同程度の正確さで十分であること
2. 人間の動きに合わせて素早く動作できるということ
3. 人間と衝突した場合などにおける安全性を有しているということ

などである。これらの特徴をロボットに持たせるために、生物が有している二関節筋が注目されている。二関節筋は文字通り2つの関節にまたがって配置され、両方の関節に同時に働くという特徴を持った筋肉であり、生物の運動制御を担っていると考えられている。この二関節筋を模擬した機構を備えたロボットが実現されることによって、人間と協働するロボットが実現できると考えられる。現在、様々な方法で二関節筋を模擬した機構を持ったロボットが製作されているが、構造が極め

て複雑であったり、動作が限定的であったりしている。この二関節筋を模擬する機構をより単純に製作することが可能であれば、二関節筋が運動に及ぼす影響を容易に分析できるようになり、ロボット技術の進歩はもちろん、二関節筋の特性を理解することによってリハビリテーションなどの分野にも貢献できる。

1.2 研究の目的

本研究では遊星歯車の特異な動作に着目し、これを生物特有の運動機構である二関節同時駆動機構として動作させロボットアームに搭載することを考える。

まず、遊星歯車のギア間における不都合な干渉を外乱オブザーバを利用して除去する手法を提案する。また、この手法が実現可能であることをシミュレーション及び作成したロボットアームでの実験によって示す。

さらに、二関節筋を装備することによって静力学的な手先出力方向が容易に操作できることを確認する。

第2章 二関節筋の説明

2.1 従来型ロボットアームと生物の四肢モデルとの違い

従来型のロボットアームは、関節ごとにモータを配置してそれぞれの関節を独立に駆動するという機構を備えている。これに対して代表的な生物四肢モデルには1つの関節のみを駆動する一関節筋が2対4筋、2つの関節を同時に駆動する二関節筋が1対2筋存在している。図2.1にその様子を示す。

この二関節筋が存在することによって2つの関節の独立性が失われてしまうのでその存在意義が分からなかったのだが、近年の研究によって二関節筋が生物の運動制御において非常に重要な役割を担っているということが認識されている。

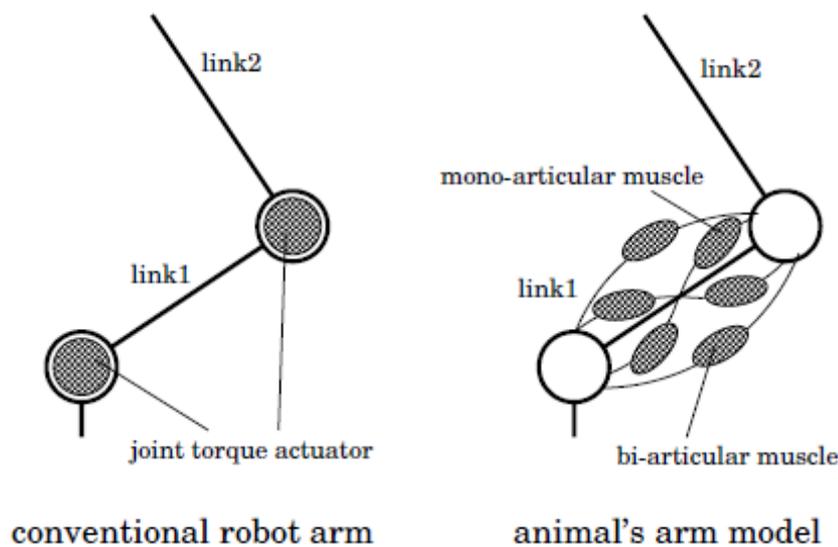


図2.1:従来型ロボットアームと生物の3対6筋四肢モデル

2.2 二関節同時駆動機構を持つロボットアームの特性

図2.2に二関節筋を有した3対6筋のロボットアームモデルを示す。 f_1, f_2, f_3 は収縮筋であり e_1, e_2, e_3 は伸展筋である。 r_1, r_2 はそれぞれの関節のモーメントアーム径であり、 θ_1, θ_2 は関節角度、 L_1, L_2 はアーム長、 T_1, T_2 は関節トルクをそれぞれ表す。

2.2.1 筋の非線形粘弾性

二関節筋の特徴の一つが非線形粘弾性である。まず、筋肉は図2.3のようなモデルで表すことができ、筋の出力 F は次式によって表される。

$$F = u - K(u)x - B(u)\dot{x} = u - kux - bu\dot{x} \quad \text{式(1)}$$

u は筋の収縮力であり、 x は筋の収縮量、 K 、 B はそれぞれ筋の弾性率、粘性率である。 K 、 B は u に比例すると考えることができ、それらの比例定数は k 、 b で表すとす。この非線形粘弾性は制御コンピュータ内でソフトウェア的に再現することが可能であることが吉田らの研究で実証されている^[2]。本研究では、非線形粘弾性は再現に至っておらず、以下に示す拮抗駆動及び二関節同時駆動の再現に焦点を絞る。

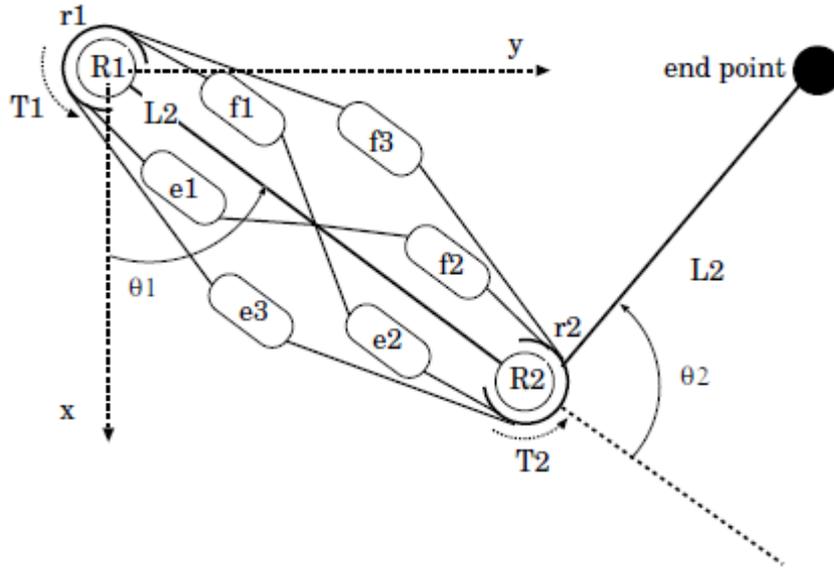


図 2.2: 二関節筋を有する 3 対 6 筋の生物アームモデル

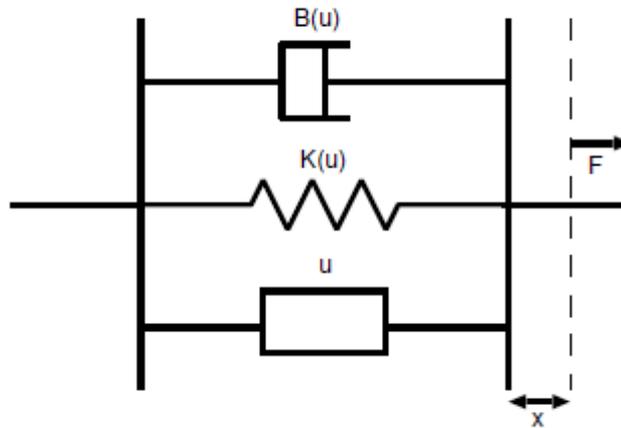


図 2.3: 筋肉のモデル

2.2.2 拮抗駆動

各筋肉が関節に及ぼすトルク τ^m は、収縮筋による出力を F_f 、伸展筋による出力を F_e とすると、

$$\tau^m = (F_f - F_e) \cdot r \quad \dots \text{式(2)}$$

となる。筋 e の出力の最大値を E_{\max} 、筋 f の出力の最大値を F_{\max} とすると筋 e, f の出力 E, F の間に

は、

$$\frac{E}{E_{max}} + \frac{F}{F_{max}} = 1$$
$$0 \leq E \leq E_{max}, \quad E_{max} > 0$$
$$0 \leq F \leq F_{max}, \quad F_{max} > 0$$

…式(3)

という関係がある。

2.2.3 関節トルクと筋肉トルクの関係

3対の拮抗筋対が発揮するトルクを τ_1^m 、 τ_2^m 、 τ_3^m とすると、図2.4のように二関節筋が交差するよう存在しているとみなせば、関節のトルクは以下のように表すことができる。

$$T_1 = \tau_1^m + \tau_3^m$$
$$T_2 = \tau_2^m + \tau_3^m$$

…式(4)

即ち、第一関節トルク T_1 は第一関節単関節筋トルク τ_1^m と二関節筋トルク τ_3^m の和で表され、第二関節トルク T_2 は第二関節単関節筋トルク τ_2^m と二関節筋トルク τ_3^m の和で表される。以上のように二関節筋の働きを単純化して定義すると、実現する上で留意すべき点は、以下の二点である。

1. 単関節筋は、他方の関節に対してはトルクを伝達しない。
2. 二関節筋は、両関節に対して等しくトルクを発揮する。

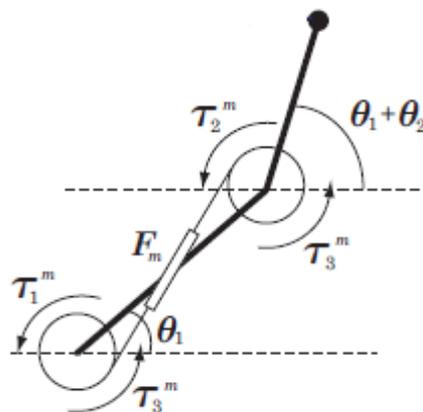


図2.4:二関節筋がクロスしているモデル

本研究では式(4)で表されるトルク関係の実現に焦点を置く。

2.3 二関節同時駆動機構に関する研究

二関節筋の研究は精密工学会生体機構制御・応用技術委員会で行われている。また、ロボット学会などにおいても二関節筋を主題としたセッションが開かれるなど、二関節筋の運動制御機能に関する研究は注目を集めている。

熊本らは静力学的な条件での手先・足先の出力を解析し、二関節筋が先端の位置・力・剛性制御において重要な役割を担っていると結論づけている[3]。

藤川らは人間の筋電信号を測定し、それに基づいた拮抗筋群の協調パターン制御を提案している[4]。

2.3.1 二関節同時駆動機構を忠実に再現したロボットプラットフォーム「HIPRO」[5]

門田らは可変弾性アクチュエータ VEA を開発し、この VEA を 3 対 6 筋構造に基づいて配置した HIPRO というロボットプラットフォームを開発した。図 2.5 は HIPRO を用いたロボットアームであり、人間と同様の手先出力が実現できたとしている。

2.3.2 油圧アクチュエータを用いたロボット「Gorilla」[6]

斉藤らは図 2.6 のような油圧アクチュエータを用いた災害救助ロボット Gorilla を開発した。

2.3.3 空気圧アクチュエータを利用したロボットレッグ「空脚 K」[7]

高山らは図 2.7 に示すような空気圧アクチュエータによるロボットレッグ空脚 K を開発した。このロボットレッグは人間の下肢の筋配置を再現してアクチュエータを配置しており、簡単な制御によって連続跳躍が可能であることを示した。

2.3.4 タイミングベルトを利用したロボットアーム[2]

吉田らはタイミングベルトとモータを用いて、簡単な構造で二関節同時駆動機構を再現した。

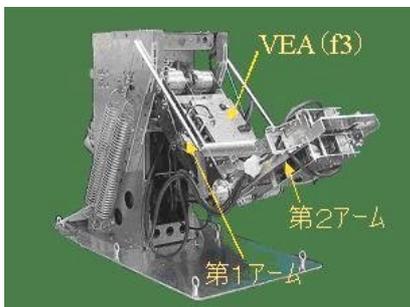


図 2.5: ロボットプラットフォーム HIPRO



図 2.6: 災害救助ロボット Gorilla

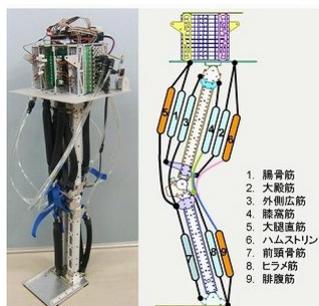


図 2.7: 空脚 K

2.4 既存研究との比較

以上に挙げたような既存の二関節筋装備型ロボットは、非線形粘弾性の再現によって構造が複雑化していたり、応答性が良くないなどの問題を持っている。本研究においては、より簡単な二関節同時駆動を実現するためにDCモータと遊星歯車機構を用いることを試みる。これにより、応答速度が高速で小型化することも容易な二関節同時駆動機構が実現できる。また、タイミングベルトを用いた機構よりもトルク伝達などの解析が容易であると考えられる。

第3章 遊星歯車の原理

3.1 遊星歯車と二関節同軸同機構との対応

3.1.1 遊星歯車の構成

図 3.1 に遊星歯車の構成を示す。遊星歯車はサンギア・リングギア・プラネタリギア・キャリアという 4 つの部分から構成されており、中心にサンギアがあり、その周りを自転しながら公転するプラネタリギアがリングギアとの間に存在する。キャリアはプラネタリギアの公転を伝える円盤である。

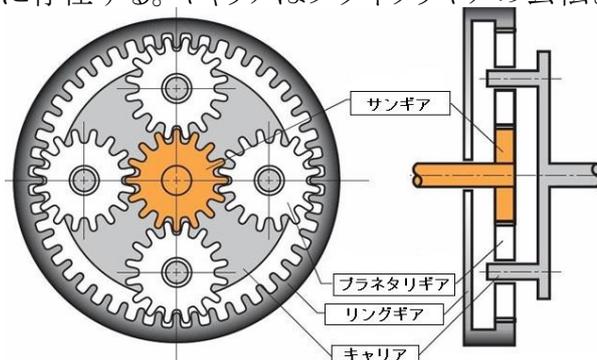


図 3.1:遊星歯車機構の構成

3.2.2 遊星歯車と各筋肉の対応

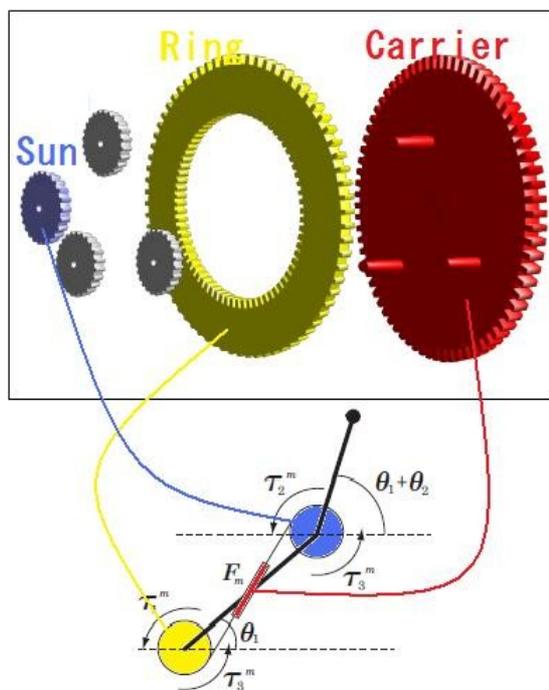


図 3.2:遊星歯車と各筋肉との対応

図 3.2 に遊星歯車と3対6筋の筋肉モデルとの対応を示す。リングギアが第一関節の単関節駆動筋であり、サンギアが第二関節の単関節駆動筋である。そして、キャリアが両関節に作用する二関節筋である。

3.2 遊星歯車の運動方程式

3.2.1 遊星歯車の拘束条件

遊星歯車には、拘束条件が存在する。表 3.1 に遊星歯車のパラメータを示し、以下に拘束条件の式を示す。

$$\begin{aligned} \theta_s - \frac{\rho-1}{2\rho}\theta_p - \frac{\rho+1}{2\rho}\theta_o &= 0 \\ \theta_c &= \theta_o \\ \theta_s + \frac{\rho-1}{2}\theta_p - \frac{\rho+1}{2}\theta_o &= 0 \end{aligned} \quad \dots\text{式(5)}$$

θ_r	リングギア回転角	J_r	リングギアイナーシャ
θ_s	サンギア回転角	J_s	サンギアイナーシャ
θ_c	キャリア回転角	J_c	キャリアイナーシャ
θ_p	プラネタリギア自転角	J_p	プラネタリギア自転イナーシャ
θ_o	プラネタリギア公転角	J_o	プラネタリギア公転イナーシャ
ρ	リング:サンギア比	τ_r	リングギア入力トルク
τ_c	キャリア入力トルク	τ_s	サンギア入力トルク

表 3.1: 遊星歯車のパラメータ

3.2.2 遊星歯車の運動方程式

遊星歯車の運動方程式をラグランジュ法によって求める。以下の式(5)がラグランジュアンである。

$$L = \frac{1}{2}J_r\dot{\theta}_r^2 + \frac{1}{2}J_s\dot{\theta}_s^2 + \frac{1}{2}J_p\dot{\theta}_p^2 + \frac{1}{2}J_o\dot{\theta}_o^2 - \tau_r\theta_r - \tau_s\theta_s - \tau_c\theta_c \quad \dots\text{式(6)}$$

これにラグランジュの未定定数法を適用すると、最終的に以下のような式になる。

$$\begin{pmatrix} J_r\ddot{\theta}_r \\ J_s\ddot{\theta}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_r \\ \tau_s \end{pmatrix} + A^{-1} \cdot S \cdot \begin{pmatrix} \tau_r \\ \tau_c \\ \tau_s \end{pmatrix} \quad \dots\text{式(7)}$$

ただし、

$$A \equiv \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\rho}{\rho+1} \frac{J_c+J_o}{J_r} + \frac{\rho+1}{2\rho} & \frac{1}{\rho+1} \frac{J_c+J_o}{J_s} + \frac{\rho+1}{2} \\ \frac{\rho}{\rho-1} \frac{J_p}{J_r} + \frac{\rho-1}{2\rho} & \frac{1}{\rho-1} \frac{J_p}{J_s} - \frac{\rho-1}{2} \end{pmatrix} \quad \dots\text{式(8)}$$

$$S \equiv \begin{pmatrix} s & 1 & t \\ u & 0 & v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-\rho}{\rho+1} \frac{J_c+J_o}{J_r} & 1 & \frac{-1}{\rho+1} \frac{J_c+J_o}{J_s} \\ \frac{-\rho}{\rho-1} \frac{J_p}{J_r} & 0 & \frac{1}{\rho-1} \frac{J_p}{J_s} \end{pmatrix} \quad \dots\text{式(9)}$$

である_[8]。

第4章 外乱オブザーバによる制御手法

4.1 遊星歯車のブロック線図

前節の式(6)と式(4)を比較すると遊星歯車はそのままでは二関節同時駆動機構として機能しないことがわかる。なぜなら、第一関節の単関節駆動トルク τ_r が第二関節へ作用し、第二関節の単関節駆動トルク τ_s が第一関節へと作用しているからである。さらに、二関節筋トルク τ_c は両関節に等しく働かなくてはならないが、異なる大きさに作用してしまっている。即ち、

$$\begin{aligned} J_r \ddot{\theta}_r &= K_1 \tau_r + K_2 \tau_s + K_3 \tau_c \\ J_s \ddot{\theta}_s &= L_1 \tau_r + L_2 \tau_s + L_3 \tau_c \end{aligned} \quad \dots \text{式(10)}$$

という式で表される。

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{1+as+bu}{\det A}, \quad K_2 = \frac{at+bv}{\det A}, \quad K_3 = \frac{a}{\det A} \\ L_1 &= \frac{cs+du}{\det A}, \quad L_2 = \frac{1+ct+dv}{\det A}, \quad L_3 = \frac{c}{\det A} \end{aligned} \quad \dots \text{式(11)}$$

である。これをブロック線図で表すと、以下のようになる。

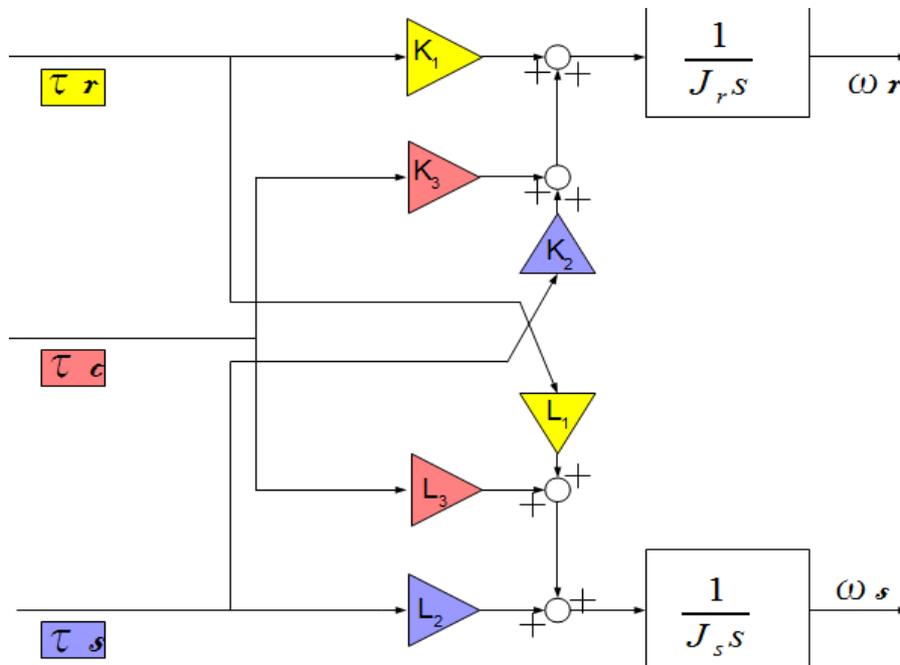


図 4.1: 遊星歯車のブロック線図

4.2 外乱オブザーバを装備したブロック線図

図 4.1 における K_2 と L_1 の影響が、二関節同時駆動機構として好ましくない点である。これを除くために、外乱オブザーバを用いる。外乱オブザーバは外乱を推定してその影響を打ち消すように補償するものであるが、プラントをノミナル化するという大きな特徴を持っている。この点に着目し、提案する手法では、 K_2 と L_1 の影響が無いような理想的なノミナルモデルをコンピュータ内に構成し、プラントをこの状態に近づけることによって遊星歯車機構を二関節同時駆動機構として動作させようとするものである。図 4.2 にそのブロック線図を示す。また、表 4.1 には外乱オブザーバのパラメータを載せる。

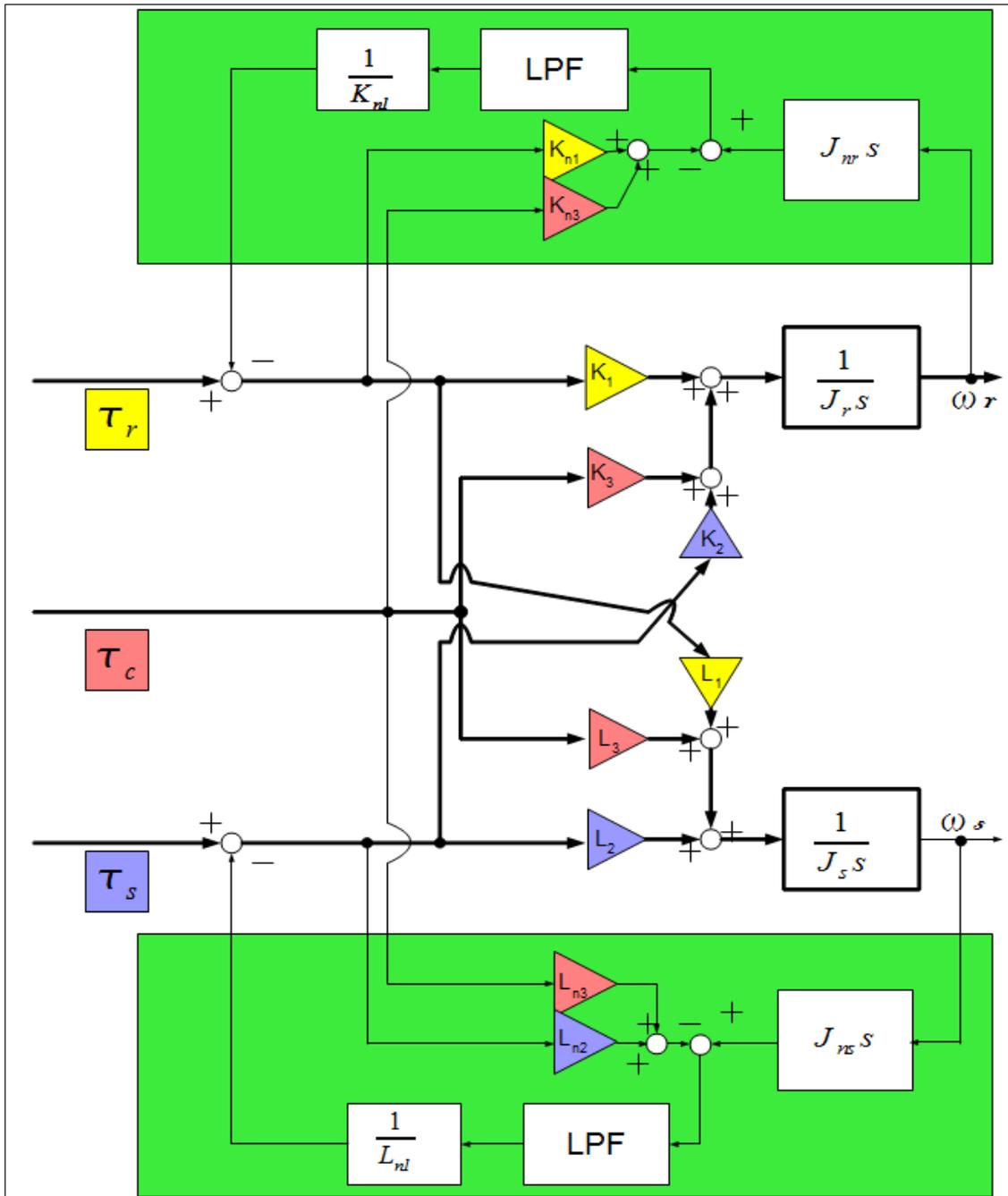


図 4.2: 外乱オブザーバを装備した遊星歯車のブロック線図

K_{n1}	τ_r の係数のノミナルモデル
L_{n2}	τ_s の係数のノミナルモデル
K_{n3}, L_{n3}	τ_c の係数のノミナルモデル
J_{nr}	リングギアノミナルモデルのイナーシャ
J_{ns}	サンギアノミナルモデルのイナーシャ

表 4.1: 外乱オブザーバ内のパラメータ

理想的なモデルの通りに遊星歯車が駆動すれば、単関節駆動トルクは外乱として推定され除去されるので他の関節に影響しない。さらに、ノミナルモデルのパラメータをどちらの関節においても等しい値にすることによって、二関節同時駆動トルクが等しく作用することも可能となる。これによって、二関節同時駆動が実現できる。

次章では、シミュレーションによってこれが可能であることを示す。

第5章 シミュレーション結果と考察

5.1 外乱オブザーバを用いない場合の結果

図 4.1 に示したようなブロック線図を MATLAB/SIMLINK 上に構成してシミュレーションを行った。この結果を図 5.1 および図 5.2 に示す。

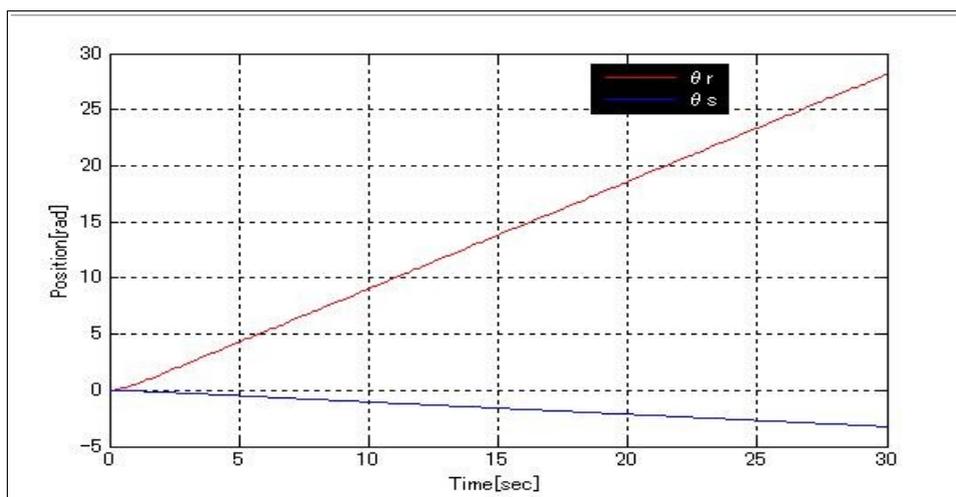


図 5.1: リングギアのみにステップ入力を入れた場合

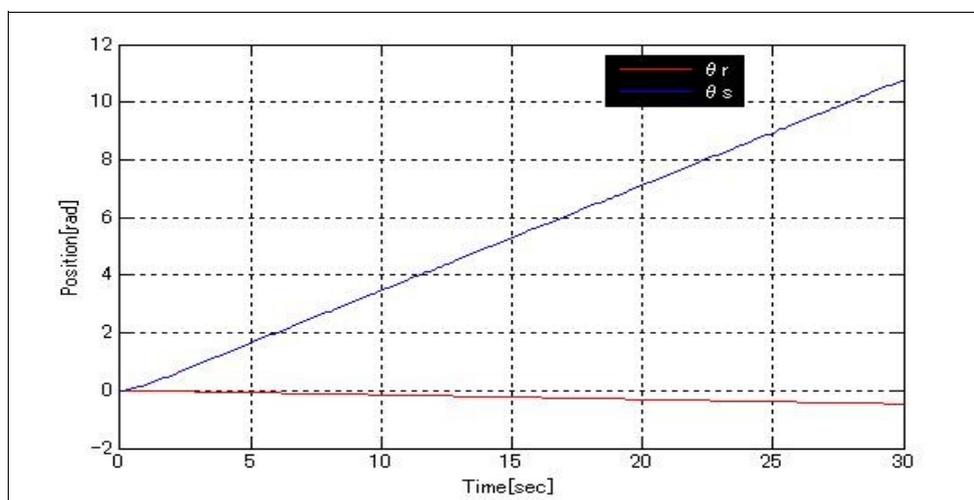


図 5.2: キャリアのみにステップ入力を入れた場合

このように、なにも補償を行っていない状態では、単関節にのみ作用するリングギアが他方の関節にも作用してしまったり、二関節筋であるキャリアが両関節に等しく作用しない。

次節では、こういった好ましくない遊星歯車の特徴を除去するために外乱オブザーバを用いた制御を行ったシミュレーション結果を示す。

5.2 外乱オブザーバを用いた場合の結果

次に、外乱オブザーバを用いた場合のシミュレーション結果を図 5.3、図 5.4 に示す。図からもわかるように、リングギアのみにステップ入力を加えた場合はリングギアのみが駆動し、キャリアにステップ入力を加えた場合はサンギア側とリングギア側の両方に等しい大きさのトルクが働いている。

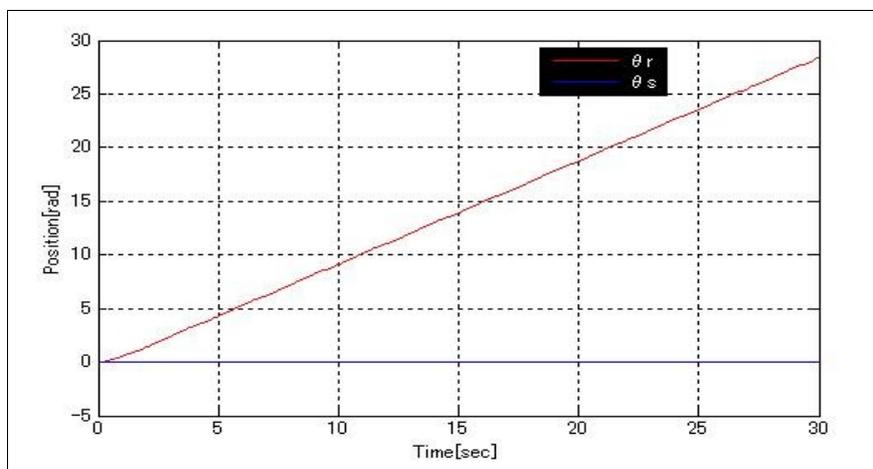


図 5.3: リングギアのみにステップ入力を入れた場合 (外乱オブザーバ装備)

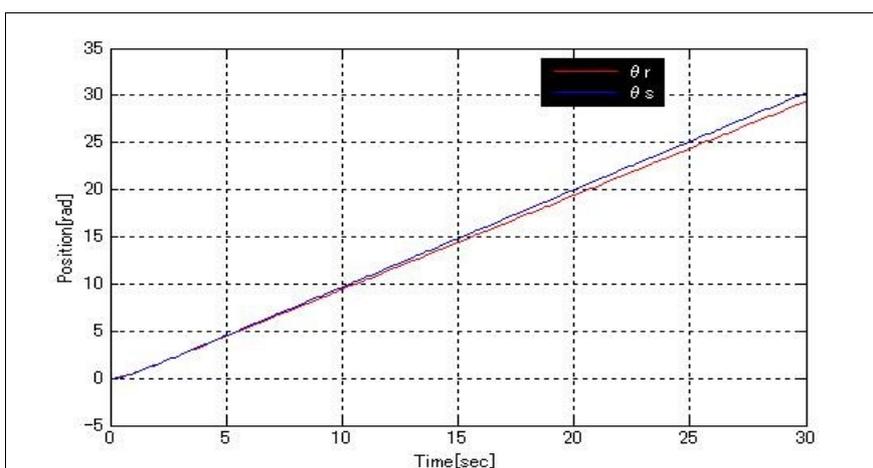


図 5.4: キャリアのみにステップ入力を入れた場合 (外乱オブザーバ装備)

5.3 考察

シミュレーションの結果から、外乱オブザーバを装備した場合においては単関節駆動トルクの他方の関節への影響を遮断することが可能となり、さらに、ノミナルモデルの値を等しくすることによって二関節筋の作用を等しくすることが可能であることがわかった。以上のことから、遊星歯車を二関節筋同時駆動機構として動作させるために、外乱オブザーバを用いた本手法が有効であることがわかった。

第6章 ロボットアームの実装

6.1 ロボットアームの構造

図 6.1 はロボットアームの全体図である。遊星歯車機構は第一リンク内に収められており、モータも第一リンクに装備してある。エンコーダはモータと一体となっている。図 6.2 は第一リンクを側面から観た図である。各モータは第一関節側からそれぞれリングギア、サンギア、キャリアを駆動しており、リングギアとキャリアは駆動用のギアを介して外側から駆動する機構となっている。リングギアとサンギアの回転はそれぞれタイミングベルトによって第一関節と第二関節に伝えられる。この間に、出力トルク増大のために1:100のハーモニックドライブが搭載されている。また、図 6.3 は手先出力を測定する様子である。



図 6.1: ロボットアーム全体図

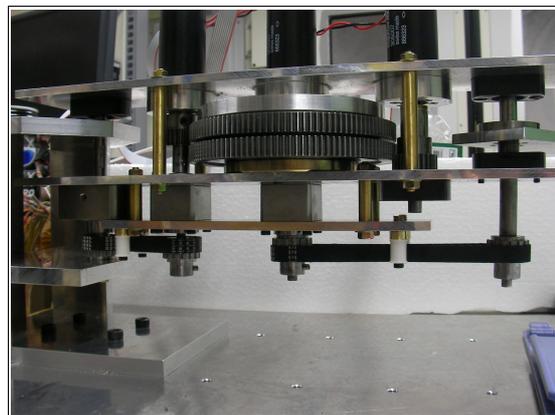


図 6.2: 側面図

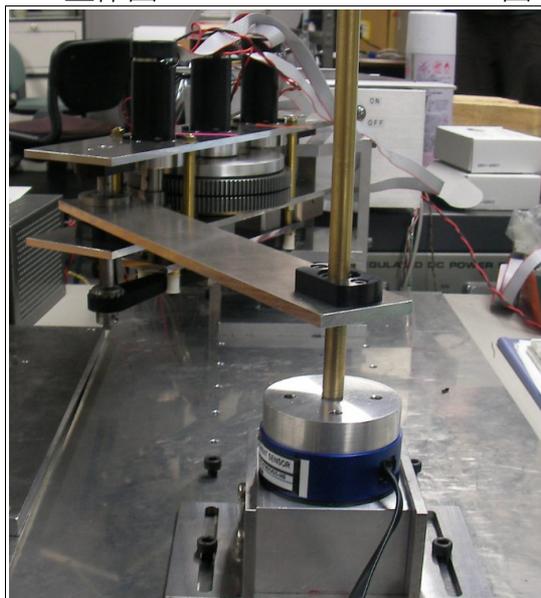


図 6.3: 手先出力測定の様子

6.2 ロボットアームの諸元

ロボットアームおよびその駆動装置の諸元を表 6.1 に記す。

Moter	maxon RE-30 310009
Moter Driver	図工 HRT07-0004
Encoder	maxon MR TypeL
Harmonic Drive Gear	CSF-8-100-1U-F
Timing Belt(Joint1)	MITSUBOSHI U8SN 78XL
Timing Belt(Joint2)	MITSUBOSHI L8SD 128XL
OS	ART-Linux
AD/DA Board	Interface PCI3523C
Counter Board	Interface PCI6205C
Force Sensor	Nitta IFS67M25
Rign Gear	120mm(24mm のギアで駆動)
Sun Gear	24mm
Carrier	120mm(24mm のギアで駆動)
Planetary Gear	24mm

表 6.1: ロボットアームおよび駆動装置の諸元

第7章 トルクの分離と等分配の実験結果

7.1 外乱オブザーバを用いない場合の結果

図 7.1、7.2 はリングギア及びサンギアに単位ステップ入力を入れた場合の各関節の角度を表し、図 7.3 は単位キャリアにステップ入力を入れた場合の各関節の角度である。

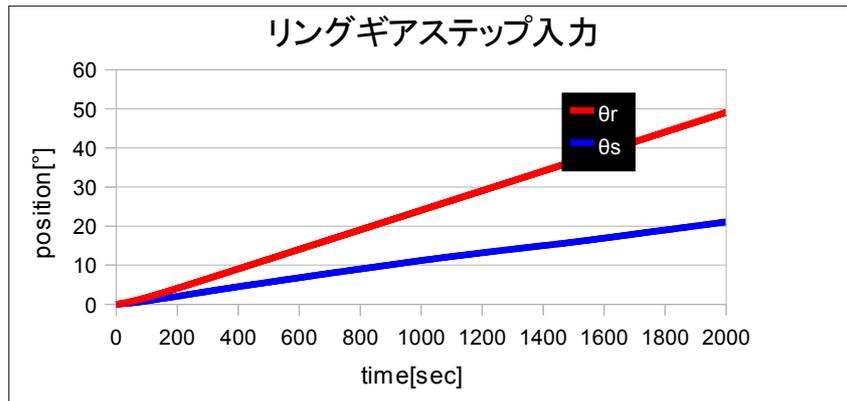


図 7.1:リングギアのみにステップ入力を入れた場合

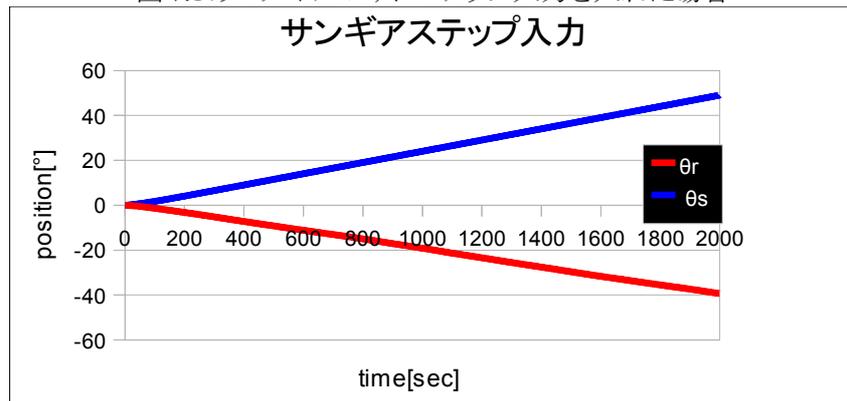


図 7.2:サンギアのみにステップ入力を入れた場合

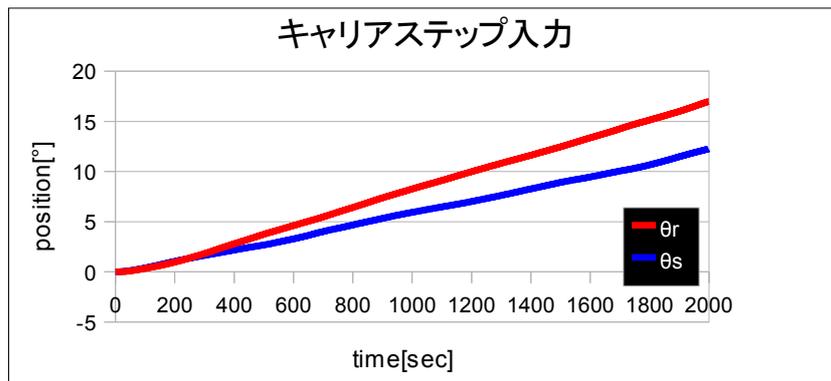


図 7.3:キャリアのみにステップ入力を入れた場合

シミュレーションと同じように、単関節駆動トルクの分離と二関節駆動トルクの等分配が必要であるのがわかる。

7.2 外乱オブザーバを装備した場合の結果

7.2.1 伸展姿勢における実験結果

図 7.4、図 7.5 はリングギアとサンギアへ、外乱オブザーバを装備した状態でステップ入力を入れた場合の間接角度である。図 7.6 はキャリアにステップ入力を入れた場合である。このとき、ロボットアームの姿勢は伸展姿勢である。また、外乱オブザーバのローパスフィルタの時定数は4[msec]である。

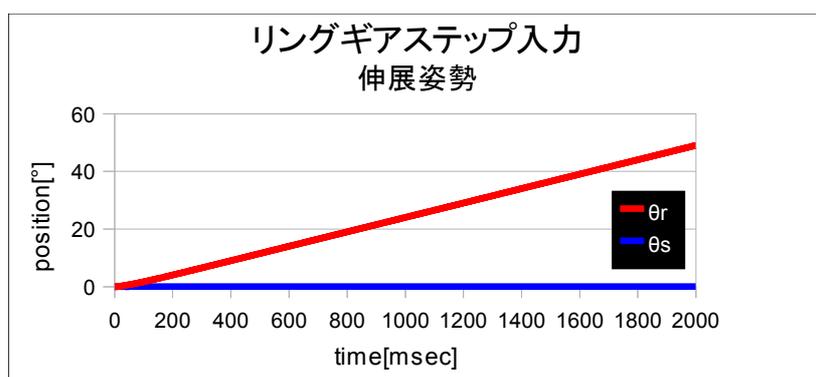


図 7.4:リングギアのみステップ入力を入れた場合(外乱オブザーバ装備時)

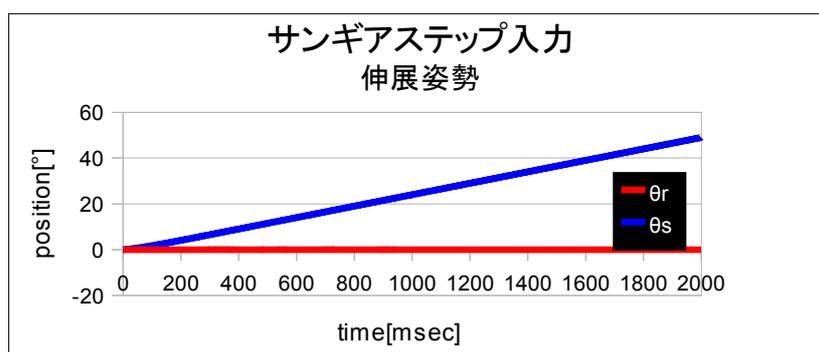


図 7.5:サンギアのみステップ入力を入れた場合(外乱オブザーバ装備時)

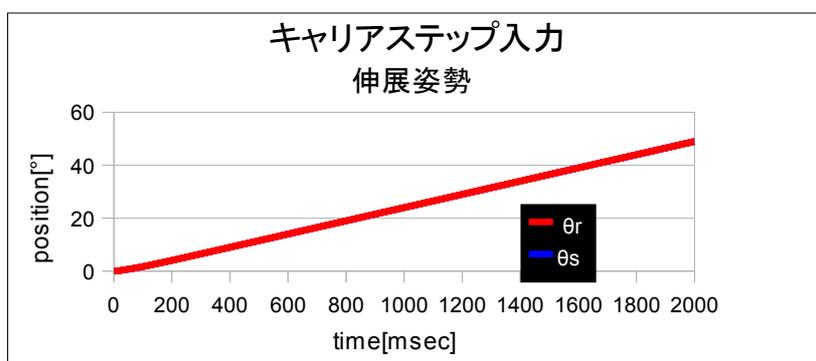


図 7.6:キャリアのみステップ入力を入れた場合(外乱オブザーバ装備時)

以上から、外乱オブザーバを装備した結果、単関節トルクは分離され、二関節同時駆動トルクは等分配されることが実験によって示された。即ち、目標としていた式(4)で表されるトルクの実現できた。

7.2.2 屈曲姿勢における実験結果

提案する手法が、ロボットアームの姿勢によらないことを示すため、屈曲姿勢での動作も検証する。屈曲姿勢では、肩関節角度 $\theta_1 = -60^\circ$ 、肘関節角度 $\theta_2 = 120^\circ$ である(図 7.7)。図 7.8 は屈曲姿勢において、リングギアにステップ入力を入れた場合の関節角度である。また、図 7.9 は屈曲姿勢において、キャリアにステップ入力を入れた場合の関節角度である。

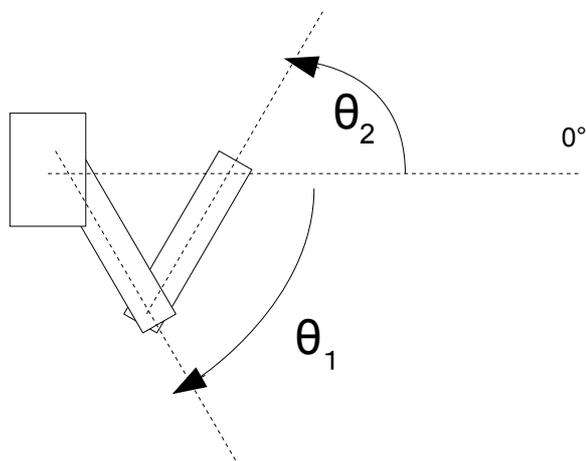


図 7.7: 屈曲姿勢

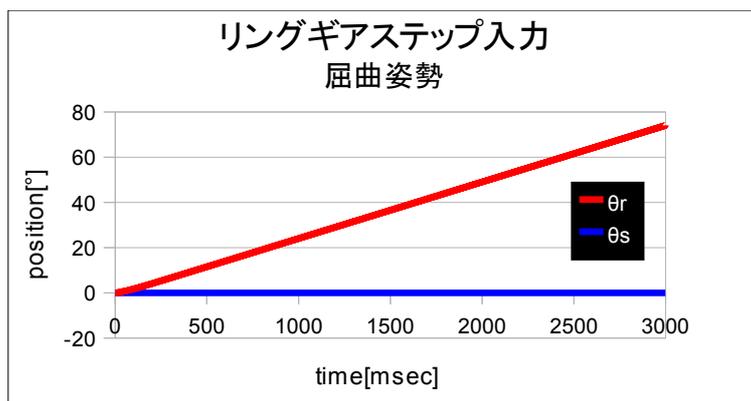


図 7.8: 屈曲姿勢におけるリングギアステップ入力応答

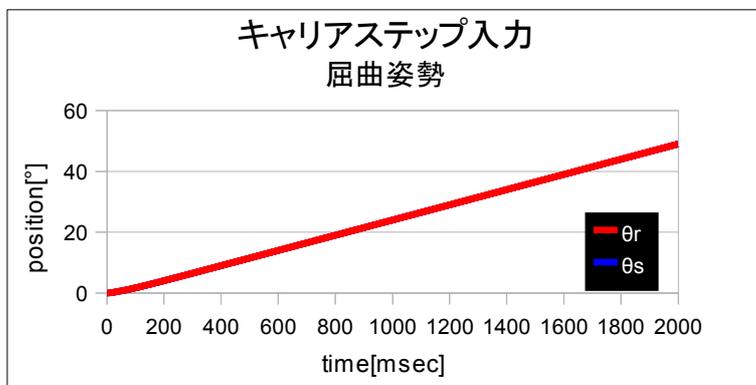


図 7.9: 屈曲姿勢におけるキャリアステップ入力応答

7.3 考察とまとめ

7.3.1 考察

7.1 及び7.2の実験結果から、外乱オブザーバによる制御を遊星歯車機構に備えることによって、単関節駆動トルクの分離と二関節同時駆動トルクの当分配が実現できることが示された。また、本手法はロボットアームの姿勢変化による慣性の変化などに影響されないということも示された。これは、動力的な動作においても本手法を用いれば遊星歯車を二関節筋として動作させることが可能であるということを表している。

7.3.2 まとめ

第2章において二関節筋を装備したロボットアームのトルク特性について述べ、実現方法として遊星歯車とDCモータを用いた手法を提案した。第3章では遊星歯車の運動をラグランジュ法によって解析し、二関節同時駆動機構との違いを示した。第4章において遊星歯車を二関節同時駆動機構として動作させるための制御手法として外乱オブザーバを用いた手法を提案し、第5章ではシミュレーションによって有効性を検証した。第6、7章で実際にロボットアームを作成し実験を行い、実機によっても提案手法の有効性を示した。

次章では、二関節筋を備えたロボットアームの特徴として周知となっている静力学的条件下での手先出力特性について、作成したロボットアームによる実験を検討する。

第8章 静力学的条件における手先出力特性解析の検討と課題

8.1 二関節筋を備えたロボットアームの手先出力特性

8.1.1 手先出力の解析

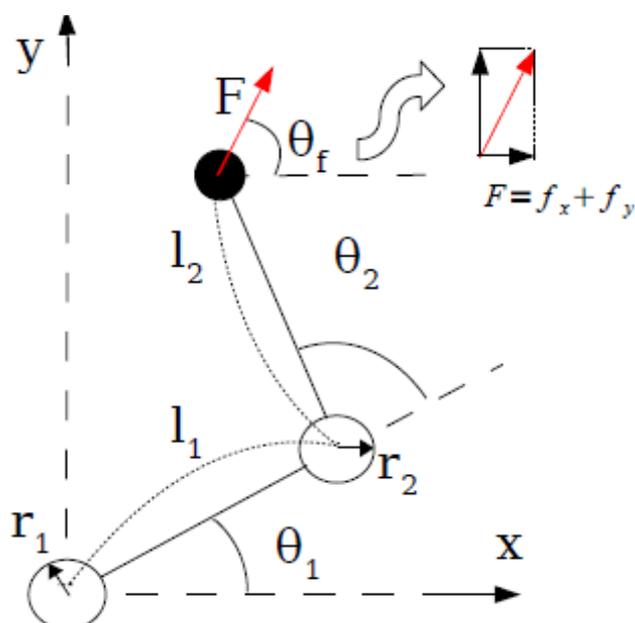


図 8.1:2リンクロボットアーム

図 8.1 のような 2 リンクロボットアームを考えると、手先出力 F_x, F_y と関節トルク T_1, T_2 とをつなぐヤコビアンは、

$$J = \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \quad \text{式(12)}$$

であり、手先出力と関節トルクの関係は、

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = J^T \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \quad \text{式(13)}$$

となる。

ここで、各筋のトルクと関節のトルクの間係を表す式(4)を考慮すると、手先出力は以下のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = \frac{1}{l_1 \sin \theta_2} \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \tau_1^m + \frac{1}{l_1 l_2 \sin \theta_2} \begin{pmatrix} -l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ -l_2 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \tau_2^m + \frac{1}{l_2 \sin \theta_2} \begin{pmatrix} -\cos \theta_1 \\ -\sin \theta_1 \end{pmatrix} \tau_3^m \quad \text{式(14)}$$

これによって、二関節筋を装備したロボットアームは6角形の手先出力をもつ^{[9][10][11]}。

8.1.2 絶対値ヤコビヤンの導入による筋トルク指定の簡単化¹⁾

文献[12]において、二関節筋を備えたことによって所望の手先出力のために必要な筋トルクが簡単に求めることができると主張している。そのためにまず、式(13)の右辺を以下のように変形する。

$$J^T \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 f_x + l_1 \cos \theta_1 f_y \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -l_2 \sin \theta_{12} f_x + l_2 \cos \theta_{12} f_y \\ -l_2 \sin \theta_{12} f_x + l_2 \cos \theta_{12} f_y \end{pmatrix} \quad \text{式(15)}$$

式(15)の右辺第1項は θ_1 について、第2項は $\theta_{12}=\theta_1+\theta_2$ についての項となっている。そこで、 θ_1 を駆動する出力として τ_1^m を、 θ_{12} を駆動する出力として τ_3^m を充てる。すなわち、

$$\begin{aligned} \tau_1^m &= -l_1 \sin \theta_1 f_x + l_1 \cos \theta_1 f_y \\ \tau_2^m &= 0 \\ \tau_3^m &= -l_2 \sin \theta_{12} f_x + l_2 \cos \theta_{12} f_y \end{aligned} \quad \text{式(16)}$$

$$\begin{pmatrix} \tau_1^m \\ \tau_3^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 & -l_2 \sin \theta_{12} \\ l_1 \cos \theta_1 & l_2 \cos \theta_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \quad \text{式(17)}$$

$$J_{abs} = \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 & -l_2 \sin \theta_{12} \\ l_1 \cos \theta_1 & l_2 \cos \theta_{12} \end{pmatrix} \quad \text{式(18)}$$

という出力にする。ここで現れた新しいヤコビヤンを絶対値ヤコビヤン J_{abs} という。この定義を用いると、所望の手先出力 F が、

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f \cos \theta_f \\ f \sin \theta_f \end{pmatrix} \quad \text{式(19)}$$

という三角関数によって指定されたと考える。すると、必要な筋肉トルクは式(20)のような簡単なsin関数によって求めることができる。

$$\begin{pmatrix} \tau_1^m \\ \tau_3^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} fl_1 \sin(\theta_f - \theta_1) \\ fl_2 \sin(\theta_f - \theta_{12}) \end{pmatrix} \quad \text{式(20)}$$

式(20)を用いれば、手先固定時の出力の大きさと方向が簡単に指定することができる。

8.2 実験

8.2.1 手先固定時のロボットアームの動作

作成したロボットアームは手先固定時において、1:100のギア比によってモータが回転してしまう構造になっている。関節角度は変化しないのだが、モータは回転してしまう。この不整合はタイミングベルトの弾性エネルギーとして蓄えられる形になっており、式(20)によって手先出力と方向が指定できるとしたが、出力に関しては正確でなくなってしまう。以下では、出力方向の指定のみを検

証の対象とする。

8.2.2 実験結果

図 8.2 はそれぞれの姿勢において手先を固定し、 θ_f を $0^\circ \sim 350^\circ$ まで 10° ずつに分けて出力した結果である。また、図 8.3、8.4、8.5 はそれぞれの姿勢において、指令した角度から出力方向がどれほどずれているかを表したグラフである。

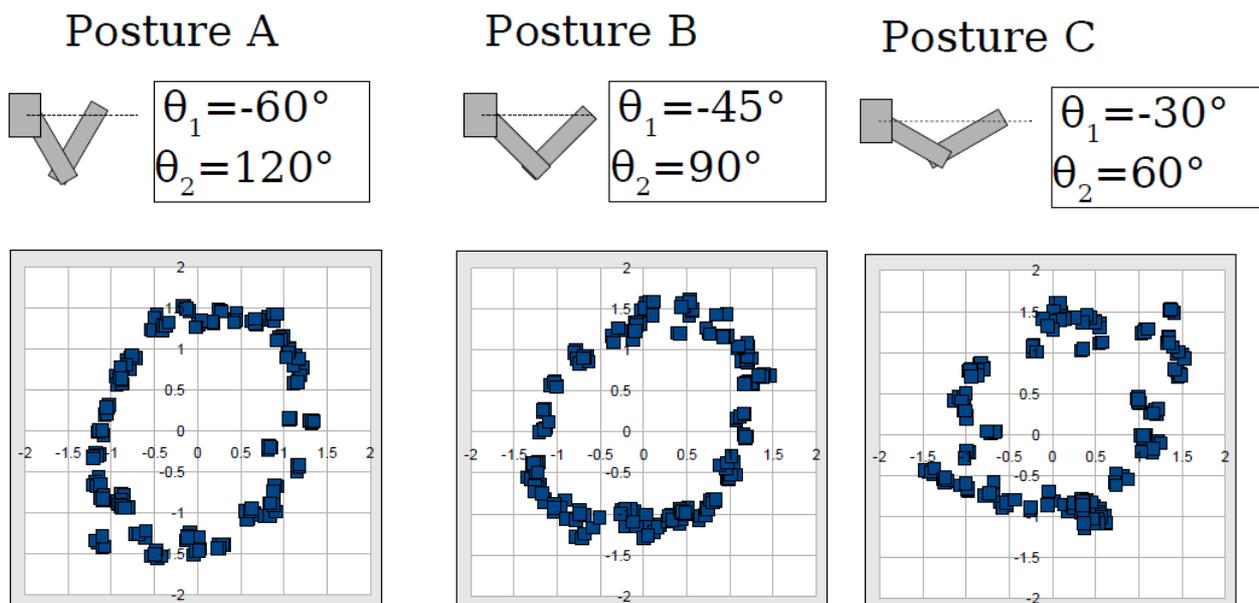


図 8.2: 手先固定状態での出力

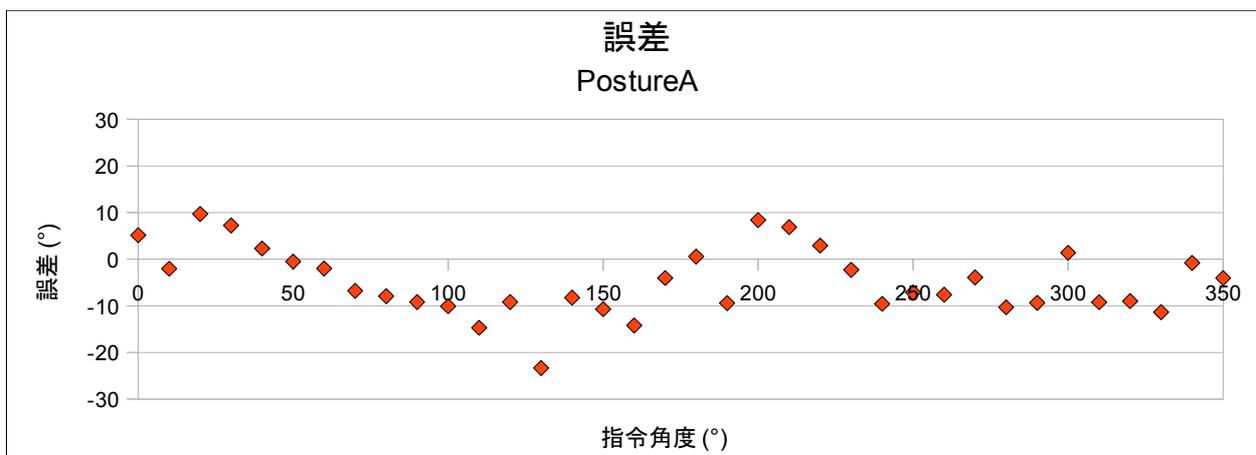


図 8.3: 姿勢Aにおける誤差

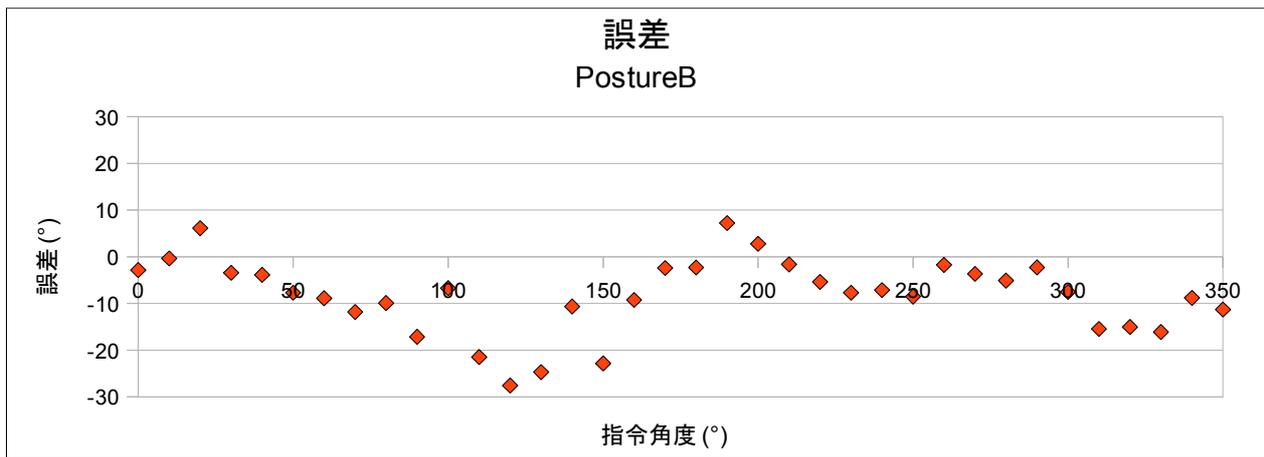


図 8.4: 姿勢Bにおける誤差

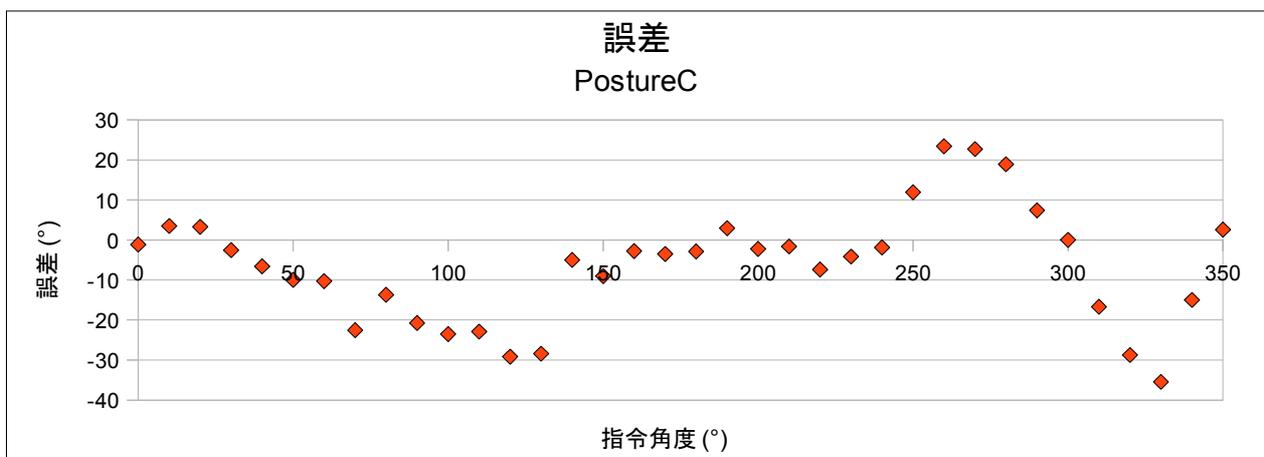


図 8.5: 姿勢Cにおける誤差

8.3 考察

図 8.2 を見ると指定した方向に力を出力できているように見えるが、図 8.3、8.4、8.5 を見ると角度によっては 20° から 30° の誤差が出ているのがわかる。誤差が大きくなる角度は全ての姿勢においてほぼ同じパターンとなっており、タイミングベルトの弾性などといった機構上の影響であると考えられる。

また、姿勢Cにおける誤差が大きくなっており、腕を伸ばした状態での出力が不安定になっていることがわかる。

今後、この実験結果を踏まえてさらに構造と制御法を改善していく必要がある。

第9章 まとめ

9.1 結論

本論文では、遊星歯車機構を二関節同時駆動機構として動作させる方法として、外乱オブザーバを用いる手法を提案した。

遊星歯車で二関節同時駆動機構として動作させるためには単関節駆動トルクを分離する必要がある。他方への影響がどれほどなのかがわかれば、二関節筋であるキャリアによってその影響をフィードフォワード的に打ち消すことが可能であるが、実際は摩擦の大きさが変化することで単関節駆動トルクが他方へ及ぼす影響も変わってしまう。本手法は、外乱オブザーバを用いた補償であるため、摩擦によってプラントのパラメータが変化しようとも理想的に動作させることが可能であることをシミュレーションによって示した。さらに、提案手法が現実においても有効であることを、実際に作成したロボットアームによって検証した。その結果、シミュレーションのように単関節駆動トルクの分離と二関節同時駆動トルクの等分配が可能であることを確かめた。

二関節筋同時駆動機構が実現できたので、手先固定時の出力特性解析について検討し、手先出力方向が容易に指定できるということを確認した。

9.2 今後の課題

今後、静力学的な条件での手先出力を解析するために構造及び制御の改善を行い、出力の大きさと方向が容易に指定できることを実証する。さらに、動力学的な実験も行い、二関節筋を備えたロボットアームの特性を解析する。その後、二関節筋がどのように運動制御に貢献しているのかを分析していく。

参考文献

- [1] 内閣府政策統括官 “平成 21 年 高齡社会白書”
- [2] 吉田憲吾, “二関節同時駆動機構を備えたロボットアームの実現と筋の粘弾性を生かした制御に関する研究”, 修士論文, 2007
- [3] 大島徹, 藤川智彦, 熊本水頼, “一関節筋および二関節筋を含む筋座標系による機能別実行筋力評価”, 精密工学会誌 vol.66 No.12 1999 pp1772-1777
- [4] 大島徹, 藤川智彦, 熊本水頼, “拮抗筋群による協調制御機能”, 日本機械学会論文集(C編), 65 卷 607 号, 1997, pp135-142
- [5] 門田健志, 鈴木健也, 深井善郎, 小田高広, “二関節筋装備基本モデル「HIPRO」—VEA を用いたロボットアームによる二関節筋特性評価—”, 精密工学会生体機構制御・応用技術専門委員会 二関節筋実利用 Workshop, 2004, pp11-16
- [6] 齊藤之男, 西田皓也, 音琴浩, “二関節筋用アクチュエータを応用した災害救助ロボットの研究”, 精密工学会生体機構制御・応用技術専門委員会 二関節筋利用 Workshop, 2004, pp17-22
- [7] 高山仁志, 田熊隆史, 細田耕, “二関節筋を含めた筋骨格構造を持つロボットによる連続跳躍の実現”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '08 予稿集, Vol.CD-ROM, 2008.(2P2-I17)
- [8] 肥田知仁, 呉世訓, 内田利之, “遊星歯車を用いた二関節同時駆動機構を有するロボットアームの実現”, 電気学会研究会資料, IIC, pp49-53, 2009
- [9] 大島徹, 藤川智彦, 熊本水頼, “一関節筋および二関節筋を含み筋座標系によるロボットアームの機能的特性”, 精密工学会誌 vol.66 No.1 2000 pp141-146
- [10] 熊本水頼 他, “ヒューマノイド工学”, 東京電機大学出版局, 2006
- [11] 大島徹, 熊本水頼, “二関節筋機能を有するロボットアーム”, 日本機械学会論文集(C編) 61 卷 592 号 1995 pp122-129
- [12] Sehoon Oh, Yoichi Hori, “Analysis of force Control Characteristics by Biarticular Muscle Viscoelasticity in Two-Link Manipulators”, *American Control Conference*, 2009.

発表文献

- [1] Yasuto Kimura, Sehoon Oh, Yoichi Hori, “Novel Robot Arm with Bi-articular Driving System Using a Planetary Gear System”, *Advanced Motion Control*, 2010(予定)

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご多忙にもかかわらずご指導していただきました堀洋一教授に感謝を申し上げます。堀教授には制御の知識はもちろんのこと、工学者としての考え方・ものの見方というものを教えていただきました。また、大変興味深い研究テーマへと導いて下さり、実験機的设计・製作に関しても親身になってご指導して下さいました呉世訓助教授にも深く感謝の意を表します。

博士課程の吉田憲吾さんには、二関節筋研究に関して的確な助言を頂きました。さらに堀研究室の皆様には、研究活動のみならず生活面においても大変お世話になりました。大学生活の中で最も有意義な1年間でした。

本研究で用いられた実験機の基礎は技官の内田利之さん、現・久保田研究室の肥田知仁さんの手によるものです。また、古関研究室博士課程の福正博之さんには研究会に出席した際などに大変お世話になりました。ここに感謝を申し上げます。