

図 2.16 筋電位に対するモータの応答(次数=125)

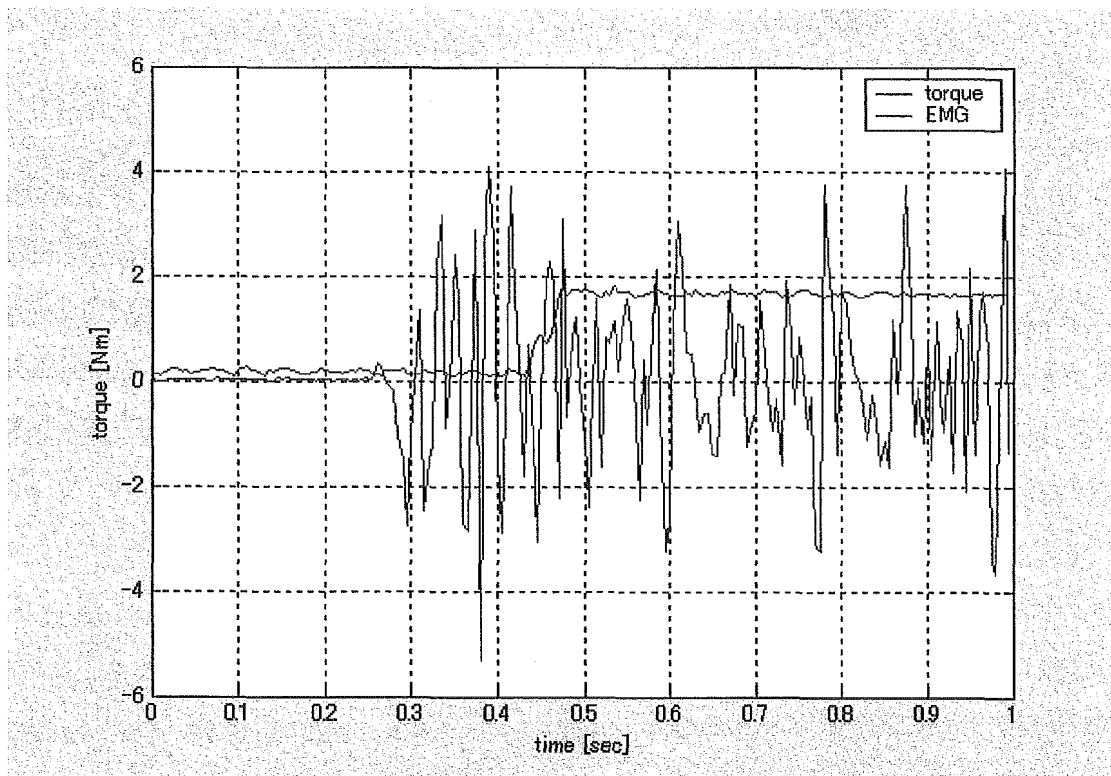


図 2.17 筋電位に対するモータの応答(次数=150)

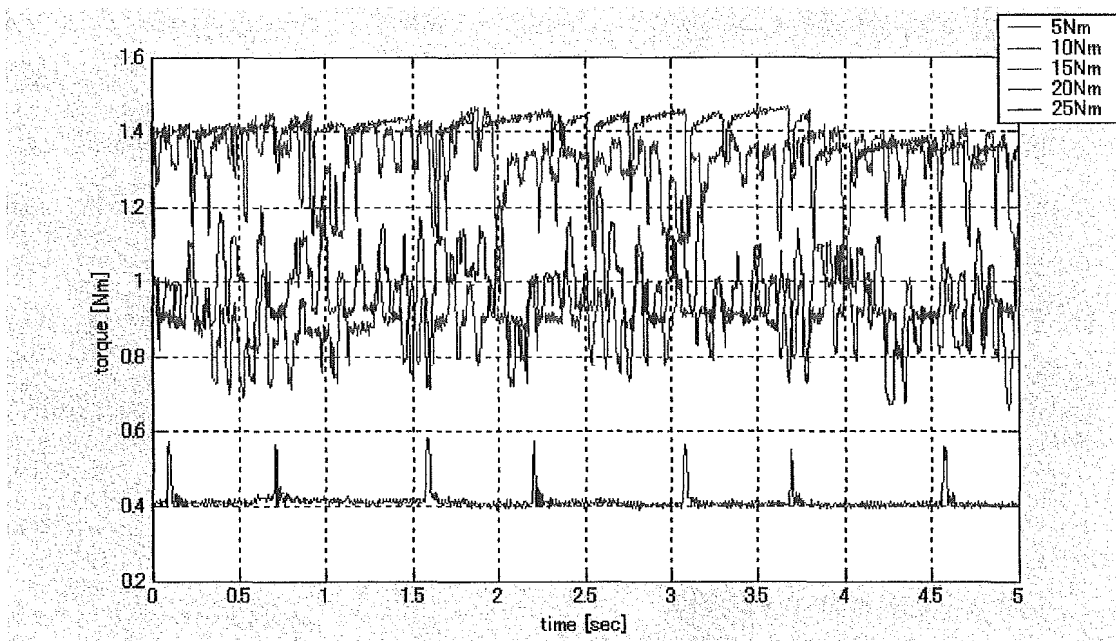


図 2.18 50 次のフィルタを用いた場合

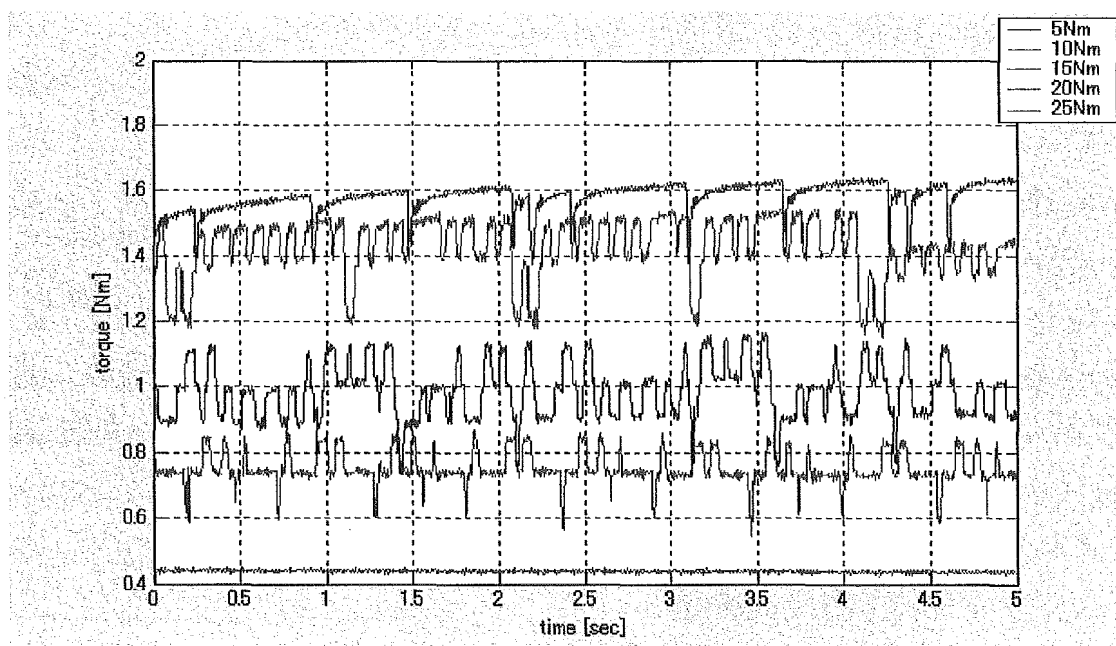


図 2.19 75 次のフィルタを用いた場合

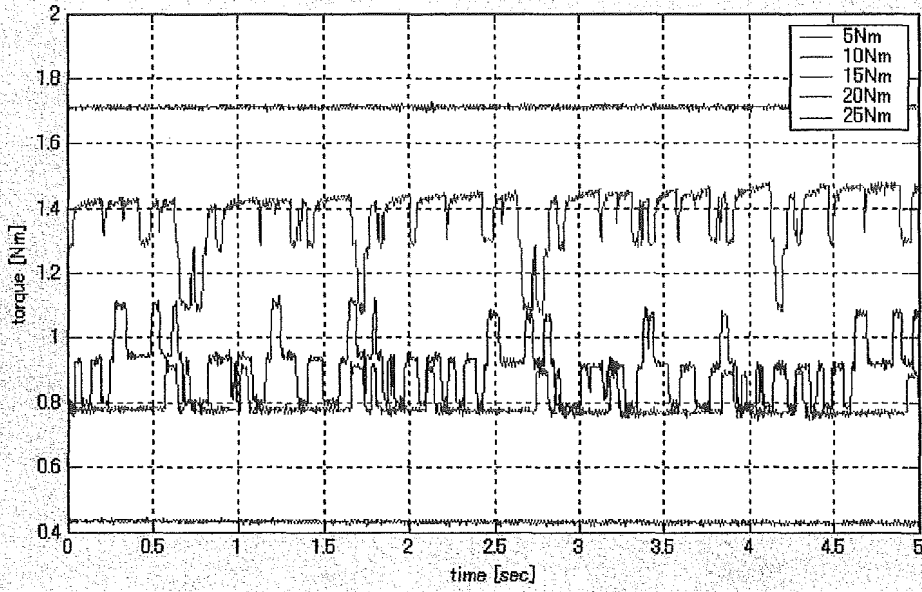


図 2.20 100 次のフィルタを用いた場合

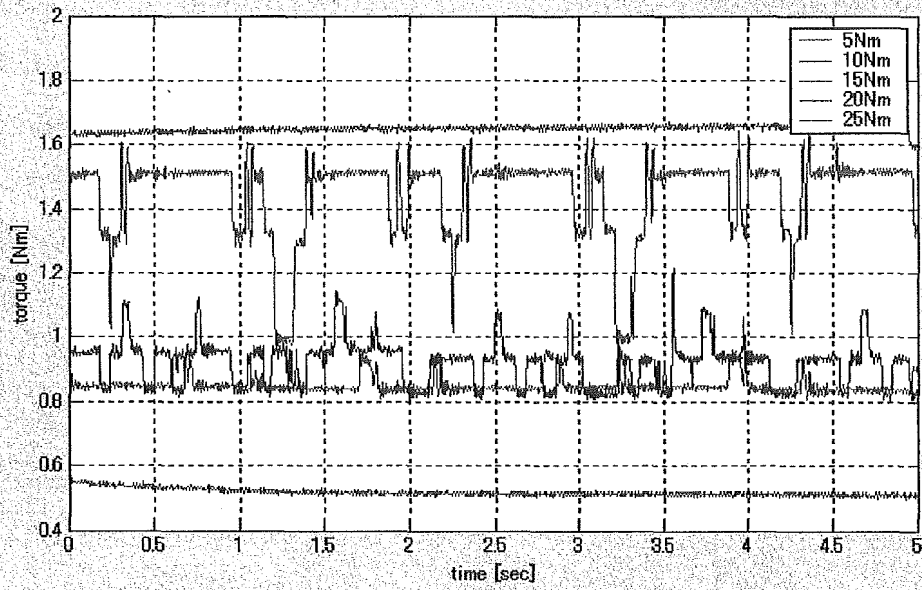


図 2.21 125 次のフィルタを用いた場合

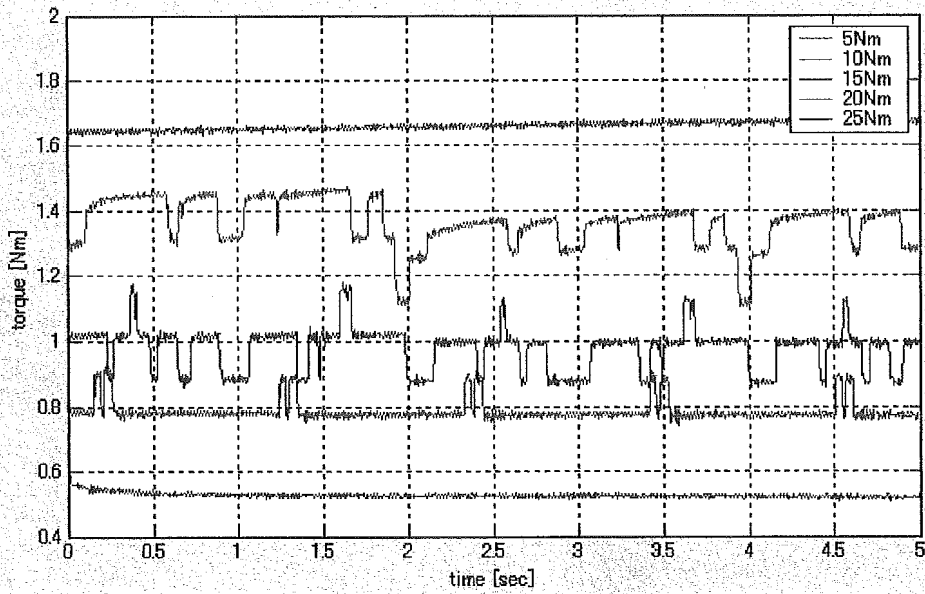


図 2.22 150 次のフィルタを用いた場合

筋圧力による随意運動センシング

パワーアシストスーツのアクチュエータ制御には装着者の随意運動のセンシングが有効である事は過去の研究からも明らかにされている。随意運動とは人間の意思の結果として発生する運動であり、随意筋の別名を持つ骨格筋の収縮によって行われる運動である。本研究では筋圧力を用いて随意運動のセンシングを行う。本節では筋圧力発生のメカニズムについて理論的に検証する。また第三試作パワーアシストスーツにおいてアシストを想定している動作において、筋圧力の検出を行う筋として、本研究では肘関節の上腕二頭筋を選定した。その選定理由と肘関節及びその動作に作用している筋について述べる。

筋構造

全ての関節の動作は、骨格筋の収縮によって行われている。本節では骨格筋の構成単位である筋繊維、筋細繊維の構造と収縮のメカニズムについて述べる。

骨格筋は筋上膜と呼ばれる膜で包まれた器官であり、膜内部には血管や神経、そして損傷した筋組織を修復する為の衛星細胞が筋束と呼ばれる筋繊維の束と共に内包されている。筋束は筋周膜と呼ばれる膜で包まれており、筋上膜に包まれた血管や神経は筋周膜の表面を這うように配置されている。筋周膜には骨格筋繊維が内包されている。骨格筋繊維も骨格筋、筋束と同様に膜で包まれた器官であり、骨格筋繊維を包んでいる膜を筋内膜と呼ぶ。筋内膜表面には毛細血管があり、筋内膜によって筋細繊維が包まれている。これらを図 3.1 に示す。

筋細繊維は筋細系の束によって成り立っている。筋細系には二種類あり、アクチン蛋白と呼ばれる物質によって成り立つ細い筋細系とミオシン蛋白と呼ばれる物質によって成り立つ太い筋細系がある。細い筋細系をアクチンフィラメント、太い筋細系をミオシンフィラメントと呼ぶ。これらは交互にかみ合うように配置され、筋節と呼ばれる単位を構成する。筋節の両端にはアクチンフィラメントを束ねている Z 線が、近接の中央にはミオシンフィラメントを束ねている M 線が存在する。筋節を図 3.2 に示す。筋節が約一万連なって一本の筋細繊維が構成される。それぞれの筋節のアクチンフィラメントとミオシンフィラメントが引き合い、より深く重なり合うように動く事で骨格筋全体が収縮するが、その原理は現在解明されていない。

筋細系の張力は、アクチンフィラメントとミオシンフィラメントの重複領域の大きさ、すなわち筋節の長さに依存する。筋節の長さや張力の関係を図 3.3 に示す。図中の (a) 又は (b) のように筋節が適切な長さよりも短かった場合、アクチンフィラメント同士が M 線付近で重複してしまい、それぞれのフィラメントの重なり量が減少し、張力は低下する。また、(a) の領域ではミオシンフィラメントがアクチンフィラメントを束ねている Z 線と接触する事により張力の発生が阻害される。図中 (c) の領域では、筋節が適切な長さを持っている為、アクチンフィラメントの重複も起こらず、また、アクチンフィラメントとミオシンフィラメントの重複領域も十分であるので最大の張力を発生する。(d)、(e) の領域では筋節が適正を超えて引き伸ばされているために重複領域が減少し、

張力が減少する。重複領域が大きくなると、筋細糸の断面積におけるアクチン、ミオシン両フィラメント密度が上がる。この事により筋細糸は太くなり、筋繊維、骨格筋の断面積の増加をもたらす。しかし、筋細繊維についてはまだその機構、構造が未解明であるところが多く、筋節長さや筋細糸の横断面積の関係及び、筋細糸の横断面積と発生張力の関係は明らかにされていない。

一般に、骨格筋の長軸に沿って筋繊維がある平行筋の場合、その最大張力は静止状態の筋の断面積に比例する。その最大張力は横断面積 $1 \times 10^{-4} [\text{m}^2]$ あたり $35 [\text{N}]$ となっている。しかし、大胸筋のように起始と停止の大きさが違う収束筋や、大腿四頭筋のように筋の長軸に対して筋繊維が斜めに存在する羽状筋の場合、面積あたりの筋繊維の本数が一定でないため、先に示した関係の適用は不可能である。

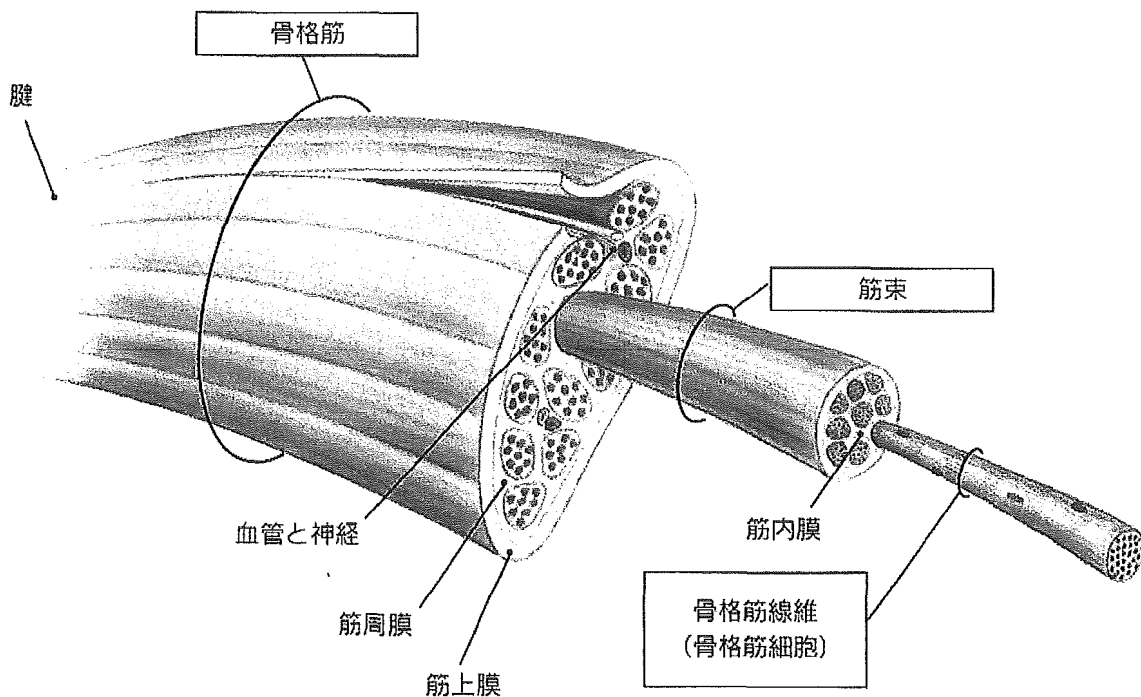


図 3.1 骨格筋の構造

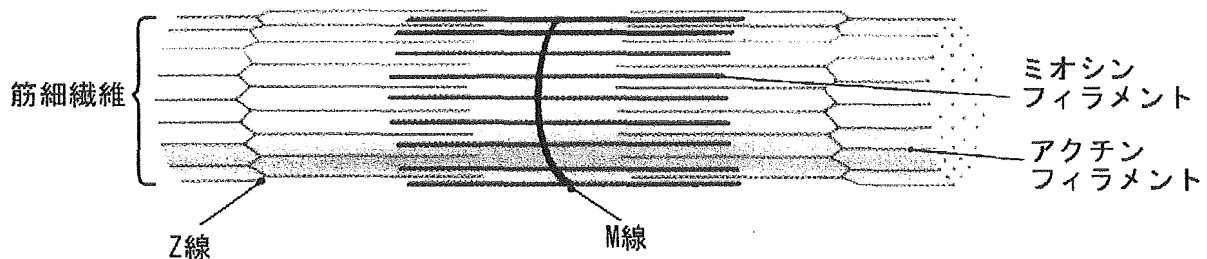


図 3.2 筋節の構造

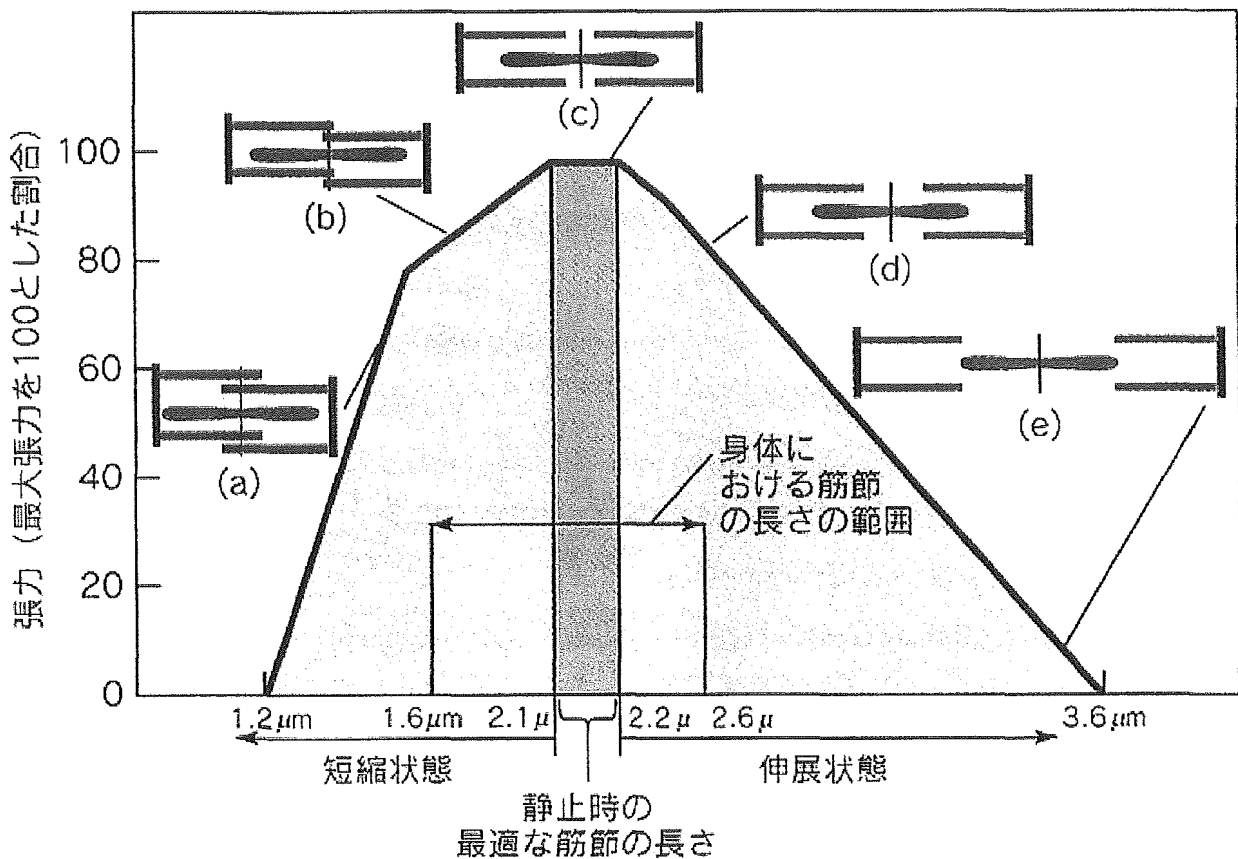


図 3.3 重複領域と発生張力の関係

筋圧力

筋が収縮すると張力が発生し、また筋の長さによって断面積が変化することは前節で述べた。本節ではこれらの変化を筋圧力という形で測定する事によって筋の張力を推定することが可能である事を述べている。

全ての関節の屈曲・伸展、外転・内転の動作に関しては、関節と筋及び骨格によるてこ構造となっている。てこ構造の模式図を図 3.4 に示す。ここで仮に筋が収縮に関係なく断面積が変化しないとする。すると関節トルクと関節角度、筋の張力には以下の式(3.1)が適用できる。

$$\tau = b T \sin \{ \tan^{-1} [(a + b \cos \theta) / (b \sin \theta)] + \theta - 90 \} \quad (3.1)$$

τ = 関節トルク [Nm] T = 骨格筋の発生張力 [N]

a = 関節から骨格筋の起始までの距離 [m]

b = 関節から骨格筋の停止までの距離 [m]

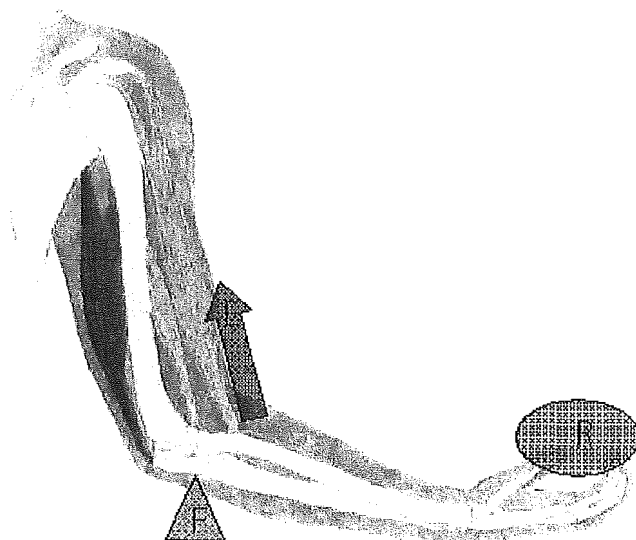
θ = 関節角度 屈曲 [deg]

式(3.1)を用いた計算結果を図 3.5 に示す。関節一起始間及び関節一停止間の距離は上腕二頭筋を想定して、 $a=0.30[m]$ 、 $b=0.05[m]$ とした。図 3.5 より、理論式においては、発生張力は関節トルクに対してほぼ線形に出力され、関節角度は張力に対してほとんど影響を及ぼさない。

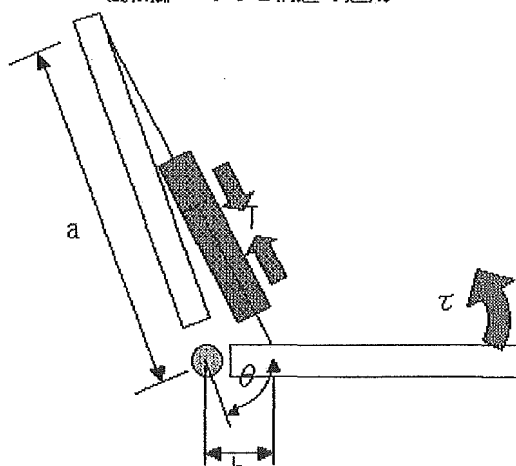
筋圧力は骨格筋にある押し込み深さを持って押し付けを行った点に作用する骨格筋からの反力である。そのために骨格筋の発生張力と筋圧力は比例する。

実際の骨格筋では関節角度によってその横断面積は変化する為、押し込み深さが変化し、筋圧力は関節角度と関節トルクとの関数になると予想される。しかし、前節にて述べたとおり、筋繊維の発生張力と横断面積の関係は明らかにされておらず、理論を立てることが非常に難しい。

この事により、理論式により、関節トルクに対して筋圧力が線形で出力されることは予想できるが、角度に対してどのように筋圧力が出力されるかは予想が出来ないため、実験によって関節角度と筋圧力の関係を求める事が必要となる。



(a)関節へのてこ構造の適用



(b)てこ構造による関節モデル

図 3.4 関節のてこ構造

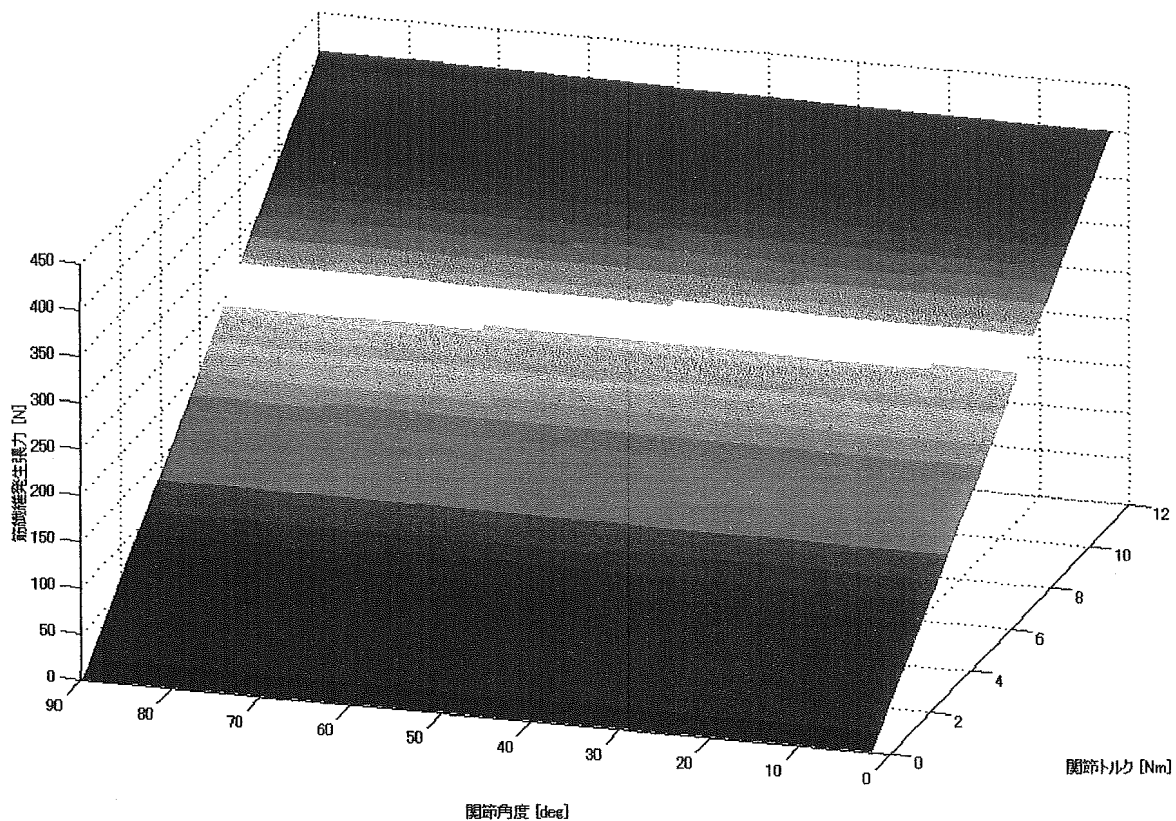


図 3.5 理論式における関節トルク－関節角度－筋圧力の関係

測定点の選定

筋圧力によるトルク推定を行う場合、正しく筋圧力を測定することが重要となる。筋圧力は皮膚表面から荷重測定器への反力として測定されるため、関節の動作に作用する筋が皮膚表面に近い、表層の筋である事が望まれる。また、複数の関節の動作に作用する筋では、測定条件が煩雑になり、トルク推定の妨げになる事も考えられる。以上により、本節ではパワーアシストスーツによるアシストを想定している関節とその動作について、関節構造と関節動作に作用する筋の配置について述べ、筋圧力の測定に適した筋の選定を行うことを目的とする。

肘関節

肘関節は、尺骨、橈骨、上腕骨の 3 つの骨で構成されている関節である。肘関節を図 3.6 に示す。3 つの骨はそれぞれの組み合わせによって 3 つの関節を構成している。上腕骨と尺骨による腕尺関節、上腕骨と橈骨による腕橈関節、尺骨と橈骨による上橈尺関節である。腕橈関節と上橈尺関節は手首にある手関節の回内・回外運等に加わる関節であり、肘関節の自由度は腕尺関節による屈曲・伸展の一自由度のみとなる。

腕尺関節は肘関節の中で一番大きな関節であり、蝶番関節となっている。蝶番関節は基本的に一軸性であり、同一平面上で角運動を行う関節である。蝶番関節の模式図を図 3.7 に示す。

腕尺関節を構成している上腕骨と尺骨は、上腕骨の上腕骨滑車と尺骨の滑車切痕の凹凸によってかみ合っており、また、複数の靭帯による補強もされている。この事により、肘関節は屈曲・伸展方向以外への運動が出来ないように拘束されており、非常に安定な関節となっている。

肘関節の運動に作用する筋の配置を図 3.8 に示す。骨格筋と骨格の接合点のうち、体幹に近い方を起始、遠い方を停止と呼ぶが、肘関節のほとんどの筋は上腕骨の下部、肘関節に近い場所から起始し、前腕の尺骨又は橈骨上部、肘関節に近い場所へ停止する。肘関節の動作に関する筋の起始と停止、その作用の一覧を表 3.1 に示す。肘関節の動作に大きくかかわる筋は上腕二頭筋と上腕三頭筋であり、どちらも皮膚に近い表層にある筋である。

上腕二頭筋は橈骨の上部に停止しており、肘関節の屈曲に作用する。また、橈骨に停止している為に、手関節の回外にも作用している。上腕二頭筋が屈曲に最大の力を発生することが出来るのは手関節が回外している状態であり、回内している状態では有効な作用をする事が出来ない。上腕二頭筋は二頭とも肩甲骨から起始している為、肩関節の状態にその長さが若干左右される。上腕三頭筋は肘関節の伸展に作用している筋であり、上腕二頭筋とは対立筋の関係にある。上腕三頭筋の長頭も上腕二頭筋と同じように肩甲骨に起始しているので、肩関節の運動に筋の長さが左右される。

上腕二頭筋の停止近くの内側には、肘関節の屈曲に作用する上腕筋や、伸展に作用する上腕三頭筋の内側頭、さらに肩関節の屈曲に作用する烏口腕筋がある。その為、直接作用していない場合でも内側の筋に押し上げられ、見た目上収縮しているように見える場合がある。その為、筋圧力を測定する場合は測定点を起始よりに配置し、深層に他の筋が存在しない箇所を選ぶ事が必要となる。

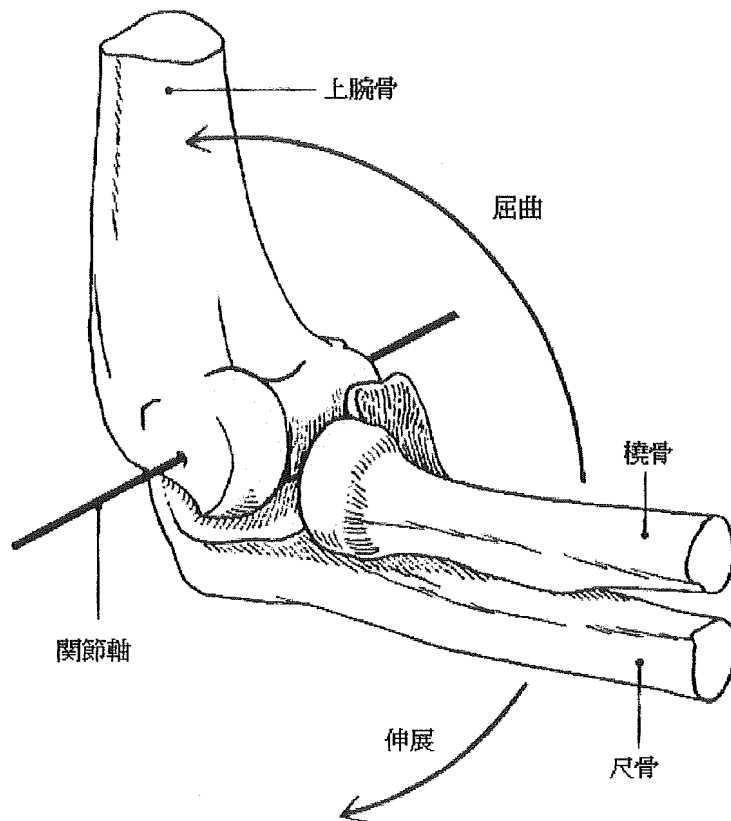


图 3.6 肘關節

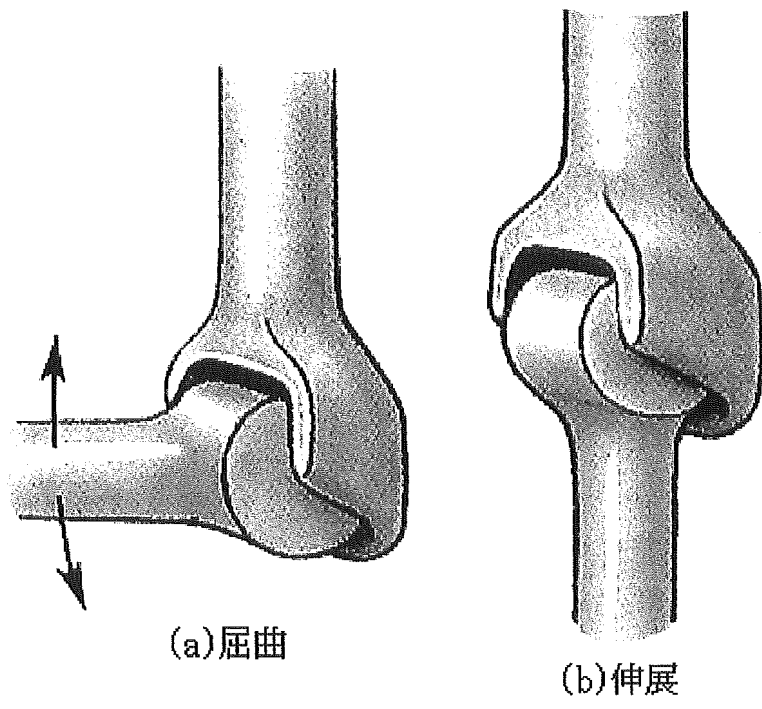
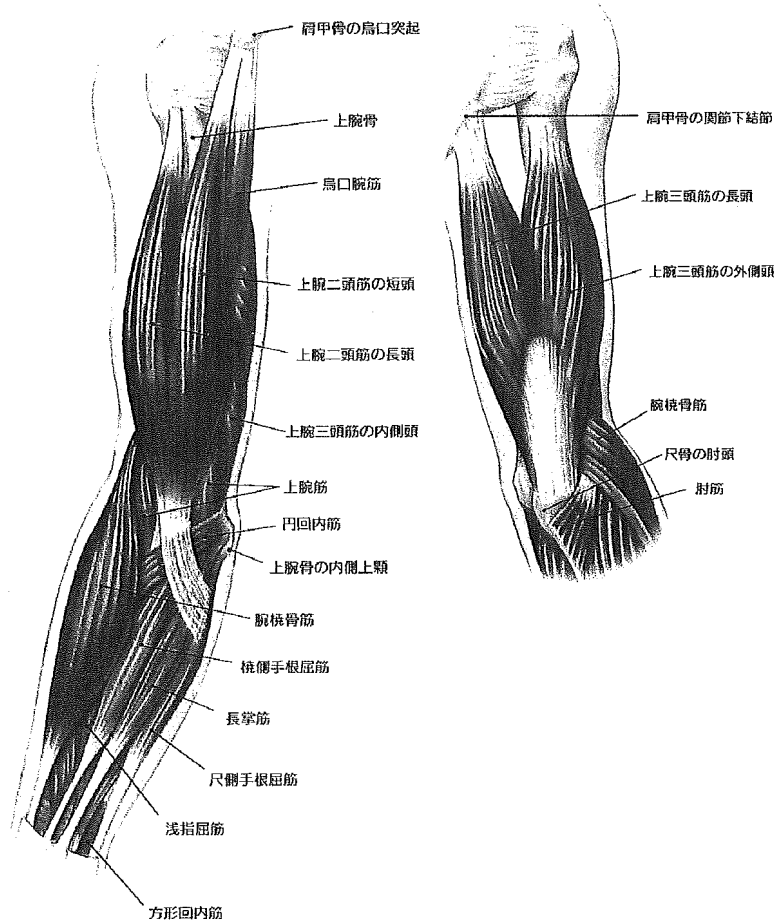


图 3.7 蝶番關節模式图



(a)前面観

(b)背面観

図 3.8 肘関節の動作に関する筋

表 3.1 肘関節を動かす筋

筋名	起始	停止	筋位置	作用
上腕二頭筋	長頭 肩甲骨 短頭 肩甲骨	橈骨	表層	肘関節の屈曲 手関節の回外
上腕筋	上腕骨	尺骨	深層	肘関節の屈曲
腕橈骨筋	上腕骨	橈骨	表層	肘関節の屈曲
肘筋	上腕骨	尺骨	表層	肘関節の伸展
上腕三頭筋	長頭 肩甲骨 外側頭 上腕骨 内側頭 上腕骨	尺骨	表層	肘関節の伸展

測定筋の選定

皮膚表面から筋圧力によって関節トルク推定を行うため、測定対象となる筋は以下の条件を満たしていることが望ましい。

- ・ 複数の自由度，又は複数の関節の動作に作用していない筋である事
- ・ 関節の動作に大きくかかわっている筋である事。
- ・ 骨格筋の中でも表層に存在し，なおかつ筋の深層に他の筋が存在しない

以上の条件を満足する筋として、肘関節の屈曲に作用する筋である上腕二頭筋を選定した。上腕二頭筋は肘関節の屈曲に最も大きく作用する筋であり、肩甲骨から起始しているものの、肩関節の動作には作用していない。さらに表層に存在し、停止付近で無ければ、筋の深層に他の筋肉が存在しない事が選定理由である。問題点として、上腕二頭筋は手関節の回外に作用しており、回内状態では、その肘関節に対する作用が弱まってしまう事がある。しかし、手関節は肘関節より末節にある関節であるので、手関節を回外状態で固定して筋圧力の測定を行うことは可能である。

筋が動作する際に最も盛り上がる点を筋腹と言い、最も筋圧力の変化が大きく出力されるが、筋腹は関節の屈曲と共に皮膚内部で移動する為に、連続的に角度を変化させる実験には向かない。この事から測定点として、筋腹よりも肩関節に近く体中心寄りの位置を選んだ。この位置は上腕二頭筋の短頭の上にあたる。測定点を図 3.9 に示す。

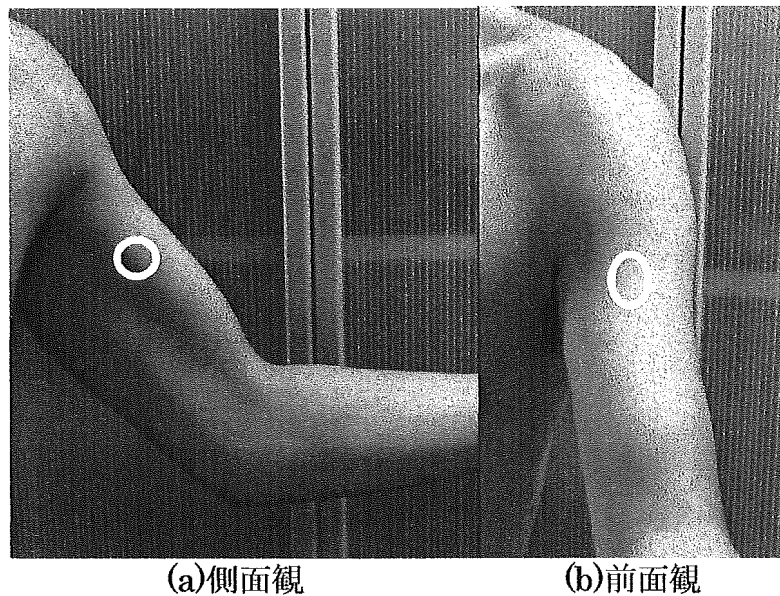


図 3.9 筋圧力測定点

関節トルク推定

これまでの理論に基づき、実際に筋圧力を測定した。また、測定結果より筋圧力と関節トルクの関係式を導き、関節トルクの推定を行った。

計測方法及び機器

本研究では骨格筋の反力を測定する機器としてロードセルを使用した。確実に反力を測定する為、ロードセルの測定面にスポンジを介してアクリル板を接着し、アクリル面を皮膚表面に接触させるものとした。ロードセルの写真を図 3.10 に構造図を図 3.11 に示す。

次にデータ取得方法について述べる。ロードセルによって取得した筋圧力をアンプによって増幅し、AD ボードによって取得する。また関節角度は、肘関節に取り付けたフレームと同軸としたロータリーエンコーダによって監視し、カウンタボードによって取得する。関節角度取得用フレームを図 3.12 に示す。測定機器の仕様を表 3.2, 表 3.3 に示す。

今回の実験では肘関節に負荷トルクを一定として与える事が必要となる。その為、肩関節は前方に $90[\text{deg}]$ 屈曲, 肘関節は伸展させて屈曲 $0[\text{deg}]$ とした状態を基準状態とし、前腕を水平に保ちつつ肘関節を徐々に屈曲させて、屈曲 $90[\text{deg}]$ まで測定するものとする。肘関節の屈曲と共に肩関節は伸展し、肘関節が屈曲 $90[\text{deg}]$ 時に肩関節は屈曲 $0[\text{deg}]$ となる。肘関節の屈曲角度と肩関節の屈曲角度の和が $90[\text{deg}]$ となるように保ち、測定を行った。肘関節が屈曲 $0[\text{deg}]$ の基準状態と屈曲 $90[\text{deg}]$ 時の測定概観を図 3.13 に示す。

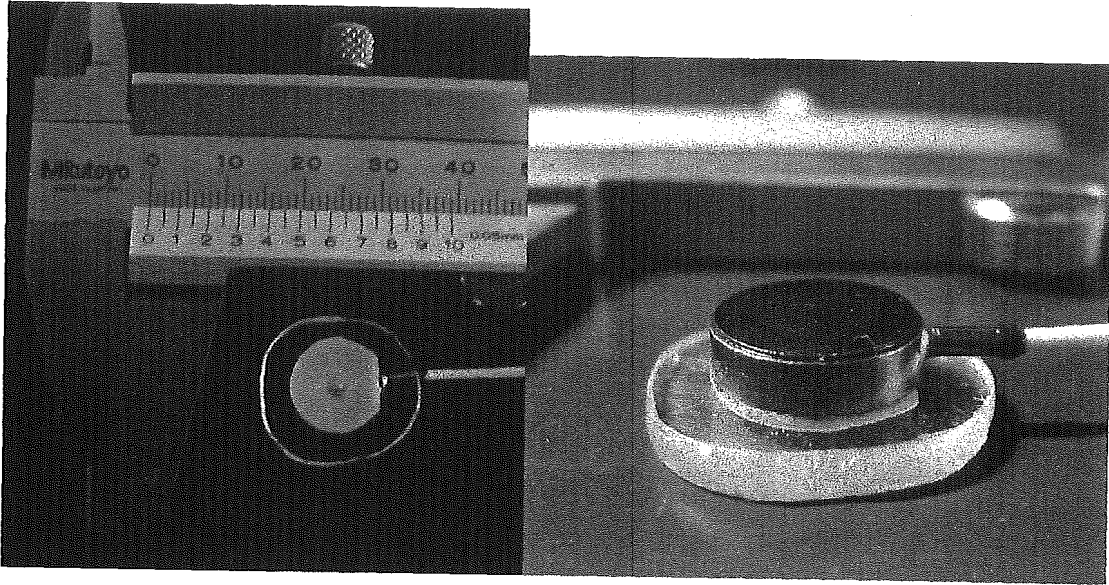


図 3.10 筋圧力測定用ロードセル

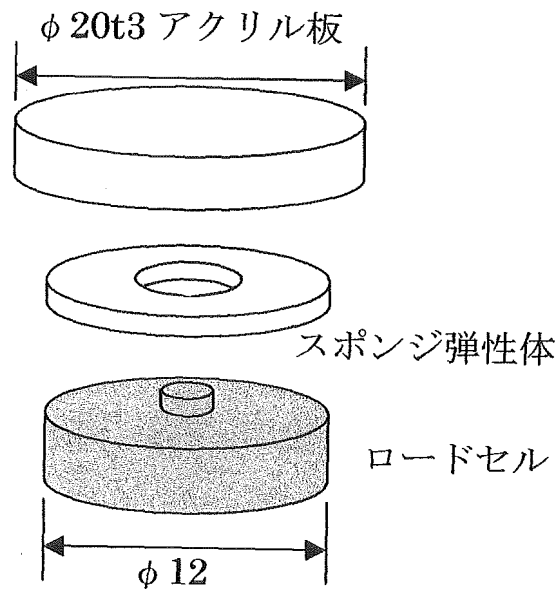


図 3.11 ロードセル構造模式図

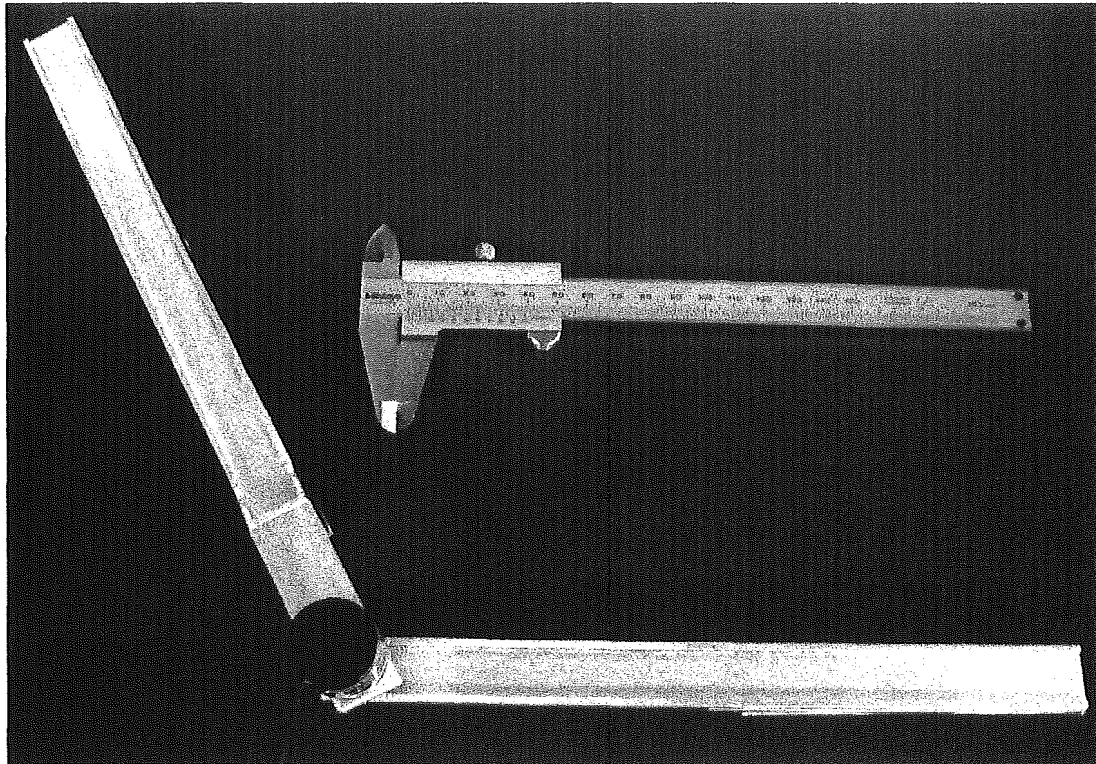


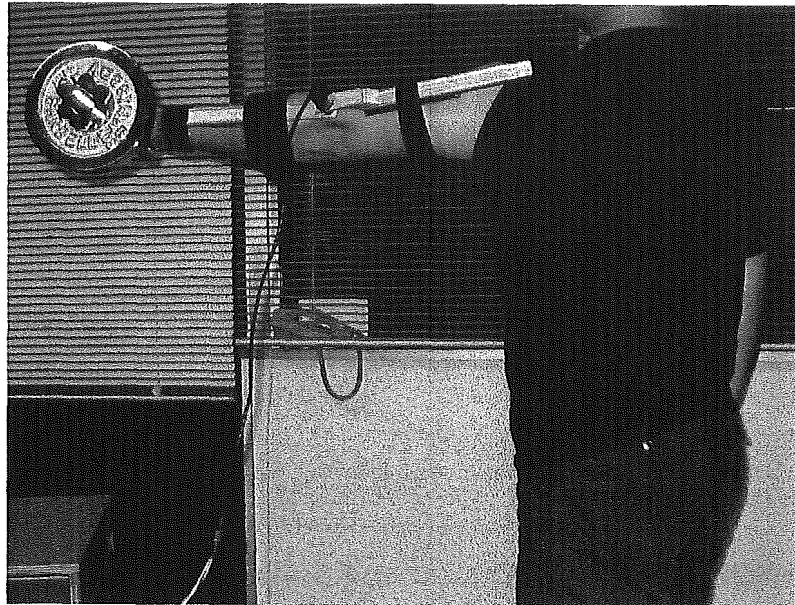
図 3.12 関節角度取得用フレーム

表 3.2 筋圧力測定機器仕様(1)

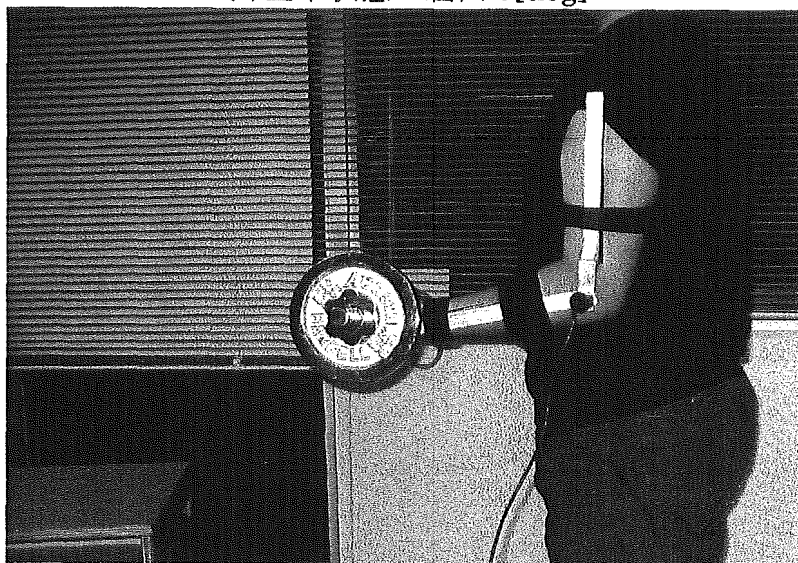
パーソナルコンピュータ	OS	Windows XP
	CPU	Pentium M 1.1GHz
	MEM	512MB
ロードセル	製造元	共和電業
	型番	LMA-A-50N
	定格容量	50N(5.099kgf)
	固有振動数	約 32.6kHz
	定格出力	0.75~2mV/V
計装用前置増幅器	製造元	共和電業
	形式	WGA-100B-01
	定格出力	電圧：±10V 電流：4~20mA
	ノイズ	SN比 60dB 以上
	初期調整	零点：粗調整+微調整トリマ±1.5mV 微調整トリマ 0.25mV/V 感度：1000倍, 4000倍 1/1~1/4

表 3.3 筋圧力測定機器仕様(2)

ロータリーエンコーダ	製造元	オムロン株式会社
	型番	E6A2-CWZ3C
	出力形態	オープンコレクタ出力
	分解能	500
	使用温度範囲	-10~55℃
	最大角速度	5.22×10^2 rad/sec
エンコーダカウンタボード	製造元	株式会社インターフェース
	型番	MCA-J631204
	カウント長	32 ビット
	入力信号	位相差パルスカウント (A,B,Z)
	カウントモード	1,2,4 進倍
AD 変換ボード	製造元	株式会社インターフェース
	型番	MCA-J1333B
	出力形式	TTL オープンコレクタ出力
	入力レンジ	±5V, ±10V
	分解能	12 ビット
	出力応答時間	10 μ sec



(a)基準状態 屈曲 0[deg]



(b)最大測定角度 屈曲 90[deg]

図 3.13 関節角度-筋圧力測定概観

C. 研究結果及び考察

超音波モータ駆動制御

・ サンドイッチモータ速度応答特性試験及び位置追従制御

ステップ応答

前節を踏まえサンドイッチモータにステップ応答を与えて定常速度になるまで測定し、実験的に時定数を求めた。実験方法として印加電圧の位相差 90deg をコンピュータの DIO ボードから $\phi 60$ ドライバへ入力し、サンドイッチモータを駆動させる。このときの角速度をロータリエンコーダにより計測し、これをカウンタボードから PC へ送信した。また、コンピュータにはリアルタイム性に優れた RT-Linux におけるスレッドを用い、制御周期は 10msec とした。機器の仕様を表 1.1 に示す。

サンドイッチモータに印加電圧の位相差 90deg を与え、そのときの角速度を測定した実験結果を図 1.1 に示す。図 1.1 より最小二乗近似式の 0 点微分から式 1.13 における K_1 は 15.7, 時定数 T は 0.015 と求めることができ、また時定数から $\alpha=66.7$ を算出することができた。

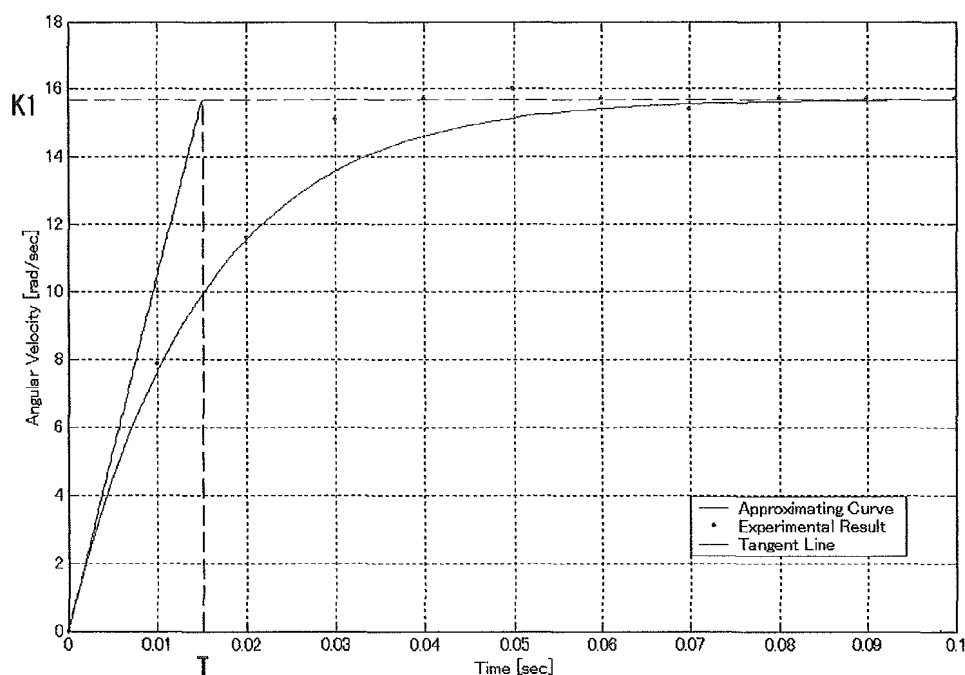


図 1.1 サンドイッチモータの角速度におけるステップ応答

表 1.1 ステップ・周波数応答実験機器仕様

パーソナルコンピュータ	OS	RT-Linux(Debian sarge)
	CPU	Celeron 2.4GHz
	MEM	PC3200 1024MB
ロータリエンコーダ	製造元	maxon tacho
	型番	HEDS5540
	出力信号	TTL コンパチブル
	分解能	500
	最大周波数	100kHz
	使用温度範囲	-40~+100 °C
	最大角速度	250000rad/s ²
エンコーダカウンタボード	製造元	株式会社インターフェース
	型番	CTP-6205
	カウンタ長	24ビット
	入力信号	位相差入力(A,B,Z)
	入力仕様	差動入力
	カウントモード	1,2,4 進倍
デジタル入出力ボード	製造元	株式会社インターフェース
	型番	PCI-2793
	出力形式	TTL オープンコレクタ出力
	推奨動作電圧	DC+5V
	最大出力電流	40mA
	出力応答時間	1μs