

## 三次元図形同異判定過程への描画法の影響

坂本忠明 今宮淳美

山梨大学 電子情報工学科

本論文では対話型3次元図形処理システムのユーザモデルを調べるために、回転に注目し、心的回転に関するユーザの処理過程と応答時間について述べる。最初従来の心的回転で求めている研究課題を挙げ、それを解決するための実験を述べる。その実験より描画方法の違いで、以下の結果を得た。

- (1) 写実レベルが高いと心的回転における図形間の角度差の影響が少なく、回転以外の時間が多くなる。
- (2) 心的回転は初期過程から特徴比較過程へと移り、図形の注目点が各々で異なる。
- (3) 10ブロックとパイプでの応答時間は異なり、それは特徴比較過程を複数行うことに起因する。
- (4) 異判定と同判定について、実際に回転する時間は同じで、それ以外の時間が同判定の方が多い。
- (5) 心的回転のプロセスは、アナログ処理と命題処理の混合である。

### THE EFFECT OF GRAPHICAL REPRESENTATIONS ON THE PROCESS AND PERFORMANCE IN MENTAL ROTATION TASKS

Tadaaki Sakamoto Atsumi Imamiya

Department of Electrical Engineering and Computer Science, Yamanashi University

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

This paper presents an analysis of human's process and performance in the experiments of a mental rotation task using eye-movement analyzer (or eye tracker). The question is that "how much the reality of images with which user could interact is enough in the interactive graphics?". As the result of analyzing the experiments, we provide basic data for the effects of graphics realism cues on the process and performance of mental rotation.

## 1. はじめに

対話型3次元図形システムのユーザは、基本対話タスクを組み合わせる必要がある。たとえば、3次元図形対話の重要な操作である回転タスクにおいては、回転対象オブジェクトの選択タスク、回転中心の位置決めタスク、および実際の回転タスクがある。本論文では、対話型3次元図形システムのユーザモデルを調べるための一連の実験の第一報として、心的回転に関するユーザの処理過程と応答時間について述べる。

心的回転の実験は、画像の表象がアナログ的であるとする古典的な研究である<sup>1)</sup>。同一の3次元オブジェクト対を各々異なる方向から見て表現した図形対、または似ている異なるオブジェクト対を表現した図形対をディスプレイ上左右に提示する。それら2図形が同じ図形であるかどうかを被験者に判定させる。図形は10個の立方体ブロックからなるオブジェクト(10ブロックス<sup>1)</sup>、<sup>2)</sup>、<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup>、<sup>6)</sup>)、と円管を組み合わせた3次元オブジェクト(パイプとよぶ)の2種類である<sup>7)</sup>、<sup>8)</sup>。

古典的な心的回転実験では、線画での10ブロックスを用いて、結果として図形間の角度差と応答時間が線形、または一定の関係であった。それは被験者が図形をどう捉えるかに起因し、たとえば積み木を想定すると、角度差と応答時間の間に線形の関係がある。一方、被験者が廊下歩きの場面を想定すると応答時間は一定である<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup>、<sup>6)</sup>。

パイプの研究は、3次元図形処理での描画方法の違いで、正答率と応答時間を分析している<sup>7)</sup>、<sup>8)</sup>。その結果、正答率の高い図形対は、角度差と応答時間で線形の関係がある。さらに、応答時間と図形対間の角度差の関係について、図形の描画方法の影響が示された。ここで、描画方法には隠陵(隠線)処理、シェーディング(色塗り)処理である。

これら従来の心的回転の研究から筆者らは以下の課題が残されていることを見つけた。

課題1：心的回転の研究を行う上での考慮点

本研究での実験が従来の心的回転の研究と同じ実験環境であるかを評価する。

課題2：描画方法の違いに関する判定過程と応答時間

3次元図形の描画方法の違いが心的回転の判定過程および応答時間にどう影響するかを10ブロックスとパイプの各描画方法について比較、分析する。すなわち被験者が図形のどこに注視するかをアイカメラ(視線追跡装置)で記録して、その視線データ列から心的回転の判定過程を明らかにする。

課題3：同判定と異判定の違い

従来の実験で同判定と異判定を一緒に扱っているが、本研究でこれを別々に分析してみる。

課題4：処理過程を求める

心的回転の処理過程を明らかにする。

## 2. 実験

描画方法は線画の隠陵処理の有無、面画でフラットシェーディングとスムーズシェーディング(Gourand技法)の4種類がある。3次元図形の描画方法の違いを、アイカメラと被験者観察用のカメラを用いて記録する。被験者に「できるだけ早く図形対が同じか異なるか」を応答させる。

[実験1] - 10ブロックス

被験者は情報コースの4年生3名と大学院生2名の計5名である(いずれも男子)。10ブロックス対を同じ図形対と、異なる図形対を作る(図1)。各対で図形間に30°から60°の範囲で10°ごとの角度差をつける。練習用に12、実験用に36種類の図形描画を作成する。

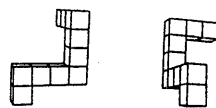


図1. 10ブロック

[実験2] - パイプ

被験者は情報コースの3年生、20名(男子)である。4種類の3次元図形描画方法各々に5名ずつ当てる。パイプ図形(図2)で同じ図形対と、異なる図形対を作り、実験1と同様な角度差をつける。練習用は20、実験用に16種類を作る。



図2. パイプ

### 3. 分析

アイカメラで記録した被験者の注視点を領域に分割し、領域間の移動をスキャンパスとして求めた<sup>9)</sup>。またその領域内の注視時間の合計を求めた。領域は図形の特徴要素である(図3, 4)。

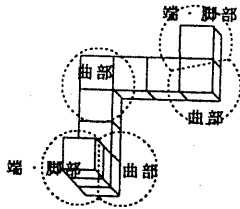


図3. 実験1の刺激図形の特徴部

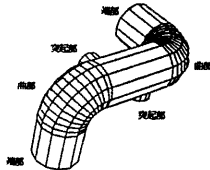


図4. 実験2の刺激図形の特徴部

各実験結果から、判定過程のための被験者の視線の動きには、交互参照と構造参照および交互参照と構造参照の折衷型があることがわかった。

#### ・交互参照

交互参照は、図形対の対応する特徴領域を左右交互に見る。この参照過程は、練習フェーズで実験1, 2に共通にある。たとえば実験1では、一方の図形の曲部を見ると次にもう一方の図形の曲部を見る。実験2では、一方の図形の突起部を見ると次にもう一方の図形の突起部を見る。

特徴領域を見る時間、および同異判定までの時間は全被験者で異なる。本実験前の練習数の増加により、すべての描画方法で、同じ特徴領域を交互に参照しあう回数(重複数)が減る。また隠蔽処理なし図形以外で、この交互参照を使う回数が減り、実験用の課題ではすべて構造参照となる。

#### ・構造参照

構造参照は、図形の構造の全体を把握し、次に特徴をその構造内に合成することで同異を判定する。

#### ・交互参照と構造参照の折衷型

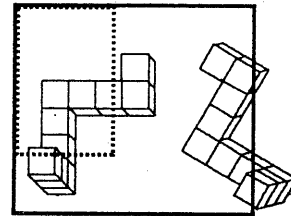
交互参照を行った後に構造参照を行う、またはその

逆もある。この参照は本実験前の練習フェーズにあり、交互参照から構造参照に移る過渡期に発生している。

#### 3-1. 実験1

##### ・初期過程(図5)

はじめに左側の図形の上から左中央の範囲内で視線が一時止まる。



□ 練習時の範囲  
 □ 実験時の範囲

図5. 実験1の初期過程

##### ・特徴比較過程(図6)

初期過程の次にどちらか一方の図形に注目し、曲部を交互に見る(特徴把握)。そして端・脚部を見、もう一方の図形の対応する端・脚部を見る(角度推定)。さらに曲部を交互に見る(特徴照合)。

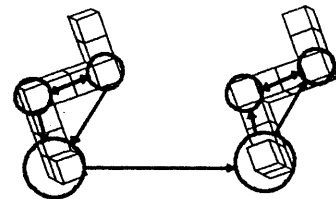
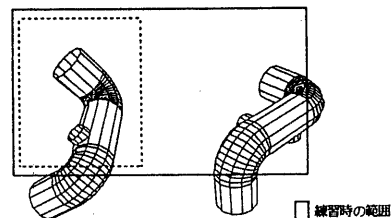


図6. 実験1での特徴比較過程

#### 3-2. 実験2

##### ・初期過程(図7)

実験1と同様に、左側の図形の上から左中央の範囲で視線が一時止まる。



□ 練習時の範囲  
 □ 実験時の範囲

図7. 実験2の初期過程

・特徴比較過程 (図8)

どちらか一方の図形に注目して突起部を交互に見る (特徴把握)。次に端部か曲部を見、もう一方の図形の対応する端部か曲部を見る (角度推定)。そして突起部を交互に見る (特徴照合)。

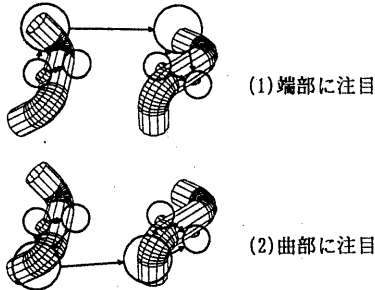


図8. 実験2での特徴比較過程

3-3. 構造参照の過程

・初期過程

刺激図形提示後最初に視線が止まる初期過程は、実験1, 2の本実験前の練習フェーズの最初の方で、左右の図形に広く点化するが、練習数が進んで左側の図形に集中する。実験フェーズでは左側の上方から中央付近になる。その初期過程の時間は、描画方法および図形間の角度差に影響せず、1/4secで一定である (表1)。

表1. 初期過程の時間

実験1: 107名			実験2: パイプ		
標準偏差	平均値	表現方法	平均値	標準偏差	
5.51	19.18	隠陵処理なし	16.77	3.61	
4.30	12.33	隠陵処理	13.26	2.45	
2.64	15.09	フラットシェーディング	14.01	3.32	
2.95	16.80	スムーズシェーディング	16.32	2.29	

以上の平均 = 15.47      単位: 1/60sec

・特徴比較過程

隠陵処理なしの図形に対しては、初期過程があるが、特徴比較過程はない。また隠陵処理なし以外の描画方法で共通して、特徴比較過程を数回繰り返した後非同異を判定する。実験1の10ブロックで平均1.34回、実験2のパイプで平均2.78回である。さらに特徴比較過程は、図形間の角度差と応答時間間に線形関係がある (図9, 10, 11)。この線形な関係は、練習フェーズで相関値が低く、実験フェーズで高くなる。

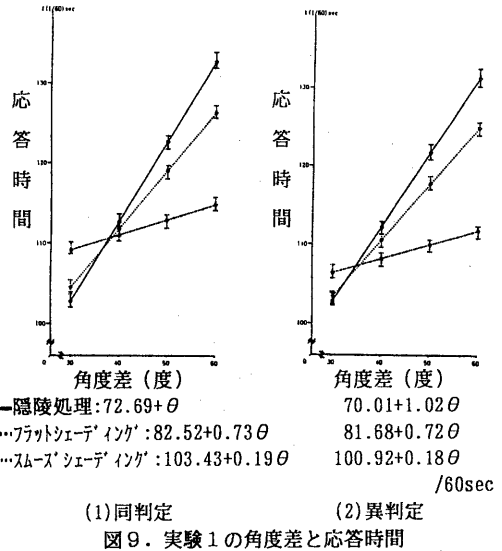


図9. 実験1の角度差と応答時間

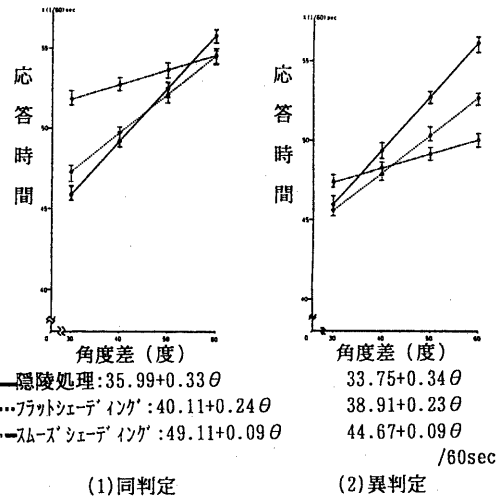


図10. 実験2の角度差と応答時間 (図8(1)の場合)

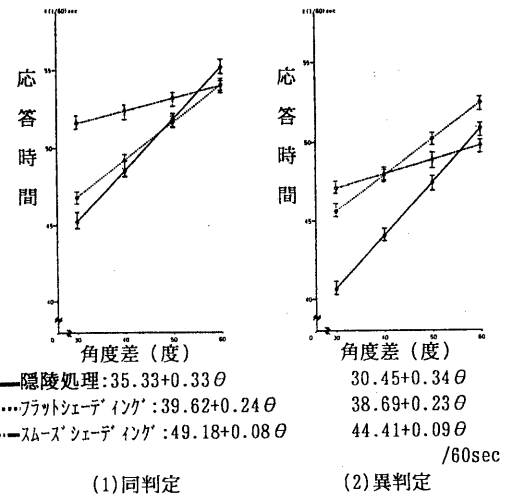


図11. 実験2の角度差と応答時間 (図8(2)の場合)

#### 4. 検討・結論

実験分析結果より次のように被験者の処理過程をまとめることができる。

##### ・練習効果：

最初は刺激図形をどのように把握すべきかがわからず、練習で的を絞っている。練習効果は図形を適切に把握する法則性を見つけることにある<sup>10)</sup>。はじめに交互参照で、図形を部分的に照合する。次に構造参照とあわせて図形構造を把握して図形全体を把握しようとする。この練習が進ことで図形全体構造を把握する。これらの効果は実験1、2の全被験者に共通である。

##### ・交互参照：

図形対の各部分の特徴を交互に調べて同異判定をする。

##### ・特徴参照：

初期過程で図形対を見ることで両図形の空間の位置と方向（空間定位）を把握する。その時間は実験より1/4secである。次に、回転基準とする図形を決める。そして特徴抽出をして、図形の概観に特徴を加え（特徴把握）、2図形間の特徴部分を比較して角度差を推定する（角度推定）。この角度差にもとづいて基準図形について心的回転をする。回転後の図形と刺激図形の特徴を照合（特徴照合）して同異判定をする。

第1章で示した課題の検討について以下に述べる。

##### ・課題1：実験環境

まず第1に、従来の研究の実験と本実験の違いは、実験環境にある。従来の研究での実験は、スライドを用いて図形対を提示している。本実験ではグラフィックスディスプレイを用いる。これにより被験者に与える図形対の大きさが異なるのでこの影響の有無を調べる必要があった。

図形対については、実験1で隠陵処理の場合が従来のShepardらの研究と共通している。従来の研究での応答時間Tは、

$$T = 71.52 + 1.03 \theta \quad [ / 60 \text{ sec} ]$$

である<sup>3)</sup>。実験1の隠陵処理の同判定についての応答時間Tは、

$$T = 72.69 + \theta \quad [ / 60 \text{ sec} ]$$

異判定について

$$T = 70.01 + 1.02 \theta \quad [ / 60 \text{ sec} ]$$

である。このことより本実験での図形対の大きさの影響はないといえる。

##### ・課題2：描画方法の違い

描画方法として4種類を実験した。

図形の写実レベルは高い方からスムーズシェーディング、フラットシェーディング、隠陵処理である。写実レベルが高いとは、描画としてグラフィックス属性が多いことを意味する<sup>7)</sup>・<sup>8)</sup>。写実レベルが高いと各回転式の傾きは小さく、逆に切片は大きくなる。したがって写実レベルが高いほど図形間の角度差の影響が小さく、心的回転に要する時間は少ない。一方心的回転以外の時間が多くなる。

##### ・注目する図形的位置

初期過程で図形構造を得る。その構造は実験1では各ブロックのつながり、実験2で突起部以外のパイプの骨組みである。次の特徴比較過程で最初に特徴を把握して特徴部の位相的な関係に特徴を付け加える。したがって被験者は、はじめに左右の図形の左上方を見ることで図形全体の構造を把握する。構造は特徴部の位相的關係である。

特徴比較過程では、初期過程で決めたとどちらか一方の図形に注目する。その注目図形の特徴を見て図形のイメージを捉える。その特徴部は実験1で曲部、実験2で突起部である。次に角度差を推定しやすい特徴部を見てもう一方の図形の対応する特徴部を見る。回転の角度推定は、実験1で端・脚部、実験2で曲部か端部である。注目した図形にここで求めた角度で心的回転をする。この図形のイメージともう一方の図形の特徴を重ね合わせ、同異判定をする。判定に十分な情報がない場合、角度推定の特徴部を変えて再度特徴比較過程を行う。

##### ・応答時間の差

従来の研究で10ブロックとパイプで応答時間に差がある。

角度推定を行う場合、実験1では端・脚部の1種類であり、実験2では端部と曲部の2種類である。実験2はこの2種類を複数使って同異判定をする。このことにより正確な判断ができる。これが応答時間の差の原因である。

課題3：同と異判定の違い

従来の研究では、同と異判定を一緒にまとめて回帰分析するのみで二判定間の差を求めていない。一方、本研究において、二つの応答時間について回帰式の切片が異なる結果を得た。傾きはほぼ一致である。心的回転がどちらか一方の図形に注目して発生する。回転時に同異判定をする処理過程は必要ない。したがって回転以外に同異判定の時間を加えた応答時間となる。同判定の場合、すべての特徴と構造が一致する必要がある。このため、被験者は特徴部を詳しく参照することになる。一方、異判定の場合、特徴部のどれかひとつが異なる判定ができればよい。その他の特徴部をそれほど詳しく参照する必要がない。したがって、応答に必要な時間は同判定より短い。これにより判定の回帰式の切片は小さい。

課題4：心的回転の処理過程

心的回転の処理過程は、最初初期過程で図形構造を把握する処理がある。把握後どちらの図形に注目するかを決定し、特徴比較過程に移る。特徴比較過程では特徴把握により注目した図形をイメージとして捉え、その後で心的回転の回転角度を推定する。この推定で心的回転をする。そしてもう一方の図形の特徴部とを照合することで同異判定をする。判定が不可能な場合は、再度特徴比較過程を行う。

このことより心的回転は、アナログと命題処理の混合である<sup>11)</sup>。短期記憶内に図形概念を一定期間(1/4sec)取り込み、そこに特徴部を付け加えることで注目した図形を構造化する。特徴部を付け加える時間は描画方法ごとに一定である(表2)。この構造化した図形を長期記憶の表象系に送り、同時に角度推定をするための図形の特徴部を見る。この時間も描画方法ごとに一定である(表3)。長期記憶の表象系に送った図形に対して、角度推定で求めた角度で回転の処理をする。回転後特徴部を参照することで同異判定をする。回転は図形間の角度差と応答時間で線形であるためアナログ処理である。一方、回転以外は一定の時間であるので、命題処理である。最初は、図形概念の取り込み、次に特徴の付け加え、そして角度推定をする。この推定後、アナログ処理としての回転、その後命題処理としての図形の同異判定をする。

表2. 特徴把握の時間

実験1: 10° offset (曲部を見る)				図形間の角度差	表現方法	実験2: 0° offset (突起部を見る)			
異判定		同判定				同判定		異判定	
平均時間 1/60sec	平均参照回数	平均時間 1/60sec	平均参照回数	平均時間 1/60sec	平均参照回数	平均時間 1/60sec	平均参照回数		
30.07		32.98		30°	30°	10.87	10.25		
33.97	1.58	30.95	1.50	40°	40°	10.25	11.10		
28.70		31.02		50°	50°	11.77	9.93		
28.88		29.51		60°	60°	10.21	9.05		
39.53	1.37	37.39	1.30	30°	30°	12.36	12.75		
26.67		41.49		40°	40°	14.98	12.14		
33.53		34.00		50°	50°	12.59	11.25		
32.68		37.92		60°	60°	14.10	11.75		
40.51	1.44	35.23	1.25	30°	30°	18.13	16.20		
40.72		32.48		40°	40°	15.54	16.97		
42.38		35.02		50°	50°	16.01	13.67		
35.42		34.24		60°	60°	14.32	18.09		

表3. 角度推定の時間

実験1: 10° offset (曲部を見る)				図形間の角度差	表現方法	実験2: 0° offset (曲部を見る)			
異判定		同判定				同判定		異判定	
平均時間 1/60sec	特徴比較の平均回数	平均時間 1/60sec	特徴比較の平均回数	平均時間 1/60sec	特徴比較の平均回数	平均時間 1/60sec	特徴比較の平均回数		
30.16		33.45		30°	30°	23.24	21.67		
29.90	1.43	30.88	1.35	40°	40°	25.73	22.12		
31.00		35.52		50°	50°	22.33	24.30		
33.77		34.61		60°	60°	23.51	20.95		
44.28	1.34	43.49	1.15	30°	30°	27.29	28.02		
42.54		45.25		40°	40°	29.46	29.28		
44.09		39.41		50°	50°	28.17	26.91		
43.55		40.21		60°	60°	27.53	26.33		
54.41	1.62	56.78	1.29	30°	30°	34.92	29.87		
53.90		59.73		40°	40°	34.95	27.52		
59.84		55.11		50°	50°	35.08	33.25		
57.91		56.49		60°	60°	35.29	29.29		

本論文では、3次元図形処理の4種類の描画方法を分析し、次の結果を得た。

- (1) 写実レベルが高いと心的回転における図形間の角度差の影響が少なく、逆に心的回転以外の時間が多くなる。
- (2) 図形の注目点は、初期過程と特徴比較過程で異なる。初期過程では図形の構造、特徴比較過程で最初特徴部、角度推定のための特徴部、同異判定のための特徴部である。
- (3) 10ブロックとパイプでの応答時間の差は、角度推定をする特徴部の数の違いにあり、これにより特徴比較過程を複数行うことで差がでる。
- (4) 同判定と異判定の違いについて、異判定でどれか一つが異なる判定ができれば他の特徴をそれほど詳しく捉えず、同判定より短い時間となる。
- (5) 心的回転の処理過程はアナログと命題処理の混合である。

今後の課題として、3次元図形の描画方法に影響する照明や背景、質問処理などが心的回転にどう影響するかを調べることがある。

### 謝辞

本研究を行う上で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西田広司君, さらに分析にあたり, 渋谷昌三山梨医科大学助教授, 三浦利章大阪大学助教授, 星薫放送大学助教授, 太田裕彦放送大学助教授に多くの示唆を受けた。ここに感謝する。

### 参考文献

- 1) Shepard R. N. & Metzler J.: Mental rotation of three-dimensional object, *Science*, 171, pp.701-703 (1971).
- 2) Both K. S., Bryden M. P., Cowan W. B., Morgan M. F. & Plante B. L.: On the parameters human visual performance - An investigation of the benefits of antialiasing, *Computer Human Interaction and Graphics Interface Proc.*, pp.13-19 (1987).
- 3) Shepard R. N. & Cooper L. A.: Mental images and their transformations, MIT Press, Cambridge, MA (1982).
- 4) 高野陽太郎: 傾いた図形の謎, 東京大学出版会 (1987).
- 5) Sayeki Y.: 'Body analogy' and the cognition of rotated figures, *The Quarterly Newsletter of the Laboratory of Comparative Human Cognition*, 3, pp.36-40 (1981).
- 6) Marr D.: *Vision-A computational investigation into the human representation and processing of visual information*, Freeman and Company, New York (1982).
- 7) Sandford J., Barfield W. & Foley J.: Empirical studies of interactive computer graphics - Perceptual and cognitive issues, *Proc. Human Factors Society, 31st Annual Meeting*, pp.519-523, (1987).
- 8) Barfield W., Sandford J. & Foley J.: The mental rotation and perceived realism of computer-generated three-dimensional images, *Int. J. Man-Machine Studies*, 29, pp.669-684 (1988).
- 9) Haber R., N. & Hersheson M.: *The psychology of visual perception*, New York: Holt, Rinehart & Winston (1973).
- 10) Crossman E.: A theory of the acquisition of speed-skill, *Ergonomics*, Vol.2, pp.153-166, (1959).
- 11) Kosslyn S. M., Ball T. M. & Reiser B. J.: Visual images preserve metric spatial information - Evidence from studies of image scanning, *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, Vol.4, pp.47-60 (1978).