The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	視覚における回転図形の認知機構
Author(s)	乾, 敏郎; 鈴木, 良次
Citation	大阪大学人間科学部紀要. 1977, 3, p. 207-231
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/11227
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

視覚における回転図形の認知機構

乾　　敏　郎
鈴　木　良　次

視覚における回転図形の認知機構

はじめに

人間のパターン認識における情報処理過程については，生理学あるいは心理学などの分野で既に数多くの研究がなされてきたにもかかわらず，いまだ未知のままで残されている問題も多い。形の恒常性を保つ機構についてもほとんどわかっていない。形の恒常性とは，網膜に映ずる像の変換にかかわらず，形の知覚が一定に保たれる事を言う。その中で基礎となる図形の変換は，平行移動・回転及び拡大縮小である。本論文では，回転変換をいかにして修正し，形の知覚が一定に保たれるのかという問題について，心理学実験を通して考える。

回転された文字の読み取りについては，既に Stanford 大学の R. N. Shepard らの研究がある。(Shepard & Metzler, 1971 ; Cooper & Shepard, 1973 ; Cooper, 1975) 彼らは，2つの3次元物体の平面投影図を同時に被験者に提示し，それらの一方を空間的に回転した時に他方に一致するか，あるいは鏡像関係にあるのかを問う実験を行なった。(1971) その結果，反応時間が回転角と線形の関係にある事を見い出し，この2つの図形が合致するか否かの判断は，図形の特徴を言語化して行なうのではなく，むしろ思考の中で図形を回転していると考え，この過程を "Mental Rotation" (思考回転) と名づけた。さらに種々に回転された文字 (1973) やランダムパターン (1975) を単独提示し，表向きか裏向きかを判断させる実験を行ない，この場合もほぼ同様の結論を得た。

我々はまず，第1部で文字について追実験を行ない，さらに〝思考回転〟の考えを確めるための実験を行なった。(第1部実験1，2) ついで，〝思考回転〟の詳細を調べるため，パターンの複雑さと，回転修正の速さとの関係を吟味した。(第1部実験3)

ところで，近年多数の研究者によって，パターンを短時間提示する方法が利用され，視覚系の情報処理の機構が明らかにされてきた。その結果，視覚系の短期記憶が2つに分離される事がわかった。一つは未だ意識にのぼらない (pre-perceptual) 段階であり，ごく短時間に減衰してしまう記憶系である。これは，Visual Information Storage (VIS) と呼ばれ，持続時間はほぼ270msec と言われている。(Averbach et. al., 1960 ; Sperling, 1960)

もう一つは，VIS からの情報が処理され意識にのぼった (post-perceptnal) 段階で，VIS と比べてかなり長い期間記憶が保持される系である。これは一般に，Short-term Memory (STM) と呼ばれている。これらの研究は文字列を短期間提示したときの，被験者の正読数

を求める方法によって行なわれた。

もし，パターンを構成する文字が何らかの変換をうけていたなら，この影響が被験者の正読数に現われてくると思われる。そこで，第2部では，まず回転変換をうけた文字列を短時間提示し，被験者の正読数を求めるという方法を用いて，回転角と正読数の関係を調べた。（第2部実験1）続いて，回転された文字列を読みとるのに要する時間を調べ（第2部実験2）最後に，これらのデータに基づき，回転して提示される文字の情報処理モデルを提案した。

第1部　回転図形の認知過程

I　実験1

Cooper, L.A. と Shepard, R.N. (1973) が行なった実験の追試である。いろいろの角度に回転されて提示される文字の表裏の判断に要する時間の測定を行ない，回転角度との関係を調べる。

I－1　方法

装置　図1－1にシステムの概要を示す。テストパターンは，被験者の前方 1.7mの位置におかれた透過型スクリーンに提示される。被験者は，直径3㎜のピンホールを通して観測

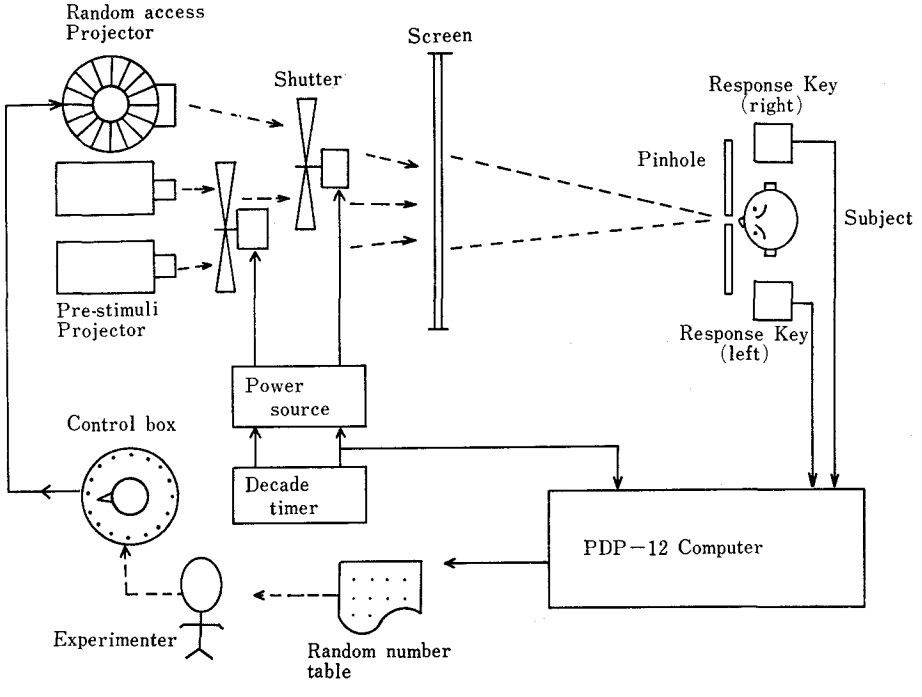


図1—1　本実験で使用された実験システムの概要

し，文字が表なら右，裏なら左の反応キーを押す。テストパターンは，ランダムアクセスプロジェクターに格納されていて，後で述べる方法によって選ばれたパターンが順次提示される。又，必要に応じて，テストパターンの提示前後にスクリーンに照射する光は，他の2台のプロジェクターを利用している。これらのパターンの切りかえは，プロジェクターの前におかれた2つの回転シャッターで行なわれる。回転シャッターは電流で制御されるロータリ・ソレノイドに扇形の回転板をとりつけたものでこの制御はディジタルタイマからの信号によっている。

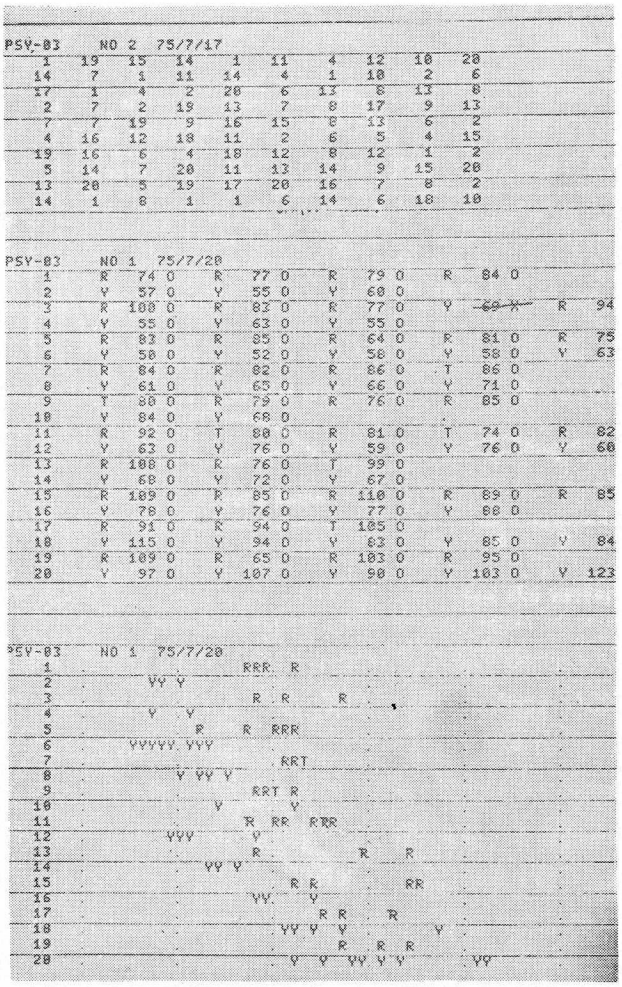
反応時間の測定は，計算機 PDP—12 に付属する実時間クロックを用いて行なう。そのためディジタルタイマの出力及び反応キーからの信号が計算機によって検出される。1回の実験は，1つの文字についてのいろいろの角度のテストパターンの中からランダムに選ばれた100個のパターンに対する反応時間の測定と表裏の判断の結果の記録からなっている。すでに述べた様に，テストパターンの選択は手動で行なうが，データの整理は計算機によって行なわれる。まず，実験に先立って，実験者は計算機に100個の乱数を打ち出させる。テストパターンは，この乱数に従って手動により選ばれる。テストパターンの提示は，ディジタルタイマの出力で制御されるが，反応時間の測定のため，実時間クロックの始動もこのタイマの出力によって行なわれる。左右の反応キーの信号は，計算機の外部ライン検出回路に送られ，クロックの停止と判断の正誤のチェックに使われる。用いられた乱数は，計算機に記憶されているので，反応時間と共に判断の正誤も自動的に整理される。実験が終了すると，実験者は，テレタイプのキーⒺを押し，終了した事を示す。次にキーⓉを押すと，テストパターンの番号（今の場合，回転角に対応する）と，これに対する反応時間，反応の種類，正否からなる表がテレタイプに印刷される。又，RSW（コンソール・パネル上のディジタルスイッチ）の0ビット目を1にセットし，キーⓉを押すと，正しい反応について回転角度（すなわち，パターン番号）と反応時間の関係を示すグラフが印刷される。（図1—2）

実験条件　テストパターンは白地に黒で描かれた文字で，被験者の前方 1.7mの位置におかれた透過型スクリーンに視角4°の円形の明るい背景の中に視角2°の大きさで提示される。（図1—3）　文字としては，数字の〝7〟，英文字の〝R〟，〝G〟ひらがなの〝る〟又，図形としては，〝ㅠ〟，〝ξ〟，〝ꝏ〟が用いられ，それぞれ10°毎に回転されたものが，表裏2組用意されている。（図1—4）被験者は，文字が表なら右，裏なら左の反応キーをできるだけ速く押す事を要求される。

被験者　筆者を含めた5名の男子

I—2　結果と考察

ここでは，〝7〟について得られた結果の一例を図1—5に示す。



PSY-03 NO 2 75/7/17

1	19	15	14	1	11	4	12	10	20
14	7	1	11	14	4	1	18	2	6
17	1	4	2	20	6	13	8	13	8
2	7	2	19	13	7	8	17	9	13
7	7	19	9	16	15	8	13	6	2
4	16	12	18	11	2	6	5	4	15
19	16	6	4	18	12	8	12	1	2
5	14	7	20	11	13	14	9	15	20
13	20	5	19	17	20	16	7	8	2
14	1	8	1	1	6	14	6	18	10

PSY-03 NO 1 75/7/20

1	R	74 O	R	77 O	R	79 O	R	84 O				
2	Y	57 O	Y	55 O	Y	60 O						
3	R	108 O	R	83 O	R	77 O	Y	~~69 X~~	R	94		
4	Y	55 O	Y	63 O	Y	55 O						
5	R	83 O	R	85 O	R	64 O	R	81 O	R	75		
6	Y	58 O	Y	52 O	Y	58 O	Y	58 O	Y	63		
7	R	84 O	R	82 O	R	86 O	T	86 O				
8	Y	61 O	Y	65 O	Y	66 O	Y	71 O				
9	T	80 O	R	79 O	R	76 O	R	85 O				
10	Y	84 O	Y	68 O								
11	R	92 O	T	80 O	R	81 O	T	74 O	R	82		
12	Y	63 O	Y	76 O	Y	59 O	Y	76 O	Y	60		
13	R	108 O	R	76 O	T	99 O						
14	Y	68 O	Y	72 O	Y	67 O						
15	R	109 O	R	85 O	R	110 O	R	89 O	R	85		
16	Y	78 O	Y	76 O	Y	77 O	Y	88 O				
17	R	91 O	R	94 O	T	105 O						
18	Y	115 O	Y	94 O	Y	83 O	Y	85 O	Y	84		
19	R	109 O	R	65 O	R	103 O	R	95 O				
20	Y	97 O	Y	107 O	Y	90 O	Y	103 O	Y	123		

PSY-03 NO 1 75/7/20

図1—2 計算機が打ち出した乱数，データ表とデータのグラフの一例，一番上が100個の乱数で，実験者はこの番号順にテストパターンを選択する。真中はデータ表である。左端の番号は，テストパターンの番号である。各パターンに対する答と，反応時間（単位は10$m$sec.）と答の正誤の判断（○，又は×）が記録されている。一番下は，データのグラフで，左端の番号が大きいほどパターンの回転角は大きい。言いかえると下方向に回転角をとっている。又，右方向に反応時間がとってある。なおグラフは，正しい答のみを自動的に判断し，プロットしている。

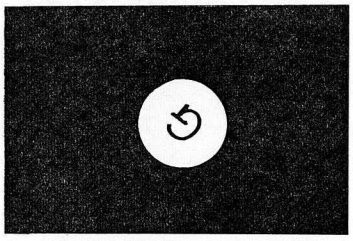


図1—3 テストパターンがスクリーンに提示された様子。直径4°のスポットの中に，2°の大きさで提示される。

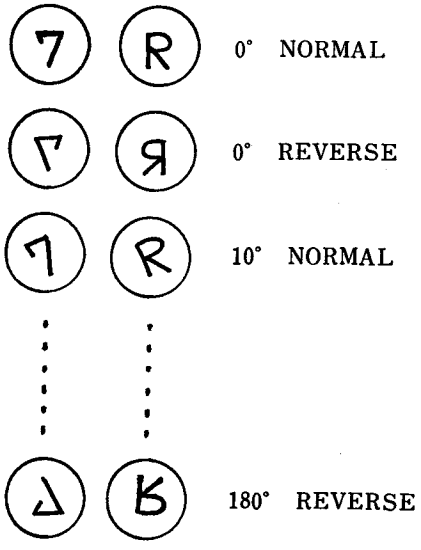


図1—4 文字〝7″と〝R″に対するテストパターンの組。一実験中に，一組のパターンしか出ない場合と，何組かのパターンが混ざって出る場合がある。

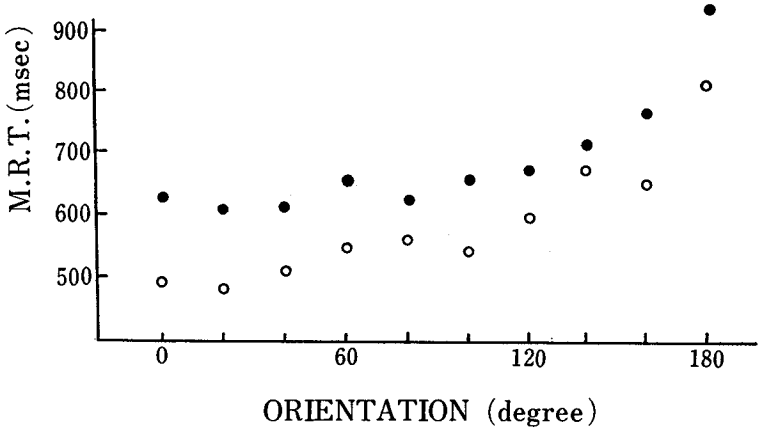


図1—5 データの一例。被験者 R.S. の文字〝7″に関するデータである。縦軸に平均反応時間，横軸に回転角がとってある。一点は，十回の平均で，標準偏差は約50*m*sec であった。

各点は，10回の平均である。各点の標準偏差は約 50*m*sec であった。回転角に応じて，反応時間は，単調に増加し，180°付近での急激な増加を除けば，ほぼ直線で近似される事がわかった。図 1 — 5 の場合に回転角0°～160°について回帰直線を求めると，表の反応に対して

は $y=1.4x+470$，裏の反応に対しては，$y=0.9x+605$ であった。ここに，y は反応時間（$m$sec），x は回転角（degree）である。この勾配から，〝思考回転〟に要する時間は，ほぼ1～1.4$m$sec／度である。又，表裏の違いは，個人差もあるが裏に対する反応時間の方が，ほぼ100$m$sec長い。この差は統計的に有意であった。又，一実験中に出るパターンの種類の数には，反応時間は依存しなかった。さらにパターンによって傾きは，1$m$sec／度くらい変化はあったが，有意な差ではない。次に図形〝π〟についての結果の一例を図1－6に示す。この場合も，各点は，10回の平均である。各点の標準偏差は，約70$m$secであった。回帰直線は表の反応に対しては $y=1.5x+643$，裏の反応に対しては $y=1.7x+608$ であった。図形の場合は表裏判定の時間差は有意ではなかった。

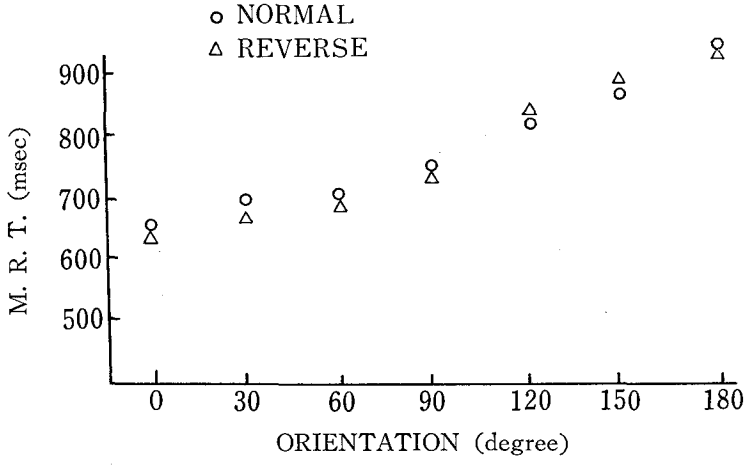


図1—6 データの一例。被験者H. U. の図形〝π〟に関するデータである。軸に平均反応時間，横軸に回転角がとってある。一点は十回の平均で，標準偏差は約70$m$secであった。

以上の結果から，2つの図形が同一か否かの判断は，特徴を言語化して行なうのではなく，Shepard らの言うように思考回転（Mental Rotation）による可能性が強いと考えられる。180°付近を除けば，ほぼ直線的な増加がみられたものの，全体としては非直線的であった。Cooper と Shepard（1973）は回転角を60°間隔でデータを出していたため，非直線的な増加の傾向にあった。しかし，我々は10°又は20°間隔で実験を行なった結果から，回転角と反応時間との間は直線的であり，むしろ180°付近が特異的であると考えている。文字と図形〝π〟の反応時間の違いに関連して，Hock と Ross（1975）は少し異なる実験方法を用い，図形の慣れ（familiarity）が思考回転の速度を増加させると言っている。次に我々の測定では，文字について表裏の判定差は約100$m$secであった。これは Cooper と Shepard（1973），Cooper（1975）らの結果と一致する。彼らは，Trabasso（1971）らの同異判定時間差の説明を引用している。これは，被験者はまずテストパターンを自己のもつ表のパターン情報と

照合し，合うかどうかを確かめた後，合わなければ異判定をだすためのスイッチ切りかえ時間として 100$m$sec 余分に必要とするものである。もし表裏の情報を同程度持っていたならどうなるであろうか。図形〝R〟などの我々の実験では，実験前に表裏を同じ回数被験者に提示し記録させた。この時の表裏の判定の時間差は，ほとんどなかった。この事から文字パターンの場合，表の情報のみが記憶にあってこの情報とテストパターンを照合していると考えられる。

II　実験2

Shepard によると，思考回転はテストパターンを記憶の中の正立したイメージに合わせようとする過程であると考えられている。その結果，角度がへだたるにつれ反応時間が増大すると理解されている。そこでもし，一時的にしろ記憶の中に正立以外のイメージ，たとえば，120°回転したイメージを書き込んでおくと，思考回転は正立したイメージないしはこの新たなイメージに向って生じ，反応時間もそれに応じて変わる事が予想される。ここでは，このような先行パターンの影響を調べる。

II－1　方法

装置　実験1に示したものと同じ。

実験条件　テストパターンの提示に先行して特定のパターンを提示する。先行パターンの提示時間は，50$m$sec～1 sec，テストパターンの提示時間は 1 sec。先行パターンとテストパターンの提示時間間隔（ISI）は，仮現運動が生じなくなる 200$m$secから10secの間について調べた。

II－2　結果と考察

ISI が1秒以下の場合について，結果の一部を図1－7に示す。各点は 10回の平均で，標準偏差は約 80$m$sec であった。先行パターンの提示時間は，それが 50$m$sec 以上なら，結果はほとんど影響しない。次に ISI が，200$m$sec，6 sec，8 sec，10secの4種について，先行パターンの影響を調べた結果を図1－8に示す。この場合，先行パターンは，〝7〟の180°回転（表）である。ISI が 10sec の時は，先行パターンがない場合と同じ傾向を示した。ただし，傾きが異なるが，これは学習効果によるものと考えられる。ISI が 6 sec，あるいは 8 sec の場合も，先行パターンの影響が見られたが，それは180°付近に限られて，ISI が200 $m$sec の結果とは異なっている。

人間の記憶は大ざっぱに言って，短期記憶（STM）と長期記憶（LTM）に分けられる。ニューロンの興奮過程は，ある一定時間中枢に興奮状態を残した後，ニューロンに一定の物理化学的変化を残効としてとどめるとされている。前者の興奮過程が短期記憶であり，後者の残効が長期記憶と呼ばれている。

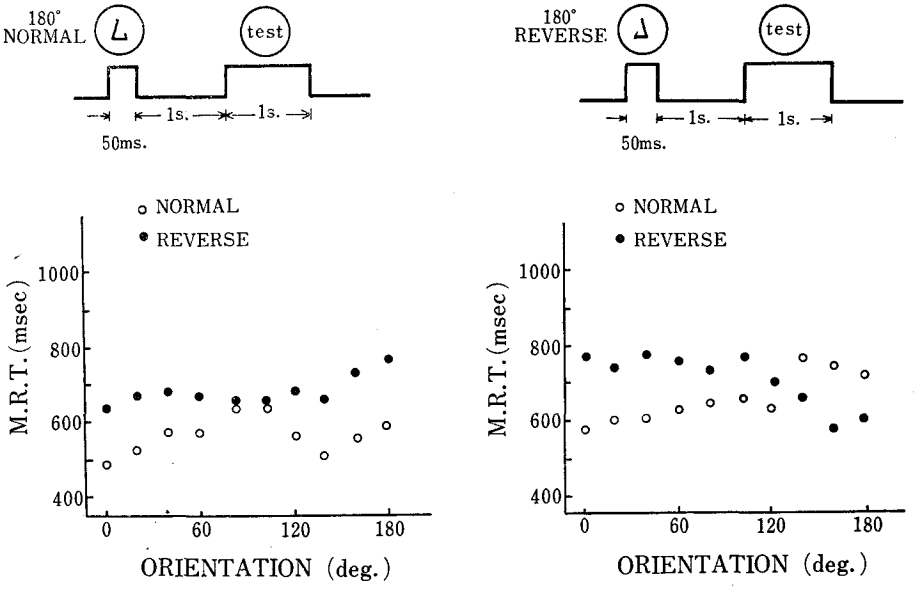


図1—7 短期記憶の情報が思考回転に及ぼす影響を調べた実験データの一部。左のグラフは，先行パターンが，倒立の〝7〟の場合，右のグラフは，倒立の〝7〟の裏の場合である。被験者はR．S．。一点は十回の平均で，標準偏差は約80$m$secであった。

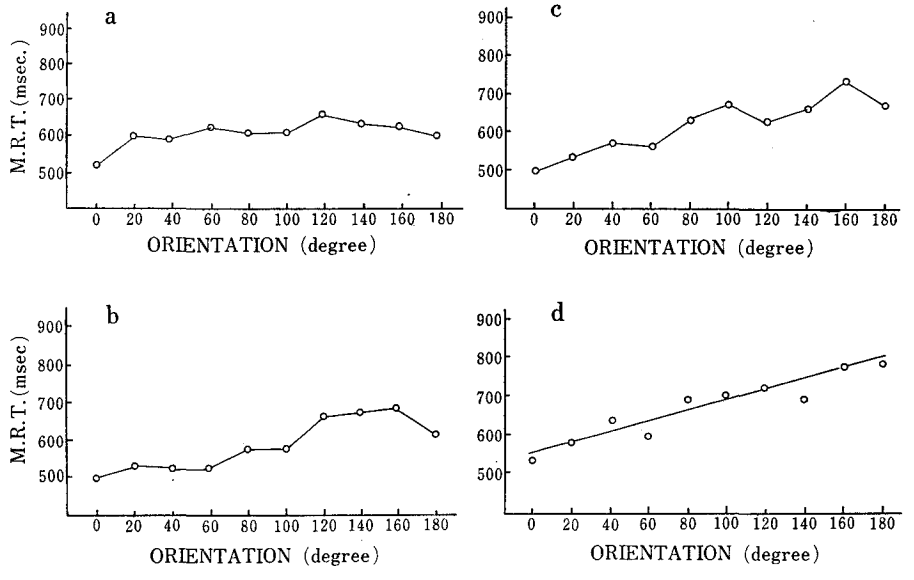


図1—8 短期記憶情報の影響の時間変化を調べたデータである。被験者H．U．のもの。(a)のグラフは，先行パターンとテストパターンの提示時間間隔（ISI）が200$m$secの場合，(b)のグラフは，ISIが6secの場合，(c)のグラフはISIが8secの場合，(d)のグラフは，ISIが10secの場合である。先行パターンは〝7〟の倒立で各点は表の判断に対する10回の平均である。

先行刺激がない場合，表裏判定時間は回転角の増加と共に単調に増えた。これは実験1でみたように，テストパターンの回転修正を行ない長期記憶情報と照合するからと考えられる。又，先行刺激が与えられると，反応時間が減少する（図1－7）のは，ここで言う短期記憶情報が有効に利用されたからと考えられる。図1－8の結果から，視覚的短期記憶（Visual STM）は，この場合のように注意が集中できる時は最高8秒持続すると考えられる。この結果は Parks ら（1972）と一致する。ただし，ISIがもっと短くないと，視覚的短期記憶の情報を LTM 情報と同様に有効に思考回転に利用できない。これは，おそらく記憶痕跡の低下のためと考えられる。すなわち，記憶の中に正立以外のイメージがあれば，思考回転は，正立したイメージないしはこの新たなイメージに向って生ずると考えられる。

実験1及び2を通して，Shepard らの言う思考回転の考えが確かめられたと言えよう。

Ⅲ　実験3

果して，パターンの回転修正は，どのようにしてなされるのであろうか。我々は，思考回転の特性を詳細に調べるため，パターンの複雑さと回転修正速度との関係を吟味した。

Ⅲ－1　方法

装置　実験1に示したものと同じ。

実験条件　図1－9に示したように，円の一部を消したパターンを使用する。

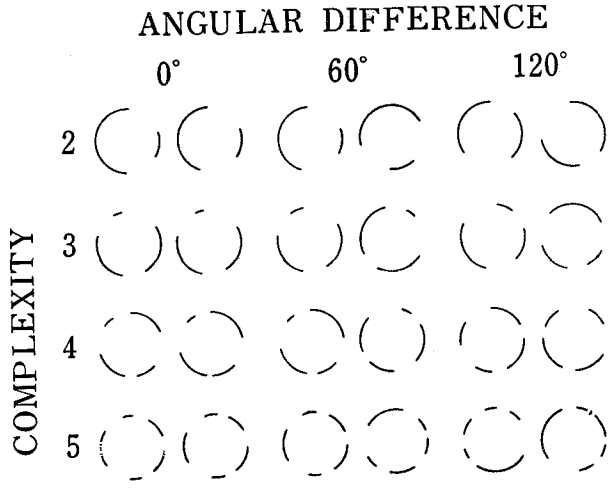


図1—9　使用されたテストパターンの例。ここでは，same pair の例のみを3種類の回転角について示してある。

ここでは，図形の複雑さを弧の数で定義しておく。パターンの作成は，以下に示す2種類の方法によった。1つは，同じ複雑さをもつパターンは，弧の長さの総和が同じになるように作る方法である。他の方法は，弧の長さをその中心角が15°，30°，60°の3種類に限り，

その組合せでパターンを作るというものである。これら2通りで書かれたパターンによって実験を行なった。被験者は，8名である。実験は次の2つの種類に分けられる。

実験a　同じ複雑さをもつパターンが一対提示される。(図1—10)　対には2通りある。1つは，同じパターンの対であり，それらは回転すれば重なる。この回転角は0°，60°，120°の3種類である。(以下 same pair と呼ぶ)　もう1つは異なるパターンの対である。(以下 different pair と呼ぶ)　テストの際は，これらの対の中からランダムに選ばれて，順次提示される。被験者は，2つのパターンが同じであるか異なるのかを，手元の反応キーをできるだけ速く押す事によって応答する。この実験をN：N照合と名づける。

実験b　図1—11に示すように，2つのパターンが同時に提示される。左側に提示されるパターンは，上述の方法で作られたパターンであり，右側に提示されるパターンは，1つ，又は，2つの弧から成るパターンである。被験者は，右側のパターンが，左側のパターンの部分になっているかどうかをできるだけ速く手元の反応キーを押す事によって応答する。なお，右側のパターンが1つの弧から成る場合，N：1照合，2つの弧から成る場合N：2照合と呼ぶ事にする。

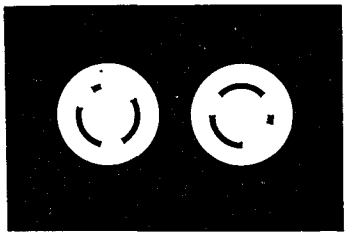


図1—10　スクリーンに same pair が提示された様子，N：N照合である。スポットの直径は視角2.7°である。

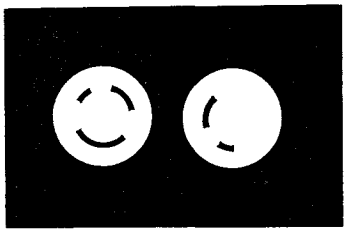


図1—11　スクリーンにテストパターンが提示された様子。この場合はN：2照合で右側のパターンを，時計回りに120°回転すれば，左側のパターンの部分である事がわかる。スポットの大きさは視角2.7°である。

実験aの場合も，実験bの場合も，共に，Same Pair に対する平均の反応時間だけをパターン別に角度の関数として計算した。

Ⅲ—2　結果と考察

実験a（N：N照合）

反応時間の増加率は複雑さが高いパターンに対するもの程大きく，おおよそ2つのグループに分かれた。一例を図1—12に示す。

図1—12の場合，複雑さが1あるいは2の傾きよりも複雑さが3，4の傾きの方が大きい事がわかる。しかし，複雑さが大きくなるにつれて，反応時間の増加率が徐々に大きくはならなかった。これは，複雑さの定義によるものと考えられる。反応時間の増加率は，思考回

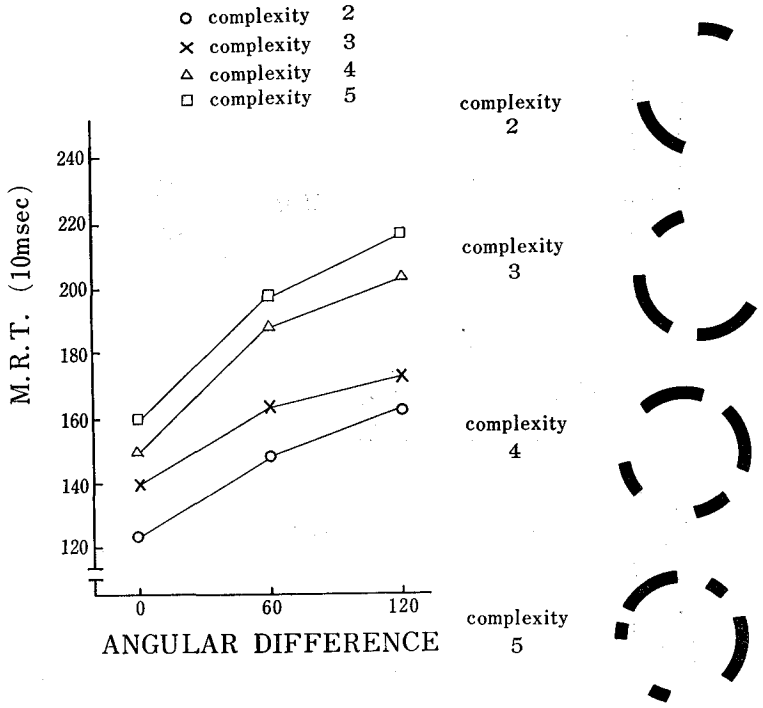


図1—12 パターンの複雑さと回転修正速度との関係を調べたデータの一部である。このデータは，same pattern についての8名の平均値である。右側は一実験中に same pattern として出た図形である。

転の速さの逆数に対応するので，パターンの複雑さが，大きくなれば，思考回転の速さは，おそくなると言える。この事から，思考回転による回転修正が，部分的にしかも継時的（直列的）になされると考えるのが適当ではなかろうか。

実験b（N：1照合，N：2照合）

1：1照合に対する平均反応時間は，ほとんど回転角に依存しなかった。N＝2の場合，N：1照合に対する反応時間は，N：N照合に対するそれと，ほとんど差がみられなかった。すなわち，N＝2の場合，全体のパターンを一度に回転修正してN：N照合を行なっていると考えられる。（図1—13）

N＝4又は5の場合，N：1照合あるいはN：2照合に対する反応時間の増加率は，N：N照合に対するより，小さかった。この事から，N＝4又は5の場合，パターンを部分的にしかも継時的（直列的）に回転修正して，N：N照合をしていると考えられる。（図1—14）

以上の考察から，次のような結論が導かれる。

全体のパターンをまず，いくつかの部分パターンに分け，それらを継時的に思考回転して，パターン照合を行なう。しかし，単純なパターン（今の場合は，N＝2）は，全体を一度に

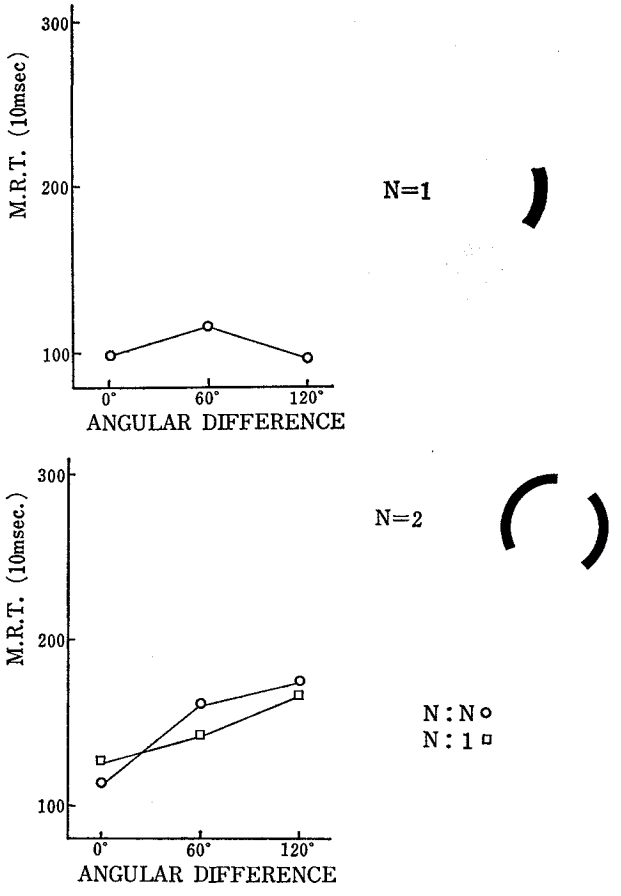


図1—13 N＝1とN＝2の場合のデータ。8名の平均値である。右に示した図形による実験結果である。

回転して照合している。

我々は，実験1で，図形の慣れ（familiarity）が思考回転の速さを増加させる事実を述べた。この実験から，たとえ複雑さが増しても，複雑なパターンの分けられた部分パターンが学習によって互いに結合していくのではないかと考えられる。言いかえると，学習によって部分パターンの継時的な思考回転から，徐々に全体を一度に思考回転するように変化すると考えられる。

Ⅳ　第1部のまとめ

本実験で得られた結果を以下にまとめる。

(1) パターンの表裏判定に際し，Shepard らが示唆した思考回転のプロセスが働く。

(2) 裏であると判断する時の方が，表であると判断する場合より反応時間は，約100*m*sec

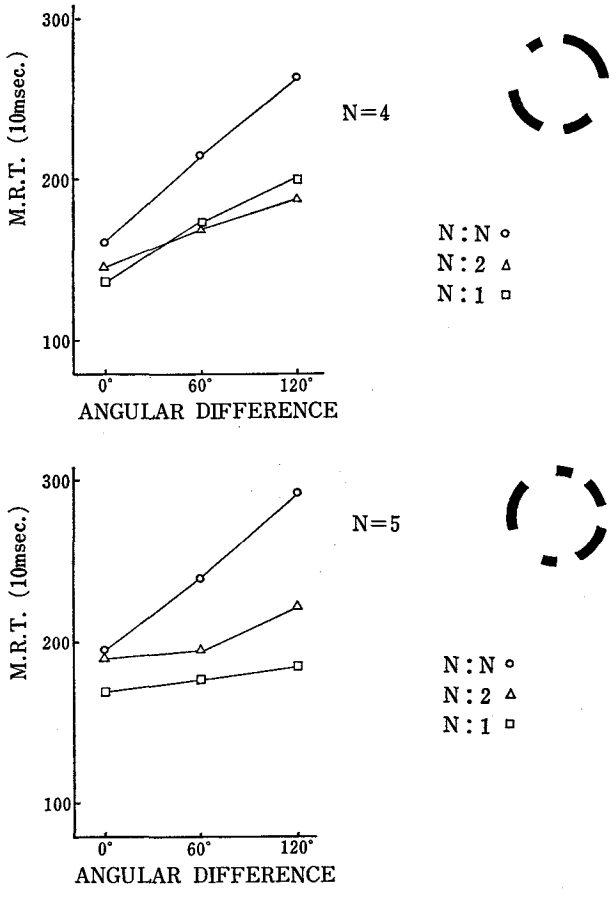


図1—14 N＝4とN＝5の場合のデータ。8名の平均値である。右に示した図形による実験結果である。

長かった。

(3) 思考回転の平均の速さは，パターンによってわずかに異なる。

(4) 思考回転の平均の速さは，パターンの複雑さとパターンに対する慣れと関係する。

(5) 回転されて提示されるパターンは，その方向が修正された後，LTM 又は STM に貯えられた情報と照合される。

(6) STM に貯えられた先行パターンの情報は最高8秒間持続する。しかし，思考回転に有効に利用されるのは，もっと短い時間である。

(7) 回転した複雑なパターンは，部分的にかつそれらが継時的に回転修正される。

第2部　回転文字読み取りの機構

I　実験1

ここでは，文字列が短時間提示された時，正しく読み取られる文字数が，文字の回転変換とどのような関係にあるのかを調べる。

I－1　方法

装置と条件　第1部で用いたものと同じ実験システムを利用し，透過型スクリーンに図2－1で示すようにパターンを提示する。

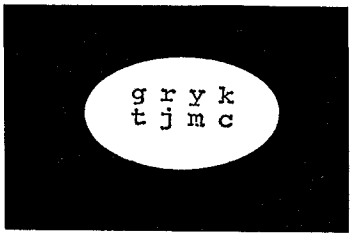


図2—1　スクリーンにテストパターンが提示された様子。テストパターンは，短径1.5°，長径2.5°の楕円形の明るい背景に提示される。

テストパターンは白地に黒で描かれた文字で，視角が短径1.5°，長径2.5°の楕円形の明るい背景の中に0.35°の視角で提示される。テストパターンは，すべて2×4＝8文字からなり，変換の施され方に応じて以下のように分けられる。（図2－2）

〔Class A〕8文字共同一の回転変換を受けている。回転角（S）は，0°，90°，150°，180°の4種類。

〔Class B〕8文字のうち4文字は正立（S＝0）　4文字は倒立（S=180）しているもの。その配置に応じて4つの型に分類される。

なお，p，d，q，b などの文字は，混乱をまねくのでさけた。

被験者が用意完了の合図を出すと，実験者が開始するむねをつげた後，テストパターンが提示される。テストパターン提示前後は，テストパターンの平均輝度にほぼ等しい拡散光でスクリーンに照射されている。テストパターンが提示されると同時に，被験者はテストパターンに書かれている文字をできるだけ多く，手元に用意されている紙に書きとる。なお，テストパターンの提示時間は，20*m*sec，30*m*sec，50*m*sec，60*m*sec，80*m*sec の5種類である。

被験者　裸眼視力0.8以上の正常視である男子10名。

I－2　結果と考察

Class A のテストパターンによる正読数の結果を図2－3に示す。

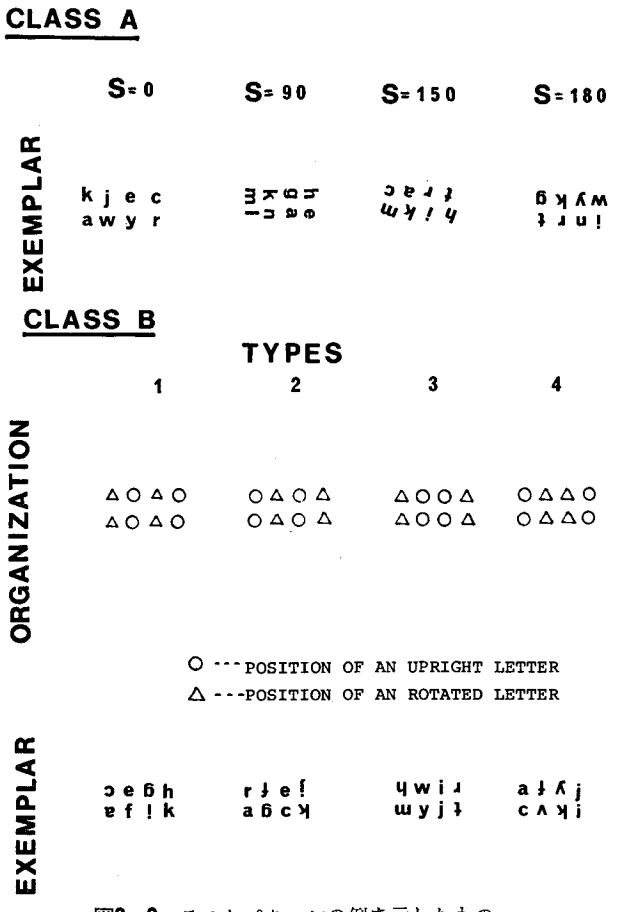


図2—2 テストパターンの例を示したもの。

8文字が正立で提示された場合（S=0）50$m$sec 付近で正読数は飽和し，その値は 4.5 文字である。これは Sperling のデータと一致し，又，20～50$m$sec で増加する傾向については，Macworth (1963) と一致する。一方，すべてが倒立している場合（S=180）正読数はほぼ3文字に収束している。又，文字の回転角の大きさと共に，正読数が減少している事がわかった。各点の標準偏差は約1文字である。提示時間が，80$m$secの時，S=0 と S=90と S=150の差は有意（$P<0.05$）であり，S=0 と S=90とS=180の差も又有意（$P<0.05$）であった。しかし，S=150 と S=180 の差は有意ではなかった。

Class B のテストパターンによる正読数の結果を図2—4に示す。

文字の配置によらず正読数は，ほぼ同じである。グラフに示された破線は，図3にあるSの曲線である。図2—4から Class B のパターンの正読数はほぼ8文字がすべて90°回転されたパターン（S=90）の正読数に一致する事がわかる。

又，別の実験で倒立文字が2つ，正立文字が6つのパターンの正読数は，わずかにClass B

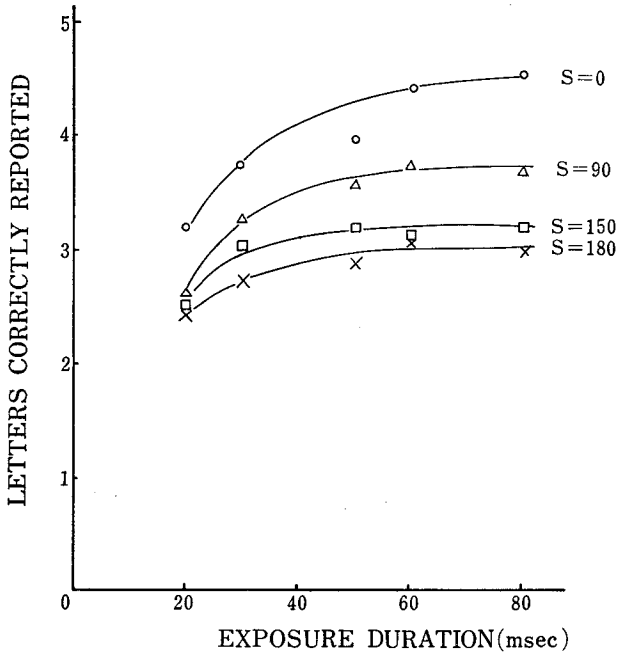


図2—3 Class A のテストパターンの提示時間と正読数。各点は10名の平均で，標準偏差は約1文字である。

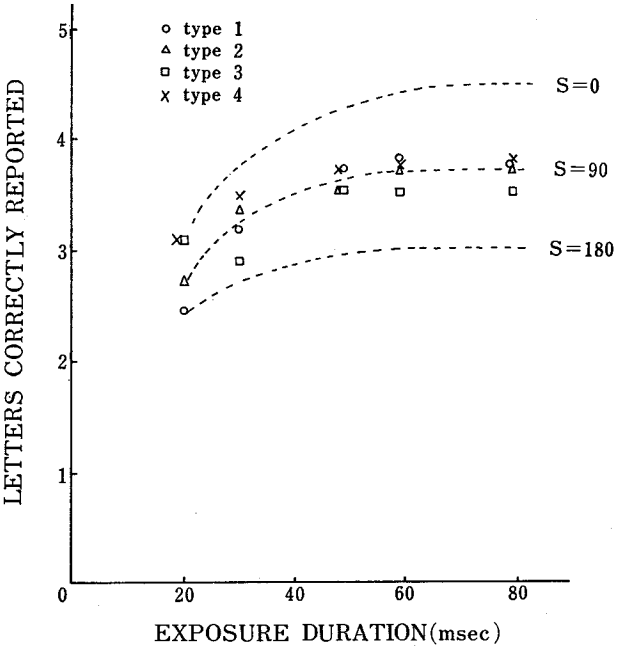


図2—4 Class B のテストパターンの提示時間と正読数。各点は10名の平均で，標準偏差は約1文字である。

のものより多かった。

なお，予備実験において，提示時間が，150$m$sec～300$m$sec の間だと，上記の正読数は，ほとんど変化しない事を調べた。

又，図2－4に示した Class B のデータを検討した結果，倒立又は正立の文字のみを先に読んでいる者はなく，必ず左又は右から順に読んでいる事がわかった。

もし，Class A のようにすべての文字が同方向に並んでいるために一種の定位構えのような効果がきいて，読み取り速度が増したとすれば，Class B の正読数が S=90 の正読数と一致した事実に矛盾する。又，パターンの正読数から，倒立の文字数の増加に伴ない正読数が減少した事実にも矛盾する。以上の結果，文字列が短時間提示された場合，文字読み取りに際しても，一文字ずつ回転修正を行なっている事がわかった。つまり，naming するのは，回転角に依存しない（Cooper と Shepard, 1973）とは言えない事がわかった。

Ⅱ　実験2

ここでは，文字列の回転方向と読み取り時間の関係を吟味する。（実験a）又，後の議論に対する参考データとして，正立した一文字を読みとるのに要する時間を測定する。（実験b）

Ⅱ－1　方法

装置は実験1と同じである。実験aで用いたテストパターンは，実験1で用いたものと同じである。テストパターンは，4秒間，被験者に提示される。被験者はできるだけ速く，閾下音声的に文字列を読み，読み終えると同時に反応キーを押すように指示されている。我々は，この読みとり時間を測定した。被験者は8名。

実験bで用いたテストパターンは，大文字と小文字のI，J，Lである。円形の明るい背景の中にテストパターンが一つ提示される。被験者は，提示された文字が，大文字又は小文字のIであれば手元の反応キーを押す。この時の反応時間を記録した。被験者は15名。

Ⅱ－2　結果と考察

Class A のテストパターンの8文字を読みとるのに要する平均時間が図2－5に示してある。図2－5の横軸は，文字の回転角（S）である。

読みとり時間は，回転角の増加とともに大きくなっている。このデータから，一文字について，読みとり時間の増加率は，0.56$m$sec／deg である事がわかる。これは，回転修正速度すなわち，思考回転（mental rotation）の速さとも考えられるが，このデータだけでは即断できない。なぜなら，8文字の方向がすべて同じなので，文字列を読んでいる間に naming の速度が上がる可能性があるからである。つまり，被験者は，最初の2，3文字の方向がわかると，この情報を残りの文字を読みとる際に有効に利用する可能性があるからである。

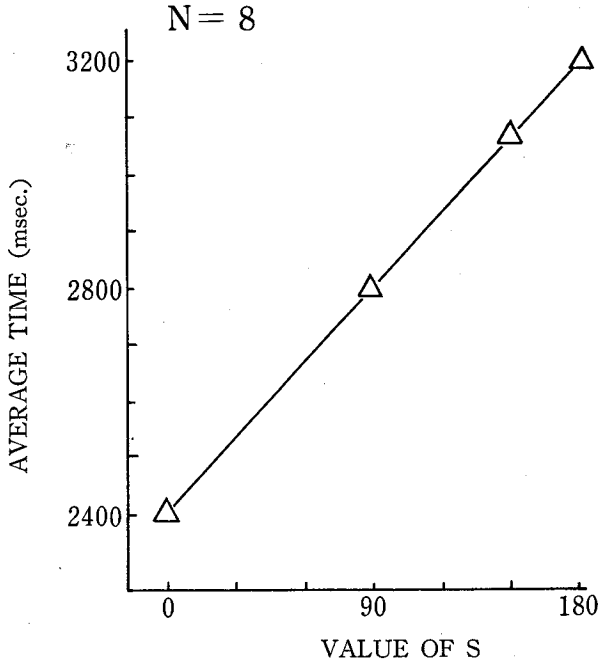


図2—5 Class A のパターン（8文字より成る）の読み取り時間，各点は8名の平均値である。

しかしながら，Class B のテストパターンの平均読み取り時間が，ほぼ Class A の S=90 のテストパターンに対する平均読み取り時間に等しい事がわかった。Class B のテストパターンに対しては，上述の加速の可能性がない。というのは，被験者Class B はのパターンを読む際に，正立文字なら正立文字だけを先に拾い読みしているという事実がなく，必ず，左又は右から順に読んでいる事がデータからわかる。この時はスキャンニングの間，文字の方向が変化しているので上述の可能性は一応考えられない。さらに Class B のパターンは，正立文字と倒立文字が4文字ずつ混ぜてあるので，回転角の平均を考えると，ちょうど Class A の S=90 のパターンに相当する。これらの2種のパターンに対する平均の読みとり時間が一致するので，加速の可能性は否定される。

ともかく，文字列を読みとる速さ（実験2）も，正読数（実験1）も，文字の回転角と線形の関係にある事がわかった。

又，実験aの条件では，回転角による読みとり時間の差はわかるが，読みとり時間そのものは，正確に測定できない。そこで，その値を明らかにするため，実験bを行なった結果，一つの正立文字を読みとる速さは，約 270±35*m*sec であった。この値は，光刺激による単純反応時間を引いたものであり，パターン提示後，naming するまでの時間と解釈できる。

Ⅲ 考 察

前述のごとく，視覚系における短期記憶は2段階に分けられる。一つは，未だ意識にのぼらない段階で VIS と呼ばれる。

実験2の結果から，180度の思考回転には約 100$m$sec 必要であり，1つの正立文字の naming には，約 270$m$sec 必要である。一方，VIS の最大持続時間は，約 270$m$sec である。(Averbach and Sperling, 1969) VISからの特徴抽出は，項目 (item) 間で並列的になされ，形が知覚される。その情報は STM に貯えられる。この STM の持続時間内に LTM の情報と順次照合が行なわれ，正立文字ならば，4.5 文字が読みとられると考える事ができる。ところで，実験1より，倒立文字の場合は3文字読みとれるので，正立した1文字を読みとるのに必要な時間を T として次の方程式を立てる。

$$4.5T = 3(T + T_{180}) \qquad (1)$$

ここに，T_{180} は読み取りの際180°回転修正するのに必要な時間である。実験2 b で得られた T=270を代入すると，T_{180}=135 ($m$sec) となり，実験2 a の結果とほぼ一致する事がわかる。我々は，第1部において，図形の表裏判定の際の思考回転の速さが，本実験の場合より少し遅い事を示した。この差は，おそらく課題の違いによるものと思われる。

そこで，図2－6に示すような視覚情報処理系のブロック線図が考えられる。網膜に入った情報はある程度の前処理を受けた後，VIS に貯えられる。VIS の持続時間は最大270$m$sec である。ここから特徴が抽出され，統合されて，形が知覚される。形のイメージはある期間持続すると考えられ，この段階を視覚的短期記憶 (Visual STM) と呼ぶことにする。視覚的短期記憶の持続時間は上述の式(1)の両辺の値に相等しく，約 1200$m$sec である。視覚的短期記憶が持続している間に，パターンの変換が修正され，長期記憶と照合される。

最近，微小電極を用いた生理学的方法によって，VIS が大脳視覚領に対応すると考えられるようになってきた。(Glezer ら，1973：Bridgeman, 1975) 又，岩井 (1971) による実験等によって，視覚的短期記憶が，側頭葉下部 (20野，21野) に対応すると考えられる。

高等動物の視覚領のニューロンは，特定の方向の白又は黒の棒に対して選択的に応答する事が知られている。(Hubel, and Wiesel, 1965, 1968) この方向は，preferred orientation (最適方位) と呼ばれている。同じ最適方位を持つニューロンは，大脳表面から白質に向う垂直な柱状に集まっている。細胞の好む最適方位は，円柱ごとに変化し，互いに近い円柱程，近い最適方位を持っている。このような神経構造は，視覚領に限らず，より高次の中枢においても存在している。(Zeki, 1974)

回転したパターンの修正過程の簡単なモデルとして，このような構造をもつ一次元神経回路網が考えられる。(図2－6)

まず，提示されたパターンに対応する神経興奮が，この一次元神経構造をもつ STM に起

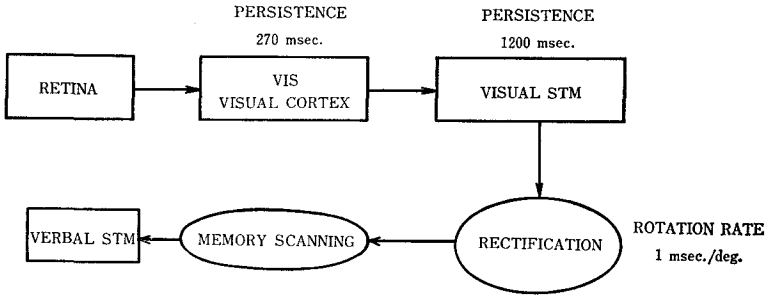


図2—6　回転文字読み取りに関する情報処理のブロック線図，入力パターンは，前処理がなされて VIS′ に貯えられる。この期間に特徴が統合され，視覚的イメージが知覚され，Visual STM に貯えられる。この間の1文字ずつ，回転修正され，視覚的イメージに対応する名前が LTM から読み出されて，Verbal STM に転送される。

こる。横方向にニューロンの最適方位が徐々に変化しているので，パターンの回転は，神経興奮の横移動に対応する。それゆえ，思考回転は，神経興奮を横方向に移動させる事で実現される。この STM の神経興奮は，たえず LTM の情報を検索しており，適当な出力が出るまで，神経興奮の移動が起こる。この出力は，STM と LTM の相互相関になっているであろう。

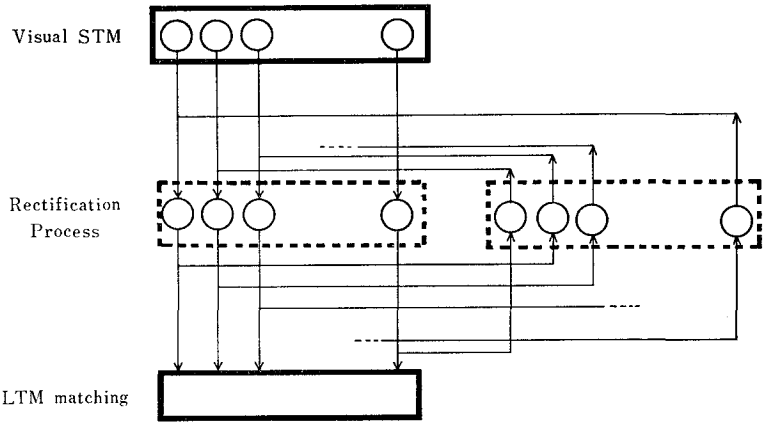


図2—7　回転修正の神経モデル。preferred orientation が少しずつ変化するような配列でニューロンが一次元に並んでいる時，回転修正は，神経興奮パターンの横移動に対応する。この横移動が真中の2層の神経回路で実現される。

Ⅳ　要　約

本実験によって，以下の事が明らかにされた。

(1)　瞬間提示された文字列の正読数は，文字の回転角の増加とともに減少した。すべての文字が正立している場合は，約4.5文字，すべての文字が倒立している場合は，約3文字が読みとられた。

(2) さらに，倒立文字と正立文字が同数だけ混ざっている文字列の場合は，ほぼ90°回転した文字列の正読数に一致した。

(3) 文字列を読みとる時間は，回転角の増加とともに線形に増加した。正立文字と倒立文字に対する読みとり時間差は，一文字当り約100$m$secであった。

(4) 回転した文字列が提示されると，一文字ごとに回転修正がなされている。

(5) 正立した一文字を読みとるのに要する時間は，およそ270$m$secであった。

これらの結果から，以下のように結論した。

(1) 一文字を読みとる場合の思考回転の速さは，180°につき約100$m$secである。

(2) 視覚的短期記憶（Visual STM）の持続時間は約1200$m$secである。

(3) 思考回転は，視覚的短期記憶の情報に施され，長期記憶の情報と照合される。

謝辞　本実験に対し，終始協力していただいた植松宏彰氏，実験システムの設計に御協力いただいた本学基礎工学部の末田統氏，小林欣吾氏に感謝します。又，有益な御討論をいただいた佐藤俊輔基礎工学部助教授，曽我部正博氏に感謝します。

参　考　文　献

1) Averbach, F. and Sperling, G.(1960) Short-term storage of Information in vision. "Information theory" proc. 4th London Symp., Butterworth, 1960, 196-201
2) Bridgeman, B.(1975) Correlates of metacontrast in single cells of the cat visual system. Vision Res. Vol. 15 91-99
3) Cooper, L.A. and Shepard, R.N.(1973) Chronometric studies of the rotation of mental images. In W.G. Chase (Ed.) Visual Information Processing. New York: Academic Press
4) Glezer, V.D., Ivanoff, V.A., and Tscherbach, T.A. (1973) Investigations of complex and hypercomplex receptive fields of visual cortex of the cat as spatial frequency filters. Vision Res. vol. 13 1875-1904
5) Hock, H.S. and Ross, K.(1975) The effects of familiarity on rotational transformation. Percept. & Psychophysics 18 15-20
6) Hubel, D.H. and Wiesel, T.N. (1965) Receptive field and functional architecture in two nonstriate visual area (18 and 19) of the cat. J. Neurophysiol. 28 229-289
7) Hubel, D.H. and Weisel, T.N. (1968) Receptive field and functional architecture of monkey striate cortex. J. Physiol. 195 215-243
8) 岩井栄一 (1971) 視覚失認—その動物実験による研究—神経進歩　第15巻　第1号
9) Kolers, P.A. and Pomerantz, J.R. (1971) Figural change in apparent motion. J. Exp. Psychol. 87 99-108
10) Shepard, R.N. and Metzler, J. (1971) Mental rotation of three-dimensional objects. Science 171 701-703
11) Sperling, G. (1960) The information available in brief visual presentation. Psychol. Monogr. 74 1-29
12) Zeki, S.M. (1974) Functional organization of a visual area in the posterior bank of the superior temporal sulcus of the rhesus monkey. J. Physiol. 236 549-573

MECHANISMS OF VISUAL PERCEPTION OF ROTATED PATTERNS

TOSHIO INUI and RYOJI SUZUKI

Part I

Shepard and his associates first suggested that when recognizing rotated patterns, there exists the process of mental rotation which is the recovery process of the orientation. In order to verify the existence of this process and to examine the details of this mechanism, we followed their experiment with some modifications.

Part I of this paper is composed of the following three experiments.

First, we examined the process of mental rotation in detail by the same way as used by Shepard and co-workers. (Experiment I)

The results of Experiment I can be summarized as follows:

1) In determining whether the test pattern is normal or reversed, the process of mental rotation might operate as suggested by Shepard and his associates.
2) The average rate of mental rotation varied somewhat from pattern to pattern.
3) RTs were shorter to the normal pattern than to the reversed pattern by about 100 msec.
4) The average rate of mental rotation had relation to the familiarity of the pattern.

Now, mental rotation is considered as the process that a test pattern is rotated mentally so as to congruence with the right image which is stored in long-term memory (LTM). Consequently, RT is to increase with angular departure. It will be expected from this point of view that if any other rotated image is registered in memory as a preceeding pattern even temporarily in addition to the right image, mental rotation will occur toward either of them and these process will be reflected in RT. Therefore, we investigated the effect of the preceding pattern. (Experiment II)

The result of Experiment II is interpreted as follows:

1) The rotated pattern is adjusted its orientation so as to match with the information stored in LTM.
2) Information registered in STM persists within 10 sec. But it is used more efffectively in the earlier period of the persistence.

Finally, we investigated the dependence of the complexity of the test pattern on the reaction time. (Experiment III)

The results suggest that complex patterns are devided into parts and then operated mental rotation part by part serially.

Part II

The rate of mental rotation was investigated by measuring the effect of rotational angles of letters on reading tasks.

First, we examined the number of letters correctly reported when two rows of letters are rotated by various angles and are presented for a short time. (Experiment I)

In case that the test pattern of eight upright letters (S=0) is presented to subjects, the average number of letters correctly reported is equal to about 4.5 letters which agrees with Sperling's data. On the other hand, in case of the test pattern with 8 inverted letters (S=180), the number of letters correctly reported is equal to about 3 letters. And it is found that the more the rotational angle of the letters, the less the number of letters correctly reported. In case that the test pattern consists of 4 upright letters and 4 inverted letters, the number of letters correctly reported is almost equal to that in case of the test pattern of 8 letters rotated by 90° (S=90).

Secondly, we examined the relationship between orientation of letters and the speed of recognition. (Experiment II)

The result was that the mean reaction time for naming 8 letters rotated by the same angle increased linearly with rotational angle of letters. Furthermore, the mean reaction time for naming the pattern which consists of 4 upright letters and 4 inverted letters was equal to that for naming 8 letters rotated by 90°. The difference was about 100 msec between for a normal and for an inverted letter.

The results from Experiment I and II support the fact that the rectification of rotated letters is performed letter by letter even if they are presented simultaneously, and that the speed of the rectification (mental rotation) is about 100 msec/180°. Our experiments are also suggesting the mental rotation is performed with information stored in Visual STM, the persistence of which is about 1200 msec.

Finally, we proposed a neural model of mental rotation process based on the neurophysiological knowledges about visual system.