

図 3.16 関節角度－関節角加速度－筋圧力 測定結果  
(負荷トルク 5.88Nm)

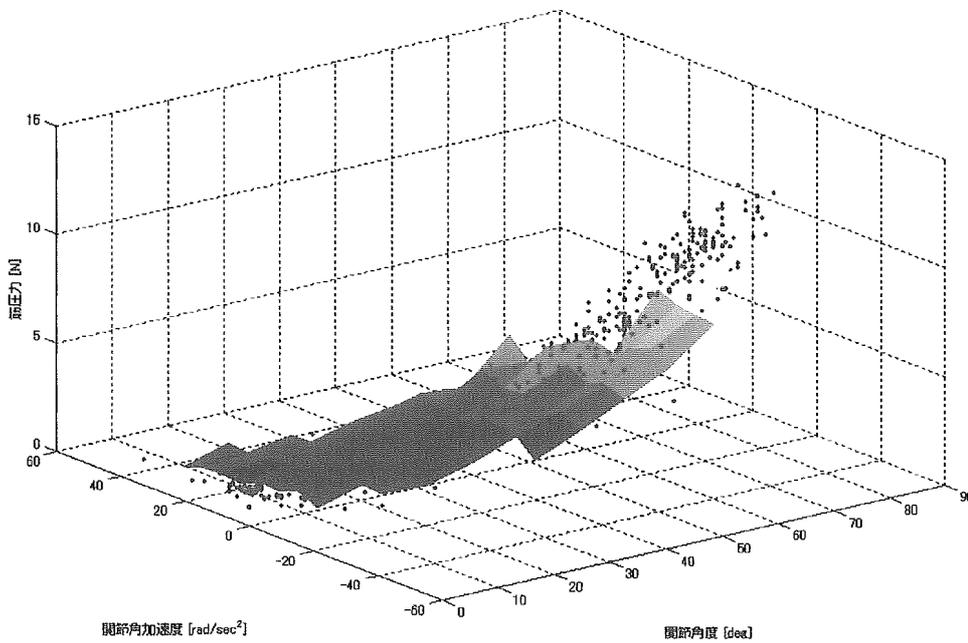


図 3.17 関節角度－関節角加速度－筋圧力 測定結果  
(負荷トルク 8.82Nm)

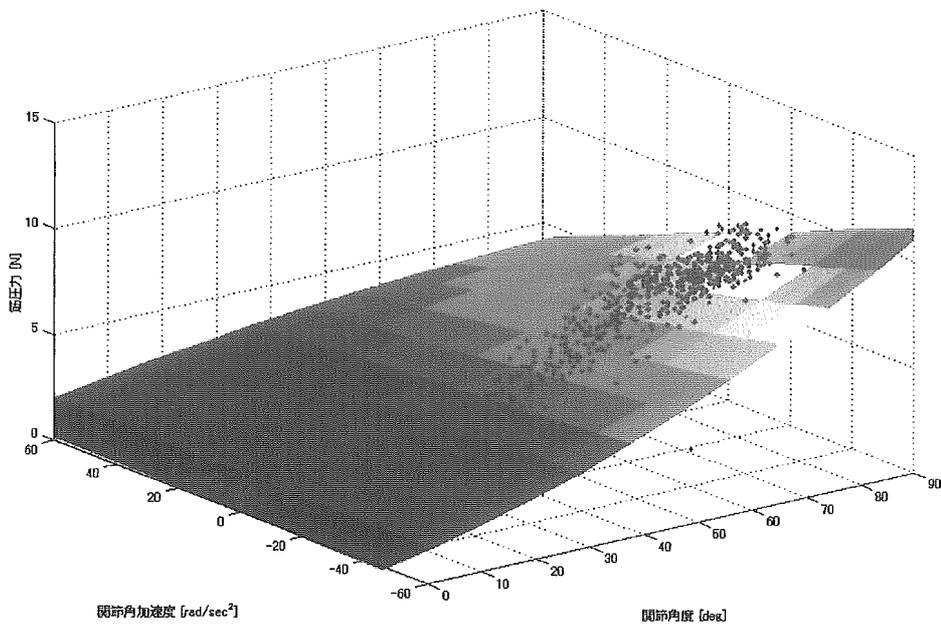


図 3.18 関節角度－関節角加速度－筋圧力 最小二乗曲面近似結果  
(負荷トルク 0.0Nm)

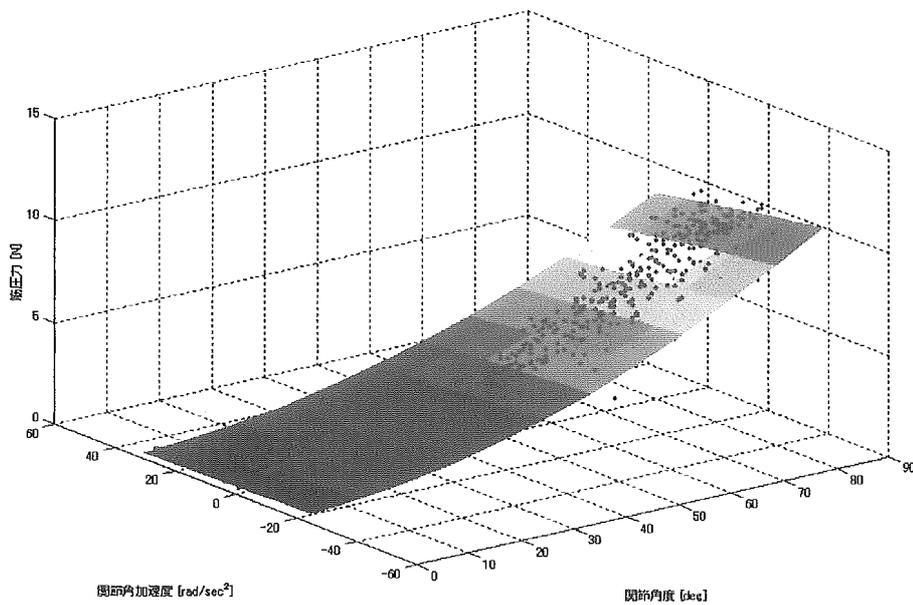


図 3.19 関節角度－関節角加速度－筋圧力 最小二乗曲面近似結果  
(負荷トルク 2.94Nm)

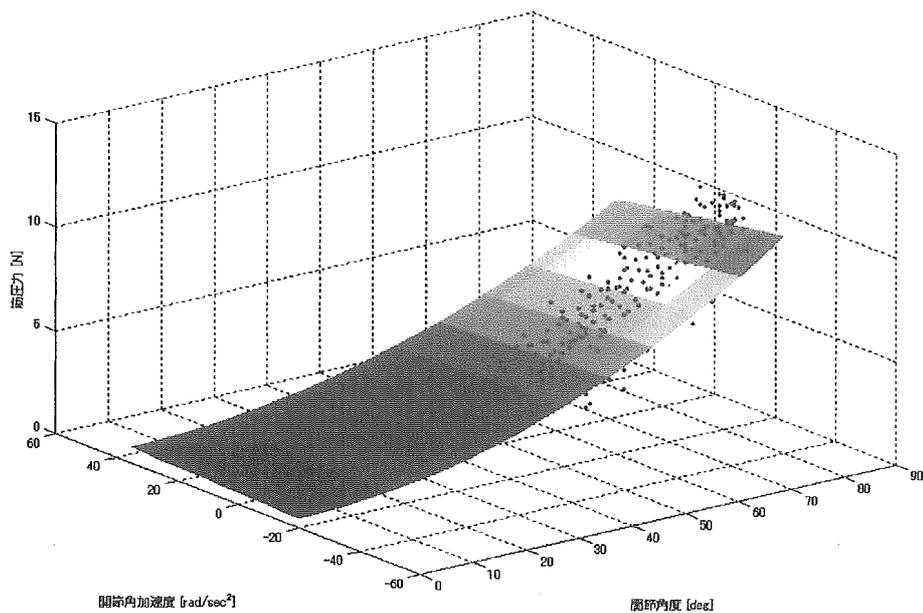


図 3.20 関節角度－関節角加速度－筋圧力 最小二乗曲面近似結果  
(負荷トルク 5.88Nm)

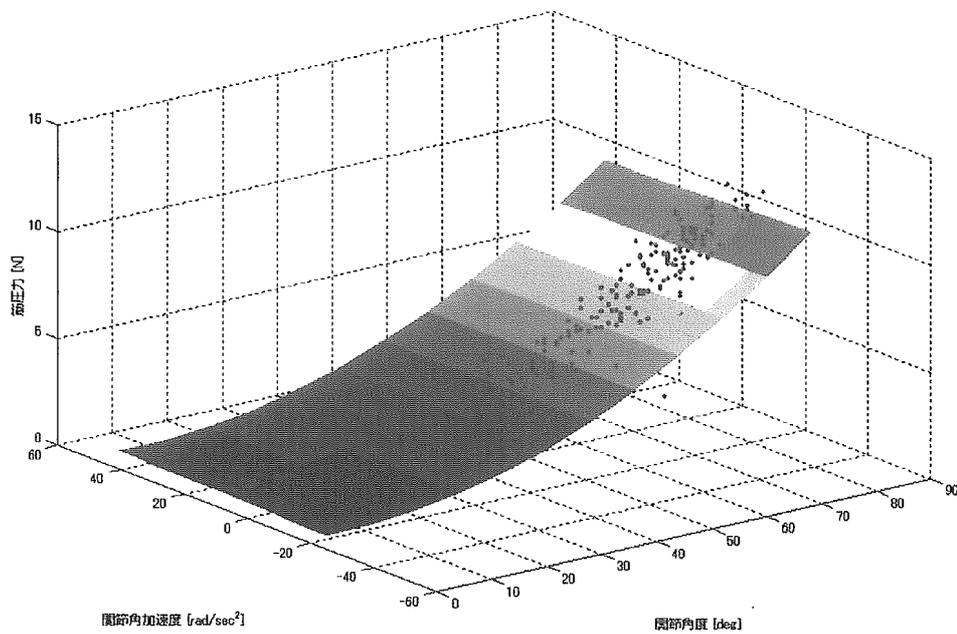


図 3.21 関節角度－関節角加速度－筋圧力 最小二乗曲面近似結果  
(負荷トルク 8.82Nm)

表 3.3 負荷トルク－関節角加速度－筋圧力 最小二乗近似係数

負荷トルク	a	b	c	d	e
0.00 [Nm]	$2.6981 \times 10^{-3}$	$4.6076 \times 10^{-2}$	$2.6617 \times 10^{-4}$	$-6.1732 \times 10^{-6}$	$-2.0131 \times 10^{-2}$
2.94 [Nm]	$-3.3975 \times 10^{-3}$	$1.3147 \times 10^{-2}$	$6.8417 \times 10^{-4}$	$-2.4882 \times 10^{-6}$	$4.0213 \times 10^{-1}$
5.88 [Nm]	$5.0342 \times 10^{-3}$	$-5.1793 \times 10^{-4}$	$9.1311 \times 10^{-4}$	$-3.5946 \times 10^{-6}$	$5.7673 \times 10^{-1}$
8.82 [Nm]	$3.2302 \times 10^{-3}$	$-8.0605 \times 10^{-4}$	$1.2249 \times 10^{-3}$	$-1.1551 \times 10^{-6}$	$7.3599 \times 10^{-1}$

#### 関節トルク推定式

得られた結果により，負荷トルク，関節角度，関節角速度と筋圧力の関係式を構築する．関係式は式(3.5)となる．

$$\tau' = (P - b\theta - d\theta^2 - e - f\theta\omega) / (a + c\theta) \quad (3.5)$$

P = 筋圧力 [N]

$\tau$  = 負荷トルク [Nm]

$\theta$  = 関節角度 [deg]

$\omega$  = 関節角速度 [rad/sec]

a, b, c, d, e, fは近似によって決定される係数である．

前節と同様に，肘関節に既知の負荷トルクを与えた時の，関節角度と筋圧力の結果に式(3.5)を適用し，トルク推定を行う．近似によって決定した係数を，表 3.4 に示す．推定トルクと負荷トルクの差をヒストグラムとして表したものを図 3.22 に示す．また正規分布として表したものを図 3.23 に示す．平均は  $-0.51313$ [Nm]，標準偏差は 2.4968 となった．関節角速度を考慮する事によってトルク推定の精度が向上した．

しかし，本研究室にて開発しているパワーアシストスーツが介護用である事を考えると，関節角速度が大きくなる事は考えにくく，大きくとも屈曲・伸展共に 0.52[rad/sec]であると考えられる．そこで比較する為に，関節角速度の絶対値が 0.52[rad/sec]以下の測定値によって近似を行い，同様に関節角速度の絶対値が 0.52[rad/sec]以下の結果に式(3.2)を適用してトルク推定を行った．近似によって決定した係数を表 3.7 に示し，近似を行った結果を図 3.22 に示す．推

定トルクと負荷トルクの差をヒストグラムとして表したものを図 3.25 に、正規分布として表した物を図 3.26 に示す。正規分布の平均は $-0.05847[\text{Nm}]$ ，標準偏差は $2.6855$  になった。式(3.5)を適用した場合，負荷トルク，関節角度，関節角速度の 4 つのパラメータについて 6 つの係数を決定する必要があるので，近似が複雑になり，実用的ではない。これより，大きく関節角速度が変わらない状態でのトルク推定が必要とされている時には，想定されている角速度の範囲で筋圧力を測定し，式(3.2)を適用したトルク推定を行うことが良いと考えられる。また，式(3.2)，式(3.5)共にその形により，関節角度が小さい時には関節トルクに対する勾配が小さくなっている。このため，筋圧力にわずかなずれが生じても，推定トルクは大きく変わってしまう事になる。これにより，関節角度が小さい場合には，今回の関節トルク推定式の信頼性は著しく低下すると言える。

表 3.4 負荷トルク－関節角度－関節角速度－筋圧力 最小二乗近似係数

a	b	c	d	e	f
$1.2968 \times 10^{-1}$	$3.5010 \times 10^{-2}$	$6.1716 \times 10^{-3}$	$1.0510 \times 10^{-4}$	1.4086	$6.4001 \times 10^{-4}$

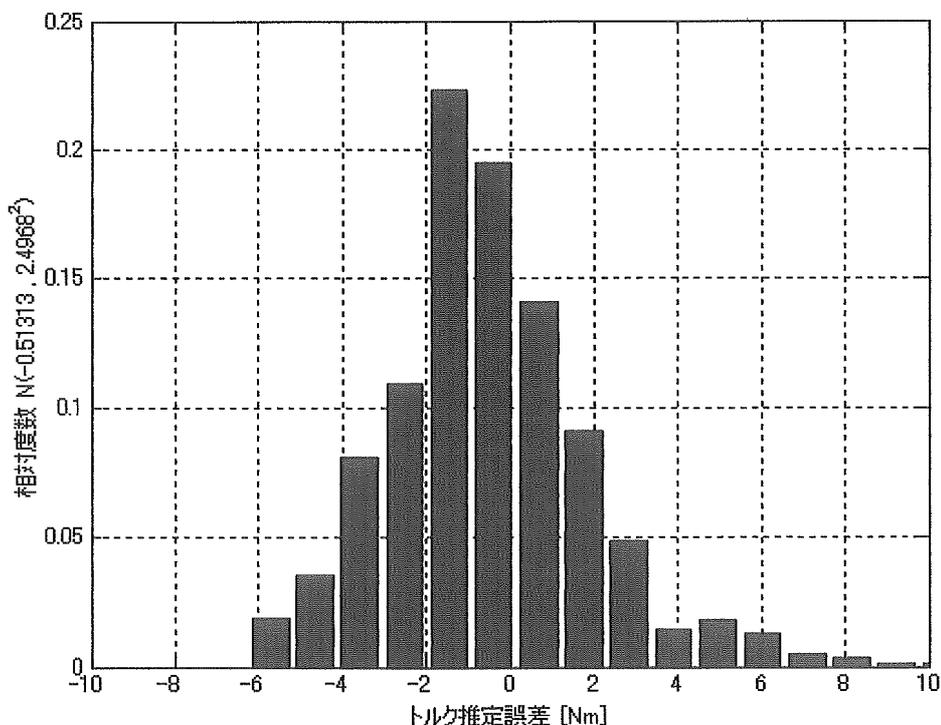


図 3.22 負荷トルク－関節角度－関節角速度－筋圧力

トルク推定誤差 ヒストグラム

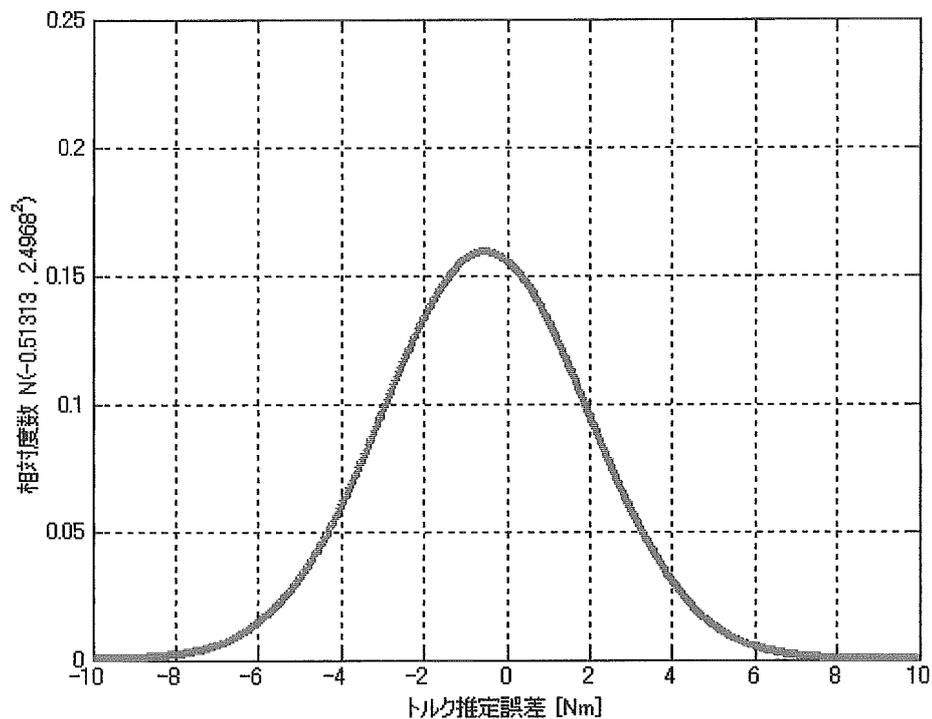


図 3.25 負荷トルク-関節角度-関節角速度-筋圧力  
トルク推定誤差 正規分布

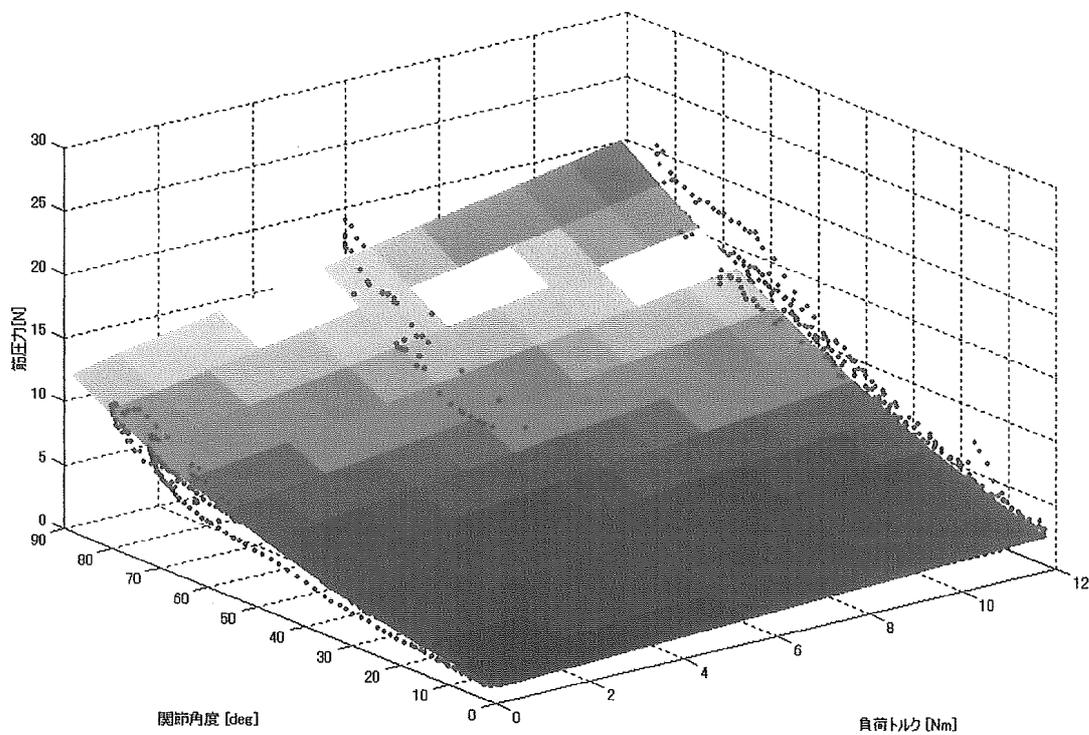


図 3.24 負荷トルク-関節角度-筋圧力 最小二乗曲面近似結果  
(関節角速度 0.52[rad/sec]以下)

表 3.5 負荷トルク－関節角度－筋圧力  
 最小二乗近似係数(関節角速度 0.52[rad/sec]以下)

a	b	c	d	e
$1.2330 \times 10^{-1}$	$3.3801 \times 10^{-2}$	$6.3366 \times 10^{-3}$	$9.9087 \times 10^{-4}$	1.4482

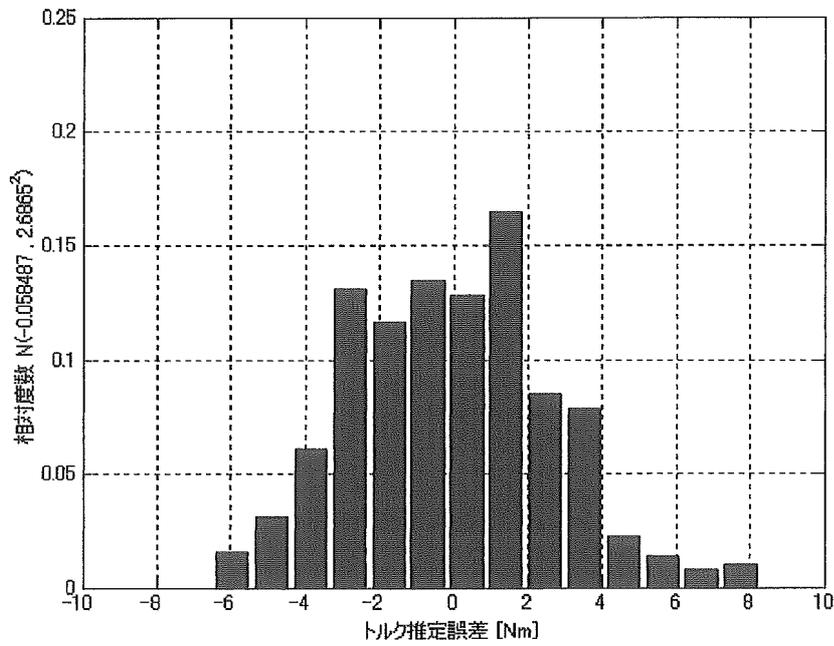


図 3.25 負荷トルク－関節角度－筋圧力 トルク推定誤差 ヒストグラム  
 (関節角速度 0.52[rad/sec]以下)

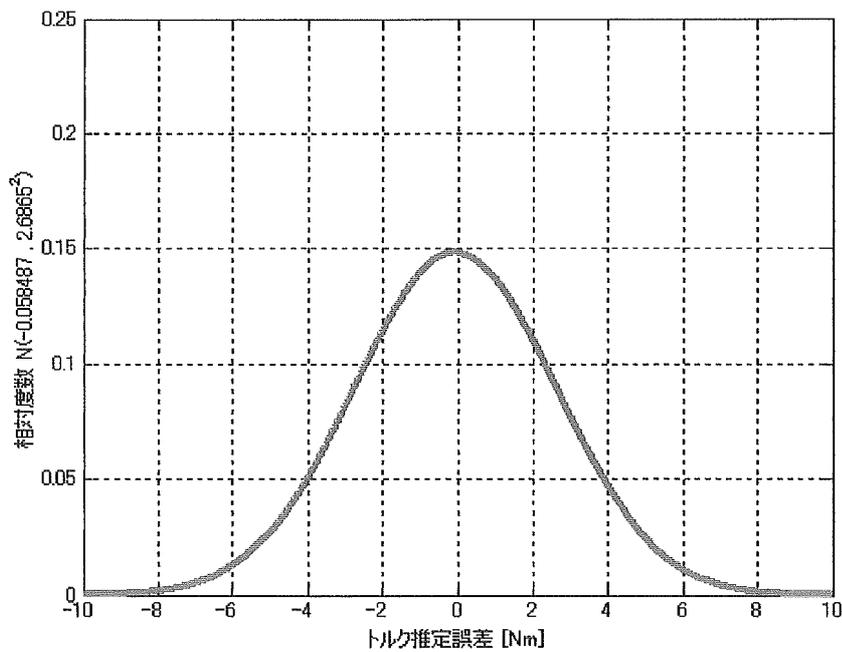


図 3.26 負荷トルク－関節角度－筋圧力 トルク推定誤差 正規分布  
 (関節角速度 0.52[rad/sec]以下)

## 応答性

関節トルクが関節角度, 関節角速度, 関節トルクによって推定できることを, 前節にて述べた. トルク推定を実際に使用する場合に, その精度が問題となるのは当然の事である. しかし, パワーアシストに使用する場合, 精度と共にその応答性も重要である. 本節では筋圧力の動作に対する応答性を測定し, 実用に耐えうるものであるかを検討する.

関節にトルクを発生させた場合, 筋圧力が発生すると共に, 動作先に力が発生する. 動作に対する筋圧力の発生の遅れを測定する事によって, 応答性の検証を行う.

肘関節を屈曲  $90[\text{deg}]$  に固定し, 測定点以外に, 手関節の橈骨側にロードセルを配置し, ロードセルを固定した台に押し付け動作の検出を行う. 動作検出用ロードセルの配置位置を図 3.27 に, 測定状態を図 3.28 に示す.

動作の開始に関する筋圧力の遅れをヒストグラムとしたものを図 3.29 に, 動作の停止に関する遅れをヒストグラムとしたものを図 3.30 に示す. なお, サンプル数は  $90$  とした.

結果より, 開始に関する遅れはほぼ  $20[\text{msec}]$  であると言える. 骨格筋が収縮する場合, 最初に収縮するのは筋繊維と運動神経の接合点である. また, 筋繊維と運動神経の接合点が集まっているのは骨格筋の筋腹である. 今回の測定点は, 筋腹から離れた位置であるために, 動作開始に対する遅れが生じたものと考えられる.

開始に関する遅れが  $20[\text{msec}]$  に収束している事に対し, 停止に関する遅れは値がばらついてしまい, 明確な遅れ時間を述べる事が出来ない. これは筋細繊維が張力の発生のみによって収縮を行うものであることが関係していると考えられる. 筋の動作の停止と同時に, 筋細繊維も張力の発生を停止する. しかし, 張力が消失しても筋細繊維を構成するアクチンフィラメントとミオシンフィラメントの重複は保たれたままである. フィラメントの重複は外力による関節の回転又は, 対立筋による関節モーメントの発生によって解消される為, 今回の実験では動作停止における応答が明確でないという結果をもたらしたと考えられる.

筋圧力と同様に随意運動をセンシングする方法として, 表面筋電位(EMG)によるトルク推定がある. 筋電位は筋繊維が収縮する為のトリガとして生体内で発生するスパイク状の電位であり, 筋繊維の収縮の  $100[\text{msec}]$  前に発生する. 表面筋電位(EMG)は関節トルクが増加すると, スパイク状電位の頻度の増加として出力される. そのためローパスフィルタをかける必要がある. フィルタによって遅れが発生する為, 実際は筋繊維の収縮の  $20[\text{msec}]$  前程度に発生する.

筋電位の遅れが  $20[\text{msec}]$  であることに対し, 筋圧力の遅れは  $20[\text{msec}]$  である. 筋電位と比較すると遅れが大きいものの, 筋の構造と動作原理より, 筋圧力は動作より前に発生する事はないため, 今回の結果は高い応答性を持っている.

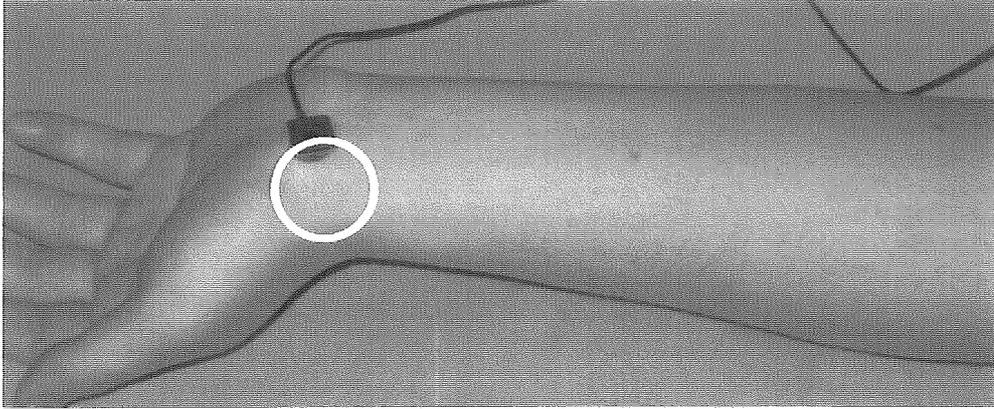


図 3.27 動作力測定点

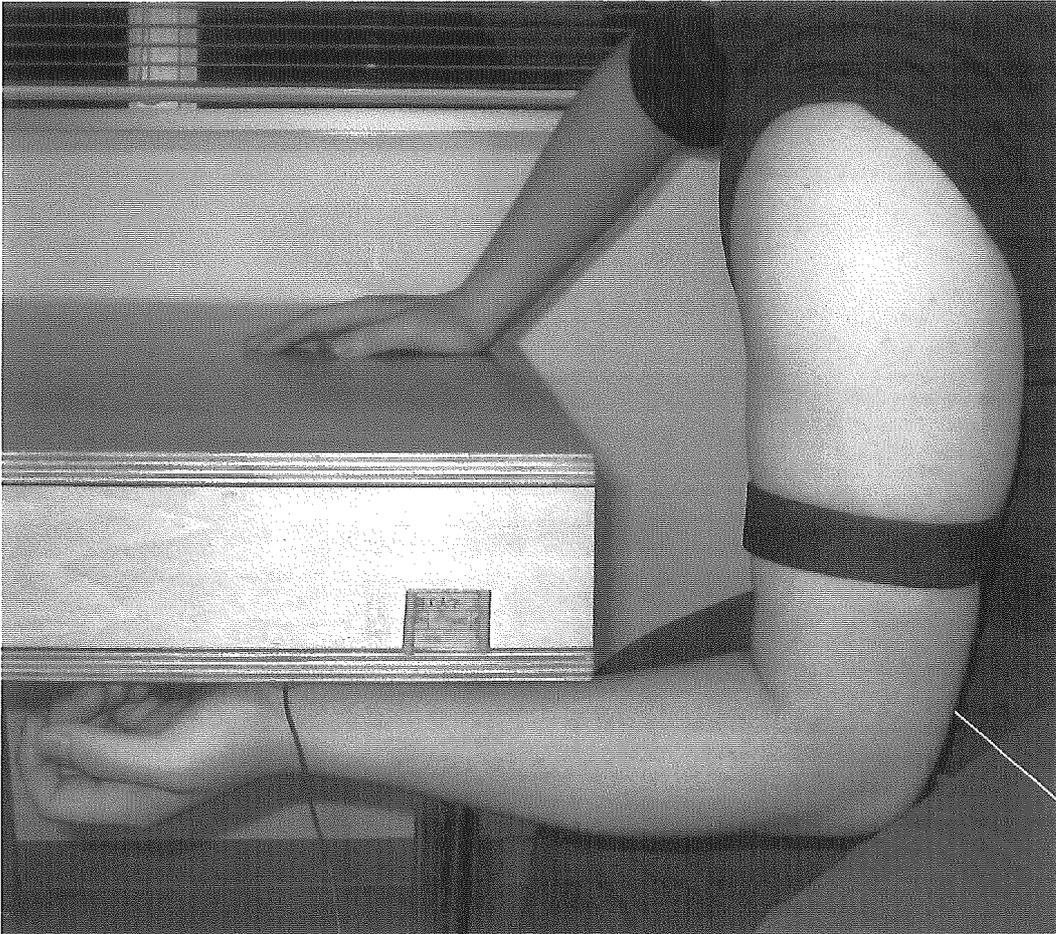


図 3.28 応答性測定概観

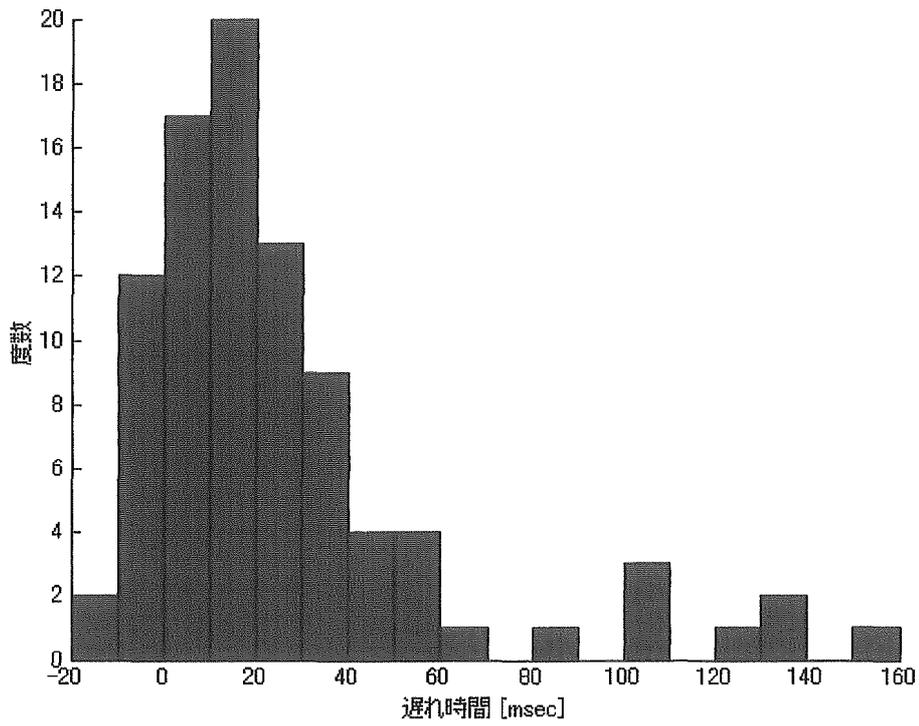


図 3.29 筋圧力応答時間 ヒストグラム(開始)

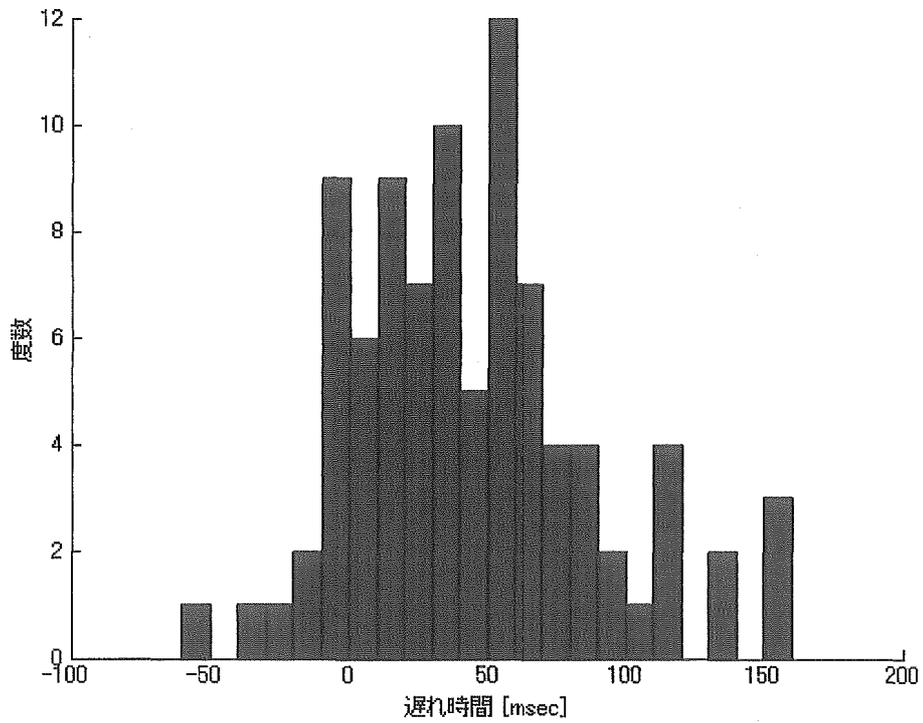


図 3.30 筋圧力応答時間 ヒストグラム(停止)

## アシスト率測定への応用

前節にて、筋圧力及び関節角度、関節角速度をパラメータとした関節トルクの推定が可能である事を述べた。本節では、関節トルクの推定を使用したパワーアシスト機構のアシスト率測定の検証を行った結果について示す。

パワーアシスト機構により、関節にアシストトルクを与えた場合、関節への負荷トルクは減少する。動作に必要な全トルクに対するアシストトルクの率をトルクアシスト率と言う。これまでに負荷トルクと関節角度及び関節角速度に対する筋圧力の関係を示した。あらかじめ負荷トルクと筋圧力の関係式を得ていれば、アシストトルクによって関節への負荷トルクの減少量を測定することが可能である。パワーアシスト機構によって、一定のアシストトルクを肘関節に与える。アシスト時の関節角度と筋圧力より関節トルク推定を行い、筋圧力によってトルクアシスト率の測定が可能であるかを検討した。

実験方法を示す。肘関節アシスト機構を取り付ける前に、関節角度取得用フレームを用いて筋圧力と負荷トルク、関節角度の関係を測定し、最小二乗近似係数を求める。その後、肘関節アシスト機構を取り付け、錘によって肘関節に負荷トルクを与え、同時に超音波モータによってアシストトルクを出力し、筋圧力を測定する。アシスト時の筋圧力と関節角度から、肘関節トルクを推定し、錘による負荷トルクとの差がアシストトルクと同一であることを確認する。なお、今回使用するアクチュエータは負荷によって、アクチュエータを逆転させた時の発生トルクが不明であるので、肘関節を往復させて測定するのではなく、肘関節を屈曲方向に  $20[\text{deg}]$  から  $80[\text{deg}]$  まで動作させた時の筋圧力を測定する。

肘関節に与えるアシストトルクをアクチュエータの最大トルクである  $3.9[\text{Nm}]$ 、負荷トルクを  $5.88[\text{Nm}]$  とした時のトルク推定値の正規分布を図 3.31 に、負荷トルクを  $11.76[\text{Nm}]$  とした時の正規分布を図 3.32 に示す。負荷トルクを  $5.88[\text{Nm}]$  とした時の推定トルクの平均は  $3.46145[\text{Nm}]$ 、標準偏差は  $1.2601$  であり、 $11.76[\text{Nm}]$  とした時の平均は  $11.34138[\text{Nm}]$ 、標準偏差は  $2.0123$  となった。なお、本実験においては、関節角速度を低速に限定してトルク推定を行う手法にて最小二乗近似係数を求めている。

負荷トルクを  $5.88[\text{Nm}]$  とした時の推定トルクの平均は  $3.46145[\text{Nm}]$  であるために、計算上アシストトルクは  $2.4185[\text{Nm}]$  である。また、負荷トルク  $11.76[\text{Nm}]$  時の推定トルクの平均は  $11.34138[\text{Nm}]$  であるので、計算上アシストトルクは  $0.41862[\text{Nm}]$  となる。よって、負荷トルク  $5.88[\text{Nm}]$  時のトルクアシスト率は  $41.1\%$ 、負荷トルク  $11.76[\text{Nm}]$  時のトルクアシスト率は  $3.5\%$  となった。

以上により、筋圧力によるトルク推定が、トルクアシスト率の測定に有効である事がわかった。しかし、計算上のアシストトルクが、アクチュエータによって与えたアシストトルクより小さくなっている。これはトルク推定の誤差もあるが、関節速度が発生した事でアクチュエータが最大トルクを発生することが出来なかったことも原因のひとつであると考えられる。

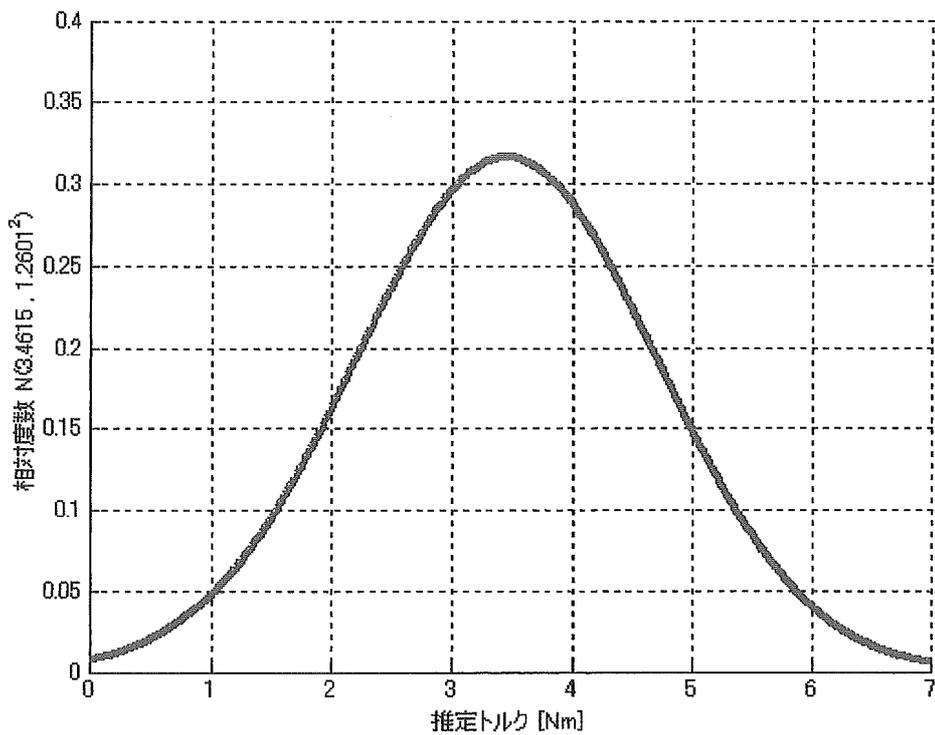


図 3.31 トルクアシスト率測定実験における筋圧力からの推定トルク正規分布  
(負荷トルク 5.88Nm, アシストトルク 3.9Nm)

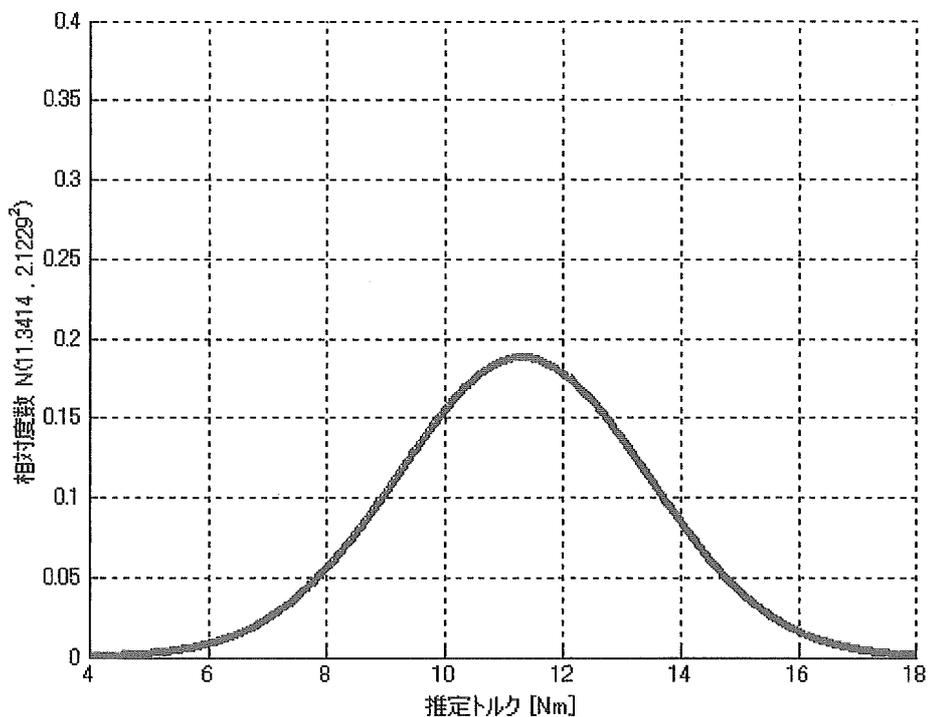


図 3.32 トルクアシスト率測定実験における筋圧力からの推定トルク正規分布  
(負荷トルク 11.76Nm, アシストトルク 3.9Nm)

## E. 結論

### 超音波モータ駆動制御

パワーアシストスーツの肘部において、開発したサンドイッチモータの制御法を提案し、実装を行った。制御法としてはPID追従制御の他に筋圧力を用いたトルク推定制御、急激な負荷に対応するためのインピーダンス制御手法の提案、実装を行った。

PID追従制御法において超音波モータの応答性が高いため小さい誤差で肘関節をアクチュエータが追従することができ、装着時の運動の違和感軽減につながった。

筋圧力に用いたトルク推定サポート制御においては肘の角度と筋圧力のキャリブレーションを行うことで手先に負荷を与えたときに適切なサポート力を与えることが可能となった。ただし、サポートを与えた場合の筋圧力の変化は増加減少を繰り返し振動的になった。解決案として筋圧力パラメータにシュミットトリガを用いること、ロバスタ性を持たせること、フィードフォワード学習などを行うことにより改善することができると考えられる。この問題を解決しない限り制御法として確立させることはできない。

インピーダンス制御によるダブルサンドイッチモータの粘弾性特性実験では肘の粘弾性特性に着目し、肘関節のパラメータをダブルサンドイッチモータに用いて、肘関節を保護するための粘弾性特性を仮想的に持たせるインピーダンス制御法を実装させた。その結果、実験結果はほぼシミュレーションを再現でき肘のサポートを与えられる制御法を実現させることができたが、今後肘関節を詳細にモデル化し、肘関節に違和感を感じさせない制御法を構築させる必要がある。

また、本論文はΦ60フィードバック追従ドライバの完成がなければ書くことができなかった。従来の周波数制御ドライバより位相差制御ドライバは超音波モータの制御を容易に行うことができるようになったからである。また、FB追従のおかげで超音波モータを長時間安定させて駆動させることができるようになった。ドライバが制御において最重要であることを記しておく。

今後の展望として、トルク推定における実験でダブルサンドイッチモータを肘に装着して4kgのバーベルを持ったとき、位相差90degと最大値まで振り切っていた。被介護者の重量を支えるためにはさらにトルクを向上させることが必要である。しかしダブルサンドイッチモータのような接続構造による高トルク化はサイズが大きくなってしまうため、超音波モータの振動解析、材料選定の方面から超音波モータの高トルク化をアプローチすることが良いと思われる。

次にパワーアシストスーツ制御法として追従制御、トルク推定制御、インピーダンス制御をそれぞれモードとして条件に応じた制御法に切り替える手法を構築しなければならない。さらに、今回の肘部の制御を踏まえて、肩や腿なども同様な制御手法を構築し展開していく。

## 筋電位による駆動、トルク推定の構築

装着者の意志をアシストスーツの駆動に反映させ、かつ効果的なパワーアシストを得るために駆動信号として表面筋電位を用いた。筋電位はそのままでは関節トルクの大きさを把握することはできないので低域通過フィルタにより高周波成分の除去を行った。このことにより筋電位から関節トルクの大きさをほぼ把握することができ、またフィルタの次数により超音波モータの応答性が変化することも確認することができた。

開発したアシストスーツを装着し肘関節に置いて重り持ち上げ実験をおこなった。アシストゲインを調整することにより持ち上げ時に発生する筋電位の低下が確認でき、パワーアシストスーツの有効性を確認することができた。

今後の課題点と対策を以下に示す。

(1) 課題点：モータトルクが小さいためアシスト率が意味をもたないものとなってしまう。

対策：現在のアシストスーツはφ60のサンドイッチモータを組み込むために設計したものであるが、これを約2倍のトルクが出力できるサンドイッチモータを2つ組み合わせたダブルサンドイッチモータにすることで改善できると考えている。

(2) 課題点：筋電位を低域通過フィルタを用い処理したが応答性を高めた場合、関節トルクが一定であってもモータのトルクが変動してしまう。

対策：アシストスーツの応答性が高いものが効果的なアシストを確認できたので関節トルクの推定は関節角度や床半力から求め筋電位と併用することが有効であると考えられる。

## 筋圧力による随意運動センシング

本研究では関節トルクと関節角度、関節角速度に対する筋圧力の関係を明らかにした。肘関節における筋圧力と関節角度、関節角速度を用いたトルク推定は成功したと言える。また、トルク推定を応用したトルクアシスト率の測定も可能である事が検証された。

肘関節の屈曲のみという限定的な成果であるが、研究がより進めば、全身の関節の随意運動をセンシング出来る事となるだろう。

今後の課題としては、肘関節の関節トルク推定の精度を上げる事と同時に、他の関節にも今回の結果が適用可能か検証を行って行く事があげられる。また、肘関節の屈曲だけでなく、伸展方向のトルク推定も重要である。さらに、関節トルクの推定式の係数は、筋圧力の測定ごとに決定しなおさなければならない。現在は人間が測定データをまとめて各係数を決定しているため、係数を自動的に求めるシステムの構築も必要になる。最後に、関節角速度を用いた関節トルク推定時の最小二乗による推定式の係数決定が、3変数1出力の最小二乗近似であるために容易でなく、時間がかかる。そのため3変数1出力の最小二乗近似の高速化も挙げられる。

厚生労働科学研究費補助金(長寿科学総合研究事業)

分担研究報告書

機構の設計と強度計算

研究者 桑原 利彦

研究要旨

超音波モータは摩擦力を利用して駆動力を得るアクチュエータである。この駆動原理により、ステータ・ロータ間の接触面での摩擦状態は、モータの性能に大きな影響を及ぼす。そのため、ロータ材の選定、耐磨耗用の摩擦材の選択は非常に重要である。前年度までのロータ材の検討、耐磨耗用の摩擦材の検討により耐久力、トルクの向上を示唆することが出来た。今年度は更なる高トルク化のための有限要素法を用いたステータ形状の解析、超音波モータの押し付け機構に関する検討を行った。これまでの研究でステータを二枚使用したサンドイッチ型にすることでほぼ同体積でトルクを約2倍まで上げることが出来ることがわかっている。そこで今回はステータ一枚での性能の向上をのため、これまで製作してきたモータ(Φ80、Φ100)の機構を見直し、さらに大型のモータ(Φ120、Φ145)、Φ110の大型サンドイッチ型モータを製作しトルクの向上を目指した。これらの検討により大幅にトルクの向上を確認することが出来た。

## A. 研究目的

アクチュエータは、パワーアシストスーツを人体に装備し、装着者の力などを効率良くアシストするための重要な要素として挙げられる。これは、身体に装着する事から更に厳しい制約となるためである。アクチュエータとして求められる特性は、長時間装着していても負担にならないよう小型軽量であり、力を補助するだけの大出力である。また、人間の関節特有の性質である粘弾性特性を有することである。小型軽量かつ大出力を実現することは既存のアクチュエータでは、難しく、新しいアクチュエータの提案が望まれてきた。以上の理由から、小型軽量かつ静粛性に優れ、摩擦駆動により粘弾性特性を有する進行波型超音波モータは重要な存在となり得ている。特に超音波モータは印加電圧を変化させることで瞬時にフリー状態を実現できるため、フェールセーフ機能の実現も容易でありパワーアシストスーツに適したアクチュエータである。だが、パワーアシストスーツにはその性質上、小型軽量を実現しつつ大出力を発揮する事が求められる。このため更なる小型軽量化、出力特性の向上を行わねばならない。本章では、この超音波モータの高出力化を行う。

## B. 研究方法

昨年度までに超音波モータの高出力化を図ってきたが、今年度は超音波モータの軽量化及び安定化を図った。この技術は、パワーアシストスーツの装着者である人間の肉体的負担の軽減及びパワーアシストスーツの動作保証のためにも重要な要素である。

超音波モータは、超音波振動を発生するステータ、その振動によって回転するロータ、そして、超音波モータのケース等で構成されている。これらの構成部品の中で、ステータが超音波モータの重量の大半を占めている。よって、超音波モータの軽量化するには、ステータの軽量化は必要不可欠であると考えられる。そこで、ステータを構成する材料について検討を行い、軽量化を図った。超音波モータは摩擦駆動であるため、ステータとロータ間の接触面には、耐摩耗性に優れており、ステータが発生する振動を高効率でロータに伝達することが求められる。これらを満たすことによって超音波モータの安定化が図れる。これらの条件を満たすべくライニング材の検討を行った。

### 4.1 ステータ材料の検討

昨年度までのステータ材料の検討は、振動解析を中心としたものであった。本年度は、実際に交流電圧をステータに印加して、出力特性等を測定し、ステータ材料の検討を行い決定した。本研究室では今までに超音波モータのステータ材料は、真鍮及びステンレス合金 SUS420-J2 を主に使用してきた。しかし、真鍮は密度が大きく超音波モータ全体の重量が増してしまうという欠点がある。また、ステンレス合金は加工性に若干の欠点がある。そこで本研究では、それぞれの欠点を克服するために4種類の材料について、振動振幅測定、トルク試験を行い検討する。

#### 4.1.1 ステータ材料特性

ステータの材料は、アルミ合金 A6061、バネ用リン青銅 C5210、ステンレス鋼 SUS420-J2、チタン材料 TP340 の4種類について検討を行った。これらの材料の材料特性を表 4.1 に示す。また、材料検討の際のステータ形状を図 4.1 に示す。アルミ合金 A6061 は、熱処理型の耐食性合金であり、T6 処理によってかなり高い耐力値が得られる。また、今回の材料の中で最も軽い金属である。バネ用リン青銅 C5210 は、展延性、耐疲労性、耐食性が良い材料である。ステンレス鋼 SUS420-J2 は、耐食性、溶接性、機械的性質が良好であり、SUS420-J1 より炭素含有量を多くしたことによりより高硬度にしたものである。チタン材料 TP340 は、硬さ等のバランスが良く、汎用チタン材として広く用いられているものである。

表 4.1 ステータ材料特性

材料名	ヤング率 [GPa]	ポアソン比	密度 [g/cm <sup>2</sup> ]	ばね係数
A6061	75	0.345	2.7	0.1
C5210	110	0.38	8.8	
SUS420-J2	200	0.4	7.75	
TP340	220	0.321	4.51	

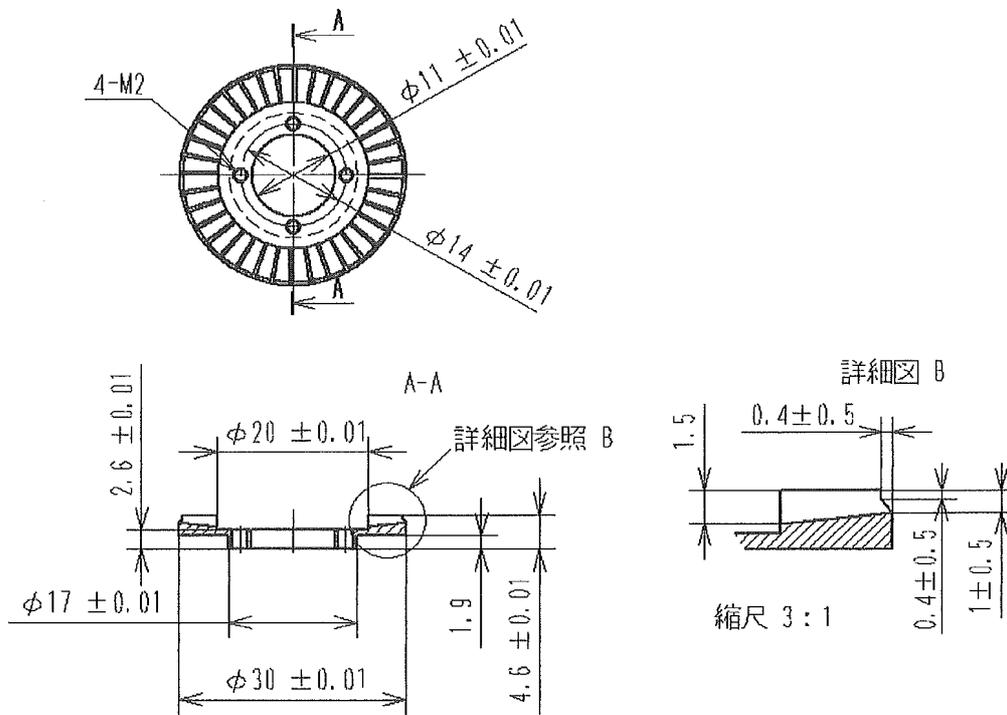


図 4.1  $\phi 30$  ステータ形状

#### 4.1.2 ステータ振動振幅測定

振動振幅測定実験では、励起した進行波の鉛直方向及び円周方向の変位を Zimmer 社の変位測定器を用いて測定した。振動振幅測定実験に関しては、各ステータに対して 40、60、80Vpp の交流電圧を印加して周波数は各ステータの共振周波数とした。

本研究では、透過光式により測定を行った。図 4.2 に透過光式の模式図を示す。Y 軸のマイナス方向からプラス方向に光を当て、櫛歯によってその光路の一部

分が遮断されるように光源の位置を調整する。そして、光路の延長上に変位測定カメラを置き、櫛歯を暗、光を明として明暗のエッジ部を追従し、櫛歯の変位をデジタルオシロスコープで記録した。変位測定器の出力信号  $0.1V$  あたり、振動振幅は  $2\mu m$  であるためその比を利用して算出した。

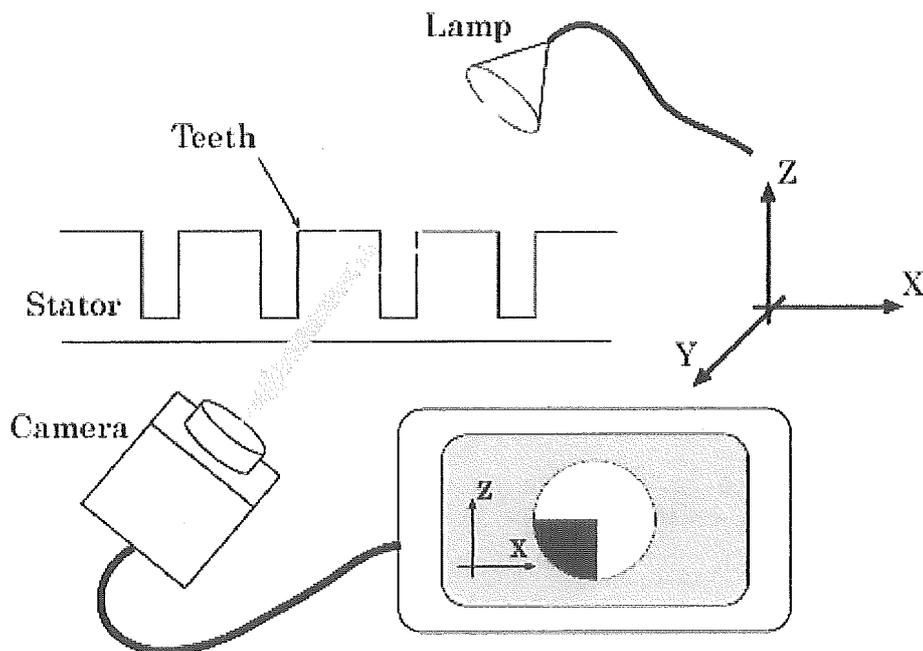


図 4.2 透過光式の模式図

#### 4.1.3 駆動試験

各ステータの出力特性を把握するために、トルク及び回転数を測定し、ステータ材料の検討を行った。回転数・トルク試験機の外観を図 4.3 に示す。このトルク試験機は、押付け荷重測定用ロードセル、トルク測定用のトルク検出器及びトルクメータ、回転数測定用ロータリーエンコーダ、出力に負荷を与えるヒステリシスブレーキ等で構成されている。トルクメータからは発生したトルクに比例したアナログ電圧が出力されるため、そのアナログ電圧を A/D 変換ボードに入力し、記録していった。また、ロータリーエンコーダからの信号をカウンタボードに入力し、回転数を記録した。

回転数・トルク測定実験において、押付け荷重は、 $19.6$ 、 $26.46$ 、 $34.3N$  とし、印加電圧は  $180V_{pp}$  であり、周波数は各材料の共振周波数とした。ステータに

印加するシステムは以後にも使用するものである。出力に与える負荷は、ヒステリシスブレーキを外部に設けた電源で電流制御して行った。

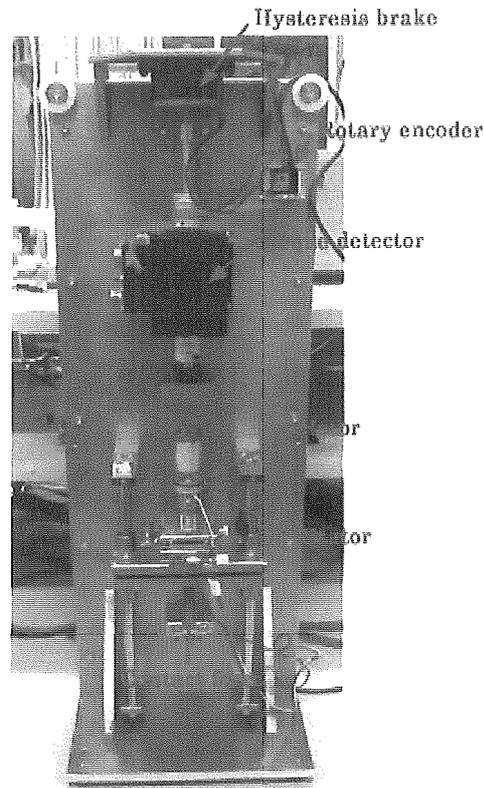


図 4.3  $\phi 30$  ステータ駆動試験機

## 4.2 超音波モータの安定化

ステータの超音波振動を効率よくロータの回転力に換える働きをするものであり、超音波モータ全体の寿命にも影響を与えるものである。本研究では、ライニング材の対象としてロータに熱硬化性フェノール樹脂を貼り付けた。また当研究室ではいままでにステータ側にライニング材を貼り付けてこなかったが、本研究ではステータにフッ素樹脂を貼り付けた。このステータとロータに貼り付けたライニング材を組み合わせた時の出力特性及び安定駆動の向上について検討を行った。このようにステータ及びロータにそれぞれライニング材を貼り付けることによって、摩擦熱等による圧電素子と弾性体を貼り合わせている接着層の劣化を防ぎ、大幅な出力特性の低下を防ぐことが出来ると考えられる。

#### 4.2.1 ライニング材の材料特性

本研究では、ライニング材としてステータの接触部にフッ素樹脂を母材とした材料を3種類、ロータの接触部に熱硬化性フェノール樹脂を母材とした材料2種類をそれぞれステータ及びロータに貼り付けた。各ライニング材の材料特性を Table 4.2、4.3 に示す。ここで以降、フッ素樹脂そのままのものを PTFE、接着剤を強化したものを PTFE-S、ガラス繊維を添加したものを PTFE-GC と呼ぶ。また熱硬化性フェノール樹脂を母材とし、紙を添加したものを PL-PEM、布を添加したものを PL-FLE と呼ぶ。

PTFE は、耐熱性、耐寒性、電気特性、耐薬品性に優れており、平滑性及び柔軟性に優れている。PTFE-GC は、PTFE に含浸させたガラス繊維に耐熱性の粘着剤を塗布してある。また、伸びが小さく、機械的強度や寸法安定性に優れた耐熱性粘着テープである。PL-PEM は、加工性に優れており、耐溶剤性、電気特性、機械特性に優れているため、電気・電子産業を中心にあらゆる産業に用いられている。一方、PL-FLM は、耐衝撃性に優れ、機械強度が大きく、構造材料を加味した絶縁体その他の分野で広く使用されているものである。

表 4.2 フッ素樹脂材料特性

材料名	厚さ [mm]	引張り強さ [kgf/25mm]	伸び率 [%]
PTFE	0.13	7.2	360
PTFE-S		14.0	125
PTFE-GC		25.0	-

表 4.3 熱硬化性フェノール樹脂材料特性

材料名	基材	引張強度 [MPa]	圧縮強さ [Mpa]	アイゾット衝撃強 さ [J/cm]	比重
PL-PEM	紙	172	294	0.35	1.4
PL-FLM	布	147	289	0.85	

#### 4.2.2 起動トルク測定

ライニング材を貼り付けたステータ及びロータとライニング材を貼らないものをそれぞれ組み合わせた場合の超音波モータの出力トルクへの影響について検討した。これを確証するために、ステータへ交流電圧を印加して、ロータを駆動することによって得られる起動トルクを測定した。起動トルク測定実験において、押付け荷重は超音波モータ内に皿ばねを設け、上下のケースのスペースを調整することにより、押付け荷重を調整した。印加電圧は 80、100、120、160、180、200Vpp とした。