

つまみ力による円筒形状のつまみの直径の評価

Experimental Consideration on Diameter of Cylindrical Knob based on Pinch Force

三田 純義・佐藤 裕介*
MITA Sumiyoshi・SATO Yusuke

1. はじめに

物体をつまむ動作については、これまでに、2本指のつまみでの上下運動における指先とつまみ面との間の摩擦係数とつまみ力に関する研究⁽¹⁾や、親指と他の4本指を対向させて物をつまんで支えるときの各指のつまみ力に関する研究⁽²⁾、または、つまみの微小な調整動作において、変動荷重を負荷させたときのつまみ力と操作性に対するつまみ径との関係を機械的、運動学的に解析した研究⁽³⁾などがある。

このように、これまでの研究におけるつまみ方は、2本指か5本指において、親指と他の指を対向させるつまみ方であり、負荷の方向も鉛直方向に限られていた。しかし実際には、つまむ物の形状は円筒形状のものが多く、円筒形状のつまみをつまむ動作に関する研究は少ない。

そこで、本研究では、鉛直方向や回転方向の荷重を負荷させた円筒形つまみを5本指でつまんだときのつまみ径とつまみ力の関係や、つまみをつまんだときにおける各指のつまみ力分布の関係からつまみ径の評価を実験的に行うことを目的とする。

2. 実験方法

2. 1 実験内容

図1にトルク負荷のかかるつまみを静止させる場合の力のつり合いを示す。つまみには負荷荷重 f とプーリ径 d により、

$$T = \frac{d}{2} \times f$$

のトルク負荷 T が加わる。これに対し、人は指先に力 $F_1 \sim F_5$ を入れ、指先とつまみ面の間に摩擦力 $\mu F_1 \sim \mu F_5$ (μ : 摩擦係数) を発生させ、つまみを静止させる。

このときのトルク負荷 T とつまみ力による支持トルクの関係は、

$$T \leq \frac{D}{2} \times \sum_{i=1}^5 \mu F_i$$

となる。

このようなつまみを静止させる動作を対象に

して、次の実験を行う。

- ①つまみの中心軸につまみ径に関係なく一定の負荷荷重 f を加え、つまみに一定トルク負荷 T が作用するときのつまみ力を測定する。
- ②つまみ径に関係なく、つまみ面に同じ大きさの鉛直荷重を作用させたときのつまみ力を測定する。
- ③つまみ径に関係なく、つまみ面に同じ大きさのトルク負荷 T 作用させたときのつまみ力を測定する。
- ④負荷荷重が加えられたつまみをつまむときの、つまみ力と筋力との関係を知るために、腕の筋電位を測定する。

2. 2 実験装置

これらの実験を行うにあたり、図2に示すようなつまみ部、つまみ力の検出部、つまみに負荷を加える負荷装置によって構成される実験装置を製作した。つまみ部は中心軸まわりに回転できるように支持されており、つまみ径に合わせ図3に示すつまみ力検出部が5本の指の置かれる位置に固定されるしくみになっている。

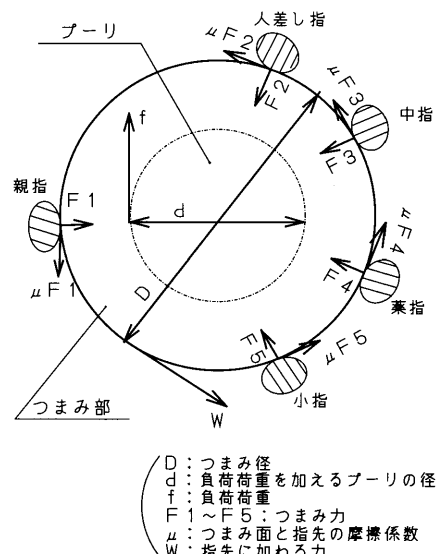


図1 手にはたらく力のつりあい

* 平成12年度専攻科電子システム専攻修了
(現 ジャパンアウトソーシング株)

2.2.1 つまみ力検出部のしくみ

つまみ力や把握力の検出は、従来の研究⁽¹⁾⁽²⁾では、指先に力センサを直接取り付け方や、感圧導電ゴムセンサなどが用いられてきたが、本研究では、つまみ力は片持ちばりに働く力をつまみ力としてひずみゲージによってその力を検出した。ひずみゲージは、半導体ひずみゲージ(KYOWA社製半導体ひずみゲージKSP-2-120-E3)を用い、2枚のゲージによる2ゲージ法とした。

つまみ力の検出は、リレーを使った切り換えによって親指から順次切り換え、各指10回ずつ繰り返して測定するようにして、その平均値をモニタ画面に数値と棒グラフで表示した。

このひずみゲージを利用する測定方法は、直接指先にセンサを取り付ける方法⁽²⁾とは違い、つまみの表面を直接指先で接触させることができ、指先の感覚がセンサの表面材質に影響されないという特長がある。しかしその反面、力の作用点、つまむ位置が変化するとつまみ力の測定値が変化してしまう問題がある。これには、被験者がつまみ位置を特定できるように、つまみの表面に円弧状の木片を貼り付け段付きとして、つまみに円形の質感を持たせた。

2.2.2 負荷装置

鉛直荷重に対するつまみ力の実験をするには、図2に示す実験装置のつまみ部を取り外し、錘を吊り下げ、つまみに負荷荷重を加えた。また、トルク負荷に対するつまみ力の実験をするには、図2に示す装置において、プーリに巻きつけられたひもをモータと角ねじの駆動装置で引っ張るしくみとした。

実験内容①においては、負荷荷重 f をつまみ径 D に関係なく同じ大きさの荷重を負荷させて、一定のトルク負荷 T がつまみにかかるようにした。実験内容③においては、指先の力の感覚をつまみ径に関係なく一定にすること、すなわちどんな大きさのつまみ径においても、指先に同じ大きさの力 W が伝わっている状態にしなければなら

ない。このためには、トルク負荷 T により指先に伝わる力 W は、

$$T = \frac{d}{2} \times f = \frac{D}{2} \times W$$

となり、つまみ径 D によって変化する(図1)。そこで、つまみの中心軸上にプーリを取り付け、モーメントの腕の長さ(プーリ径 d)を一定とし、負荷荷重 f をつまみ径の大きさにより変化させることでトルク負荷 T を操作し、指先に伝わる力 W をつまみ径 D に関係なく同じ大きさになるようにした。プーリ径 d は48mmとした。

負荷荷重 f は、最小つまみ径27mmのときに加える荷重を基準とし、つまみ径 D によって係数 $D/27$ をかけた荷重とした。また、基準つまみ径27mmに負荷させる負荷荷重の大きさ f は1.96N, 3.92N, 5.88N, 7.84N, 9.8Nとした。

2.3 被験者と実験姿勢

実験は成人男性5人を対象とし、実験時の被験者の姿勢は利き腕(右手)にて実験を行い、つまみ力に腕の自重が影響しないように考慮して、直立姿勢とし、左手で右腕を保持・固定した。鉛直荷重の実験姿勢は、直立姿勢でつまみをつまんでいる腕の肘を伸ばした状態とした。

各被験者の手の寸法とつまみ径などの関係を調べるため、図4に示す被験者の手の代表的な寸法⁽⁴⁾を測定し、その値を表1に示す。20歳~45歳までの手の各部の平均値は、(a)手の長さが182mm, (b)手の幅が103mm, (d)甲全幅が84.8mm, (e)親指の長さが54.7mmと報告されており⁽⁵⁾、表1の結果との比較より、各被験者の手の大きさは、平均的でほぼ同じ大きさであることがわかる。

2.4 筋電位の測定

筋電位は、人差し指から小指までの関節を屈曲させる役割をする指伸筋⁽⁶⁾の皮膚表面上に、15mm~30mmの間隔で2個の表面電極(NECメ

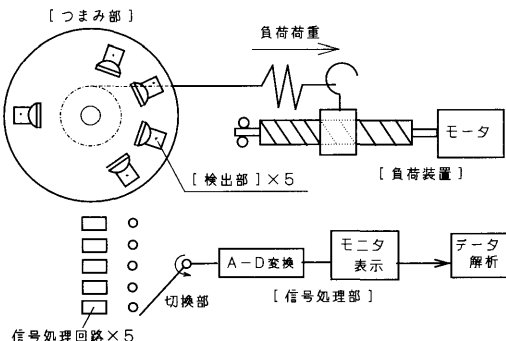


図2 実験装置

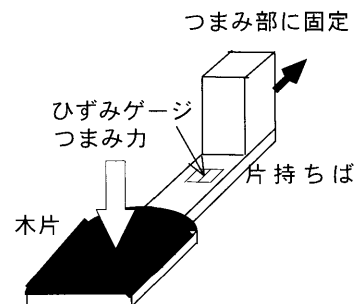


図3 つまみ力検出部

ディカルシステムズ（株）製ディスプレイ電極バイオロードX）を貼り付けて検出した。

検出された電位は、増幅器（NEC（株）製ポリグラフ360生体電気用増幅ユニット1253A）を介して増幅し、デジタルレコーダ（TEAC社製デジタルレコーダDR-F2a）で記録した。また、データ解析にはデータ解析ソフトDA-DiSP（アストロデザイン（株）製）を使用した。

実験は、鉛直荷重および反時計方向の回転荷重における最大負荷荷重9.8Nの条件を代表として行った。また、筋電位の大きさは微小であり、ばらつきも大きいため、予備実験の結果、測定時間を2秒間、サンプリング周波数を300Hzとし、1つの条件で5回の測定を行うこととした。

得られたデータは図5～7に示すように、測定で得られたデータの絶対値を取り、その積分値を求め、データの最小値と最大値を除いて平均値を求め、これを筋電位とした。

2. 5 実験条件

実験条件をまとめると次のようになる。

- I. つまみ径：
27mm, 42mm, 58mm, 74mm, 90mm
- II. 負荷荷重
1.96N, 3.92N, 5.88N, 7.84N, 9.8N
- III. 荷重方向
鉛直, 時計回り, 反時計回り

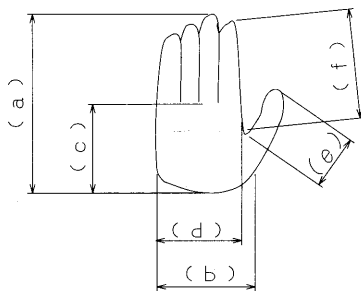


図4 手の各部の寸法

表1 被験者の手の寸法

単位[mm]

手の各部の寸法	被験者					
	A	B	C	D	E	平均
(a)手の長さ	185	187	180	189	190	186
(d)手の幅	102	103	104	102	103	103
(c)手の甲の長さ	105	105	105	108	105	106
(d)手の甲の幅	84	85	85	84	88	85
(e)親指の長さ	60	63	59	57	60	60
(f)人差し指の長さ	120	116	113	114	123	117

IV. 各指の位置・角度

被験者の親指を基準（角度0°）とした時計回りの各指の角度を調べ、それらの平均値とした（表2）。

これらの条件で、被験者に対して約2時間の予備実験を2回ずつ行った後、本実験を行った。

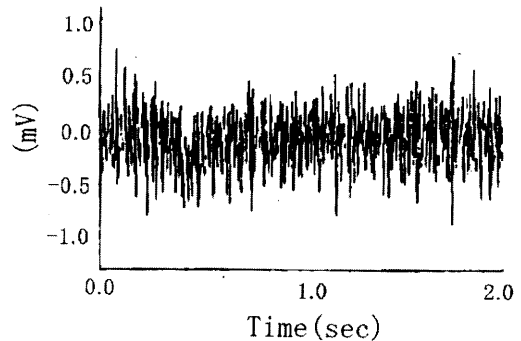


図5 筋電位の波形

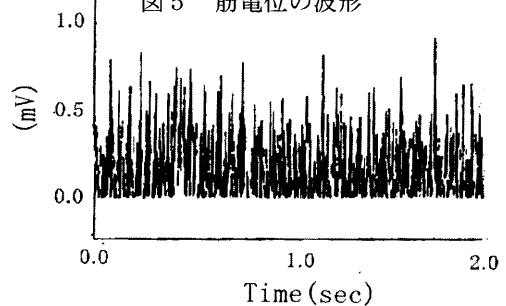


図6 筋電位の絶対値

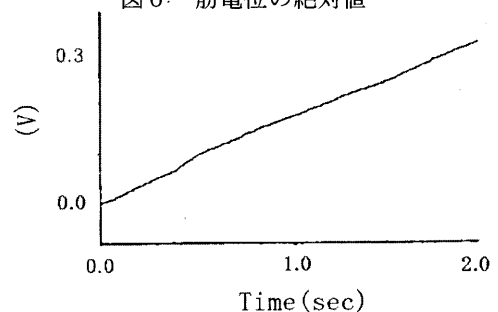


図7 筋電位の積分値

表2 親指を基準にした基準つまみ力検出部の配置

単位 [mm]

つまみ径	親指	人差し指	中指	薬指	小指
58~90mm	0	125	165	190	270
42mm	0	125	180	230	270
27mm	30	125	180	230	330

3. 結果及び考察

3. 1 つまみ径に関係なく一定トルクを负荷させたときのつまみ力

実験内容①は被験者A, B2名に対して行い、図8, 9に実験結果を示す。この図において、縦軸は5本指のつまみ力の合計値とし、横軸はつまみ径と甲全幅の平均値85.2mmとの比とした。甲全幅の寸法は、人の把握能力に大きく関係する寸法であるので、表1に示す甲全幅(d)の平均値85.2mmを使用した。

その結果、つまみ径が大きくなるとともに、つまみ力は小さくなる傾向が各被験者において表れた。この実験の荷重条件では、つまみの接面に生じる接線力はつまみ径の増加とともに小さくなるので、人の手はつまみの接面にかかる力の大きさを指先で感じ取ってつまみ力を発揮しているということがわかる。

3. 2 つまみ径とつまみ力

実験内容②, ③の結果は、横軸をつまみ径Dと甲全幅(d)の平均値との比とし、また、负荷荷重fに対して、どの程度のつまみ力を発揮しているかを見るために縦軸をつまみ力F1~F5の合計値と负荷荷重fとの比とした。

3. 2. 1 鉛直荷重に対するつまみ力

実験内容②において、図10は被験者全員のつまみ力合計値の平均値と负荷荷重との比を示し、表3には代表例として、各被験者の负荷荷重5.88Nにおける各つまみ径ごとのデータの検定結果を示す。その結果、つまみ力合計値と负荷荷重との比はつまみ径と甲全幅平均値との比が0.5~0.87で小さくなる傾向が表れ、手がこのつまみ径の範囲内で適応していることがわかる。

また、最小负荷荷重1.96Nに対するつまみ力合計値と负荷荷重との比が、それ以上の负荷荷重に対する比よりも大きく、5.88N以上の负荷荷重においては、つまみ力合計値と负荷荷重との比が一定に近づく傾向を示した。

3. 2. 2 トルク负荷に対するつまみ力

実験内容③の実験における被験者全員のつまみ力合計値の平均値と负荷荷重(時計, 反時計)との比を図11, 図12に、负荷荷重5.88Nにおける検定結果を表4と表5に示す。

これらの結果、時計回りのトルク负荷に対しては、鉛直荷重のときと同様につまみ径と甲全幅平均値との比が0.5~0.68の範囲で小さくなる傾向を示し、反時計回りのトルク负荷に対しては、つまみ径と甲全幅平均値との比が0.68でつまみ力合計値と负荷荷重との比が最小となる傾向を示した。

加えて、最小负荷荷重1.96Nに対するつまみ力と负荷荷重との比が大きくなる傾向や、负荷荷重が大きくなるにつれて、つまみ力合計値と负荷荷重との比が一定となる傾向が鉛直荷重のときと同様に現れた。また、鉛直荷重における実験結果と比較すると、つまみ力合計値と负荷荷重との比は、鉛直荷重の方がトルク负荷のときよりも大きく、トルク负荷の約2倍となってい

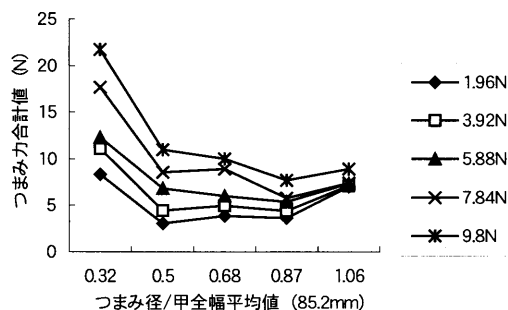


図8 トルク负荷に対するつまみ力 (被験者A)

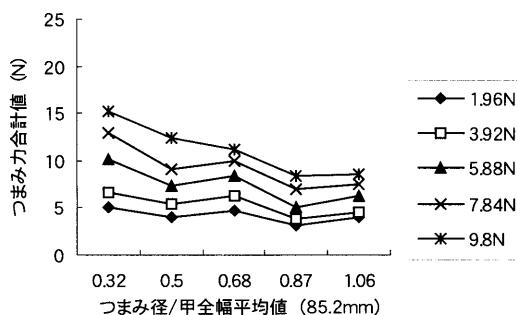


図9 トルク负荷に対するつまみ力 (被験者B)

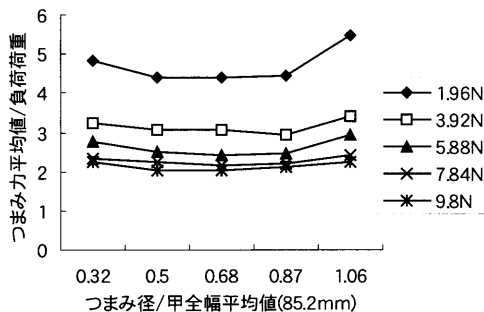


図10 鉛直荷重に対するつまみ力の平均値

表3 検定結果 (鉛直荷重 5.88N)

		手の甲の幅に対するつまみ径の比				
		0.32	0.50	0.68	0.87	1.06
つまみ径 / 手の甲の幅	0.32	Mean 2.41 SD 0.56		*	**	n.s
	0.50	Mean 2.11 SD 0.51		n.s	n.s	*
	0.68	Mean 2.03 SD 0.48			n.s	*
	0.87	Mean 2.20 SD 0.49				**
	1.06	Mean 2.69 SD 0.51				

Mean: 平均値, SD: 標準偏差

n.s: 有意差なし +: $p<0.1$ *: $p<0.05$ **: $p<0.01$

ることがわかる。

3. 3 各指ごとのつまみ力の分布

実験内容②, ③における各指のつまみ力とつまみ力の合計値との比をまとめた結果, つまみ径27mmでは, 指の位置が他の径と比べて異なるので多少異なる分布を示したが, つまみ径42mm~90mmにかけては, 被験者, 負荷荷重の大きさに関係なくほぼ同じ分布を示した。

したがって負荷荷重5.88Nにおける各被験者のつまみ径ごとのつまみ力分布を平均した結果を代表として考察することとした。

3. 3. 1 鉛直荷重におけるつまみ力分布

鉛直荷重における各指ごとのつまみ力分布を図13に示す。この図より, 鉛直荷重では, 親指

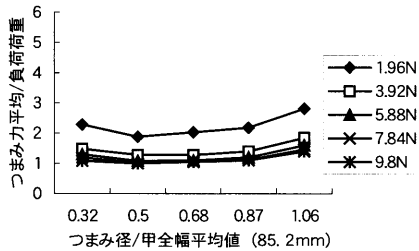


図11 時計回りトルク負荷に対するつまみ力の平均値

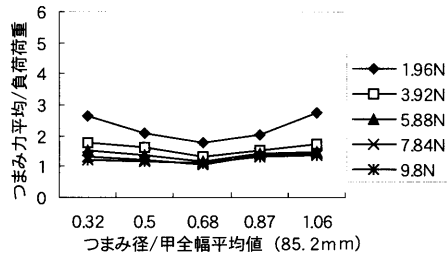


図12 反時計回りトルク負荷に対するつまみ力の平均値

表4 検定結果 (時計回り荷重 5.88N)

つまみ径 / 手の甲の幅		手の甲の幅に対するつまみ径の比				
		0.32	0.50	0.68	0.87	1.06
0.32	Mean	1.31				
	SD	0.24				
0.50	Mean	1.08	*	n.s.	n.s.	n.s.
	SD	0.26				
0.68	Mean	1.11		n.s.	n.s.	*
	SD	0.21				
0.87	Mean	1.20			n.s.	+
	SD	0.25				
1.06	Mean	1.60				+
	SD	0.32				

Mean: 平均値, SD: 標準偏差

n.s: 有意差なし +: $p<0.1$ *: $p<0.05$ **: $p<0.01$

に対して他の4本指がほぼ同じつまみ力を発揮していることがわかる。

3. 3. 2 トルク負荷におけるつまみ力分布

トルク負荷を負荷させたつまみについても, そのつまみ力の分布傾向は鉛直荷重のときと同様に, どのつまみ径においても, 各指におけるつまみ力とつまみ力合計値との比は, 負荷荷重の大きさに関わらずほぼ一定パターンを示し, つまみをつまむ各指の役割は負荷荷重の大きさやつまみ径の大きさによって変化しない結果となった。

図14にはトルク負荷における各指のつまみ力分布を示し, 表6, 表7には時計回り, 反時計回りそれぞれの方向の負荷における各指ごとの検定結果を示す。これらの結果から, 親指の強いつまみ力の他に, 時計回りでは人差し指, 反時計回りでは薬指のつまみ力が強い傾向が表れた。

表5 検定結果 (反時計回り荷重 5.88N)

つまみ径 / 手の甲の幅		手の甲の幅に対するつまみ径の比				
		0.32	0.50	0.68	0.87	1.06
0.32	Mean	1.54				
	SD	0.16				
0.50	Mean	1.39	n.s.	*	+	n.s.
	SD	0.15				
0.68	Mean	1.16		**	n.s.	n.s.
	SD	0.14				
0.87	Mean	1.40			*	+
	SD	0.15				
1.06	Mean	1.46				n.s.
	SD	0.18				

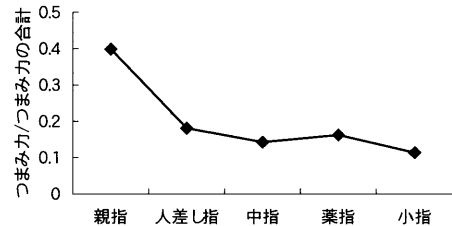


図13 各指のつまみ力の分布 (鉛直荷重5.88N)

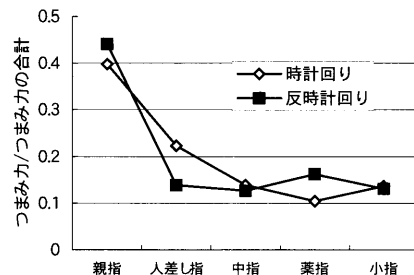


図14 各指のつまみ力の分布 (トルク荷重5.88N×48mm)

3. 4 筋電位の特性

図15に、被験者A, Bに対して測定した鉛直荷重における筋電位を示す。

この結果、被験者Aの筋電位はつまみ力と同様に、つまみ径と甲全幅平均値との比が0.68付近で最小になる傾向を示し、被験者Bにおいてもほぼ同様の傾向となった。

図16にはトルク負荷（反時計回り）における被験者A, Bの筋電位を示す。この図より、被験者Aの筋電位は鉛直荷重のときと同様に、つまみ径と甲全幅平均値との比が0.5～0.68の範囲において小さくなる傾向を示し、被験者Bにおいてはつまみ径と甲全幅平均値との比が0.68～0.87の範囲において小さくなる傾向を示した。

4. まとめ

円筒形つまみを静止させる静的なつまみ動作において、指先の力の感覚をつまみ径に関係なく一定にしたときのつまみ力および各指のつまみ力の分布状況を実験的に研究した結果、以下のことがわかった。

- (1)つまむ力は、鉛直荷重、トルク負荷(時計回り、反時計回り)のどちらの負荷条件でも、つまみ径と甲全幅平均値との比が0.5～0.87の範囲で最小となる。
- (2)つまむ力は小さい負荷荷重 (1.94N以下) に対しては大きく発揮され、3.92N以上の負荷荷重においては、荷重が大きくなるにしたがい、負荷荷重に対するつまみ力の割合がつまみ径の大きさに関係なく一定に近づく。
- (3)各指のつまみ力の分布傾向は、つまみ径の大きさや負荷荷重の大きさに関係なく一定の傾向を示し、トルク負荷がかかる場合、時計回りの負荷に対しては人差し指、反時計回りに対しては薬指が親指についてつまむ力が大きい。

参考文献

- (1) 木下博, 生田香明, 川合悟: 指先の微細操作機能の個体差について, 小野スポーツ科学vol1(1993), 39-52.
- (2) Kinoshita, H. Kawai, S. Ikuta, K. : Contributions and co-ordination of individual fingers in multiple finger prehension, Ergonomics, 38-6(1995), 1212-1230.
- (3) 松島 浩三, 原田 義久: 人間-機械系における手先の微細調整について, 精密機械43巻7号(1995), 32-36.
- (4) 正田旦: 人間工学, 恒星社厚生閣(1992), 22-24.
- (5) 佐藤 方彦, 勝浦 哲夫, 佐藤 陽彦, 栃原 裕, 横山 真太郎: 人間工学基準数値数式便覧, 技報堂出版(1999), 3-19.
- (6) 保田くら: 体育のための解剖学, 南山堂(1984), 74-76.

表6 検定結果 (時計回り荷重)

			親指	人差し指	中指	薬指	小指
親指	Mean	0.39		**	**	**	**
	SD	0.05					
人差し指	Mean	0.22			*	n.s	n.s
	SD	0.01					
中指	Mean	0.14				**	n.s
	SD	0.02					
薬指	Mean	0.10					n.s
	SD	0.03					
小指	Mean	0.13					
	SD	0.03					

Mean: 平均値, SD: 標準偏差

n.s: 有意差なし +: $p<0.1$ *: $p<0.05$ **: $p<0.01$

表7 検定結果 (反時計回り荷重)

			親指	人差し指	中指	薬指	小指
親指	Mean	0.44		**	**	**	**
	SD	0.03					
人差し指	Mean	0.14			*	n.s	n.s
	SD	0.02					
中指	Mean	0.12				**	n.s
	SD	0.03					
薬指	Mean	0.16					n.s
	SD	0.01					
小指	Mean	0.13					
	SD	0.03					

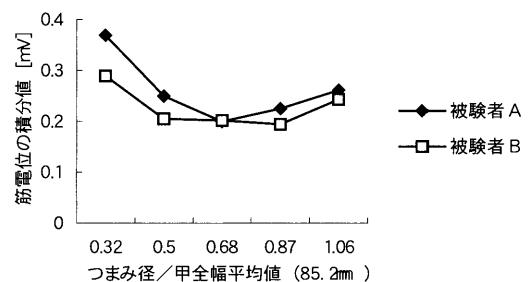


図15 筋電位の積分値 (鉛直荷重)

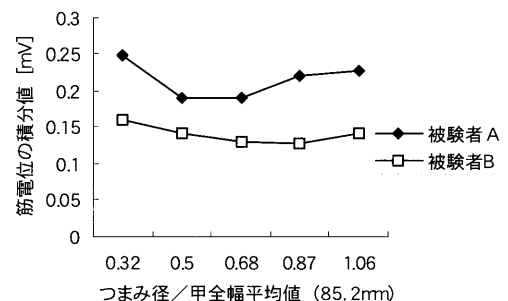


図16 筋電位の積分値 (反時計回り荷重)

「受理年月日 2005年9月27日」