

目次

1 序論	3
1.1 研究の背景	3
1.2 研究の目的	3
2 二関節筋を再現したロボット	4
2.1 二関節筋の説明	4
2.1.1 生物の四肢モデルと二関節筋	4
2.1.2 二関節筋の特徴	5
2.1.2.1 非線形粘弾性	5
2.1.2.2 拮抗駆動	6
2.1.2.3 二関節同時駆動	6
2.1.3 二関節筋に関する研究	7
2.2 二関節筋機構を有するロボット	7
2.2.1 既存の二関節筋機構ロボット	7
2.2.1.1 跳躍・着地ロボット	7
2.2.1.2 二関節筋装備ロボット	7
2.2.1.3 ロボットプラットフォーム HIPRO	7
2.2.1.4 災害救助ロボット Gorilla	7
2.2.2 二関節筋ロボットのまとめと比較	8
3 遊星歯車を用いた二関節同時駆動機構の提案	9
3.1 遊星歯車による二関節同時駆動の実現	9
3.1.1 遊星歯車の構成	9
3.1.2 遊星歯車の動作と二関節同時駆動との対応	9
3.2 遊星歯車の運動方程式	10
3.2.1 ラグランジュ法による運動方程式の導出	10
3.2.2 単関節駆動トルクの分離	11
3.2.3 二関節同時駆動トルクの伝達	12
3.2.4 提案機構と3対6筋アームモデルとの比較	12
3.3 遊星歯車による二関節同時駆動のシミュレーション	13
3.3.1 単関節トルクの分離	13
3.3.2 PID 制御による分離比の同定	15
3.3.3 まとめ	16

4 製作した遊星歯車による実験.....	17
4.1 装置の説明.....	17
4.2 実験結果	20
4.2.1 PID 制御による分離比の同定.....	20
4.2.2 同定した分離比を利用した FF 補償.....	20
5 まとめ	21
5.1 結論	21
5.2 今後の課題.....	21
参考文献.....	22
発表文献.....	22
謝辞.....	23

1 序論

1.1 研究の背景

現在広く使用されているロボットは主に産業用に開発されていて、その主眼は予め決まっている動作を精密に行うことであり、莫大な量の計算によって位置制御・速度制御を非常に高い精度で実現している

これに対して、福祉機器やロボットスーツなどのように人間に近いところでの稼動を念頭に置いて研究・開発されるロボットに要求されるのは高い正確性ではなく、高い安全性と人の様々な動きや突発的な動作に素早く対応できる即応性であると言える。

この要求を満たすために、従来のロボットと生物との機構的な違いが注目されている。生物には従来のロボットには装備されていない二関節筋が存在し、この機構を実現するために様々な方法が考えられている。しかしながら、それらの方法は二関節筋の一部の特徴を抜き出しているものであったり、構成が複雑であったりする。二関節筋の機構を簡単に再現できれば、実際に生物を模したロボットを製作できるようになるだけでなく、様々な方法で二関節筋の分析を容易に行うことができる。

1.2 研究の目的

本研究では二関節筋の特徴のうち二関節同時駆動機構に注目し、その機構を遊星歯車を利用して実現する方法を提案する。また、その方法が容易に実現できることをシミュレーションによって示し、実際に遊星歯車にモータを取り付けてその動作を確認した。

2 二関節筋を再現したロボット

2.1 二関節筋の特徴

2.1.1 生物の四肢モデルと二関節筋

現在一般的に用いられるロボットアームは、各関節にアクチュエータを配置するという形状をとっている。これに対して人間などの生物の四肢では、各関節のみに働く一関節筋と二つの関節にまたがり両方の関節に働く二関節筋が存在する。一見すると二関節筋の存在は二つの関節の独立性を損ない不要に思われるが、実際は生物の持つ高い運動制御機能に関して重要な役割を担っているということが近年認識されている。両者のモデルを図 2-1 に示す。

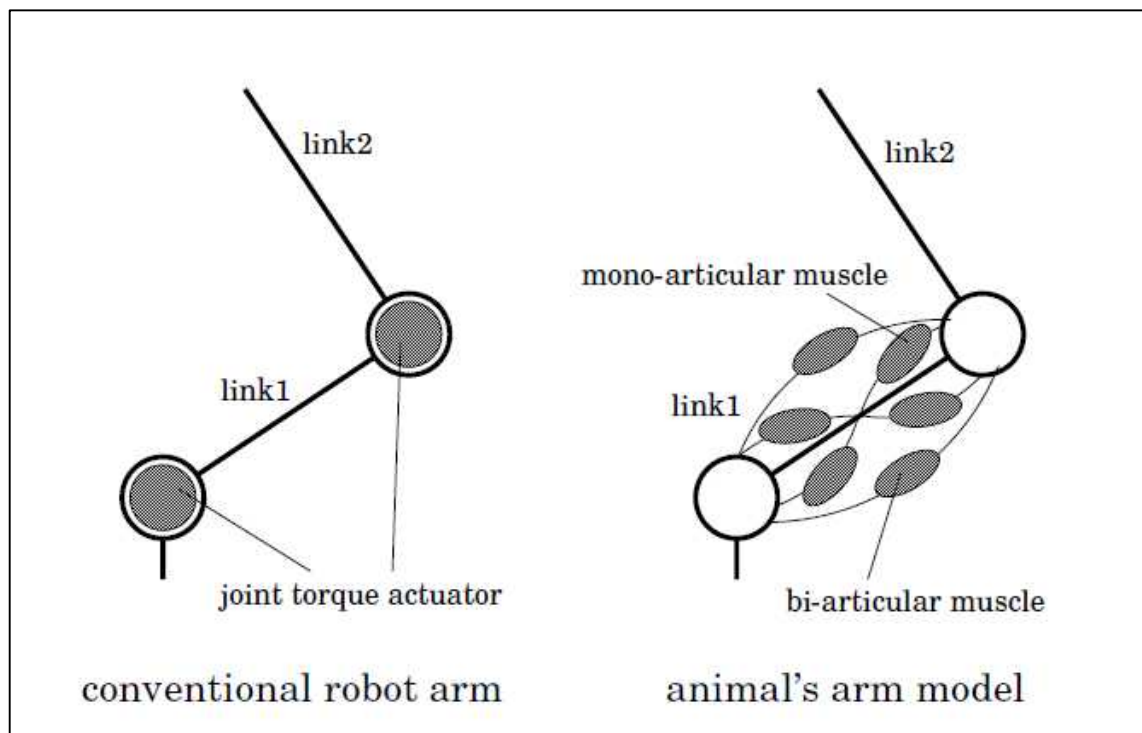


図 2-1 従来のロボットアームと生物四肢モデル

2.1.2 二関節筋の特徴

二関節筋には大きく3つの特徴があると言われている。筋の非線形粘弾性・筋の拮抗駆動・二関節同時駆動である。図 2-2 に二関節筋を有するアームのモデルと、各パラメータの内容を表 2-1 に掲載する。

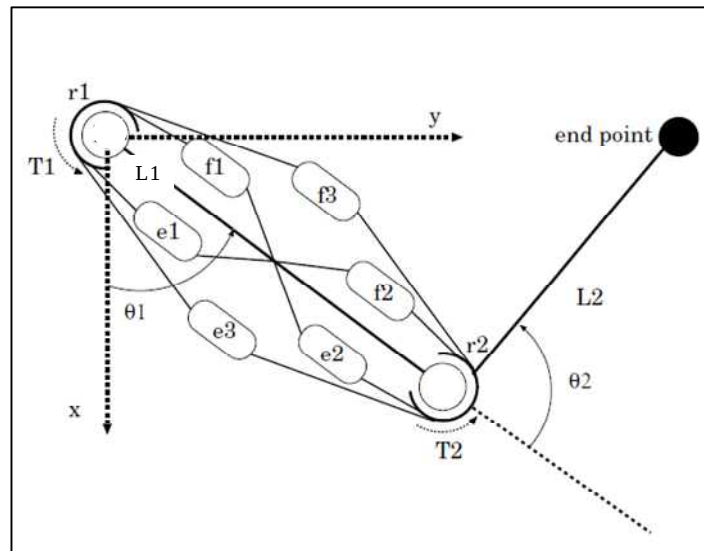


図 2-2 二関節筋を有する 3 対 6 筋のアームモデル

表 2-1 アームモデルにおけるパラメータ

f_i ($i = 1, 2, 3$)	縮尺筋
e_i ($i = 1, 2, 3$)	伸展筋
r_1, r_2	関節のモーメントアーム径
θ_1, θ_2	関節角
L_1, L_2	アーム長
T_1, T_2	関節トルク

2.1.2.1 非線形粘弾性

筋のもつ粘性率・弾性率は収縮力に依存することが知られており、筋の出力 F は次式で表される。ここで、 u, x 収縮力および収縮量・ K, B は弾性率・粘性率である。また、その際の筋のモデルを図 2-3 に示す。

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

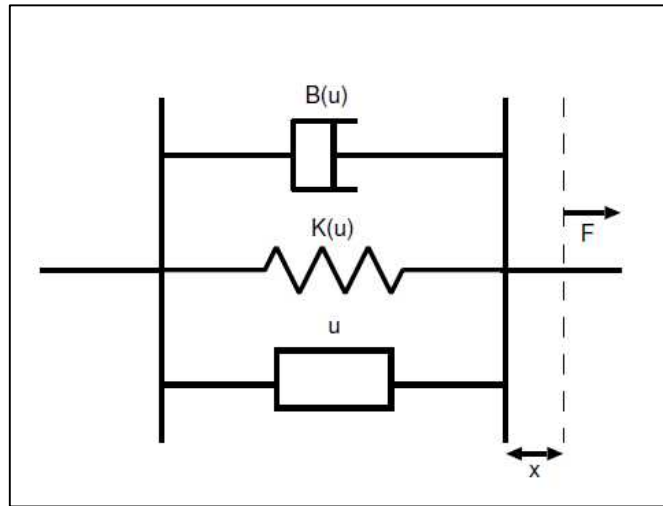


図 2-3 筋のモデル

2.1.2.2 拮抗駆動

図 2 からわかるように、一関節筋・二関節筋とも対を成しており互いに関節を介して引っ張り合っている。各筋の出力が式(1)で表されるとき、実際に発揮されるトルクは

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

となる。

2.1.2.3 二関節同時駆動

各拮抗筋肉対が関節に発揮するトルクをそれぞれ $\tau_1^m, \tau_2^m, \tau_3^m$ とすれば、合計の関節トルクは以下ようになる。

$$\begin{aligned} T_1 &= \tau_1^m + \tau_3^m \\ T_2 &= \tau_2^m + \tau_3^m \end{aligned} \quad \text{—式(3)}$$

上式より明らかなように二関節同時駆動の特徴は以下である。

- ・ 二関節筋が 2 つの関節に同時に働く
- ・ 二関節筋が 2 つの関節に 1 : 1 で力を発揮する
- ・ 一関節筋は他方の関節に力を発揮しない

非線形粘弾性・拮抗駆動は筋自体の特徴であり、二関節筋に特有というわけではない。そこで本研究では 3 つの特徴のうち特に二関節同時駆動に着目した。

2.1.3 二関節筋に関する研究

二関節筋の研究は精密工学会生体機構制御・応用技術専門委員会で行われており、熊本らは静力学的な解析により、二関節筋が四肢先端の位置・力・剛性に関する特異な制御機能を有していると主張している。^[1]

また、藤川は筋電図の解析に基づく拮抗一関節筋群および拮抗二関節筋群の協調活動様相を示し、協調パターンによる運動制御を提案している。^[2]

さらに、2008 年 11 月 22 日に行われた精密工学会生体機構制御・応用技術専門委員会第 14 回例会では、「二関節筋力学体系の動力学領域の開拓」を主題に討論会が設けられた。

2.2 二関節筋機構を有するロボット

2.2.1 既存の二関節筋機構ロボット

2.2.1.1 跳躍・着地ロボット

大島らは跳躍・着地動作における二関節筋の効果を明らかにするために図 2-4(A)のようなバネとモータを用いた跳躍ロボットや動物を模した跳躍ロボット(図 2-4(B))を製作し、単純な制御で安定した跳躍・着地動作を実現できたと報告している。^{[3][4][5]}

2.2.1.2 二関節筋装備ロボットアーム

また、吉田ら^[6]はより簡単な構造により二関節筋機能を実現すべく、モータとギア・タイミングベルトによるロボットアームを製作している。

2.2.1.3 ロボットプラットフォーム HIPRO^[7]

門田らは独自に開発した可変弾性アクチュエータ(VEA)を用いて、二関節筋機能を再現した HIPRO と呼ばれるロボットプラットフォームを開発した。また、HIPRO を用いたロボットアームやロボットレッグを製作している。

2.2.1.4 災害救助ロボット Gorilla^{[8][9]}

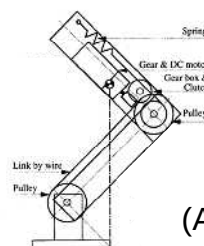
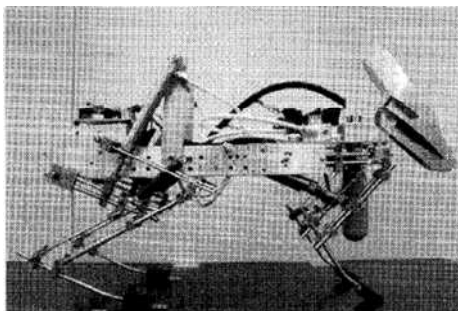
二関節筋を応用したロボットとして、斎藤らにより図 2-4(D)に示す災害救助ロボット「Gorilla」が研究されている。また、斎藤らは障害者をパワーアシストするリハビリテーションロボットに二関節筋を取り入れる研究^[10]も行っており、用いられる二関節筋には二関節筋型 HBSA と呼ばれる油圧アクチュエータが使用されており、その応答性は数 Hz となっている。

2.2.2 二関節筋ロボットのまとめと比較

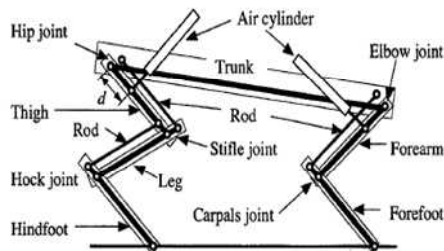
以上のような二関節ロボットに対して、本論文では DC モータと歯車機構による二関節筋ロボットを提案する。その特徴としては、応答速度が速いこと・小型化が容易であること・動作に限定性がないことが考えられる。また、歯車機構を利用することで、工学的な解析がタイミングベルトなどを使ったロボットよりも容易であると考えられる。表 2-2 では関節筋を装備したロボットの比較を行った。

表 2-2 二関節筋ロボットの駆動装置による比較

	駆動装置	応答速度	所望動作	小型化
跳躍・着地 ロボット	空気圧シリンダ	1s	限定的	○
	モータ・バネ、ワイヤ	10ms	限定的	
吉田	モータ、タイミングベルト	10ms	汎用的	
HIPRO	リニアモータ	100ms	汎用的	
Gorilla	油圧シリンダ	1s	限定的	
提案手法	モータ、ギア	10ms	汎用的	



(A) 跳躍ロボット



(B) 動物型跳躍ロボット



(C) HIPROを用いた
ロボットレッグ



(D) Gorilla

図 2-4 既存の二関節筋装備ロボット

3 遊星歯車を用いた二関節同時駆動機構の提案

3.1 遊星歯車による二関節同時駆動の実現

3.1.1 遊星歯車の構成

遊星歯車は図 3-1 に示すようなサンギア・リングギア・プラネタリギア・プラネタリキャリアの 4 つの構成要素を持つ機構であり、プラネタリギアが自転しつつ公転することで、特徴的な動作を行うことができる。本研究でもその特徴を利用している。

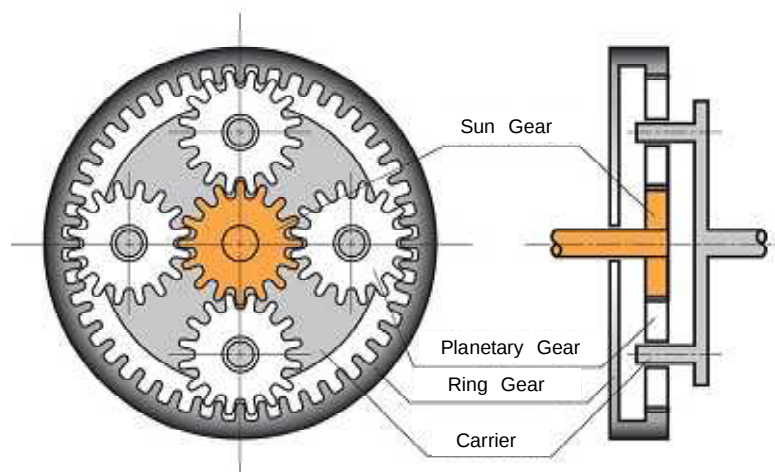


図 3-1 遊星歯車の構成

3.1.2 遊星歯車の動作と二関節同時駆動機構との対応

二関節同時駆動の特徴は前章でも紹介したように

- ・ 二関節筋が 2 つの関節に同時に働く
- ・ 二関節筋が 2 つの関節に 1 : 1 で力を発揮する
- ・ 一関節筋は他方の関節に力を発揮しない

の 3 点である。以下では一関節筋が発揮するトルクを単関節駆動トルク、二関節筋が発揮するトルクを二関節同時駆動トルクと呼ぶことにする。

サンギア・リングギアに単関節駆動用のモータ、キャリアに二関節同時駆動用のモータを配置して二関節同時駆動機構を実現した場合、サンギア・リングギアに入力されたトルクに応じたトルクをキャリアに入力することでもう一方の関節への影響を打ち消すことができ、キャリアに入力したトルクはプラネタリギアを介してサンギア・リングギアに伝達される。

次節では、式展開により上記のことを示す。

3.2 遊星歯車の運動方程式

3.2.1 ラグランジュ法による運動方程式の導出

遊星歯車において、 $\theta \cdot J$ を以下のように定義する。

θ_r : リングギアの回転角	J_r : リングギアの自転イナーシャ
θ_s : サンギアの回転角	J_s : サンギアの自転イナーシャ
θ_c : キャリアの回転角	J_c : キャリアの自転イナーシャ
θ_p : プラネタリギアの回転角 (自転)	J_p : プラネタリギアの自転イナーシャ
θ_o : プラネタリギアの回転角 (公転)	J_o : プラネタリギアの公転イナーシャ

このとき、各回転角には以下のような拘束条件が存在する。

$$\theta_s - \frac{\rho-1}{2\rho}\theta_p - \frac{\rho+1}{2\rho}\theta_o = 0$$

$$\theta_c = \theta_o$$

$$\theta_s + \frac{\rho-1}{2}\theta_p - \frac{\rho+1}{2}\theta_o = 0$$

ただし、 ρ はリングギアとサンギアのギア比である。一方、サンギア・リングギア・キャリアへの入力トルクをそれぞれ τ_r, τ_s, τ_c とするとラグランジュアンは

$$L = \frac{1}{2}J_r\dot{\theta}_r^2 + \frac{1}{2}J_s\dot{\theta}_s^2 + \frac{1}{2}J_c\dot{\theta}_c^2 + \frac{1}{2}J_p\dot{\theta}_p^2 + \frac{1}{2}J_o\dot{\theta}_o^2 + \tau_r\theta_r + \tau_s\theta_s + \tau_c\theta_c$$

—式(4)

となる。これらより、ラグランジュの未定定数法から以下を得る。

$$J_r\ddot{\theta}_r - (\tau_r + \lambda_r) = 0$$

—式(5)

$$J_s\ddot{\theta}_s - (\tau_s + \lambda_s) = 0$$

—式(6)

$$J_c\ddot{\theta}_c - (\tau_c + \lambda_c) = 0$$

—式(7)

$$J_p\ddot{\theta}_p - \left(-\frac{\rho-1}{2\rho}\lambda_r + \frac{\rho-1}{2}\lambda_s\right) = 0$$

—式(8)

$$J_o\ddot{\theta}_o - \left(-\frac{\rho+1}{2\rho}\lambda_r - \frac{\rho+1}{2}\lambda_s - \lambda_c\right) = 0$$

—式(9)

$$\theta_s - \frac{\rho-1}{2\rho}\theta_p - \frac{\rho+1}{2\rho}\theta_o = 0$$

—式(10)

$$\theta_c = \theta_o$$

—式(11)

$$\theta_s + \frac{\rho-1}{2}\theta_p - \frac{\rho+1}{2}\theta_o = 0$$

—式(12)

ここで、 λ は各ギアに働く抗力を表すことになる。

これを解くと、リングギア・サンギアの運動方程式は

$$\begin{pmatrix} J_r \ddot{\theta}_r \\ J_s \ddot{\theta}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_r \\ \tau_s \end{pmatrix} + A^{-1} \cdot S \cdot \begin{pmatrix} \tau_r \\ \tau_c \\ \tau_s \end{pmatrix} \quad \text{—式(13)}$$

となる。ただし、

$$A \equiv \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\rho}{\rho+1} \frac{J_c + J_o}{J_r} + \frac{\rho+1}{2\rho} & \frac{1}{\rho+1} \frac{J_c + J_o}{J_s} + \frac{\rho+1}{2} \\ \frac{\rho}{\rho-1} \frac{J_p}{J_r} + \frac{\rho-1}{2\rho} & \frac{1}{\rho-1} \frac{J_p}{J_s} - \frac{\rho-1}{2} \end{pmatrix} \quad \text{—式(14)}$$

$$S \equiv \begin{pmatrix} s & 1 & t \\ u & 0 & v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\rho}{\rho+1} \frac{J_c + J_o}{J_r} & 1 & -\frac{1}{\rho+1} \frac{J_c + J_o}{J_s} \\ -\frac{\rho}{\rho-1} \frac{J_p}{J_r} & 0 & \frac{1}{\rho-1} \frac{J_p}{J_s} \end{pmatrix} \quad \text{—式(15)}$$

3.2.2 単関節駆動トルクの分離

式(13)において τ_r から θ_s , τ_s から θ_r への伝達関数を 0 にするために、 τ_c に相応のトルクを足し合わせて以下のようにする。 τ'_c が実際に二関節同時駆動トルクとして働くトルクである。

$$\tau_c = \frac{ua - sc}{c} \tau_r + \frac{vb - td}{d} \tau_s + \tau'_c \quad \text{—式(16)}$$

$$E_1 = \frac{ua - sc}{c}, E_3 = \frac{vb - td}{d}$$

これにより、リングギア・サンギアの運動方程式は以下のように書きなすことができ、単関節トルクの分離ができることが示される。各文字は式(14) , (15)で定義している。

$$\begin{pmatrix} J_r \ddot{\theta}_r \\ J_s \ddot{\theta}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & 0 \\ 0 & H_{22} & H_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_r \\ \tau_c \\ \tau_s \end{pmatrix} \quad \text{— 式 (17)}$$

$$\begin{aligned} H_{11} &= 1 + \frac{u}{c} & H_{22} &= -\frac{c}{ad - bc} \\ H_{12} &= \frac{d}{ad - bc} & H_{23} &= 1 + \frac{v}{d} \end{aligned}$$

3.2.3 二関節同時駆動トルクの伝達

書き直した運動方程式において、二関節同時駆動トルクが各関節に発揮される比は $H_{12} : H_{22}$ である。これが $1 : 1$ になるための条件は

$$\frac{\rho}{\rho-1} \frac{J_p}{J_r} + \frac{\rho-1}{2\rho} = -\frac{1}{\rho-1} \frac{J_p}{J_s} + \frac{\rho-1}{2}$$

であるが、一般にプラネタリギアは他のギアに比べ小さいので、その自転イナーシャを無視できると考えるため、配分比が $1 : 1$ になる条件は

$$\rho = 1$$

となり、実現不可能である。

しかしながら、配分比は各ギアのイナーシャや歯車比から求めることができるため補償を行うことは容易である。

3.2.4 提案した二関節同時駆動機構と 3 対 6 筋アームモデルとの比較

以上の結果をまとめると、提案機構において各関節駆動トルクの指令値を τ_r 、 τ_c 、 τ_s としたときに最終的な関節トルク T_1 、 T_2 は

$$T_1 = \frac{u+c}{c} \tau_r + \frac{d}{ad-bc} \tau_c$$

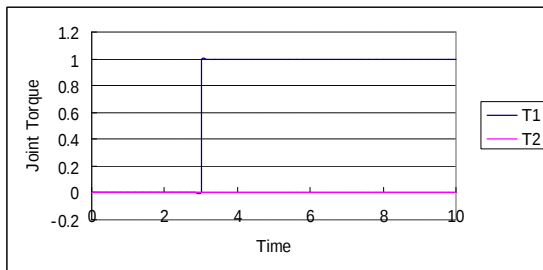
$$T_2 = \frac{v+d}{d} \tau_s + \frac{-c}{ad-bc} \tau_c$$

とできる。これは 3 対 6 筋のアームモデルにおける関節トルクと各拮抗筋肉対の出力との関係

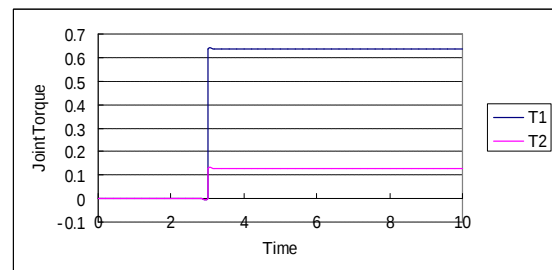
$$T_1 = \tau_1^m + \tau_3^m$$

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

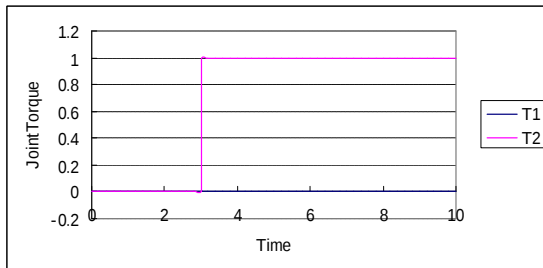
をよく模擬していることがわかる。



(A)



(B)



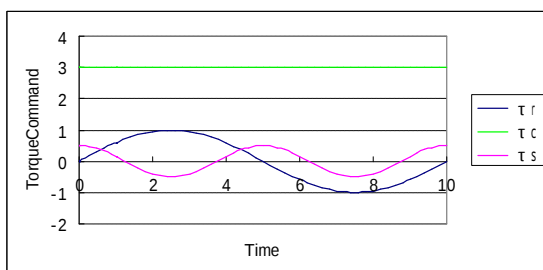
(C)

図 3-3 1つの関節駆動トルクだけに指令値を与えた時の関節トルクの様子

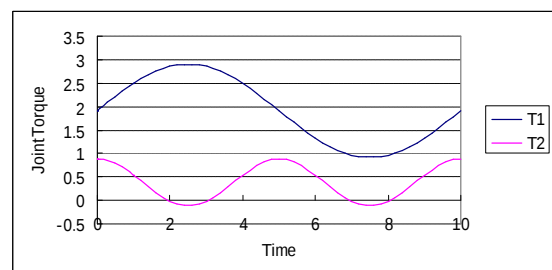
(A) τ_r にステップ指令, $\tau_c=0$, $\tau_s=0$

(B) $\tau_r=0$, τ_c にステップ指令, $\tau_s=0$

(C) $\tau_r=0$, $\tau_c=0$, τ_s にステップ指令



(A)



(B)

図 3-4 全ての関節駆動トルクに指令値を与えた時

(A) 与えた指令値

(B) 出力された関節トルク

3.3.2 PID 制御による単関節トルクの分離と分離比の同定

PID 制御によって単関節トルクの分離を行い、分離比 E_1 , E_3 の同定をした。同定は一方の単関節駆動トルクのみ指令値を与え、最終的な収束値を分離比とした。以下は、そのブロック図である。

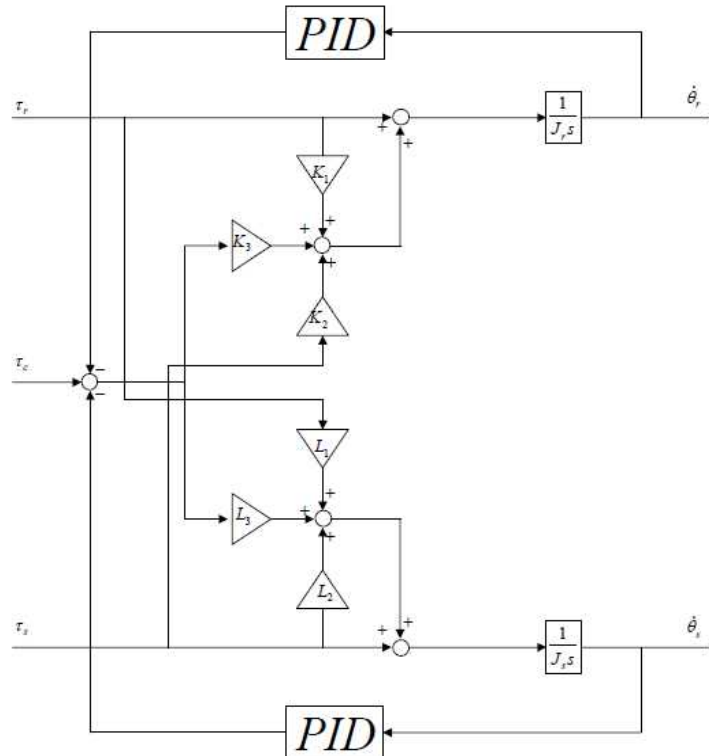
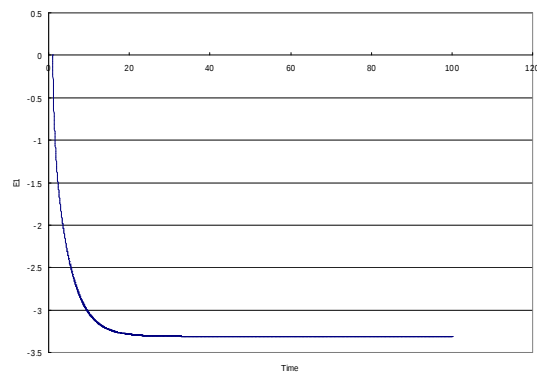
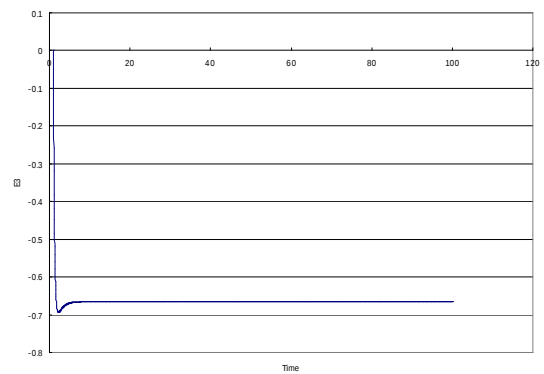


図 3-5 PID 制御による単関節トルクの分離

$J_r=5$, $J_s=5$, $J_c+J_o=20$, $J_p=0.01$, $\rho=5$ のとき、 E_1 , E_3 は図 3-6 のように推移し、一定値に収束していく。この収束値を分離比として $E_1=-3.3089$, $E_3=-0.6657$ と同定できる。また、 $J_r=5$, $J_s=2$, $J_c+J_o=2$, $J_p=0.01$, $\rho=5$ と変化させた場合でも、同様に $E_1=-0.3275$, $E_3=-0.1647$ と同定できる。これらはともに式(16)から得られる値とほぼ一致する。



(A) E1



(B) E3

図 3-6 PID 制御によって同定した分離比の推移

3.3.3 まとめと実際に使用する際の指針

遊星歯車を利用して二関節同時駆動を実現するためには、キャリアによる補償を行って一関節筋同士のトルク伝達を分離する必要がある。しかし、このときキャリアが補償するトルクは各一関節筋の出力トルクに比例するため簡単にトルク補償が可能である。

補償の為の比は各ギアのイナーシャの値に依るが、実際にはそれらを知ることができなくても、PID 制御を用いた同定により求めることができるということをシミュレーションから確認できた。

4 製作した遊星歯車による実験

4.1 実験装置

製作した装置の外観を図 4-1 に示す。モータは maxon の DC モータ RE30 を、エンコーダは同社の MR TypeL を用いた。また、電流制御を行うためのモータ・ドライバ（図工 HRT07-0004）を用意した。装置の緒元を以下に示す。

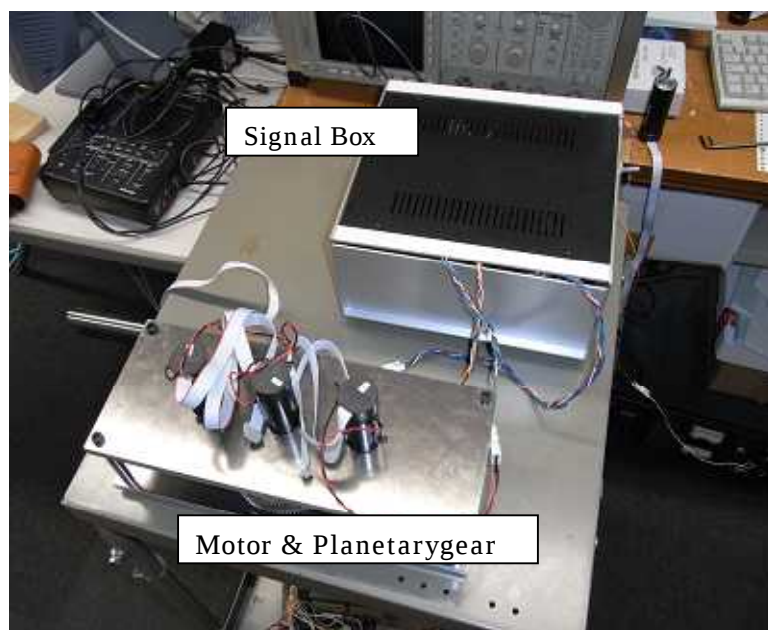


図 4-1 実験装置概観

表 4-1 装置緒元

Size	130 × 330 × 90 [mm]
Weight	about 8 [kg]
Motor	maxon RE-30
Encoder	maxon MR TypeL
CurrentController	図工 HRT07-0004

図 4-2 はシグナルボックス内部の配置、図 4-3 は使用したモータドライバである。また、図 4-4 は使用した遊星歯車である。モータの配置を考えリングギア・キャリアは外部からギアを介して駆動している。使用したギアの径、ギア比などを表 4-2 に載せる。サンギア・プラネタリギアは図 4-5 のように、外部からは目視できない構造となっている。図 4-6 は使用したモータとエンコーダであり、一体となっている。

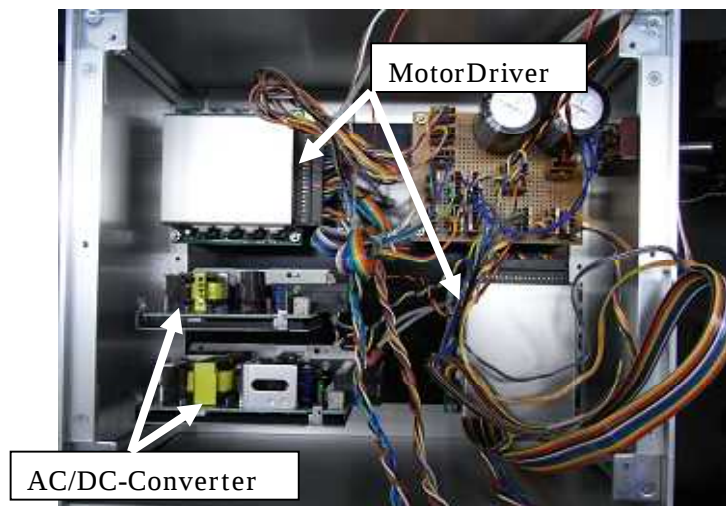


図 4-2 シグナルボックス内部



図 4-3 モータドライバ

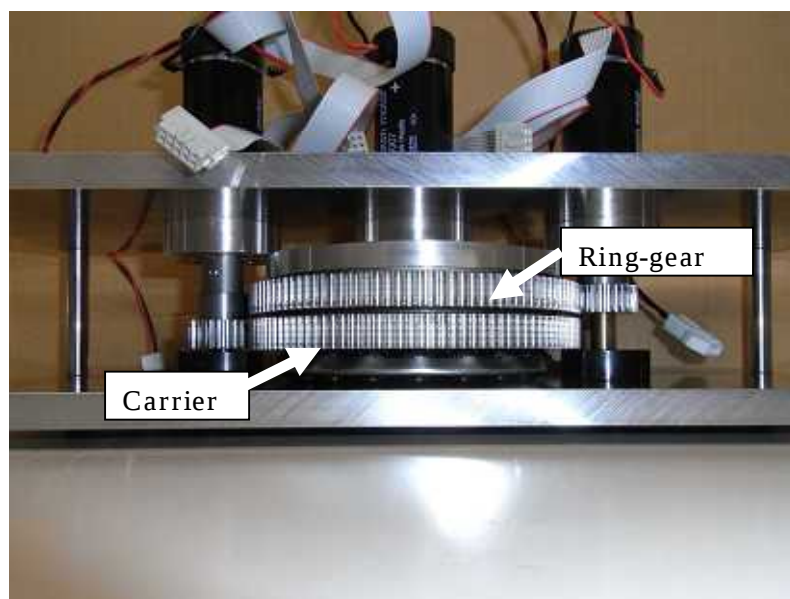


図 4-4 遊星歯車の概観

表 4-2 遊星歯車緒元

Ring	120mm (24mm のギアで駆動)
Sun	24mm
Carrier	120mm(24mm のギアで駆動)
Planetarygear	24mm
GearRatio	1 : 1

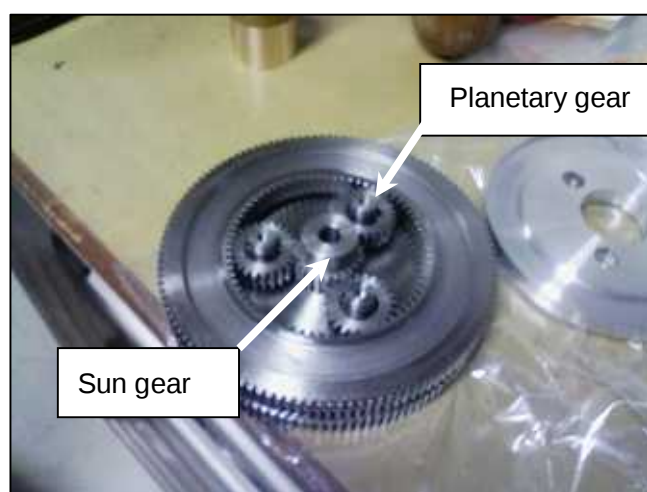


図 4-5 サンギア・プラネタリギアの配置



図 4-6 モータ RE30 とエンコーダ MR TypeL

4.2 実験結果

4.2.1 PID 制御による分離比の同定

図 4-7 に同定した分離比の推移を示す。これより $E_1 = -0.6$, $E_3 = -1.25$ と同定した。

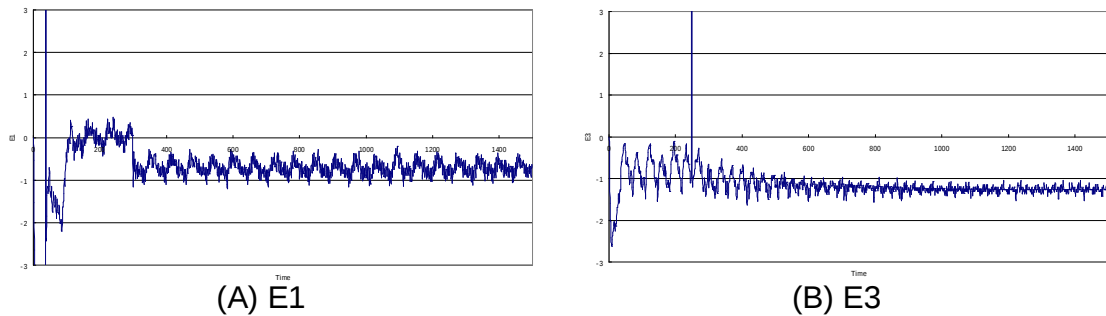


図 4-7 同定した分離比の推移

4.2.2 同定した分離比を利用して FF 補償を行った結果

リングギアあるいはサンギアのみステップ指令をあたえ、キャリアによる補償を行った。その際、同定によって求めた分離比 $E_1 = -0.6$, $E_3 = -1.25$ を使用した。リングギアにのみ指令値を入力し、キャリアの補償によりサンギアの回転を抑えたときの実験結果を図 4-8 に、逆の場合を図 4-9 に示す。

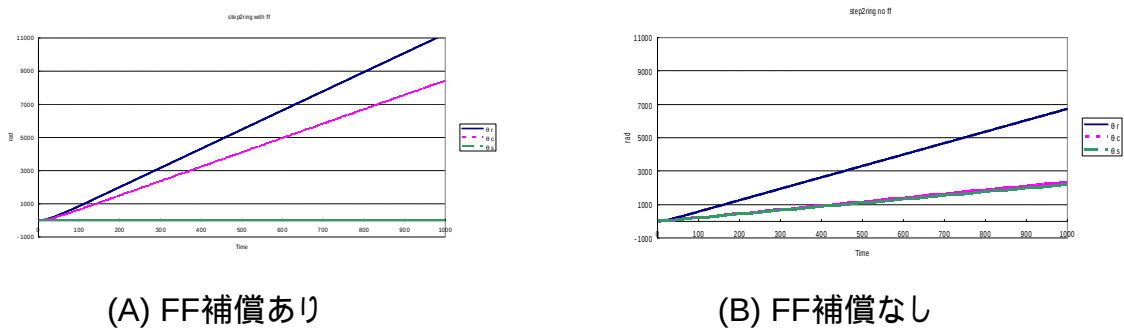


図 4-8 リングギアにのみ指令値をいれた場合

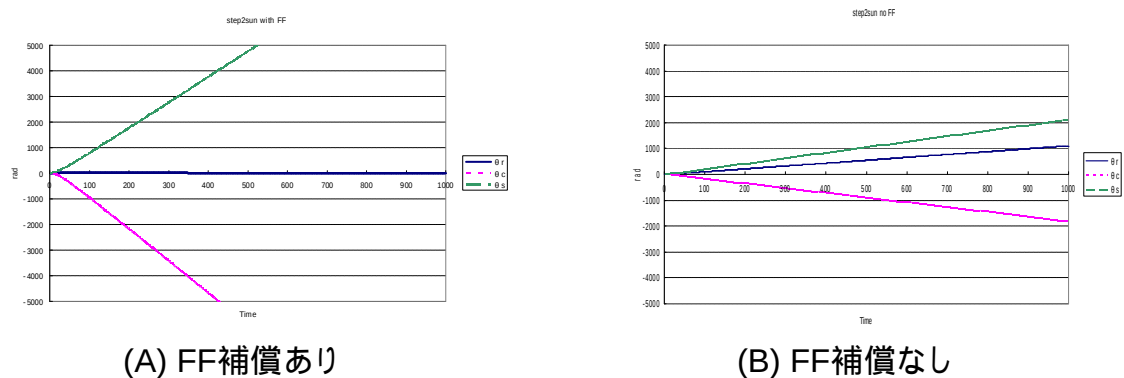


図 4-9 サンギアにのみ指令値をいれた場合

また、キャリアのみに指令値を入れたときは図 4-10 のようにサンギア・リングギアが共に動いており、以上をもって二関節同時駆動が実現されていることを確認できた。

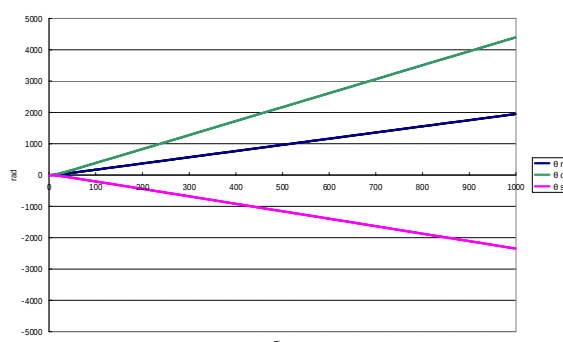


図 4-10 キャリアにのみ指令値を与えた場合

5 まとめ

5.1 結論

本論文では遊星歯車の 4 つの構成要素のうち 2 つに一関節筋、残りの 2 つのうち 1 つに二関節筋に相当するアクチュエータを配置することで二関節同時駆動機構を実現する方法を提案した。

その際、二関節筋に相当するアクチュエータは二関節筋としての出力のみでなく一関節筋同士のトルク伝達を分離するための出力が必要であるが、その出力は一関節筋の出力に比例し、容易に補償が可能であることをシミュレーションによって示した。また、そのときに必要となってくる比は各ギアのイナーシャを求めることなく、PID 制御を利用することで同定できることも示した。

さらに、シミュレーションの結果を踏まえ実際に製作した遊星歯車と DC モータからなる装置によって、一関節筋同士のトルクを分離するために必要な比を同定し、その値を利用することで一関節筋同士のトルク伝達を分離することに成功した。

5.2 今後の課題

今回は 3 つあるうちのモータの、1 つのみに指令値を与えて二関節同時駆動の実現を確認するにとどまったが、今後は 2 つあるいは全てのモータに指令値を与えた時の動作を解析する必要がある。

また、サンギア・リングギアの回転軸にアームを取り付けて、二関節筋を装備したロボットアームの動作特性を解析していくことが課題として残った。目指すロボットアームの完成図を図 5-1 に参考として示す。

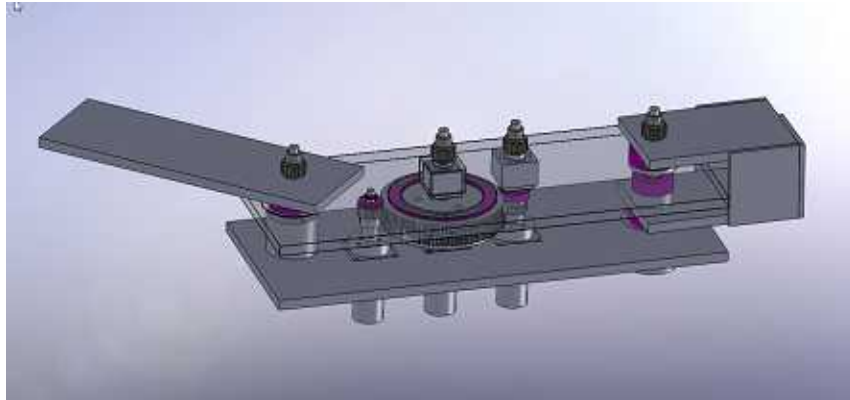


図 5-1 目標とするロボットアームの完成想像図

参考文献

- [1]大島徹,藤川智彦,熊本水頼 ; “一関節および二関節筋を含む筋座標系による機能別実行筋出力評価 - 筋力と四肢先端の出力 -”, 精密工学会誌 Vol.65 , No.12 , 1999 , pp1772-1777
- [2]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 巻 607 号 , 1997 , pp135-142
- [3]大島徹,鳥海清司,藤川智彦,百生登 ; “足関節と膝関節の二関節筋による協調機能を用いた跳躍メカニズム”, 日本機械学会論文集(C 編) 71 巻 712 号 , 2005 , pp176-182
- [4]坂井康樹,大島徹,藤川智彦, 百生登, 鳥海清司,神谷和秀 ; “二関節筋機構による動物規範方跳躍ロボット”, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference , 2006 , 549
- [5]大島徹, 百生登,藤川智彦, 鳥海清司,小柳健一,松野隆幸 ; “動物の脚機構を模倣したリンク機構による跳躍の実現”, 精密工学会誌 Vol.74 , No.4 , 2008 pp416-420
- [6]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
- [7]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
- [8]斎藤之男,藤本光太郎,音琴浩 ; “バイラテラルサーボを用いた二足歩行ロボットの研究” , 日本機械学会関東支部第 2 回埼玉ブロック大会講演論文集 , 2006 , pp33-34
- [9]斎藤之男,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 二関節筋実利用 Workshop , 2004 , pp17-22
- [10]斎藤之男,音琴浩,藤崎広一,大西謙吾 ; “障害者自身の操作をパワーアシストするリハビリテーションロボットの研究” , 日本機械学会関東支部第 2 回埼玉ブロック大会講演論文集 , 2006 , pp39-40

発表文献

[1]肥田知仁,呉世訓,内田利之,堀洋一 ; “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”, 電気学会産業計測制御研究会 ,IIC-09-121 (予定)

謝辞

1年間ご指導下さった堀洋一教授に感謝申し上げます。また、秘書の降旗明子さんにも一年間研究室生活を送る上で大変なお世話になりました。

研究室の先輩である、呉世訓助教・博士課程吉田憲吾さん・終始課程小林邦生さんには特に同じ福祉チームとして卒業研究のテーマ決めから最後の実験まで終始ご指導いただき、大変ありがたく思っています。藤井毅さんには歯車の動作解析において非常に大きなご助言を頂きました。また、堀研究室で一年間過ごす上で研究室の諸先輩方にはご面倒を見て頂きました。

最後になりますが、技術専門職員の内田利之さんには遊星歯車の製作という大変な仕事を快く引き受けていただき、無事一年間で実験まで行うことができました。

お世話になった方々にここで厚くお礼申し上げます。一年間ありがとうございました。