

回転操作による図形のマッチング実験

西田 広司 坂本 忠明 今宮 淳美
山梨大学 工学部 電子情報工学科

ユーザの「あるユーザインタフェースデバイスを用いてディスプレイ上の三次元図形に回転操作を施す」という相互作用におけるヒューマンファクタを分析するためのマッチング実験の方法、分析項目、分析結果について述べる。分析するヒューマンファクタは、主に、マッチング時間、マッチング過程、および三次元図形の特徴点である。そして、最終的に、これらのデータを統括したこの実験環境下におけるマッチングモデルを構築し、ユーザ側からのデバイスの評価、三次元図形の評価を行なった。

A MATCHING EXPERIMENT OF THE OBJECT WITH THE OPERATION OF ROTATING

Hiroshi Nishida Tadaaki Sakamoto Atsumi Imamiya

Department of Electrical Engineering and Computer Science,
Yamanashi University

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

This paper describes that the measures of the matching experiment to analyze human-factors for the interaction which is that users rotate the three dimensional objects on the display with an user-interface device, and some items and results of the analysis. Human-factors analyzed are mainly the process of matching, and feature points of the object. Finally, we construct the matching model integrated these data under this environment of the experiment, and evaluate the device and the threedimensional object from the view of the user.

1. 概要

これからのユーザインタフェースに要求される機能として、写実的な動きの再現、人間の触覚や力の感覚、および声や身ぶりによる操作などが考えられている。これらはより高度な直接操作による人間と計算機間の対話を可能にし、理解し易い形で情報をユーザに提示できると期待されている。そして、使いやすいユーザインタフェースを提供するためには、計算機や各種情報処理システムを利用するときのヒューマンファクタを分析することが最適なアプローチであることが知られている[1]。一方、図形処理システムの対話形式は「ユーザが、ある入力装置を用いて、システム上のある対話要素に操作を施す」である。しかし、この場面での相互作用におけるヒューマンファクタに関する研究は少ない[1][2]。

本研究では、システム上の対話要素として三次元図形、入力装置として回転ダイヤルを用い、回転操作に着目した相互作用におけるヒューマンファクタを分析する(図1)。この分析のための実験として、図形回転操作によるマッチング(一致)を行う。

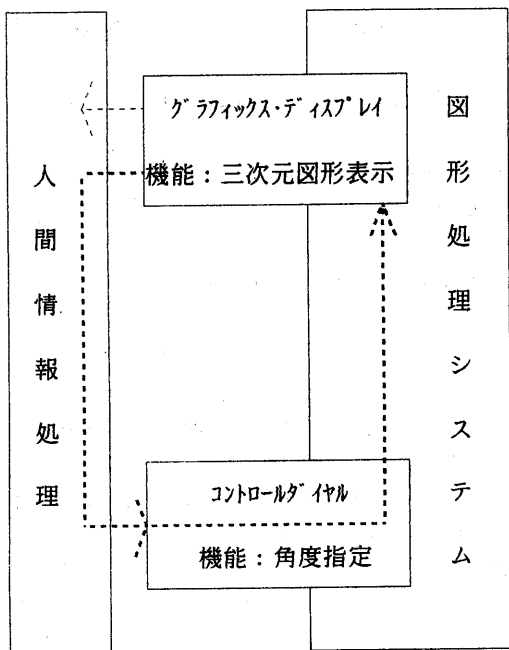


図1. 本研究での対話形式

2. 人間情報処理モデル[3]

認知心理学で得られた知見を「人間情報処理モデル(Model Human Processor)」としてCardらはまとめ、コンピュータ・ユーザの行動を分析・予測するにあたっての基本的モデルを提示している。

2.1 人間情報処理モデルの特徴

このモデルは、人間の情報処理過程が知覚系(Perceptual System)、認知系(Cognitive System)、運動系(Motor System)へと遷移し、それぞれにメモリとプロセッサが存在する。

知覚系は、知覚プロセッサ、メモリとして視覚、聴覚イメージ貯蔵庫から成り、この臨界時間を知覚プロセッサの周期時間(τ_p)と称してBlochの法則を適用する。この適用によると、知覚処理の周期時間(τ_p)は刺激の強度の逆関数になる。この典型的な値は、

$$\tau_p = 100 [50 \sim 200] \text{ msec}$$

と考えられている。

認知系は、認知プロセッサと作業記憶(または短期記憶)、それに長期記憶が含まれている。これは、知覚系から送られてきた情報を意味的に分析し、発展して問題解決や意志決定、学習などを行う。ここでの基本的な活動は、「認知プロセッサの再認-活性周期」の原理に従い、必要な情報を獲得するまで何周期も繰り返される。この1周期は、

$$\tau_c = 70 [25 \sim 170] \text{ msec}$$

である。

運動系は、メモリを持たず、運動プロセッサが目的とする動作を行う。この動作には、反応決定から遠心の神経を通して筋肉が活動し、実際にキーなどを押す反応で、常にフィードバックしながら繰り返す。この最小時間は

$$\tau_m = 70 [30 \sim 100] \text{ msec}$$

で、知覚フィードバックを用いた典型例の閉回路では

$$\tau_p + \tau_c + \tau_m = 240 \text{ msec}$$

となり、一般にはこれが複数繰り返される。

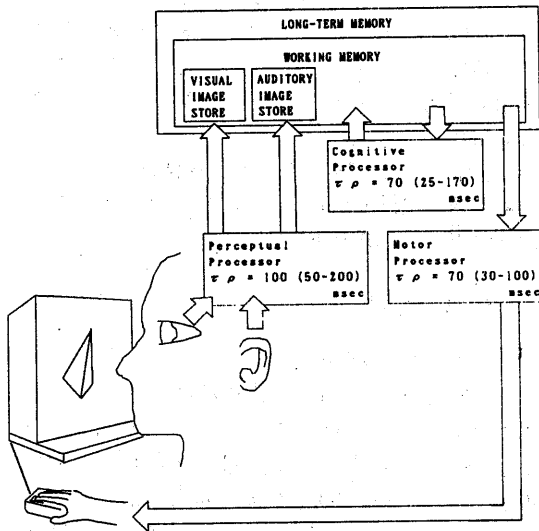


図2. 人間情報処理モデルの概要図

2.2 Fitts の法則

運動系を介して反応する場合、例えば D cm 離れたサイズ S cm のターゲットに手を移動する場合に要する時間 T_{POS} (sec) は、

$$T_{POS} = I_M \log_2 (D/S + 0.5)$$
 ただし、

$$I_M = -(\tau_P + \tau_C + \tau_M) / \log_2 \epsilon$$

$$= 100 [50 \sim 120] \text{ msec/bit}$$

で得られる。

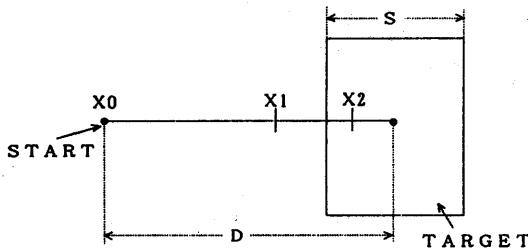


図3. Fitts の法則

3. 実験

3.1 概要

ディスプレイ上の三次元図形に回転角度を指示する場合一般にダイヤルを用いて対話を行う。ダイヤルによる操作は、単に運動系での操作だけでなく、ディスプレイ上にフィードバックされる図形を参照しながら操作を行う。このため知覚系、認知系への情報処理がともに行われる閉回路となる。

本実験では、ディスプレイ上の左右に三次元図形を提示し、左右の見え方が一致するようダイヤルを用いて回転させる。右側の図形は、ダイヤル操作用の図形で、ダイヤル1周が128ステップでフィードバックとして1ステップ 2.8125° リアルタイムに回転、表示する。左側の図形は課題である。

3.2 実験方法

①被験者

被験者は、知識的背景を均一にし有意な分析データを得る[4]ため、計算機科学専攻の4年生4名を選定した。

②提示図形

提示図形は、Shepard[5]らがメンタルローテーション実験で用いた1種類の10blocks図で、分析する上でのグループ化を行う。このグループ化には、特徴要素としての範囲を定める(図4)。

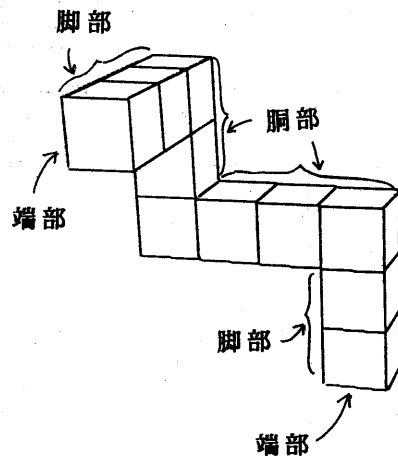


図4. 実験で使用する提示図形

③実験手続き

ディスプレイ上の左右に2つの図形を提示する。右側は被験者がダイヤルを使って回転させる図形、左側はマッチングの対象となる図形である。

2つの図形を表示し、被験者が回転操作を行う瞬間から実験開始となり、終了には、キットダイヤル(Q)を回す。これで1回の実験が終わり、右側の図形が消える。

ダイヤルは8つのダイヤルで構成されており、各ダイヤルを用いて回転、移動、消去の操作が可能になる。本実験では回転、消去の2つの操作を行うため、図5の太線のダイヤルを用いる。図形は右手座標系で定義しており、各軸のダイヤルを時計方向(正方向)に回すことで、右手座標系の定義にしたがい各軸に沿って図形が回転するよう構成してある。また、当実験システム内部にはダイヤルデータ(回転軸の種類、回転角度、その時の回転時間、開始から終了までの集計時間)が記録できるよう構成してある。

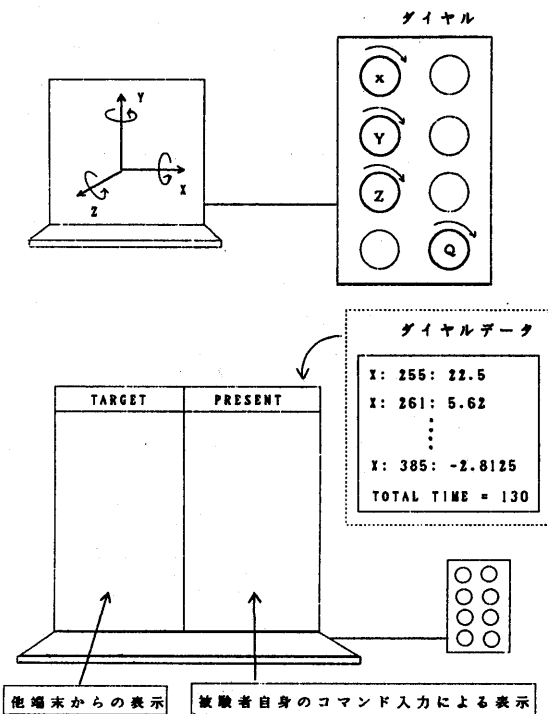


図5. 実験環境

本実験は1軸による回転操作マッチング(X, Y, Z軸のうちどれか)評価である。提示図形間の角度差は10°, 20°, 40°, 80°, 160°の5種類である。したがって、左右提示図形の左側の図形は、

$$3(\text{軸}) \times 5(\text{角度差}) = 15 \text{種類}$$

であるが、被験者にはこの中からランダムに10個抽出し、提示する。

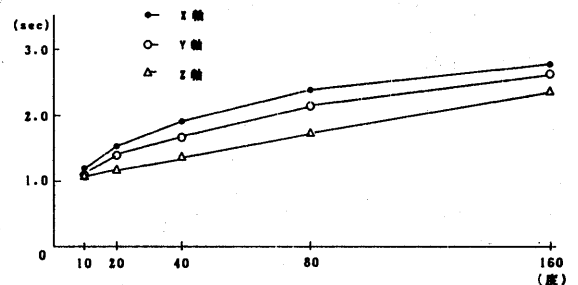
4. 結果と考察

4.1 マッチング時間

ダイヤルデータ内での操作時間を抽出し、各軸別(X, Y, Z軸)のマッチング時間を定量化した。この定量化には定量化式として、角度差とマッチング時間をもとに導出した。

はじめに角度差を横軸に、マッチング時間を縦軸の表に示すと(表1)、回転操作がX軸およびY軸の場合は両者の間にほぼ対数関係があることがわかる。ダイヤルを使って図形を回転するタスクと、あるターゲットに手を移動させるタスクとを同一視することにより、ダイヤル回転による図形のマッチング手続きも Fitts の法則が適用できる。一方、Z軸回転操作の場合は、線形増加と見れるため、両者はほぼ線形であることがわかるので直線回帰を行い、その相関係数を求める。

表1. 軸別のマッチング時間グラフ



① X軸およびY軸回転操作について

Fitts の法則でのDは手からターゲットまでの距離(cm), Sはターゲットのサイズ、つまり範囲(cm)となっている。一方本実験では、ダイヤルを用いて左右の図形の角度が一致(見え方が同じ)するよう回転させるため、回転操

作の操作距離は提示図形間の角度差D (degree : これを θ とおく) である。Sは一致と判定する範囲で、判定時の図形間の角度差 (degree) である。

・Sについて

本実験でのダイヤルの1周が128刻みであるため、たとえば角度差 10° であると3もしくは4刻み回転した時点が一致となる。角度に換算すると 8.4375° , 11.25° であり、実際の提示図形の角度に一致しない。このため、被験者はどこまで一致できるかを予備実験として行った。この予備実験は、ダイヤル1周を360刻みにし、1刻みが1度に対応するようになっている。被験者は、計算機科学専攻の3年生5名に対して行った(表2)。結果、平均が0.08で標準偏差が4.45となった。

以上より一致と判断する範囲を正方向(左側の図形の角度を越した場合)、負方向(左側の図形の角度に満たない場合)を加味するとほぼ $\pm 5^\circ$ となることから範囲Sが 10° となる。

表2. 左側の図形と右側の図形の差(単位は度)

被験者	X軸回転の場合 左右提示図形間の差				Y軸回転の場合 左右提示図形間の差			
	10	20	40	80	10	20	40	80
S1	5 4	4 4	5 2	6 3	5	8	3	7
S2	-2	0	7	-14	-2	0	-1	-1
S3	3 3	2 5	6 9	7 2	3	4	6	-5
S4	-5	0	-6	-3	-5	1	-3	-2
S5	2 3	0 -2	-8 -4	9 2	-1	-2	4	5

・ユーザ行動の予測式

ダイヤルデータから被験者が実際にダイヤルを操作する時間と、操作していない時間があつた。操作していない時間の平均をX、Y軸回転についてとると共に0.7 secである。この時

間をマッチングに要した時間から引き、先のDとSの値を考慮して回帰分析した後、この回帰式に含めるとX軸回転においては、

$$T_x = 0.882 + 0.498 \log_2(\theta/10 + 0.5) \dots (1)$$

となる。Y軸回転においては、

$$T_y = 0.802 + 0.441 \log_2(\theta/10 + 0.5) \dots (2)$$

となる。

② Z軸回転操作について

ダイヤルデータから被験者が実際にダイヤルを操作する時間と、操作していない時間があつた。操作していない時間の平均は0.6 secである。この時間をマッチング時間から引き、ユーザ行動の予測式として提示図形間の角度差とマッチング時間で回帰分析すると

$$T_z = 0.784 + 0.01 \theta \dots (3)$$

となり、相関係数0.798となる。

4.2 視線データ

本実験は被験者に視線追跡装置を装着して実施することにより図形の見方を分析した(視線データ)。ここで提示する視線データは、X軸とZ軸に関するデータで、ともに角度差 160° である。

① X軸およびY軸回転操作について

見方は、上端部同士を交互に参照しながら回転する(注視点(a)(b))。このとき上端部が見えなくもしくは見えづらくなった時点で視線は下端部に移り、上端部参照と同様に交互に参照する(図6)。

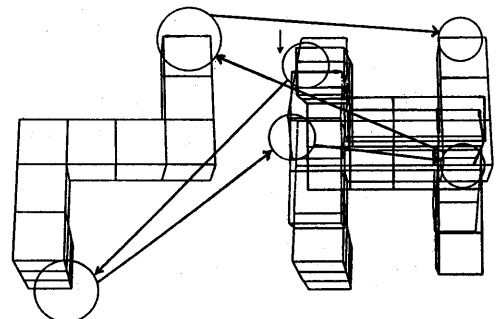


図6. X軸についての視線データ

この視線データより、回帰式(1)、(2)式を評価する。この式での切片は、操作していない時間と実験誤差である。操作していない時間は、Fittsの意味付け方法から「マッチング戦略：回転方向と回転速度および角度の推定）を行っている時間」と考えられる。傾きについては閉回路であるため、 τ_P と τ_C 、 τ_M の和で示される。 τ_P は知覚系で、たとえば角度差 10° の場合一方の図形を見て、もう一方の図形の端部を見る点から $2\tau_P(n)$ 、 $\tau_C(n)$ は認知系で知覚系 $2\tau_P(n)$ から必要な情報を獲得し、 $\tau_M(n)$ で実際の回転操作を行う。このフィードバックが次の $\tau_P(n+1)$ となる。この1サイクルは、

$$2(\tau_P + \tau_C) + \tau_M$$

である。実際に上式はこのサイクル数が 10° 、 20° 、 40° 、 80° 、 160° と角度差が増すにしたがって増加し、 τ_P も増加している(表3)。

表3. 角度差、 τ_P 、サイクル数

角度差	τ_P の回数平均	サイクル数の平均
10度	2.2回	2.1回
20度	4.1回	3.0回
40度	4.5回	3.9回
80度	4.9回	4.1回
160度	5.0回	5.2回

τ_P 、サイクル数各々を回帰分析すると、サイクル数は $\ln\theta$ 、 τ_P は $1.18\ln\theta$ で近似できる。以上より

$$\{1.18\ln\theta(\tau_P + \tau_C) + \tau_M\} \ln\theta$$

となる。これはFittsの法則の I_M に対応し、X軸回転操作の場合(1)式の0.498が値となる。Y軸回転操作については(2)式の0.441が値となる。

② Z軸回転操作について

この視線データは終始両図形の端部を見ている(図7)。

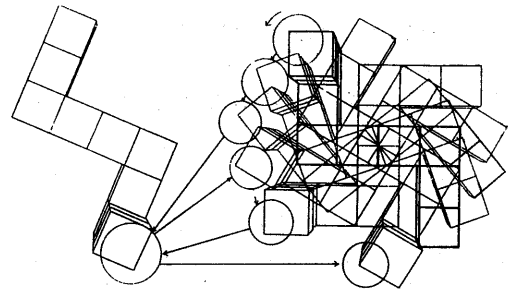


図7. Z軸についての視線データ

4.3 マッチング過程

認知系、運動系の2側面から分析するには、ダイヤルデータ内の回転角度と時間を用いる。また知覚系の分析には視線データで分析する。以上の知覚系、認知系、運動系を総合した閉回路でのマッチングモデルを提案する。このマッチングモデルは、3つの処理系(知覚系、認知系、運動系)間を矢印により処理が遷移していく様子を示したものである。各処理系の内容は何を行うかのタスクとして規定する。まず最初のサイクルとして知覚系から起動し、認知系の「推定」で2図形間の角度差の推定思考を行い、運動系の「回転」が動作する。この動作中知覚系を通して(「監視」)認知系は推定した値に一致するか「評価」を行う(並行処理)。一致した時点において運動系に停止命令(図8での点線)を与え、次のサイクルに移る。このステップは知覚系から2図形間の角度差を推定する「ヒント」を得、認知系は回転し過ぎもしくは足りないかの「補正」思考を行い、運動系の「回転」が動作する。このサイクルが数回行われ、最終サイクルとして「決定」思考が認知系で行われる(図8)。

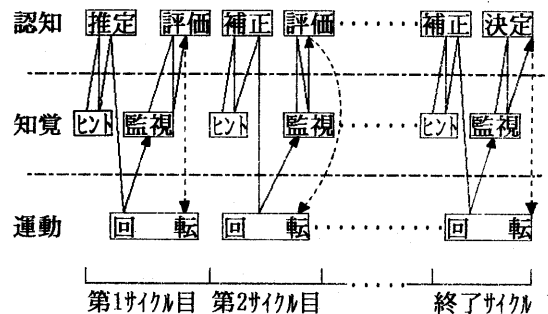


図8. マッチングモデル

5. おわりに

本研究は、入力装置としてダイヤルのみを許した2つの提示図形間のマッチング実験をX, Y, Z軸回転の3種について行った。その結果、マッチング時間として、X, Y軸回転にはFittsの法則に沿う結果が求められた。Z軸回転においては線形関数として求められた。また視線データから提示図形に対する見ている対象、順序についても求められた。さらにCardらの人間情報処理モデルに一致するマッチング過程が求められ、認知系、知覚系、運動系をいかに情報が流れるかをも集約できた。しかし、これら求められた式、知見が他の実験課題（たとえば提示図形が異なった場合）に適用できるかは評価していない。より一般性の検証はこれからの課題である。

参考文献

- [1] Foley J. D.: Interfaces for Advanced Computing, Scientific American, Vol.257, No.4, 1987.
- [2] Schneiderman B.著, 東基衛, 井関治 監訳: ユーザインタフェースの設計, 日経マグローヒル, 1987.
- [3] Card S. K., Moran T. P., Newell A.: The Psychology of Human-Computer Interaction, L. E. A. Inc., 1983, pp.23-44.
- [4] Girgus J. S.: A Developmental study of the effect of eye movements on the processing of shape information, Journal of Experimental Child Psychology, Vol.22, 1976, pp.386-399.
- [5] Shepard R. N., Cooper L. A.: Mental Images and their Transformations, The MIT PRESS, 1986.