

重力負荷がある場合の  
人間どうしの腕の協調特性解析に関する研究

平成 23 年 三重大学大学院工学研究科

博士後期課程 システム工学専攻

王 元新

# 目次

---

第1章 緒言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	5
1.3 運搬運動と一自由度回転運動との関係	5
1.4 本論文の構成	10
第2章 慣性負荷のみがある場合の協調特性解析	11
2.1 協調作業のモデルと実験装置	11
2.2 人間の腕の筋骨格モデル	23
2.3 実験方法と結果	28
第3章 重力負荷が運動方向と垂直の場合の協調運動解析	32
3.1 実験装置及び方法	32
3.2 実験結果	39
3.3 まとめ	49
第4章 重力負荷が運動方向と同じ場合の協調運動解析	50
4.1 回転方向に一定負荷が作用する場合の実験装置と実験モデル	50
4.2 二人が弛緩状態からリーダーとフォロアーとなる実験と結果	56
4.3 二人が弛緩状態からリーダーとリーダーで動き出す実験と結果	58
4.4 一人が一定角回転後にリーダーに変わる実験と結果	60
4.5 両被験者が共にトルクを分担した状態から回転する実験と結果	67
4.6 まとめ	84

第 5 章 結言	85
参考文献	87
謝辞	92

# 第1章 緒言

---

## 1. 1 研究背景

日本の平成22年における人口構成割合は、年少人口(0～14歳)が13.42%、生産年齢人口(15～64歳)が63.90%、老年人口(65歳以上)が22.68%であり高齢社会である。今後も年少人口、生産年齢人口の割合の低下、老年人口の割合の上昇が予測されている<sup>[1][2]</sup>。そのため、医療福祉の現場では介護者が不足することが予測される。ロボットはこれまで主として生産性向上の手段であったが、少子高齢社会の現在では福祉や医療現場など日常的に身近な所での作業も求められつつある。このため、従来要求された高速・高精度の動作能力より、安全であることはもちろんのこと、人間に脅威を与えないこと、人間が受け入れやすいこと、人体に負担が少ないことなど、人間との協調作業能力が求められるようになってきている。それらの能力を実現するためには、ロボットの制御システムに人間の特性を反映させることが必要となる。

人間と協調するロボットに関する制御理論はこれまでに様々な研究が行なわれてきた<sup>[3]-[9]</sup>。例として、田窪らは仮想非ホロノミック拘束による協調運搬手法を提案し<sup>[10]</sup>、小菅らは人と複数のマニピュレータによる単一物体の協調ハンドリングシステムを提案している<sup>[11]</sup>。また、山本らは介護者用パワーアシストスーツの開発を行っている<sup>[12]</sup>。しかし、これらは、人間の特性を考慮して制御系を設計していない。1990年以後、池浦らは人間どうしが協調作業する際の人間の特性を解析し、図1.1に示す人間とロボットの協調作業に、人間どうしの特性を取り入れるロボットの制御理論を提案してきた<sup>[13]-[18]</sup>。2人の人間協調作業における人間の特性を調べる研究では、人間の性能をインピーダンス制御で表現できるのが分かった。彼らは見つけられたインピーダンス・パラメータを人間と協調作業するロボットに適用した<sup>[19]-[22]</sup>。そこでは、人間とスムーズに協調できるロボットの可変インピーダン

ス制御手法を提案している。

Rahmanらは人間と人間の水平直線運動によって協調作業中の人間の特性を調べた<sup>[23]-[25]</sup>。図1.2に示すようなリニアモーターを用いた実験装置を使用し、人間がスライダーを操作する。そして、二人は自分の前腕を水平に維持し、スライダー上のハンドルを協調的に動かす。この実験では、加速度と力の相関関係が分析された。このような一自由度協調作業運動においては、リーダーとリーダーの協調とリーダーとフォロアーの協調の二つの協調動作が存在することが見い出された。そして、リーダーとフォロアーの協調では、リーダーが力を能動的に発生することで物体を動かし、フォロアーはリーダーに追従する受動運動をしていたことが分かった。この実験結果より、人間とロボットの協調作業において、人間をリーダー、ロボットをフォロアーとしたとき、人間どうしのフォロアーの特性をロボットの制御に応用できる。さらに、Rahmanらはフォロアーの手先でのインピーダンス特性を同定し、推定した時変パラメータを人間と協調するロボットの制御に適用した<sup>[26]</sup>。実験結果より、提案された協調制御システムにより、ロボットは、人間とスムーズに協調できるが確認されている。この研究成果より、人間の手先でのインピーダンス特性を人間と協調作業するロボットの制御に適用できることが示された。

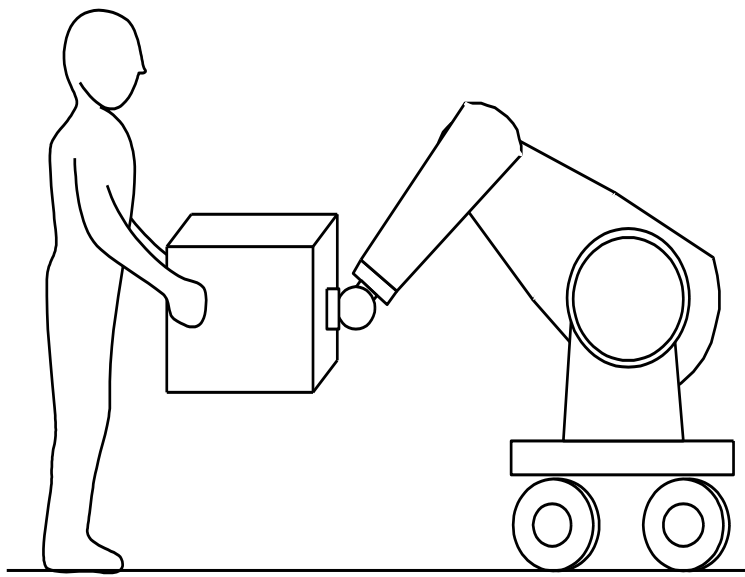


Fig. 1.1 Human-robot cooperative task

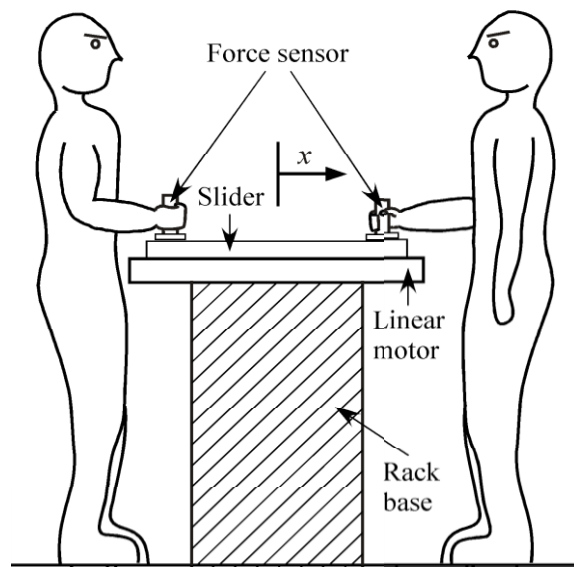


Fig. 1.2 Human-human cooperative task that requires moving an object horizontally

## 1. 2 研究目的

以上のように、Rahmanらは人間の手先でのインピーダンスの特性を解析したが<sup>[27][28]</sup>、筋骨格特性を調べていない。より詳細に協調特性を得るには、人間の協調運動はどのような筋骨格特性から発生するかを調べる必要がある。五味らは、筋骨格構造に基づく人間の腕の特性に関する理論をいくつか提案し、人体中に最も複雑な筋骨格系<sup>[29]</sup>の一つである人間の腕のインピーダンス特性を計測した。また、腕の姿勢を維持する場合と動作する場合の人間の腕の剛性と粘弾性の変化も示した<sup>[30][31]</sup>。さらに、腕の筋骨格特性を解析している研究は多くあるが、一般的にそれらのモデルは複雑であり、協調特性との関係を見いだすのは難しいと考えられる。これを解決するため、Zhangらは肘周りの水平一自由度回転運動における人間どうしの協調実験手法を提案した。肘周りの水平一自由度回転運動では、筋骨格特性は簡単なモデルとなり、協調運動と筋骨格特性との関係を見いだしやすくなる。そして、慣性負荷がある場合の協調特性と筋骨格特性との関係について調べている。本論文では、物体運搬に欠かせない重力負荷がある場合の協調特性について、肘周りの筋骨格特性との関係を調べることを目的とする。

## 1. 3 運搬運動と一自由度回転運動との関係

先に示したように、本論文では、重力負荷がある場合の肘周りの水平一自由度協調動作を取り扱うが、この動作と物体を協調運搬する運動との関係について以下に述べる。

図1.3に人間と人間による物体の協調運搬動作を示す。人間と人間の協調作業における一人の協調特性を解析し、解析した人間の特性を人間と協調作業できるロボットの制御に応用できるが、この場合、腕は多くの筋肉から構成されるため、筋骨格モデルも複雑となる。今まで多数の研究者が、この複雑な筋骨格モデルの解析について研究を行っており、さらに理想化された筋骨格系の生体力学的モデルに基づいた研究もされている<sup>[32]-[41]</sup>。しかしながら先に示したように、複雑なモデルと協調運動との関係を見いだすことは困難が予想されることから、本研究では肘周りでの水平一自由度運動に限定している。そして、二頭筋と三頭筋からなる前腕を駆動する肘周りの筋骨格特性では、単純なばね、ダンパーと摩擦の力学モデルとして仮定することができる<sup>[45]-[47]</sup>。この単純化されたモデルにより、協調動作における筋骨格特性と協調特性との関係を見いだしやすくなることができる。人間どう



しの腕の水平一自由度協調作業モデルと腕の周りの筋骨格モデルについては、第2章で詳しく説明する。

先に述べたように図1.3に示す協調運搬動作と肘周りの水平一自由度協調運動においては、筋骨格特性は異なるが、手先における協調運動モデルの動特性は同じになる。以下にこれについて説明する。

図1.4にテーブル上に物体を移動する協調作業を示す。この場合、物体の質量(kg)を $m$ 、二人の腕から出した力(N)を $f_1$ 及び $f_2$ とすると、水平直線運動の運動方程式は $m\ddot{x} = f_1 + f_2$ で示される。本研究で取り扱う肘周りの水平回転一自由度協調運動の場合、図1.5に示すように、負荷の慣性モーメント( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )を $I$ 、回転角加速度( $\text{rad/s}^2$ )を $\ddot{\theta}$ 、両被験者の腕の発生するトルク( $\text{N}\cdot\text{m}$ )を $\tau_a$ 及び $\tau_b$ とすると、運動の方程式は $I\ddot{\theta} = \tau_a + \tau_b$ で示される。このように、物体の協調運搬動作の運動方程式と腕の回転の運動方程式と比較すると、同じ形であることが分かる。Zhangらは、図1.5に示すような慣性モーメントのみを負荷とし、重力負荷を負担しない場合の解析を行って来た。これにより様々な場合のフォロアーの特性が分かり、それがリーダーの負担に影響する事などが分かった<sup>[45][47]</sup>。

しかし、図1.3に示す人間どうしの協調運搬作業の場合、テーブル上で物体を運搬するのではなく、重力負荷を持ったまま運搬することから、重力負荷を考慮した協調特性の解析が必要となる。その場合、重力負荷が運搬動作方向と垂直な方向にかかる場合、つまり物体を持って水平に運搬する場合と、重力負荷が運搬動作方向と同じ方向にかかる場合、つまり物体を持ち上げる場合がある。前者の場合、物体の質量(kg)を $m$ 、二人の腕から出した力(N)を $f_{1H}$ 及び $f_{2H}$ とすると、重力負荷がある水平方向の一自由度運動方程式は $m\ddot{x} = f_{1H} + f_{2H}$ で示される。この重力負荷を持ったまま運搬する実験及び解析結果は第3章で示す。また、後者の場合の直線運動方程式は $m\ddot{x} = f_{1v} + f_{2v} - mg$ で示される。これは第4章で述べる回転一自由度協調運動の方程式 $I\ddot{\theta} = \tau_a + \tau_b - mgR$  ( $R$ はプーリの半径である。この内容は第4章で詳しく説明する。)と比較すると、同じ形であることも分かる。従って第4章では、重力負荷を持ち上げる場合の、腕の筋骨格モデルを用いた回転一自由度協調運動特性解析を通じて、物体の協調搬送の特性を解析する。

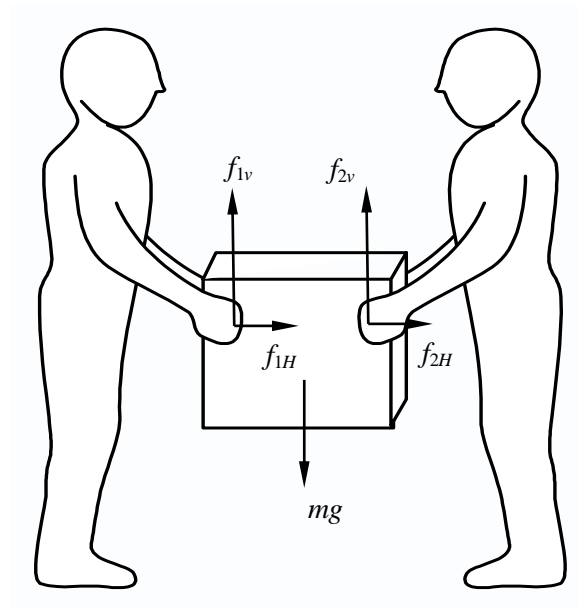


Fig. 1.3 Human-Human cooperative task

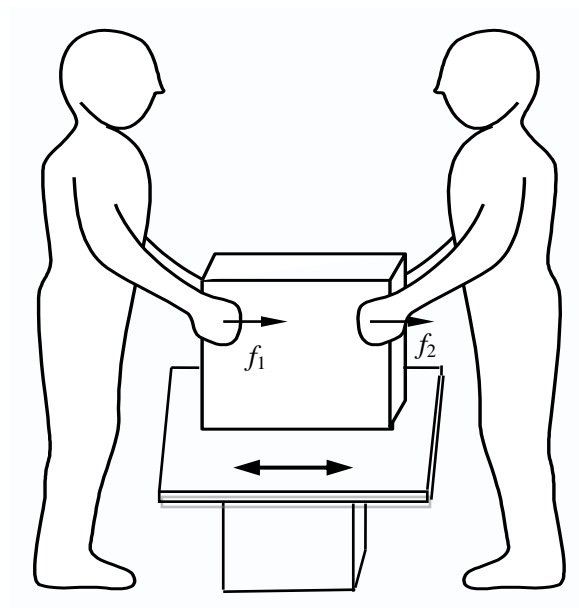


Fig. 1.4 Human-human cooperative task with inertial load

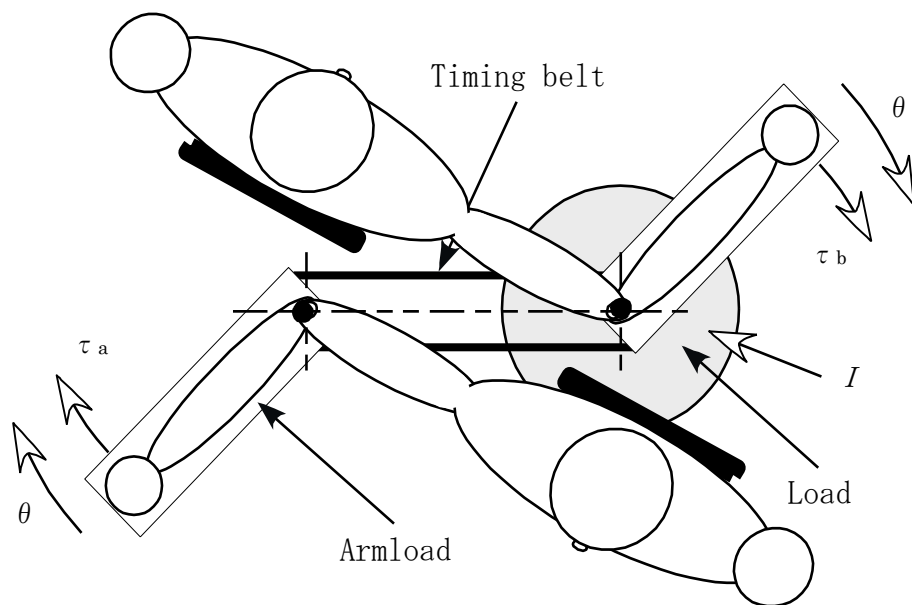


Fig. 1.5 Rotational 1 DOF cooperative motion

## 1. 4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す.

まず, 第2章では本研究で用いた二人の人間による回転一自由度協調運動モデル及び実験装置を説明する. また, 人間の腕の筋骨格モデルについても説明する. 次に, 第3章では, 運動方向が重力負荷と垂直であるような物体を持ったまま回転する場合の協調運動実験の方法と実験結果及び考察をまとめる. さらに, 第4章では, 運動方向が重力負荷と同じであるような重力負荷を持ち上げる場合の協調運動実験の方法と実験結果及び考察をまとめる. 最後に第5章では本研究のまとめについて述べる.

## 第2章 慣性負荷のみがある場合の 協調特性解析

---

Rahman らは人間と人間の水平一自由度直線運動によって協調作業中の人間の特性を調べた<sup>[23]-[25]</sup>。これまで、Zhang らは重力負荷がない場合の人間どうしの腕の水平一自由度回転協調特性を解析した<sup>[45]-[47]</sup>。本研究では重力負荷がある場合の人間どうしの腕の水平一自由度回転協調実験を行うが、本章では、Zhang らの重力負荷がない、つまり、慣性負荷のみの協調特性について、再度実験及び解析を行い、結果をまとめる。

### 2. 1. 協調作業のモデルと実験装置

図2.1に本研究で使用した慣性負荷のみがある場合の人間どうしの回転一自由度協調作業モデル<sup>[45]-[47]</sup>の概略を示す。被験者正面にあるディスプレイには、目標位置を示す四角印が表示され、+印によりアームロードの現在角度が表示されている。図2.2には実験装置外観を示す。2人の被験者は前腕をアームロード（前腕を載せる台）に載せ、肘を回転中心とし、一定の回転角範囲内で一自由度の回転運動を行うことができる。また、タイミングベルトにより2人の前腕は常に同時に動く。図2.3に両被験者が腕を置く部分の実験装置の構成を示す。本装置は腕を載せるアームロードと計測系並びにトルク伝達系の3つに別れる。アームロードは被験者の腕を載せる台であり、黒いスポンジの凹部に前腕を置く。図2.2と図2.3に示すように、装置の計測系は二つの力センサーと角度センサーで構成されている。本装置に採用した力センサー（CB17-600G-3K-11, by Minebea Co Ltd）を図2.4に示す。このセンサーははかり用のもので、比較的安価なものが多く、指定された荷重方向以外に力が作用しなければ、良好な線形性が得られる。クリアランスや摩擦などの要因で目的外の

方向にも歪ませてしまう場合が多いが（多くの場合これが計測誤差の原因となる）、フリーベアを使うので、それを避けることができる。フリーベアとセンサーの間の薄板は絶縁板で、生体信号からのノイズを絶縁する。本装置に採用した角度計測センサーを図2.5に示す。角度計測センサーは渦電流変位センサー（図2.6に示すPU-09, by AEC Corporation）と転換器（図2.7に示すAEC-5509, by AEC Corporation）により構成される。図2.5において、発信回路よりセンサコイルに高周波電流を供給すると、センサコイルより高周波磁束を発生する。この磁界中に金属（ターゲット）のカムが近づくと、その金属表面に渦電流が生じる。この渦電流の大きさは、センサコイルとカムの距離により変化し、その変化によりセンサコイルのインピーダンスが変化する。このインピーダンスの変化より、センサとカムの距離が計測できる。そして、計測した距離より、回転角度を計算することができる。実験装置の計測システムのブロック線図を図2.8に示す。装着してある力センサー、渦電流変位計によりトルクと角度を計測し、A/D変換器を介してパーソナルコンピュータへ取り込む。サンプリングタイムは0.004sである。パーソナルコンピュータ内で変位成分を微分することにより角速度を得る。装置のトルク伝達系では、二つのアームロードと負荷をタイミングベルトでトルク伝達をしている。図2.9に示すように、アームロードの軸受けにはニードルローラベアリングとスラストボールベアリングを用いた二重構造の軸受部を採用し、摩擦抵抗を極力低減している。これによりタイミングベルトに張力を与えても、本装置に生じる摩擦トルクは約0.003N・mであり、この摩擦は操作トルクに比べると十分無視できる。アームロードや、その下の伝達部は軽量化と慣性モーメント軽減のために、肉厚0.5mmのアルミ角パイプに発泡ウレタンを圧入してある。また、軸受部とパイプ根元の結合は強い締めりばめで、更にその上に多数の小径ボルト締結を行い、高剛性と軽量化の相反する条件を両立させた。

図2.1のようなシステムにおける実験装置の慣性モーメント( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )を $I$ 、回転角加速度( $\text{rad/s}^2$ )を $\ddot{\theta}$ 、両被験者の腕の発生するトルク( $\text{N}\cdot\text{m}$ )を $\tau_a$ 及び $\tau_b$ とすると、運動方程式は以下の式で示される。

$$I\ddot{\theta} = \tau_a + \tau_b \quad (2-1)$$

負荷に対する分配係数 $\alpha$ を導入すると、 $\tau_a$ と $\tau_b$ はそれぞれ、

$$\tau_a = \alpha I \ddot{\theta} + \tau_{int} \quad (2-2)$$

$$\tau_b = (1 - \alpha) I \ddot{\theta} - \tau_{int} \quad (2-3)$$

と示される．ここで， $\tau_{int}$  は被験者の間で発生する内部トルク (N・m) である．

$\alpha$  の値によってRahmanらは二つの協調作業種類を定義した．つまり，協調運動中に2人の被験者はリーダー或いはフォロアーの役割を行う<sup>[23]</sup>．本研究では，協調運動中一人の被験者は，ディスプレイ上の移動目標物である四角印に追従して能動的に前腕を動かす主体的に運動をする役割の者でリーダーと呼ぶ．他の一人も目標物は見ているが，腕は弛緩状態で，力を自発的に出して腕を動かす事は行わない．この受動的役割を行う被験者をフォロアーと呼ぶ．

$\alpha \neq 1$  の場合にはリーダーとリーダーの協調運動と考えられる． $\alpha = 1$  の場合にはリーダーとフォロアーの協調運動と考えられ<sup>[23]</sup>，それぞれのトルクは以下の式(2-4)，(2-5)のようになる．

$$\tau_a = I \ddot{\theta} + \tau_{int} \quad (2-4)$$

$$\tau_b = -\tau_{int} \quad (2-5)$$



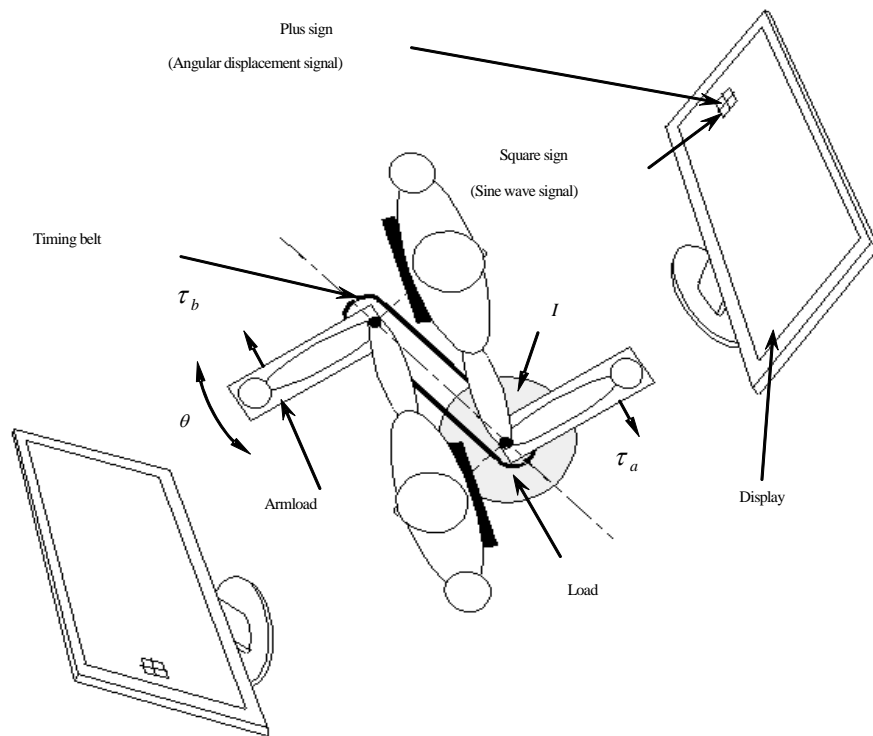


Fig. 2.1 Rotational 1 DOF cooperative motion



Fig. 2.2 Top view of the experimental system

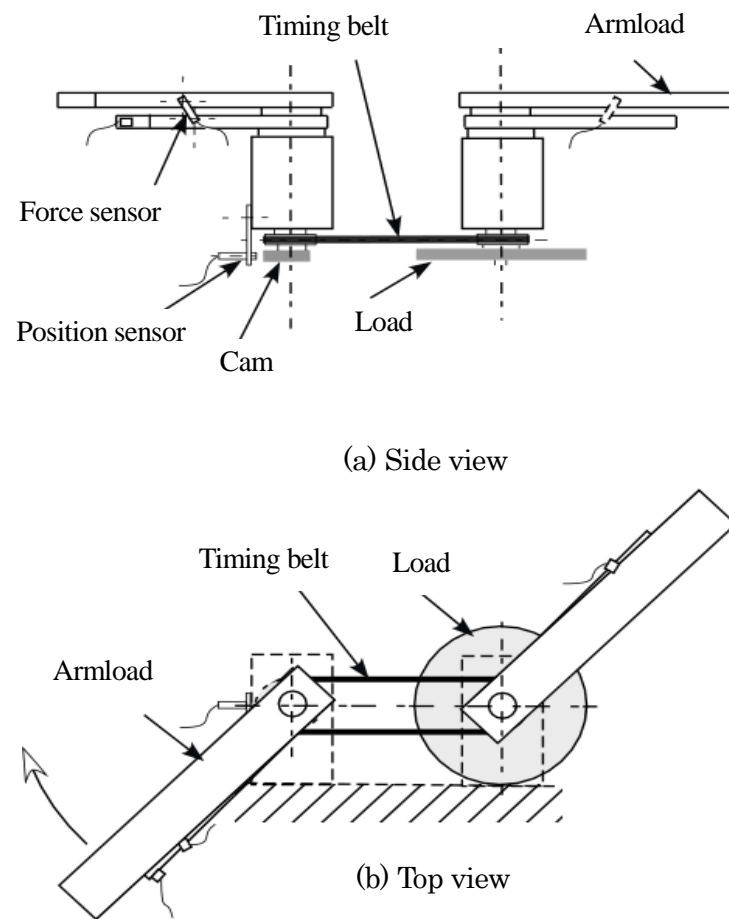
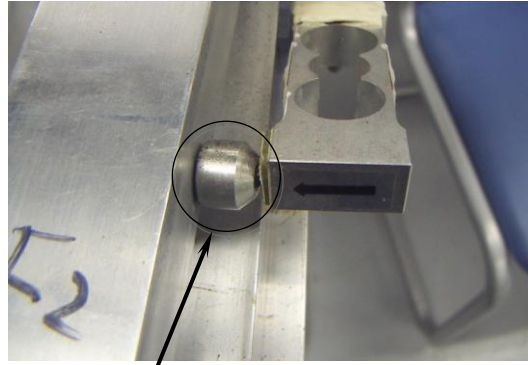
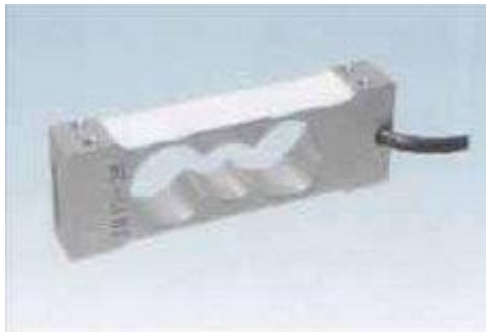


Fig. 2.3 Configuration of the experimental system



Free bearing

定格容量	29.42 N{3 kgf}
定格出力	1 mV/V $\pm$ 0.1 mV/V
非直線性	0.02 %R.O.
絶縁抵抗	2 000 M $\Omega$ 以上(DC50 V)(ブリッジ～本体間)
許容温度範囲	-10 °C $\sim$ 50 °C
起歪体の材質	アルミニウム合金
疲労寿命	定格容量で 1 000 000 回
偏置誤差	<ul style="list-style-type: none"> <li>・積載面の大きさ:最大で 200 mm<math>\times</math>200 mm</li> <li>・積載面の中心とロードセルの中心は一致 させること</li> <li>・誤差:偏置 50 mm で定格容量の 1/2 を負荷し, 0.02 %R.O.以内</li> </ul>

Fig. 2.4 Force sensor

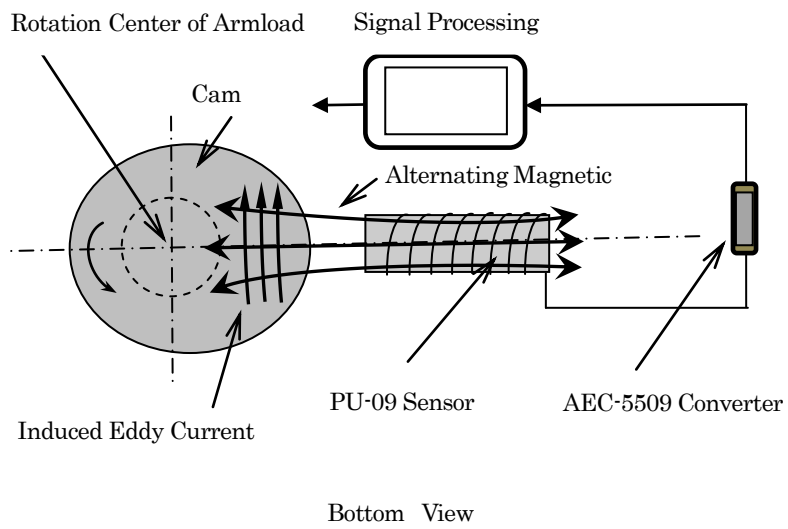
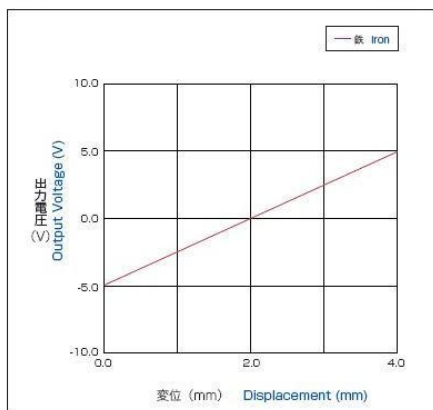


Fig. 2.5 Measuring rotational angles using the eddy current sensor



出力特性・直線性  
Output characteristics / linearity



形式	PU-09 型
測定範囲(鉄)	0～4mm ( $\alpha$ 0:0.2mm)
出力	$\pm 5V$ (0.4mm/V)
適合変換器	5509
分解能	0.5 $\mu$ m
直線性	0.4～3.6mm まで $\pm 0.5\%$ /FS その他 3%
使用温度範囲	-20℃～+120℃
温度特性	-20℃～0℃の変化で $\pm 1.6\mu$ m/℃ 0℃～+80℃の変化で $\pm 1\mu$ m/℃ +80℃～+120℃の変化で $\pm 1.6\mu$ m/℃

Fig. 2.6 PU-09 Sensor



形式	変換器 AEC-5509
出 力	各種センサ欄をご参照下さい
周波数特性	DC～30kHz -3dB
分解能	各種センサ欄をご参照下さい
使用温度範囲	-10℃～+55℃
温度特性	-10℃～+55℃の変化で±0.1%/℃
電 源	DC±11V～17V ±40mA max

Fig. 2.7 AEC-5509 Converter

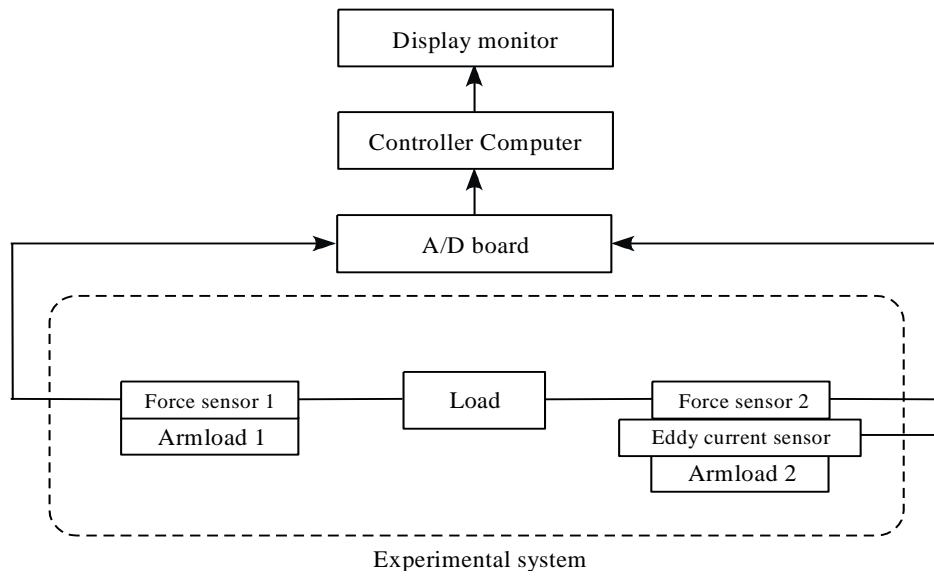


Fig. 2.8 Schematic diagram of the measurement method



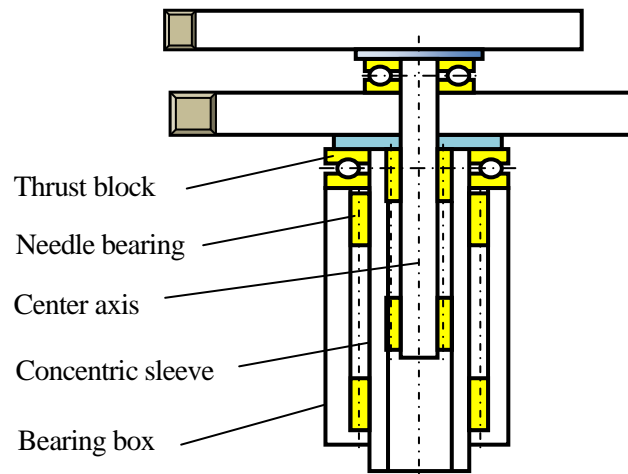
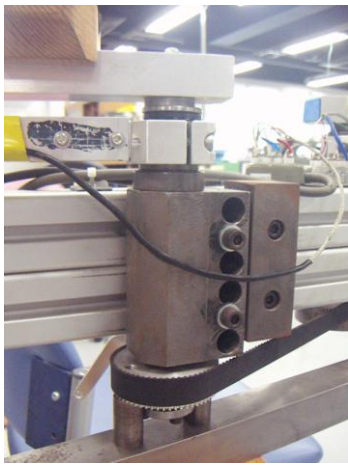


Fig.2.9 Bearing of experimental system

## 2. 2 人間の腕の筋骨格モデル

2.2節では、人間の腕の筋骨格モデルについて説明する。

人体構造は軽いが、高効率で運動し、非常に多能である。可動部では、上肢は最も頻繁に使用される。図2.10に示すように、人体解剖学では、上肢は指先と肩の間の部分であり、肩、腕（上腕、肘、および前腕）、手首、および手を含んでいる<sup>[42]-[44]</sup>。人間の腕は、上腕二頭筋、上腕三頭筋、三角筋、根屈筋、根伸筋、上腕骨、尺骨、橈骨から構成されていることが分かる。人間の腕はそれぞれの骨とそれを動かす筋肉の働きにより動かすことが出来る。それぞれの筋肉の働きは、上腕二頭筋と上腕三頭筋は互いに拮抗的に働き、肘関節を屈伸させ、三角筋は上肢を外転させるときや、前方および後方に上げるときに主役を演じ、根屈筋と根伸筋は手首の曲げ伸ばしをする。本研究では、単純なモデルとなる前腕の駆動部を導入する<sup>[45]-[47]</sup>。図2.11に人間の前腕を駆動する肘周りの筋骨格構造を示す。この図を基にモデル化すると、二頭筋、三頭筋、上腕骨、肘、尺骨は図2.12に示されるようなモデル構造となる<sup>[45]-[47]</sup>。図中、 $I_h$  は人間の前腕の慣性モーメント( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )、 $u_B$ 、 $u_T$  は二頭筋と三頭筋の筋力(N)、 $c$ 、 $k$ 、 $f_\mu$  は上腕の粘性係数(N·s/m)、弾性係数(N/m)、クーロン摩擦力(N)、 $\theta$  は前腕の回転角(rad)、 $f_1$ 、 $f_2$  は二頭筋と三頭筋の力(N)、 $\tau_s$  は前腕のトルク(N·m)である。それぞれの被験者の前腕のトルク $\tau_s$ は式(2-2)と(2-3)中の両被験者の腕の発生するトルク $\tau_a$ 及び $\tau_b$ になる。

このモデルの前腕の運動方程式は、

$$I_h \ddot{\theta} = r(f_1 - f_2) + \tau_s \quad (2-6)$$

と表される。ここで、

$$f_1 = u_B - f_\mu \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) - kx_1 - c\dot{x}_1 \quad (2-7)$$

$$f_2 = u_T - f_\mu \operatorname{sgn}(\dot{x}_2) - kx_2 - c\dot{x}_2 \quad (2-8)$$

であり、また、

$$\text{sgn}(\dot{x}) = \begin{cases} 1 & (\dot{x} > 0) \\ -1 & (\dot{x} < 0) \end{cases} \quad (2-9)$$

$$x_1 = r\theta, \quad x_2 = -r\theta \quad (2-10)$$

である．式(2-9)と式(2-10)を式(2-7)と式(2-8)に代入すると，

$$f_1 = u_B - f_\mu \text{sgn}(\dot{\theta}) - kr\theta - cr\dot{\theta} \quad (2-11)$$

$$f_2 = u_T + f_\mu \text{sgn}(\dot{\theta}) + kr\theta + cr\dot{\theta} \quad (2-12)$$

となる．式(2-11)と式(2-12)を式(2-6)に代入すると，

$$I_h \ddot{\theta} + 2cr^2 \dot{\theta} + 2kr^2 \theta + 2f_\mu r \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}) = \tau_s + (u_B - u_T)r \quad (13)$$

が得られる．

また，式(2-13)は

$$I_h \ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta + \tau_\mu = \tau_s + \tau_u \quad (14)$$

と置き換えることができる．ここで， $C = 2cr^2$ ， $K = 2kr^2$ ， $\tau_\mu = 2f_\mu r \cdot \text{sgn}(\dot{\theta})$ ， $\tau_u = (u_B - u_T)r$

である．この場合，それぞれの被験者の前腕のトルク  $\tau_s$  は式(2-2) と式(2-3)中の  $\tau_a$  と  $\tau_b$  になる．

フォロアーの場合には， $\tau_u = 0$  を式(2-14)に代入すると，

$$I_h \ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta + \tau_\mu = \tau_s \quad (2-15)$$

となる．この場合，被験者の前腕のトルク  $\tau_s = \tau_{int}$  となり，式(2-5)中のフォロアーの腕のトルク  $\tau_b$  になる．

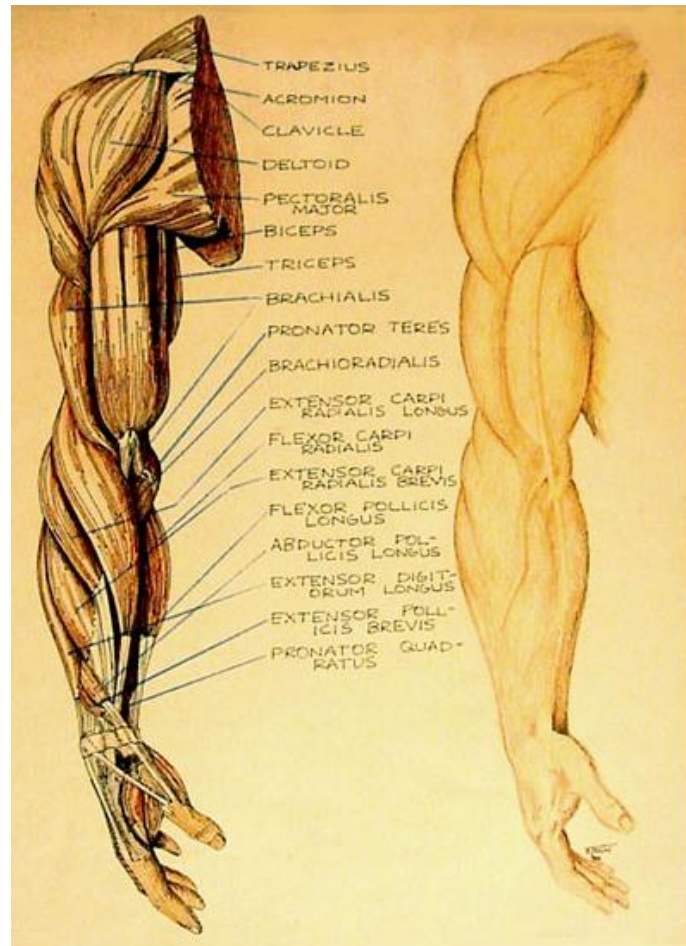


Fig. 2.10 Human arm musculoskeletal system

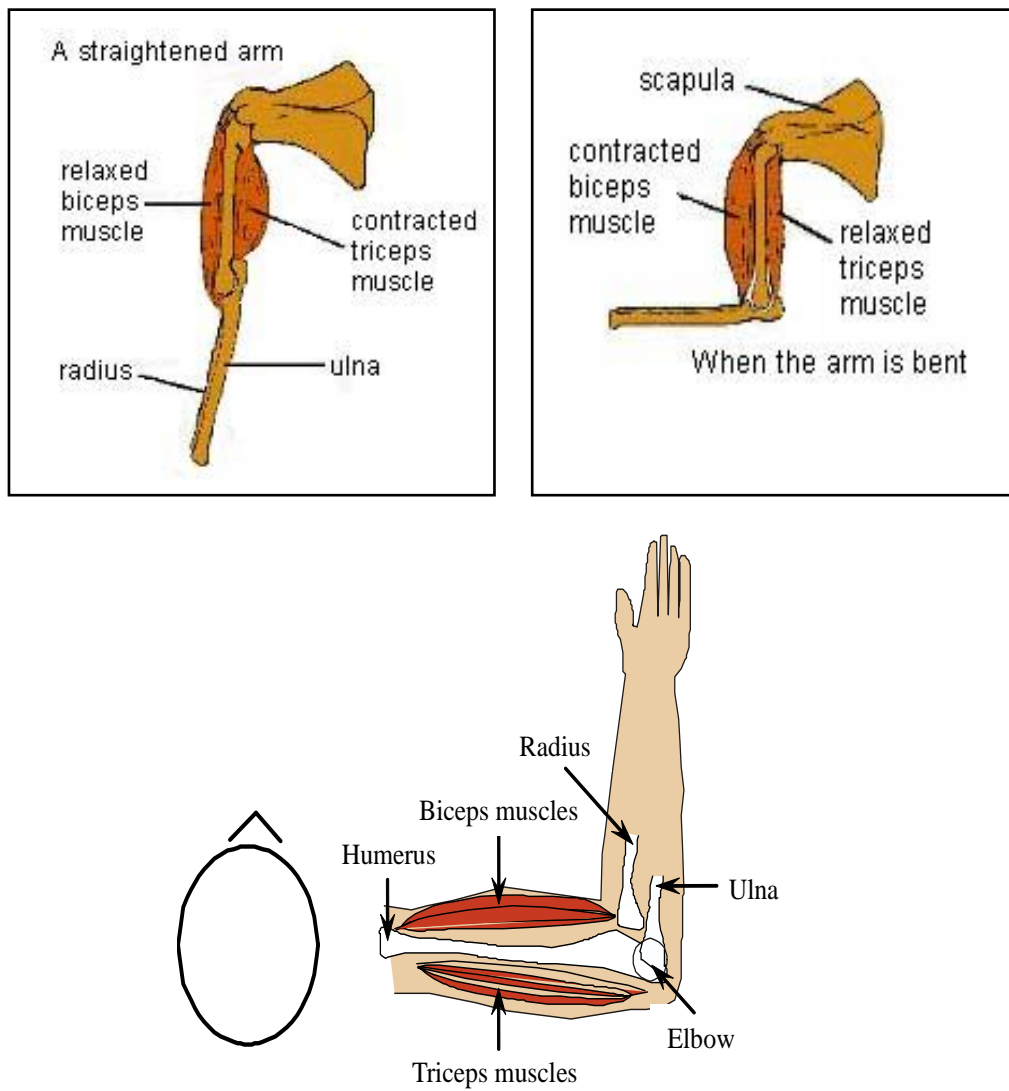


Fig.2.11 Simplified image of the human arm musculoskeletal

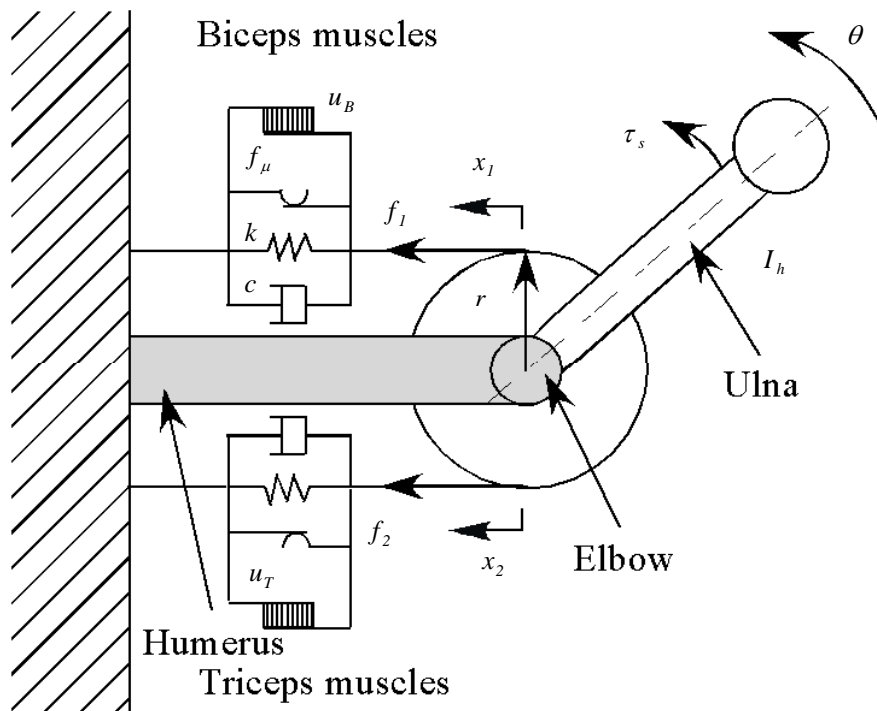


Fig.2.12 Human arm biomechanical model

## 2. 3 実験方法と結果

第3章と第4章で述べる重力負荷がある場合の実験結果を重力負荷がない場合の実験結果と比較するため、ここで、重力負荷がない場合の実験方法と実験結果を説明する。重力負荷がある場合の実験方法及び結果については、第3章と第4章で詳しく説明する。

重力負荷がない場合の実験には、右利きの健康な6人の被験者で実験を行った。一人を被験者1として、もう一人が被験者2となり、二人一組で実験を行う。実験の前に、被験者に実験について詳しく説明し、実験装置になれるため十分なトレーニングをした。

図2.1に示すように、二人の被験者は右腕をそれぞれのアームロードにのせる。肘を前腕の回転中心に置き、アームロードと同軸を保つ。二人の座り方を調節しディスプレイ上の始点を合わせる。リーダーの被験者はディスプレイ上に表示される目標の四角印を見て前腕を動かし、回転運動を行う。フォロアーの被験者は筋肉を弛緩していたままで、前腕をリーダーの被験者に動かされる。両被験者とも回転運動中に姿勢は崩れないように一定の姿勢をとる。運動の最大回転角度は約 $0.7\text{rad}$ であり、左から右への片方向の回転運動のデータを収集する。

図2.13と図2.14に示す重力負荷がない場合のリーダーとフォロアーの実験結果を例として説明する。図に上から時間に対する速度および角度、トルクと、角度ートルク線図を示す。図に示すように、回転開始からトルクが急に増加する。それ以後は一定の傾きで増加し、この区間のばね定数は一定であることが分かった。また、ばね特性以外では、幅Hから摩擦もしくは粘性特性が存在することも分かった。さらに、図2.13のような遅い運動と図2.14のような速い運動を比較すると、トルク - 角度線図において、いずれも直線となり、変化がないので、速度に依存する粘性はないと考えられる。従来、筋骨格特性は粘弾性特性が重要と言われていたが、筋肉を弛緩した状態では、粘性特性はあまり重要でないという新しい知見を得ることができた。この実験結果により、重力負荷がない場合のフォロアーの腕は図2.15に示すモデルになる。

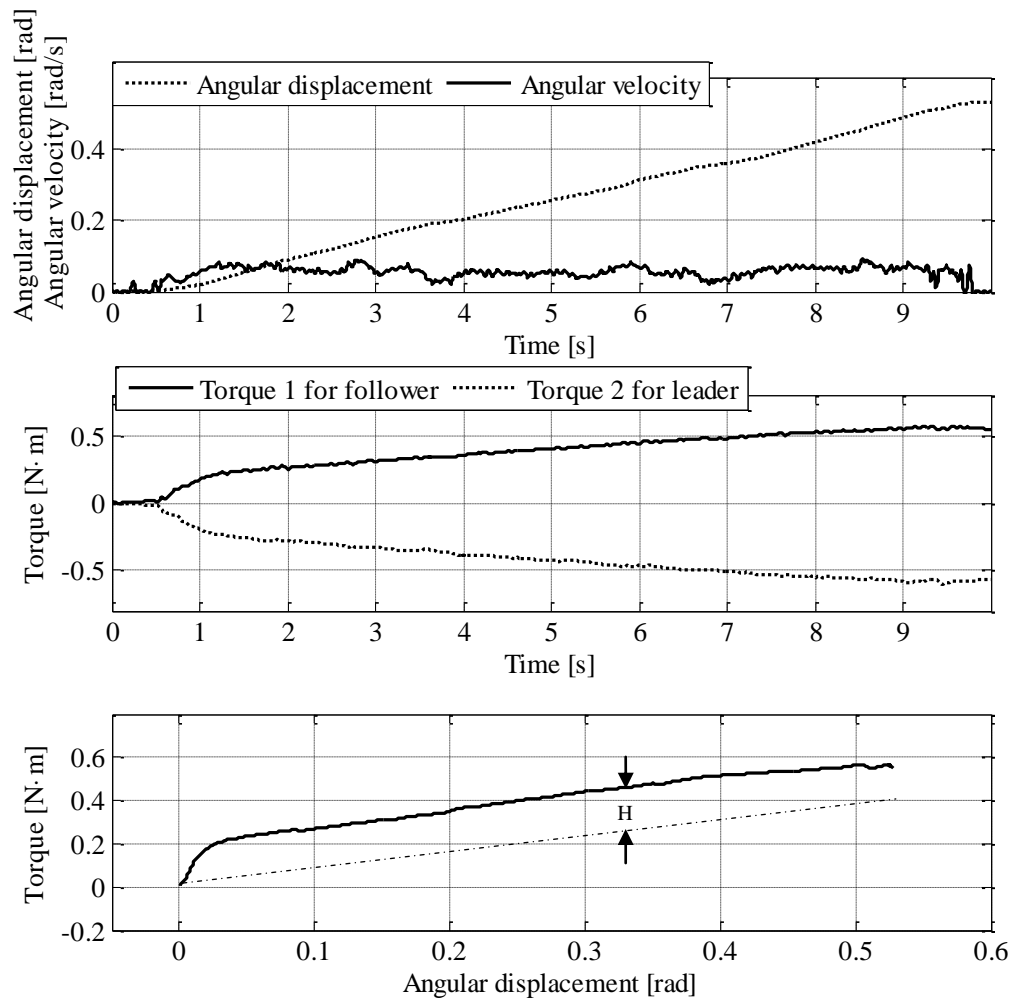


Fig.2.13 Torque characteristics in no load (slow motion)



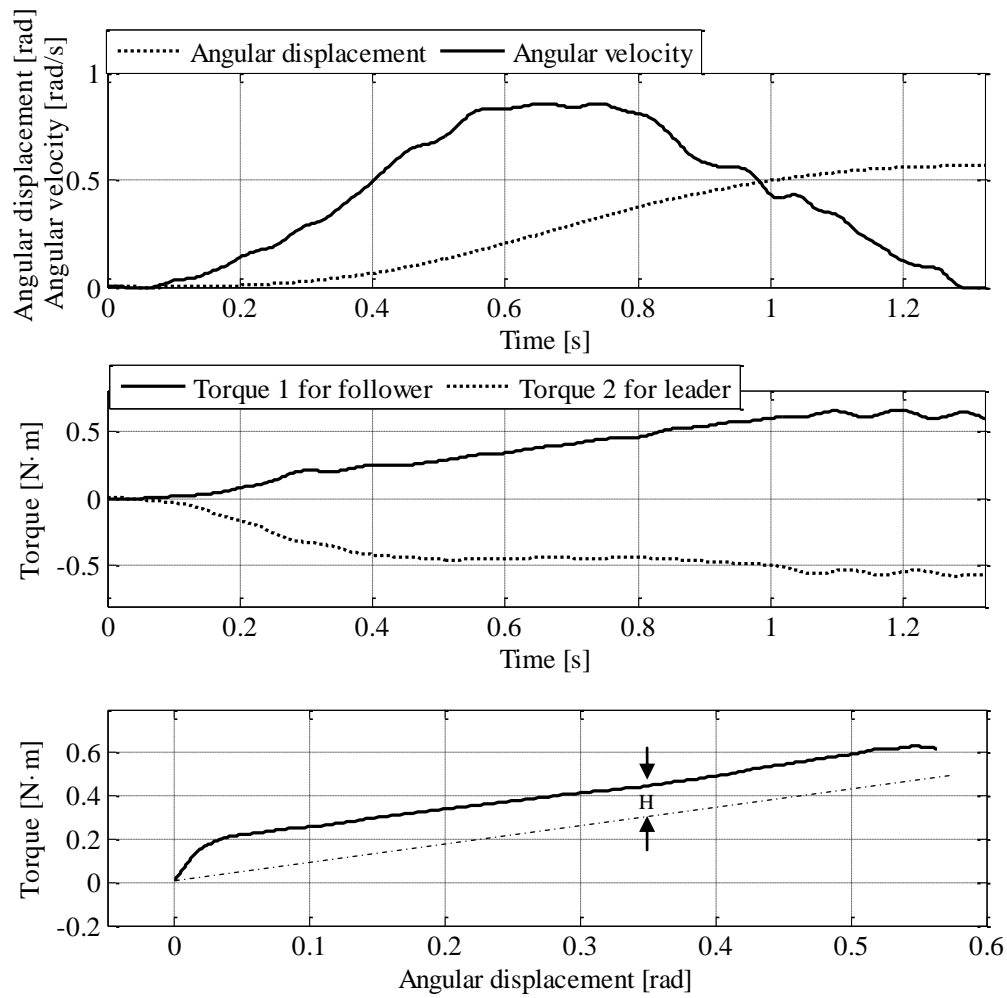


Fig.2.14 Torque characteristics in no load (quick motion)

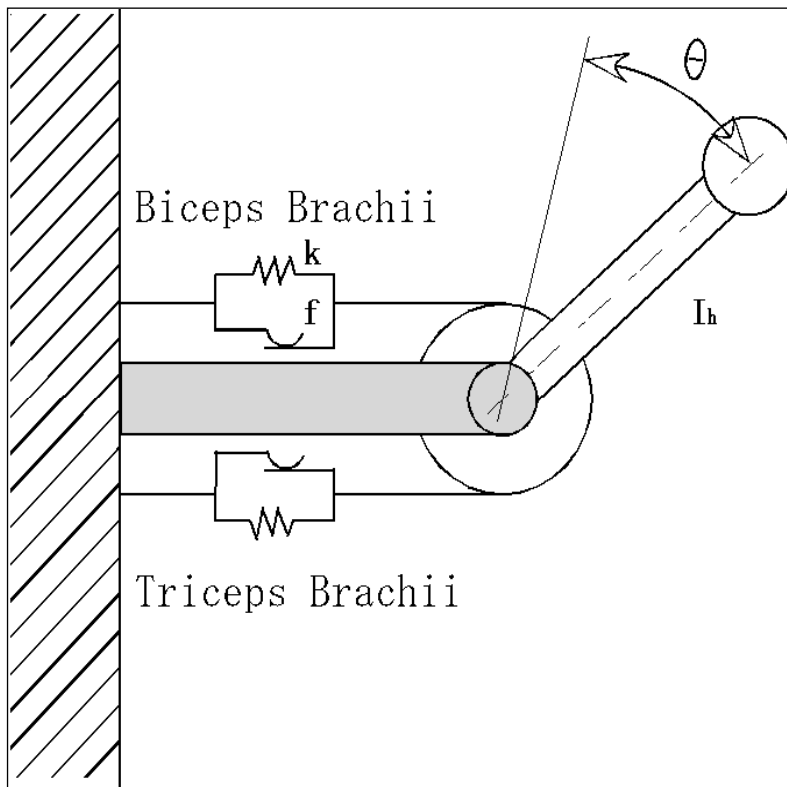


Fig.2.15 Mass, spring and friction system

## 第 3 章 重力負荷が運動方向と垂直の場合の協調運動解析

---

2章では、慣性負荷のみがある場合のリーダーとフォロアーの協調作業解析を行って来た。しかし、一般的な協調作業では、物体を持ち上げて搬送する作業があるため、重力負荷がある場合の協調特性を調べる必要がある。図3.1に示すように、本章では一般的共同作業に近付けるため、重力負荷を持ったままで、負荷の重力とは垂直方向に回転する場合の協調運動の解析を行う。

### 3. 1 実験装置及び方法

図3.2は本実験装置の写真であり、図3.3に本実験の装置の概要を示す。図3.2と図3.3に示すように、第2章で紹介した実験装置のアームロード上に支柱を2本取り付けた。2本の支柱の間の距離はねじで調整することができる。

右利きの健康な6人の被験者で実験を行った。そのうちわけは、22歳、23歳、25歳、26歳、40歳の男性が5人、39歳の女性が一人である。その一人を被験者1として、残り5人が被験者2となり、二人一組で実験を行う。実験の前に、被験者に実験について詳しく説明し、実験装置になれるため十分なトレーニングをした。

実験中、図3.4に示されるように、フォロアーは支柱があるアームロードの方のいすにすわる。2人の被験者は右腕をそれぞれのアームロードにのせ、肘は前腕の回転中心とし、アームロードと同軸を保つ。2本の支柱はフォロアーの前腕の左右としっかり接触すると同時に、前腕が自由な上下の方向に動かすために、2本の支柱の間の距離を調整して、アームロードをねじで固定する。

動き始める前に、フォロアーを担当してもらう被験者の右腕前腕にのせているおも

りを持ち上げ、腕を浮かし、おもりを持ち上げたままの状態、リーダーの被験者に回転運動をさせる。回転運動中、リーダーの被験者はディスプレイに現れる目標値とする四角目印に追従して前腕を回す。2人とも回転運動の中で姿勢は崩れないように一定のポーズをとる。フォロアーはおもりを持ち上げたまま、リーダーの被験者の動きに合わせて前腕を動かす。運動の最大回転角度は約  $0.7\text{rad}$  である。左から右へ片道の回転運動のデータを取る。

5組の被験者にて実験データを収集して、パラメータ解析を行い、共通の特徴が分かった。以下に代表する1組の被験者の実験結果を示す。

本実験中、腕の回転速度が速い場合（片方向 2s～3s）と遅い場合（片方向 9s～10s）を測定した。また、重力負荷の変化が実験結果にの影響を調べるために、表 1 に示すような重力負荷 0kg, 0.6kg, 0.9kg, 1.2kg 場合の実験 (1) ～ (8) を行った。

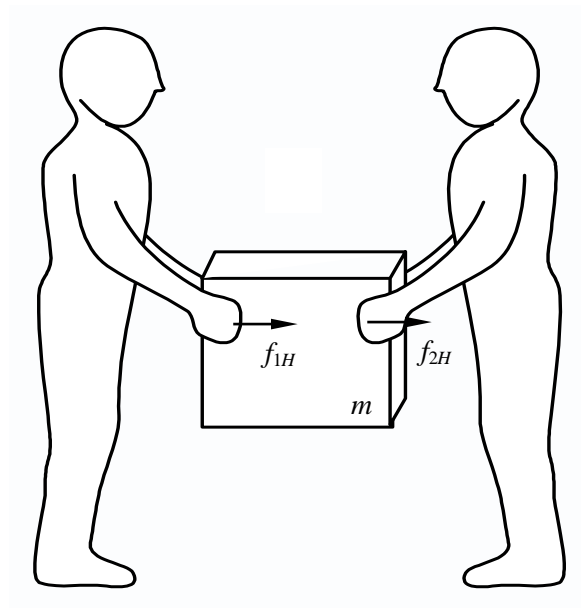


Fig. 3.1 Human-Human cooperative task

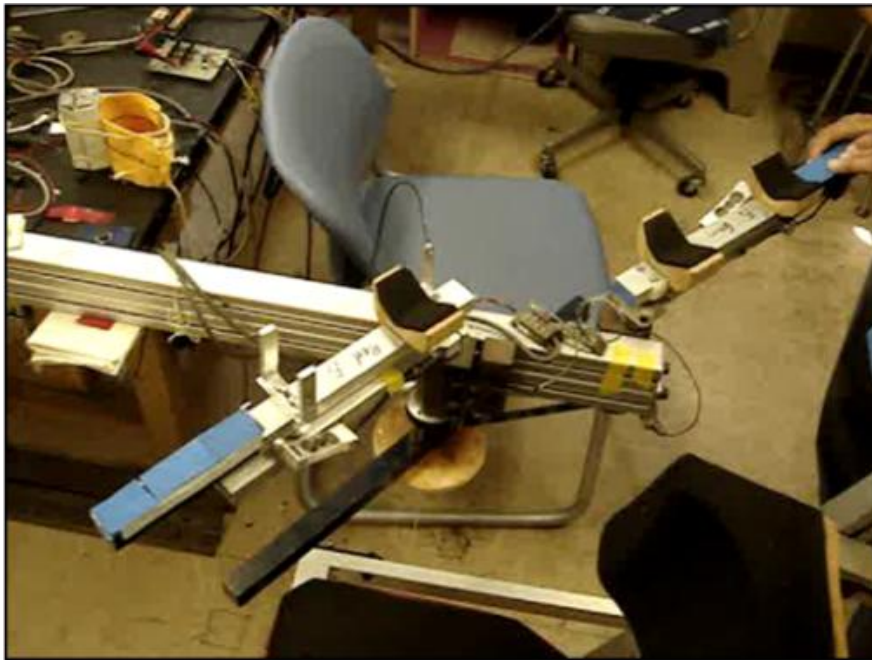


Fig. 3.2 Experimental system

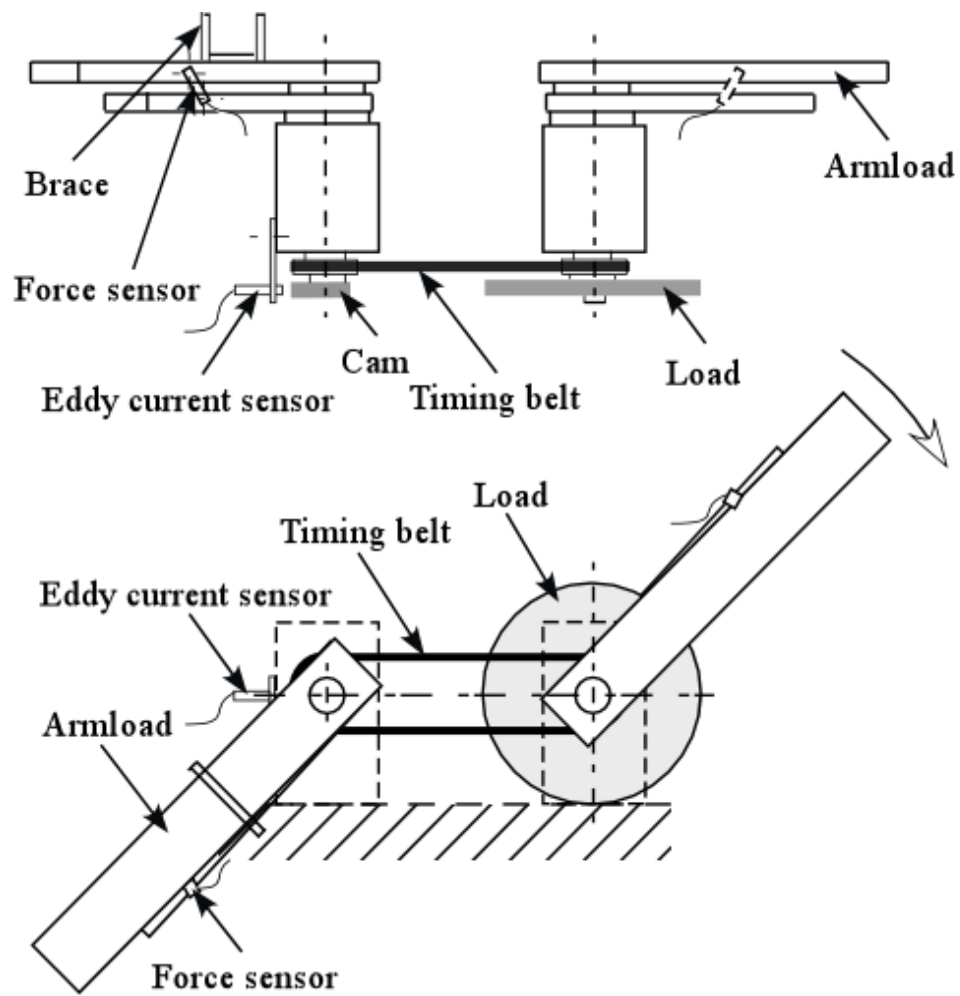


Fig. 3.3 Experimental system

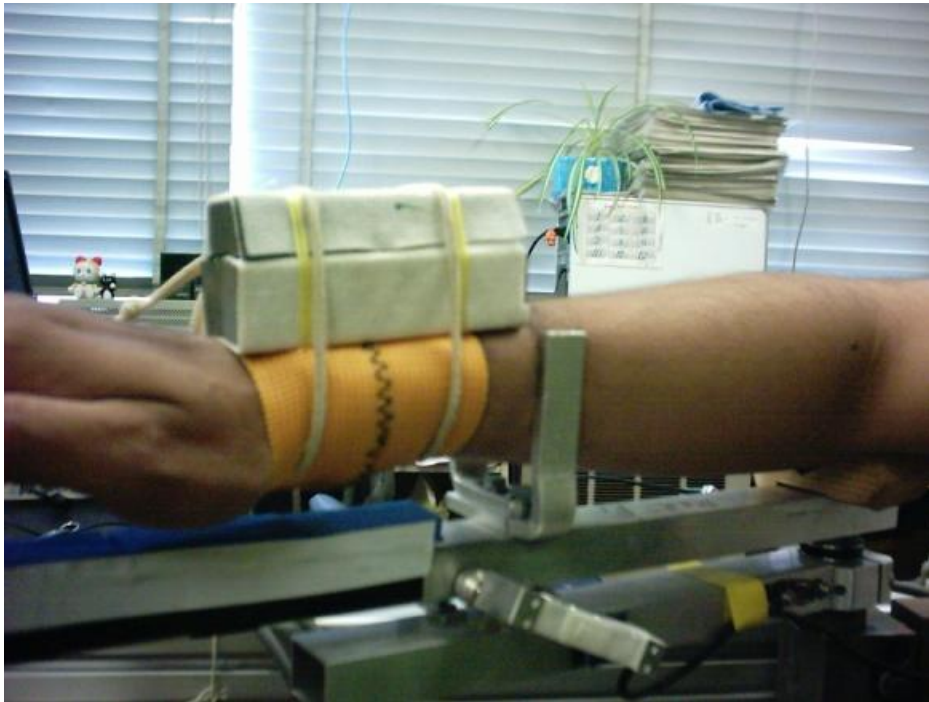


Fig. 3.4 Arm of follower



表1 実験の種類

	負担した重力負荷			
	0kg	0.6kg	0.9kg	1.2kg
遅い実験	実験(1)	実験(2)	実験(3)	実験(4)
速い実験	実験(5)	実験(6)	実験(7)	実験(8)

## 3. 2 実験結果

図3.5に重力負荷がない場合の実験結果を示す．第2.3節で示すように，重力負荷がない場合の実験方法は重力負荷がある場合の方法とほぼ同じであるが，フォロアーの被験者の前腕をアームロードの上に置いて，筋肉を弛緩していたままで，前腕をリーダーの被験者に動かされる．図3.5で角度－トルク線図に示すように，角度がゼロから0.2Nmまで急激に増加し，それ以降は一定の傾きで増加していることが分かる．従って，0.2Nmが摩擦トルクで，それ以降，ばね特性が存在していると考えられる．また，粘性は存在していないことは先行研究で分かっている．

次に，重力負荷がある実験 (1) ～ (8) の結果を図 3.6, 図 3.7, 図 3.8, 図 3.9, 図 3.10, 図 3.11, 図 3.12, 図 3.13 に示す．それぞれ，遅い場合と速い場合の 0kg, 0.6kg, 0.9kg, 1.2kg のおもりの実験結果である．各図とも上から時間に対する速度，角度，トルク及び，角度－トルク線図を示す．おもりがある場合のフォロアーのトルク-角度曲線図はおもりがない場合のフォロアーのトルク-角度曲線図 3.5 と比較して，角度が増してもトルクは一定となっている．つまり，おもりをのせると，腕のばねの特性が消失することが分かった．また，各図の角度－トルク曲線を比較すると，おもりを変わっても摩擦トルクに相当するトルク 0.2Nm はほぼ変わらず，おもりの影響はあまりないといえる．

図 3.6 と図 3.13 を例として遅い動作の場合と速い動作の場合のフォロアーの特性を比較する．図 3.6 と図 3.13 の角度－トルク線図に示すように，速い場合も遅い場合も角度がゼロから増えるに従いトルクが大きくなり，トルクが 0.2Nm からほぼ一定となっていることが分かる．このトルク 0.2Nm は粘性か摩擦トルクであることが予想されるが，速度が変わってもこのトルクは変わらないことから，粘性は存在せず，ほぼ摩擦トルクであることが分かる．

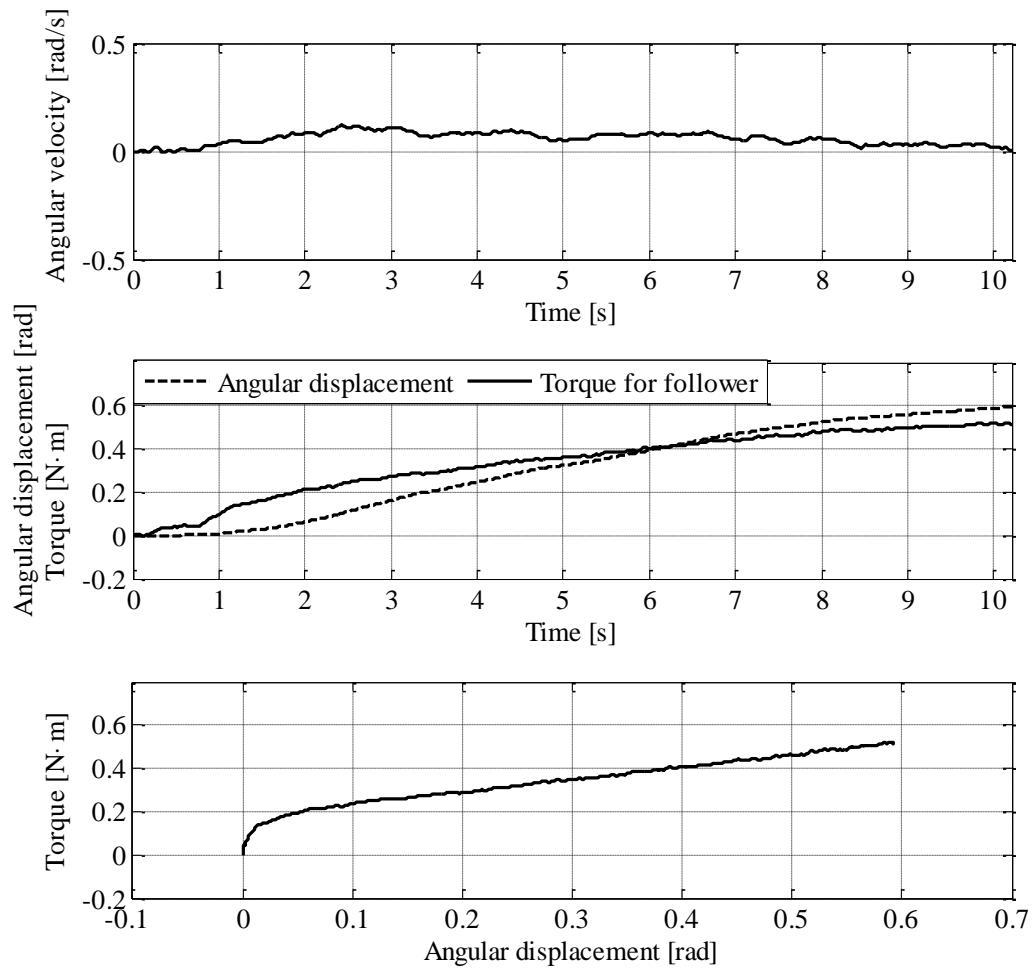


Fig. 3.5 Torque characteristics in no load

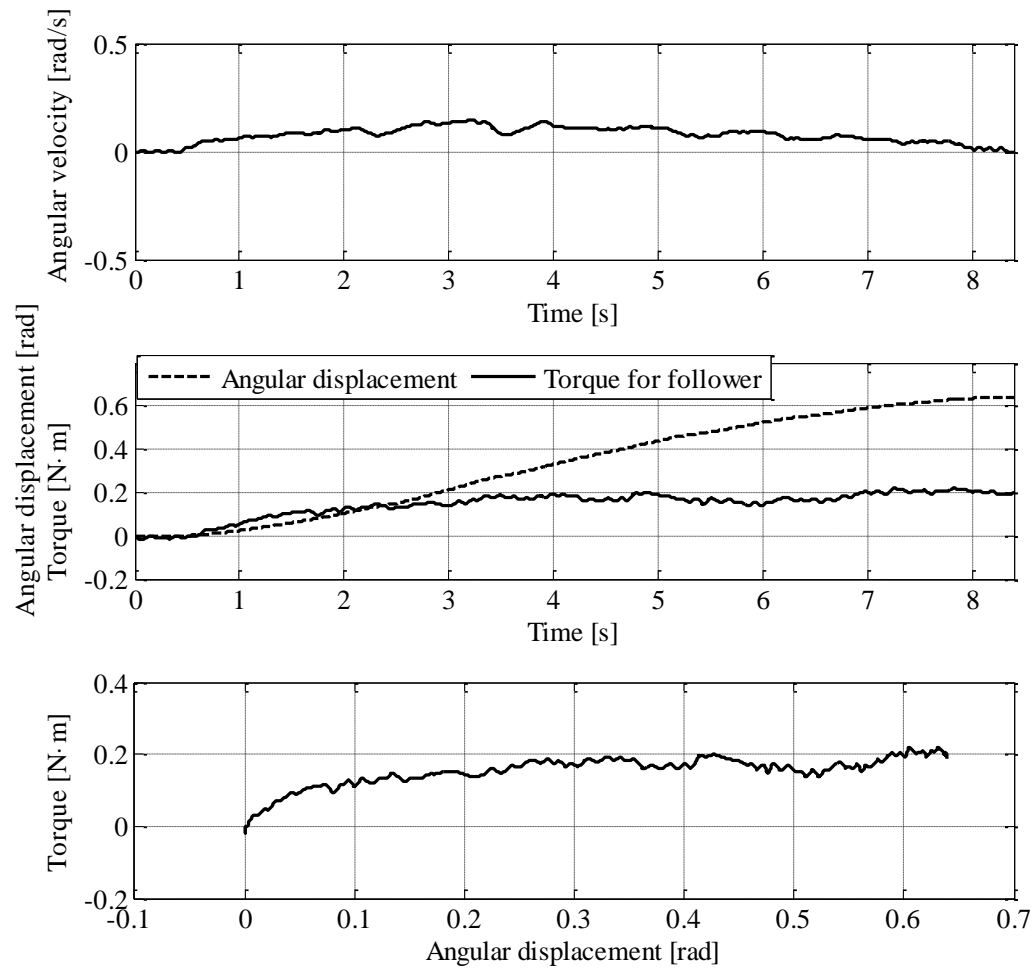


Fig. 3.6 Torque characteristics of experiment (1) (load 0kg, slow motion)

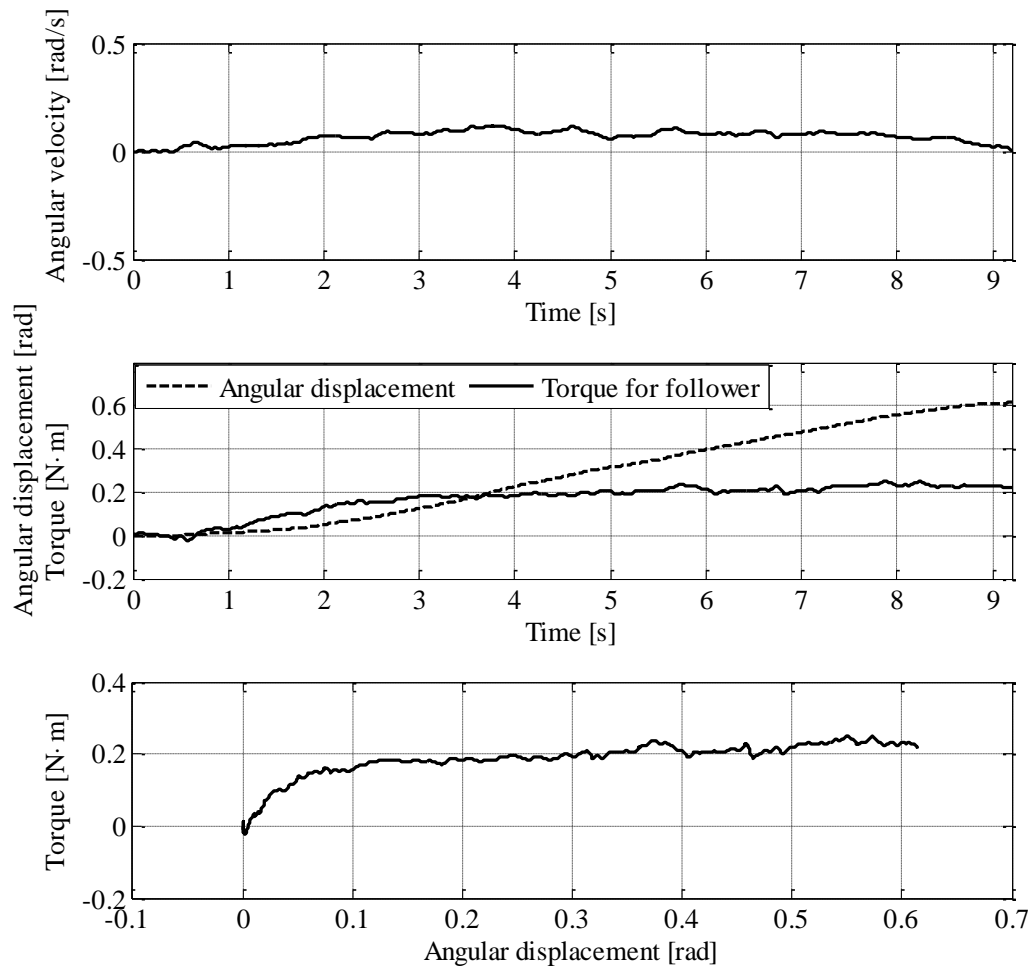


Fig. 3.7 Torque characteristics of experiment (2) (load 0.6kg, slow motion)

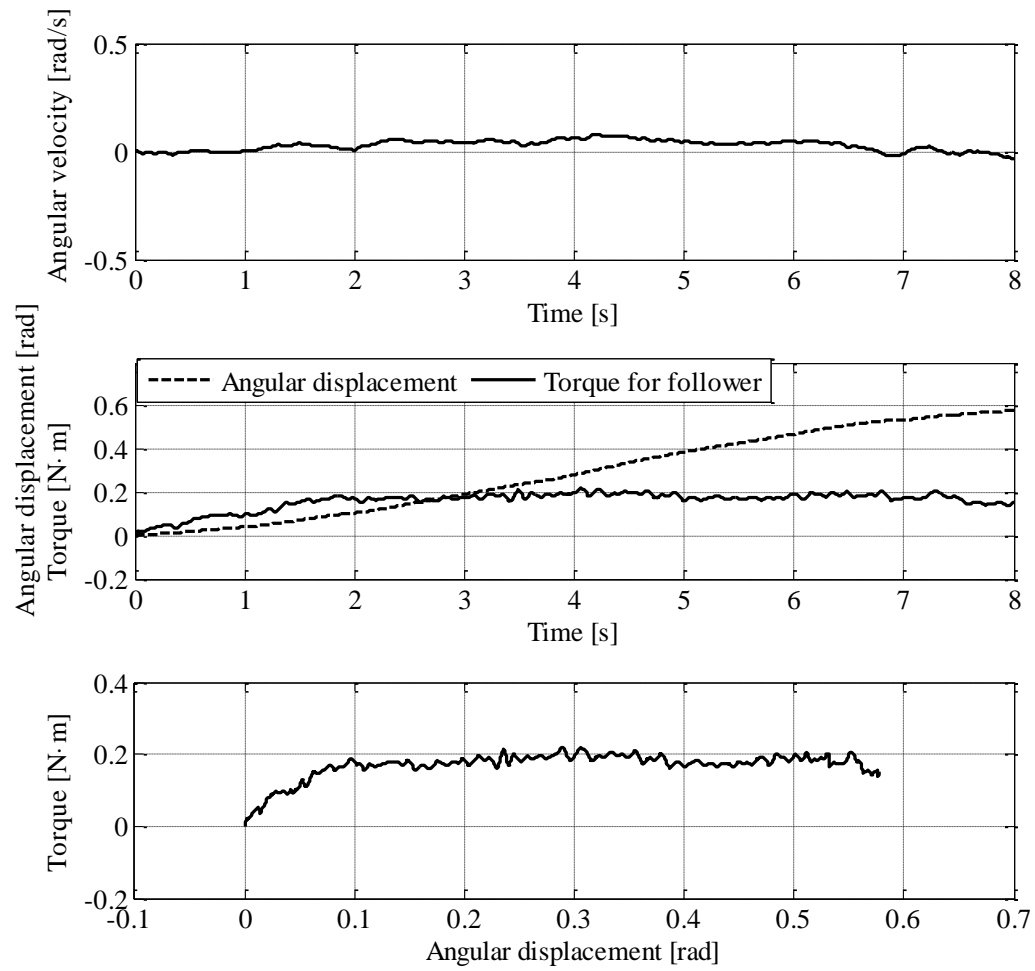


Fig. 3.8 Torque characteristics of experiment (3) (load 0.9kg, slow motion)

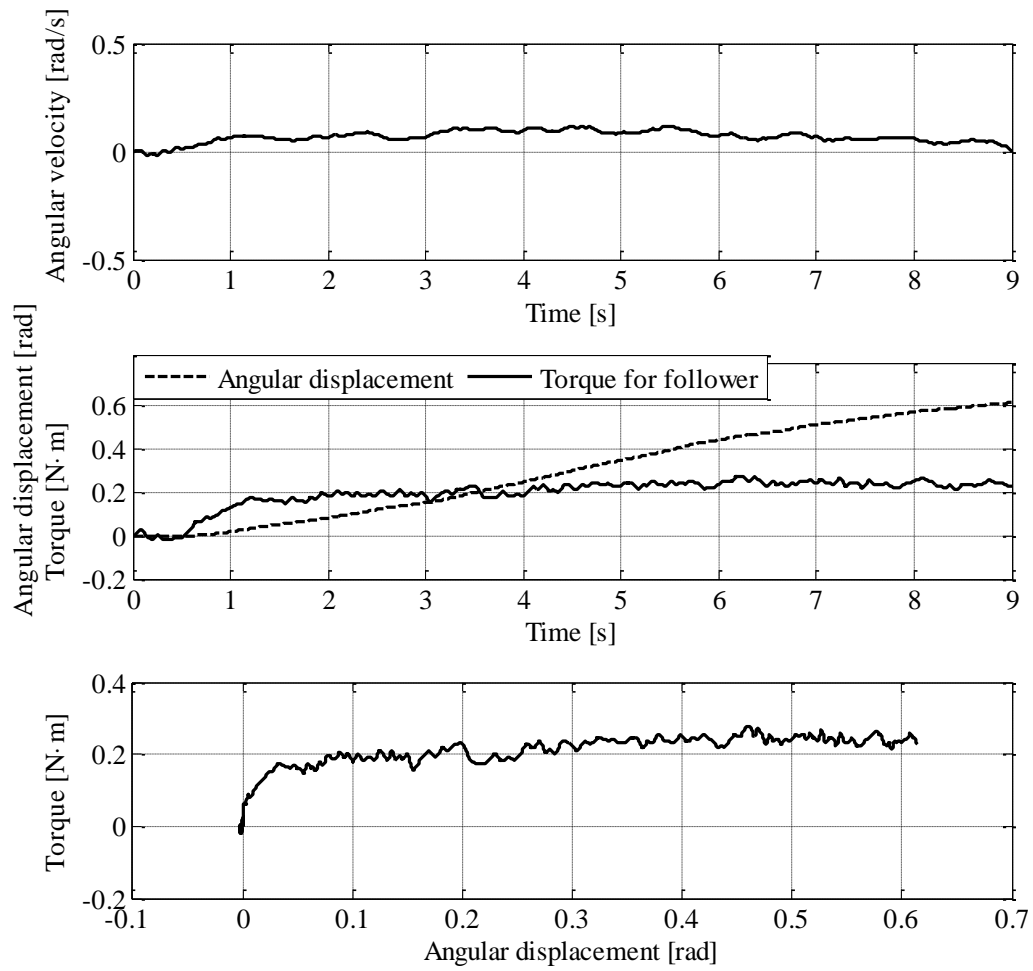


Fig.3.9 Torque characteristics of experiment (4) (load 1.2kg, slow motion)

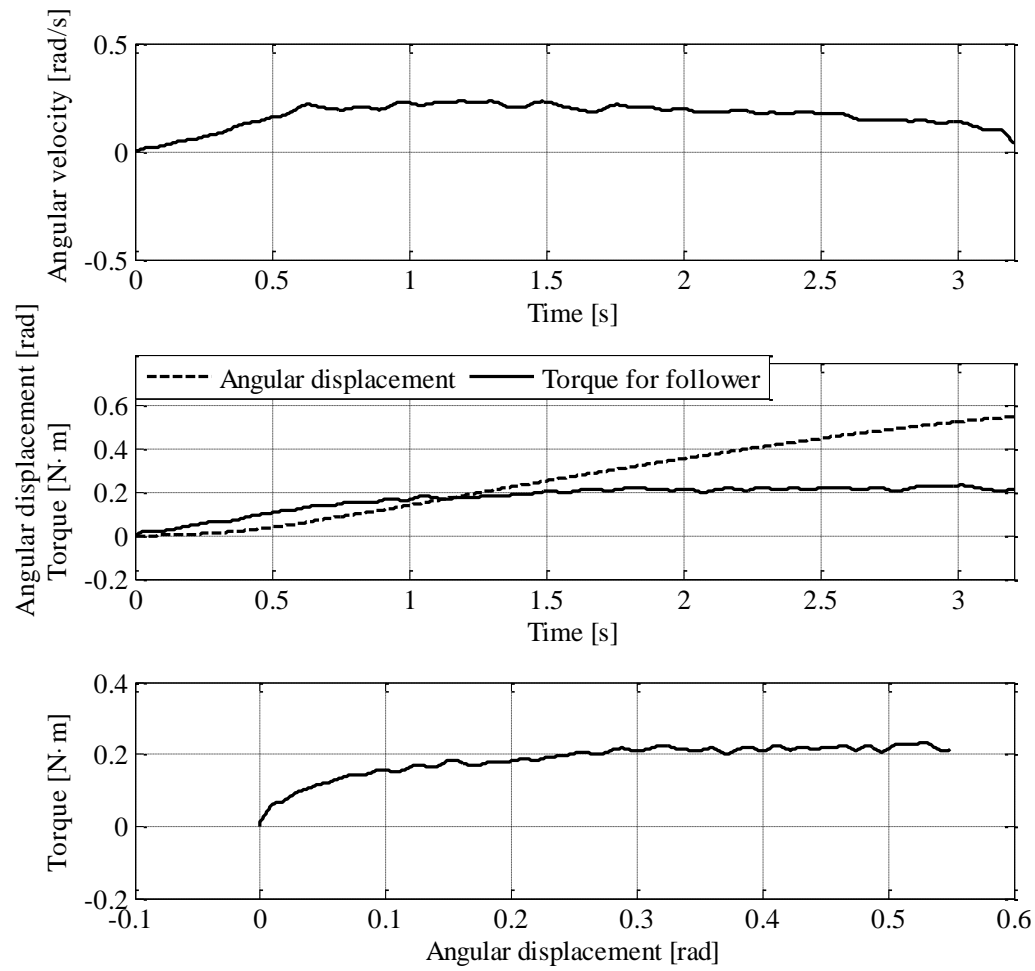


Fig.3.10 Torque characteristics of experiment (5) (load 0kg, quick motion)



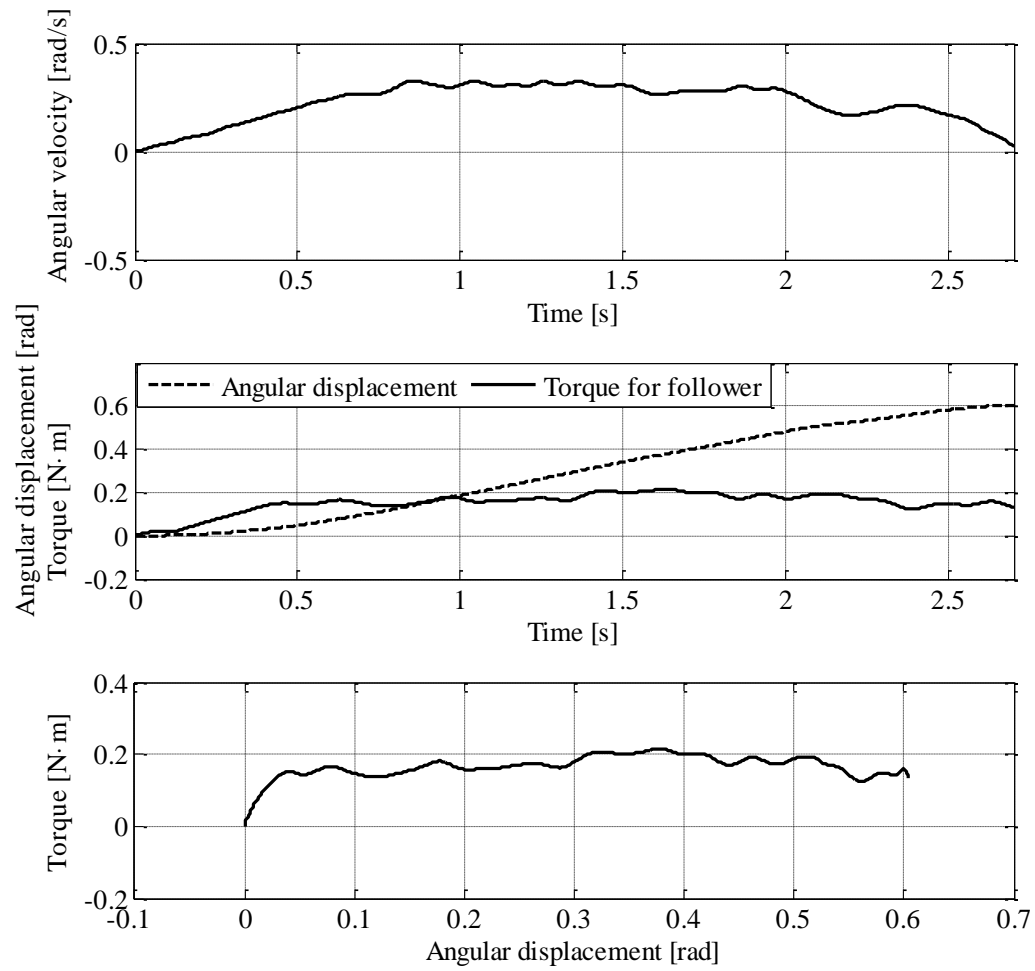


Fig.3.11 Torque characteristics of experiment (6) (load 0.6kg, quick motion)

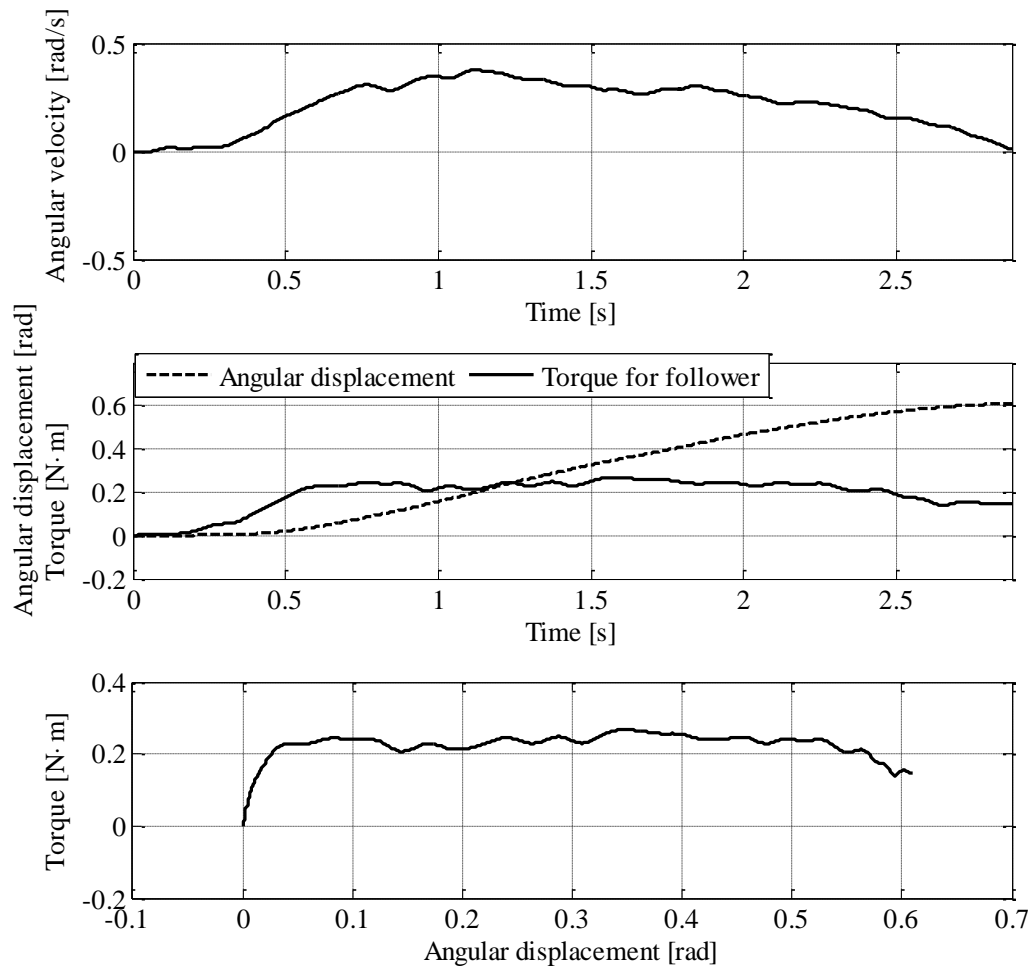


Fig.3.12 Torque characteristics of experiment (7) (load 0.9kg, quick motion)

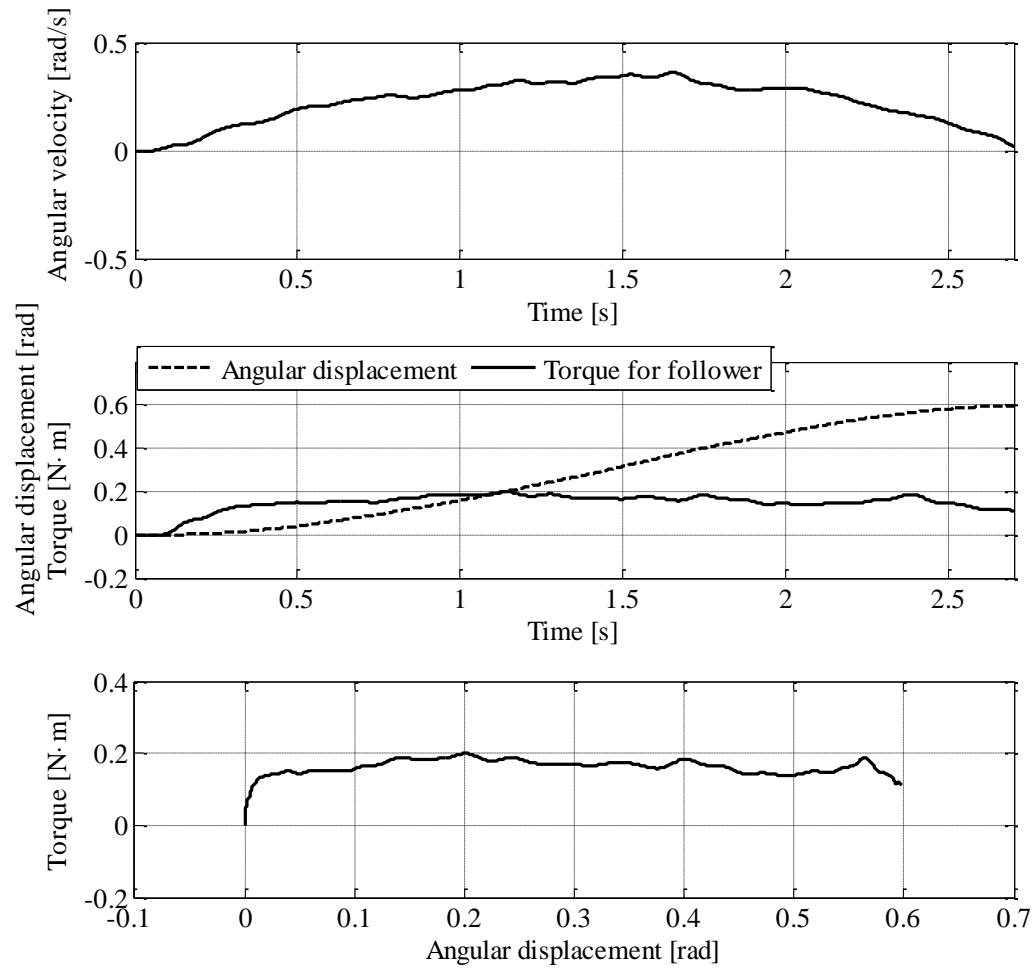


Fig.3.13 Torque characteristics of experiment (8) (load 1.2kg, quick motion)

### 3. 3 まとめ

本章では，人間の腕の筋骨格構造を検討した上で，人間どうしの腕の回転1自由度協調運動モデルに基づいて，一般的共同作業に近付ける重力負荷がある場合に，重力負荷と垂直方向に回転する場合の協調運動の解析を行った．重力負荷がない場合の人間の腕の特性と比較すると，粘性と摩擦の特性は変わらないが弾性はなくなることが分かった．また，この場合にフォロアーの腕の特性はおもりの重さと関係がないことも分かった．

## 第4章 重力負荷が運動方向と同じ 場合の協調運動解析

---

図4.1に示すように、本章では一般的共同作業に近付けるため、重力負荷を持ち上げる場合の協調運動解析を行う。この実験には、物体の運動方向が物体の重力方向と同じである。つまり、物体は重力方向に動かす。

### 4. 1 回転方向に一定負荷が作用する場合の実験装置と実験モデル

図4.2は実験装置の写真である。図4.3に実験装置の概要を示す。第2章で紹介した重力負荷がない場合の実験装置のアームロード回転軸下端に軽量のプーリを設け、これに巻きつけたワイヤーで負荷錘を釣り上げる。プーリの半径は0.06mで、本実験では1.35kgと0.66kgの負荷錘を使用することから、アームロードの回転方向に約0.8N・mと0.4N・mの重力負荷をかけることができる。そして、両被験者のトルクが、この一定の負荷トルクを超えた時、回転動作を行うこととなる。第2章と同じように、本システムに於ける実験装置の慣性モーメント(kg・m<sup>2</sup>)を $I$ 、回転角加速度(rad/s<sup>2</sup>)を $\ddot{\theta}$ 、負荷錘の質量(kg)を $m$ 、プーリの半径(m)を $R$ 、両被験者の腕の発生するトルク(N・m)を $\tau_a$ 及び $\tau_b$ とする。また、負荷錘を持ち上げる時、負荷錘の直線加速度(m/s<sup>2</sup>)を $a$ とすると、重力負荷がある場合の運動方程式は $I\ddot{\theta} + (mg + ma)R = \tau_a + \tau_b$ で示される。加速度 $a = \ddot{\theta}R$ であるので、この場合の運動方程式は以下の式で示される。

$$I\ddot{\theta} + (mg + m\ddot{\theta}R)R = \tau_a + \tau_b \quad (4-1)$$

式(4-1)は $(I\ddot{\theta} + m\ddot{\theta}R^2) + mgR = \tau_a + \tau_b$ となれる．本研究で装置の慣性モーメント $I$ は $0.02\text{kg}\cdot\text{m}^2$ である．初期の加速時と最後の停止時に最大加速度があらわれ，その回転角加速度 $\ddot{\theta}$ の最大値は $0.03\text{rad/s}^2$ である． $I\ddot{\theta}$ の最大値は約 $0.6 \times 10^{-3}\text{N}\cdot\text{m}$ である．また，プーリの半径は $0.06\text{m}$ で，本実験では $1.35\text{kg}$ と $0.66\text{kg}$ の負荷錘を使用することから， $m\ddot{\theta}R^2$ の最大値は約 $1.5 \times 10^{-4}\text{N}\cdot\text{m}$ と $0.7 \times 10^{-4}\text{N}\cdot\text{m}$ である．これで， $(I\ddot{\theta} + m\ddot{\theta}R^2)$ の最大値は約 $7.5 \times 10^{-4}\text{N}\cdot\text{m}$ と $6.7 \times 10^{-4}\text{N}\cdot\text{m}$ である．それを加わる負荷錘のトルク $mgR$ の $0.8\text{N}\cdot\text{m}$ と $0.4\text{N}\cdot\text{m}$ と比較すると $(I\ddot{\theta} + m\ddot{\theta}R^2)$ は無視できるので，本実験では両被験者は負荷錘のトルクのみを負担していると見てよい．従って式(4-1)は以下の式(4-2)と近似できる．

$$mgR = \tau_a + \tau_b \quad (4-2)$$

負荷に対する分配係数 $\alpha$ を導入すると， $\tau_a$ と $\tau_b$ はそれぞれ，

$$\tau_a = \alpha(mgR) + \tau_{int} \quad (4-3)$$

$$\tau_b = (1 - \alpha)(mgR) - \tau_{int} \quad (4-4)$$

と示される．ここで， $\tau_{int}$ は被験者の間で発生する内部トルク( $\text{N}\cdot\text{m}$ )である．

式(2-2)と(2-3)に示すように，慣性負荷のみがある場合の実験で，負荷の分配対象は慣性力であった．加速度が小さくなると，この負荷は出ないので， $\alpha$ を解析するのは非常に難しかった．本章で重力負荷をすると， $mgR$ は常に一定にかかる．ゆっくり動いても負荷が出るので， $\alpha$ を解析するのは慣性負荷のみがある場合より分かりやすくなる．

運動中に2人の被験者はリーダー或いはフォロアーの役割を行う<sup>[23]</sup>．協調運動中一人の被験者は，ディスプレイ上の目標である四角印に追従して能動的に前腕を動かす者でリーダーと呼ぶ．他の一人も目標は見ているが，腕は弛緩状態で，力を自発的に出して腕を動かす事は行わない．この受動的役割を行う被験者をフォロアーと呼ぶ．

$\alpha \neq 1$ の場合にはリーダーとリーダーの協調運動と考えられる． $\alpha = 1$ の場合にはリーダーとフォロアーの協調運動と考えられる．それぞれのトルクは以下の式(4-5)，(4-6)のようになる．

$$\tau_a = mgR + \tau_{int} \quad (4-5)$$

$$\tau_b = -\tau_{in} \quad (4-6)$$

右利きの健康な6人の被験者で実験を行った。そのうちわけは、21歳、22歳、25歳、30歳、41歳の男性が5人、40歳の女性が一人である。その一人を被験者1として、残り5人が被験者2となり、二人一組で実験を行う。実験の前に、彼らに実験について詳しく説明し、実験装置になれるため十分なトレーニングをした。

5組の被験者にて実験データを収集して、パラメータ解析を行い、共通の特徴が分かった。以下に代表する1組の被験者の実験結果を示す。

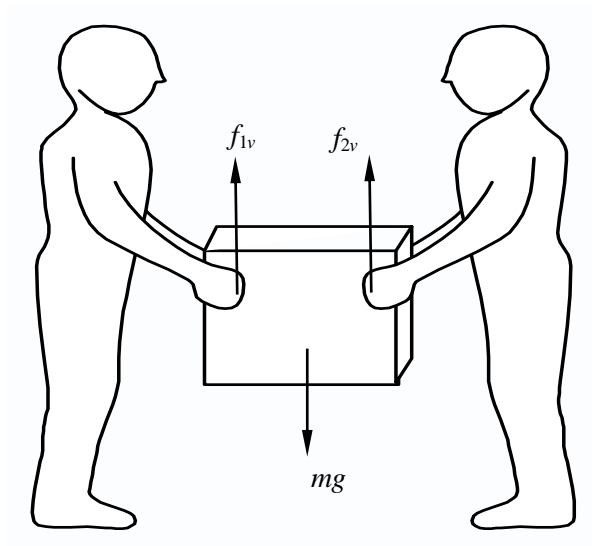


Fig. 4.1 Human-Human cooperative task



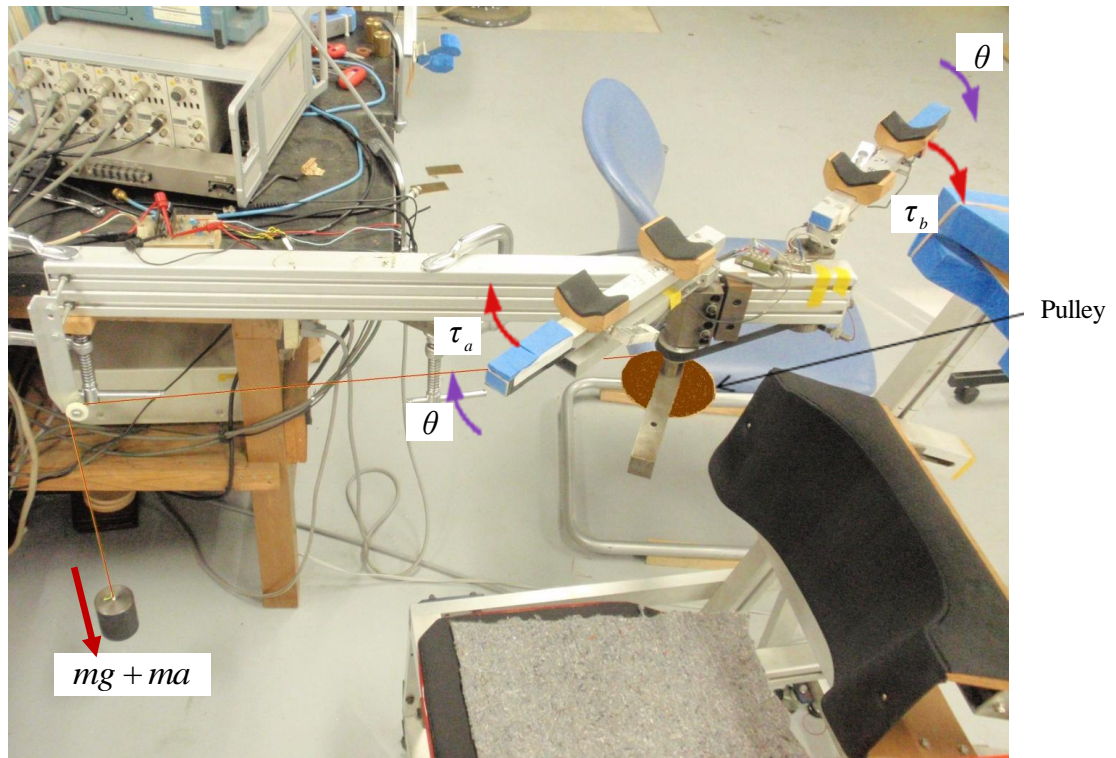


Fig.4.2 Top view of the experimental system

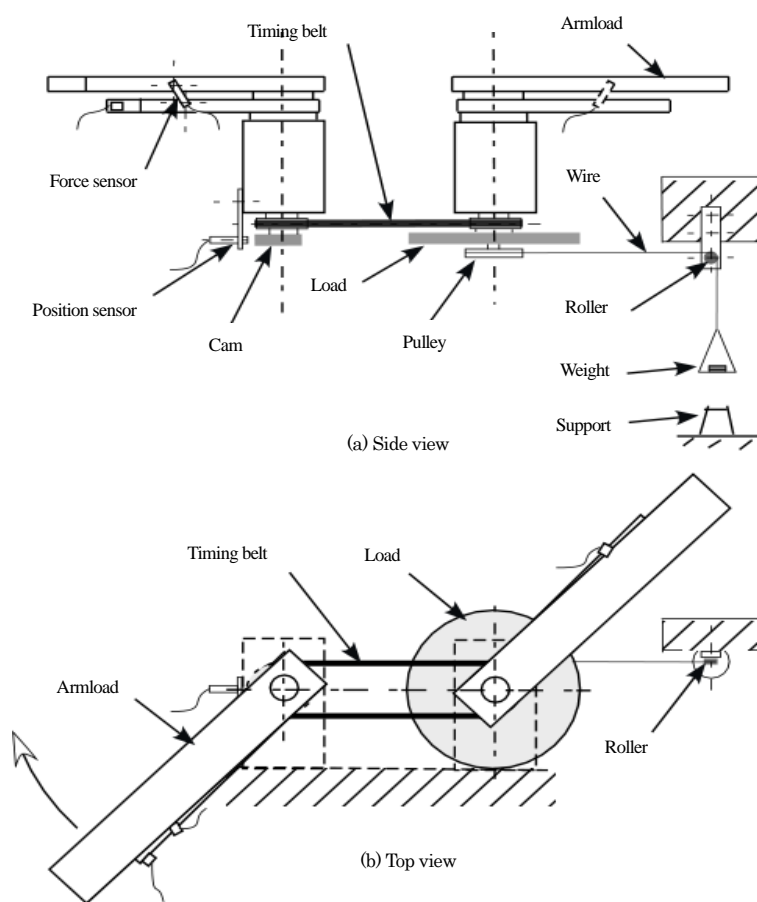


Fig.4.3 Configuration of the experimental system

## 4. 2 二人が弛緩状態からリーダーとフォロアーとなる実験と結果

二人の被験者は右腕をそれぞれのアームロードにのせる。肘を前腕の回転中心に置き、アームロードと同軸を保つ。二人の座り方を調節しディスプレイ上の始点を合わせる。負荷錘を上げる運動とアームロードの回転運動とを同時に開始するために負荷錘下の台の高さを調整する。回転開始までは、二人の被験者の腕は共に弛緩状態で、負荷錘持上げのためのトルクは負担していない。これを初期状態とし、被験者は回転運動を開始する。回転中、被験者2はディスプレイ上に表示される目標の四角印を見て前腕を動かし、リーダーとして回転運動を行う。被験者1はディスプレイ上に表示される目標の四角印を見ているが、腕は弛緩状態したままで、フォロアーとして力を出さない。両被験者とも回転運動中に姿勢は崩れないように一定の姿勢をとる。運動の最大回転角度は約 $0.7\text{rad}$ であり、左から右への片方向の回転運動のデータを収集する。

被験者1が終始フォロアーである場合の負荷錘を持ち上げる実験結果を図4.4に示す。この図は、縦軸はトルク $[\text{N}\cdot\text{m}]$ を表し、横軸は角度 $[\text{rad}]$ を表す。この実験の被験者1（フォロアー）は負荷を分担しないので、被験者2の特性を除けば、この結果は負荷がない実験に於ける同一条件の実験のフォロアーの特性<sup>[45]-[47]</sup>と差異はなく、摩擦特性（図4.4中に示す幅 $H$ が摩擦の大きさである）が存在する。また、約 $0.03\text{rad}$ 回転後から回転終了まで一定勾配で変化し、この間は線形ばね特性を示す。つまり、インピーダンス要素とした弾性係数はほぼ一定であり、ばね定数と見なす事が出来る。被験者2は負荷と被験者1の腕の復元力を負担し、被験者1のばね定数で一定の傾きに沿ってトルクが増加する。

次に、4.3節でリーダーとリーダーの人間の腕の特性について調べる。

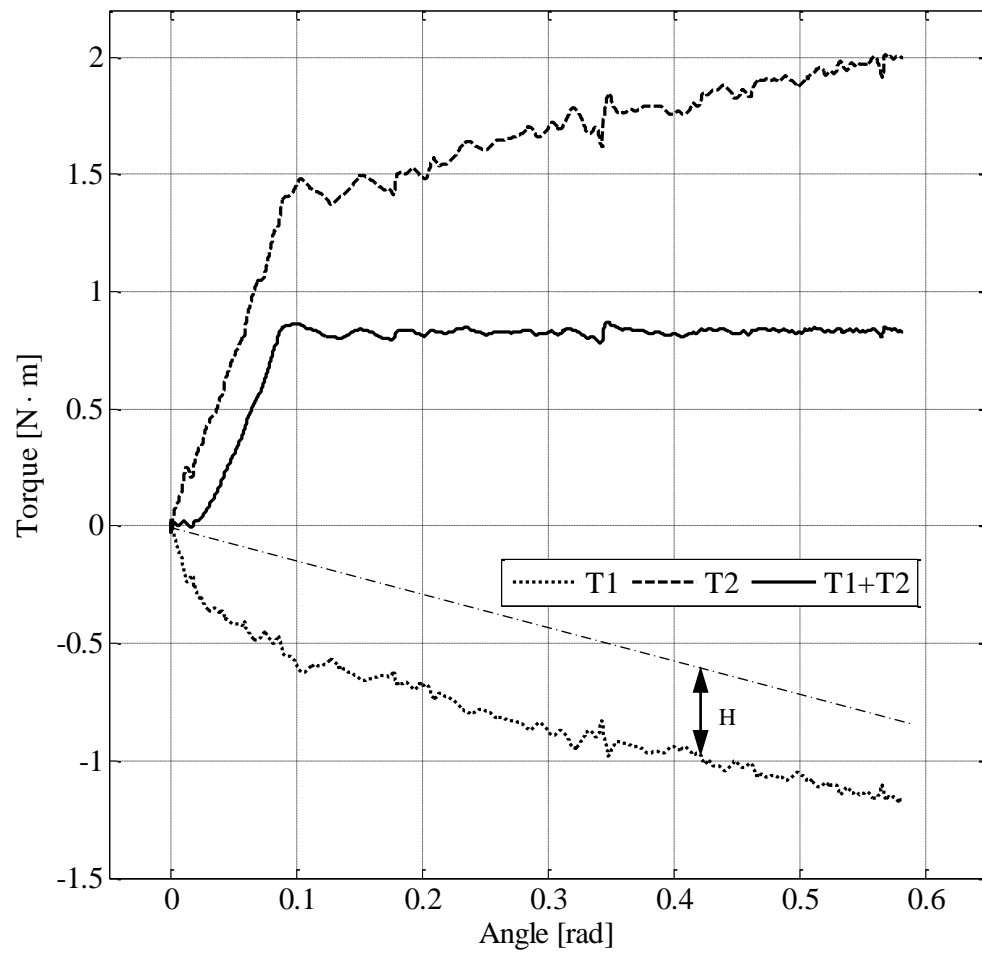


Fig.4.4 Torque characteristics of follower

## 4. 3 二人が弛緩状態からリーダーとリーダーで動き出す実験と結果

本節の実験方法は4.2節で示した実験方法とほぼ同様である。ただ、二人ともディスプレイ上に表示される目標の四角印を見て前腕を動かし、回転運動を行う。両被験者は回転運動中に姿勢は崩れないように一定の姿勢をとる。運動の最大回転角度は約 $0.7\text{rad}$ であり、左から右への片方向の回転運動のデータを収集する。

図4.5に二人が弛緩状態からリーダーとリーダーで動き出す実験の結果を示す。上の図は、縦軸が角度 $[\text{rad}]$ 及びトルク $[\text{N}\cdot\text{m}]$ を表し、横軸は時間 $[\text{s}]$ を表す。下の図は、縦軸がトルク $[\text{N}\cdot\text{m}]$ を表し、横軸は角度 $[\text{rad}]$ を表す。図中のT1とT2は被験者1と被験者2の腕のトルクを表す。またT1+T2は被験者1と被験者2の腕のトルクの和を表す。この実験では、弛緩状態であった被験者が回転運動を始めるが、その直後から、両者のトルクの増加が始まり、ある一定値に達するまで変化する（A-B点間の期間）。このトルクが変化する期間を遷移期間と呼ぶ。更に、遷移期間を過ぎ、トルクがある値に達しても回転は続くが、両者のトルクは依然一定値を維持する（B-C点間の期間）。この期間を定常期間、定常期間のトルクを定常トルクと呼ぶ。このように回転一自由度回転運動に於いては回転運動の全期間で不安定なトルク変動をすることなく、前述したようなトルクが互いに変化する遷移期間と、一定値を保つ定常期間に分かれることが分かった。

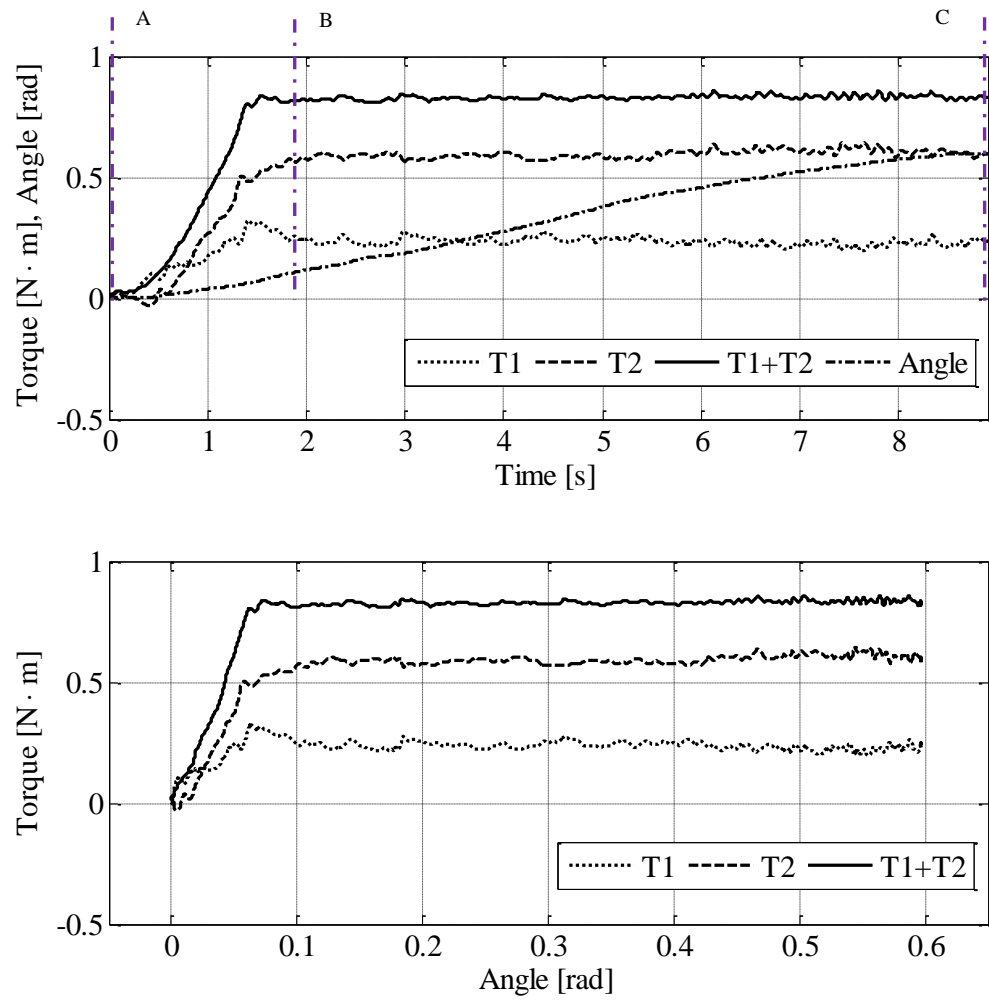


Fig.4.5 Experimental result of leader and leader

## 4. 4 一人が一定角回転後にリーダーに変わる実験と結果

4.3節のリーダーとリーダーの実験から、定常期間の存在を確認した。しかし、両被験者の定常トルクを決定する要因やその過程は不明である。結果的に生じた両被験者の定常トルクの差が出た理由を一元的に扱って良いか否かも不明であるが、本節ではその手掛りとして両者の運動開始時間に差があった場合を想定して、一方が一定の角度を回転した後にフォロアーからリーダーに変わる実験を行う。

本節の実験方法は運動開始直後の被験者1はフォロアーであり、一定の角度を回転した後にリーダーに変わる、このことを除けば、4.2節で示した実験方法と同様である。ここでも被験者2は全期間中リーダーである。被験者1がリーダーに変わる前のフォロアーの期間をフォロアー期間、そのフォロアー期間で回転した角度をフォロアー角度と呼ぶ。本実験では、フォロアー角度を0.15rad, 0.2rad, 0.25rad, 0.3rad, 0.35rad, 0.4rad, 0.45rad, 0.5rad として8種類の実験を行った。

本実験で、開始直後の被験者1は重力負荷を負わないフォロアー期間であり、一定の角度（本図中では0.2rad, 0.3rad, 0.4radと設定）を回転した後、リーダーに変わる。図4.6に示すように、被験者1が発生するトルクは、フォロアーからリーダーに変わる直前のフォロアー期間トルクを継続し、その後もそのトルクを維持していくことが分かる。このことは異なったフォロアー角度A, B, C各点のそれぞれの場合に於いて再現できている。更に、同一実験方法で、8種類のフォロアー角度について実験し、得られた定常トルクを図4.7と図4.8に示す。この時の負荷錘は1.35kgである。両図とも、縦軸はトルク[N·m]を表し、横軸はフォロアー角度[rad]を表す。図4.7中の△印と○印は両被験者がリーダーに変わる前に回転した角度0.15rad, 0.2rad, 0.25rad, 0.3rad, 0.35rad, 0.4rad, 0.45rad, 0.5radで計測した定常トルクの平均値である。平均値の上下の棒はそれぞれの標準偏差である。図4.8中の△印と○印は8種類の両被験者の定常トルクの平均値である。二本の直線はその平均値をもとに最小二乗法により求めた結果である。この8種類の実験結果においても、フォロアーからリーダーに変わった後、二人の被験者の腕のトルクは一定になることが分かった。また、最小二乗法で導出した直線の勾配は、被験者1が全期間フォロアーであった場合のトルク変化の勾配と殆ど一致している。これは、被験者1が受動的状態から能動的になる場合、その直前の受動時には、自らの腕のインピーダンスによる復元トルクが生じていて、能動的になった被験者はそのまま以前のトルクを維持していることが確認できる。

図4.9と図4.10に負荷錘0.66kgが加わる場合の実験結果を示す. これを図4.7と図4.8の1.35kgの場合と比較すると, 被験者1が全期間フォロアーの場合, 被験者2の荷重負担に大きな違いがあっても, 負荷を分担しない被験者1のトルク変化には殆ど影響がない. この方法の実験では, 被験者2の負担状態に関わらず, 被験者1の特性は変化しないことが分かる. またこの実験で, 被験者1がフォロアー期間の後, リーダーになったとしても, 前に述べた理由により, そのトルクの経過は変わらないことが推測できる.

4.4節では一人が一定角回転後にリーダーに変わる実験を行った. 重力負荷を持ち上げる場合の回転一自由度協調作業する際, 両被験者のトルクは回転全期間に常に変化せず, 回転開始後の遷移期間のみでしか変化しない. 定常期間では両者の腕のトルクは一定値をとる. 一定の角度を回転した後に一人がフォロアーからリーダーに変わると, その直前のフォロアー時のトルクを維持する. また, フォロアーの腕の特性はおもりの重さに関係しないことが分かった.



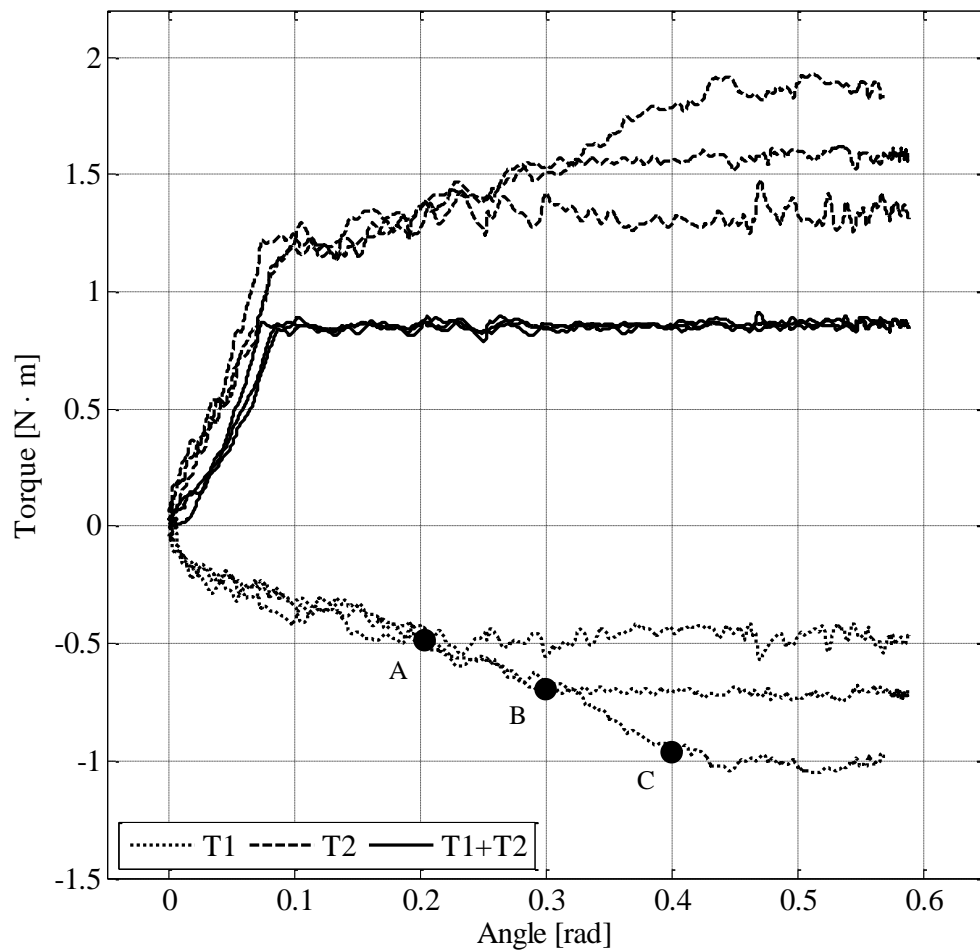


Fig.4.6 Experimental result in changing follower to leader

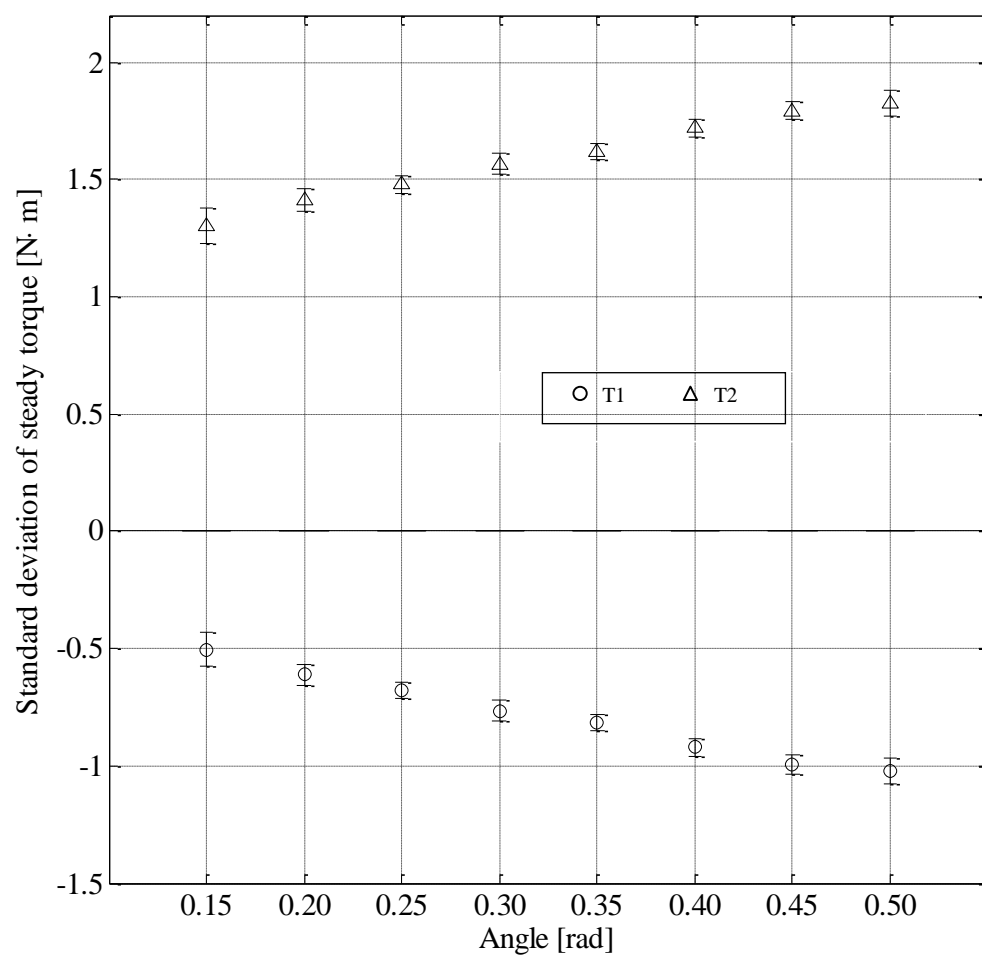


Fig.4.7 Statistic analysis of steady torque (1.35kg)

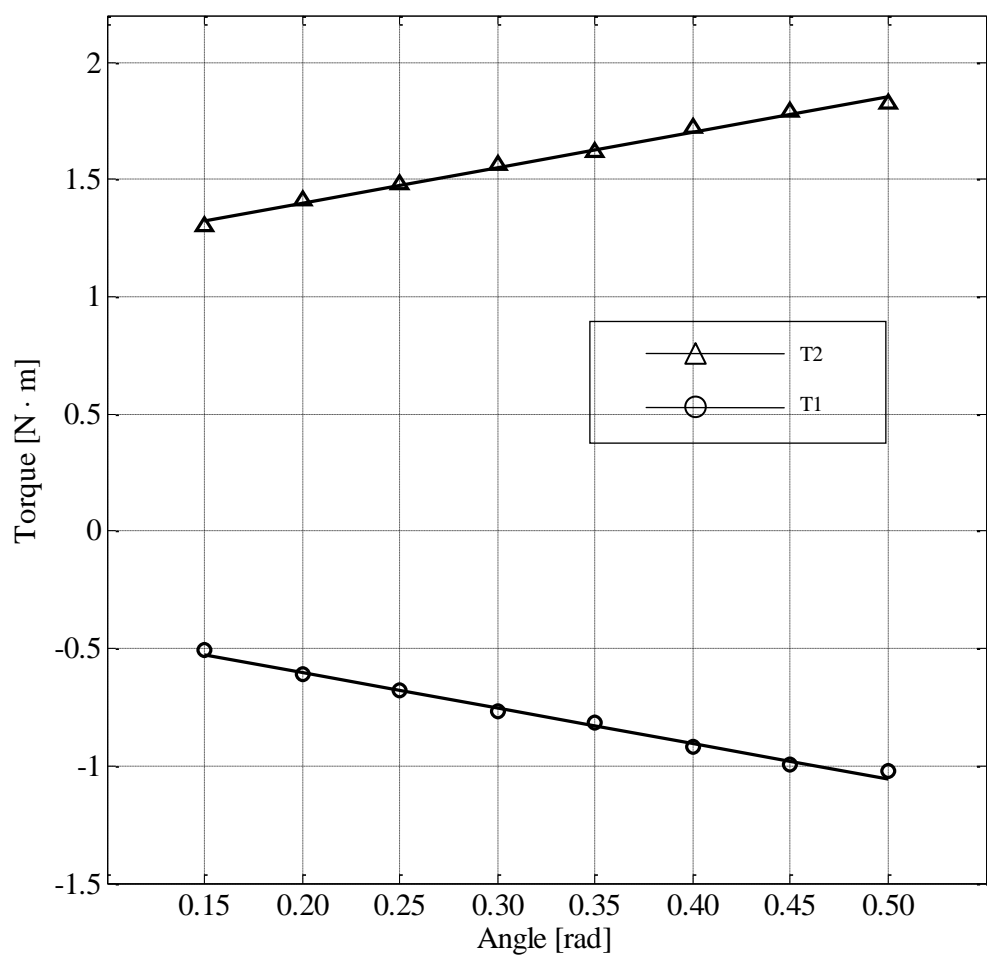


Fig.4.8 Experimental result using least square method (1.35kg)

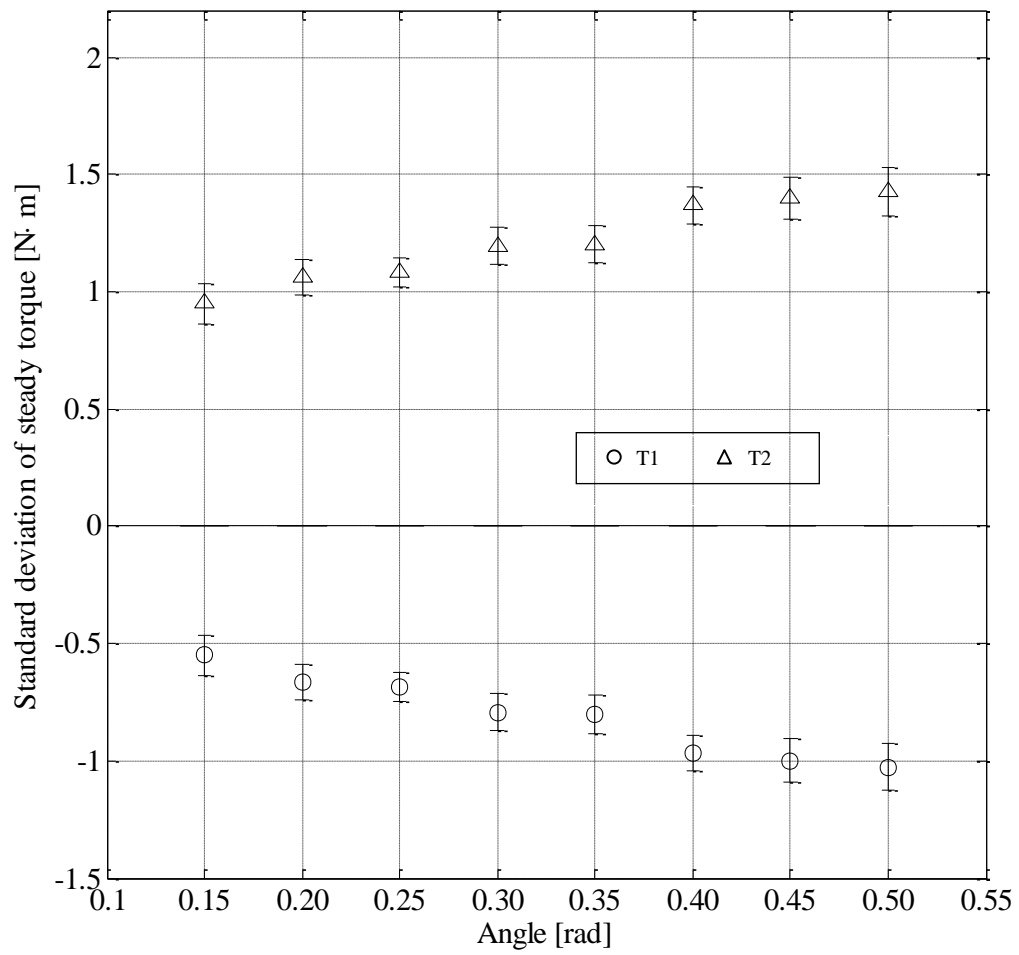


Fig.4.9 Statistic analysis of steady torque (0.66kg)

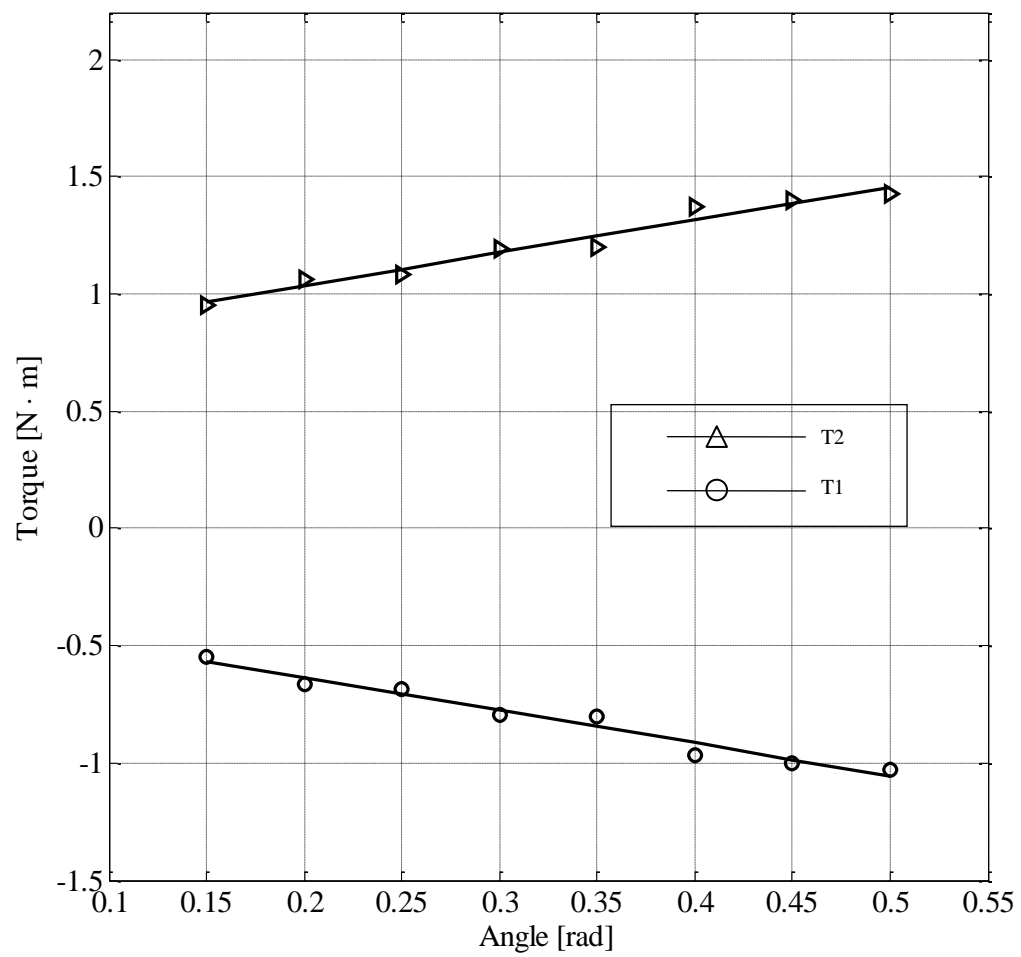


Fig.4.10 Experimental result using least square method (0.66kg)

## 4. 5 両被験者が共にトルクを分担した状態から回転する実験と結果

前の実験では、回転開始時に、二人は負荷錘のトルクを負担せず、筋肉が弛緩した状態から回転動作をした。次に、筋肉の緊張状態から始まる実験と、4.3節の実験の結果を比較するため、次の実験を行うことにした。本実験は回転開始前に、両被験者が一定比で負荷錘のトルクを負担していて、既に筋肉が緊張状態にあり、その状態から回転運動を行う。また、本実験の方法も4.3節の実験と同様である。両被験者の初期状態における分担トルクを表1、及び表2に示す。表1の左から順に実験(1)～実験(5)と呼び、同様に表2についても実験(6)～実験(10)と呼ぶ。

負荷錘1.35kgが加わる場合の実験(1)～実験(5)の実験結果を図4.11～図4.15に示す。負荷錘0.66kgが加わる場合の実験(6)～実験(10)の実験結果を図4.16～図4.20に示す。実験結果より、回転開始後、二人の腕は互いに影響し合い、遷移時間（A-B点間の期間）を経た後、両者のトルクはB-C点間では一定になり、この場合でも定常期間が存在することが分かった。これらの10つの実験においても4.3節で示した結果と同様の傾向がみられた。ただし、遷移期間の長さや定常期間の定常トルクの大きさが実験ごとに異なっている。

実験結果をより普遍的に考察するため、実験(1)～実験(10)の全ての実験の遷移時間と定常トルクについて、それらの平均値と標準偏差を求めた。図4.21に負荷錘1.35kgに於ける遷移時間の平均値、並びに標準偏差を示す。同様に図4.22には負荷錘0.66 kgの場合を示す。図4.21に於いては実験(3)の遷移時間の平均値が最も小さく、標準偏差も小さい。また、この事は図4.22の実験(8)に於いても再現されている。以上のように、二人の被験者が負荷トルクを互いに半分ずつ分担する場合に、最も短い時間でトルクが安定する事が分かる。次に、この2種類の負荷錘における定常トルクの平均値、並びに標準偏差を図4.23、並びに図4.24に示す。ここで、二人で分担した、個々の定常トルクの和は、重りによる一定トルクであるから、被験者1、及び被験者2の両者のこの統計値の特徴は類似するので被験者1の定常トルクの平均値、並びに標準偏差をもって代表した。これを見ると、実験(3)と実験(8)の定常トルクの標準偏差は小さく、このトルクは負荷錘の約二分の一であった。つまり、回転が始まる際に、両被験者が負荷錘の半分のトルクをそれぞれ負担すると、回転終了まで負担したトルクを維持して変わらないことが分かった。その一例を前に示した図4.13にトルクの時系列特

性で説明する。回転開始後、一定トルクになる時間は約0.6sであり、回転開始後の全期間に於いて、負荷錘の二分の一のトルクを安定して維持した事を示している。また、この事は負荷錘0.66kgの場合も同様な結果を実験(8)の図4.18に示したので、負荷錘の大小には関係なく、その二分の一のトルク分担の安定性が確認できた。

また、図4.21と図4.22に示すように、二人が分担したトルクの差値が大きければ大きいほど遷移時間値は大きいことが分かった。逆に、図4.23と図4.24に示すように、安定トルク値は二人が分担したトルクの差値に対して重さによる影響がない、半分のトルクを分担すると、回転終了まで分担したトルクを維持することしか分らない。

4.5節では両被験者が共にトルクを分担した状態から回転する実験を行った。二人が分担したトルクが重りの半分のトルクに近ければ近いほど一定トルクになる時間は短い。回転が始まる際に、両被験者が重りの半分のトルクを分担すると、回転終了まで分担したトルクを維持して、変化しないことが分かった。

表1 実験による被験者負担のトルク[N・m]（負荷錘1.35kgの場合）

	実験(1)	実験(2)	実験(3)	実験(4)	実験(5)
被験者1	0	0.2	0.4	0.6	0.8
被験者2	0.8	0.6	0.4	0.2	0

表2 実験による被験者負担のトルク[N・m]（負荷錘0.66kgの場合）

	実験(6)	実験(7)	実験(8)	実験(9)	実験(10)
被験者1	0	0.1	0.2	0.3	0.4
被験者2	0.4	0.3	0.2	0.1	0



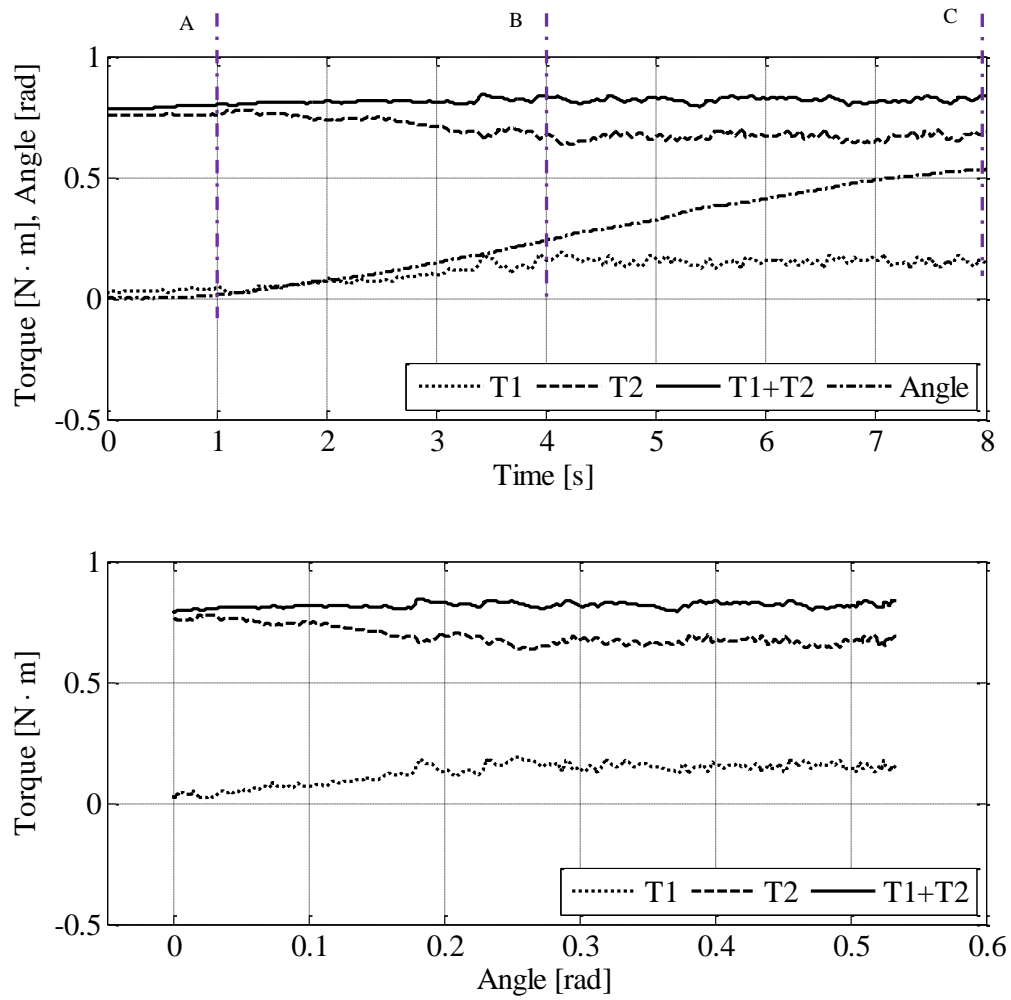


Fig.4.11 Result of experimental (1) (load 1.35kg)

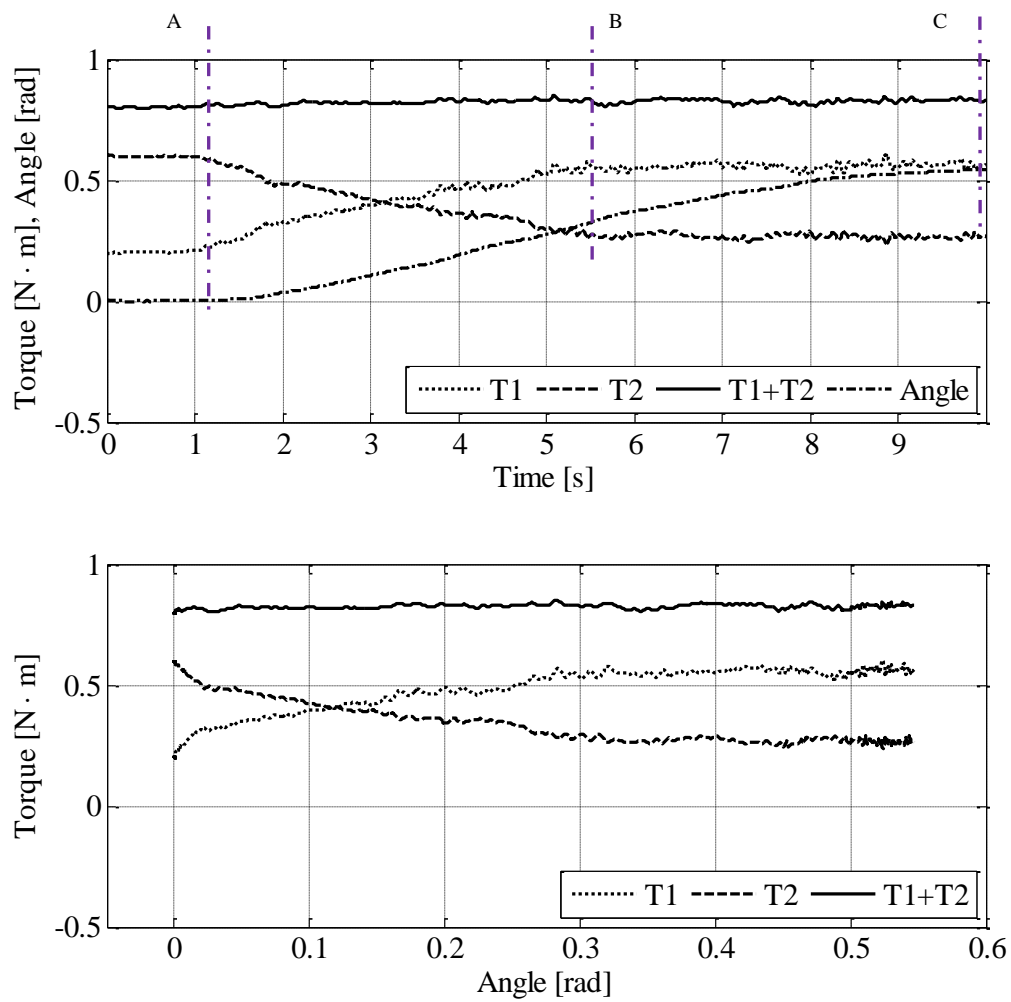


Fig.4.12 Result of experimental (2) (load 1.35kg)

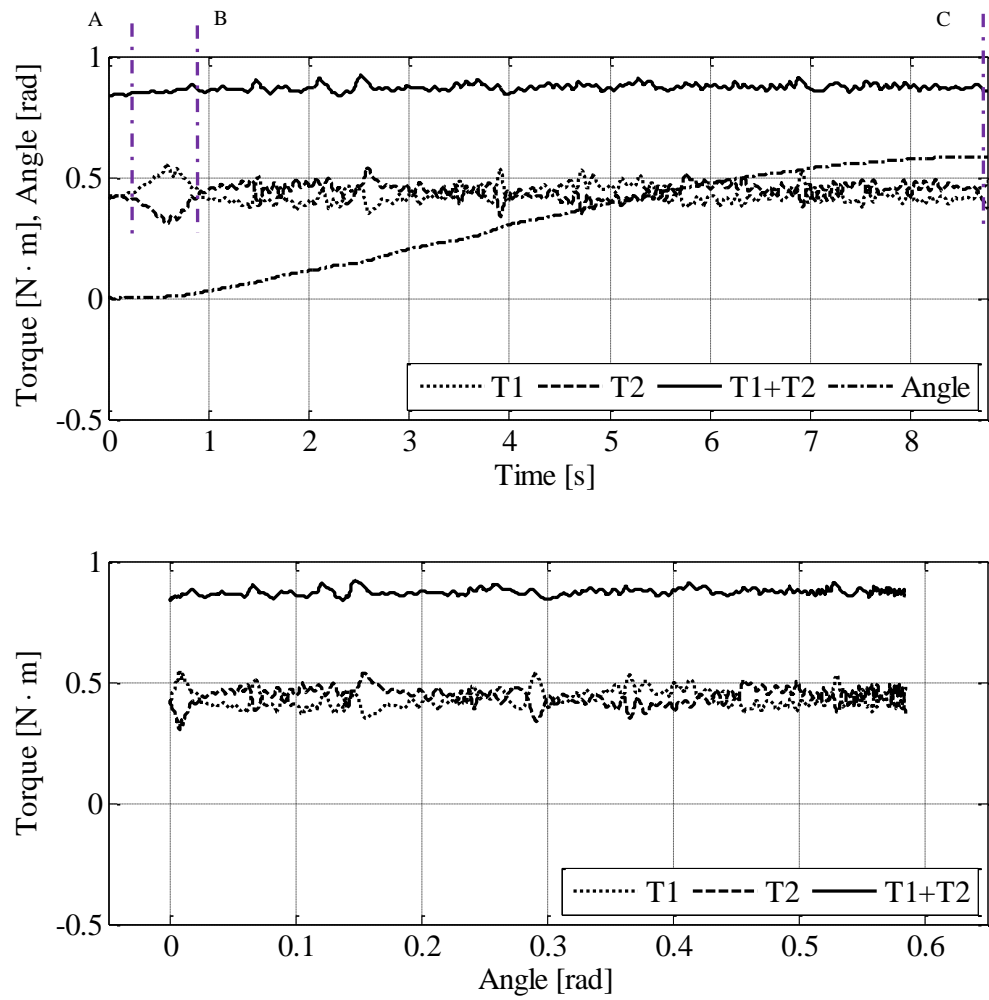


Fig.4.13 Result of experimental (3) (load 1.35kg)

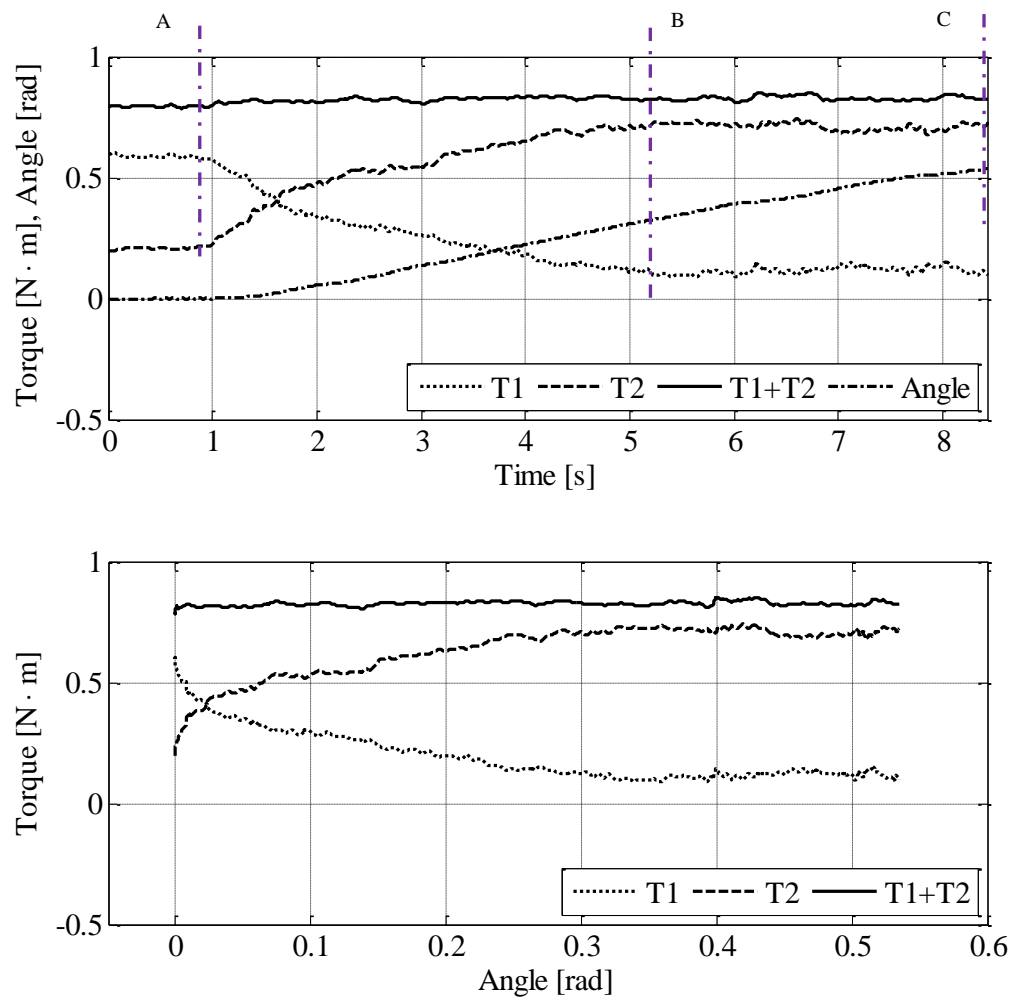


Fig.4.14 Result of experimental (4) (load 1.35kg)

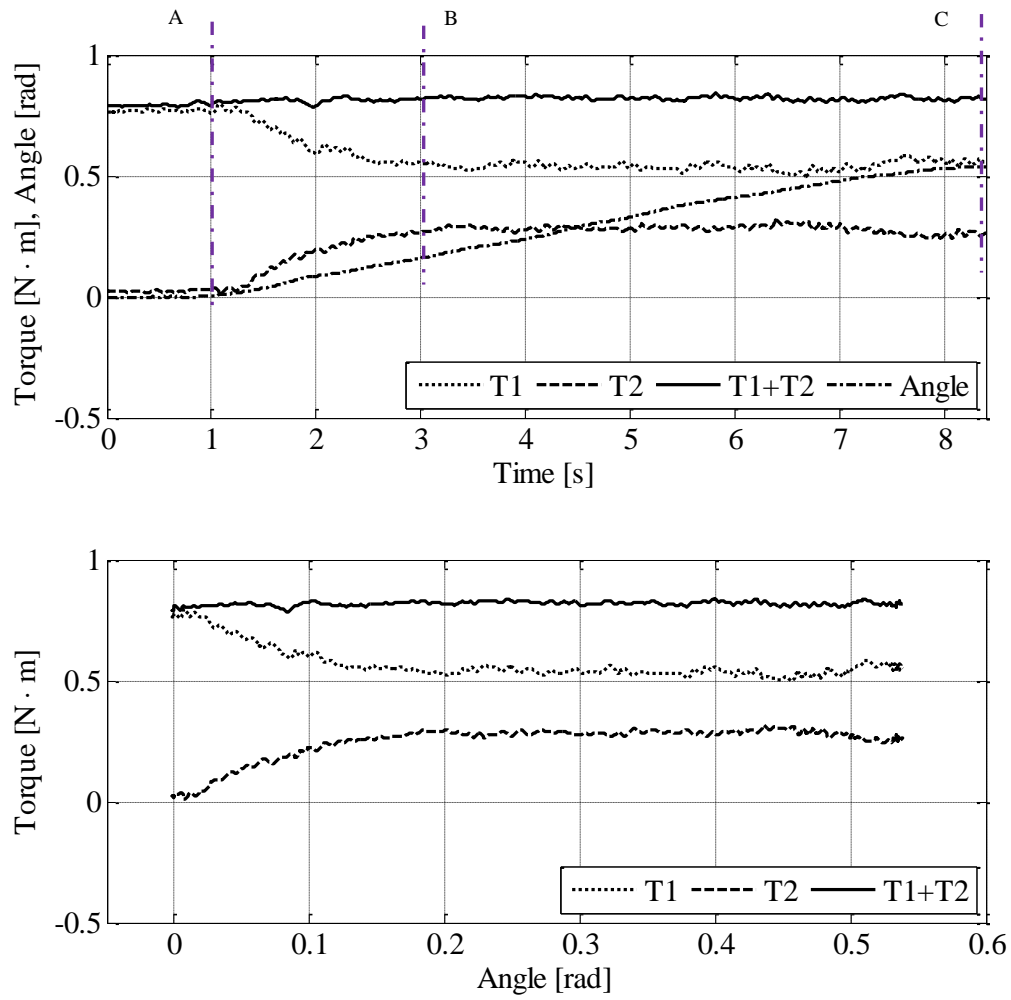


Fig.4.15 Result of experimental (5) (load 1.35kg)

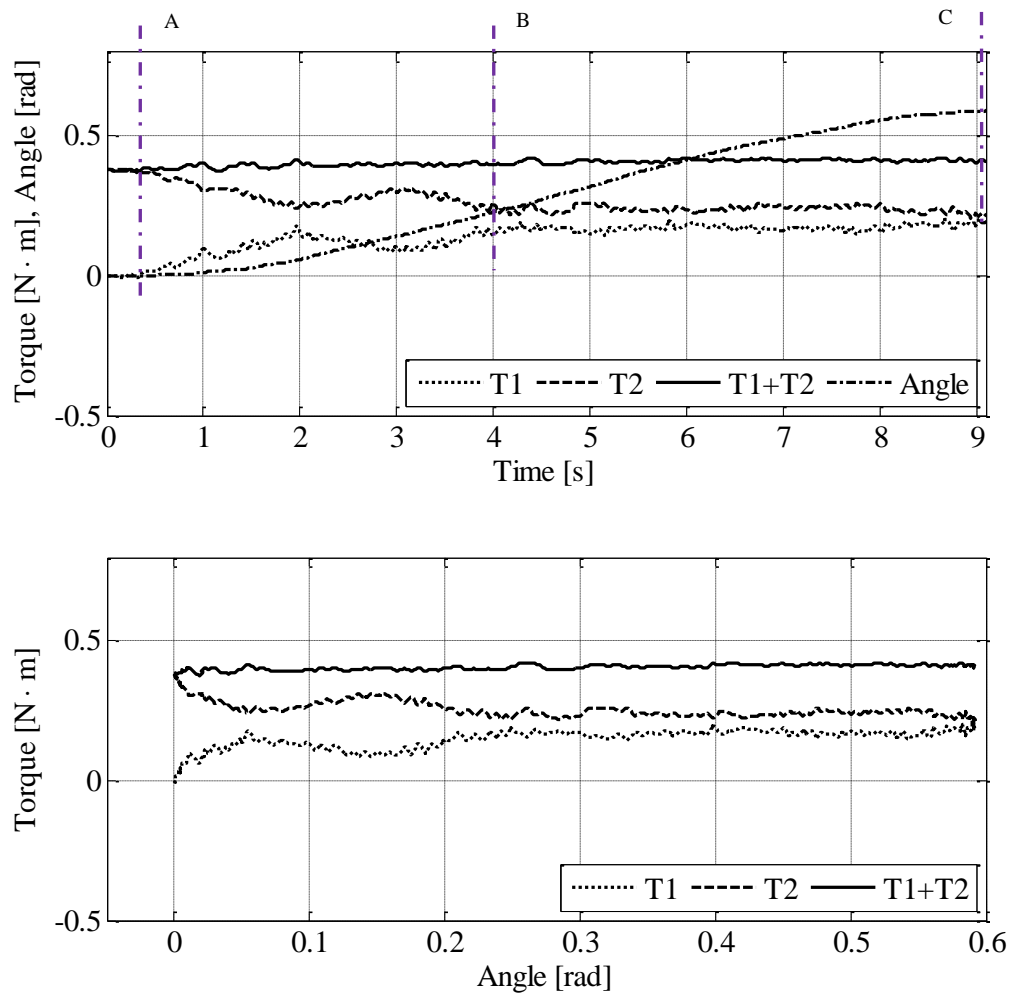


Fig.4.16 Result of experimental (6) (load 0.66kg)

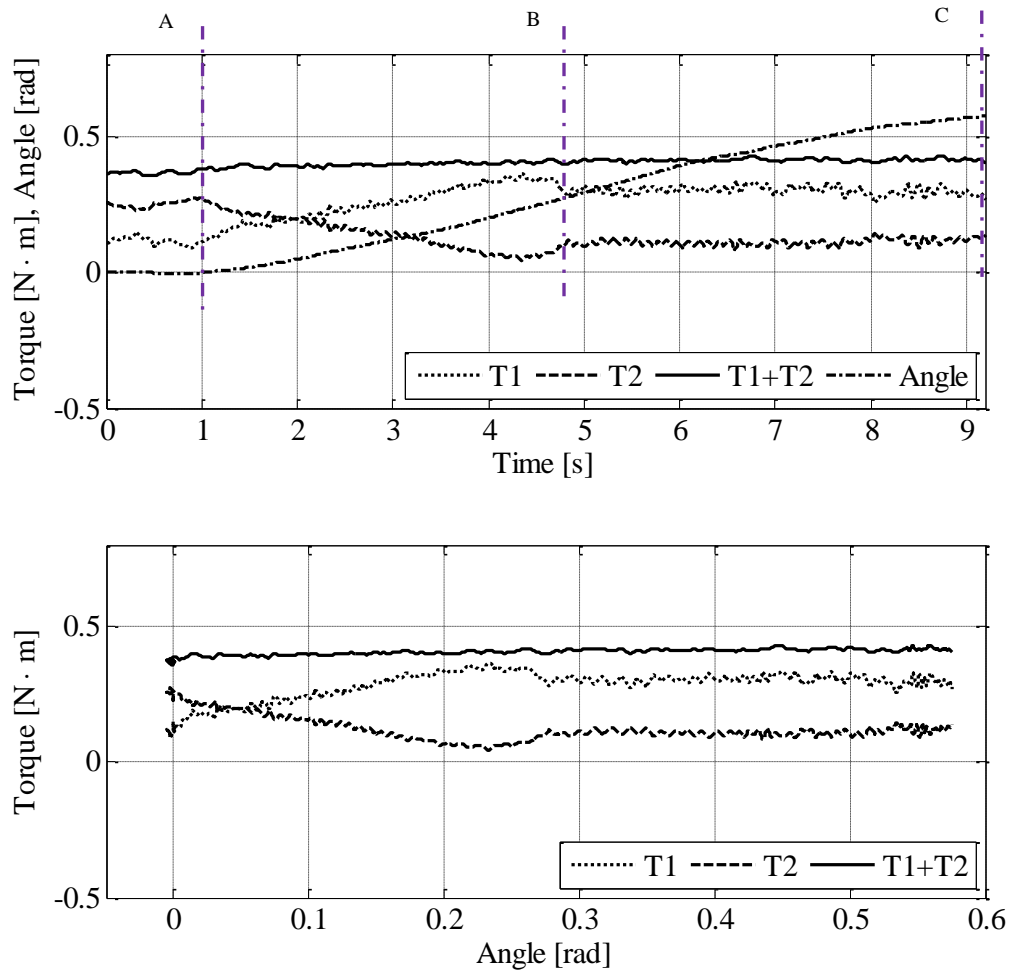


Fig.4.17 Result of experimental (7) (load 0.66kg)

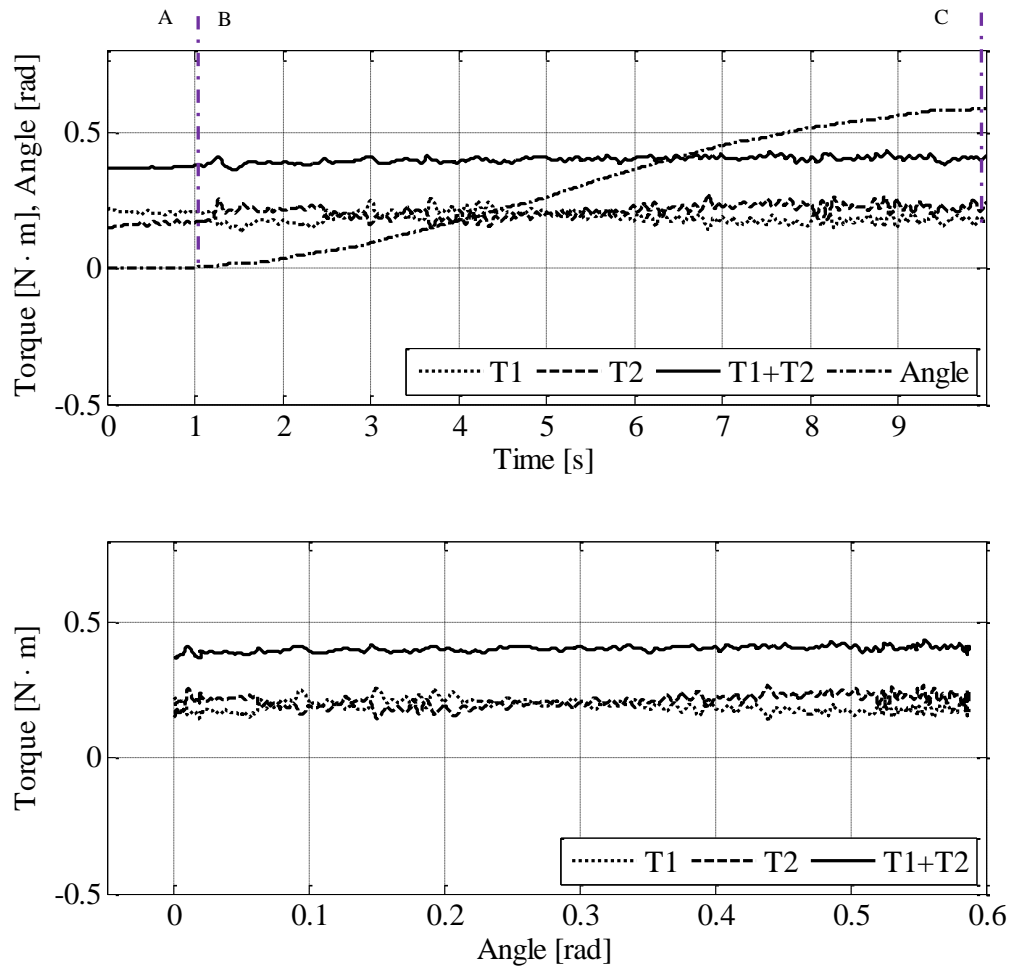


Fig.4.18 Result of experimental (8) (load 0.66kg)



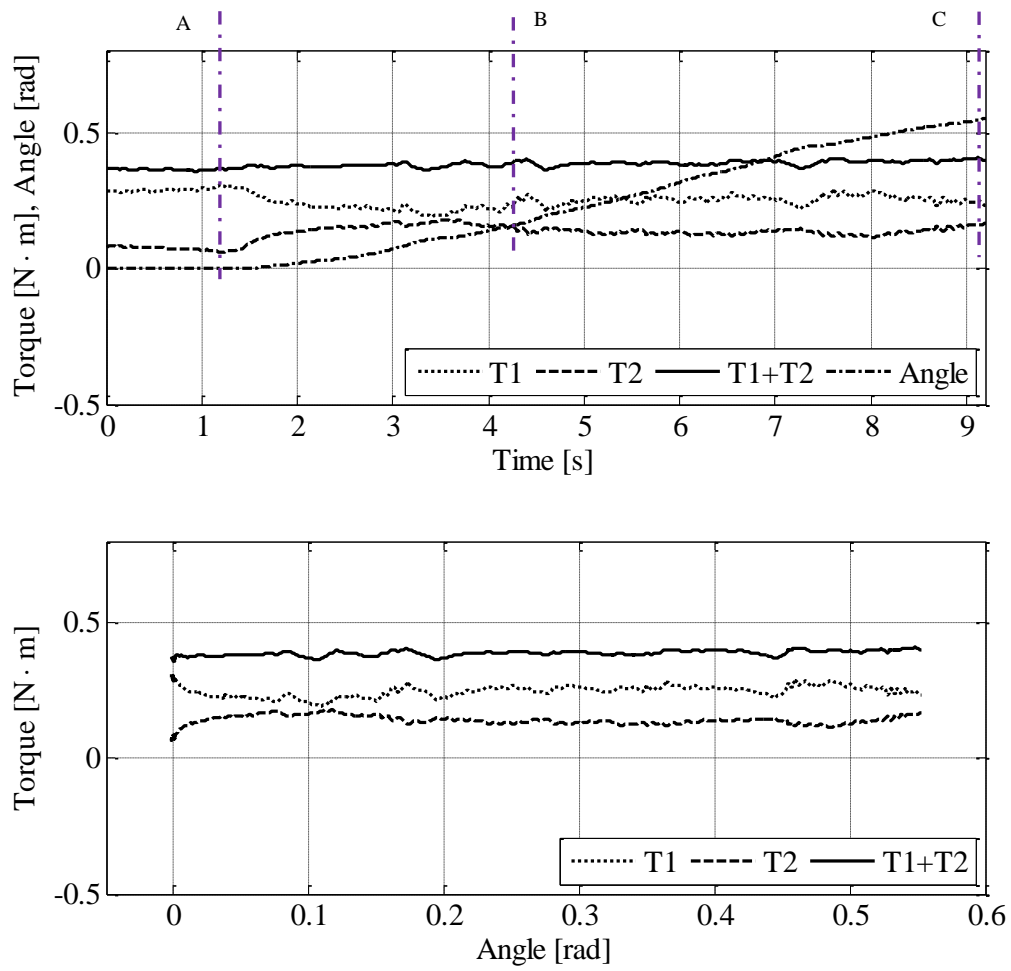


Fig.4.19 Result of experimental (9) (load 0.66kg)

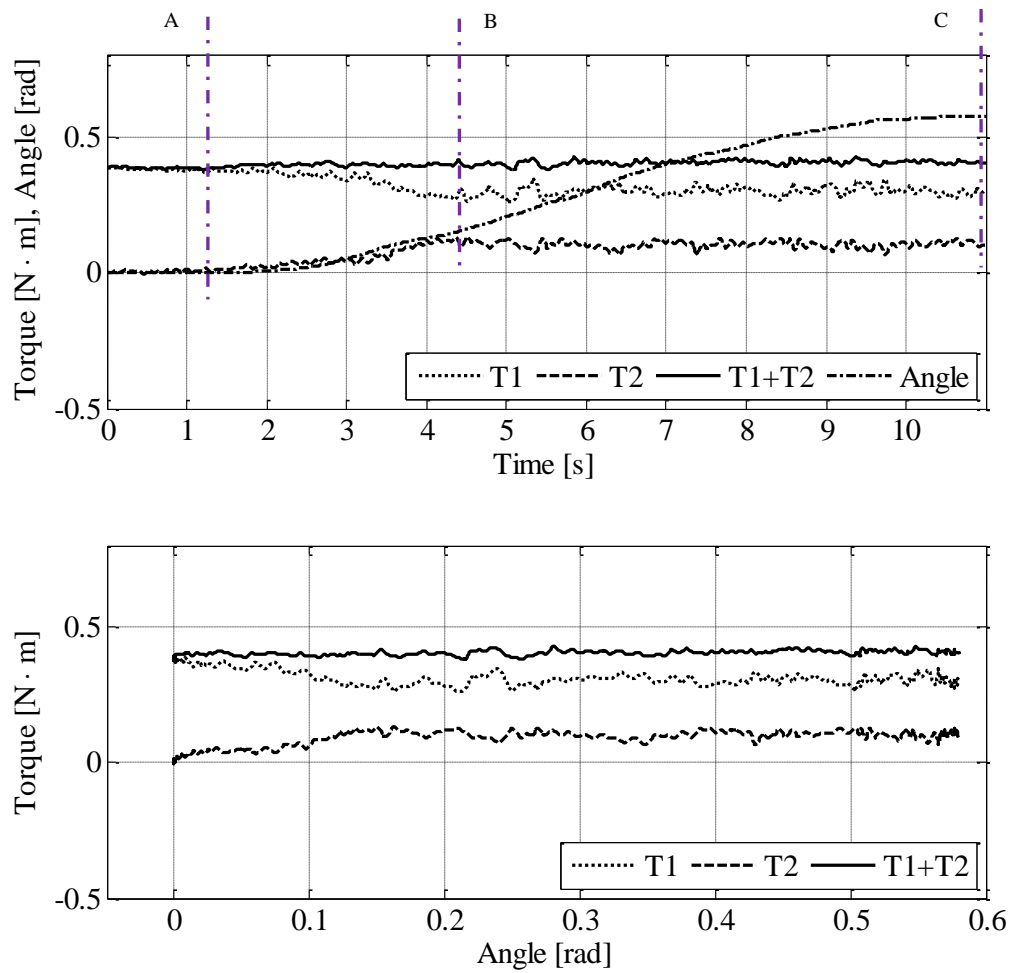


Fig.4.20 Result of experimental (10) (load 0.66kg)

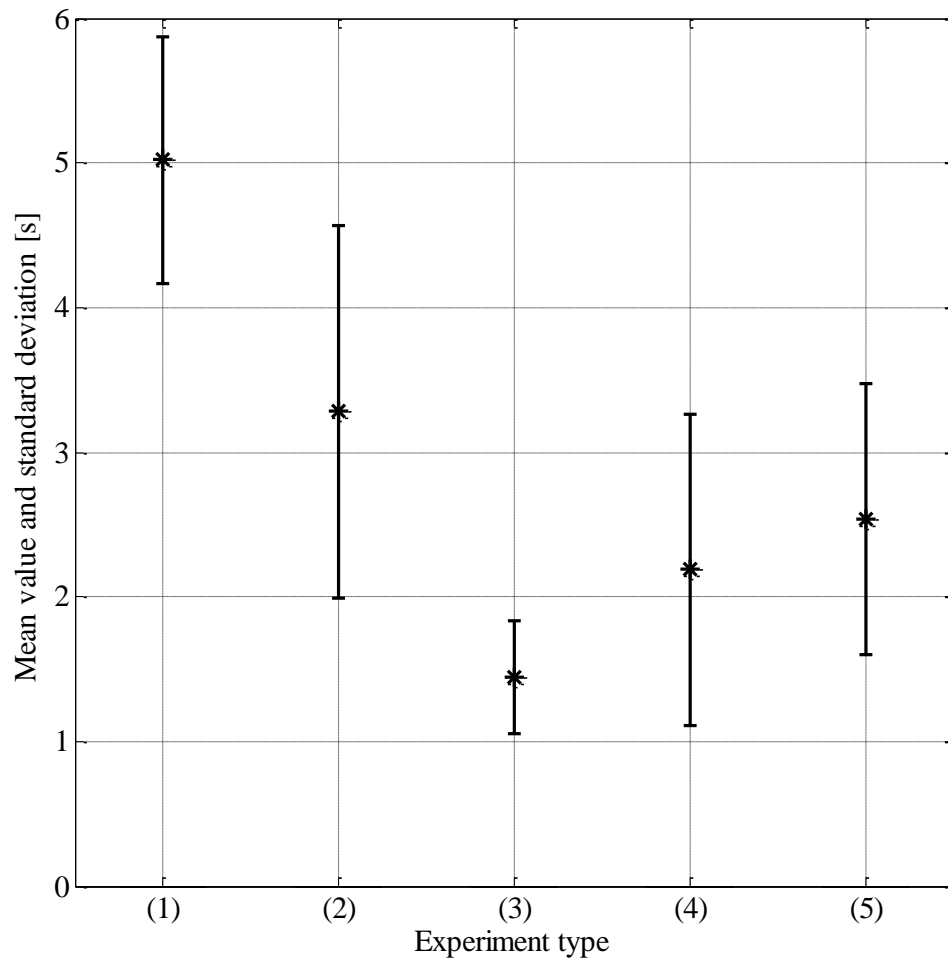


Fig.4.21 Transition time (load 1.35kg)

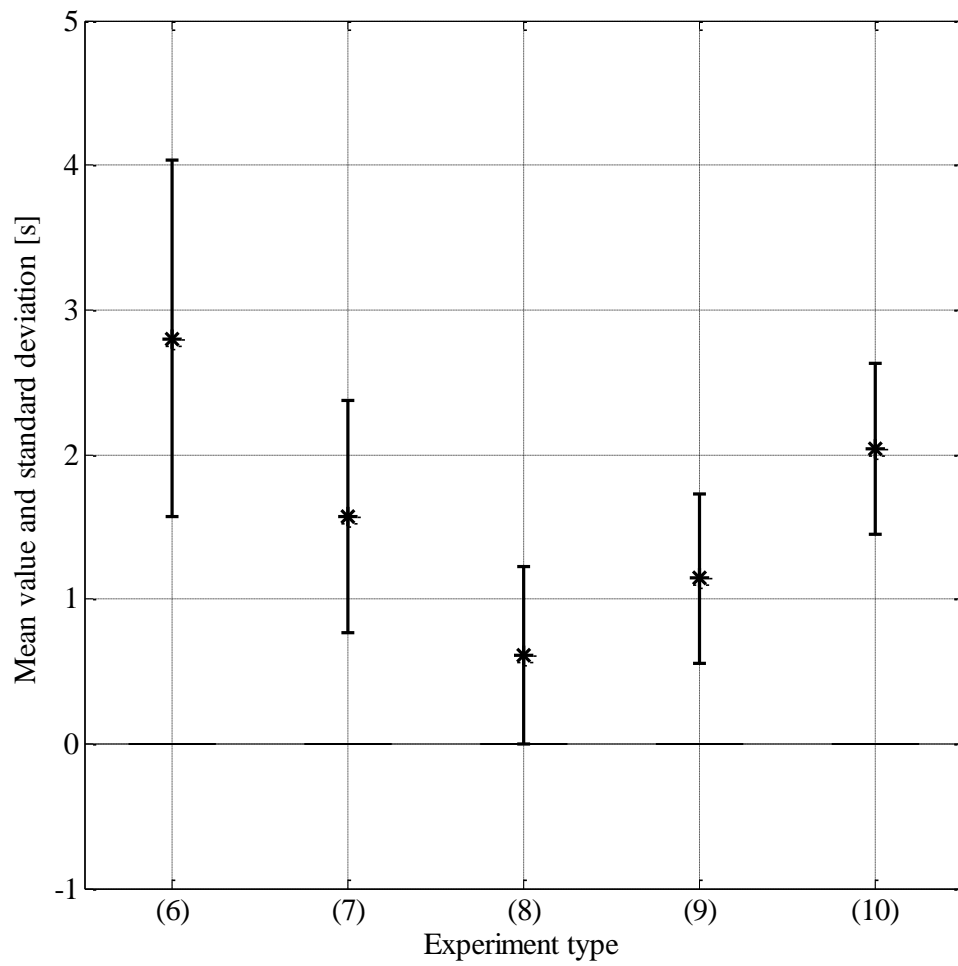


Fig.4.22 Transition time (load 0.66kg)

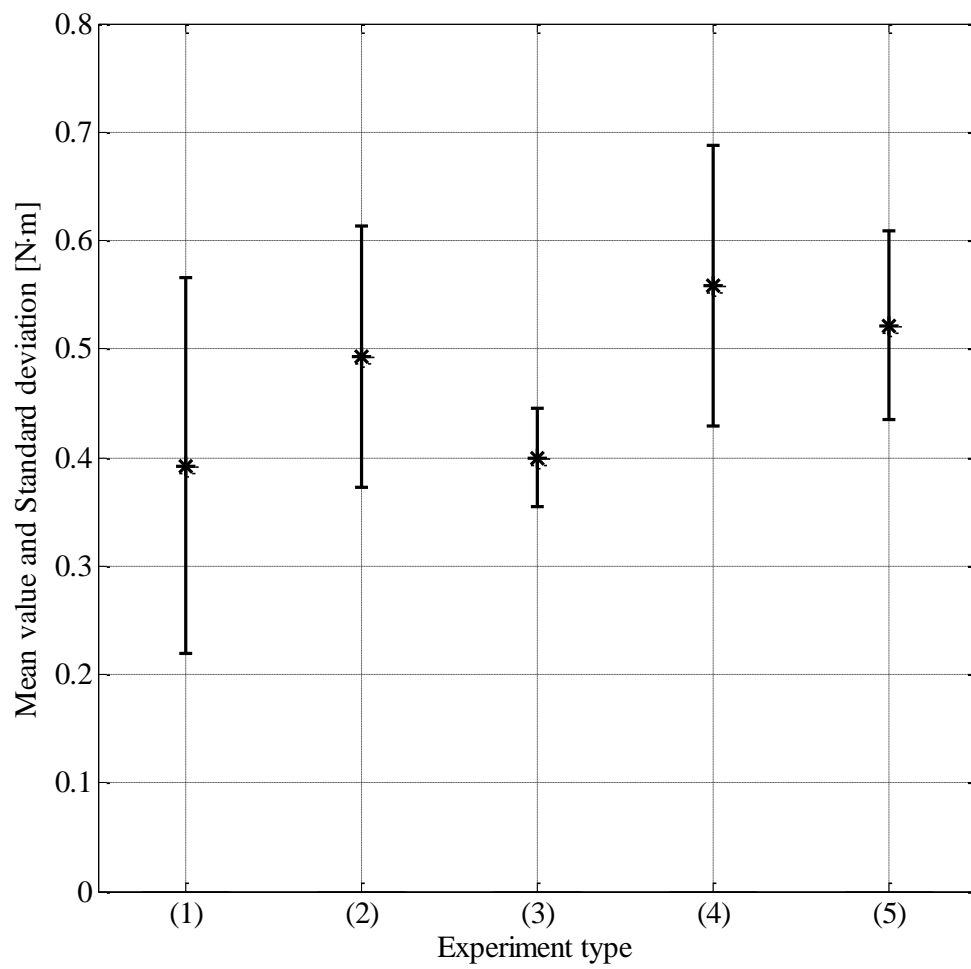


Fig.4.23 Steady torque (load 1.35kg)

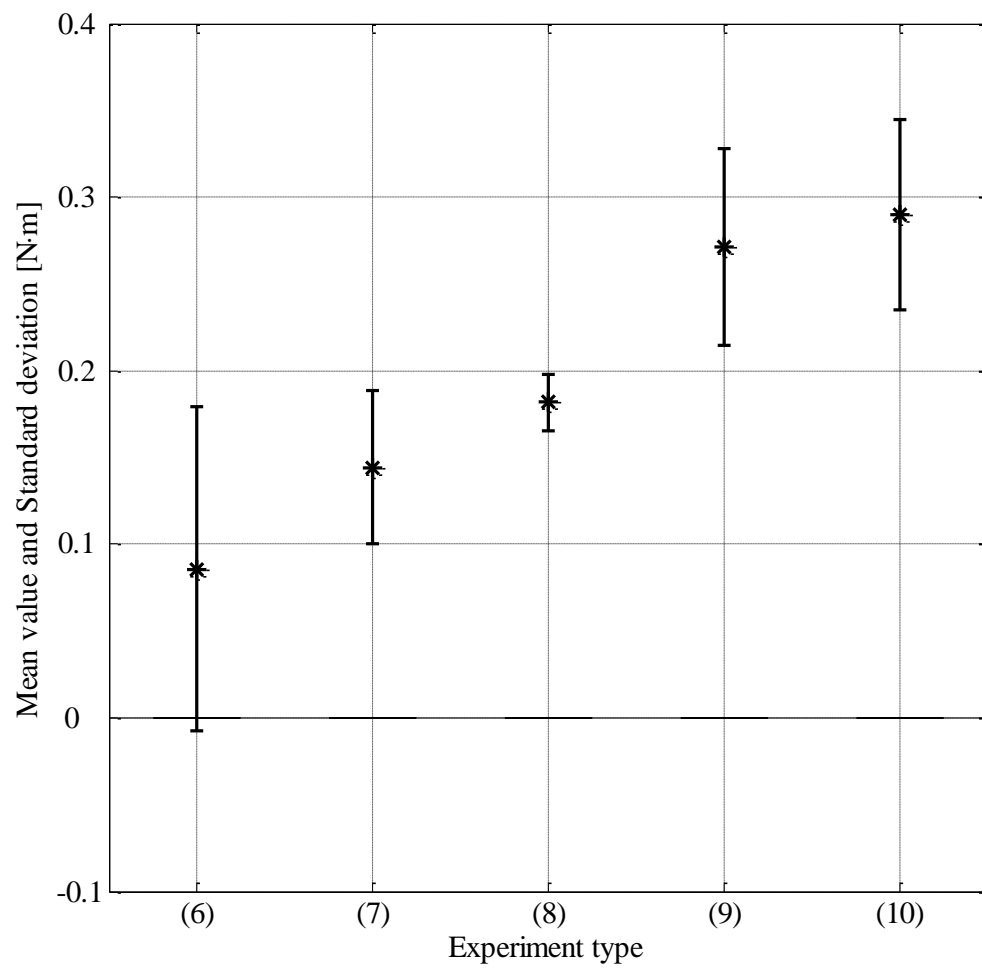


Fig.4.24 Steady torque (load 0.66kg)

## 4. 6 まとめ

本章では重力負荷が運動方向に作用した場合の協調特性を解析した。実験結果より、二人が弛緩状態からリーダーとフォロアーの実験では、フォロアーの腕は重力負荷がない場合のフォロアーの腕の特性と同じように、摩擦特性は存在し、ばね定数は一定である。弛緩状態からリーダーとリーダーの実験では、回転作業開始後、両者のトルクは初期の期間で変化し、その後は安定して一定値をとる。このように、トルクの時系列は全時間で変化するのではなく、変動期間と安定期間の二つの期間に分かれることが分かった。この場合に、分配係数 $\alpha$ も一定値になるが、力を出すタイミングによって、大きさは変わる。一定の角度を回転した後に一人が遅れてフォロアーからリーダーになった場合、直前のフォロアー時のトルクを維持することが分かった。この場合の $\alpha$ は運動全期間で分かりやすい。更に、回転開始前の初期状態において両被験者に負荷トルクを分担させた実験に於いて、その分担率が互いに二分の一の場合に、一定値になるまでの時間が最も短く、その後、回転終了まで分担トルクの変化が少なく、最も安定した状態を維持できることが分かった。

## 第5章 結言

---

本論文では、人間どうしの協調作業特性をロボットの制御に応用する知見を得るため、人間の腕の筋骨格構造に基づいた人間どうしの腕の回転一自由度協調運動モデルを提案し、これに重力負荷が作用した場合の協調特性と腕の筋骨格特性との関係について調べた。

重力負荷と運動方向が垂直の場合の協調運動では、重力負荷がない場合の人間の腕の特性と比較すると、フォロアーの粘性と摩擦の特性は変わらないが弾性はなくなることが分かった。この場合にフォロアーの腕の特性はおもりの重さとの関係がないことも分かった。

重力負荷が運動方向と同じ方向にかかる場合の協調運動において、運動開始前に2人の被験者とも弛緩状態である場合、運動開始直後から、両者のトルクの増加が始まり、ある一定値に達するまで変化する。このトルクが変化する期間を遷移期間と呼んだ。遷移期間を過ぎると、両者のトルクは一定値を維持するようになる。この期間を定常期間、定常期間のトルクを定常トルクと呼んだ。このように一自由度回転運動に於いては回転運動の全期間で不安定なトルク変動をすることなく、前述したようなトルクが互いに変化する遷移期間と、一定値を保つ定常期間に分かれる事が分かった。また、動作開始タイミングに時間差がある事を想定した実験も行った。先に動く被験者が一定角度回転した後に、もう一人の被験者はフォロアーからリーダーに変わる場合、フォロアー期間の両者のトルクは、フォロアーとした被験者の腕のばね、摩擦特性を示した。その後、両者のトルク共にその直前のフォロアー期間のトルクを維持し、回転終了まで変化しないことが分かった。また、二人の負荷分担の割合とトルク特性に及ぼす影響を知るため、以下の初期状態を変えた実験を試みた。回転を始める前の初期状態において、被験者が既に負荷トルクを負担している状態にあり、そこから回転する実験を行った。この実験の結果、トルクが重りの半分のトルクを分担している場合に於いて、遷移時間が最も短く、回転開始前から回転終了まで最も安定して分担トルクを維持することを確認した。



以上の結果から重力負荷を負担した人間との協調動作において、ロボット制御に応用できうる重要な知見を得ることができた。重力負荷が運動方向と同じ場合の協調実験においては、特性はまだ完全には解析されていない。例えば、実験装置の関係から、速い協調運動の実施が困難であった。実験装置を改良し、速い場合の実験を行うことにより、重力負荷と慣性負荷が作用する場合の協調動作を実現することが今後の課題の一つとなる。

## 参考文献

- [1] 総務省:「住民基本台帳に基づく人口,人口動態及び世帯数(平成22年3月31日現在)」
- [2] 総務省統計局刊行, 総務省統計研修所編集:「日本の統計 2010」
- [3] M. E. Pittelkau: Adaptive load-sharing force control for two-arm manipulators, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.1, 498-503, Philadelphia, PA, USA (1988).
- [4] M. Al-Jarrah, and Y. F. Zheng: Arm-manipulator co-ordination for load sharing using variable compliance control, Proc. of 1988 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.1, 895-900, Albuquerque, NM, USA (1997).
- [5] K. Kosuge, and N. Kazamura: Control of a robot handling an object in co-operation with a human, Proc. of IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, 142-147, Sendai, Japan (1997).
- [6] T. Koyama, M. Q. Feng, and T. Tanaka: Development and motion control of wearable human assisting robot for nursing care, Human Friendly Mechatronics, Elsevier, 105-110 (2000).
- [7] 池浦良淳:「人間とロボットによる協調作業」,システム制御情報学会誌,Vol.44 No.12, pp.682-687(2000)
- [8] M. E. Pittelkau: 「Adaptive load-sharing force control for two-arm manipulators, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation」, Vol.1, pp. 498-503, Philadelphia, PA, USA (1988).
- [9] M. Al-Jarrah, and Y. F. Zheng: 「Arm-manipulator co-ordination for load sharing using variable compliance control」, Proc. of 1988 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.1, pp. 895-900, Albuquerque, NM, USA (1997).
- [10] 田窪朋仁, 荒井裕彦, 谷江和雄, 林原靖男:「人とロボットによる長尺物の協調運搬: 仮想非ホロノミック拘束による水平面内の制御手法」,日本機械学会論文集. C編, Vol. 66, No. 648, pp. 2677-2684 (2000)
- [11] 小菅一弘, 須田理央, 風村典秀, 佐藤学:「人と双腕型移動ロボット"M\_R Helper"による物体の協調搬送」,日本機械学会論文集. C編, Vol. 69, No. 685, pp. 2308-2314 (2003)
- [12] 山本圭治郎, 石井峰雄, 兵頭和人, 高橋勝美, 松尾崇, 若井良友:「介護者用パワーアシ

ストスーツの開発」, 福祉工学シンポジウム講演論文集 2008, pp.158-161(2008)

[13] R. Ikeura, H. Monden, and H. Inooka: Cooperative motion control of a robot and a human, Proc. of 3rd IEEE Int. Workshop on Robo and Human Communication, 112-117, Nagoya, Japan (1994).

[14] Ikeura, R., and Inooka, H.: Cooperative force control in carrying an object by two humans, Proceedings of IEEE international conference on systems, man, and cybernetics, 2307-2311 (1995)

[15] Ikeura, R., Inooka H., and Mizutani K.: Subjective evaluation for maneuverability of a robot cooperating with humans, Journal of robotics and mechatronics, Vol. 3, No. 1, 324-329 (2008)

[16] R. Ikeura, H. Inooka, and K. Mizutani: A control method for a robot cooperating with a human in carrying an object, Proc. of the Japan-USA Symposium on Flexible Automation, 255-260 (1996).

[17] R. Ikeura, and K. Mizutani: Control of robot cooperating with human motion, Proc. of 7th IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, 525-529 (1998).

[18] 池浦良淳, 森口智貴, 水谷一樹: 「人間どうしの協調運動における腕の可変インピーダンス特性とロボット制御への適用」, 日本機械学会論文集. C編, Vol.73, No.725, pp.251-257 (2007)

[19] Ikeura, R., Morita, A., and Mizutani, K.; Variable damping characteristics in carrying an object by two humans, Proceedings of IEEE international workshop on robot and human communication, 130-134 (1997)

[20] Ikeura, R., Kozawa, H., and Mizutani, K.; Variable damping control for a robot cooperating with a human in carrying an object and its experimental evaluation, Proceedings of the Japan-USA Symposium on Flexible Automation, 29-34 (1998)

[21] Ikeura, R., Moriguchi, T., and Mizutani, K.; Optimal variable damping control for a robot carrying an object with a human, Proceedings of international conference on control, automation and systems, 63-66 (2001)

[22] R. Ikeura, and H. Inooka: Variable impedance control of a robot for cooperation with a human, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.3, 3097-3102, Nagoya, Japan (1995).

[23] M. M. Rahman, R. Ikeura, and K. Mizutani: Analysis of cooperation characteristics of two humans in moving an object, Proc. of the International Conference on Mechatronics and Information

Technology, 454-458, Yamaguchi, Japan (2001).

[24] Rahman, M. M., Ikeura, R., and Mizutani K.: Control characteristics of two humans in cooperative task, Proceedings of IEEE international conference on systems, man and cybernetics, 1301-1306 (2000)

[25] Rahman, M. M., Ikeura, R., and Mizutani K.: Cooperation characteristics of two humans in moving an object, Machine intelligence and robotic control, Vol. No. 2, 43-48 (2002)

[26] M. M. Rahman, R. Ikeura, and K. Mizutani: Control characteristics of two humans in cooperative task and its application to robot control, Proc. of 2000 IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Vol.3, 1773-1778, Nagoya Japan (2000).

[27] Rahman, M. M., Ikeura, R., and Mizutani K.: Investigation of the impedance characteristic of human arm for development of robots to cooperate with humans, JSME international journal, series C, Vol. 45, No.2, 510-518 (2002)

[28] Rahman, M. M., Ikeura, R., and Mizutani K.: Impedance characteristics of human arm for cooperative robot, Proceedings of the international conference on control automation and systems, 1455-1460 (2002)

[29] Engin, A.E.: On the biomechanics of the shoulder complex, Journal of biomechanics, Vol. 13, 575-590 (1980)

[30] Gomi, H., Koike, Y., and Kawato, M.: Human hand stiffness during discrete point-to-point multi-joint movement, Proceedings of the annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society, Vol. 4, 1628-1629 (1992)

[31] Gomi, H., and Osu, R.: Task-dependent viscoelasticity of human multi-joint arm and its spatial characteristics for interaction with environments, Journal of neuroscience, Vol. 18, 8965-8978 (1998)

[32] 澤田昌信, 大亦絢一郎: 「可変長 1 リンクと 2 関節から成るアーム形摩擦ダンパの研究」, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2000, CD-ROM 論文集, 656 (2000), 1-4

[33] Lemay A. M. and Crago E. P.: A dynamic model for simulating movements of the elbow, forearm, and wrist, J. Biomechanics, 29, 1319-1330 (1996)

[34] Shinagawa Y. Komura, T. and T.L. Kunii: A muscle-based feed-forward controller of the human body. In Computer Graphics Forum, Vol. 16, pp. 165-176, 1997

[35] 小泉孝之, 辻内伸好, 岡村昌浩, 奥村泰知, 竹田正樹: 「随意筋収縮を考慮した膝関

節運動のモデル化」, 日本機械学会 [No.02-9] Dynamics and Design Conference 2002 CD-ROM  
論文集 [2002.9.17-20, 金沢]

[36] Weinberg M. A., Pietsch T. I., Helm B. M., Hesselbach J. and Tscherne H: A new kinematic model of pro- and supination of the human forearm, *J. Biomechanics.*, 33, 4876-491 (2000)

[37] 遠山茂樹, 米竹淳一郎: 「超音波モーターを応用したパワーアシストスーツ」, バイオメカニズム学会誌, Vol. 30, No.4, 189-193 (2006)

[38] Maurel, W., and Thalmann, D.: A case study on human upper limb modeling for dynamic simulation, *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, Vol2, No.1, 65-82 (1999)

[39] Maurel, W., and Thalmann, D., Hoffmeyer, P., Beylot, P., Gingins, P., Kalra, P., and Magnenat Thalmann, N.: A biomechanical musculoskeletal model of human upper limb for dynamic simulation, *Proceedings of the eurographics workshop on computer animation and simulation*, 121-136 (1996)

[40] Cannon, S.C., and Zahalak, G.I.: The mechanical behavior of active human skeletal muscles in small oscillations, *Journal of biomechanics*, Vol. 15, No.2, 111-121 (1982)

[41] 吉田憲吾: 「生物の筋骨格構造に基づくモーション制御に関する研究」, 東京大学学位論文

[42] 森於菟 他: 「解剖学 分担1 (総説・骨学・靱帯学・筋学) 改訂第11版」, 金原出版

[43] 金子丑之助: 「日本人体解剖学 上巻 (骨格系 筋系 神経系) 改訂19版」, 南山堂出版

[44] 高橋彬: 運動解剖学図譜, Baseball magazine 社

[45] N. Zhang, R. Ikeura, Y. X. Wang, K. Mizutani and H. Sawai: Characteristics of the human arm based on a musculoskeletal model of cooperative motion between two humans, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol. 3, No. 1, 50-61 (2008).

[46] Zhang, Nan: Analysis of cooperation characteristics between two humans based on a musculoskeletal model, *Doctoral Dissertation* (2008).

[47] N. Zhang, Ryojun Ikeura, Yuanxin Wang, Kazuki Mizutani, Hideki Sawai: Characteristics of human arm based on musculoskeletal model in human-human cooperative task, *Proceeding of SPIE (The International Conference on Mechatronics and Information Technology)* , pp.67942M-1-67942M-10 (2007)

その他：

- [48] 高木貞治:「解析概論 改訂第3版」, 岩波書店
- [49] 山内恭彦「一般力学」, 岩波書店
- [50] 山本義隆「解析力学」, 朝倉書店
- [51] ハルビン工業大学 理論力学教学研究室編集:「理論力学 (上巻・下巻)」, 高等教育出版社
- [52] 中村隆一, 斎藤 宏, 長崎浩:「基礎運動学」, 医歯薬出版
- [53] Ljung, L., System Identification Toolbox, Users Guide, USA, The Mathworks Inc., Commands and Functions (1995)
- [54] 薛定宇, 陳陽泉:「Matlab/Simulinkに基づく系統のシミュレーション技術と応用」, 清華大学出版社
- [55] 求是科技:「Matlab7.0 从入門到精通」, 人民郵電出版社
- [56] 大石進一:「Matlabによる数値計算」, 培風館
- [57] 高谷邦夫:「Matlabの総合応用: 例題による解説」, 森北出版
- [58] 久米均:「数理統計学」, コロナ社
- [59] 渡辺理:「ひずみゲージとその応用」, 日刊工業新聞社
- [60] 千原国宏:「センサ・変換原理からコンピュータ応用計測まで」, コロナ社

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、非常に多くの方々にお世話になりました。ここに感謝の意を表します。

はじめに、三重大学大学院工学研究科池浦良淳教授には、修士院生から終始多大なる御指導、御鞭撻を親身になって行って頂き、深く感謝するとともに厚く御礼申し上げます。特に、研究者としての基本的な心構え、ものの考え方など、多くのことをご教授いただきました。また、先生の教育者としての姿勢に触れ、多くのことを学びました。

三重大学工学研究科早川聡一郎准教授、定年退職した水谷一樹先生と加藤光廣先生には、研究を通じ、様々なご助言を賜りました。この場を借りて御礼申し上げます。また、早川聡一郎准教授、学位論文をご審査いただきました平井淳之教授、矢野賢一教授には、本論文を作成するにあたって貴重なご意見を賜りました、心よりの感謝を厚く御礼申し上げます。

また、装置の製作、計器の使用、実験方法等、種々の技術習得に際し、適切且つ懇絶丁寧なるご指導を賜りました澤井秀樹先生に深く感謝致します。日常生活の面でも、研究成果を十分にあげられるよう、精神的な援助を多くの澤井先生に賜りました心より御礼申し上げます。

さらに、実験や研究を通して一生懸命協力していただきました四年生の藤井克圭君と南総一郎君に深く感謝致します。

本研究を行うに際しまして、お忙しい中実験に協力していただきました天野洸人君などの被験者の皆様には貴重な時間を割いていただき、厚く御礼申し上げます。

そして、明るく楽しい雰囲気にくれた研究室の皆様にこころから感謝いたします。

最後に、大学在籍中、より勉強をしたいという私の我儘に対して快く賛同して頂き、また惜しめない援助を送ってくださった家族のお陰で充実した素晴らしい勉強・研究生活を送ることができました。感謝の気持ちを述べることで謝辞の最後とさせていただきます。