

大きい目標の選択操作に対する Fitts の法則の適合性の評価

高田喜朗[†] 梅木良太郎[‡] 辻野嘉宏[†] 都倉信樹[†]

y-takata@ics.es.osaka-u.ac.jp

[†]大阪大学基礎工学部情報工学科

〒560 大阪府豊中市待兼山町 1-3

[‡]日立西部ソフトウェア(株)

大阪市中央区今橋 2-4-10

近年、計算機システムのユーザインタフェースとして、ウィンドウシステムが広く普及している。ウィンドウシステムにおけるユーザの目標選択操作の特徴を調べることは、GUI の評価、設計に重要である。

マウス等による目標選択操作のモデルとして Fitts の法則があり、文字など小さい目標の選択操作についてよく適合することが知られている。今回、ウィンドウのような大きい目標に対してどの程度適合するかを調べた。

An Evaluation of the Fitness of Fitts' Law
for Large TargetsYoshiaki TAKATA[†], Ryoutarou UMEKI[‡], Yoshihiro TSUJINO[†] and Nobuki TOKURA[†][†]Department of Information and Computer Sciences,

Faculty of Engineering Science, Osaka University

Toyonaka, Osaka, 560 Japan

[‡]Hitachi Seibu Software, Ltd.

2-4-10, Imabashi, Chuoh-ku, Osaka, Japan

Recently, window based systems have become very popular as user interface on many interactive computer systems. It is important to study the human characteristics of target selecting operations, for evaluating and designing graphical user interfaces.

Fitts' law, a model of target selecting operations, is well known as a suitable model when it is applied for small targets such as a letter or a string. In this paper, we present the fitness of Fitts' law when it is applied for large targets such as a window.

1 まえがき

近年、計算機システムのユーザインタフェースとしてウィンドウシステムが広く普及し、それを使用することがきわめて一般的になってきている。ウィンドウシステムは、マウスなどのポイント装置を用いて画面上のアイコンやメニュー項目を選択するグラフィカルユーザインタフェース (GUI) によって特徴づけられる。

マウスなどのポイント装置やメニューなど GUI の方式の評価・設計のために、ポイント装置の操作性を何らかの形で測定し評価することが重要である。目標選択操作に要する時間は、客観的な測定が容易であること、目標選択操作は GUI における基本的操作であり頻繁に行われることなどから、操作性を測る指標のひとつとして有用である。

目標選択操作とそれに要する時間との関係として、Fitts の法則が知られている [1, 3]。これまでの研究で、文字や文字列などの小さな目標については、Fitts の法則が現実によく適合することが知られている。目標選択操作にかかる時間を T 、目標までの距離を D 、目標の大きさを W としたとき、Fitts の法則は次の式で表される。

$$T = a + b \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right).$$

ただし a, b は、ポイント装置と操作方式によって決まる定数である。

Fitts の法則はもともと一次元運動のためのものであった。MacKenzie らは、ウィンドウシステムで見られるような二次元運動への適合性について調べた [3]。MacKenzie らは、目標の大きさ W について次の 4 通りのモデルを示し、実験結果との適合度を比較した。

- 目標の水平幅 (STATUS-QUO モデル)、
- 目標の面積 ($W \times H$ モデル)、
- 目標の短辺の長さ (SMALLER-OF モデル)、
- 移動方向に沿った目標の奥行き (W' モデル)。

それぞれのモデルに従って実験結果の回帰式を求め、相関係数を比較した。その結果、SMALLER-OF モデルと W' モデルが他の 2 モデルより相関係数が有意に大きく、この 2 モデルの適合性が高いことがわかった。

従来の研究では、文字や文字列などの小さな目標についての Fitts の法則の適合性が調べられてきた。小さい目標の場合、目標までの距離 D を目標のどの部分までの距離としても大きな違いがなく、これまでは D を目標の中心までの距離としていた。しかし、ウィンドウのような大きな目標の

場合、 D をどのようにとるかによって値が大きく異なる。ウィンドウのような大きい目標に対する選択操作は、ウィンドウの入力フォーカスや重なり状態の変更のために現実によく行われる。ユーザの選択操作を観察すると、目標の中心ではなく辺に近い部分に向かって移動を行っていることがわかる。

そこで、今回、ウィンドウのような大きな目標に対する目標選択実験を行い、ユーザの操作の傾向を調べた。そして、その結果を基に目標までの距離 D の新しいモデルを提案し、従来のモデルより実験結果との適合度が高いことを確かめた。

2 実験

この実験では、大きい目標の選択を行ったときの選択時間と選択操作の終了位置 (選択位置) を、目標の形状や移動方向、距離を変えて測定する。これにより、選択位置の傾向を調べ、それを基に目標までの距離 D のモデルを作ること、およびそのモデルにおける Fitts の法則の適合度を従来のモデルと比較することを行う。

2.1 被験者

被験者は、本情報工学科の学生 10 名 (すべて男性) である。被験者はすべてマウスの操作に慣れている。また、被験者は一人を除いて全員右利きで、マウスの操作は利き手でを行った。

2.2 実験環境

実験は、SONY 製の NWS-3470 と白黒ディスプレイ (1280 × 1280 pixels, 100 dots/inch)、およびシステム付属のマウスを用いて行った。

マウスには 3 個のボタンがついているが、そのいずれでも操作可能とした。またマウスカーソルの移動速度は、マウスの移動の単位あたりにマウスカーソルが 0.5 ドット移動する速さである。

実験システムは X-Window 上で作成した。時間の測定にはシステム内蔵のタイマを用い、1 msec 単位で計測した。

2.3 実験手順

画面上に大小 2 つの矩形を表示し、それらに対して被験者に選択操作を行わせて、時間と選択位置を測定する。

選択操作は、スタートウィンドウと呼ぶ小さい矩形の中でクリックしてから、カーソルを移動させ目標ウィンドウと呼ぶ大きい矩形の中でクリッ

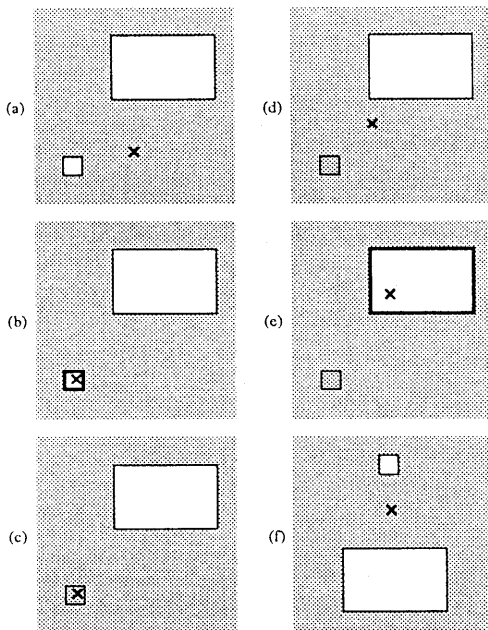


図 1: 選択操作

クするまでの操作である。1回の選択操作の手順を次に示す。

1. 画面上に目標ウィンドウとスタートウィンドウが表示される (図 1(a))。
2. スタートウィンドウ内でクリックする (図 1(b))。ウィンドウ内にカーソルが入っているときは輪郭が太く表示される。
3. 2の操作が正しく行われるとスタートウィンドウの表示が変化する (図 1(c))。
4. 目標ウィンドウ内にカーソルを移動させ、クリックする (図 1(d),(e))。ウィンドウ内にカーソルが入っているときは輪郭が太く表示される。
5. 4の操作が正しく行われると次の画面が表示される (図 1(f))。

カーソルをスタートウィンドウ内でクリックした後、目標ウィンドウの外で間違えてクリックした場合は、選択誤りとする。このときブザー音を鳴らして被験者に知らせ、もう1回スタートウィンドウの選択からやり直してもらう。

各選択操作に対し、次の値を測定する。

- スタートウィンドウ内でボタンを押してから、目標ウィンドウ内でボタンを押すまでの時間 (操作時間)。

- 目標ウィンドウ内でボタンを押した位置 (選択位置)。
- エラー回数。

被験者には、スタートウィンドウを選択した後、正確さを損なわない程度にできるだけ速く目標ウィンドウを選択するよう指示をした。

各被験者が受ける実験の手順は以下のようになる。

1. 操作方法について、口頭による説明と注意を受ける。
2. 選択操作の練習をする。
3. 1ブロック分の選択操作を行う。実験条件によって、15回から25回の選択操作を1ブロックとする。次節で詳しく述べる。
4. 疲労による実験結果への影響を抑えるために、1ブロック終了ごとに小休止をする。また、スタートウィンドウの選択をするまでは必要に応じて小休止できる。
5. 3と4を繰り返す。

2.4 実験条件

目標ウィンドウの大きさ、表示する位置などは、次のようにする。

2.4.1 目標ウィンドウの形状

次の6種類。

- TL型 (横 572 × 縦 336 dots)
- TM型 (横 330 × 縦 194 dots)
- HL型 (横 50 × 縦 572 dots)
- HM型 (横 50 × 縦 330 dots)
- WL型 (横 572 × 縦 50 dots)
- WM型 (横 330 × 縦 50 dots)

TL, TM型はターミナルウィンドウのような形状, HL, HM型はタイトルバーのような横に細長い形状, WL, WM型は縦に長い形状である。Lは大, Mは中を表す。

TL型は80 × 25文字程度のターミナルウィンドウの大きさに当たる。TM型は寸法比でTL型の約1/√3倍の大きさである。HL, HM, WL, WM型の短辺の長さは、実際によく使われるタイトルバーの約2倍である。長辺の長さはそれぞれTL, TM型の長辺と同じである。

2.4.2 目標ウィンドウとスタートウィンドウの距離

中心間の距離について、目標形状ごとに3から5通り (下表)。ひとつの形状については、距離の値が公比√2の等比数列に近くなるよう設定した。

形状	中心間距離 (dots)
TL	472, 668, 945
TM	264, 374, 529, 748, 1058
HL	334, 472, 668, 945
HM	264, 374, 529, 748, 1058
WL	334, 472, 668, 945
WM	264, 374, 529, 748, 1058

ウィンドウの大きさによって最小距離が、画面の大きさによって最大距離が制限される。目標形状によってこの範囲が大きく違うので、範囲いっばいを使えるよう形状ごとに距離の取り方を変えた。

2.4.3 スタートウィンドウから見た目標の方向 (移動方向)

中心間の方向について、全周囲を 18° ずつ 20 等分した 20 通りの方向。

2.4.4 選択操作の回数と順序

以上のすべての組合せ 520 通りの実験条件について選択操作を行う。1 人あたり、1 条件につき 10 回の選択操作を行う。選択操作の回数が非常に多いため、実験は 1 人について 10 日間に分けて行う。1 日に 520 通りの条件をそれぞれ 1 回ずつ 520 回の選択操作を行う。

1 日分の選択操作を、目標形状と移動方向によって 24 のブロックに分割する。すなわち、移動方向を水平垂直で分けた 4 つの象限に分け、6 通りの目標形状との組合せで 24 に分割する。実験中、1 つのブロック内は連続的に次の目標とスタートウィンドウが表示され、ブロックとブロックの間は小休止が取られる。

ブロック内の各条件の提示順序はランダムに定める。ブロックの提示順序は、同じ形状、象限が連続しないようにランダムに定める。各被験者ごとおよび実験日ごとにブロックの提示順序、ブロック内の提示順序を変える。

2.4.5 その他

スタートウィンドウの大きさは 40×40 dots とした。

3 実験結果

3.1 選択位置

ある被験者の、選択操作の際のカーソルの軌跡を図 2 に示す。これは TL 型、中心間距離 472 dots の場合のものである。このように、被験者の選択操作には

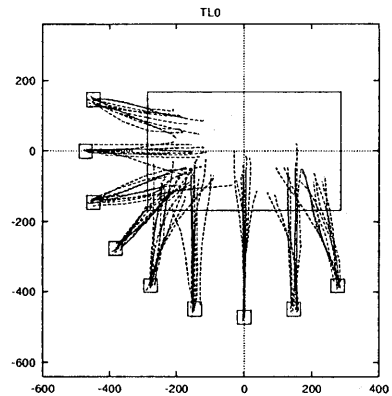


図 2: カーソルの軌跡
(TL 型, 中心間距離 472 dots)

- 出発点が目標の頂点よりも辺に近い場合には、目標の辺をほぼ垂直に横切ってカーソルを移動する、
- 出発点が目標の頂点に近い場合には、目標の頂点の近くを通過してカーソルを移動するという傾向が見られる。

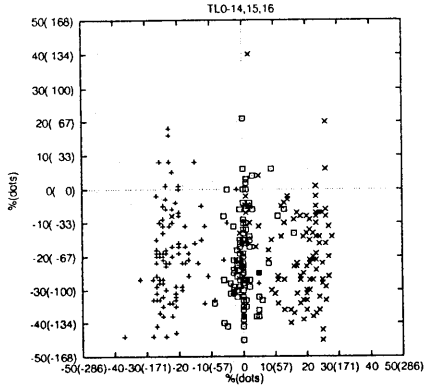
図 3 は全被験者の選択位置を図示したものである。これは、目標ウィンドウをグラフの外枠の正方形で表し、その内部の選択位置を図示している。つまりグラフ上の座標は目標ウィンドウの辺の長さに対する相対位置になる。また「出発点の方向」は目標の中心から見たスタートウィンドウの中心の方向で、水平右向きを 0° 、垂直上向きを 90° とする。

図を見ると、選択位置は図 2 で見た軌跡の方向に細長く分布しているのがわかる。また、分布の範囲は大きい但其の平均は目標の中央より辺に近い部分にある。中心間距離を大きくすると、おおまかな傾向は似ているがしだいに分布が広がる (図 4)。また、中心間距離が小さいときより少し辺に近い部分に分布する。

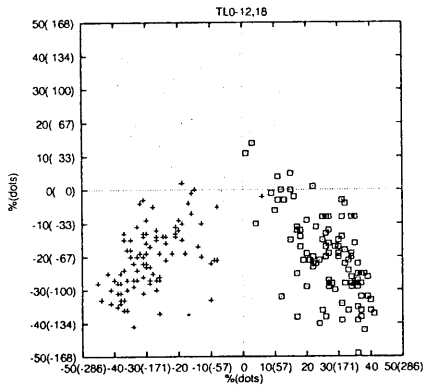
出発点の方向が、右と左、上と下など、水平軸や垂直軸に関して対称な場合、選択位置の分布に大きな傾向の違いは見られない。

3.2 平均選択位置

520 通りの実験条件ごとに、全被験者の全選択操作 (100 試行) の選択位置の平均を求めた (図 5)。紙面の都合で一部の図だけを示す。位置の平均は、水平・垂直座標の値をそれぞれ独立に平均

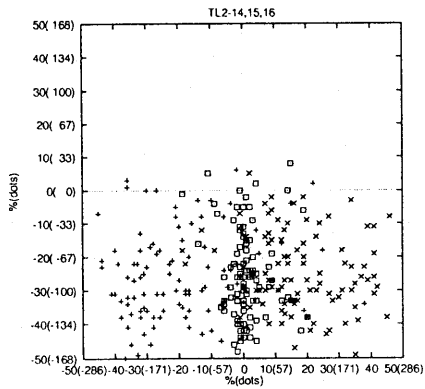


(a) 出発点の方向: +:252°, □:270°, ×:288°



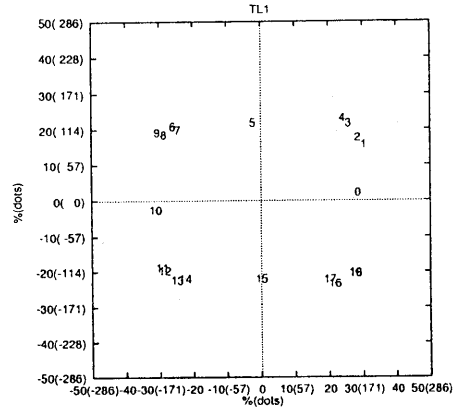
(b) 出発点の方向: +:216°, □:324°

図 3: 選択位置 (TL 型, 中心間距離 472dots)

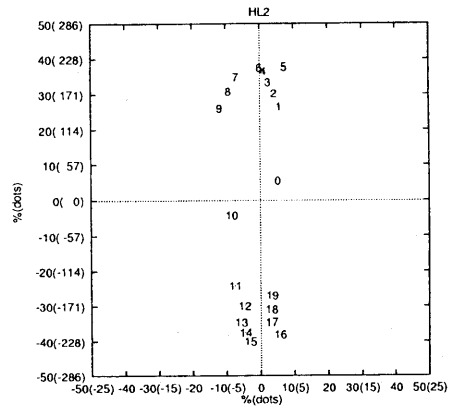


出発点の方向: +:252°, □:270°, ×:288°

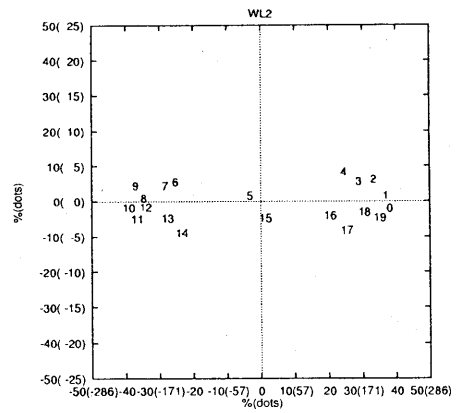
図 4: 選択位置 (TL 型, 中心間距離 945dots)



(a) TL 型, 中心間距離 668dots



(b) HL 型, 中心間距離 668dots



(c) WL 型, 中心間距離 668dots

図 5: 平均選択位置

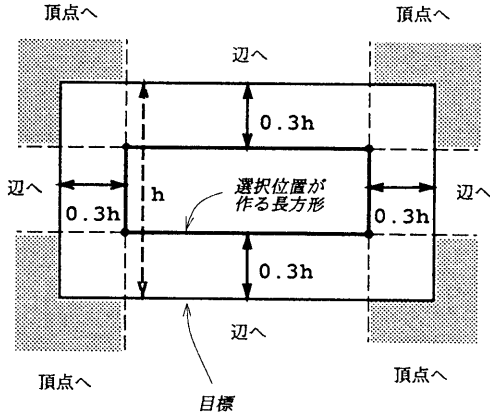


図 6: 出発点と選択位置の関係

したものである。1枚の図は1種類の目標の形状と中心間距離に対する図で、異なる番号で各方向に対応する平均選択位置を表している。

TL, TM型の平均選択位置は、目標ウィンドウの辺から短辺の長さの約30%程度内側の長方形に近い形を形成している。中心間距離が近い場合は、平均選択位置が作る長方形の辺が凹状に、距離が遠い場合は長方形の角が丸くなっている。

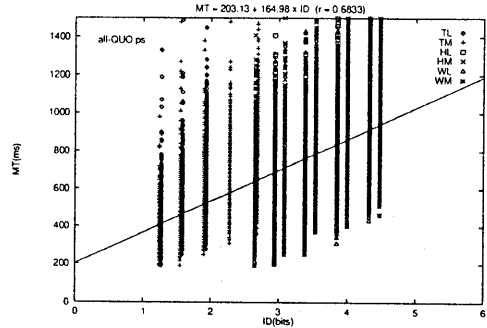
HL, HM型の平均選択位置は、長軸の端が目標ウィンドウの短辺から短辺の長さ(50dots)程度内側の非常に細長い楕円形に近い形を形成している。WL, WM型の平均選択位置は、それぞれHL, HM型の水平・垂直を入れ替えたような形である。

4 目標までの距離 D の新しいモデル

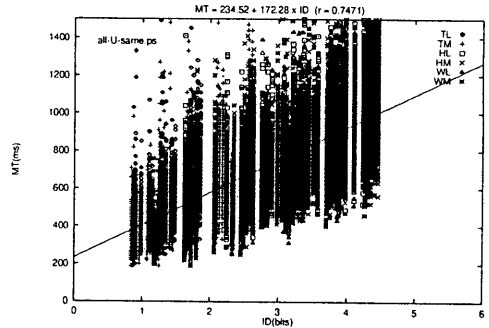
4.1 モデル

前節で示した平均目標選択位置を基に、Fittsの法則でいう目標までの距離 D の新しいモデルを考える。目標ウィンドウの形状とカーソルの出発点の位置から D を次のように定める。

- 目標の短辺の長さの30%だけ目標ウィンドウの四辺から内側の辺からなる長方形を考える(図6)。これを選択位置長方形と呼ぶ。
- 出発点から直線距離で最も近い選択位置長方形上の点を、その出発点に対する予想選択位置と呼ぶ。すなわち、図の網がかかった範囲内に出発点がある場合は選択位置長方形の最も近い頂点、それ以外の場合は最も近い辺に



(a) 従来のモデル



(b) 新しいモデル

図 7: 困難度 ID と操作時間 T の関係

出発点から下ろした垂線の足が予想選択位置である。

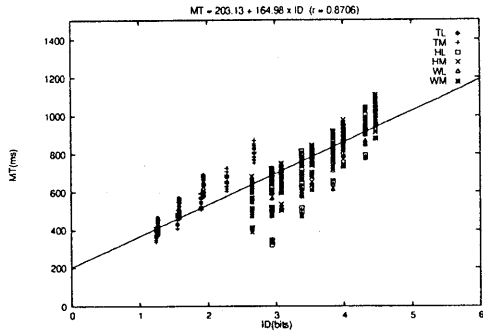
- 出発点と予想選択位置の間の距離を D とする。

4.2 適合性の検証

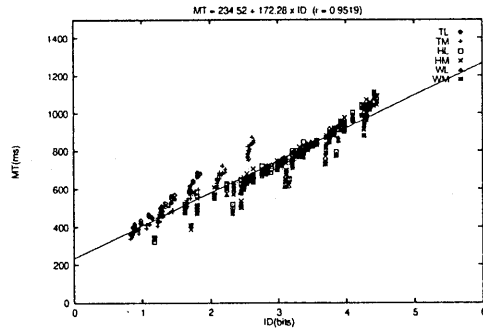
前節で示したモデルが現実に対応するかどうか、今回の実験データをあてはめて検証する。ただし、目標の大きさ W については SMALLER-OF モデル [3] を使用した。また、各選択操作について出発点はスタートウィンドウの中央とした。

1. まず、全選択操作(52000試行)の困難度 ID と操作時間 T の関係を、従来のモデルと新しいモデルそれぞれについて求めた(図7)。
2. また、各実験条件(520通り)ごとに選択操作(100試行)の操作時間の平均を求め、困難度と平均操作時間の関係を両モデルについて求めた(図8)。

Hotelling の t 検定 [2] により両モデルの相関係数を比べると、有意水準 0.5% で 1., 2. とともに新しいモデルのほうが有意に大きいことがいえた(表1)。



(a) 従来のモデル



(b) 新しいモデル

図 8: 困難度 ID と操作時間 T の関係 (実験条件ごとに T を平均)

すなわち、新しいモデルのほうが従来のモデルより現実により適合しているといえる。

操作時間の分布は、同じ実験条件・被験者に対しても非常に分散が大きい。つまり、人間が操作することによるばらつき（ノイズ）が大きい。今回の実験では、目標が大きいことから被験者の自由度が高くよりその傾向が強い。しかし、実験条件ごとに操作時間を平均することでそれらのノイズの影響を抑えることができると考えられる。上の 2. の場合、新しいモデルではかなり高い相関係数の値が得られた。これは今回のモデルが現実により十分適合することを示していると考えられる。

5 その他の結果

5.1 エラー率

全被験者の選択誤りの回数は 1,014 回で、これは全操作の 1.91% にあたる。

目標形状と中心間距離ごとにエラー率を調べた

表 1: 両モデルの相関係数の比較

	r_{new}	r_{old}	$r_{n,o}$	N	$t_{d,r}$
1.	0.7471	0.6833	0.9618	52000	80.73
2.	0.9519	0.8706	0.9618	520	25.86

r_{new} : 新しいモデルでの ID と T の相関,
 r_{old} : 従来のモデルでの ID と T の相関,
 $r_{n,o}$: 両モデルの ID の相関,
 N : 標本数,
 $t_{d,r}$: Hotelling の式の値.

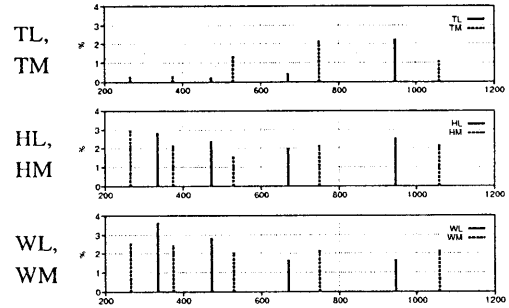


図 9: エラー率 (目標形状と中心間距離ごと)

(図 9). TL, TM 型のほうが HL, HM, WL, WM 型よりエラー率が低い傾向が見られる。WL, WM 型と HL, HM 型のエラー率は同程度である。

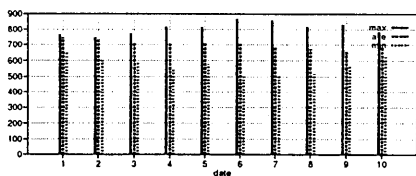
TL 型では中心間距離が大きくなるにつれてエラー率も増加するが、HL, HM, WL, WM 型ではある距離のときにエラー率が最小となり、それより遠くても近くてもエラー率が大きかった。これは、マウスを移動させるときに最低限必要な距離があり、そのとき目標までの距離が近いと細い目標を通り越してしまうからではないかと推測される。TM 型では、TL 型と同様に中心間距離が大きくなるにつれてエラー率が増加していたが、最も遠い場合 (1058dots) についてはエラー率が低かった。

5.2 被験者間および実験日間の比較

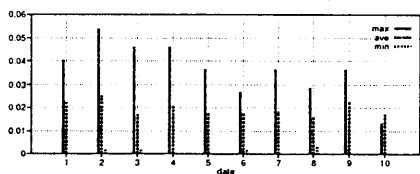
操作時間とエラー率について、被験者間および実験日間に有意な差があるか調べた。

実験は、各被験者それぞれの都合に合わせて 1ヶ月から 2ヶ月の期間に 10 日に分けて行った (2.4.4 節)。ここでいう実験日は、10 日分の実験の 1 日目, 2 日目, ..., 10 日目を指す。

図 10 は、各被験者の各実験日ごとに、それぞれ平均操作時間とエラー率を求め図示したものであ



(a) 平均操作時間



(b) エラー率

図 10: 被験者および実験日ごとの値

る。ただし、1日に520通りの実験条件の操作を各1回ずつ行うので、ここではその520回分の操作時間の平均を平均操作時間と呼ぶ。図では、全実験日を合わせた平均操作時間（エラー率）が最大および最小の被験者の値と、各実験日ごとの全被験者の平均の値とを示している。

各被験者および実験日ごとの平均操作時間とエラー率それぞれに対し分散分析（2元配置法）[4]を行った。有意水準1%で調べた結果、エラー率については、被験者間には有意差があるが実験日間に差があるとはいえなかった。平均操作時間については、被験者間・実験日間とも有意差があった。

5.3 困難度の定義の検討

4節では、Fittsの法則でいう困難度の定義 $ID = \log_2(D/W + 1)$ は変更せず目標までの距離 D の定義だけを議論した。しかし図7,8を見ると、困難度と操作時間をFittsの法則にあてはめた際、TL, TM型とそれ以外の型とでは傾斜の異なる直線に沿う傾向が見られる。すなわちTL, TM型のほうが傾斜が大きい。

これは、今回用いた困難度の定義が、目標形状の差が大きい場合に適合しない可能性を示していると考えられる。

6 あとがき

本稿では、マウスを使用してウィンドウのような大きな目標を選択操作する際のFittsの法則の適合性について調べた。

表 2: 分散分析表

(a) 平均操作時間

	平方和	df	MS	f値
被験者間	465920	9	51769	34.08
実験日間	59345	9	6594	4.34
誤差	123050	81	1519	
全変動	648315	99		

(b) エラー率

	平方和	df	MS	f値
被験者間	130.44	9	14.49	18.60
実験日間	8.14	9	0.90	1.16
誤差	63.13	81	0.78	
全変動	201.70	99		

df: 自由度, MS: 平均平方和

まず、選択位置の特徴を調べるために目標選択実験を行った。そして、その結果を基に目標までの距離 D の新しいモデルを示した。今回の実験データに対する適合度を調べたところ、従来のモデルより有意に相関係数が大きく、より現実に適合していることが言えた。

謝辞

早く被験者を引き受けていただいた都倉研究室の皆様へ感謝致します。

参考文献

- [1] Fitts, P.M.: "The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement", *Journal of Experimental Psychology*, Vol.47, No.6, pp.381-391 (June 1954).
- [2] Guilford, J.P. and Fruchter, B.: "*Fundamental statistics in psychology and education*", 5th ed., McGraw-Hill, New York, p.167 (1974).
- [3] MacKenzie I.S. and Buxton W.: "Extending Fitts' law to two-dimensional tasks", *Proceedings of the CHI'92 Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.219-226 (May 1992).
- [4] 高松: "数理統計学入門", 学術図書出版社, pp.144-149 (1977).