

困難度指標を用いた動作時間推定に関する基礎的研究

IDO, Masatoshi / 井戸, 正敏

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Bulletin of the Faculty of Engineering, Hosei University / 法政大学工学部
研究集報

(巻 / Volume)

22

(開始ページ / Start Page)

247

(終了ページ / End Page)

256

(発行年 / Year)

1986-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00004022>

困難度指標を用いた動作時間推定に関する基礎的研究

井戸正敏*

An Experimental Evaluation of the Validity of Fitts' Law

Masatoshi IDO*

Abstract

Fitts conducted several series of experiments and assumed that the time to move a stylus from a starting point to a target was proportional to Index of Difficulty. Then he indicated following formula,

$$\text{Movement Time} = a + b \log_2 (2A/W).$$

A is the distance from the starting point to the center of the target, W is tolerance limits that is the difference between objects and a, b are constant. This formula has come to be known as Fitts' Law.

This paper describes the result of the experimental studies for Fitts' Law through two series of experiments and using Predetermined Time-Standards Systems data. Those experiment were reciprocal tapping task and Pin assembling task. PTS data were MTM, BMT, WF and DMT.

Those data obtained were analyzed by regression analysis. The result indicated that the relationship between MT and ID was liner and then Fitts' Law was supported. A clue to the possibility of estimation of motion time was got.

§1. 緒言

動作時間の推定法には、PTS法 (Predetermined Time-Standards Systems) がその代表的なものであるが、それは作業動作を身体部位の運動、或は作業対象物に規定される動作形態の現象的把握による時間特性に基づいて動作時間を推定しようとするものである。

これに対し、人間が作業を行う場合には、脳もしくは神経メカニズムでその作業の遂行に必要な情報が処理される。したがって作業もしくは動作のもつ情報量とその処理速度が明らかになれば、情報理論の観点から、動作時間の推定が可能となることが考えられる。

このような考え方に1つの方向を示唆する研究にP.M. Fittsの研究がある^{1,2)}。Fittsは必ずしも前述の観点からではないが、Human Motor Systemに情報理論を適用した。もしも、TaskのAmplitude (A) と Tolerance limit (W) がコントロールされ、被験者は最大のRateでTaskを遂行するように指示されるならば、1 Response 当たりの平均時間は、そのTaskのAmplitude

* 経営工学学科

や Tolerance の要件によって必要とされる Response 当たりの最小平均情報量に比例するという仮説を立て、次の三つの実験を試みた。第一の Reciprocal Topping 実験は、距離 (A) をへだてて置かれた短径 (W) の二つの長方形の Plate を Tapping する作業で、A および W の異なる組み合わせで行われ、Response として平均作業時間が測定された。Disc Transfer の第二の実験は、Pin 間距離 (A) と Disc の孔径と Pin 径との差 (W) が種々の組み合わせ条件で行われた。第三実験は、Pin Transfer 作業が行われ、Pin の穴間の距離 (A)、Pin の穴と Pin の径との差 (W) が変化させられた。この実験の結果から、(W) の小さい程、(A) の大きい程作業時間は長くなることを示した。この処理される情報量は $-\log_2 W/2A$ bit/Response であり、情報処理速度は、 $-\log_2 2A/W$ と、1 Response 当たりの作業時間との比とし、これを Binary Index of Performance (IP) とよんだ。

$$IP = -\frac{1}{t} \log_2 \frac{W}{2A} \text{ bit/sec} \quad (1)$$

この IP は三種の実験結果によれば一定であることが示され、仮説が成立したとした。

さらに Fitts は $-\log_2 W/2A$ を困難度指標 (Index of Difficulty: ID) と呼び、この ID と手の運動時間とは次の関係式にあるとした。

$$\text{Movement Time (MT)} = a + b \log_2 \frac{2A}{W} \quad (2)$$

a, b: 定数

この研究の目的は、Fitts が示した困難度指標が作業時間との間に直線的関係が存在するかどうか実験的手続きおよび PTS の各種手法を使って検討し、この指標により作業域は動作時間推定の可能性について考察しようとするものである。

§ 2. 実験による検討

2.1 実験 1 の内容

A) モデル作業

Fitts の第一実験に類似した作業モデルとした。右手にボールペンを持ち、座位で作業台に置かれた円形目標物に定置する単純反復作業。Task の Amplitude として、被験者正面右前方 45° の方向に 10, 20, 30, 40, 50cm の距離をとった。Tolerance limit は、この場合、ペン先の直径と目標物直径との差となるが、ペン先の直径は無視できる程小さいので、目標物直径とした。目標物直径は、6, 10, 50mm を設定した。実験レイアウトを図 1 に示す。

B) 時間の測定

基点および目標地点上に置かれた目標物にマイクロスイッチを設置し、マルチ・タイマー (竹井機器工業製) で時間値の測定を行った (0.01 sec 単位)。

作業は 25 サイクル測定し、初期および終末効果を除去するために 6 サイクル目から 20 サイクル

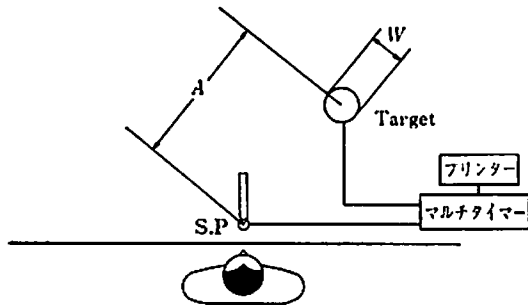


図1 実験1のレイアウト

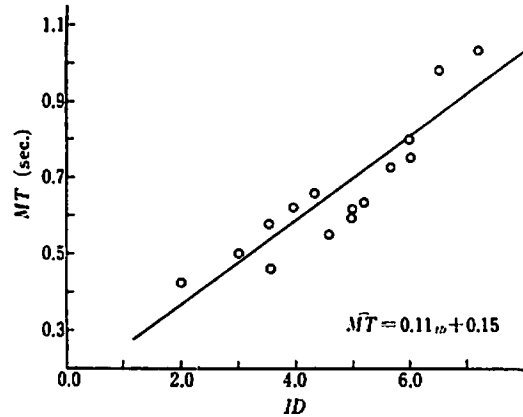


図2 実験1のIDとMTとの関係

目までを対象とし、その平均値を1回の実験データとした。

C) 被験者と実験方法

被験者は右利き男子学生3名。実験に際し十分練習を行わせ、習熟による効果を配慮した。作業速度は通常のペースとした。実験は移動距離5水準、目標物直径3水準の組み合わせで15通りの作業となり、これをランダムな順序で行わせた。一作業が終了するごとに2～3分間の休憩をとり疲労等による配慮を行った。

2.2 実験1の結果

実験条件よりIDを求め得られたMTとの関係を図2に示す。結果はほぼ直線的関係がうかがわれる。IDを確定変数、被験者を繰り返し数として回帰分析³⁾を行うと表1の結果を得た。水準間の変動は、

表1 実験1の結果の分散分析表

要因	S.S	O.F	M.S	F.R
回帰 (1次)	1.1456	1	1.1456	
残り (高次)	0.2044	13	0.0157	1.23
水準間	1.3500	14	0.0964	7.38**
誤差	0.3845	30	0.0128	
計	1.7345	44		

修正した分散分析表

要因	S.S	O.F	M.S	F.R
回帰 (1次)	1.1456	1	1.1456	83.62**
誤差	0.5889	43	0.0137	
計	1.7345	44		

	R.C	S.E	T-V
X	0.1067	0.0117	9.1455
定数項	0.1505	0.0603	2.4942

$$F_0 = 7.38 > F_{30}^{14}(0.01) = 2.76$$

となり有意であったが、高次の回帰については、

$$F_0 = 1.23 < F_{30}^{13}(0.05) = 2.07$$

となり、有意でないことがわかった。そこで、高次の項を誤差項にプールし、回帰係数、 $H_0: \beta=0$ の検定を行う。

$$F_0 = 83.62 > F_{48}^1(0.01) = 7.29$$

を得、 H_0 を棄却 ID と MT とは一次の関係にあることが統計的に判明した。

3.1 実験2の内容

A) モデル作業

Move 動作の時間は距離に対応して増加することは明らかであるので、実験2では Amplitude を一定条件とし、Tolerance limit の条件のみを変化させ、その特性を強調したモデル作業を設定した。

被験者正面右前方 45° の方向 20cm のところに平行ピンが置いてある。これを掴み手前のプレートに明けられている孔に挿入し、ピンを離す。その後側面に設置されているスイッチボタンを押し、最初の地点へ戻るといふ右手による組み立て作業である。こうすることにはよりある程度の単純性と作業性を高められることを意図した。実験レイアウトを図3に示す。

B) 実験の条件

Task の Amplitude として距離をとり 20cm とした。Tolerance limit として、目標物寸法と挿入物寸法との差として求められるゆとり量とした。挿入物として4種類の直径の平行ピンを使用し、目標物として、平行ピンの直径に対しはめ合い比率が 95, 90, 85, 80%になる孔の明いたプレートを使用した。

表2 実験2の実験条件

ピン径	穴径	ゆとり量	ピン径/穴径%	ID
4.0φ	4.2	0.2	95	10.97
	4.4	0.4	90	9.96
	4.7	0.7	85	9.16
	5.0	1.0	80	8.64
6.0φ	6.3	0.3	95	10.38
	6.7	0.7	90	9.16
	7.1	1.1	85	8.51
	7.5	1.5	80	8.06
8.0φ	8.4	0.4	95	9.96
	8.9	0.9	90	8.80
	9.4	1.4	85	8.16
	10.0	2.0	80	7.64
10.0φ	10.5	0.5	95	9.64
	11.1	1.1	90	8.51
	11.8	1.8	85	7.80
	12.5	2.5	80	7.32

(mm)

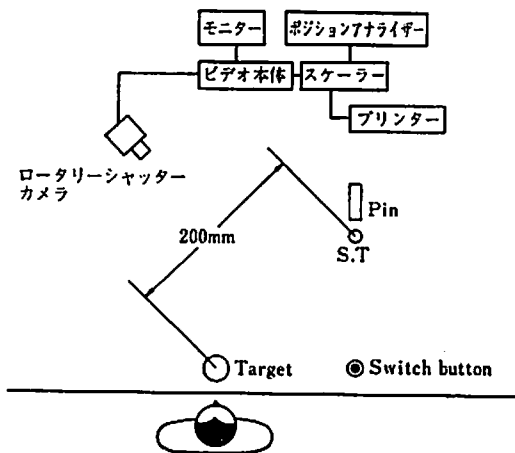


図3 実験2のレイアウト

したがって、表2に示す実験条件となり、それらの組み合わせにより16通りの実験となる。

C) 測定の方法

Position Analyzer (朋栄製) を使用し時間値の測定を行った (0.017 sec 単位)。右手が平行ピンを握んで持ち上げ始めた点および平行ピンを孔に挿し離れた点の二点間が測定対象となる。実験1と同様25サイクル測定し、同様な理由により6サイクル目から20サイクル目までを分析対象とし、その平均値を1回の実験データとした。

D) 被験者と実験方法

被験者は実験1とは異なる右利き男子学生3名である。実験1と同様に実験に際し十分練習を行わせ、習熟による効果を配慮した。練習においてはビデオで MTM ペースを教示した。したがって、作業ペースは MTM の標準ペースに近いものであった。

実験はピンと孔との組み合わせにより16通りの作業を行うことになり、これを全てランダムな順序で行わせた。一作業が終了するごとに2~3分間の休憩をとり疲労等も配慮した。

3.2 実験2の結果

実験条件より ID を求め得られた MT との関係を図4に示すと、ほぼ直線的傾向が得られた。実験1と同様な手続きにより回帰分析を行った。その結果は表3の分散分析表に示す通り1次が有意であることが判明し、 ID と MT は直線的関係にあると推察された。

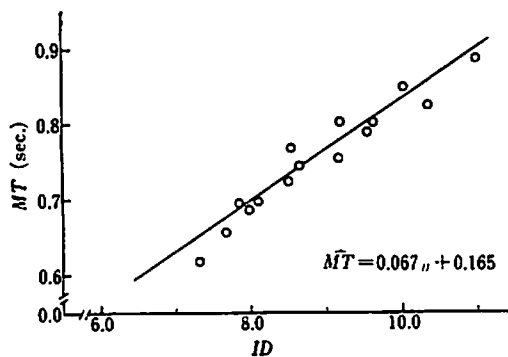


図4 実験2の ID と MT との関係

表3 実験2の修正後の分散分析表

要因	S. S	D. F	M. S	F. R
回帰 (1次)	0.217	1	0.217	108.5**
誤差	0.071	46	0.002	
計	0.288	47		

§3. PTS データによる検討

実験2の作業モデルを対象として、その ID とそれに対応する時間値を PTS 法の主な手法で設定し、前述の実験と同様な方法で、 ID と MT とが一次関係にあるかどうか検討する。

3.1 データの作成

A. Methods Time Measurement (MTM)⁴⁾

MTM における Position は P1SE, P2SE, P3SE を対象とするが、それぞれのはめ合いの度合の許容量は P1: 2.1~6mm, P2: 0.25~2.0mm, P3: 0~0.25 が目安とされているので、目標物と挿入物との隙間は、それぞれの間中値をとることにした。また Move は 2, 5, 10, 20, 30,

40cmとし、 ID を求めた。Positionを後続する場合のMoveは $M-C$ となるので ID に対応する MT は次式のような基本動作の和として求められる。

$$MT=(MxC)+(PySE)$$

$$x: 2, 5, 10, 20, 30, 40\text{cm}$$

$$y: 1, 2, 3$$

以上の手続きにより18組のデータを得る。

B. Basic Motion Time Study (BMT)⁵⁾

BMTでは特にPositionに対応する動作は、個別に分類されておらず、Reach, Moveに含まれている。したがって、視覚調整の必要なPositioningが要求される場合は「正確さ補正」が行われるので、ここでは、 $M-CV$ を対象とする。Moveの距離は、1, 2, 4, 8, 12, 16インチとした。 MT を求める基礎動作および変動要素は次のようになる。

$$MT=(MxCV)+P_t$$

$$x: 1, 2, 4, 8, 12, 16\text{インチ}$$

$$t: 1/2, 1/4, 1/9, 1/10, 1/23\text{インチ}$$

以上の手続きにより30組のデータを得る。

C. Work-Factor (WF)⁶⁾

WFではPositionに相当する標準要素として普通組立(Ordinary Assemble)を対象とした。目標物の型は閉鎖型とし、目標物の寸法はその許容範囲のほぼ中心値をとり0.079, 0.157, 0.315, 0.472インチとした。さし込み寸法対目標物寸法の比とその許容範囲の中心値を使い、目標物寸法からさし込み物寸法を算出し、さし込み物と目標物との間のスキ間を求めた。移動動作距離は、BMTと同様にした。

MT は次の様な標準要素の和として求めることができる。

$$MT=(AxSD)+(CTyR=z)$$

$$x: 1, 2, 4, 8, 12, 16\text{インチ}$$

$$y: 0.079, 0.157, 0.315, 0.472\text{インチ}$$

$$z: 0.224, 0.257, 0.352, 0.657, 0.917, 0.968$$

以上の手続きにより144組のデータを得る。

D. Dimensional Motion Times (DMT)⁷⁾

DMTでは位置決めに先行する運びは制限動作(Restricted Transport: R)が要求される。また位置決めは、組み立て物間のクリアランス、挿入物の大きさ、形状、回転の角度で時間値が規定されるが、ここでは、ピンの組み立てをモデルに想定するので、面取りのあるピン径0.44インチのみを対象とする。クリアランスは許容範囲の上限をとり、それぞれ、0.004, 0.020, 0.100, 0.600インチとした。移動距離は、BMT, WFと同様とした。 MT は次のような動作要素群から

求められる。

$$MT = (TxR) + PyD$$

x : 1, 2, 4, 8, 12, 16インチ

y : 0.004, 0.020, 0.100, 0.600インチ

D : 0.35インチ

以上の手続きにより24組のデータを得る。

3.2 PTS データによる結果

以上の手続きによって得られた MT と ID との対応関係を各システムごとに図5～8に示す。

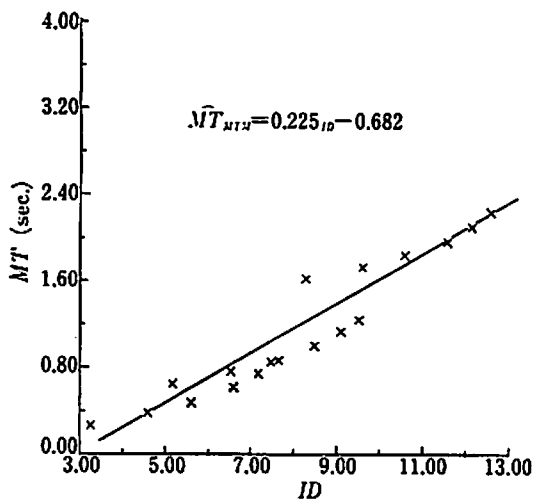


図5 MTM データによる MT と ID の関係

表4 MTM データの分散分析表

要因	S. S	D. F	M. S	F. R
回帰 (1次)	5.888	1	5.888	147.2**
誤差	0.639	16	0.040	
計	6.527	17		

	R. C	S. E	T-V
X	0.225	0.0185	12.146**
定数項	-0.682		

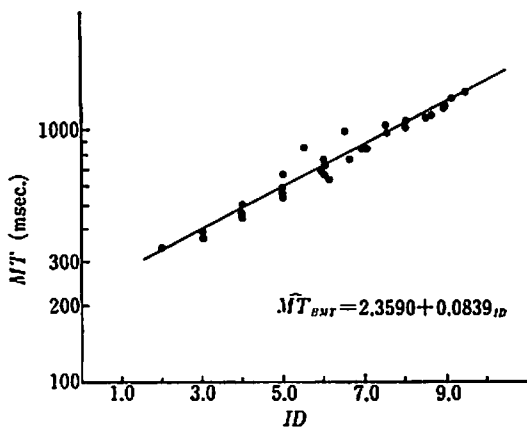


図6 BMT データによる ID と MT との関係

表5 BMT データの分散分析表

要因	S. S	D. F	M. S	F. R
回帰 (1次)	0.775	1	0.775	702.363**
誤差	0.031	28	0.001	
計	0.806	29		

MTM では図5に見られるように直線関係にあることがうかがわれる。回帰分析を行った結果を表4の分散分析表に示す。

$$F_0 = 147.2 > F_{1,16}(0.01) = 8.53$$

となり, $H_0: b=0$ を棄却。さらに二次の回帰係数に対し t 検定を行う,

$$T_2 = 1.563 < t(15, 0.05) = 2.131$$

となり, 一次回帰が妥当と推察された。

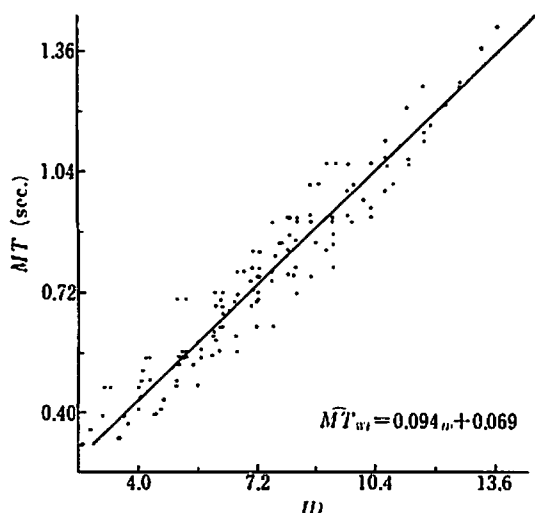


図7 WF データによる ID と MT との関係

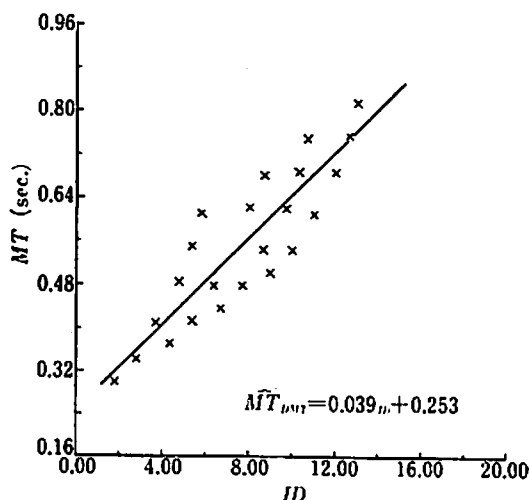


図8 DMT データによる ID と MT との関係

BMT では、得られた結果を図に示して見ると ID の大きさにしたがって増加する指数曲線の傾向が見られた。そこで、時間値を対数に変換し図6に示すと ID の大きさに対してほぼ直線的傾向が得られた。回帰分析を行った結果を表5の分散分析表に示す通り1次が有意となり、ID は対数をとった MT と直線関係にあることが判明した。

以下同様に WF および DMT の結果は図7, 8に見るように直線的傾向が見られるので、回帰分析を行った。

WF については、

$$F_0 = 154.8 > F_{1,42}^{\alpha}(0.01) = 6.77$$

となり二次の係数は、

$$T_2 = 0.787 < t(120, 0.05) = 1.960$$

で一次の回帰が妥当と考えられる。

DMT については、

$$F_0 = 84.3 > F_{1,22}^{\alpha}(0.01) = 7.95$$

二次の係数検定は

$$T_2 = 0.112 < t(21, 0.05) = 2.08$$

となり一次回帰が妥当と考えられる。

§4. 考 察

2つの実験および PTS の4つの手法のデータを使い ID と MT とが直線的関係にあるかどうか検討を試みた。結果はBMTにおいて対数線型の関係であったが、実験結果を含め直線関係が認められた。

Fitts は 1 Response 当たりの平均時間の把握前提として、被験者の最大 Rate を要求している。

今回の2つの実験においては、より現実的接近のために Normal pace とした。各 PTS の手法においても、それぞれの基準ペースで時間値が設定されている。

また、Fitts の対象モデルは、MTM の基本動作で分析してみると、 M 或は $M+P$ となる。Move は動作の終局に限定された範囲の大きさと移動距離に大きくその時間値は影響を受け、さらに Position の時間の影響要因は、目標物および挿入物の大きさ、両者の差或は比率、はめ合いにおける両者の形状等といわれている。円型棒状部品の組み立てにおいては、著者等⁸⁾の検討によれば Tolerance Limits で十分であるという結果を得ている。これらの点をも考慮すると、今回対象としたような作業に対しては Fitts の仮説はほぼ支持できるものと思われ、Fitts のいう困難度指標を使うことにより作業時間の推定の可能性の手掛りの1つが得られた。

しかし、MTM の回帰式は $MT=0.225 ID-0.682$ として求められたが、 ID が 3 bit 以下の場合には負の MT となり現実的ではない点が認められた。またこのような場合を回避するために Welford や Crosman⁹⁾の提案式がある。さらに適用作業の拡大の可能性等、さらに検討を進める必要がある。

§5. 結 言

情報理論の手の運動系への適用から Fitts が提案した困難度指標が動作時間の推定に適用できないか実験および PTS データにより検討を行った。

作業測定の一手法として確立されるためにはまだ多くの解決すべき問題¹⁰⁾はあるが、従来とは別の視点からの時間推定への接近で、その可能性が確かめられた。

今回の報告は Fitts の仮説の実験的検討にとどまったが、理論的解明を行う必要のあることはいうまでもない。これが次の課題となる。

謝 辞

(この研究は昭和58年度法政大学特別研究助成金の援助を得て行った研究です。関係各位に心より感謝申し上げます)

参 考 文 献

- 1) Fitt, P.M.: The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement. *J. of Experimental Psychology*, Vol. 47, No.6 (1954).
- 2) Fitt, P.M. and Peterson, J.R.: Information Capacity of Discrete Motor Responses. *J. of E.P.*, Vol. 67, No.2 (1964).
- 3) 森口 繁一編: 「統計的方法」, 日本規格協会 (1982).
- 4) 林 茂彦訳: 「MTM メソッドタイム設定法」, 技報堂, (1956).
- 5) 日本 IE 協会編: 「IE 技法ハンドブック」, 丸善, (1968).
- 6) 上田武人編: 「WF 分析法」, 技報堂, (1956).
- 7) 遠藤・新宮・坂崎・熊谷: 「作業測定」, 金原出版, (1963).
- 8) 井戸正敏・加藤 貞: 定置動作の構造と時間, 日本経営工学会春季研究発表予稿集 (1985).

- 9) Welford, A.: The Measurement of Sensory-Motor Performance, Survey and Reappraisal of Twelve Years' Progress Ergonomics, 3 (1960).
- 10) Annett, C.W., Golby and H. Kai: Measurement of Elements in an Assembly Task—The Information Output of the Human Motor System. *J. Quarterly J. of Exp. Psychology* Vol. X, 1958.