

## 三次元図形マッチングタスクにおける ダイヤル回転操作の分析

坂本忠明 今宮淳美  
山梨大学 電子情報工学科

対話型三次元図形処理におけるユーザの対話動作の定量的モデルは、ユーザインターフェースの設計において重要である。本論文では、回転操作の予測式、一方の3次元図形を他方の図形と見え方を同じくするようにダイヤルを使っての回転時間と回転角度に関する予測モデルについて述べる。

$$(i) \text{ ダイヤル操作時間 } T = C (I H + D_t)$$

$$(ii) \text{ 回転速度 } x = A e^{-\lambda t} \cos \omega t$$

An analysis at the matching experiment of the object  
with the manipulation of rotating

Sakamoto Tadaaki Imamiya Atsumi

Department of Electrical Engineering and Computer Science  
Yamanashi University

4-3-11 Takeda, Kofu, Yamanashi 400, Japan

The quantitative models of user's dialog behavior are important to the design of user interface of interactive 3D Computer Graphics. The paper describes predictive equation of the rotational operation, predictive models of true and angle to rotate a 3D figure into the same view of another using dial devices, (i) dial manipulation :  $T = C (I H + D_t)$ ,  
(ii) rotation speed :  $x = A e^{-\lambda t} \cos \omega t$ .

## 1. はじめに

対話型三次元図形処理においてユーザは、視点を変えてモデルを見る場合に回転操作を行う。一般に回転操作では、直交する三主軸(X, Y, Z)の各軸についてユーザが指定する角度で回転する。キーボード、マウス、ダイヤルなどの入力装置で三次元図形処理システムに角度値を渡す。中でもダイヤルは、回転角度を回転の動作でユーザが与えるため、回転に適した入力装置と考えられている。しかし、ユーザのダイヤル操作に関する実証研究は少ない<sup>[1][2]</sup>。本論文では、被験者のダイヤル回転操作の実験から求めた操作時間の予測式について述べる。

## 2. 実験

次に示す3種類のダイヤル回転操作に関する実験を行う。実験の前提として、被験者は各実験で異なる。被験者の質と同じくするために情報コースの3年生（いずれも右手利き）である。

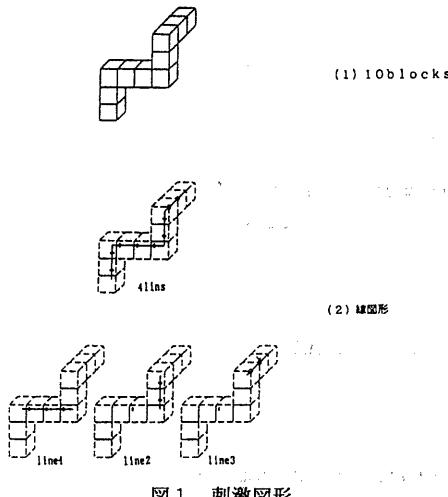


図1. 刺激図形

### (1) 実験1

刺激図形は同じサイズの立方体の10個からなる10ブロックスである（図1(1)）。被験者は10名で、X, Y, Zの各主軸の中から1つの主軸に関する回転操作ができる。

### (2) 実験2

刺激図形は10ブロックスのつながりの構造を表す線図形である。10ブロックスのどの部分に注目するかで、全体構造の1種類と部分構造の3種類がある（図1(2)）。被験者は5名、操作できる主軸(X, Y, Z)に制限はない。

### (3) 実験3

刺激図形は実験1と同様に立方体の10個からなる10ブロックスである（図1(1)）。被験者は10名

で、被験者が回転操作できる主軸に制限はない。

### 2-1. 手続き

被験者全員に実験の目的を説明および実験で使う图形空間と座標の関係を説明する（図2）。また、ダイヤル操作を説明し、操作に慣れるまで被験者は練習する。

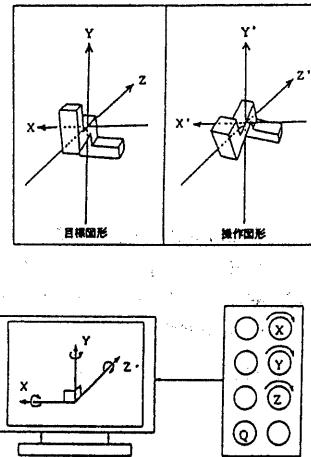


図2. 刺激図形の座標系

はじめ被験者は机の右側の指定位置に手を開いて置く。実験システムは、練習および実験開始とともに刺激図形を表示画面の左右に描画する。被験者は、右側の刺激（目標）図形の見え方と同じになるよう左側の刺激（課題）図形をダイヤルで回転する。目標図形と課題図形間の初期角度差の発生には乱数を使う。一致と判断した時点で被験者は終了宣言のQダイヤルを回わし、指定位置に手を戻す。以上を1課題とする。被験者は実験システムの刺激図形描画で、どの主軸をどれくらい回転させるかを予測し、ダイヤルで実際に回転する。各課題数は：実験1で108、実験3で54、実験2で全体構造に9、部分構造に3づつの9、合計18である。

### 2-2. 記録

$1/2^7$ [sec]の周期でダイヤルの回転値を読み取り( $S_n$ )、前の値( $S_{n-1}$ )と同じ( $S_n = S_{n-1}$ )であればダイヤルが停止していることになる。2つ前の値( $S_{n-2}$ )と1つ前の値の差( $\alpha = S_{n-2} - S_{n-1}$ )と、1つ前の値と現在の値の差( $\beta = S_{n-1} - S_n$ )が同じ( $\alpha = \beta$ )であれば等速度でダイヤルを回していることになる。一方、 $\alpha \neq \beta$ ならば回転速度が変化したことになる。この回転値と回転した主軸を記録する（ダイヤルデータ）。記録したデータの各々は $1/2^7$ [sec]となる。このデータは1課題について、被験者がダイヤルに触れた時点からQダイヤルに触れた時点までを記録する。被験者のすべての行動はビデオ画像として記録する。ビデオ画像は $1/60$ [sec]で分析する。練習用の課題を終えた時点で被験者に練習および実験

用に用意した課題以外を1つさらに実験する。そのとき口述記録と被験者アンケートをとる。

### 3. 結果

被験者の操作を次の3つの動作段階に分けることができる。目標移動：被験者は指定位置からダイヤルに手を移動する。回転操作：次にダイヤルを回し、目標图形と課題图形が一致した場合に終了宣言としてのQダイヤルを回す。指定位置移動：最後は指定位置に手を移動する。

#### 3-1. 実験1

##### (1)誤解（鏡像と点対象）

目標图形と課題图形間の見え方が一致したと被験者が判定する時点に注目し、目標图形と課題图形間の角度差を求める（図3）。Y軸の90[°]に特異点が2つあった。この場合の目標图形と課題图形の関係は鏡像である。またZ軸では180[°]のところに特異点がある。この場合の目標图形と課題图形の関係は点対象である。いずれも、YまたはZ軸に関する回転で課題图形を目標图形の見え方が一致できる場合（YUZ軸での一致操作と表す）に誤解が生じる。ここで課題数と誤解の発生数の関係を表1に示す。

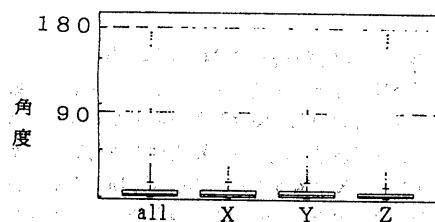


図3. 一致判定時の角度差（実験2：線図形）

表1. 課題数と誤解の数（実験1：10blocks）

	課題数	YUZ軸での一致操作の数	誤解の数
	練習	540	43
	実験	139	11

##### (2)操作傾向

##### (A)目標移動

口述記録によれば被験者は刺激图形の提示後、回転方向と角度を予測する。

被験者の行動では、最初に操作するダイヤルに視線が移動する。次にダイヤルがある位置に手が直線的に移動する。被験者の手は、移動中にダイヤルを握る場合と、ダイヤルの位置に到達した時点で握る場合がある。全データを調べると前者は76[%]で、後者は24[%]である。

##### (B)回転操作

縦軸を目標图形と課題图形間の角度差[°]、横軸を時刻[sec]としてダイヤルの操作をプロットする（図4）。その結果、模索期、収束期、微調整期、終了期があることがわかった。

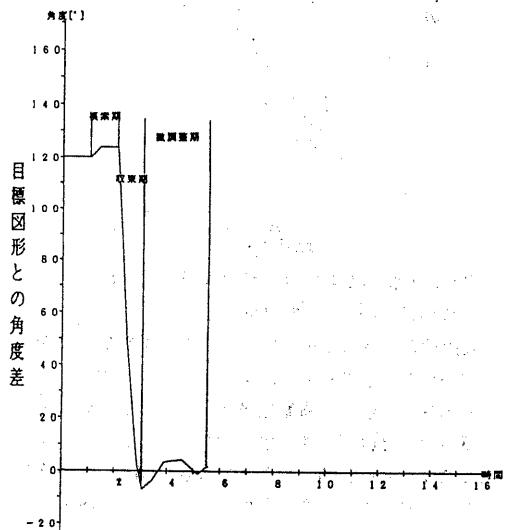


図4. 回転操作例（実験1：10blocks）

口述記録によれば、模索期では、ダイヤルの回転がどのくらい課題图形に渡されるか、またダイヤルの回転方向を把握する。これはダイヤルを少し動かすことできわかる。収束期では、目標图形に課題图形を一致させるため、高速にダイヤルを回転する。被験者が予測した回転角度に対し、模索期で定めた回転角度の大きさと回転方向をもとに適する回転角度と回転方向を定め、それらの情報によって実際に回転する。次に、目標图形に対する課題图形の一致の精度を上げる微調整をする。終了期では、回転主軸に対応するダイヤルから手を離し、Qダイヤルに手を移動して回す。

練習においては、模索期と収束期および微調整期の境界がわからない操作がある。最初からゆっくりダイヤルを回転させながら图形間の一致を図る。練習回数が増すに従って、模索期と収束期の境界がはっきりしてくる。実験に入っても、境界がわからない回転操作は、全実験で12[%]である。

##### (C)指定位置移動

Qダイヤルを回す時点から指定位置に手を移動する時点までである。被験者の手は、移動中に手を開く比率が82[%]で、残りがQダイヤルを放した時点で手を開きそのまま指定位置に移動する。

##### (3)ダイヤル操作と回転時間の関係

ダイヤル操作の傾向は、回転操作で述べた模索期、収束期、微調整期がある。この期間のダイヤルの操作を縦軸を角度[°]、横軸を秒[sec]として表す（図5）。ただし、被験者がダイヤルを握り直す時間を除く。

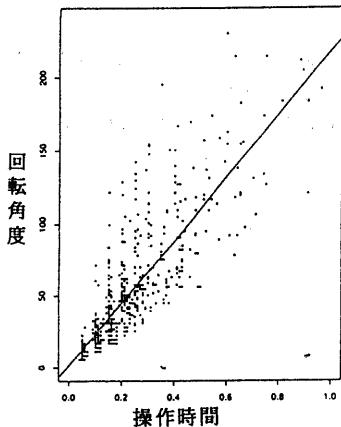


図5. 回転角度と操作時間（実験1：10blocks）

#### (4)課題の角度差と予測の関係

収束期から微調整期に移る時点の目標图形と課題图形の角度差を求める。縦軸は提示した目標图形と課題图形間の角度差、横軸は被験者が予測した角度とその時点の目標图形と課題图形間の角度差とする（図6）。図6によると、課題の角度差が大きい場合、被験者は正しく予測でき、一方、角度差が小さいと角度差の予測が不正確となる傾向がある。

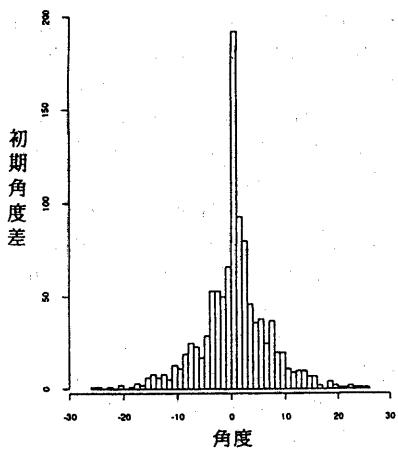


図6. 微調整期時点の角度差（実験1：10blocks）

#### 3-2. 実験2

##### (1)誤解（鏡像と点対象）

実験1と同様な誤解が2種類ある。1つがY軸を回転するときに鏡像による誤解が起こる。もう一方がZ軸を回転するときに点対象による誤解が起こる。

##### (2)操作傾向

###### (A)目標移動

口述記録によると、被験者は複数の主軸を操作する。刺激图形が提示された時点でどの主軸を、どのくらい回転させ、さらに別の主軸をどのくらい回転させるかを予測する。

被験者の行動（指定位置からの移動）について、手

をダイヤルの大きさに合わせて握るのが8割で、他の2割で手を開いたまま移動して握る。

##### (B)回転操作（図7）

ここでの操作傾向ははじめに模索期があり、次に操作する主軸の数だけ収束期がある。そして微調整期の後にQダイヤルで終わる。

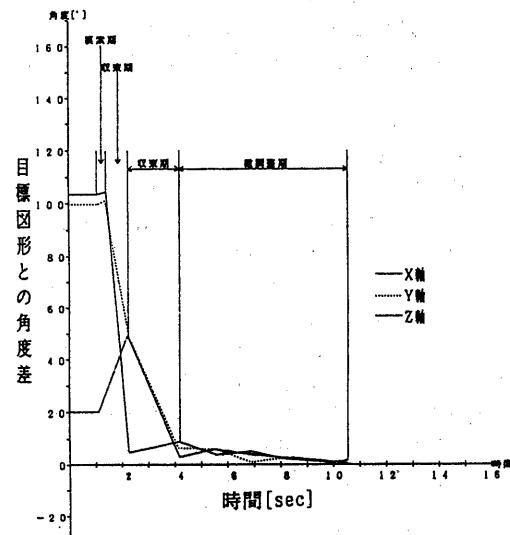


図7. 回転操作例（実験2：線図形）

はじめの模索期は、実験1と同様にダイヤルの回転がどのくらい課題图形に渡されるかを把握する。次の収束期は、被験者が予測した回転主軸を予測した角度で回転する。回転主軸をかえて再度収束期に入る。回転角度の大きさおよび回転方向は模索期で定めてあるので、最初の主軸以外の主軸では再度模索期に入ることはない。したがって、模索期、収束期、収束期、…、微調整期の順である。微調整期において、目標图形に課題图形の一致を試みる。一致と判定した時点でダイヤルから手を放し、Qダイヤルを回す。これが終了期である。

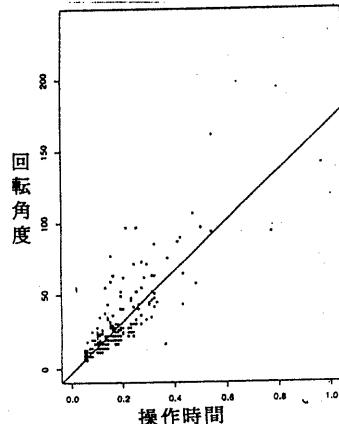


図8. 回転角度と操作時間（実験2：線図形）

### (C) 指定位置移動

指定位置に手をおく。そのため Q ダイヤルを放した時点で手を開き、次にその手を移動する被験者が 2 割である。他の 8 割の被験者は移動中に手を開く。

### (3) ダイヤル操作と回転時間の関係

実験 1 と同様にダイヤル操作について、角度と時間の関係を図 8 に示す。

表 2. 課題数と誤解の数（実験 3 : 10blocks）

	課題数	YUZ 軸での誤解の回数	
		一致操作の数	誤解の回数
練習	1080	724	6
実験	569	381	29

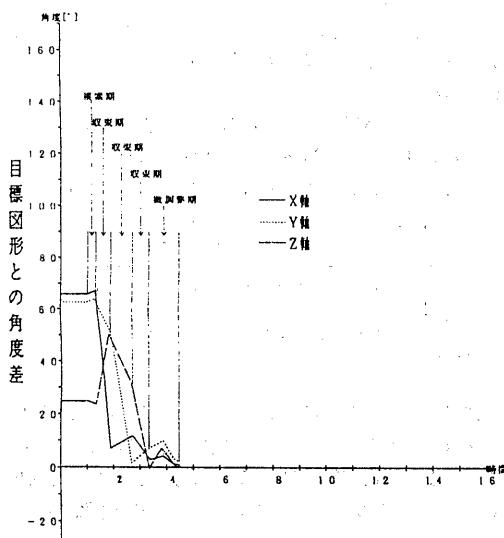


図 9. 回転操作例（実験 3 : 10blocks）

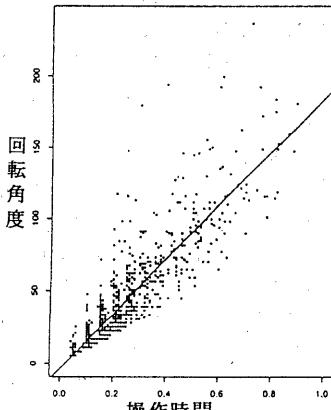


図 10. 回転角度と操作時間（実験 3 : 10blocks）

### 3-3. 実験 3

#### (1) 誤解（鏡像と点対象）

実験 1 および 2 と同様に鏡像と点対象による誤解がある。Y 軸操作で鏡像、Z 軸操作で点対象の誤解である（表 2）。

#### (2) 操作傾向

操作傾向は実験 2 と同様に、最初目標移動、次に回転操作、最後が指定位置への移動である。回転操作は、模索期、収束期、収束期、…、微調整期の順である（図 9）。

#### (3) ダイヤル操作と回転時間の関係

他の実験と同様にダイヤルの操作について、角度と時間の関係を図 10 に示す。

### 4. 検討・結論

#### 4-1. 誤解（鏡像と点対象）

##### (1) 誤解と回転操作する主軸の関係

すべての実験での誤解は鏡像と点対象による。このとき被験者が Y 軸ダイヤルを最終一致に使う場合に鏡像、Z 軸ダイヤルを最終一致に使う場合に点対象の誤解が起こる。

##### (2) 誤解はなぜ起きるか

各実験の口述記録を調べる。目標图形と課題图形のかたち、特に立方体のつながりだけに注目して回転する被験者がいる。それらの小数の被験者が目標图形と課題图形の関係を鏡像、および点対象として捉え、2 図形が一致すると判定する。この誤解の発生の傾向は練習が進むにしたがって少なくなる。また、誤解の発生比率（誤解の発生数／課題数）は実験 2 が他の実験より極めて多い。

#### 4-2. 回転操作と時間の予測式

1 つの課題を遂行する時間は、ダイヤル操作時間  $M_t$  とそれ以外の時間  $O_t$  の和である。特に  $O_t$  については、フィットラの運動系の時間分析がある<sup>[2][3][4][5][6]</sup>。ここではダイヤル操作に関する時間分析をする。

各実験において、はじめに被験者が回転角度と回転方向を予測する時間  $t_1$  がある。次に手の移動時間  $t_2$ 、実際の回転操作に関する時間  $t_3$ 、終了宣言への手の移動時間  $t_4$ 、終了 Q ダイヤルの操作時間  $t_5$ 、指定位置に手を移動する時間  $t_6$  である。ここではダイヤル操作時間  $t_3$  をダイヤル操作時間  $T$  と表して分析する。

ダイヤル操作は複数の主軸の回転、また 1 つの主軸でも速度の異なる複数の回転操作からなる。このすべての回転操作数の平均を  $C$  とおく。そこで 1 つの回転操作に注目する。口述記録によれば 2 つもしくは 3 つの主軸に被験者が注目している。複数の主軸から 1 つの主軸を選択し、次にそれを実際に回転操作する。その主軸の選択時間は、選択のための指標  $H$  とその指標の単位あたりの時間  $I$  との積 ( $IH$ ) である<sup>[2][7][8][9][10][11]</sup>。回転操作時間は、回転角度が大きければ大きく、小さければ小さくなる。回転速度と操作時間

に線形関係があると仮定する（回転操作時間  $D_t = aR + b$ ，ただし  $R$  は回転角度 [°] である）。以上よりダイヤル操作時間  $T$  は

$$T = C(IH + D_t) \quad \text{式(1)}$$

となる。

### (1) 実験 1

この実験では被験者に操作する主軸を指定してあるので被験者の回転操作のみに注目すると式(1)は

$$T = C(aR + b) \quad \text{式(2)}$$

となる。

図 5 上に示した回帰式は  $D_t = 0.05R + 1.54$  である。この場合の相関係数は 0.84 である。  $R$  の平均は  $33.2[^\circ]$  であった。また、  $C$  の平均は  $21.5[\text{回}]$  であった。したがってこれらを式(2)に代入することで実験 1 の予測値を求めると  $5.109[\text{sec}]$  となる。実験結果は平均で  $6.2[\text{sec}]$  であった。予測値に極めて近い値である。

### (2) 実験 2

被験者の口述記録では、2つの主軸に注目して操作しているとの回答が7割であった。他に3と1主軸に注目しての回転操作の比は2対1であった。表3に2つの主軸に注目した被験者の出現確率を示す。

表3. 主軸の出現確率（実験2：線図形）

	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$
4lines	X→Y 0.406	Y→X 0.270	X→Z 0.108	Z→Y 0.081	Y→Z 0.081	Z→X 0.054
line1	X→Y 0.429	Y→Z 0.429	X→Z 0.142			
line2	X→Y 0.444	Z→Y 0.222	Y→Z 0.222	Z→X 0.112		
line3	Z→Y 0.363	X→Y 0.273	Y→X 0.182	Y→Z 0.091	Z→X 0.091	

式(1)より、主軸の選択時間は選択のための指標  $H$  と指標単位あたりの時間  $I$  の積である。  $I$  は実験結果から求める。指標  $H$  を

$$H = \sum P_i (1/P_i + 1) \quad \text{式(3)}$$

とする。ただし、  $P$  は選択肢（主軸）の出現確率である。そこで表3に示した出現確率を式(3)に代入すると指標  $H$  は、各刺激图形で、  $H_{4\text{lines}} = 2.444$ ,  $H_{\text{line}1} = 1.536$ ,  $H_{\text{line}2} = 2.218$ ,  $H_{\text{line}3} = 2.117$  となる。 $D_t$  は図8に示した回帰式より  $D_t = 0.006R - 2.78$  である。この式の相関係数は 0.87 である。

実験結果から  $I$  を求めると、  $I_{4\text{lines}}$  が  $0.262$ ,  $I_{\text{line}1}$  が  $0.261$ ,  $I_{\text{line}2}$  が  $0.263$ ,  $I_{\text{line}3}$  が  $0.226$  であった。刺激图形の4linesを基準に各指標との差を求める。line1の場合  $0.908$  で  $59\%$  の反応時間となる。

line2の場合、  $0.226$  で  $10\%$ , line3の場合、  $0.327$  で  $15\%$  の反応時間となる。一方、実験結果は4linesの平均反応時間が  $0.641[\text{sec}]$  である。line1は  $0.401[\text{sec}]$  で4linesの  $63\%$ , line2は  $0.584[\text{sec}]$  で  $91\%$ , line3は  $0.479[\text{sec}]$  で  $75\%$  である。実験結果の各割合を100から減算すると指標での差の反応時間にほぼ一致する。

平均回転角度  $R$  は、  $R_{4\text{lines}} = 47.82[^\circ]$ ,  $R_{\text{line}1} = 69.67[^\circ]$ ,  $R_{\text{line}2} = 46.55[^\circ]$ ,  $R_{\text{line}3} = 33.34[^\circ]$  であった。回転操作数の平均  $C$  は、  $C_{4\text{lines}} = 12.35[\text{回}]$ ,  $C_{\text{line}1} = 6.8[\text{回}]$ ,  $C_{\text{line}2} = 11.867[\text{回}]$ ,  $C_{\text{line}3} = 24.067[\text{回}]$  であった。

以上までの各値を式(1)に代入する。したがって各刺激图形での1課題あたりのダイヤル操作時間  $T$  の予測値は、  $T_{4\text{lines}} = 8.959[\text{sec}]$ ,  $T_{\text{line}1} = 2.802[\text{sec}]$ ,  $T_{\text{line}2} = 7.447[\text{sec}]$ ,  $T_{\text{line}3} = 13.536[\text{sec}]$  となる。実験結果では平均で  $T_{4\text{lines}}$  が  $11.4[\text{sec}]$ ,  $T_{\text{line}1}$  が  $3.4[\text{sec}]$ ,  $T_{\text{line}2}$  が  $8.9[\text{sec}]$ ,  $T_{\text{line}3}$  が  $15.3[\text{sec}]$  であった。これは予測値に近い値である。

### (3) 実験 3

口述記録は実験2と同様な傾向である。表4に2つの主軸に注目した被験者の出現確率を示す。

表4. 主軸の出現確率（実験3：10blocks）

	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$
	Y→X 0.232	X→Y 0.240	X→Z 0.158	Z→Y 0.135	Y→Z 0.131	Z→X 0.106

式(3)より指標  $H$  は  $2.758$  である。ダイヤル選択時間は実験データから  $0.532[\text{sec}]$  であった。したがって指標単位あたりの時間  $I$  は  $0.193$  となる。図10上の回帰式は  $D_t = 0.005R - 3.64$  である。この式の相関係数は  $0.91$  である。実験結果から平均回転角度  $R = 55.5[^\circ]$ , 操作主軸数の平均  $C = 9.167[^\circ]$  であった。

以上までの各値を式(1)に代入する。したがって1課題あたりのダイヤル操作時間  $T$  の予測値は  $3.793[\text{sec}]$  となる。実験結果では平均  $4.1[\text{sec}]$  であった。予測値に極めて近い値である。

### (4) 予測値と実験値の比較

1課題あたりのダイヤル操作時間  $T$  は、実験データから求めた平均値（実験値）と式(1)で求めた予測値とではほぼ一致している。指標  $H$  は各実験で異なるが、指標あたりの単位時間  $I$  は  $0.193 \sim 0.263$  と近い値である。

一方、全ての実験で実験値は予測値を多少上回っている。実験1は回転操作の主軸が決められているため、ひとたびダイヤルを握るとQダイヤルの回転操作まで放すことはない。したがってQダイヤルまでの移動時間が実験値に含まれる。実験2および3は回転操作をする主軸分のダイヤルに手を移動しなければならない。これが実験値に含まれる。

#### 4-3. 回転速度の予測式

ダイヤル操作に注目すると3種類の実験で模索期、収束期、微調整期がある。実験1では模索期の後に収束期が続く。そして微調整後に終了宣言をする。実験2では、模索期の後に収束期が続く。その次が再び収束期である。この収束期は、あらかじめ被験者が想定した主軸の数だけある。そして微調整後に終了宣言をする。実験3も実験2と同様である。被験者は模索期で回転方向と角度を決定する。次の収束期と微調整期は決定した回転方向と角度を使って角度差をゼロにするため、回転のみの操作である。この操作を回転速度に注目して分析する。

回転速度は、模索期時点の刺激図形間の角度差からその角度差をゼロに近づけるために減衰する。したがって減衰振動と仮定してみる。すなわち  $x$  を回転操作にともなう目標図形と課題図形間の角度差 [°] (縦軸) とし、 $t$  を回転操作をする時間 [sec] (横軸)、 $A$  を収束期の初期状態 [°] とする。これより

$$x = A e^{-\lambda t} \cos(\omega t)$$

と表す。 $\lambda$  と  $\omega$  は収束期と微調整期の操作傾向で決まる定数とする。その操作傾向は実験データから4種類の型に分類できた。

##### (1) パターン

A型 :  $\lambda = 1.3$ ,  $\omega = 1.5$ , 残差平方和の平均 = 2.58  
はじめはそれほど高速ではなく、中速で回転し、次第に減速する。そして微調整期がなく、角度差ゼロに向かう(図11)。

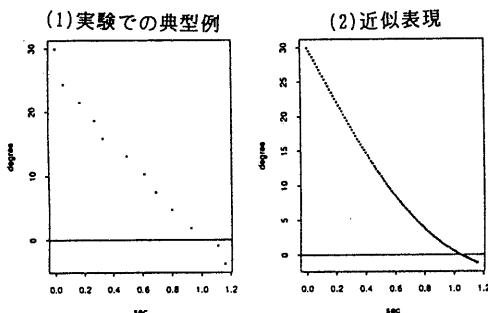


図1.1. A型の典型例と予測

B型 :  $\lambda = 1.8$ ,  $\omega = 5.2$ , 残差平方和の平均 = 14.4  
収束期の最初から最後まで高速にダイヤルを予測した角度差まで回転させる。次の微調整でも高速に回転させ、減衰運動をしながら角度差ゼロに向かう。この型も予測した回転角度を実際の角度差よりもおむねにする傾向がある(図12)。

C型 :  $\lambda = 1.6$ ,  $\omega = 3.5$ , 残差平方和の平均 = 16.1  
はじめ高速にダイヤルを回転させ徐々に速度を落とし、予測した回転角度に達した後にゆっくりと微調整

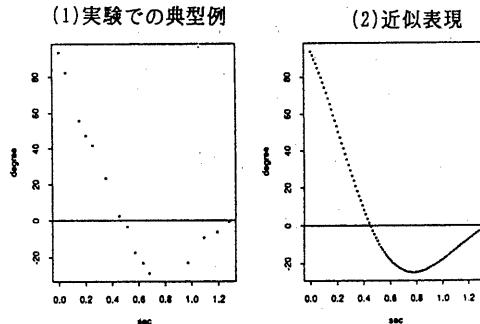


図1.2. B型の典型例と予測

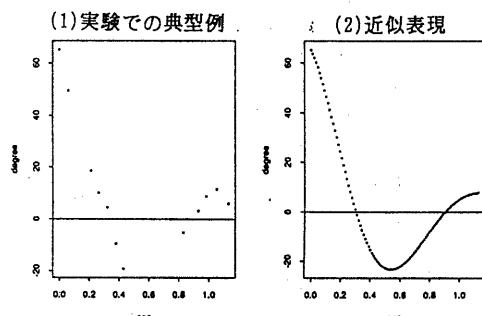


図1.3. C型の典型例と予測

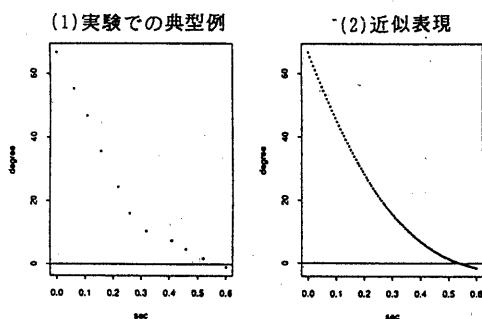


図1.4. D型の典型例と予測

期に入る。微調整期では一定速度で角度差を減少させる操作をする。この型は、予測した回転角度を実際の角度差よりもおむねにする傾向がある(図13)。

D型 :  $\lambda = 3.4$ ,  $\omega = 2.9$ , 残差平方和の平均 = 4.47  
高速に回転させ、多少減速しながら角度差ゼロに向かう(図14)。

##### (2) 検討

はじめにA型を使う被験者が多い。表示画面上の刺激図形の見え方との照合を密にしながら角度差ゼロに向かう。回転角度とその方向の予測値を確認できないため、常にダイヤル回転による刺激図形の変化を照合する必要がある。次に多いのがB型である。予測値の確認に関係なく、予測した値までダイヤルを回転する。その回転後に角度差ゼロにするための修正をする。こ

の修正の時点で刺激图形の見え方の照合を密にする。はじめA型を使った被験者は次にB型を使う傾向が多い。このB型の次がC型かD型である。C型はB型と似ているが修正時点で異なる。B型は修正時点で刺激图形との照合を密にするが、C型その照合をあまり密としない。修正時点での回転角度とその方向を予測する値の確信に関係なくダイヤルを回転する。D型は予測値が一致した場合の操作である。

### 5. おわりに

本論文は、2つの三次元图形の見え方を同じくするタスクにおいて、ダイヤルを使った3種類の実験から2種類の予測式を導出した。

#### (1) ダイヤル操作時間の予測式

$$T = C (I H + D_t)$$

$$H = \sum P_i (1/P_i + 1)$$

#### (2) ダイヤル操作の回転速度の予測式

$$x = A e^{-\lambda t} \cos(\omega t)$$

今後の課題として、さらに多くの実験をとおして各式を検証する必要がある。

### 謝辞

本研究の実験環境を整えてくれた山梨大学大学院生船戸康徳君、また実験およびデータ収集を行った鈴木千洋君（現在ダイキン工業）、佐田和也君、田中圭介君に感謝する。

### 参考文献

- [1] Shneiderman B.著、東基衛、井関治監訳：ユーザインタフェースの設計、日経マグロウヒル、1987.
- [2] Card, S., Moran, T. & Newell, A.: The psychology of human-computer interaction, L. E. A., (1983).
- [3] Fitts P.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, Journal of Experimental Psychology, Vol.47, No.6, pp381-391, (1954).
- [4] Fitts P. & Peterson J.: The information capacity of discrete motor responses, Journal of Experimental Psychology, Vol.67, No.2, pp.103-113, (1954).
- [5] Fitts P. & Radford B.: Information capacity of discrete motor responses under different cognitive sets, Journal of Experimental Psychology, Vol.71, No.4, pp.457-483, (1966).
- [6] Card S., English W & Burr B: Evaluation of mouse, rate-controlled isometric joystick, step keys, and text keys for text selection on a CRT, Ergonomics, Vol.21, pp601-613, (1978).
- [7] Wolford A.: Fundamentals of skill, Methuen, (1968).
- [8] Hyman R.: Stimulus information as a Determinant of reaction time, Journal of Experimental Psychology, Vol.45, pp188-196, (1953).
- [9] Hyman R.: Stimulus information as a determinant of reaction time, Journal of Experimental Psychology, Vol.45, pp188-196, (1953).
- [10] Shannon C.: A mathematical theory of communication, Bell System Technical Journal, Vol.27, pp379-423, 623-656, (1948).
- [11] Crossman E.: A theory of the acquisition of speed-skill, Ergonomics, Vol.2, pp153-166, (1959).