

人間の腕の筋骨格モデルに基づく協調運動解析
に関する研究

平成18年度

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻

王 元 新

修 士 論 文

人間の腕の筋骨格モデルに基づく協調運動解析
に関する研究

平 成 19 年 度

工 学 研 究 科
機 械 系 専 攻

システム設計

王 元新



目次

第1章 緒言	1
第2章 実験方法および実験システムの構成	4
2.1 人間どうしの腕の回転1自由度協調作業モデル	4
2.2 実験システム	9
第3章 マスターとスレーブの回転運動の実験	11
3.1 実験方法	11
3.2 腕をゆっくり動かした時の静的な実験	13
3.3 腕を速く動かした時の動的な実験	27
3.4 マスターとスレーブの回転運動の実験結果と考察	43
第4章 マスターとマスターの回転運動の実験	46
4.1 実験方法	46
4.2 平衡点の前にマスターになる場合	48
4.3 平衡点の後にマスターになる場合	54
第5章 結言	58
謝辞	
参考文献	

第1章 緒言

技術の発展と社会の進歩とともに、ロボットに関する研究や開発が非常に重視されてきた。従来多くのロボットは、図 1.1 に示すように、人間の代わりに単純な繰り返し作業を行ったり、人間に対する危険な仕事を行ったりするものであるが、人間と直接接するものではないものである。

しかし、ロボットはこれまで生産性の向上のための手段であったが、少子高齢化になる将来では、より深刻な問題として、介護者数が足りなくなる。そのため、医療や福祉の現場にはロボットに作業を求められるようになり、従来要求される高速・高精度といった能力より、図 1.2 のような人間と協調する能力が求められている。そのようなロボットは人間に優しい、違和感のないスムーズな作業を行う能力を有することを求められる。

Rahman らは人間どうしが一つの物体を運搬するロボットの制御手法を開発するため、可変インピーダンス制御を用いて1次元での解析を行ったが、本研究では、人間と協調できるようなロボットを開発するため、人間の腕の特性を解析した。

人間どうしの腕の多自由度協調作業モデルの解析が非常に困難なので、人間の腕の構造を簡単な力学的なモデルに仮定し、人間どうしの腕の回転1自由度協調作業モデルを導入した。その後2人の人間の腕の回転1自由度協調運動により、マスターとマスターの協調特性に関係があると思われるトルクと変位と加速度に着目し解析を行った。

本実験中、マスターとスレーブの協調回転運動中でのスレーブの特性と、マスターとマスターの協調回転運動中でのマスターの特性の解析を行った。

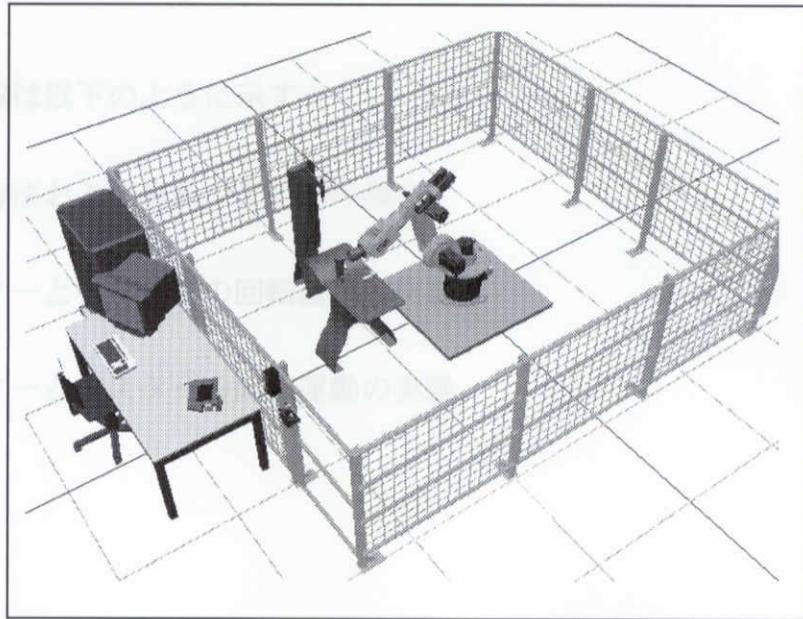


図 1.1 今まで生産性の向上のための手段であるロボット

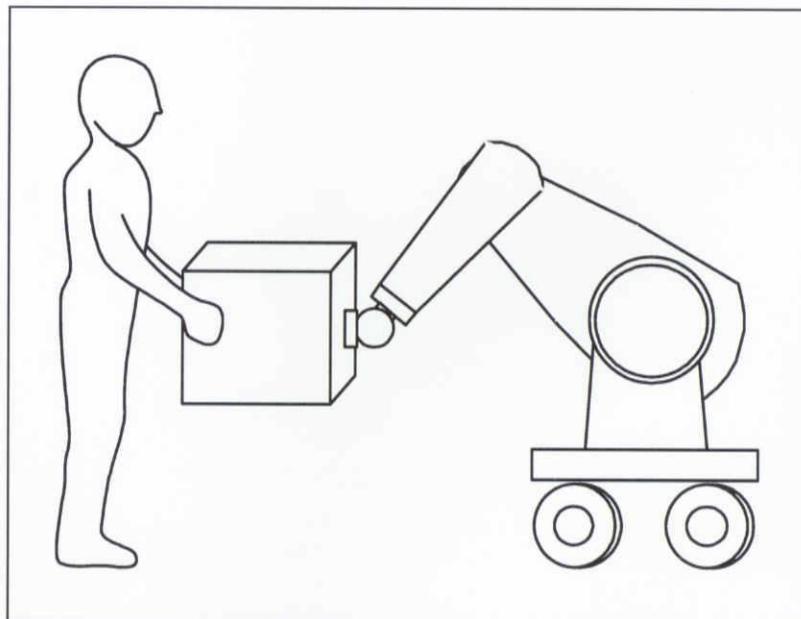


図 1.2 これから人間と協調する能力を持つロボット

本論文では行った実験についての実験方法・実験結果及び考察を以下のようにまとめる。

本論文の構成は以下のように示す：

第2章 実験方法および実験システムの構成

第3章 マスターとスレーブの回転運動の実験

第4章 マスターとマスターの回転運動の実験

第5章 結言

第2章 実験方法および実験システムの構成

2.1 人間どうしの腕の回転 1 自由度協調作業モデル

人間どうしが協調作業を行う場合、腕が多自由度で動くが、多自由度モデルとしての人間の腕において力学的な特性解析が非常に困難であるので、より簡単なモデルを求められることが必要である。

それで、人間の腕の特性が解析できるように、図 2.1 に示すような人間どうしの腕の回転 1 自由度協調作業モデルとした。

このモデルでは、前腕をアームロード（腕を載せる台）に載せ、肘を中心とし、前腕を回し、ある範囲で協調作業を行う。Timing belt により 2 人の腕は常に同時に動く。

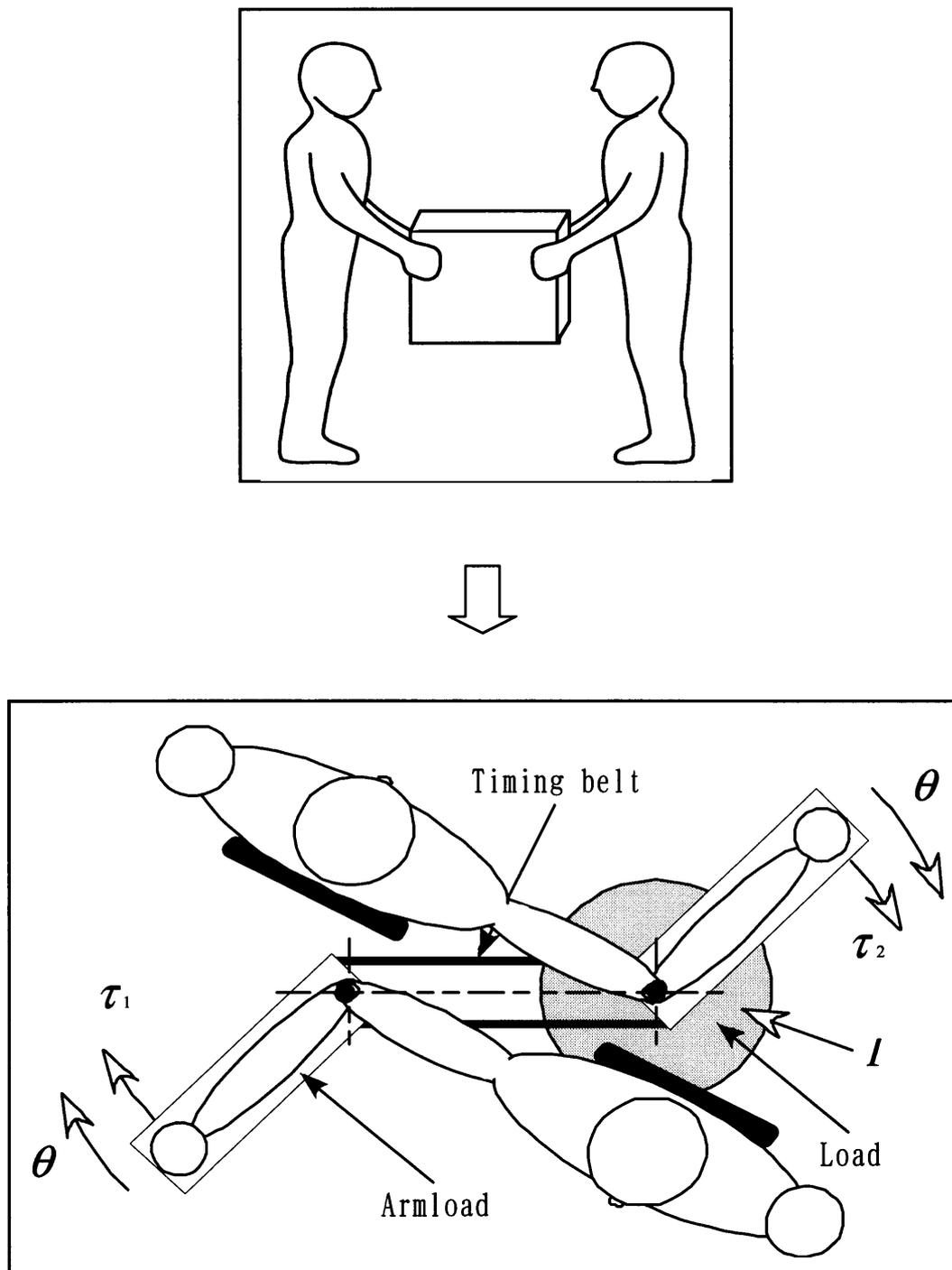


図 2.1 人間どうしの腕の回転1自由度協調作業モデル化

人間どうしの腕の回転1自由度協調運動

腕の回転1自由度の協調運動の例とする図2.1に示すように、人間どうしは肘を回転中心とし前腕を回し協調作業を行う。

腕の回転1自由度協調作業モデルに基づいて、運動方程式は

$$I\ddot{\theta} = \tau_1 + \tau_2 \quad (2.1)$$

となる。ここで、負荷の慣性モーメントを I 、回転角加速度を $\ddot{\theta}$ 、2人の腕に発生するトルクを τ_1 と τ_2 とする。

負荷に対する分配係数 α を導入するとトルク τ_1 及び τ_2 はそれぞれ

$$\tau_1 = \alpha I \ddot{\theta} + \tau_{\text{int}} \quad (2.2)$$

$$\tau_2 = (1 - \alpha) I \ddot{\theta} - \tau_{\text{int}} \quad (2.3)$$

であり、ここで、 τ_{int} は2人の間で発生した内部トルクである。

$\alpha \neq 1$ の時、マスターとマスターの協調運動と考えられ、

$\alpha = 1$ の時、マスターとスレーブの協調運動と考えられる。

ここで、

マスターは回転角の目標値も速度も知った上で主導的に腕を動かす人である、

スレーブは目を閉じて追従する側の人を言い、腕の筋肉に力を入れていない状態である人を言う。

$\alpha = 1$ の時、マスターとスレーブのそれぞれのトルクは

$$\tau_m = I \ddot{\theta} + \tau_{\text{int}} \quad (2.4)$$

$$\tau_s = -\tau_{\text{int}} \quad (2.5)$$

となる。

肘の周りの筋骨格モデル

本研究では、スレーブのトルクと変位と加速度を計測し力学的な特性を解析する。

スレーブに於いて腕の構造を力学的なモデルは図 2.2 のようになり、モデルの運動方程式は式 (2.6) で表される。

$$I_h \ddot{\theta} + c \dot{\theta} + k\theta + \tau_f = \tau_{\text{int}} \quad (2.6)$$

ここで、 I_h は前腕の慣性モーメント、 c は上腕の粘性、 k は上腕の弾性、 f は上腕の摩擦、 θ は肘関節が動いた角度、 $\dot{\theta}$ は回転角速度、 $\ddot{\theta}$ は回転角加速度である。また τ_{int} は腕に発生するトルクで、協調作業を行う場合に2人の間で発生した内部トルクである。

人間の腕の筋骨格の構造を力学的なモデルに仮定した。それから、マスターとスレーブの回転1自由度協調運動により、マスターとスレーブのトルクと変位と加速度を計測して力学的な特性を解析した。

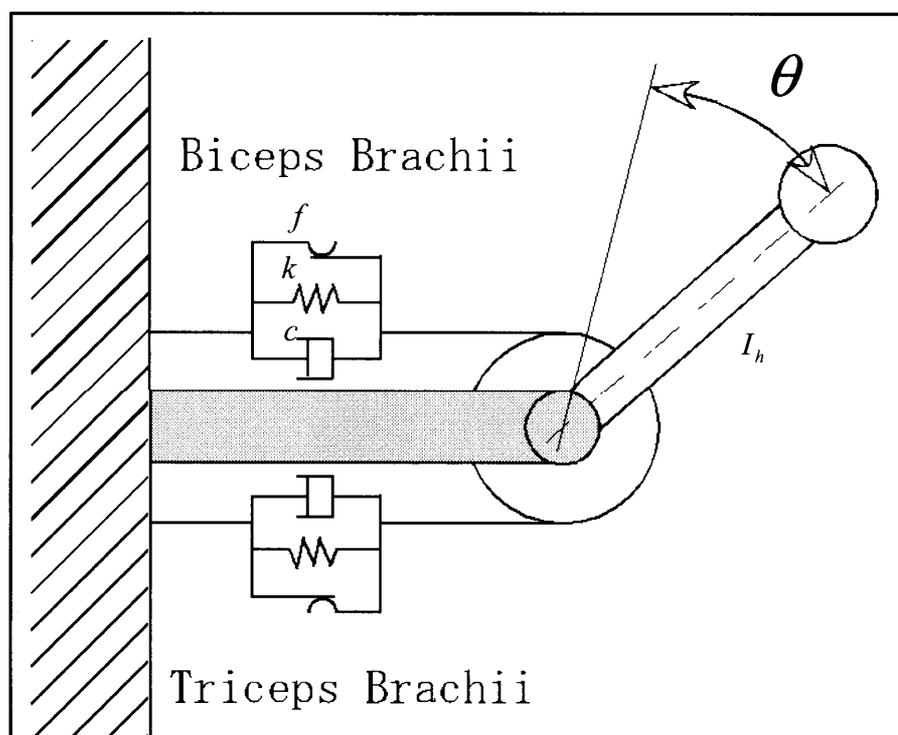
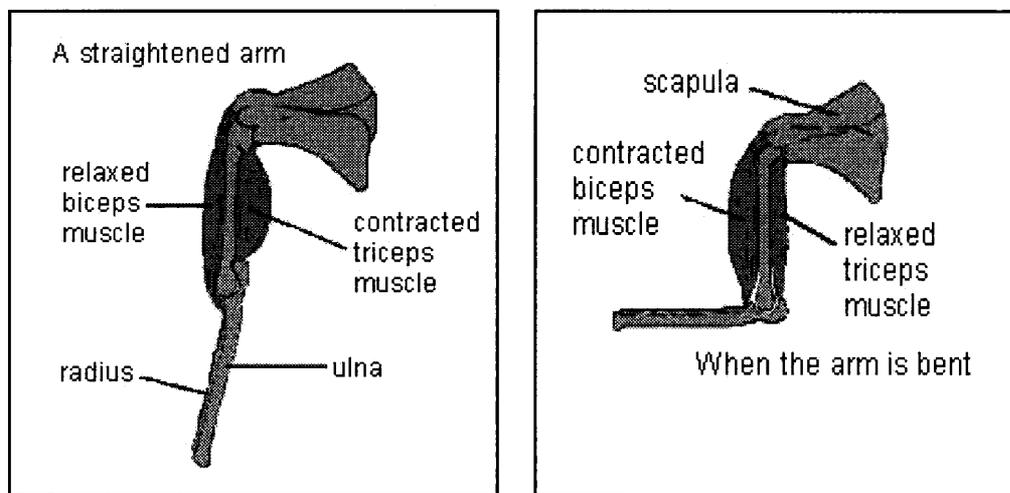


図 2.2 肘の周りの筋骨格モデル化

2.2 実験システム

図 2.3 で実験システムの構造概要を示す。実験システムは腕を載せるためのアームロードとトルク伝達系と計測系に分れる。

トルク伝達系はタイミングベルトで二つのアームロードのトルクを伝達する。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てあり、ベルトの張力を強くしても摩擦力は殆ど発生しない。

計測系は力センサーと変位センサーと加速度センサーに分れ、これらのセンサーによりトルクと角度と角加速度を求める。

実験する前にアナログフィルタとデジタルフィルタにより、ノイズを除くことを検討した。それからフィルタをかける場合とフィルタをかけない場合と、求められた実験結果に対して、あまり影響が出ないことが分かった。

それから、実験装置のセンサーの誤差も補正した。

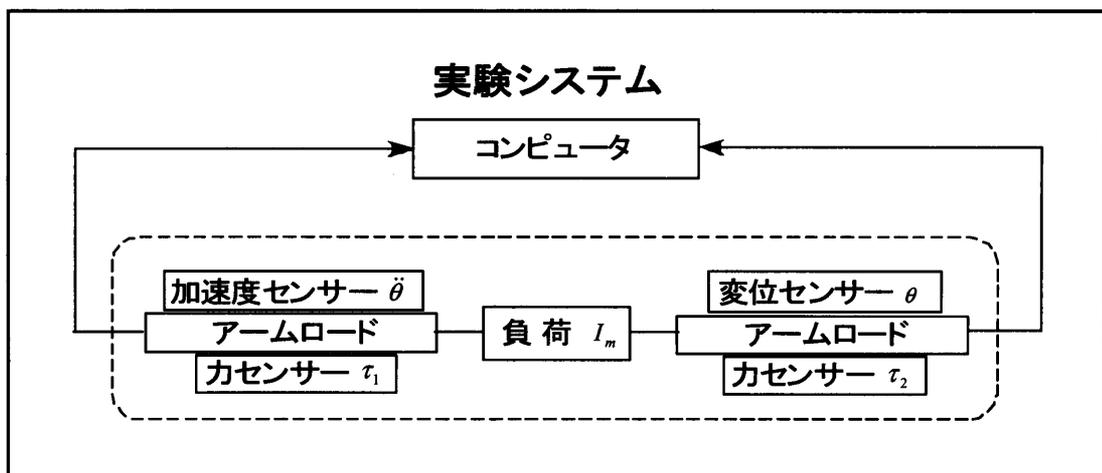
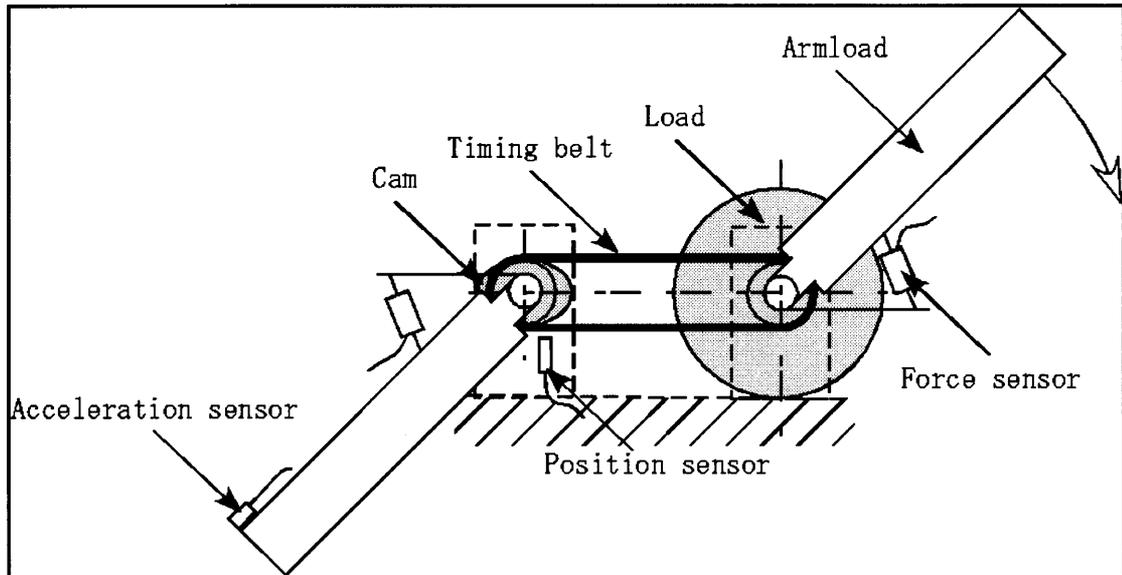


図 2.3 実験システムの概要図

第3章 マスターとスレーブの回転運動の実験

3.1 実験方法

図 3.1 に実験方法を示す。

2人の被験者はマスターとスレーブに別れ、右腕をそれぞれのアームロードに載せる。肘は前腕の回転中心としてアームロードと同軸を保つ。

2人の平衡点を合わせるように、2人の座り方を調節する。本論文での平衡点は腕の二頭筋、三頭筋とも弛緩させている状態で、腕が止まっている所である。

動作の前、2人は二頭筋と三頭筋とも弛緩させている。

四角の目標値が予め決められた印に到達する時、マスターとした被験者はその目標値にプラス目印を合わせるように追従して、一定の速度で回転運動を始める。動きはまずCW方向（時計回り方向）で、後はCCW方向（反時計回り方向）である。回転運動中で2人とも姿勢は崩れないように自然なポーズをとる。スレーブの腕はマスターに動かされ、回転運動中で弛緩していたままである。

実験は腕がゆっくり動いた（角加速度がほぼゼロ）静的な実験と腕が速く動いた動的な実験を行った。

計測した最大回転角 θ は約0.7radで、マスターとスレーブの腕に発生したトルク・角度・角加速度を計測する。

その後、マスターとスレーブの協調特性に関係があると思われるトルクと変位と加速度に着目し解析を行った。

ディスプレイの上の目印の説明：

プラス目印は変位センサーから出した信号である。

四角目印はコンピューターから二つのディスプレイに出した目標値である。

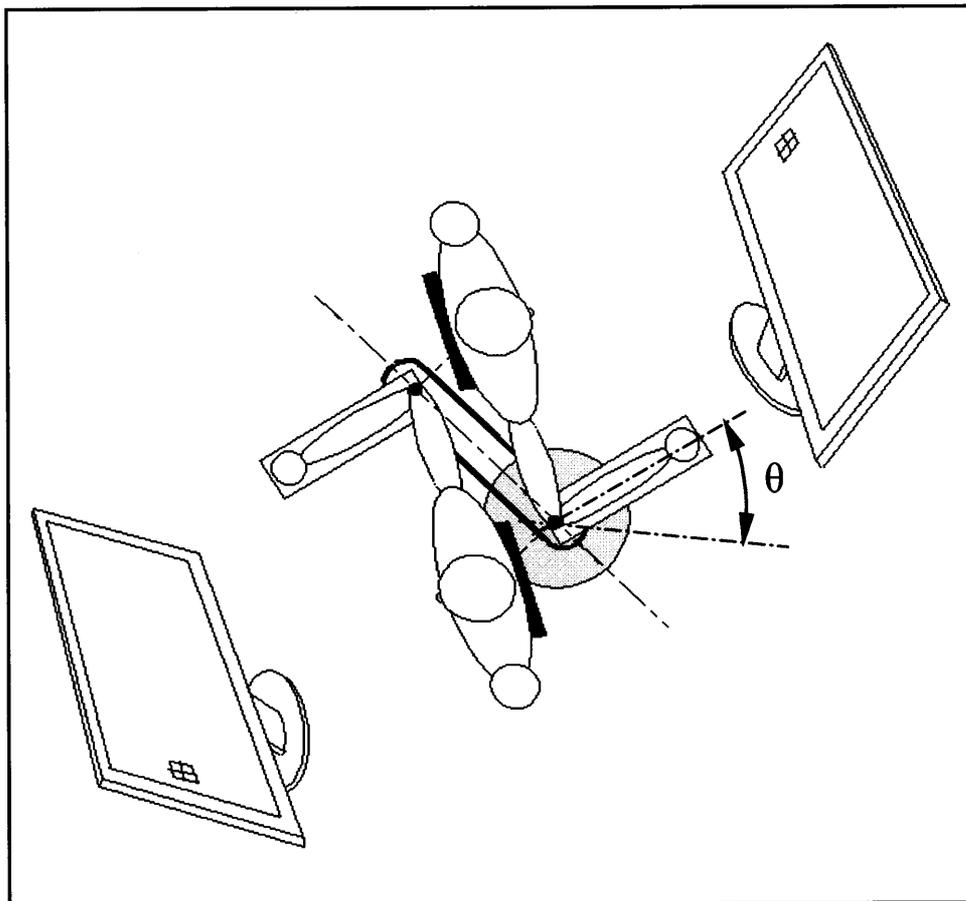


図 3.1 実験システムの説明図

3.2 腕をゆっくり動かした時の静的な実験

前に述べた実験方法より，腕をゆっくり動かした時の実験を行った．腕に発生した力・変位を計測する．その後，トルク・角度を計測し，スレーブの協調特性に関係があると思われるトルクと角度に着目し解析を行った．

図 3.2～3.12 は一人の被験者において，回転された時間に配列されたものである．上の図は腕をゆっくり動かした時のトルクと角度の時間軌跡を表し，下の図は角度 - トルク線図である．

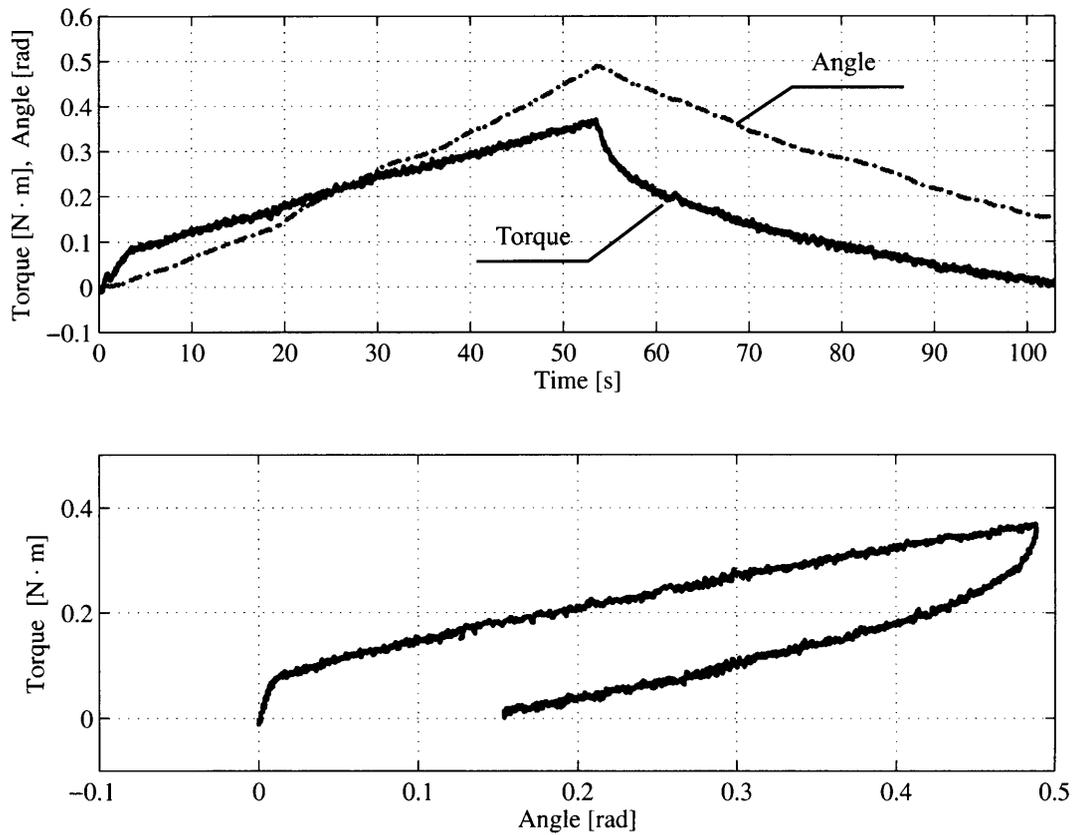


図 3.2 静的な実験結果・回転時間 103 秒

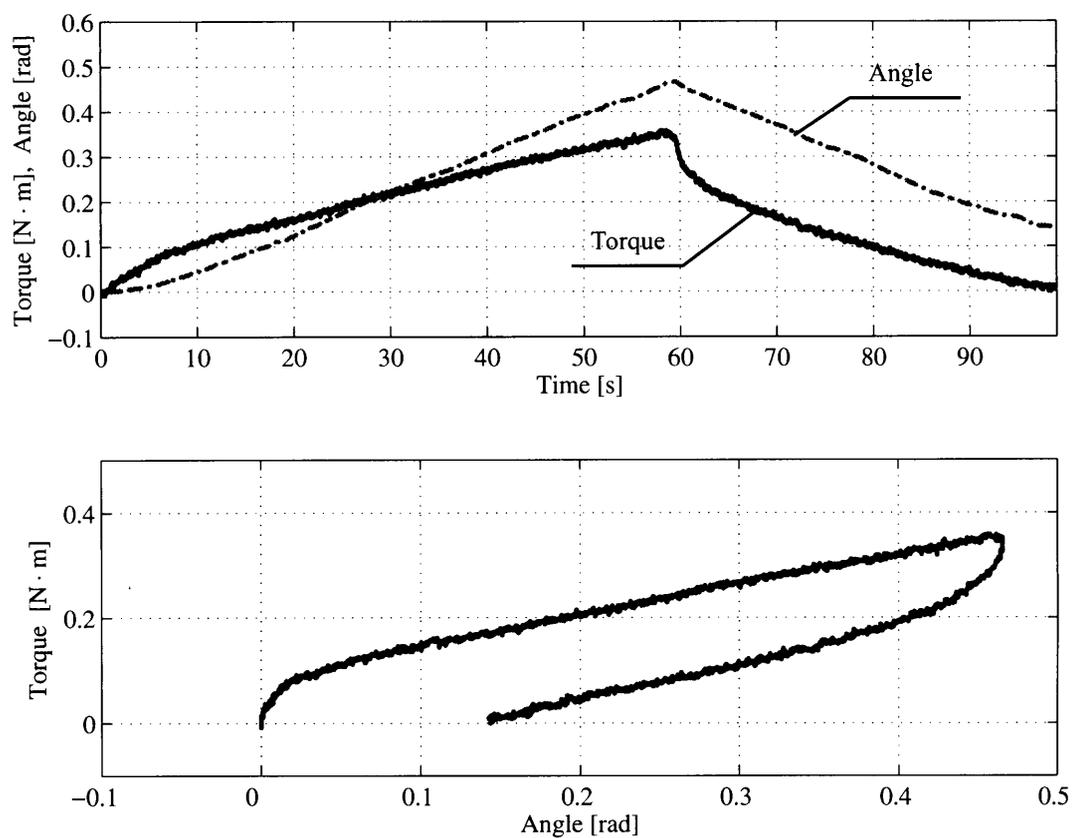


図 3.3 静的な実験結果・回転時間 99 秒

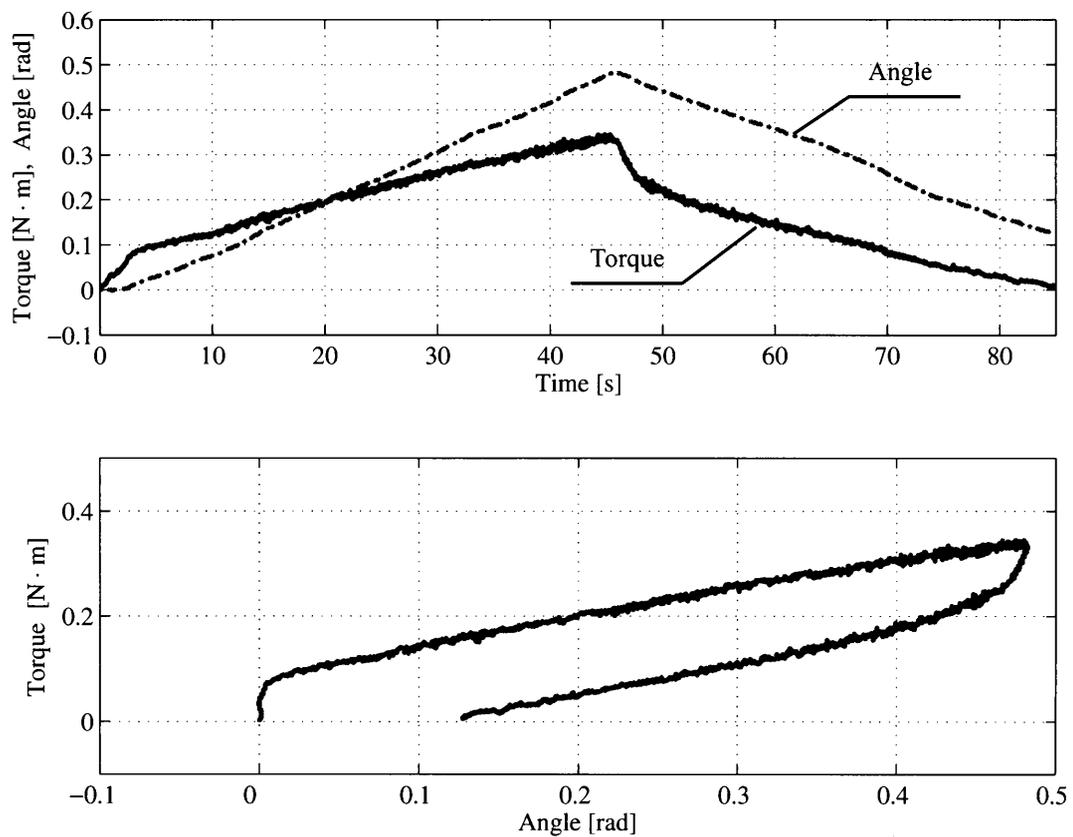


図 3.4 静的な実験結果・回転時間 85 秒

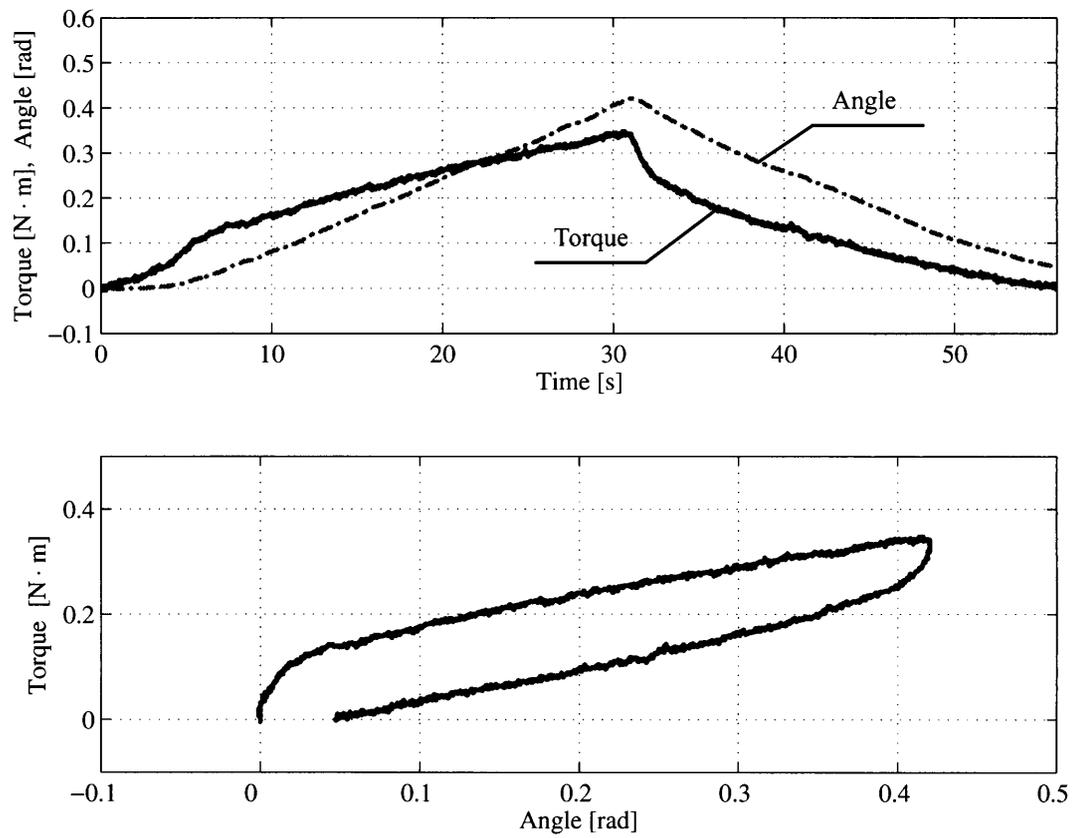


図 3.5 静的な実験結果・回転時間 56 秒

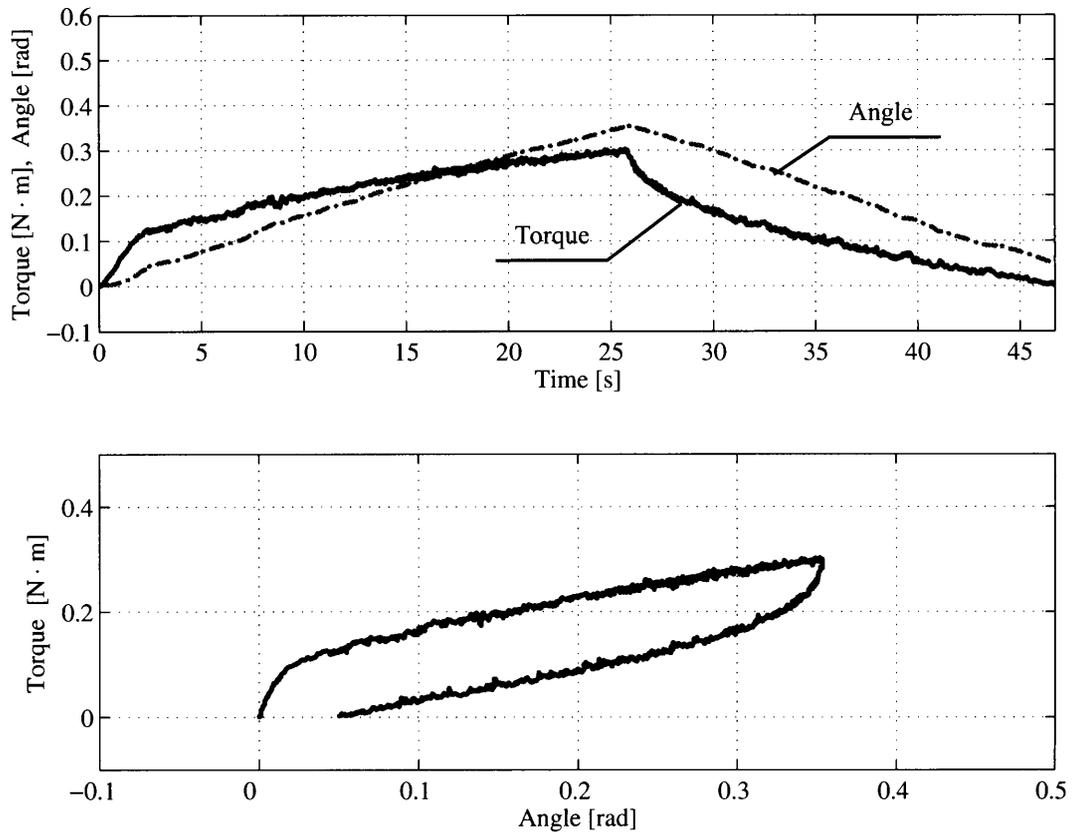


図 3.6 静的な実験結果・回転時間 47 秒

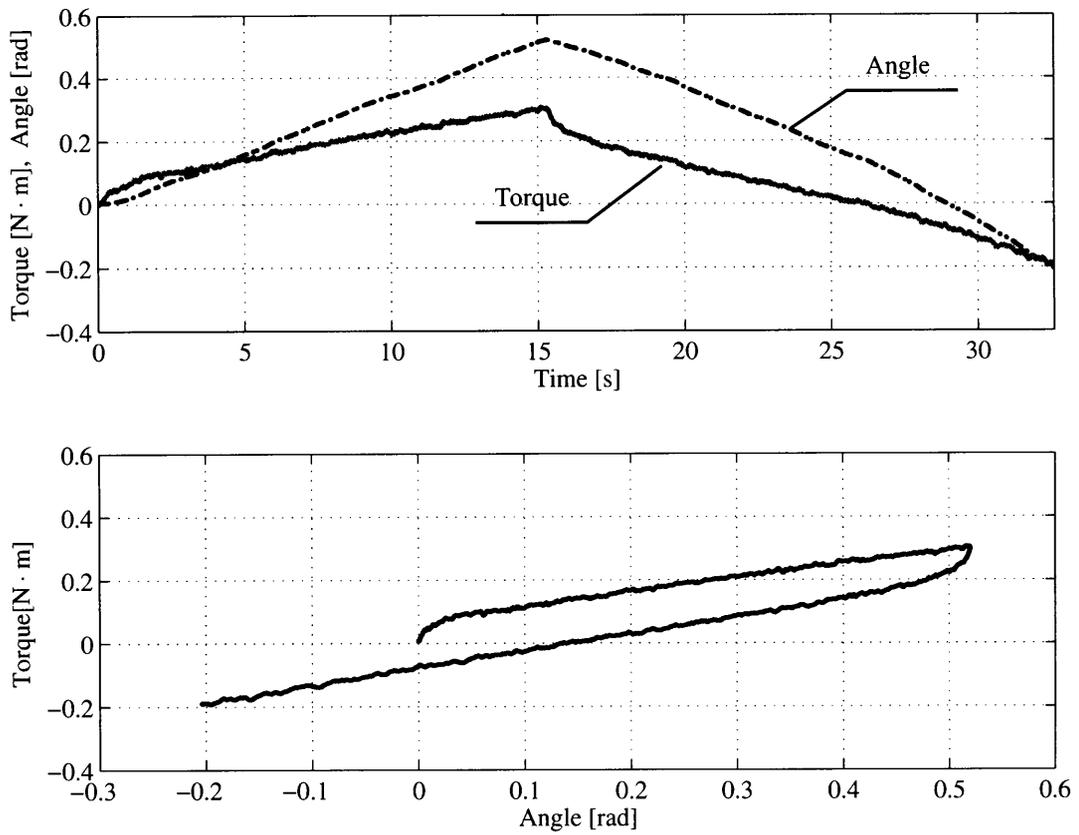


図 3.7 静的な実験結果・回転時間 33 秒

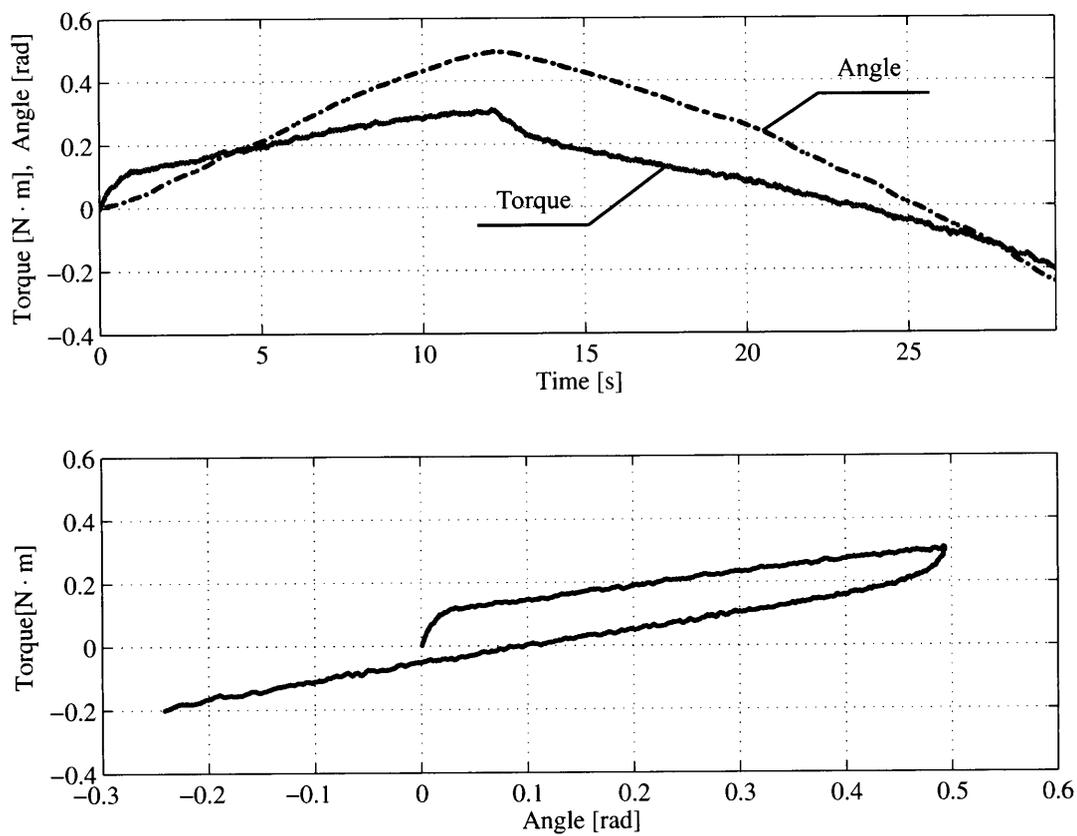


図 3.8 静的な実験結果・回転時間 30 秒

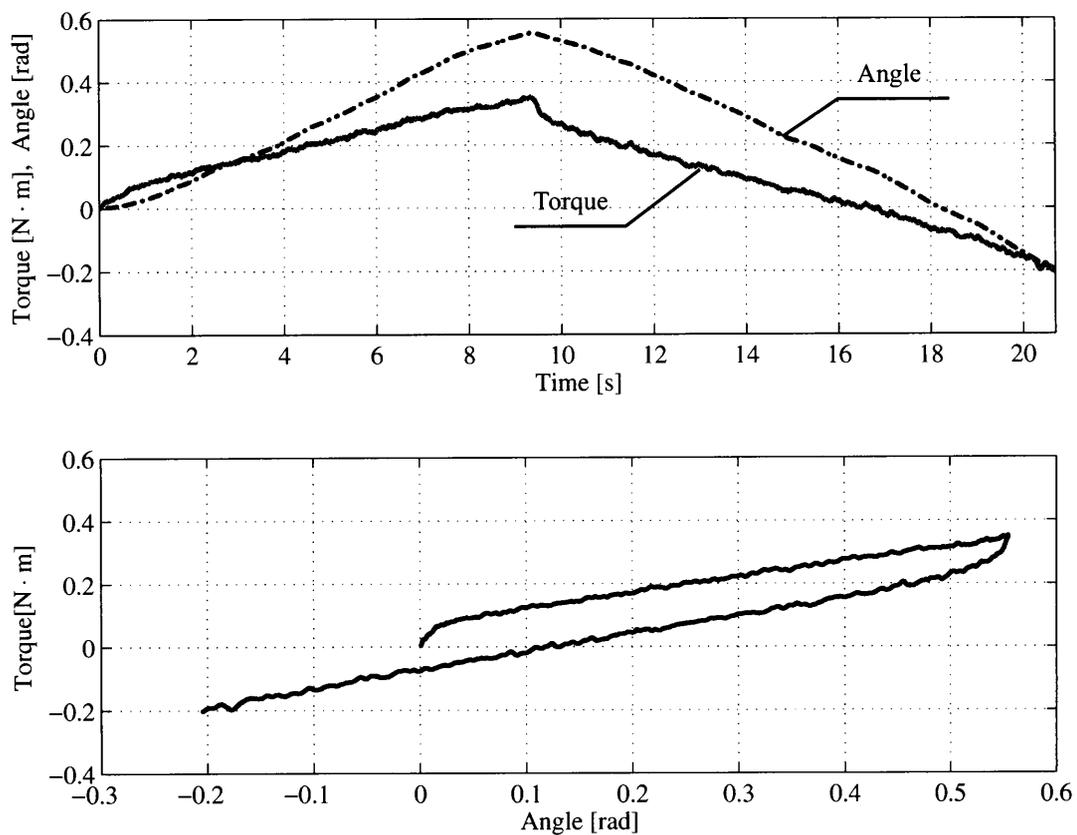


図 3.9 静的な実験結果・回転時間 21 秒

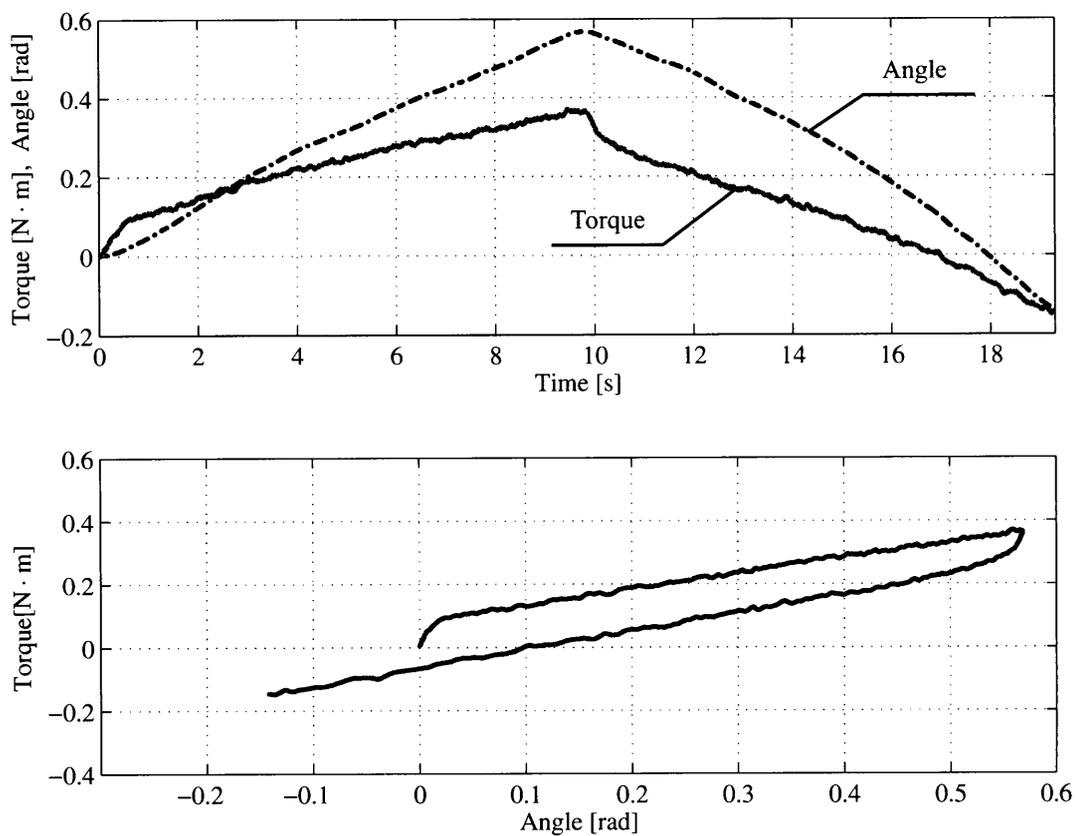


図 3.10 静的な実験結果・回転時間 20 秒

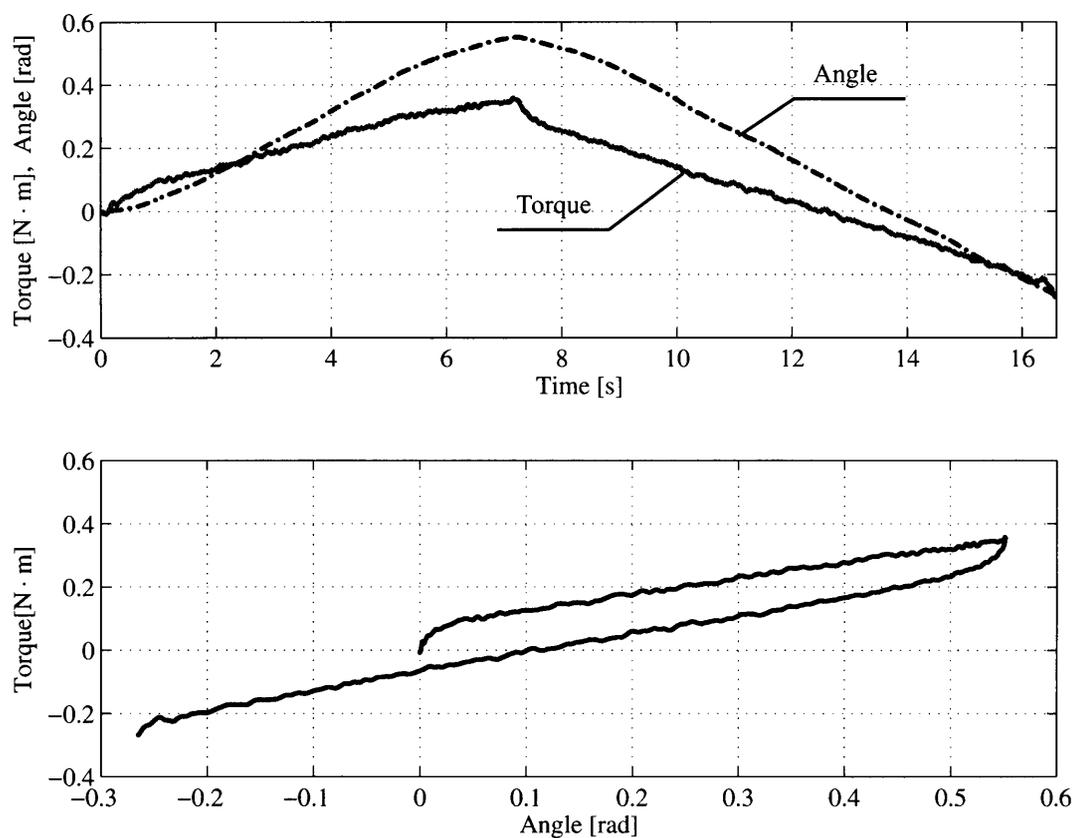


図 3.11 静的な実験結果・回転時間 16.5 秒

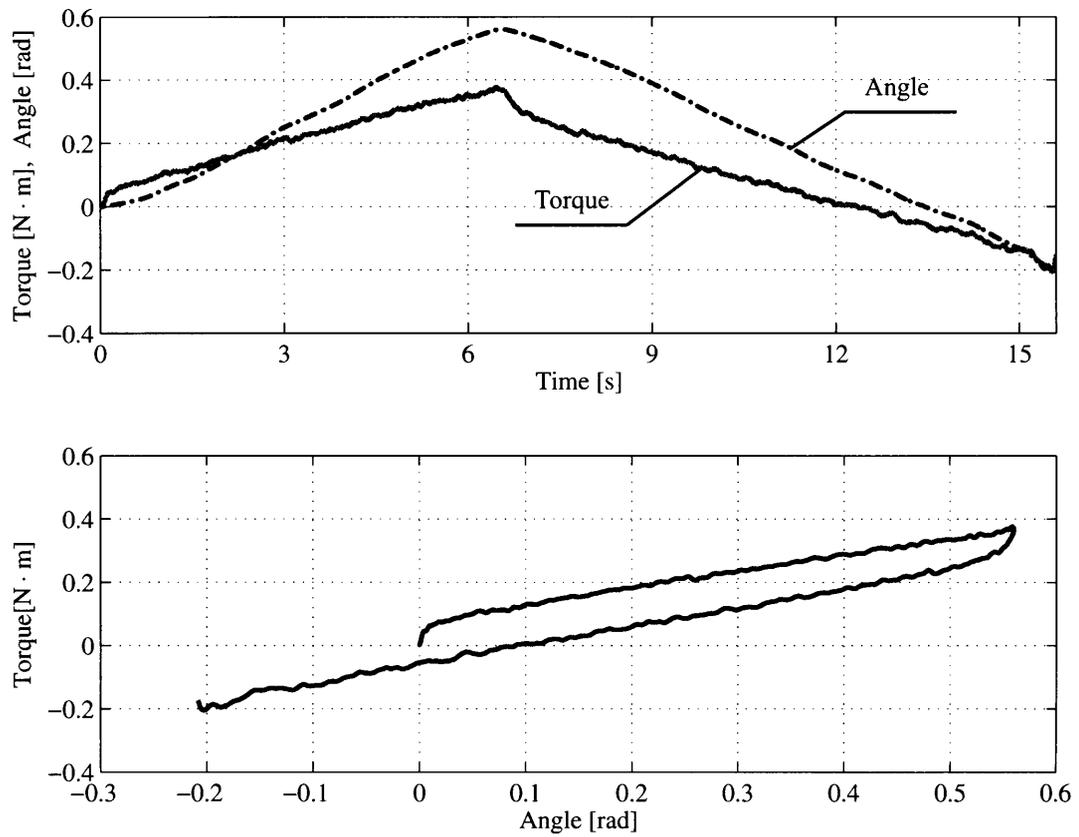


図 3.12 静的な実験結果・回転時間 15.5 秒

図 3.2～図 3.12 の角度－トルク曲線は全て同じような形である。

ここでは、図 3.13 を例として腕の静的な実験特性を説明する。

本実験では、腕がゆっくり動かされたので、式

$$I_h \ddot{\theta} + c \dot{\theta} + k\theta + \tau_f = \tau_{\text{int}} \quad (2.6)$$

により、 $\ddot{\theta} \approx 0$, $\dot{\theta} \approx 0$ の時、

$$k\theta + \tau_f = \tau_{\text{int}} \quad (3.1)$$

となる。

腕が CW 方向に動き、A 点から B 点まで一定勾配で進み、この間線形ばね特性を示す。

その後 B 点から CCW 方向に外力の方向を変化させると直後は急勾配でトルクが減少し、次第にその勾配は緩やかになる。

後に CW 方向と同じ勾配になり、その後は線形を維持する。

この結果から CW 方向と CCW 方向ともに線形に到達したばね定数は同一であることがわかった。また図に示すように、CW 方向の直線部と CCW 方向の直線部との間では同じ幅で常に同じ大きさのある摩擦トルクが存在することもわかった。

このような静的な実験では、腕の慣性抵抗のトルクは無く、それに変位に依存するばね定数は常数であることから、速度に依存する粘性の影響は出ないことは必然である。

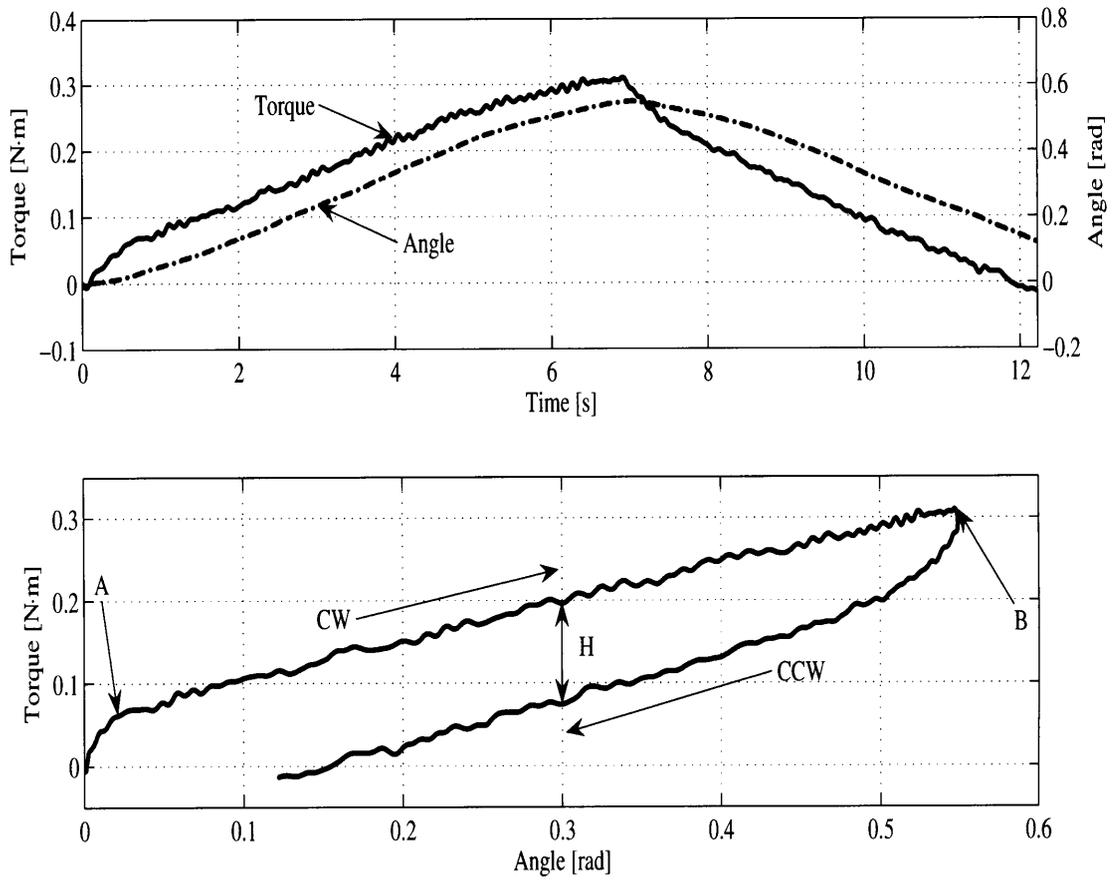


図 3.13 静的な実験結果・回転時間 12 秒

3.3 腕を速く動かした時の動的な実験

前に述べた実験方法により，腕を早く動かした時の動的な実験を行った．腕に発生した力・変位・加速度を計測する．その後，スレーブの協調特性に関係があると思われるトルクと変位と加速度に着目し解析を行った．

図 3.14～3.23 は一人の被験者において，回転された時間に配列されたものである．これらの図は腕が速く動いた場合の腕の特性を求めたもので比較的大きな加速度が生じるものである．上の図はトルクと角度と角加速度の時間軌跡を表し，下の図は角度 - トルク線図である．

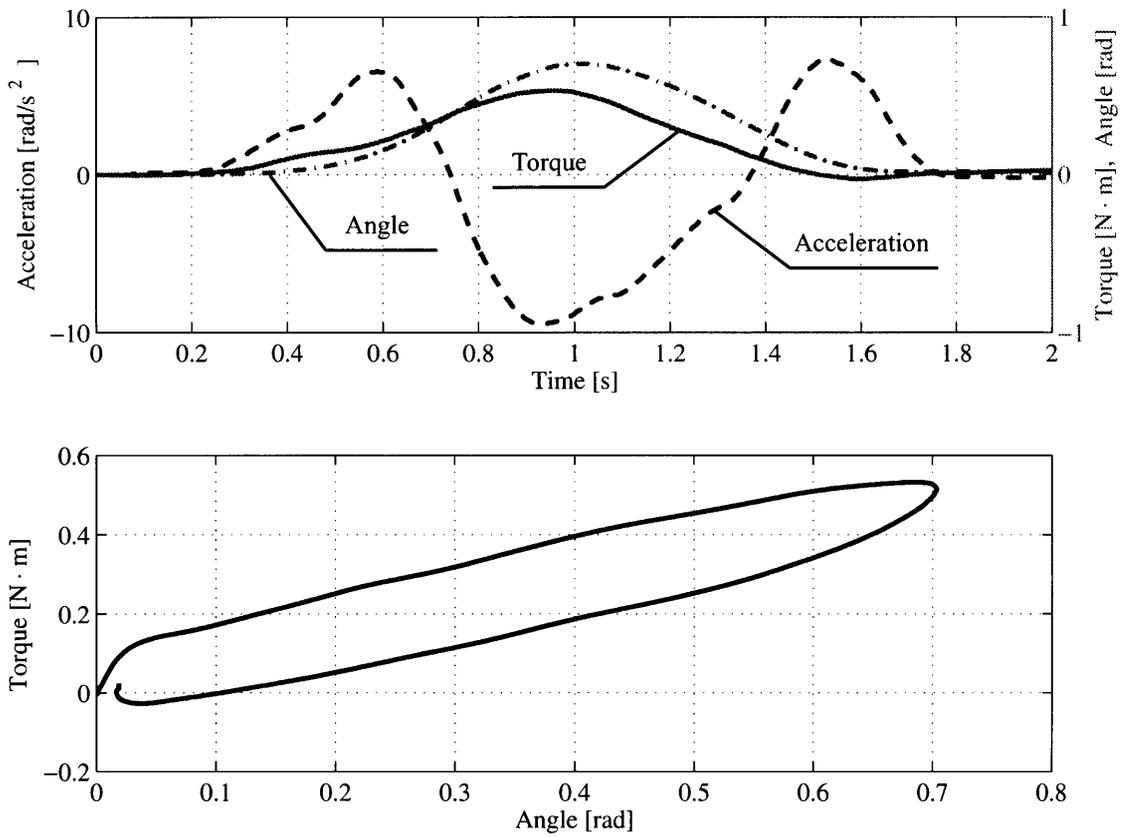


図 3.14 動的な実験結果・回転時間 2 秒

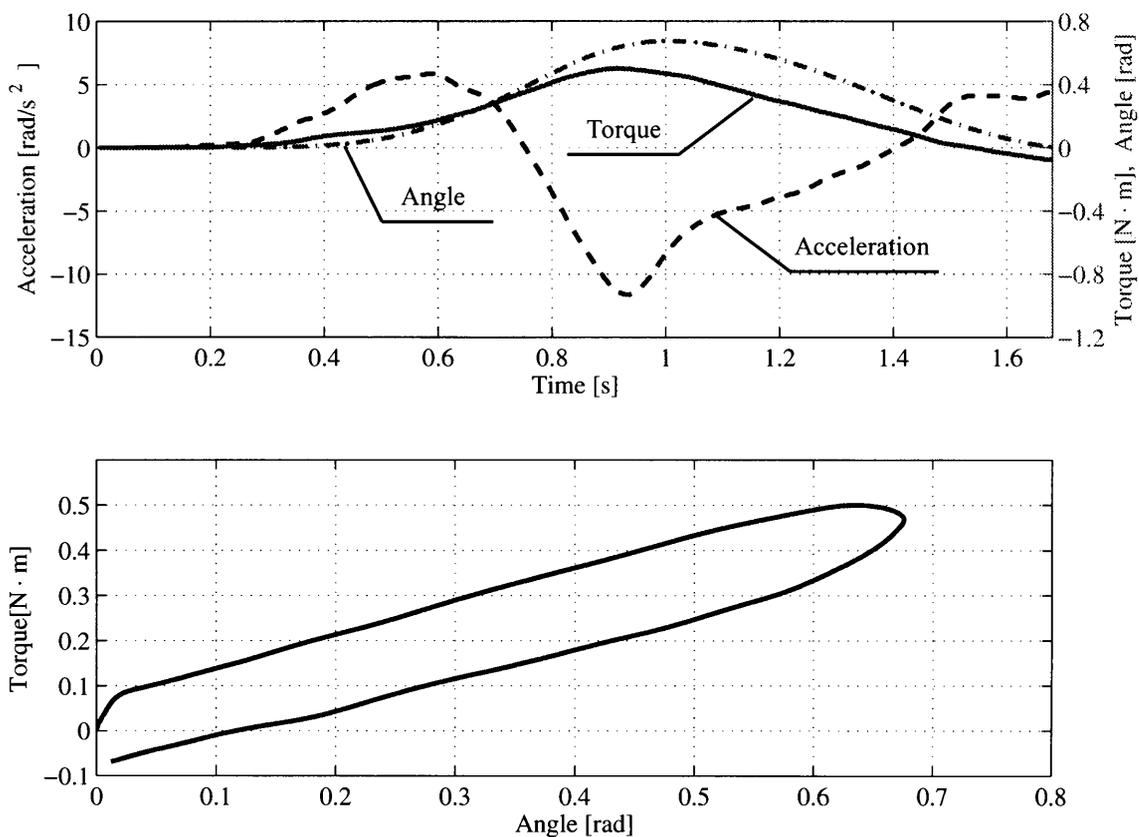


図 3.15 動的な実験結果・回転時間 1.7 秒

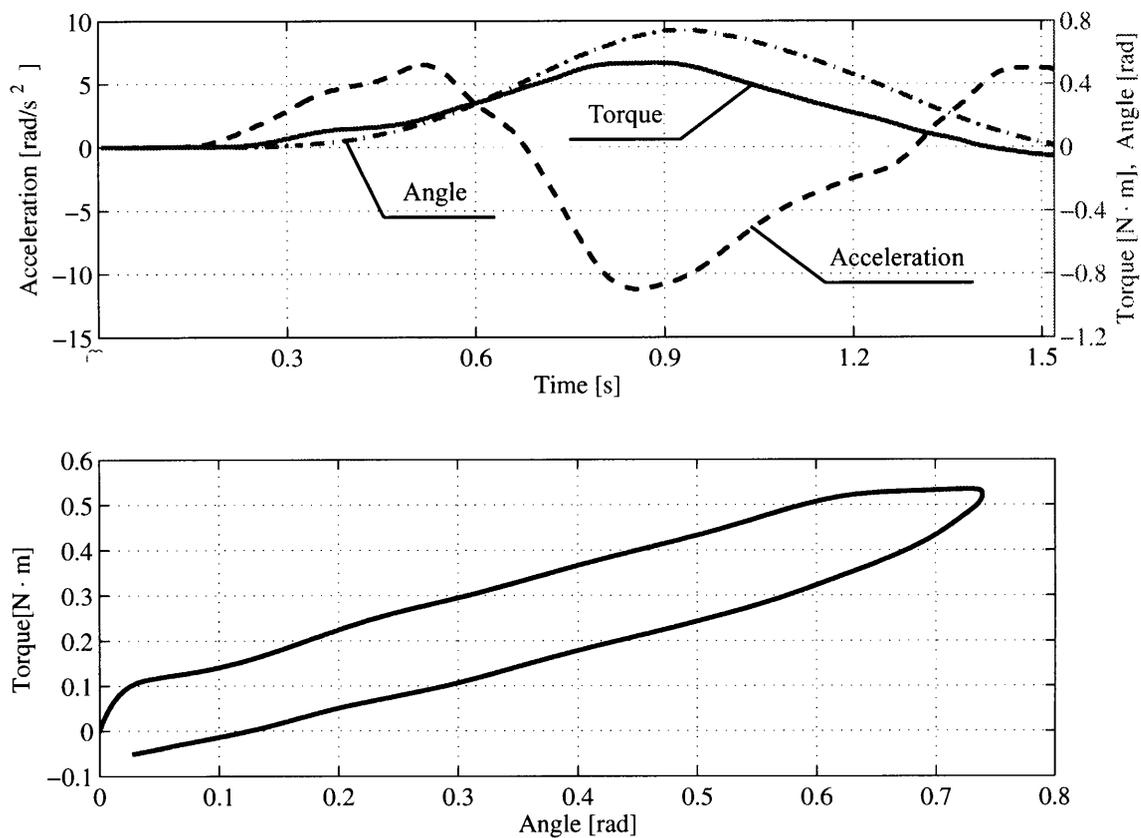


図 3.16 動的な実験結果・回転時間 1.5 秒

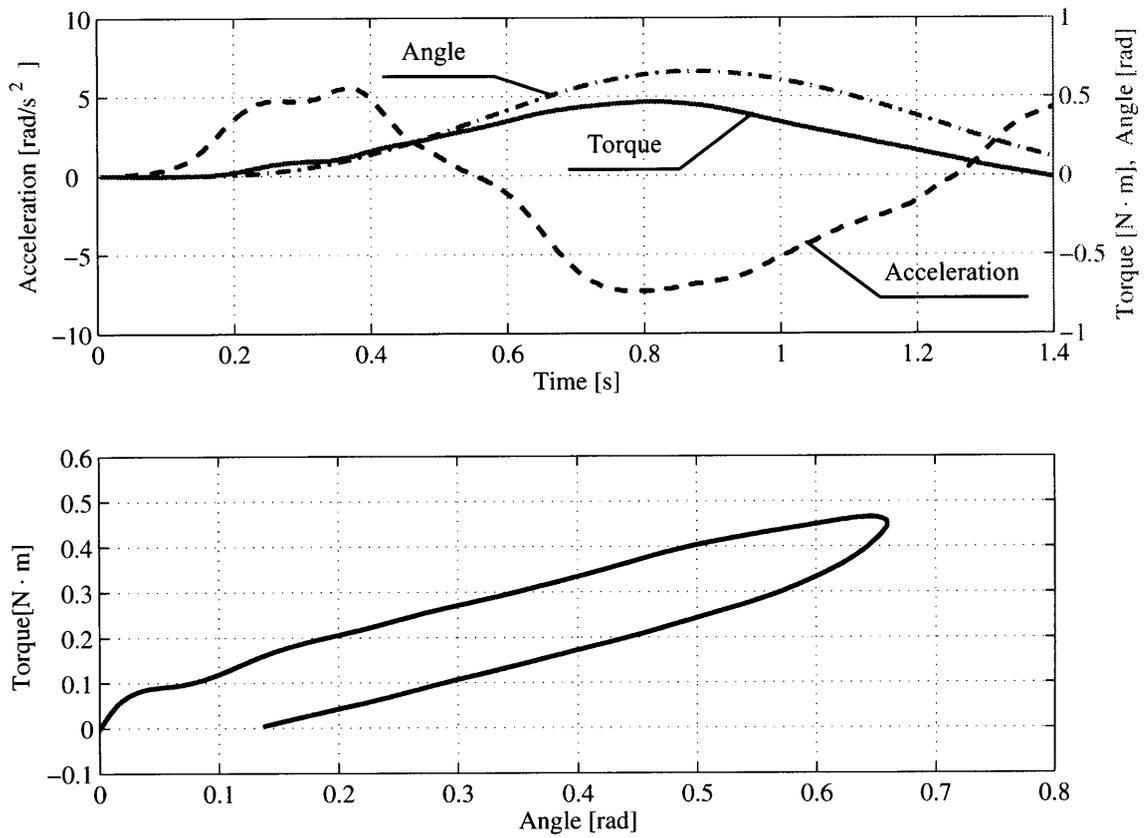


図 3.17 動的な実験結果・回転時間 1.4 秒

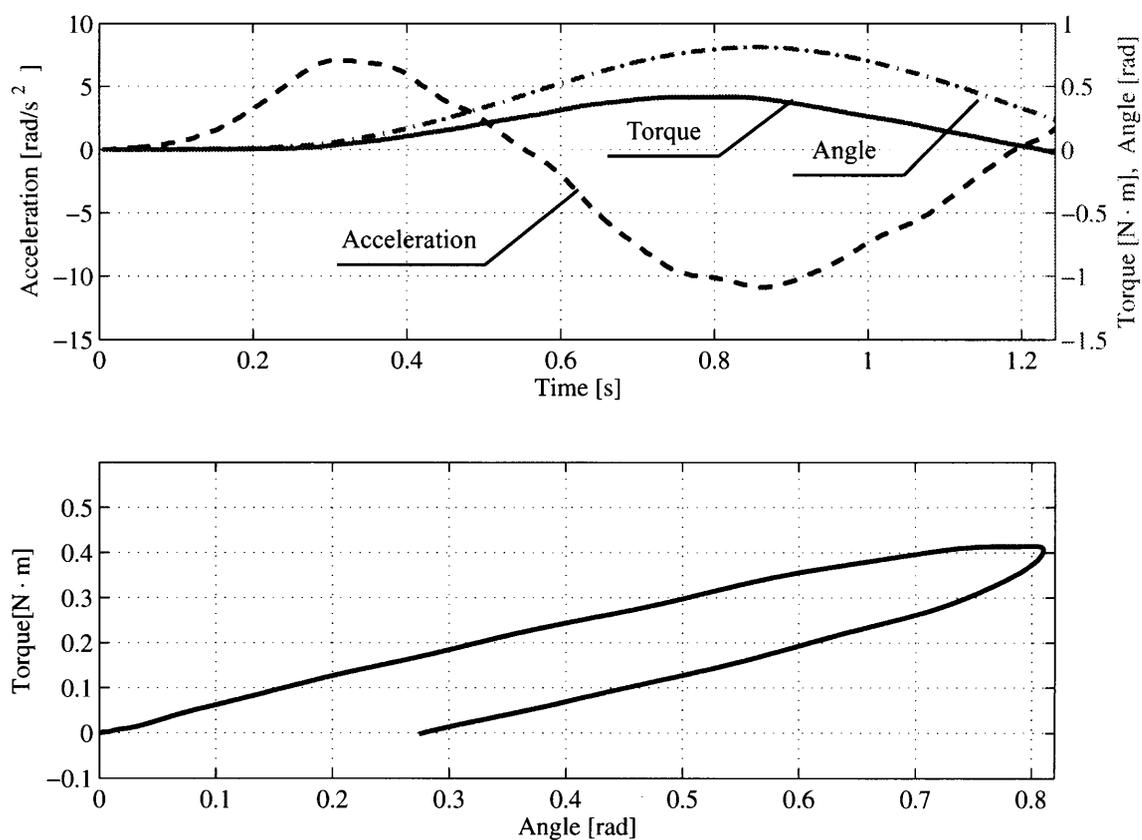


図 3.18 動的な実験結果・回転時間 1.2 秒

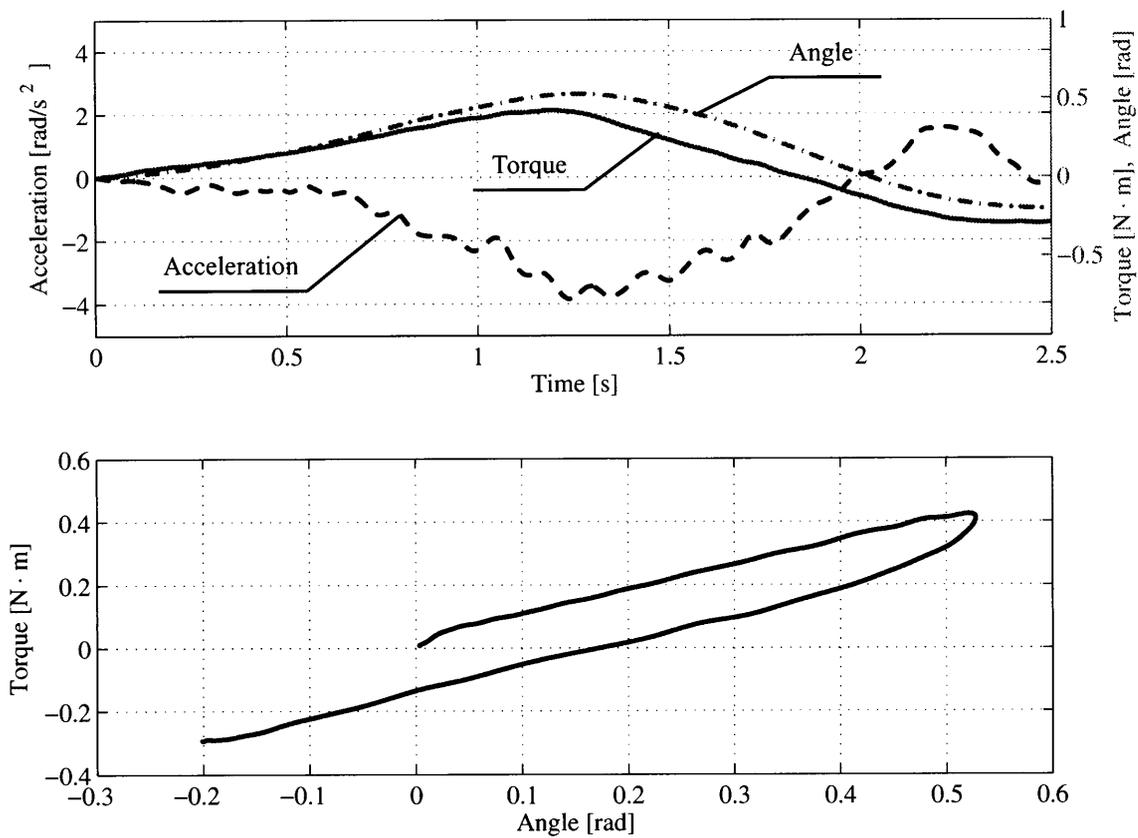


図 3.19 動的な実験結果・回転時間 2.5 秒

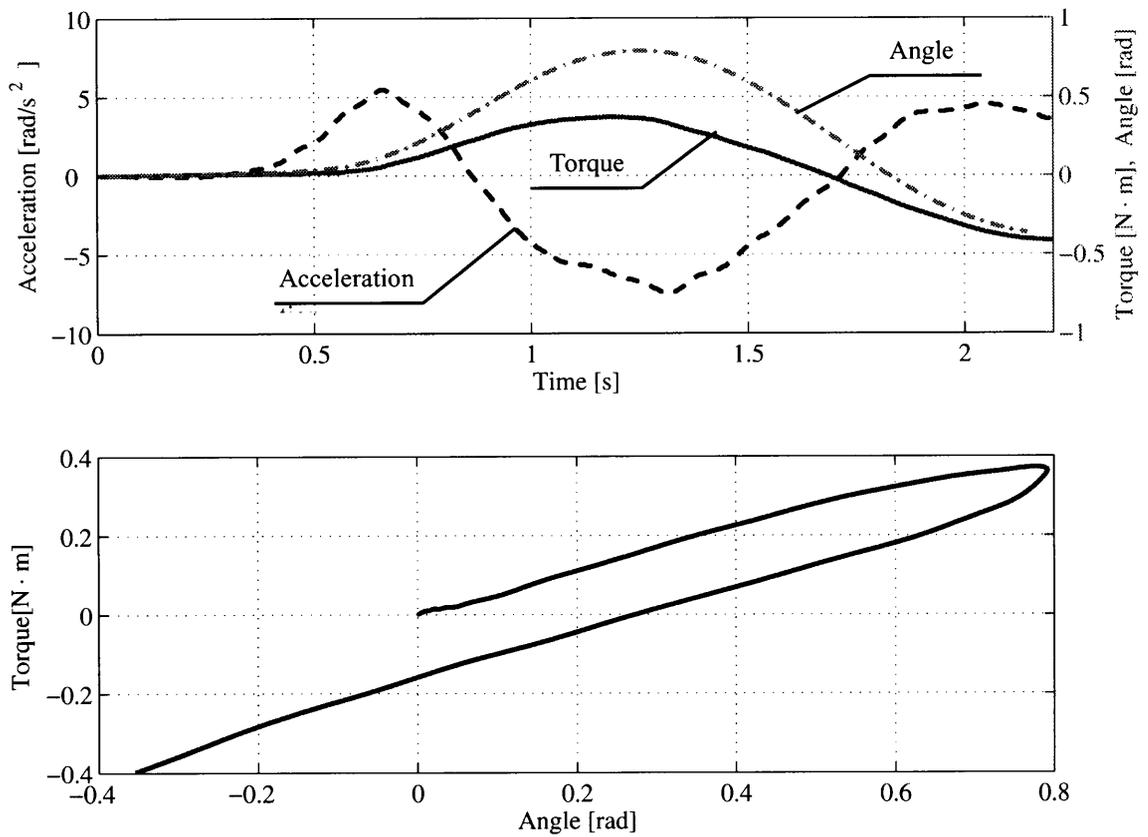


図 3.20 動的な実験結果・回転時間 2.2 秒

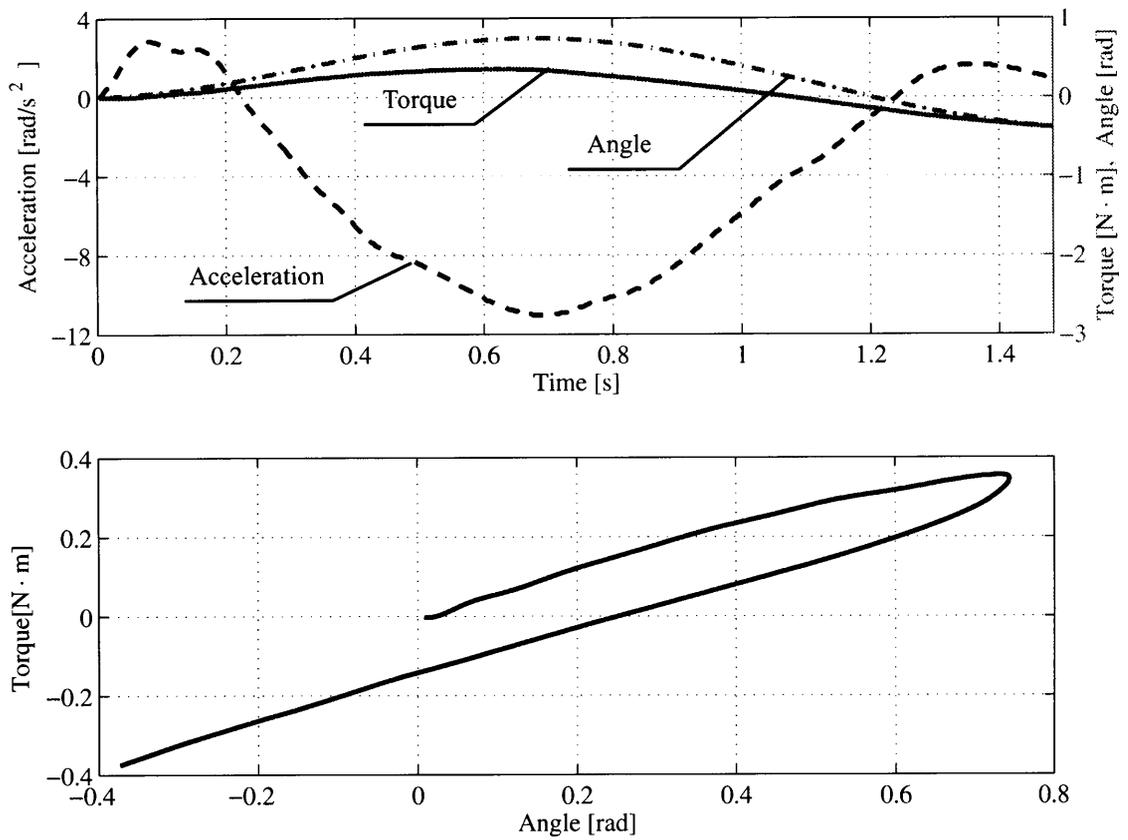


図 3.21 動的な実験結果・回転時間 1.5 秒

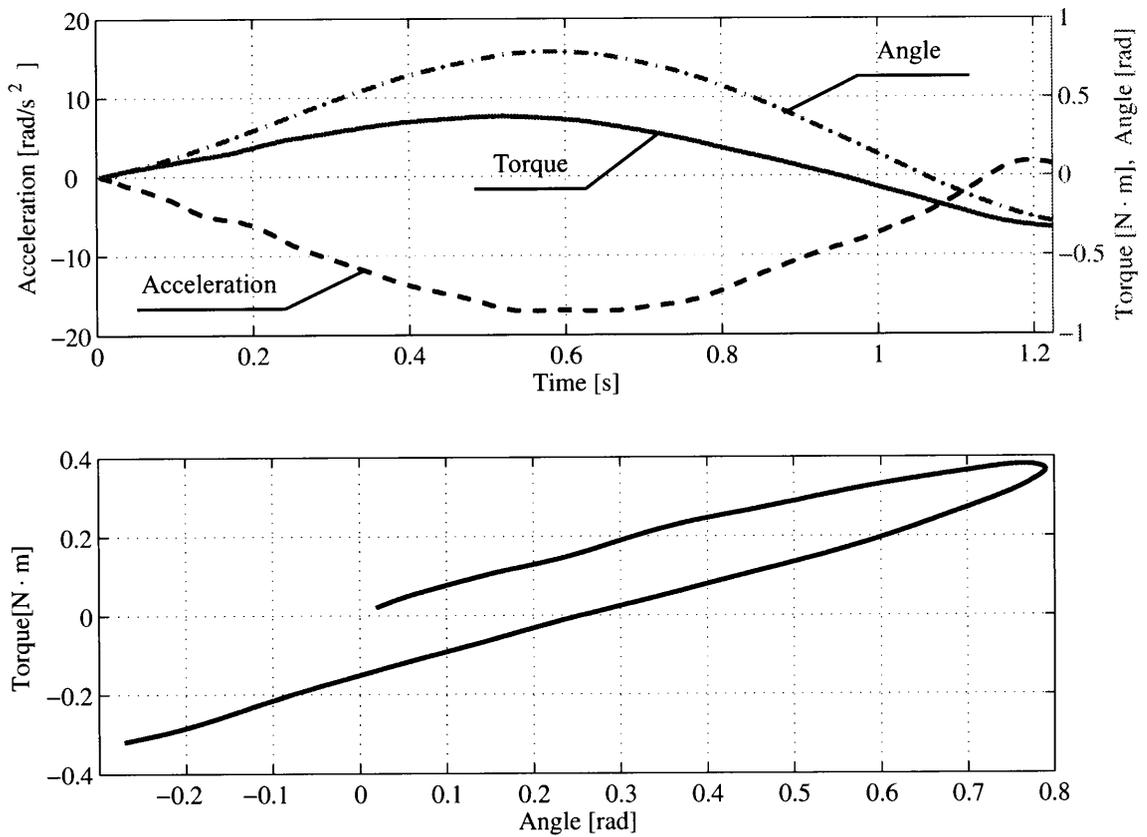


図 3.22 動的な実験結果・回転時間 1.2 秒

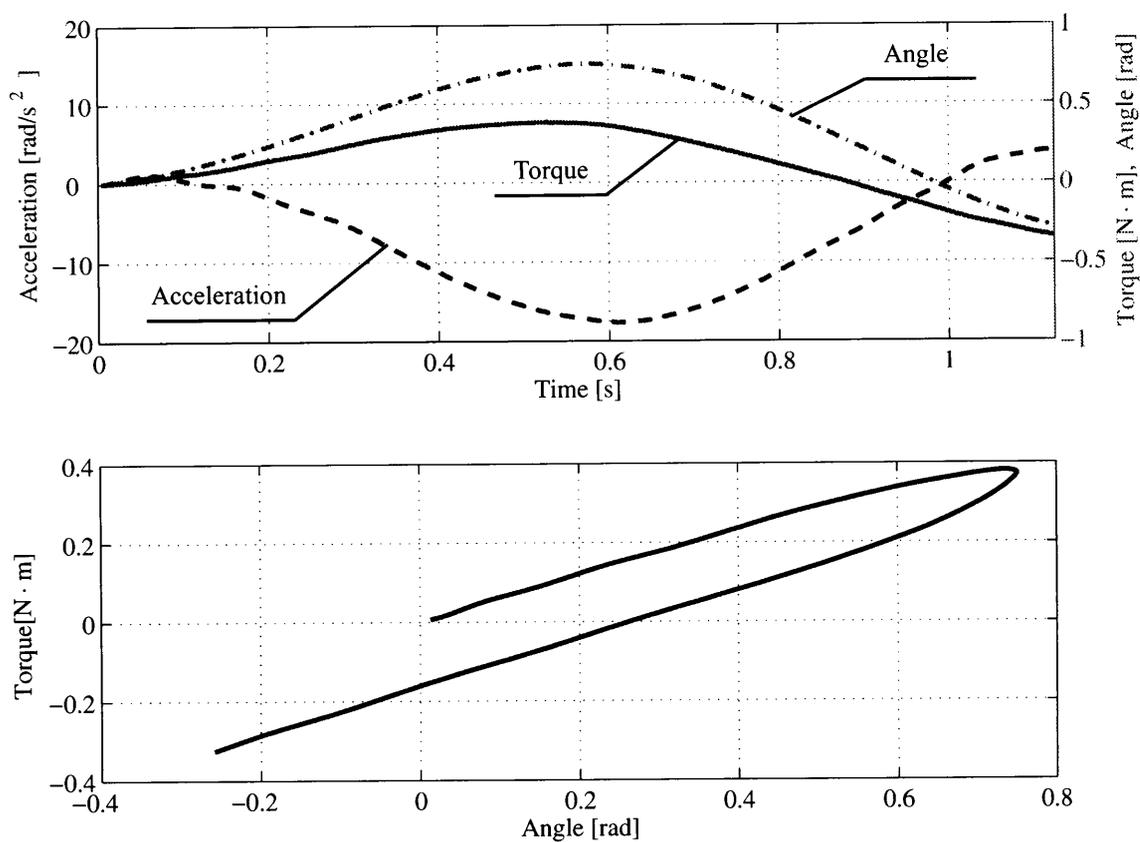


図 3.23 動的な実験結果・回転時間 1.1 秒

実験中筋肉を弛緩させた状態であっても初期状態で既に摩擦トルクが含まれていると考えられる。そこで、まず腕を CCW 方向にゆっくり回転させて、それから戻った点を初期状態として全ての実験を開始した。

図 3.24, 3.25 は、前に述べた実験方法により取ったデータである。

それらの図に求められた実験結果は前の実験と同じであることがわかった。

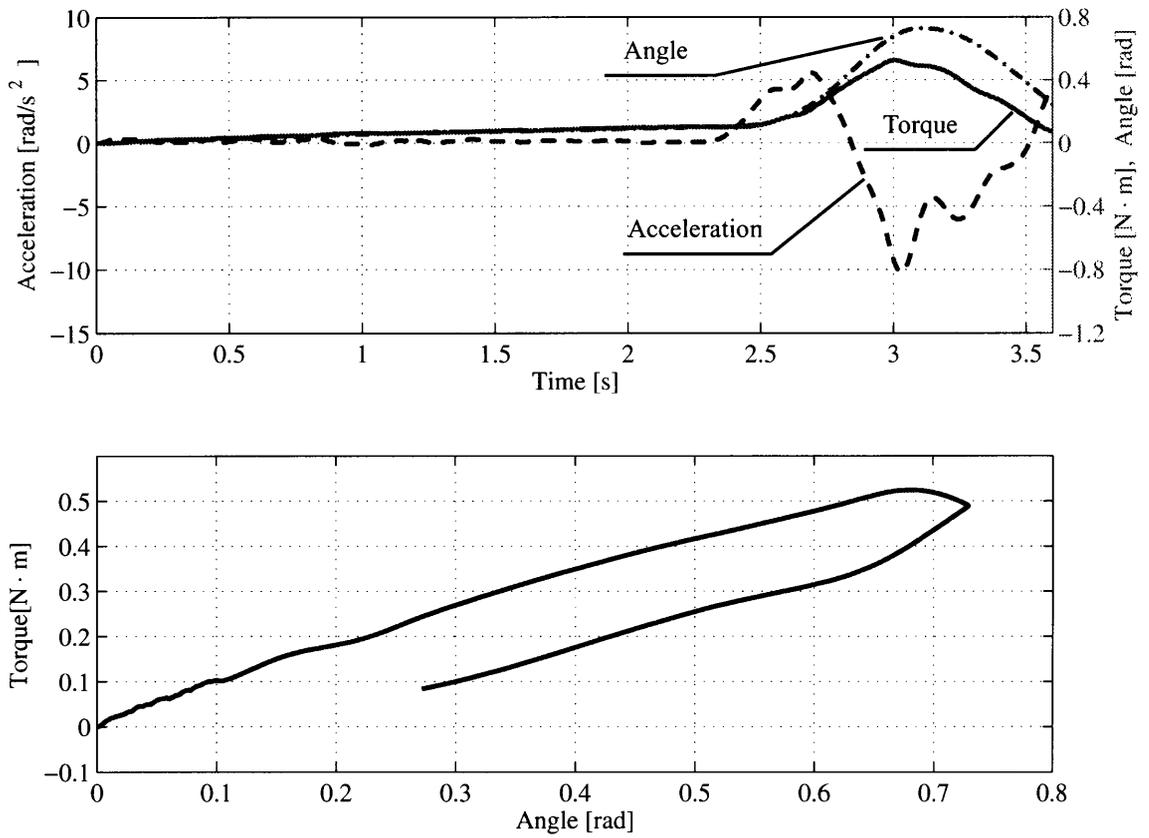


図 3.24 動的な実験結果・回転時間 3.6 秒

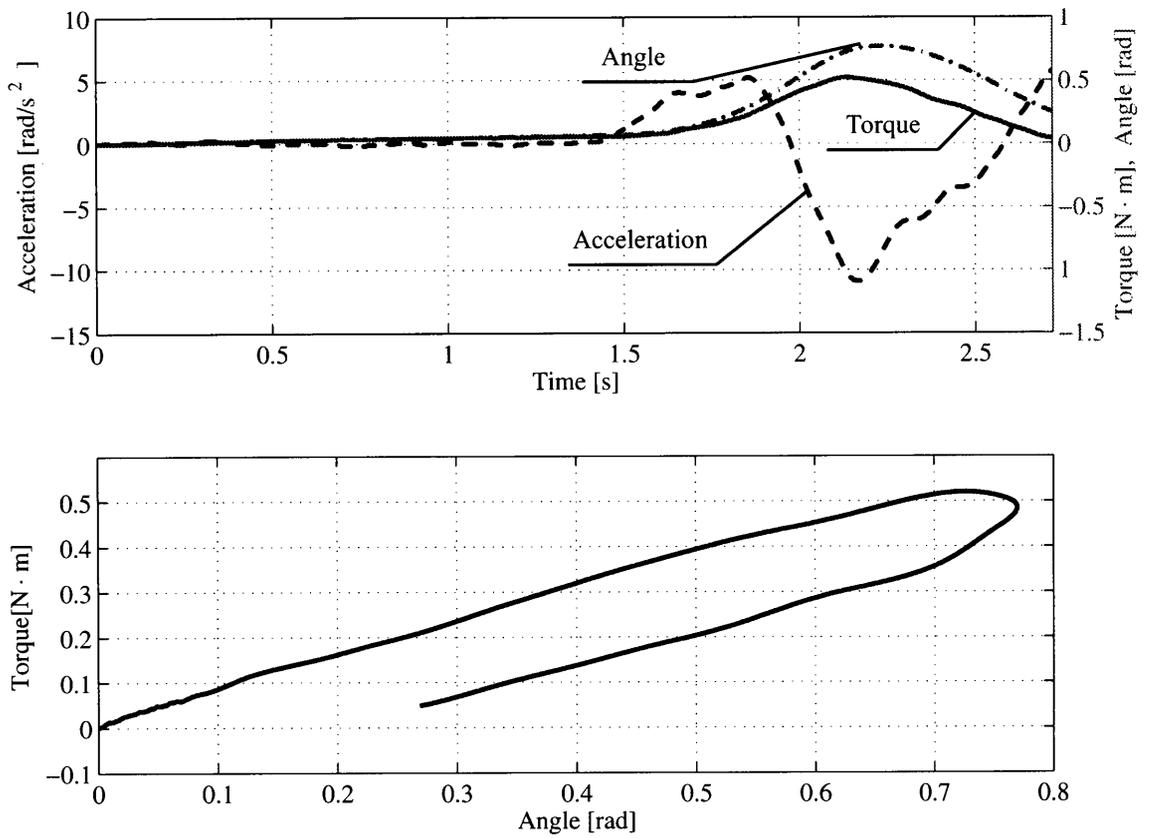


図 3.25 動的な実験結果・回転時間 2.7 秒

図 3.14～図 3.25 の角度－トルク曲線の結果はほぼ同じとなった。

ここでは、図 3.26 を例として、腕の動的な実験特性を説明する。

スレーブの腕のモデルの特性は式

$$I_h \ddot{\theta} + c \dot{\theta} + k\theta + \tau_f = \tau_{\text{int}} \quad (2.6)$$

により、式

$$c \dot{\theta} + k\theta + \tau_f = \tau_{\text{int}} - I_h \ddot{\theta} \quad (3.2)$$

となる。

$I_h \ddot{\theta}$ は腕の慣性抵抗のトルクで、 τ_{int} はアームロードに加わったトルクである。

その際の腕の慣性モーメントは計算により求めたものを用いた。同図のトルク特性はアームロードに加わったトルクから腕の慣性抵抗のトルクを除いたもの $\tau_{\text{int}} - I_h \ddot{\theta}$ である。この場合は図に示したトルクは $c \dot{\theta} + k\theta + \tau_f$ となる。

図 3.26 により、静的な実験結果と同じように、A 点から B 点まで一定勾配で速く進んで、静的な場合と同じばね定数を示した。

また CW 方向と CCW 方向ともに線形に到達したばね定数は同一であることも分かった。

それから CW 方向の直線部と CCW 方向の直線部との間の幅 H も静的な実験結果と同じような大きさであることも示した。

この結果から速度が変わっても粘性ではなく摩擦の影響は出ることがわかった。もし粘性があると考えたら、A 点から B 点まで、角度－トルク線図中のトルクは直線にならないで、幅 H も静的な実験結果と同じではなくなることから、速度に依存する粘性はないと考えられる。また動的な実験でもばね・摩擦トルク特性は変わらないことも分かった。

また腕が速く動いた時のトルクの角度－トルク線図と腕をゆっくり動かした時のトルクの角度－トルク線図はほぼ同じ形であることにより、動的な実験でもばね・摩擦トルク特性は変わらないこともわかった。

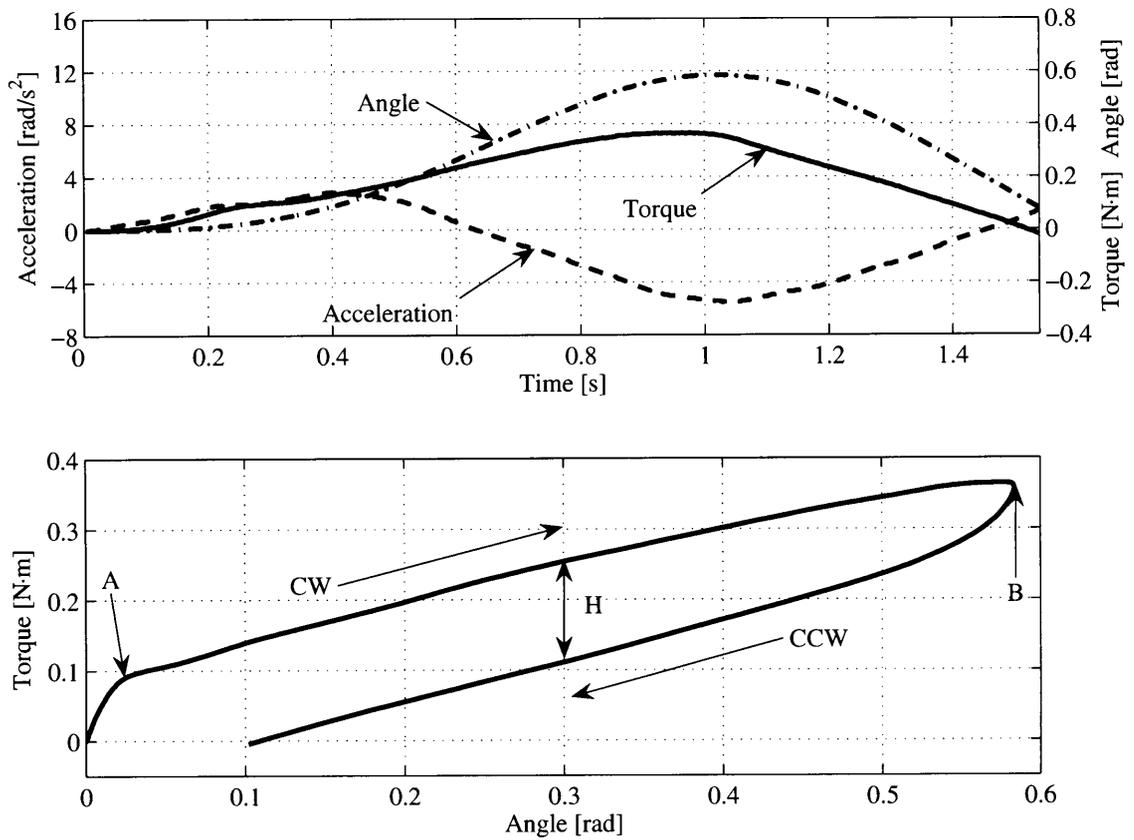


図 3.26 動的な実験結果・回転時間 1.6 秒

3.4 マスターとスレーブの回転運動の実験結果と考察

本実験では、マスターとスレーブの腕の回転1自由度協調作業モデルに基づいて、スレーブの腕の特性を調べた。その結果より、

- ・ばね定数は一定であることが分かった。
- ・ダンパーはないことが分かった。
- ・摩擦のような力が存在することが分かった。

つまり、下の図に示すように、弛緩した状態では、人間の腕の力学的なモデルは従来考えられていた質量・ばね・ダンパーではなく、質量・ばね・摩擦のモデルであることが分かった。

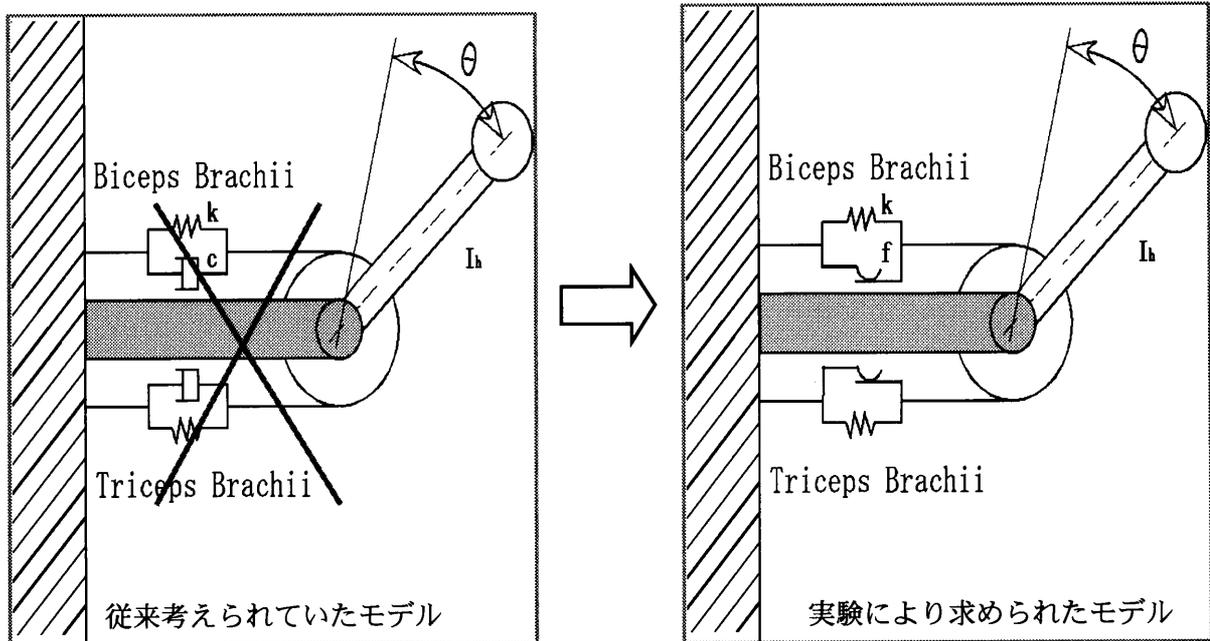


図 3.27 弛緩した状態の人間の腕のモデル

ここで、前に弛緩した状態である腕の力学的なモデルにおいて、摩擦とばねの特性はもう一度説明することが必要である。

まず、次の実験をした。

実験方法：

一人の被験者はスレーブとして、右腕をアームロードに載せる。肘は前腕の回転中心としてアームロードと同軸を保つ。もう一人の被験者は手でアームロードを回転する。まず約 0.028 rad の角度を回転して、そのまま3秒で止まっている。その後また 0.028 rad の角度を回転して、そのまままた3秒で止まっている。このように、約 0.56 rad の角度までのデータを計測した。

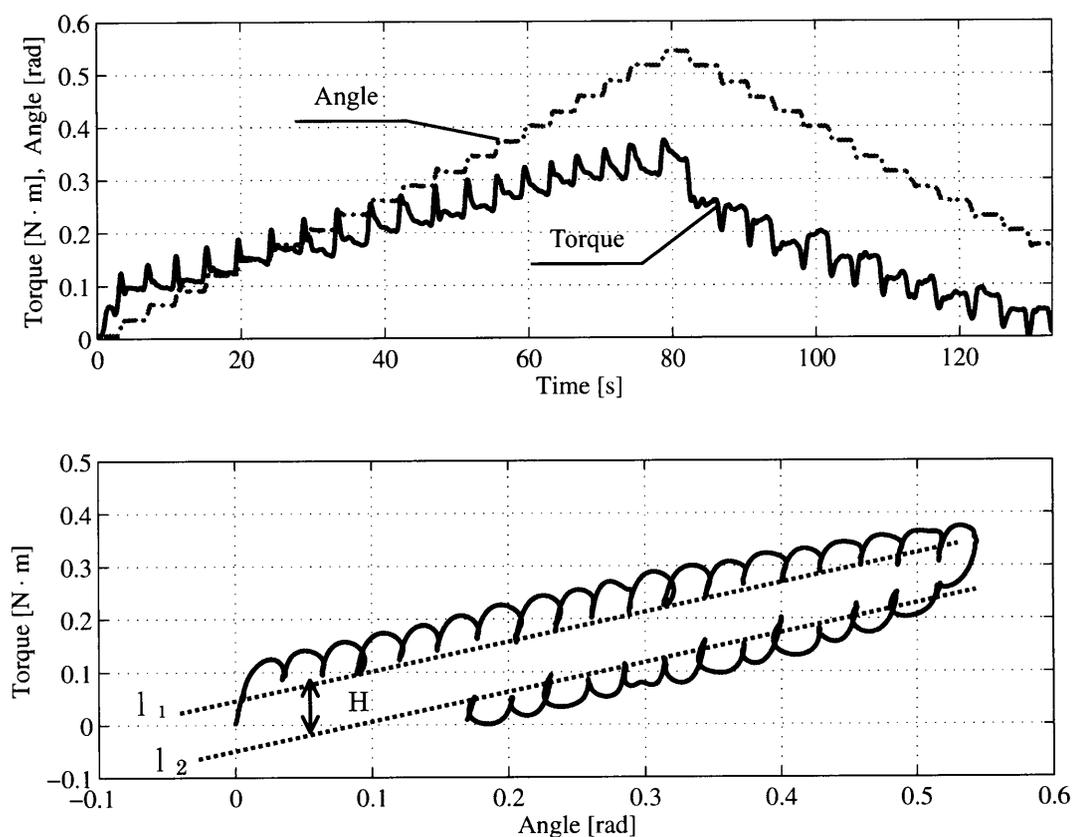


図 3.28 弛緩した状態の腕の摩擦とばねの検証

回転運動中でスレーブの腕はマスターに動かされ、回転運動中で姿勢は崩れないように自然なポーズをとり、二頭筋と三頭筋とも弛緩していたままである。スレーブの腕に発生したトルク・角度を計測する。

図 3.28 の下の図中、点線 l_1 は CW 方向への回転に 3 秒止まった所のトルクの値を結んだ線であり、点線 l_2 は CCW 方向への回転に 3 秒止まった所のトルクの値を結んだ線である。

この結果により、図 3.29 に示すシステムと同じように、弛緩した状態の腕のばね特性がはっきり現れ、一定のばね定数であることが分かった。それから、そちらの場所に止まっている時、動作していないので、動摩擦はゼロであることが分かる。この場合、慣性力 $I\ddot{\theta}$ 及び速度に依存する粘性力 $c\dot{\theta}$ もない。従って、図 3.28 に示す、点線 l_1 と点線 l_2 の幅 H は静摩擦となる。

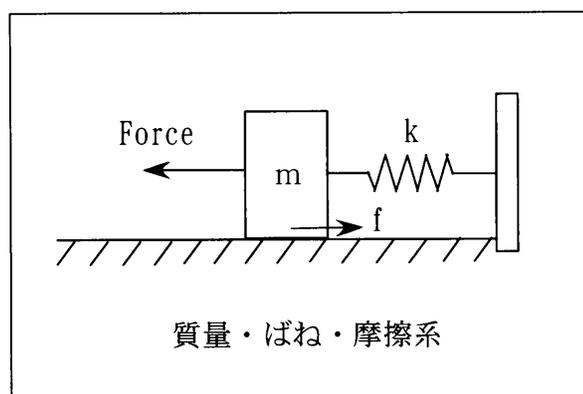


図 3.29 質量，ばね，摩擦システム

第4章 マスターとマスターの回転運動の実験

今まで人間の腕の筋骨格モデルに基づく協調運動解析に関して、マスターとスレーブの腕の回転1自由度協調作業モデルに基づいて、スレーブの腕の特性の解析を行った。人間と協調作業できるようなロボットの制御法則を構築することが研究の目的であるから、マスターとマスターの協調運動においてマスターの腕の特性を解析する必要があると考えられる。

マスターとマスターの協調運動実験を行う前に、まずスレーブの実験者が運動の途中にマスターになった時の腕の特性について、実験を行った。

4.1 実験方法

今回の実験方法は、前に述べたマスターとスレーブの協調運動実験とは大体同じである。

マスターとスレーブの運動でスレーブの被験者は、運動の途中にマスターになる。スレーブからマスターになる時の切り替える所は二箇所あり、一つは平衡点の前、一つは平衡点の後とする。動いている腕が平衡点の前にある時にスレーブからマスターになる場合は、ばねの復元力の方向は前進方向であるが、動いている腕が平衡点の後にある時にスレーブからマスターになる場合は、ばねの復元力の方向は前進方向に対する抵抗になる。そうすると、マスターになった時に、それぞれ違う特性が求められると考えられる。

実験はスレーブの被験者が平衡点の前にマスターになる実験と平衡点の後にマスターになる実験となる。マスターになるスレーブの実験者の腕に発生したトルク・角度・角加速度を計測する。

本実験では被験者が前に述べた腕がゆっくり動いた静的な実験と同じ速度と加速度で腕を動かした。

その後、マスターとスレーブの協調特性に関係があると思われるトルクと変位と加速度に着目し解析を行った。

4.2 平衡点の前にマスターになる場合

4.1 で述べた実験方法により、平衡点の前にスレーブの実験者がマスターになる実験を行った。

図 4.1–4.5 には、上の図は平衡点の前にマスターになる場合のトルクと角度の時間軌跡を表し、下の図は角度 - トルク線図である。

これらの図により、腕が CW 方向に動き、平衡点の前にスレーブからマスターになった後、一定勾配で進み、この線形を維持するばね特性を示す。

この結果から CW 方向に線形に到達したばね定数は同一であることがわかった。つまり、弛緩した状態である腕のばね特性が現れることがわかった。

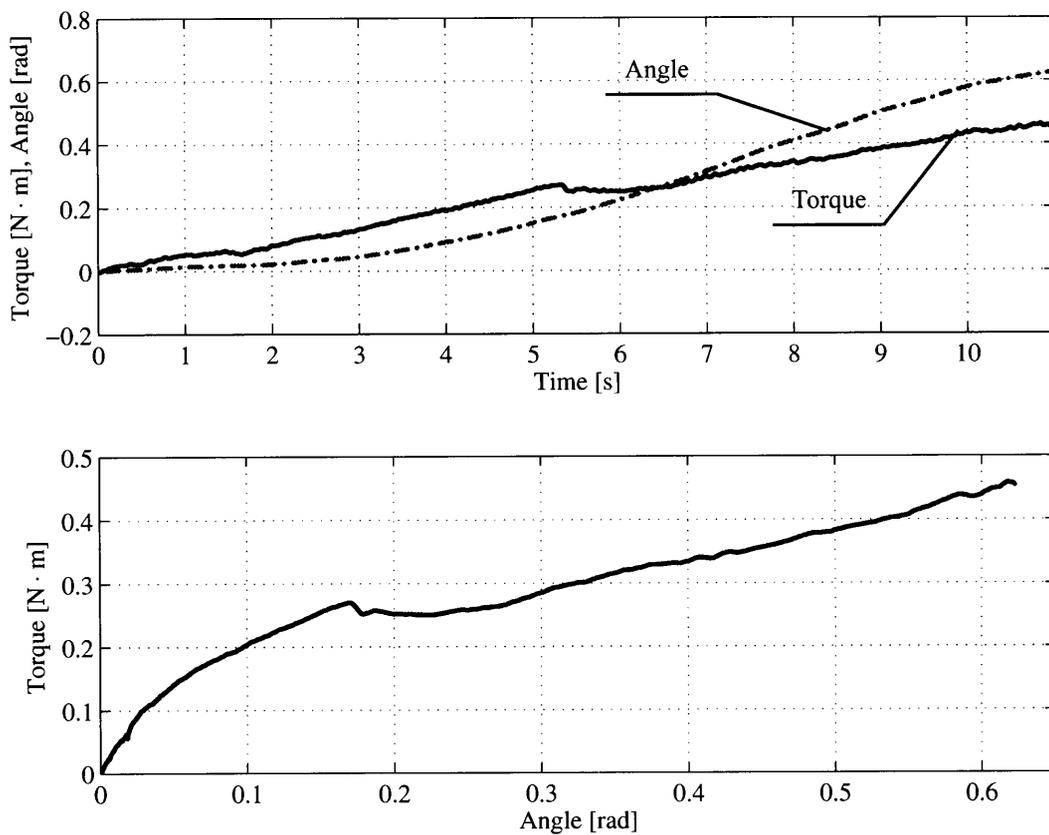


図 4.1 平衡点の前にマスターになる実験結果 1

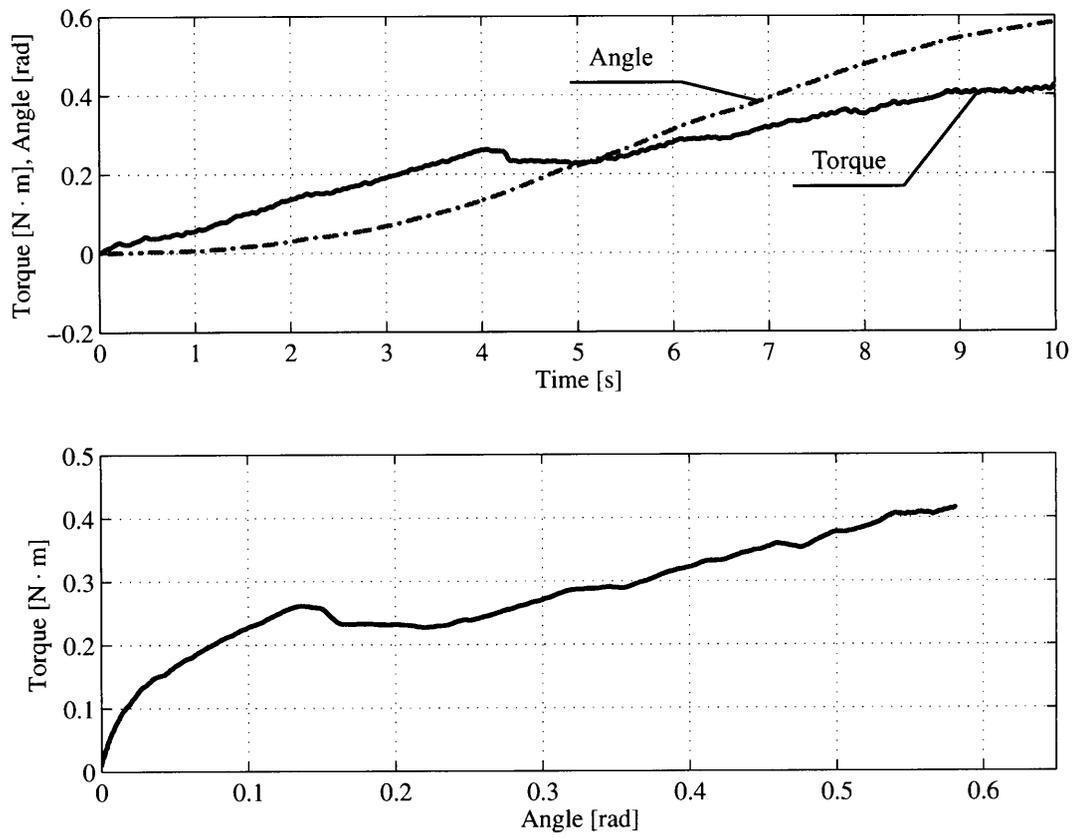


図 4.2 平衡点の前にマスターになる実験結果 2

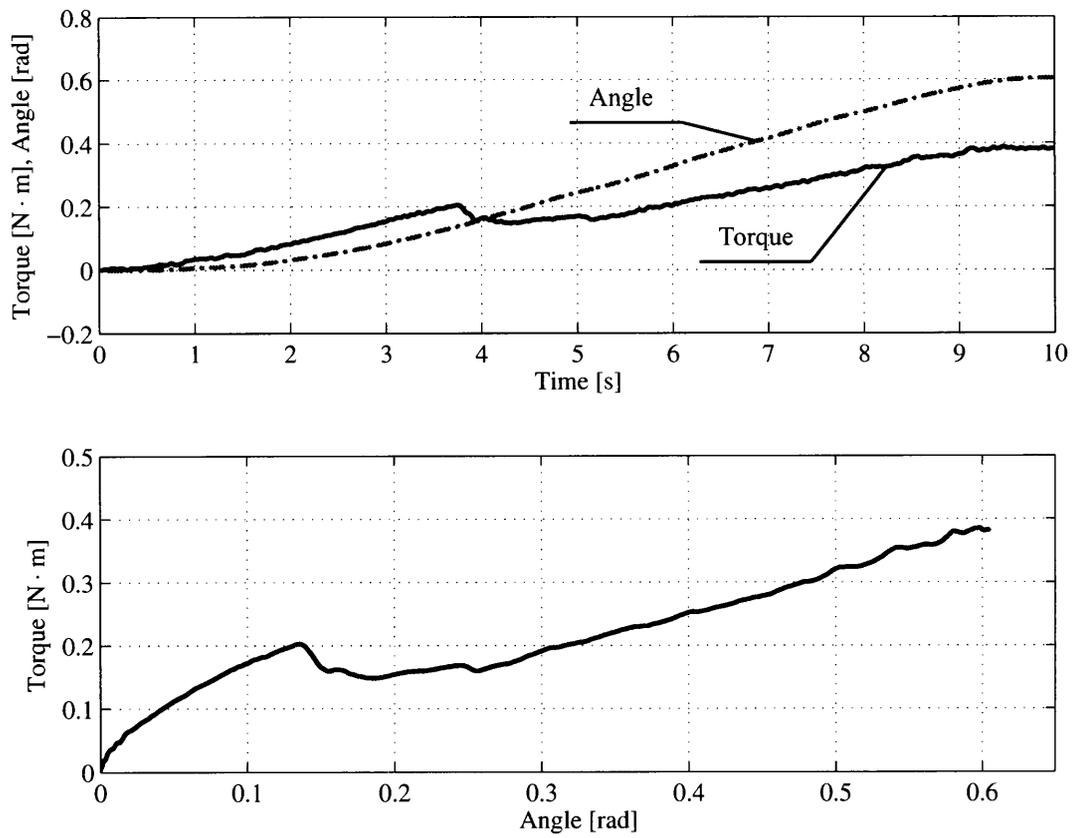


図 4.3 平衡点の前にマスターになる実験結果 3

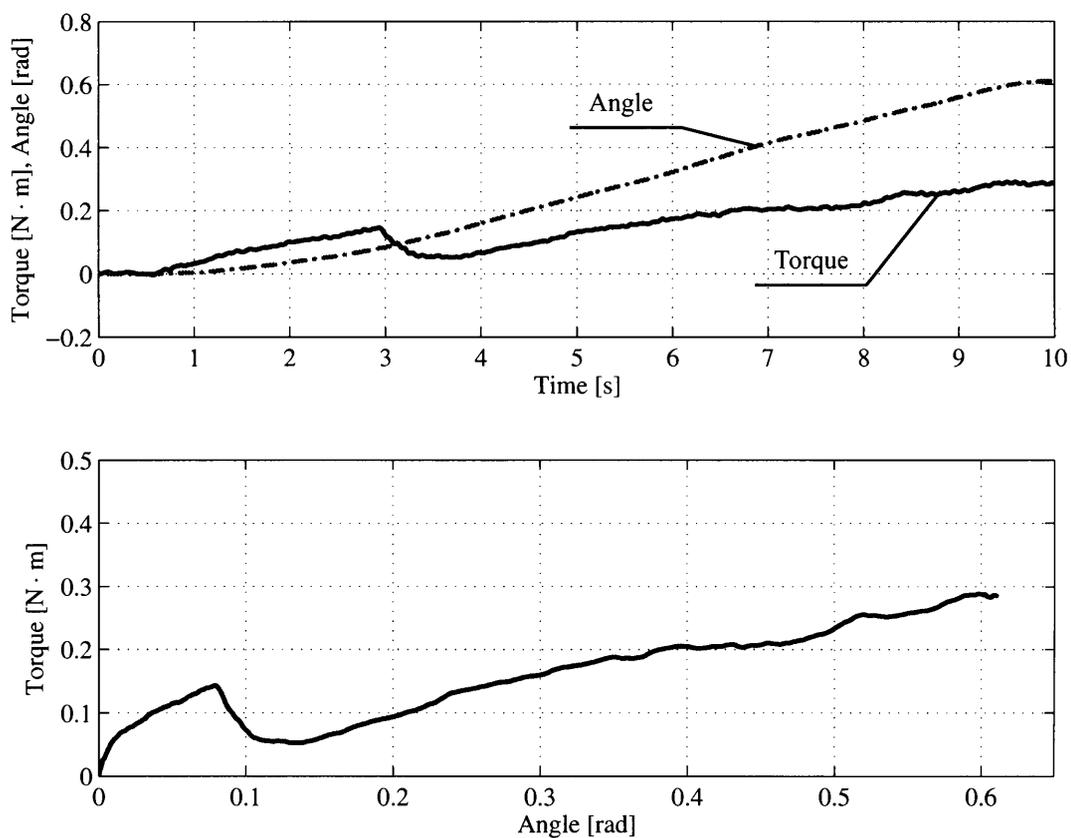


図 4.4 平衡点の前にマスターになる実験結果 4

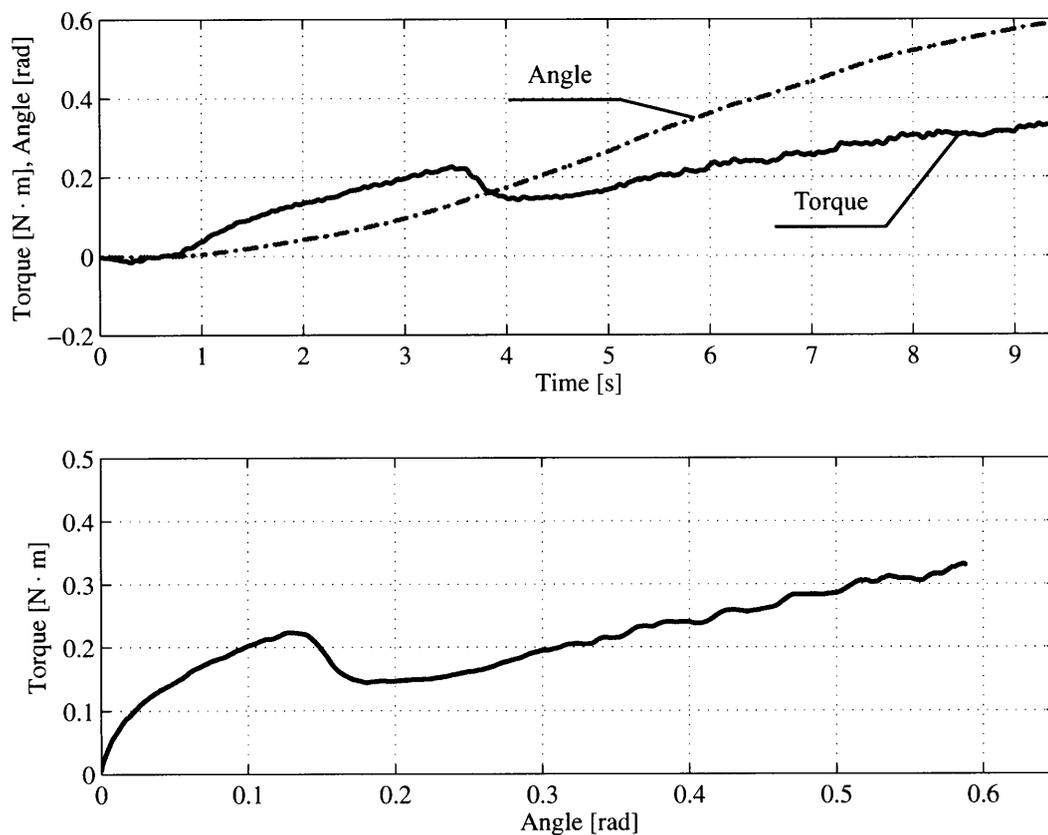


図 4.5 平衡点の前にマスターになる実験結果 5

4.3 平衡点の後にマスターになる場合

4.1 の実験方法により，平衡点の後にスレーブの実験者がマスターになる実験を行った。

図 4.6–4.8 には，上の図は平衡点の後にマスターになる場合のトルクと角度の時間軌跡を表し，下の図は角度 - トルク線図である。

これらの図により，腕が CW 方向に動き，平衡点の前にスレーブからマスターになった後では，トルクは一定となる。

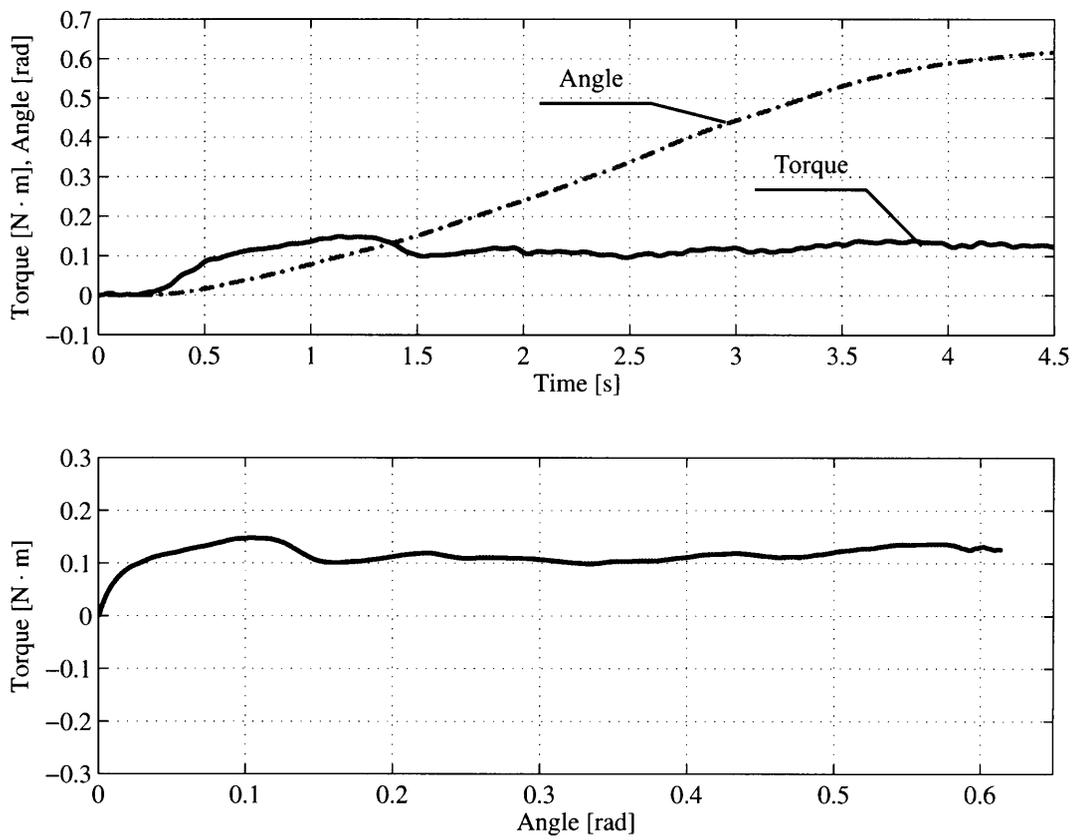


図 4.6 平衡点の後にマスターになる実験結果 1

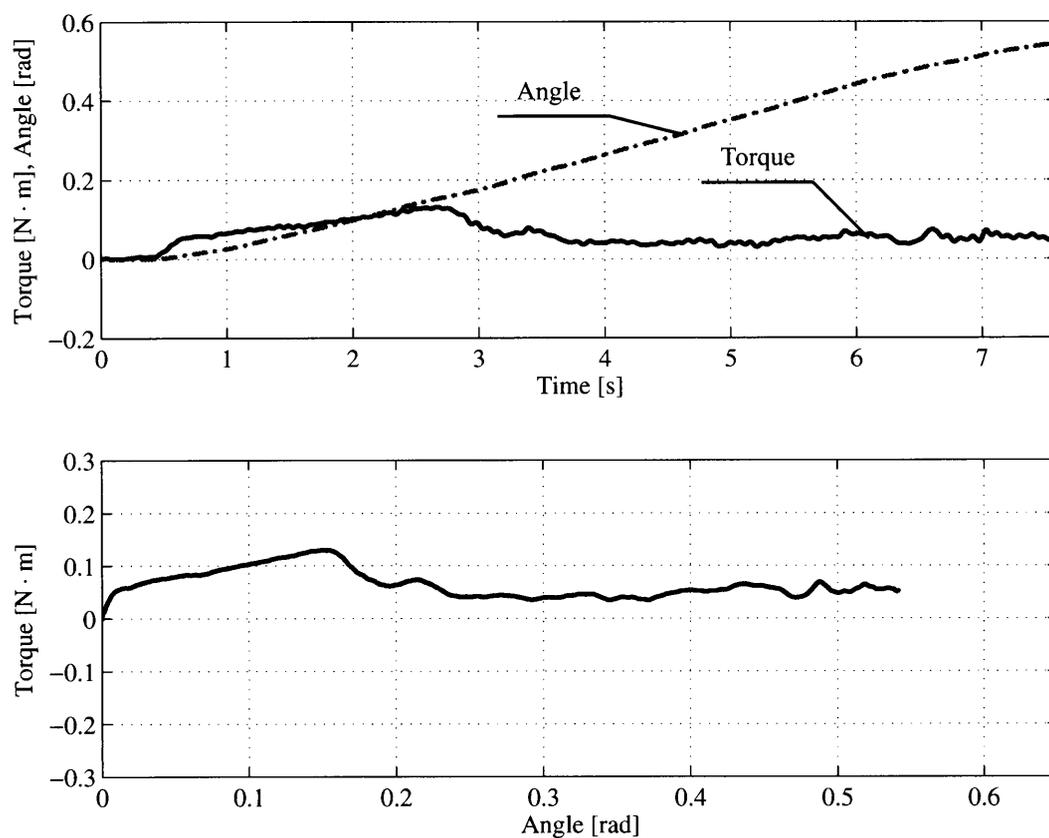


図 4.7 平衡点の後にマスターになる実験結果 2

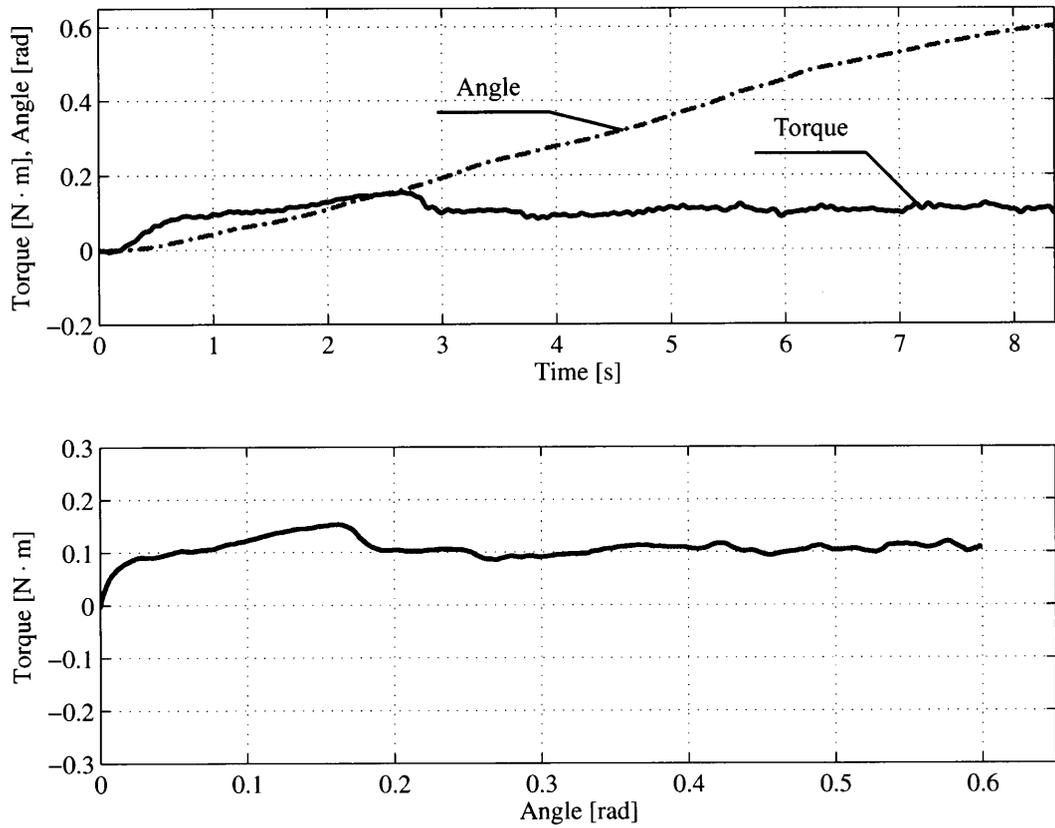


図 4.8 平衡点の後にマスターになる実験結果 3

第5章 結言

本論文は人間とロボットによる協調動作の一つとして水平方向における 1 自由度協調回転運動動作を取り上げ、人間に対して違和感なくスムーズな動作が行えるようなロボットの制御方法に検討した。

本論文を以下のようにまとめる。

1. 弛緩した状態では、人間の腕の力学的なモデルは従来考えられていた質量・ばね・ダンパーではなく、質量・ばね・摩擦のモデルであることが分かった。
2. 平衡点の前にマスターになる場合には、弛緩した状態の結果と同じばね定数を示すことがわかった。
3. 平衡点の後にマスターになる場合には、線形に到達したトルクは一定であることがわかった。

この研究テーマは、人間の腕の筋骨格モデルに基づく協調運動解析に関する研究であるが、マスターとスレーブの腕の回転 1 自由度協調作業モデルに基づいて、スレーブの腕の特性の解析を行った。また平衡点の前と後でマスターになる実験を行った。

しかし、人間と協調作業できるようなロボットの制御法則を構築することは研究の目的であるので、マスターとマスターの腕の特性を調べる必要があることが分かった。

そのために、一定の負荷がアームロードに加えられるように、新しい実験装置を考える。負荷の重さを徐々に増やすにつれて、マスターになっている 2 人の腕に生じたトルクが変化することが考えられる。それで、マスターとマスターの協調作業の実験により、

2人の被験者のトルクの相関関係を知った上で、負荷に対するトルクの分配係数とマスターの腕の特性を調べることができると思う。

将来の研究では、マスターとマスターの協調作業の実験により、人間どうしの協調動作特性を調べて、そしてその特性を人間ロボットシステムに制御を行い、作業性を評価するのは最終的の目的とする。

謝辞

本論文を終えるにあたり，有益なご指導ならびに多大なるご助言を賜りました指導教官である 池浦 良淳 助教授に深く感謝の意を表します。

また，本論文をまとめるにあたり，有益なご指導ならびにご助言いただきました水谷 一樹 教授に深く感謝の意を表します。

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ご指導を賜りました 澤井 秀樹 先生に深く感謝致します。

さらに，本研究を進めるにあたり数々のご助言をいただきました 加藤 光廣 先生に深く感謝致します。

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博士後期課程の張楠さんに深く感謝致します。

最後に，明るく楽しい雰囲気にしてくれた研究室の皆様にこころから感謝いたします。

参考文献

1. 足立修一：MATLABによる制御工学，東京電機大学出版社（1999）
2. 池浦良淳，柴田健吾，鈴木秀明，水谷一樹：人間とロボットによる物体の協調持ち上げ動作，第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集，Vol. 3，pp. 949-950，札幌（1998）
3. 伊藤宏司，伊藤正美：生体とロボットにおける運動制御，計測自動制御学会（1991）
4. 片山徹：新版フィードバック制御の基礎，朝倉書店（2002）
5. 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*, pp. 454-458, December 2001.
6. 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*, pp. 255-260, 1996.
7. 小澤治明，“人間とロボットによる協調運搬動作に関する研究”，三重大学大学院工学研究科博士前期学位論文，1998
8. 柴田健吾，“人間とロボットによる協調持ち上げ作業に関する研究”，三重大学大学院工学研究科博士前期学位論文，1999
9. MATLAB, The Language of Technical Computing, Using MATLAB Graphics Versions, The Math Works, Inc. (1996)
10. MATLAB, The Language of Technical Computing, Using MATLAB Version 5, The Math Works, Inc. (1996)
11. 足立修一：MATLABによる制御のためのシステム同定，第1，4，6，8章，東京電機大学出版社（1996）
12. K. Kosuge and N. Kazamura, "Control of a Robot Handling an Object in Co-operation with a Human," *Proc. of the IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 142-147, 1997.
13. S. Cannon and G. I. Zahalak, "The Mechanical Behavior of Active Human Skeletal Muscles in Small Oscillations," *Journal of Biomechanics*, vol. 15, pp. 111-121, 1982.

14. M. M. Rahman, R. Ikeura and K. Mizutani, "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**, pp. 510-518, June 2002.
15. 森田明司, "人間どうしの協調力制御に関する研究", 三重大学大学院工学研究科博士前期学位論文, 1997
16. T. Tsuji, P. G. Morasso, K. Goto and K. Ito, "Human Hand Impedance Characteristics during Maintained Posture," *Biological Cybernetics*, **vol. 72**, pp. 1063-1068, 1995.
17. T. Flash and F. A. Mussa-Ivaldi, "Human Hand Stiffness Characteristics during Maintained Posture," *Experimental Brain Research*, **vol. 82**, pp. 315-326, 1990.
18. T. Tsuji, "Human Arm Impedance in Multi-joint Movements," *Self-organization, Computational Maps and Motor Control*, Elsevier, pp. 357-381, 1997.
19. E. Bizzi, N. Hogan, F. A. Mussa-Ivaldi and S. Giszter, "Does the Nervous System Use Equilibrium-point Control to Guide Single and Multiple Joint Movements," *Behavioral and Brain Sciences*, **vol. 15**, pp. 603-613, 1992.
20. H. Gomi and M. Kawato, "Equilibrium-point Control Hypothesis Examined by Measured Arm Stiffness during Multi-joint Movement," *Science*, **vol. 272**, pp. 117-120, 1996.
21. R. Shadmehr, "Control of Equilibrium Position and Stiffness through Postural Modules," *Journal of Motor Behavior*, **vol. 25, No. 3**, pp. 228-241, 1993.
22. L. Ljung, *System Identification Toolbox, User's Guide*, USA, The Math Works Inc., Commands and Functions, 1995.
23. M. M. Rahman, R. Ikeura and K. Mizutani, "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**, pp. 510-518, June 2002