

図 2.3 ハミング窓関数法

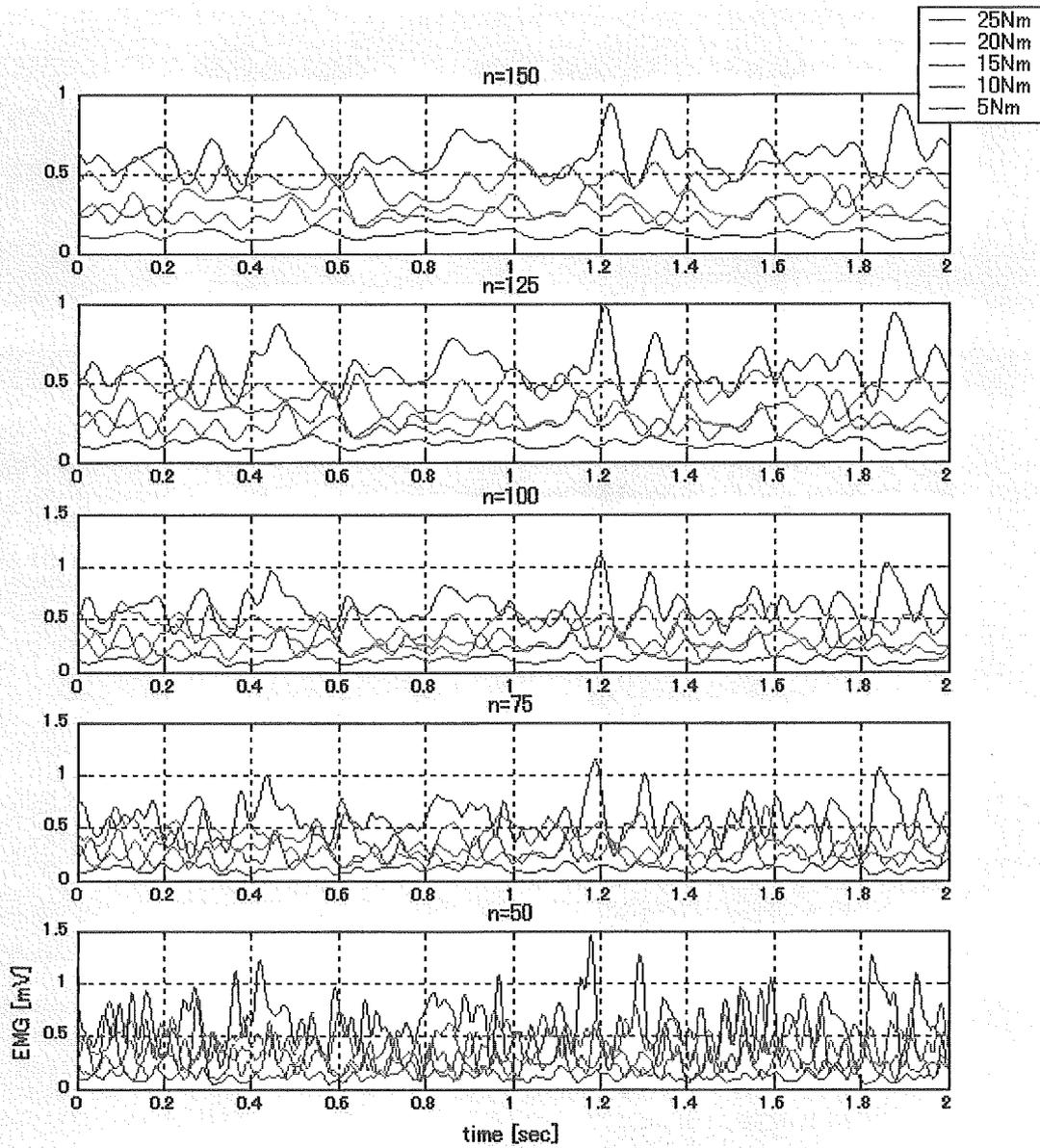


図 2.4 ブラックマン窓関数法

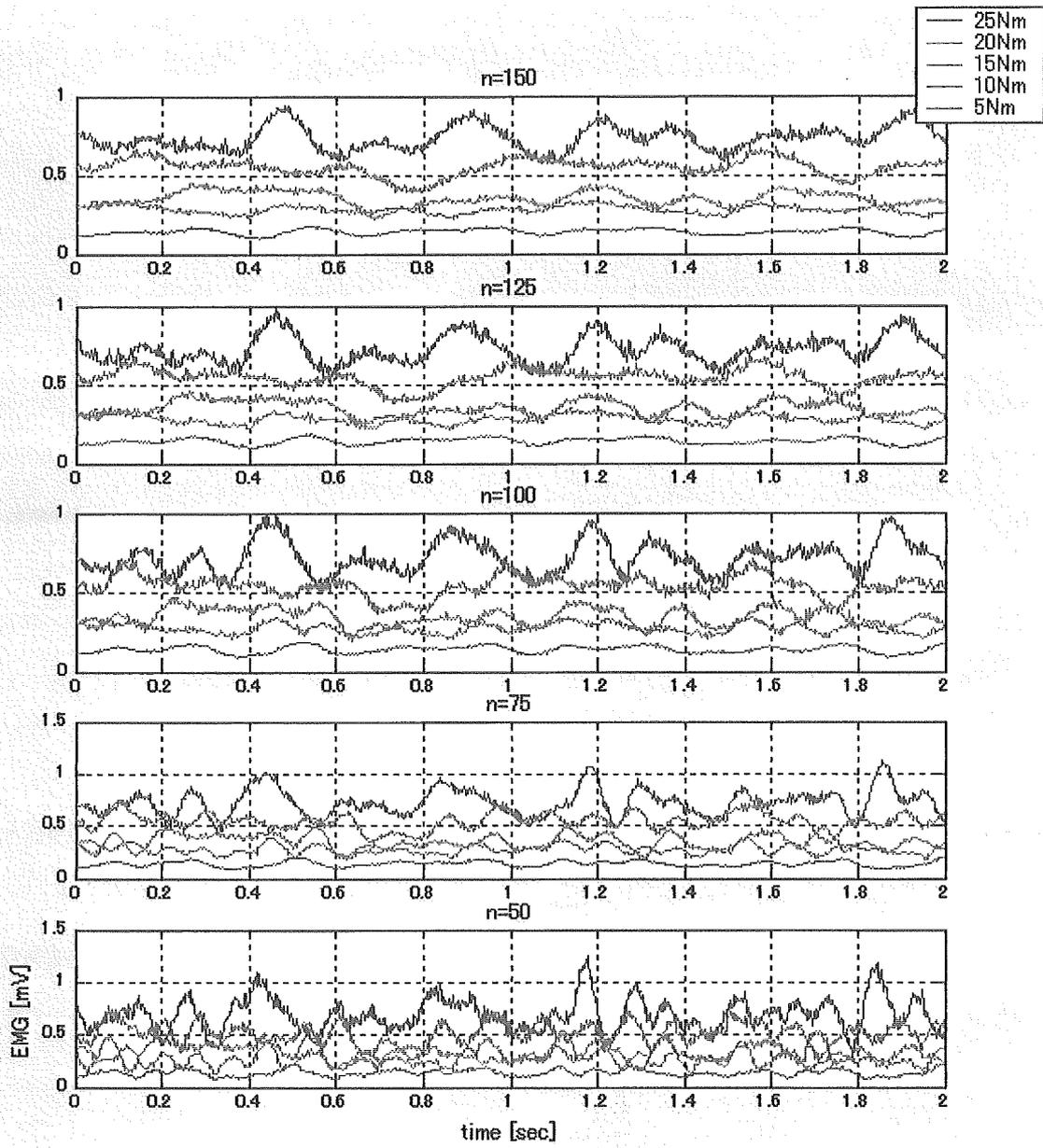


図 2.5 等リプル近似法

関節トルクに関する考察

本研究では応答性が高いことと信号の平滑化という相反する性能をフィルタに求めた。よって応答性の高いフィルタは同一の関節トルクを出している場合にトルクの推定が困難と思われる場合も生じた。一方フィルタの次数を高くした場合にはカイザー窓関数法，等リプル近似法によって設計したフィルタを通した筋電位は大きく平滑化されトルクの推定に利用できると考えた。特にカイザー窓関数法は良い評価を得られたと考えた。

応答性が高いフィルタと平滑化に適したフィルタではどちらがパワーアシストスーツに用いる場合有効であるかはパワーアシスト実験の結果とあわせて考察する。

・モータ駆動

パワーアシスト実験

実際にパワーアシストスーツ(肘部)を装着しアシストの効果の測定を試みた。筋電位の発生機構から筋電位の大きさを測定することによって，どの程度負担が軽減されているか評価できると考えた。関節トルクが5Nm~25Nmとなるように重りを持ち上げた際の筋電位の様子を筋電を平滑化した信号とともに結果を以下に示す，関節トルクが小さい5Nm，10Nmとなる重りを持ち上げた際は応答性の良いフィルタを用いた場合にアシストがない場合と比較して筋電位の低下が見られた。15Nm以上の関節トルクが発生する負荷をかけた場合はアシスト有り，無しによる筋電位の変化は確認できなかった。

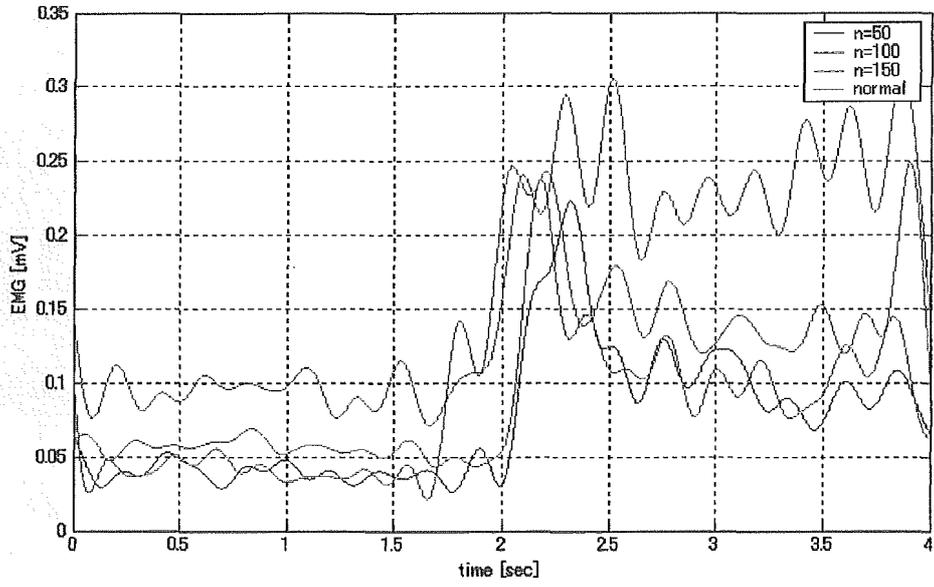


図 2.6 筋電位の比較(5Nm)

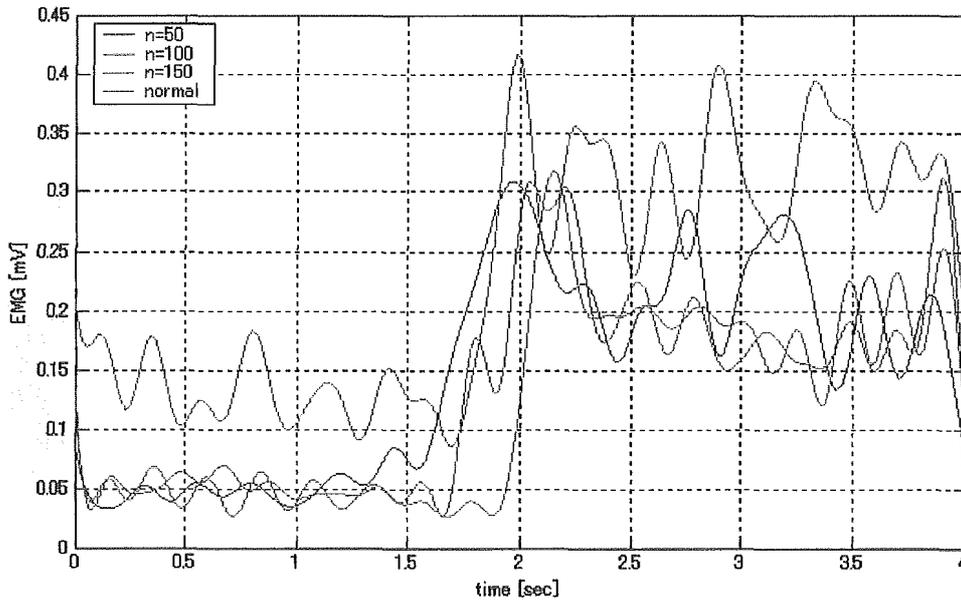


図 2.7 筋電位の比較(10Nm)

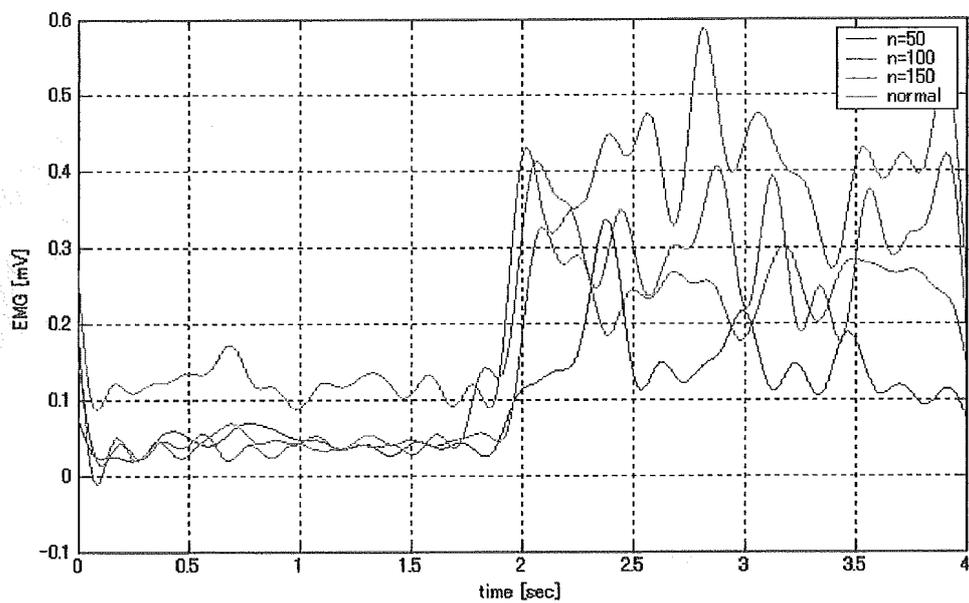


図 2.8 筋電位の比較(15Nm)

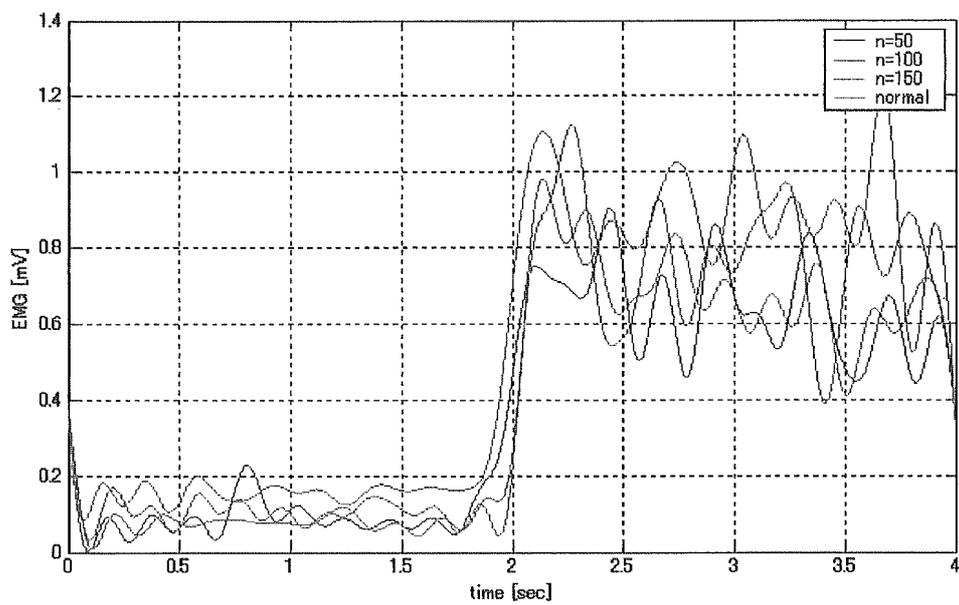


図 2.9 筋電位の比較(20Nm)

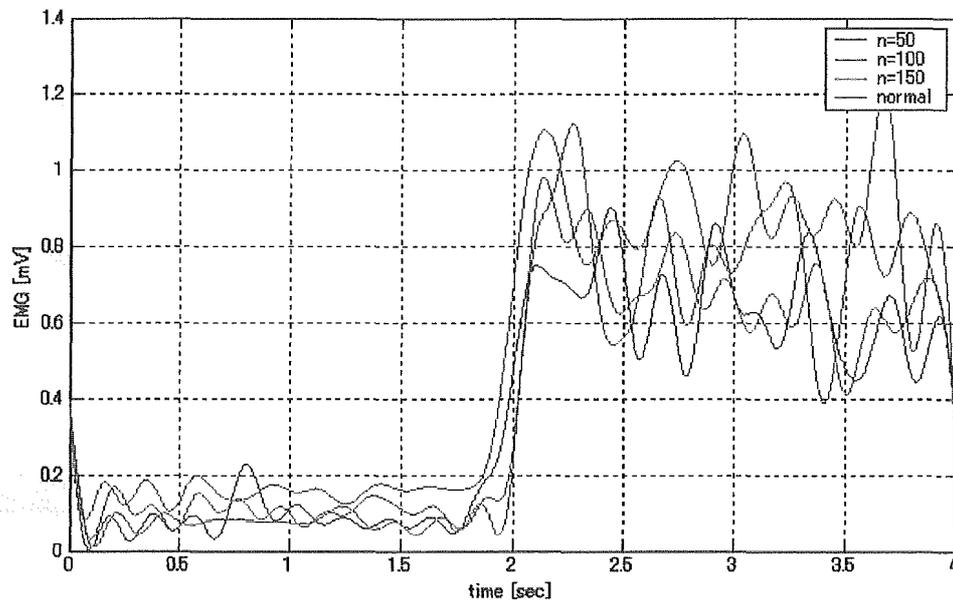


図 2.10 筋電位の比較(25Nm)

パワーアシストに関する考察

以上の実験では関節トルクが小さい場合にアシスト実験における筋電位の低下が確認できた。またフィルタは応答性が高いもののほうが効果的にアシストしていることが確認できた、これは筋電位に対するモータトルクの変化からも理解できるようにフィルタの次数が低い場合、モータは関節が機能するのとほぼ同時に駆動している。これは装着者とアシストスーツがほぼ同時に動き始めていることを示し、パワーアシストスーツにおいては応答性が高いことが効果的であることと確認できた。

しかし関節トルクが大きい場合にはアシストの効果を確認できなかった。この原因はアシストスーツのアシスト率を一定にしていることにあると考えた。現状ではモータのトルクが関節トルクと比較して小さいのでスーツによるアシストが意味を持たなくなってしまう。

そこで一定以上の筋電位が計測された際はモータに最大トルクを出力させると設定したところ、筋電位の低下が確認されたため、装着者の負担が軽減されていると考えることができる。特に関節トルクが 5Nm の重りを持ち上げた際に筋電位の低下が大きく確認することができた。

現段階ではモータのトルクに制限がついてしまっていたため関節トルクに対応してモータのトルクを変化させるということに大きな効果を確認するとは難しかった。

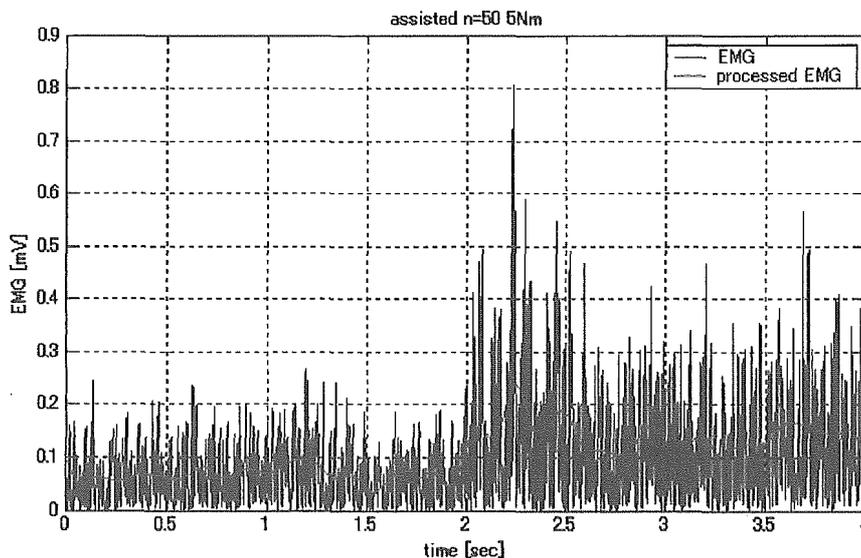


図 2.11 関節トルク 5Nm

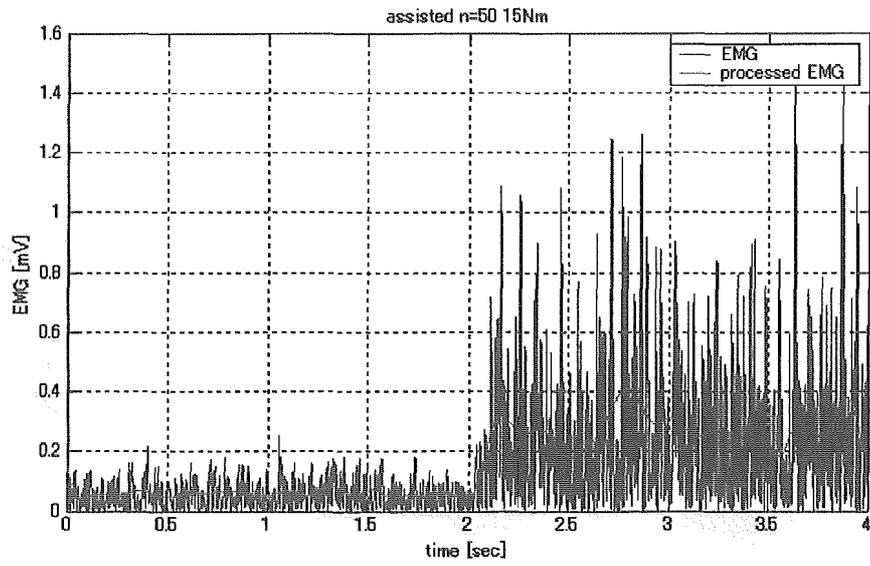


図 2.12 関節トルク 10Nm

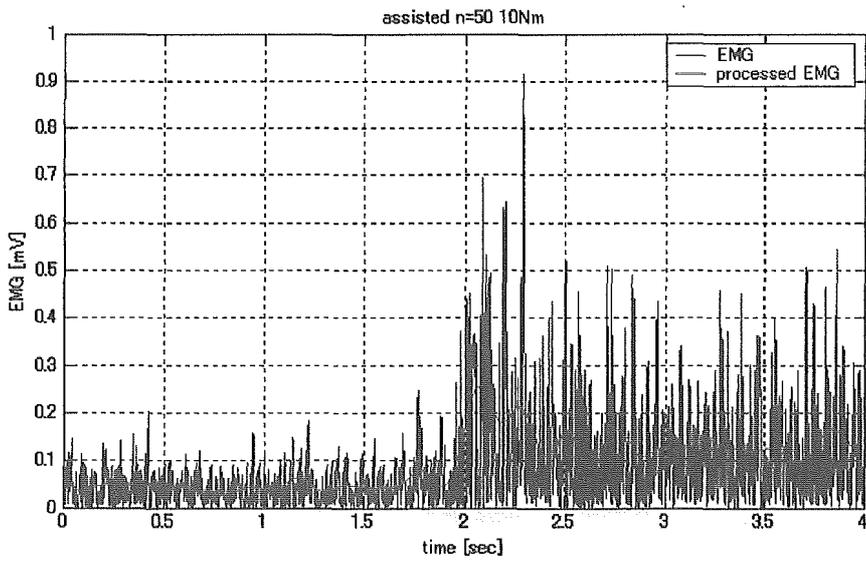


図 2.13 関節トルク 15Nm

筋圧力による随意運動センシング

関節角度

上腕二頭筋の筋圧力が肘関節トルクに対して線形である事を検証すると共に、肘関節角度に対してどのような関係を持つのかについて検証を行う。

肘関節に与える負荷トルクを 0[Nm]から 1.47[Nm]刻みで 11.76[Nm]まで測定した結果を三次元にまとめたものを図 3.1 に示す。筋圧力は、関節角度が小さいときは負荷トルクに対して小さい傾きで比例するが、関節角度が大きくなるにつれ、負荷トルクに対する傾きが大きく線形に出力される結果となった。また、関節角度に対しては非線形に、下向き凸の曲線として出力される。測定点のわずかなずれにより、筋圧力は大きく変化する。そのため、負荷トルクと関節角度のそれぞれに対する筋圧力の勾配は測定について違う。しかしほぼ同様な傾向を持っており、近似式の算出が可能であると言える。そこで近似式の算出を行った。負荷トルクと関節角度に関する筋圧力の出力は実験より、式(3.1)で近似できる。

$$P = a \tau + (b + cT)\theta + d\theta^2 + e \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} P &= \text{筋圧力 [N]} \\ \tau &= \text{負荷トルク [Nm]} \\ \theta &= \text{関節角度 [deg]} \end{aligned}$$

なお a, b, c, d, e は最小二乗近似によって決定される係数である。

図 3.1 の結果に式(3.1)を適用し、近似を行った結果を図 3.2 に示す。また、近似によって決定した係数を表 3.1 に示す。

式(4.1)を変形する事により、筋圧力と関節角度による関節トルクの算出式となる。関節トルクの算出式を式(4.2)に示す。

$$\tau' = (P - b\theta - d\theta^2 - e) / (a + c\theta) \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \tau' &= \text{推定関節トルク [Nm]} \\ \text{他の係数は式(3.1)及び表 3.1 に準ずる。} \end{aligned}$$

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(3.2)を適用し、トルク推定を行う。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 4.7 に示す。また正規分布として表したものを図 4.8 に示す。平均は 0.02306[Nm]、標準偏差は 2.8057 となった。これにより、関節トルクの推定に使用するには精度が低いと言える。この推定による誤差と、図 4.5 の結果における、角度に対する筋圧力の袋状出力は同じ原因から発生していると考えられる。その原因は、今回の実験では関節の角速度が考慮に入れられていない

ためであると考えられる。関節の角速度が筋圧力に与える影響については次節で述べる。

肩関節の屈曲・伸展が測定点の筋圧力に及ぼす影響を検証する。肩関節に角度取得用フレームを取り付け、肘関節を伸展させたまま、肩関節を屈曲 $0[\text{deg}]$ から $90[\text{deg}]$ まで屈曲させる。肩関節の屈曲と上腕二頭筋の筋圧力の関係を図 3.5 に示す。結果として肩関節の屈曲によって若干の筋圧力の変化が認められた。屈曲 $0[\text{deg}]$ と屈曲 $90[\text{deg}]$ の出力を同じくする、全体としては凹型の出力となった。これは上腕二頭筋が上腕骨にある筒状の靭帯を通過した後に、肩甲骨へ起始している事によるものと考えられる。なお、図 3.1 の結果における関節角度に対する非線形性は、肩関節の屈曲が筋圧力に与える影響を考慮すると線形に補完できる。この為、肩関節の角度を一定に保ち、肘関節の角度と負荷トルクにおける筋圧力を測定した場合、関節角度に対して線形に筋圧力が出力されるものと考えられる。

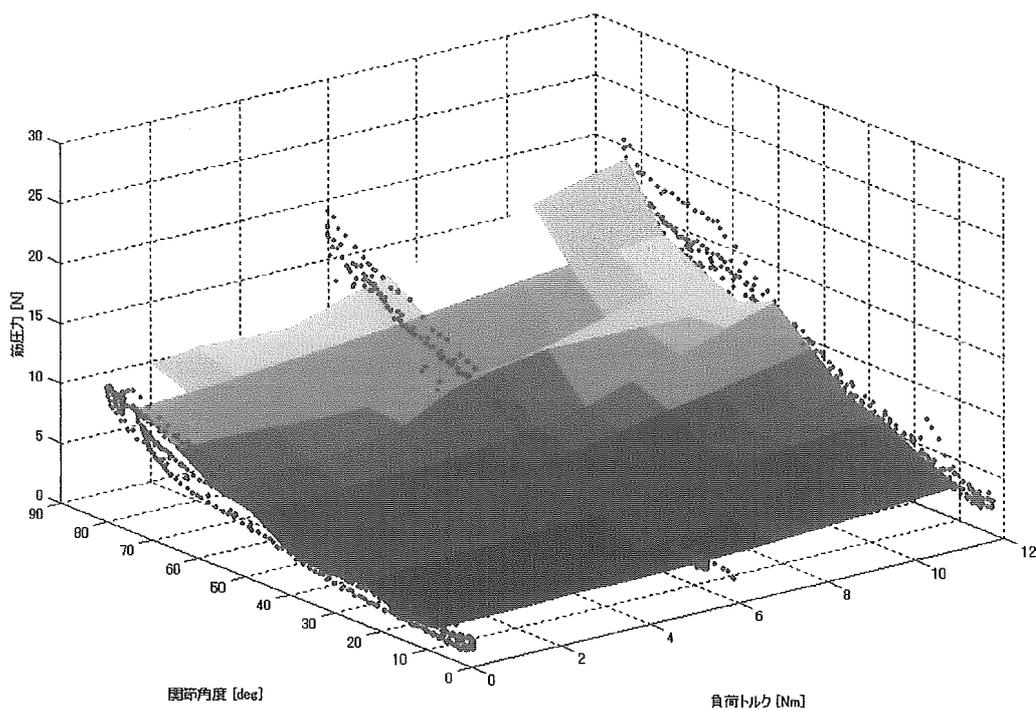


図 3.1 負荷トルク－関節角度－筋圧力 測定結果

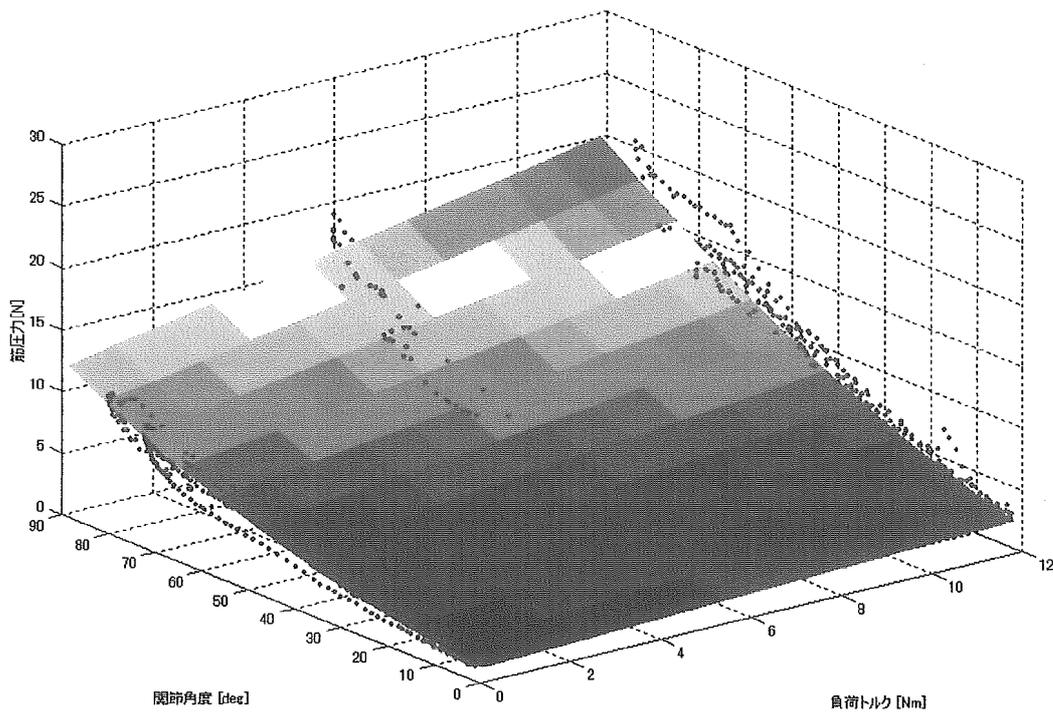


図 3.2 負荷トルク－関節角度－筋圧力 最小二乗曲面近似結果

表 3.1 負荷トルク－関節角度－筋圧力 最小二乗近似係数

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

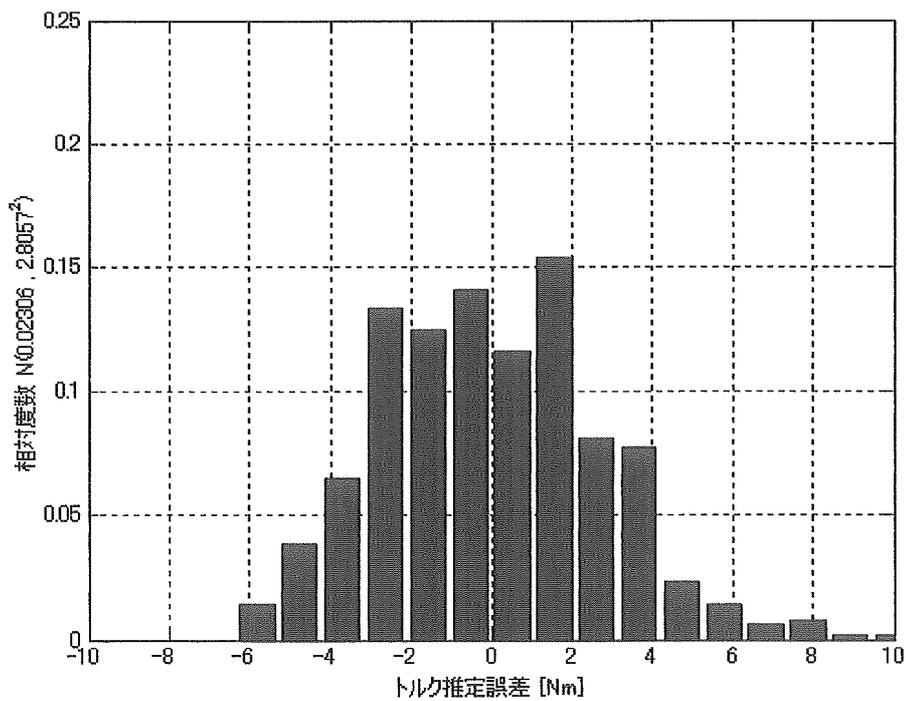


図 3.3 トルク推定誤差 ヒストグラム

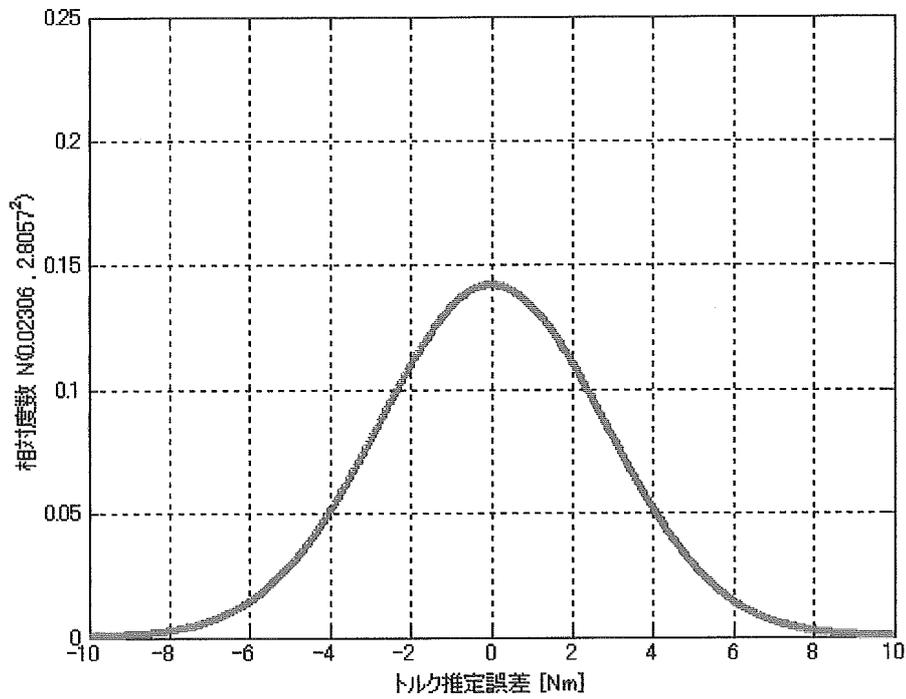


図 3.4 トルク推定誤差 正規分布

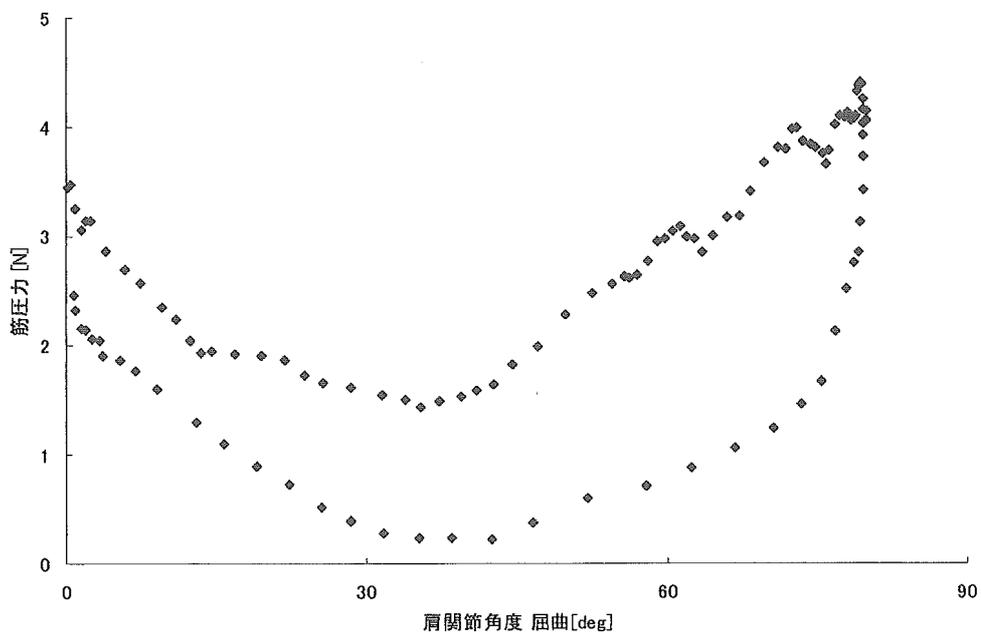


図 3.5 肩関節角度一筋圧力 測定結果

関節角速度及び関節角加速度

前節では、筋圧力によるトルク推定の精度を下げる原因として、関節の角速度の筋圧力へ与える影響が大きい事が理由であると述べた。本節では関節の角速度が筋圧力に与える詳細な影響について検証し、また、関節角加速度が筋圧力に与える影響についても検証を行う。なお、本実験においては、角速度・角加速度共に、エンコーダによる角度変位とサンプリングタイムから、計算的に求めた物を使用する。

関節角速度

負荷トルクが $0[\text{Nm}]$, $2.94[\text{Nm}]$, $5.88[\text{Nm}]$, $8.82[\text{Nm}]$ の 4 つのパラメータにおいて、関節角度と筋圧力に及ぼす影響について検証した。結果を図 3.6~図 3.9 に示す。いずれにおいても関節角速度が増加すると、筋圧力も増加する傾向にある。また関節角度が大きいほど、関節角速度の影響も大きくなっている。関節角度と関節角速度における筋圧力の関係式は式(4.3)となっている。また、式(4.3)を適用し、近似を行った結果を図 3.10~図 3.13 に示す。

$$P = a\omega + b\theta + (c + d\omega)\theta^2 + e \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} P &= \text{筋圧力 [N]} \\ \omega &= \text{関節角速度 [rad/sec]} \\ \theta &= \text{関節角度 [deg]} \end{aligned}$$

なお a , b , c , d , e は近似によって決定される係数である。

それぞれの負荷トルクにおける係数 a , b , c , d , e をまとめたものを表 4.4 に示す。関節角速度へ関係する係数及び項は、式(3.3)の係数 a を含む第一項と係数 d を含む第三項であり、関節角度が大きくなった場合に関節角速度に対する筋圧力の勾配を決定するのは係数 d を含む第三項である。係数 d はトルクを変化させても大きく変わる事が無い。よって筋圧力の関節角速度に対する勾配は負荷トルクの影響を受けず、ほとんど同じであるといえる。

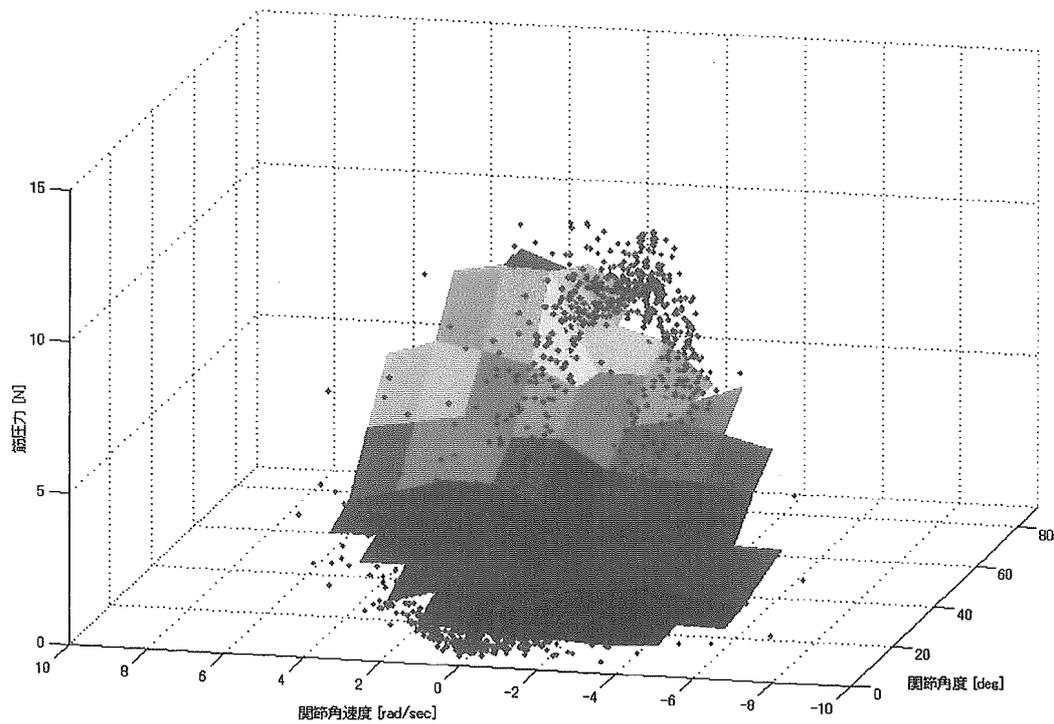


図 3.6 関節角度－関節角速度－筋圧力 測定結果 (負荷トルク 0.0Nm)

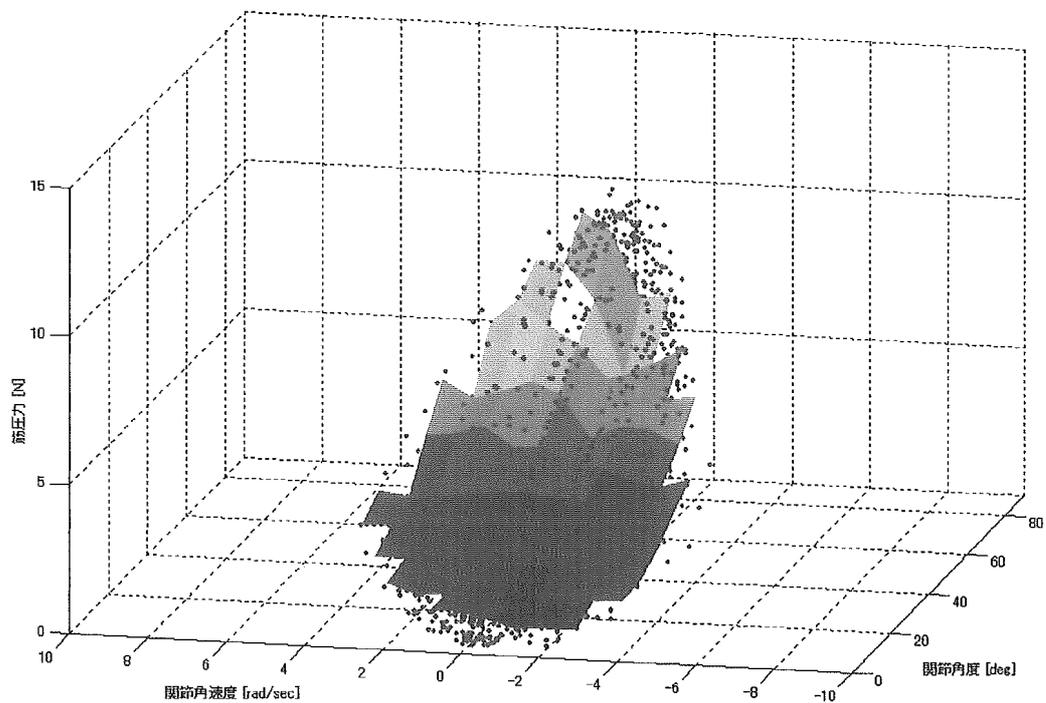


図 3.7 関節角度－関節角速度－筋圧力 測定結果 (負荷トルク 2.94Nm)

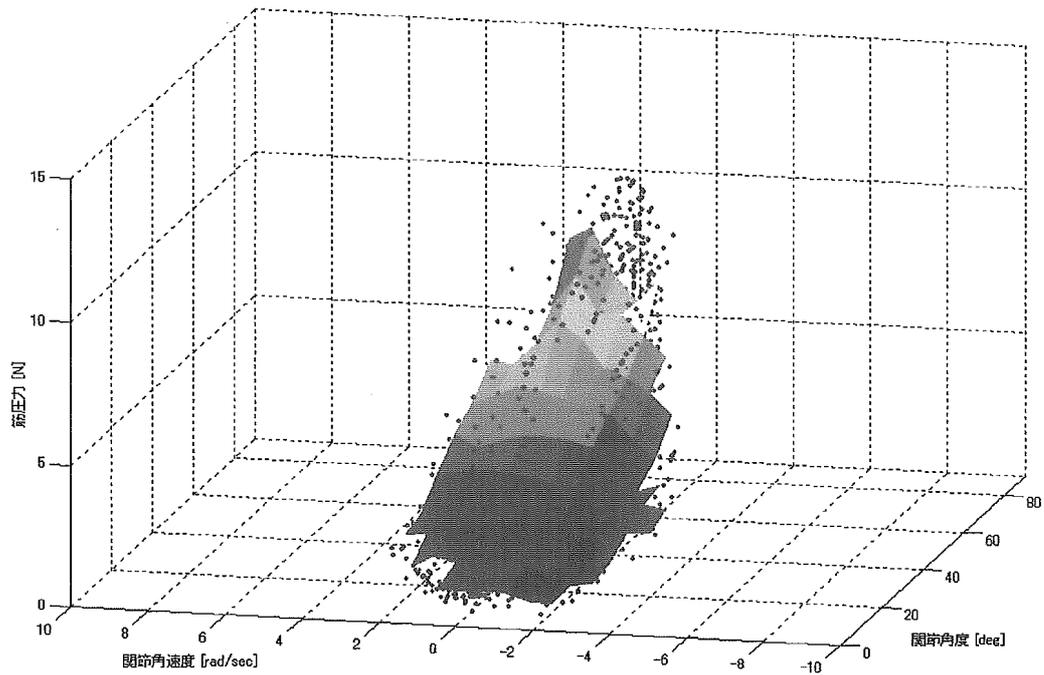


図 3.8 関節角度－関節角速度－筋圧力 測定結果 (負荷トルク 5.88Nm)

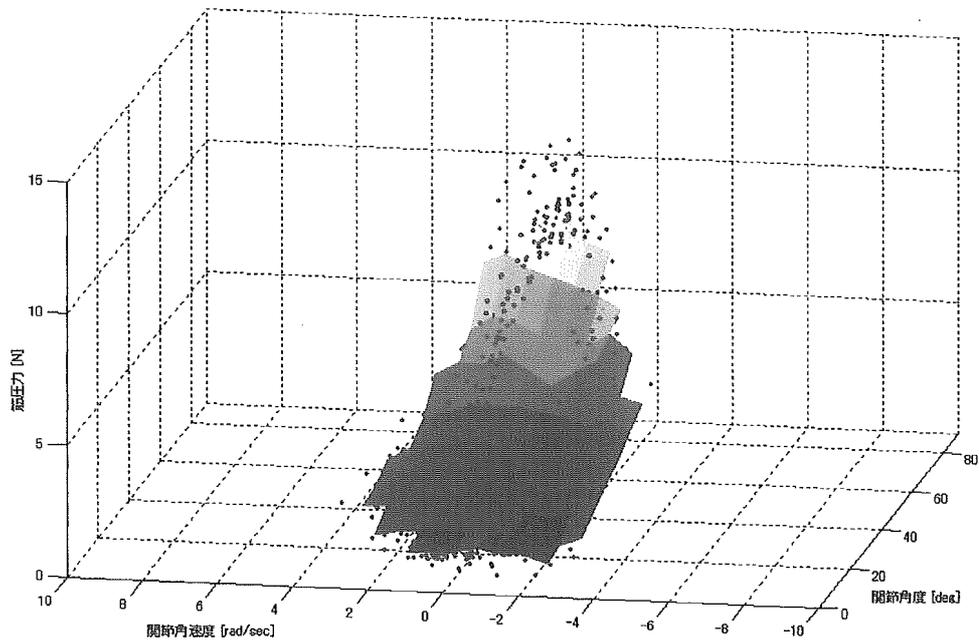


図 3.9 関節角度－関節角速度－筋圧力 測定結果 (負荷トルク 8.82Nm)

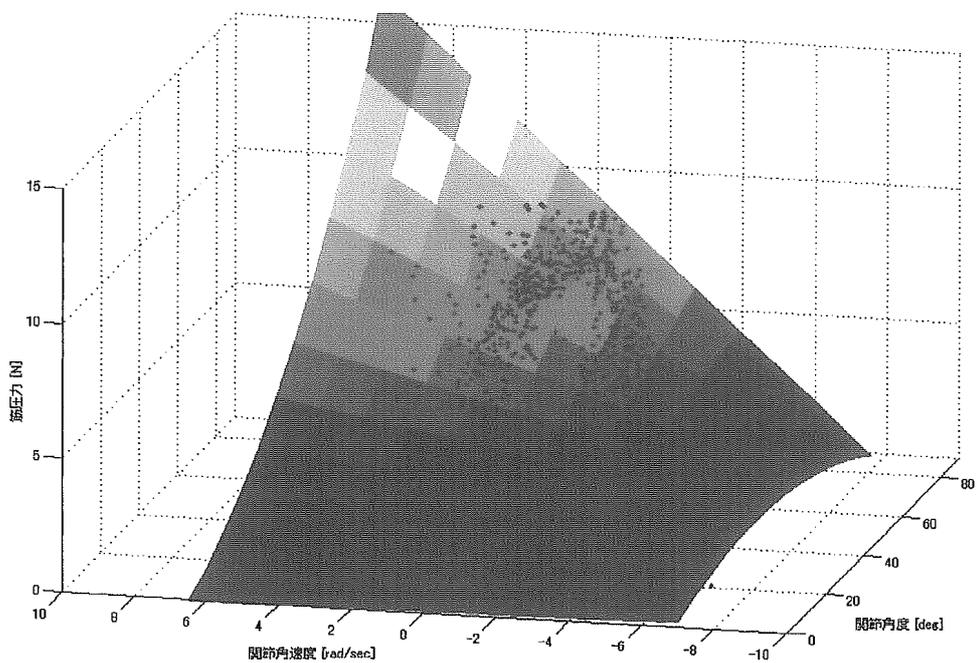


図 3.10 関節角度－関節角速度－筋圧力 最小二乗曲面近似結果
(負荷トルク 0.0Nm)

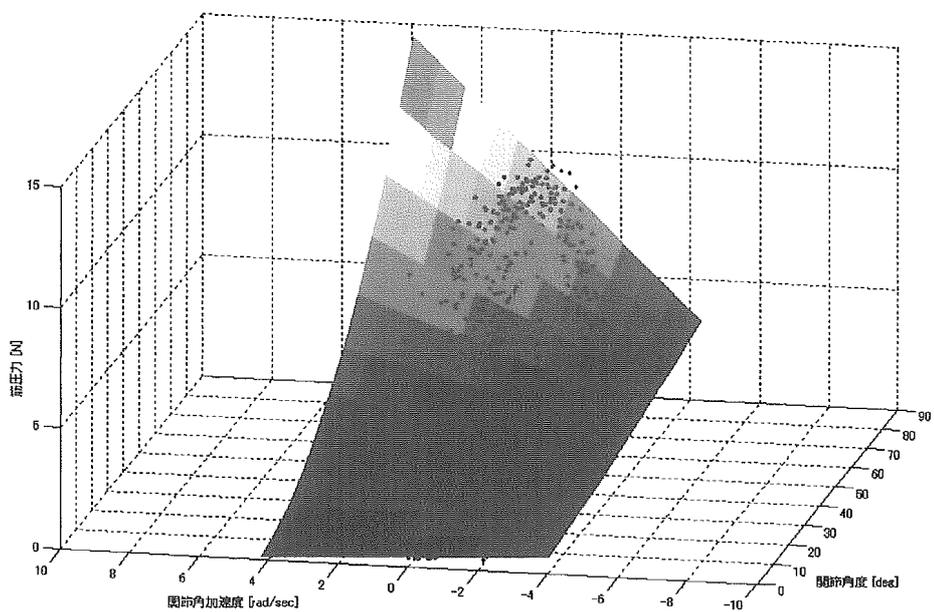


図 3.11 関節角度－関節角速度－筋圧力 最小二乗曲面近似結果
(負荷トルク 2.94Nm)

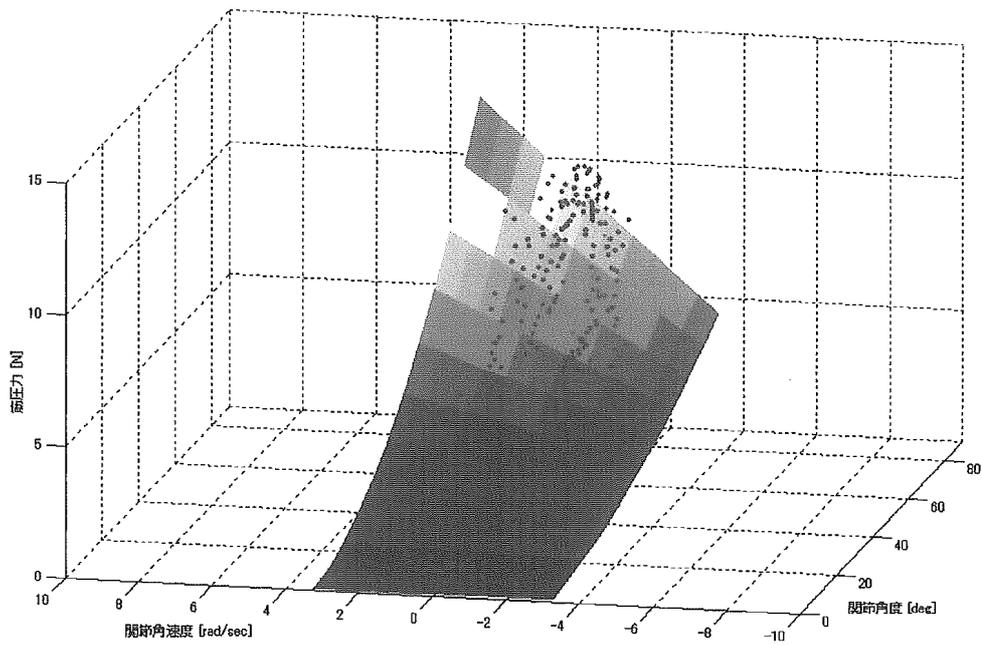


図 3.12 関節角度－関節角速度－筋圧力 最小二乗曲面近似結果
(負荷トルク 5.88Nm)

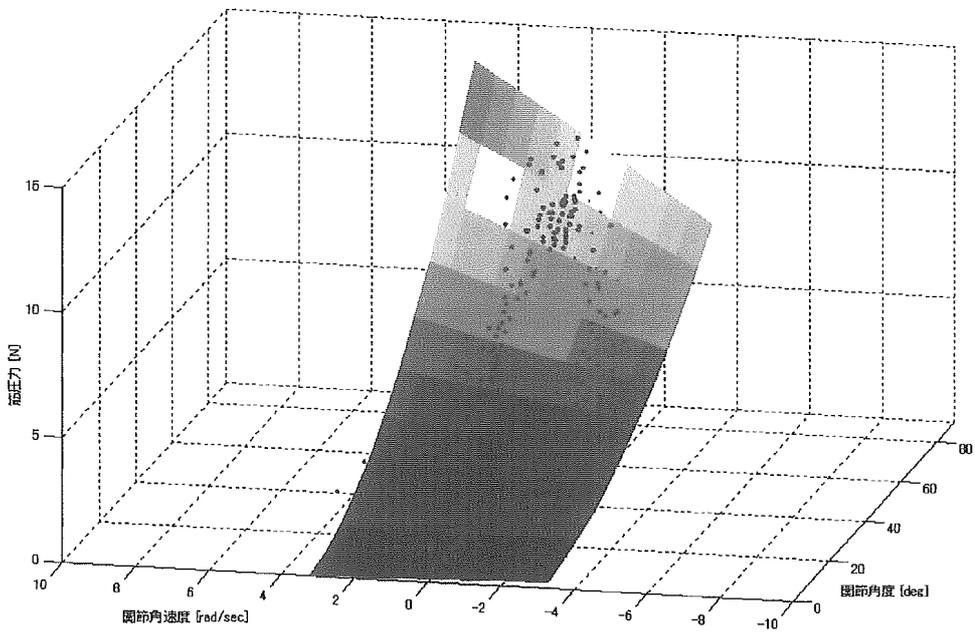


図 3.13 関節角度－関節角速度－筋圧力 最小二乗曲面近似結果
(負荷トルク 8.82Nm)

表 3.2 負荷トルク－関節角速度－筋圧力 最小二乗近似係数

負荷トルク	a	b	c	d	e
0.00 [Nm]	-1.5843×10^{-2}	4.4086×10^{-2}	2.9552×10^{-4}	1.1928×10^{-4}	2.8424×10^{-2}
2.94 [Nm]	-6.5470×10^{-2}	1.4654×10^{-2}	6.7342×10^{-4}	1.5039×10^{-4}	3.6603×10^{-1}
5.88 [Nm]	-1.2836×10^{-2}	1.2315×10^{-2}	8.3865×10^{-4}	1.4363×10^{-4}	6.4462×10^{-2}
8.82 [Nm]	-3.5895×10^{-2}	1.3730×10^{-2}	1.0755×10^{-4}	1.1534×10^{-4}	9.1539×10^{-2}

関節角加速度

前節と同様の検証を関節角加速度についても行った。負荷トルクが 0[Nm], 2.94[Nm], 5.88[Nm], 8.82[Nm]の 4 つのパラメータにおいて、関節角度と関節角加速度が筋圧力に及ぼす影響の検証結果を図 3.14~図 3.17 に示す。関節角度が増加すると、筋圧力に及ぼす影響が大きくなる事については、関節角加速度は関節速度と同じである。しかし、関節角加速度は増加した場合、筋圧力が減少する。関節角加速度と関節角度が筋圧力に及ぼす影響は、式(3.4)で表すことが出来る。

$$P = a\omega' + b\theta + (c + d\omega')\theta^2 + e \quad (3.4)$$

P = 筋圧力 [N]

ω' = 関節角加速度 [rad/sec²]

θ = 関節角度 [deg]

なお a, b, c, d, e は近似によって決定される係数である。

それぞれの負荷トルクにおける係数 a, b, c, d, e をまとめたものを表 4.5 に示す。また、近似結果を図 3.18~図 3.21 に示す。

また、最小二乗近似による近似結果を図関節角加速度へ関係する係数及び項は、関節速度の場合と同様に係数 a を含む第一項と係数 d を含む第三項である。これらの項は非常に小さく、関節角加速度は筋圧力にほとんど影響を及ぼさないものとして考えて問題ない。その為、これ以後では関節角加速度の影響を無視する。

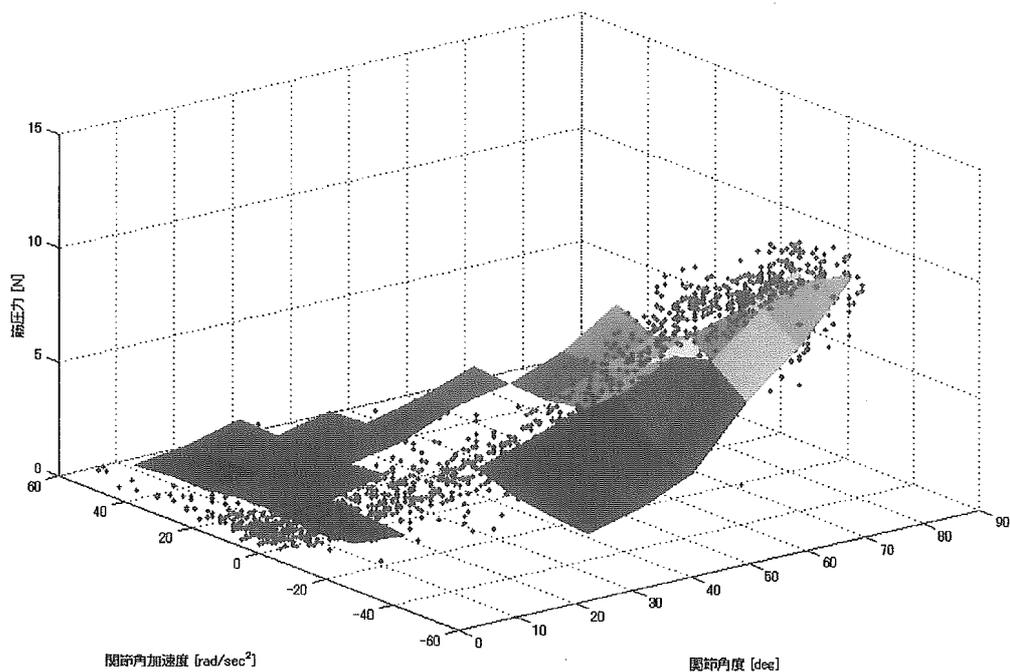


図 3.14 関節角度－関節角加速度－筋圧力 測定結果
(負荷トルク 0.0Nm)

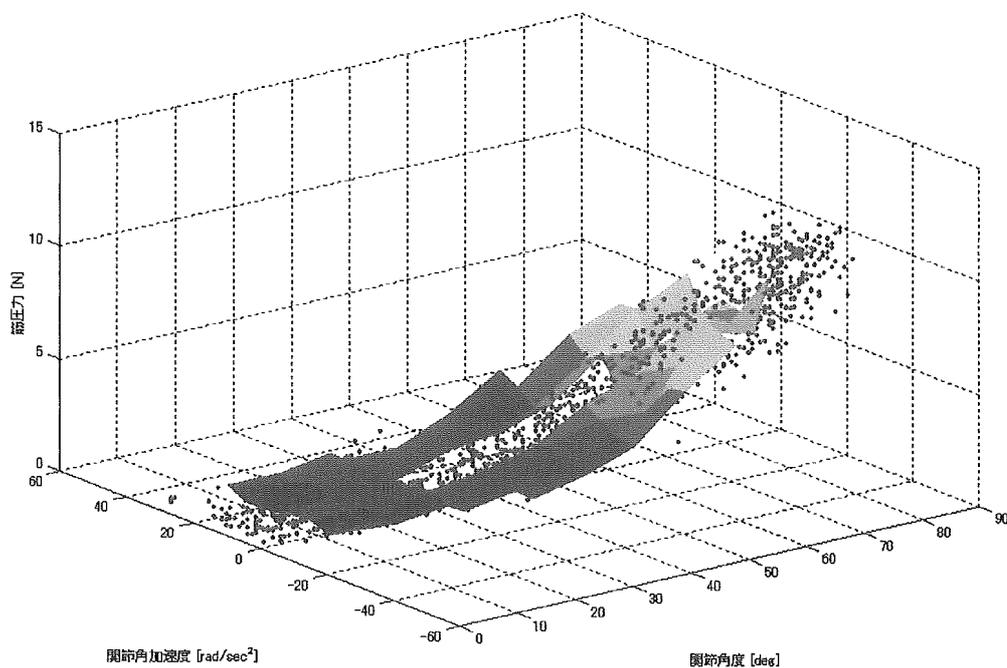


図 3.15 関節角度－関節角加速度－筋圧力 測定結果
(負荷トルク 2.94Nm)