

イメージ操作は脳の中で
どのように行われるのか：
心的回転の回転方向に関する実験的検討

筑波大学
図書館情報メディア研究科
2013年3月
寺田 春菜

目次

第1章 序論	1
1.1 イメージ操作	1
1.2 イメージ操作に関わる機構	1
1.3 イメージ操作は物理的な操作と同様か	2
1.3.1 心的回転の連続性に関する実験	4
1.4 心的回転に関する作業記憶	6
1.5 心的回転の学習効果	8
1.5.1 図形依存性のある学習効果	9
1.5.2 心的回転の学習効果は何に起因するのか	11
1.5.3 心的回転の学習効果の性質に関する実験	13
1.6 寺田・森田 (2011) の再考	15
1.6.1 回転方向依存性に関する再考	15
1.6.2 回転方向のプライミング効果に関する再考	16
1.7 本論文の目的	17
第2章 実験1	18
2.1 目的	18
2.2 方法	18
2.2.1 実験参加者	18
2.2.2 実験環境	18
2.2.3 手続き	20
2.2.4 刺激	20
2.2.5 デザイン	22
学習セッション	22
テストセッション	23
結果の比較方法	26
2.3 結果	27
2.3.1 回転率	27
2.3.2 心的回転の学習	28
2.3.3 エラーレート	29
2.3.4 学習した図形セットの違いによる影響	29
2.3.5 方位依存性の検討	30
2.3.6 回転方向依存性の検討	31
2.4 考察	32

第3章 実験2	35
3.1 目的	35
3.2 方法	35
3.2.1 実験参加者	35
3.2.2 実験環境	35
3.2.3 手続き	35
3.2.4 刺激	36
3.2.5 デザイン	36
3.3 結果	39
3.3.1 ブロックごと回転率	39
3.3.2 条件ごとのエラーレート	41
3.3.3 判定時間の制限時間を越えた試行数の割合	42
3.3.4 条件ごとの回転率	43
3.4 考察	44
第4章 結論	47
4.1 総合考察	47
4.2 心的回転のモデル	48
4.3 今後の課題	51
4.4 まとめ	51
謝辞	52
参考文献	53
付録	55

第1章 序論

1.1 イメージ操作

私たちは目の前にないものでも、頭の中に思い浮かべることが出来る。例えば、淹れたてのコーヒーが入ったカップを想像してほしい。黒々としたコーヒーから湯気が立ちのぼるところがすぐに頭に浮かぶだろう。このように頭の中に思い描いたイメージに対して変形や回転といった操作を加えることも可能だ。先程のコーヒーが入ったカップを逆さまにすると、それを思い浮かべれば、すぐにコップが逆さまになって中のコーヒーが(勿体無いことに)こぼれるところも想像出来るだろう。このように、頭の中に思い浮かべたイメージに施す操作のことをイメージ操作と呼ぶ。

私たちはイメージ操作を日常生活の様々な場面で実行している。例えば、地図を見て目的地を目指すときは、自分の向いている方向を地図に重ねあわせて進む方向を理解する。新聞や本などを読むときは、文章から場面や登場人物の動きなどを思い浮かべる。友人と世間話をするときには、友人の言葉から何が起きたのかを想像することで体験や感情を共有する。

私たちが生活する上でイメージ操作は欠くことの出来ない重要な機能だ。このイメージ操作の機序を明らかにしたいという動機のもと、本研究を実施した。

1.2 イメージ操作に関わる機構

私たちが外界からの情報を得るときは目の網膜や耳の鼓膜などを通じて外からの情報を取得し処理する。これは外界からの入力がある処理と言える。一方、イメージ操作や推論などの多くは入力がない内的な処理である。この内的な処理を行う機構は、作業記憶あるいはワーキングメモリと呼ばれる。作業記憶は『目標意志的な課題や作業の遂行に関わるアクティブな記憶』[1]であり、さまざまな内的処理に関わると考えられている。作業記憶の代表的なモデルに、Baddeley & Hitch (1974) によって提案されたマルチコンポーネントモデルがある。このモデルは後に訂正され、Baddeley (2003) により訂正マルチコンポーネントモデルが提案された。これによると、作業記憶は4個の要素からなるとされる。この概念図を図1.1に示す。

図中、青色の箱および楕円の4個の要素が作業記憶である。この中で、音韻ループ、エピソードバッファ、視空間的スケッチパッドは一時的に情報を保持する役割を担っている。それぞれ保持する情報が異なり、音韻ループは言語的な情報を保持する。視覚スケッチパッドは言語化出来ないようなイメージなどの情報を保持する。エピソードバッファは長期記憶から取り出した情報や視空間的スケッチパッドと音韻ループの情報を統合した情報など、統合された形の情報を保持する。これらサブシステムには一定の容量があると考えられており、その容量に効率よく情報を割り当てる役割を担っているのが、中央実行系である。中央実行系は注意によって処理に必要な情報を選択し、必要なだけ作業記憶の容量を割り当てる。作業記

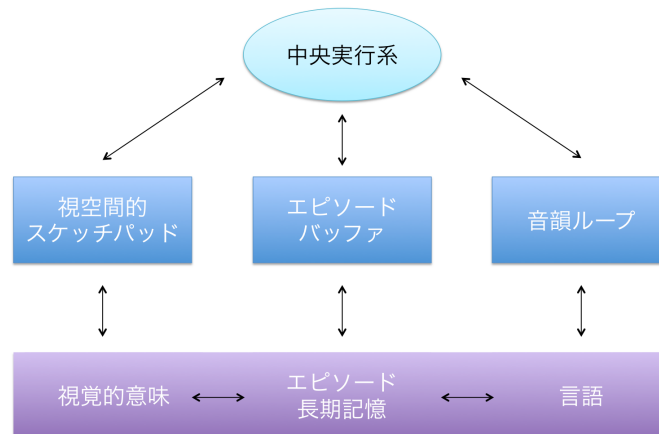


図 1.1 Baddeley による訂正マルチコンポーネントモデル (Baddeley, 2003, p.835, Fig.5 に基づいて改変)

図中、青色の箱および楕円の 4 個の要素が作業記憶である。この中で、音韻ループ、エピソードバッファ、視空間的スケッチパッドは一時的に情報を保持する役割を担っている。それぞれ保持する情報が異なり、音韻ループは言語的な情報を保持する。視覚スケッチパッドは言語化出来ないようなイメージなどの情報を保持する。エピソードバッファは長期記憶から取り出した情報や視空間的スケッチパッドと音韻ループの情報を統合した情報など、統合された形の情報を保持する。これらサブシステムには一定の容量があると考えられており、その容量に効率よく情報を割り当てる役割を担っているのが、中央実行系である。紫色の箱の中にある要素は長期記憶に存在する情報であり、作業記憶の 3 要素は長期記憶とやりとりを行い、処理を進める。

憶での処理を円滑に行うために重要な機能である。例えば電車で本を読む場合、本の内容を理解することと目的の駅まであと何駅か(何分か)気にかけていることを同時に行なう。バランス良く注意を配分できれば、本の内容を理解しつつも目的の駅で降車出来るし、本の内容に夢中になれば(本に注意をすべて向ければ)とおそらく乗り過ごすだろう。

紫色の箱の中にある要素は長期記憶に存在する情報であり、作業記憶の 3 要素は長期記憶とやりとりを行い、処理を進める。

イメージ操作は作業記憶のうち視空間的スケッチパッドで行われていると考えられる。しかし、視空間的スケッチパッドにおいて情報がどのように表現されるのか、また処理されるのかは未だ議論が続いている。

1.3 イメージ操作は物理的な操作と同様か

私たちが目の前にあるものを実際に手や足などを使って操作したりするときと同じように、イメージ操作において、動かす、ひねる、回転するなどさまざまな種類の操作が可能だ。私たちは、目の前でカップが逆さまになるところも、頭の中でカップが逆さまになるところも同じことのように考えるだろう。頭の中で行われる処理は、物理的なものと同じように行われているのだろうか。

Shapard & Metzler (1971) はこのことを実証する実験を行った。彼らの実験は、図 1.2 に示す刺激を用いて行われた。実験参加者はブロックで出来た図形が 2 個呈示され、それが同じ

ものか違うものかを判断しボタンを押して答えるという課題を行った。2個の図形は同じもの(正像)か鏡像同士になっており、向きを変えて呈示される。例えば図1.2のAは正像同士であるが、Cは鏡像同士である。図形同士の角度差は 0° から 180° まで 20° 刻みに設定された。

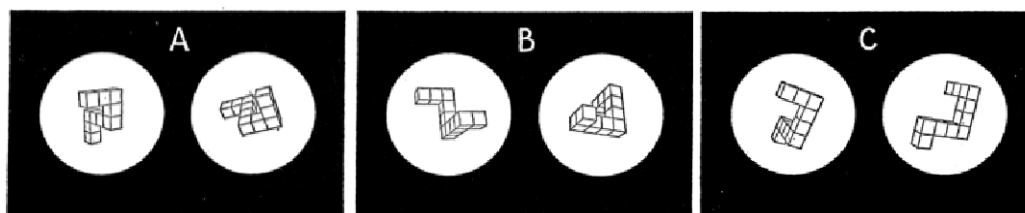


図1.2 Shepard & Mezler (1971) が実験に用いた刺激 (Shepard & Mezler, 1971, p.702, Fig.1) ブロックで出来た図形が2個呈示され、それが同じものか違うものかを判断しボタンを押して答えるという課題を行った。2個の図形は同じもの(正像)か鏡像同士になっており、向きを変えて呈示される。A,Bは正像同士であるが、Cは鏡像同士である。図形同士の角度差は 0° から 180° まで 20° 刻みに設定された。

この実験結果を図1.3に示す。なお、グラフの横軸は図形同士の角度差(deg)、縦軸は平均反応時間(sec)である。Aのグラフは投影面に垂直な方向を軸とする回転(図1.2ではA)、Bのグラフは投影面に水平な方向を軸とする回転(図1.2ではB,C))に関する結果である。

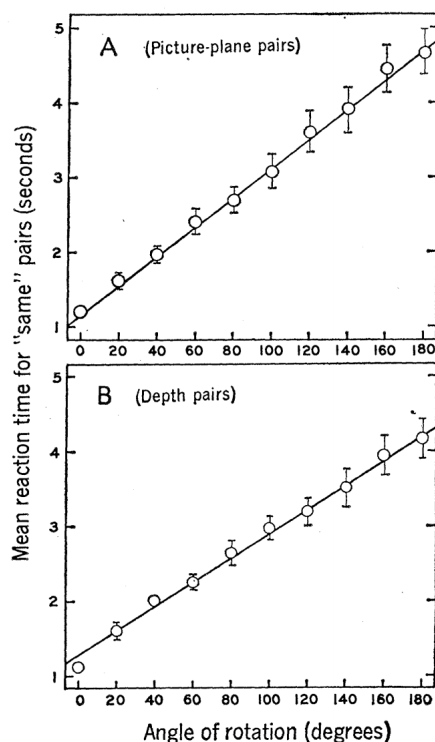


図1.3 Shepard & Mezler (1971) の実験結果 (Shepard & Mezler, 1971, p.702, Fig.2) 横軸は図形同士の角度差(deg)、縦軸は平均反応時間(sec)である。Aのグラフは投影面に垂直な方向を軸とする回転(図1.2ではA)、Bのグラフは投影面に水平な方向を軸とする回転(図1.2ではB,C))に関する結果である。

これを見ると、どちらの軸に関する回転でも図形間の角度差が大きくなるにつれて反応時間も大きくなっている。現実世界において物体を回転させるときも、角度が大きくなればそれに要する時間も増える。実験参加者が頭の中で何かの仕組みで図形を回転させていると考えれば、その仕組みは物理的な回転と類似点を持つものとも言える。つまり、この実験結果は頭の中で実際の操作と似た回転を行っているひとつの証拠だと考えられる。

頭の中に思い浮かべたイメージに対して施す回転操作のことを心的回転またはメンタルローテーションと呼ぶ。この実験結果はとても興味深いものであり、その後多くの研究者によって様々な実験がなされた。ここで、心的回転の連続性を示した実験を紹介する。

1.3.1 心的回転の連続性に関する実験

Shepard & Metzler (1971) により、心的回転の反応時間は角度に対して線形的に増加することが示された。ところで、物理的な現象は連続的であり必ず中間状態が存在する。心的回転が物理的な現象と同様なものであるなら、中間状態が存在するべきだが、Shepard & Metzler (1971) の実験ではこれを示すことができない。そこで Cooper & Shepard (1975) は実験により心的回転の連続性について検証した。

Cooper & Shepard (1975) は、図 1.4 に示す 8 個の刺激を用いて実験を行った。なお、図 1.4 には正像と鏡像を併せて示してある。

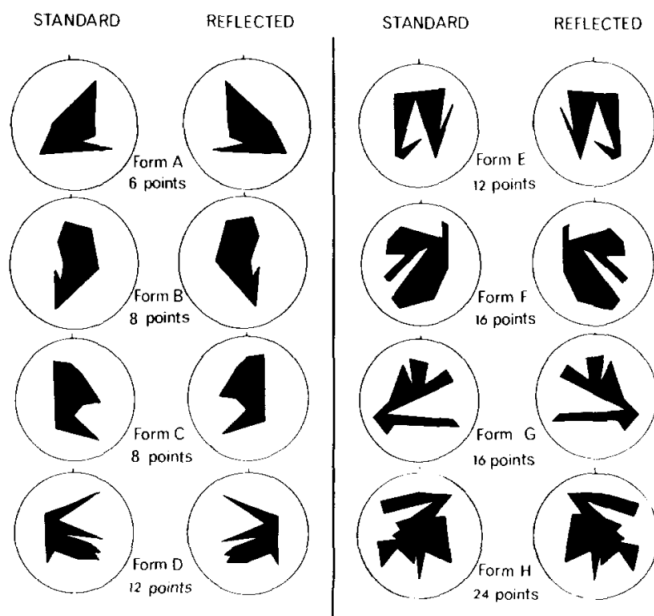


図 1.4 Cooper & Shepard (1975) が用いた刺激 (Cooper & Shepard, 1975, p.23, Fig.1)
8 個の多角形を刺激として用いた。それぞれ左側が正像、右側が鏡像である。

実験参加者は事前に心的回転の実験に参加し、心的回転および図 1.4 の刺激に精通していた。また、実験者は実験参加者の心的回転の回転速度を記録していた。実験の手続きを図 1.5 に示す。

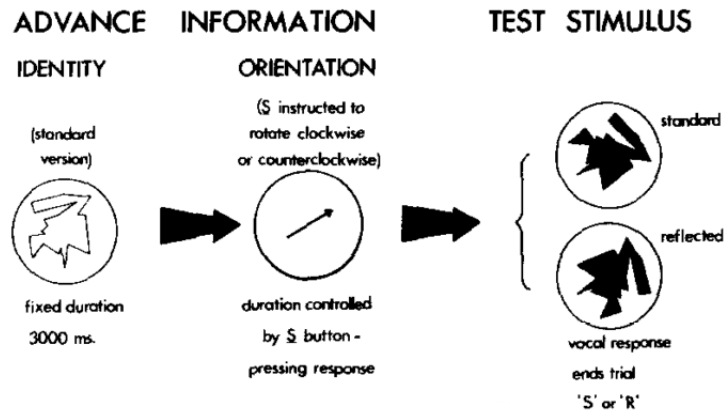


図 1.5 Cooper & Shepard (1975) の実験手続き (Cooper & Shepard, 1975, p.33, Fig.4)

はじめにある多角形が一定時間呈示される。次に回転方向(時計回りまたは反時計回り)が呈示されるので、実験参加者は先程の多角形を思い浮かべ、それを自然な速さで回転する。実験参加者が多角形の回転を思い浮かべている間、不規則な感覚でその多角形の正像または鏡像が領域内に呈示される。実験参加者はその表示された多角形が正像なのか鏡像なのかを出来るだけ素早く答える。

まず、ある多角形が一定時間呈示される。次に回転方向(時計回りまたは反時計回り)が呈示されるので、実験参加者は先程の多角形を思い浮かべ、それを自然な速さで回転する。実験参加者が多角形の回転を思い浮かべている間、不規則な感覚でその多角形の正像または鏡像が領域内に呈示される。実験参加者はその表示された多角形が正像なのか鏡像なのかを出来るだけ素早く答える。このとき、図形を呈示してから実験参加者が回答するまでの時間を反応時間として測定した。

この実験の結果を図 1.6 に示す。横軸が角度(deg) 左の縦軸が平均反応時間(msec)である。実験者はあらかじめ記録しておいた実験参加者の回転速度をもとに、その時刻で実験参加者が想像している角度を予想している。図 1.6 中黒塗りの三角で示したグラフ(RT2)は、その予想した角度で多角形を呈示した場合の平均反応時間をプロットしたものである。図 1.6 中黒塗りの丸で示したグラフ(RT1)は、予想した角度から差をつけて呈示した場合の平均反応時間をプロットしたものである。

この結果を見ると、予想した角度で呈示した場合(図 1.6 左のグラフ)の平均反応時間は角度に依存せず、短い時間で反応出来たことがわかる。これはイメージ上で回転している多角形と呈示された多角形の角度がほぼ一致していたため、多角形が呈示されたあと回転操作を必要とせず回答することが出来たためだと考えられる。一方、予想した角度から差をつけて呈示した場合(図 1.6 右のグラフ)の平均反応時間は、角度差が大きいほど大きくなっている。これは、イメージ上で回転している多角形と呈示された多角形の角度がずれていたため、呈示されたあとに回転操作をする必要があったのだと考えられる。

以上の結果は、心的回転において中間状態が存在しており、連続的な処理が行われていることを示唆している。このことから、心的回転と物理的な回転の重要な類似点として、中間状態が存在することが挙げられる。

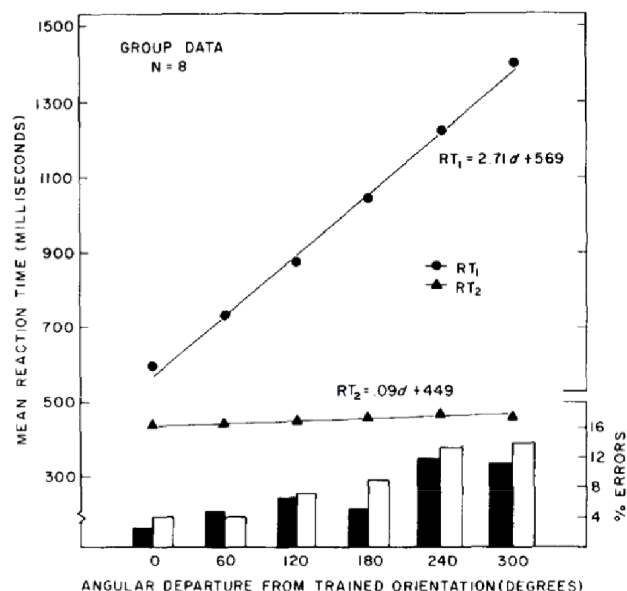


図 1.6 Cooper & Shepard (1975) の実験結果 (Cooper & Shepard, 1975, p.35, Fig.5)

横軸が角度 (deg) 左の縦軸が平均反応時間 (msec) である。実験者はあらかじめ記録しておいた実験参加者の回転速度をもとに、その時刻で実験参加者が想像している角度を予想している。黒塗りの三角で示したグラフ (RT2) は、その予想した角度で多角形を呈示した場合の平均反応時間をプロットしたものである。黒塗りの丸で示したグラフ (RT1) は、予想した角度から差をつけて呈示した場合の平均反応時間をプロットしたものである。

1.4 心的回転に関する作業記憶

作業記憶において、視覚的な情報を保持する場所は視空間的スケッチパッドであった (1.2 参照)。心的回転は視空間的スケッチパッドで行われていると考えられる。この視空間的スケッチパッドは視覚作業記憶と空間作業記憶に分けて考えることが出来る。視覚作業記憶は、色や形など操作対象であるオブジェクトそのものの情報を保持する。一方、空間作業記憶はオブジェクトの位置などの情報を保持する。Hyun & Luck (2007) は心的回転において操作対象であるオブジェクトの表象がどちらの作業記憶で操作されるかを 2 個の実験で検証した。

図 1.7 に Hyun & Luck (2007) の実験で用いた刺激および手続きを示す。A は実験 1 で用いた刺激、B は実験 2 で用いた刺激である。

どちらの実験も二重課題となっている。二重課題とは、2 つの課題を同時に行わせるものである。例えば、単語を記憶しながら計算問題を解いたりする、などである。

実験 1 では、4 個の四角形のうちのどれかの色が変わったかを回答する視覚記憶課題と心的回転課題を行なう (図 1.7A 参照)。実験参加者には始めに着色された 4 個の四角形が呈示される。一定時間が経過するとこれらの四角形が一旦消えて文字が呈示されるので、実験参加者はそれが正像か鏡像かを答える (心的回転課題)。するとまた着色された 4 個の四角形が呈示される。実験参加者は最初に見た四角形と比べて色が変化したものがあるかどうかを回答する (視覚記憶課題)。4 個の四角形の色の変化したかを答える課題では、視覚作業記憶が用いられると考えられる。もし心的回転が視覚作業記憶を用いるならば、どちらの課題も同じ作業記憶を用いるために干渉が発生することが予想される。

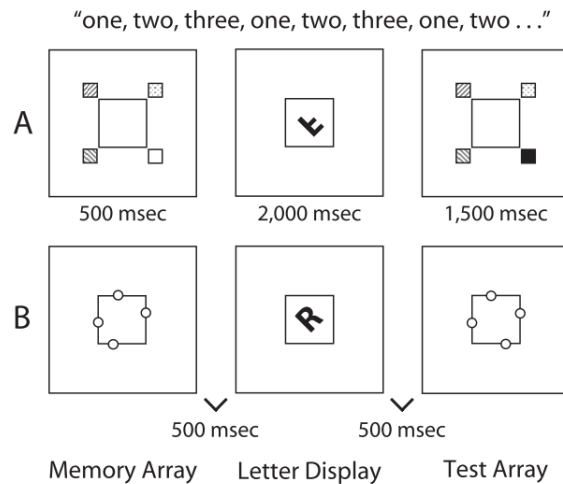


図 1.7 Hyun & Luck (2007) が用いた刺激および手続き (Hyun & Luck, 2007, p.155, Fig.1)

実験 1 の手続きは上段 (A), 実験 2 の手続きは下段 (B) である。実験 1 では、4 個の四角形のうちのどれかの色が変わったかを回答する視覚記憶課題と心的回転課題を行なう。実験参加者には始めに着色された 4 個の四角形が呈示される。一定時間が経過するとこれらの四角形が一旦消えて文字が呈示されるので、実験参加者はそれが正像か鏡像かを答える (心的回転課題)。するとまた着色された 4 個の四角形が呈示される。実験参加者は最初に見た四角形と比べて色に変化したものがあるかどうかを回答する (視覚記憶課題)。実験 2 では、四角形の辺にある 4 個の丸のうちどれかどれかの位置が変わったかを回答する空間記憶課題と心的回転課題を行なう。実験参加者には始めに四角形の各辺にひとつずつ丸がある図形が呈示される。一定時間が経過するとこれらの丸が一旦消えて文字が呈示されるので、実験参加者はそれが正像か鏡像かを答える (心的回転課題)。するとまた四角形の各辺にひとつずつ丸がある図形が呈示される。実験参加者は最初に見た 4 個の丸と比べて位置が変化したものがあるかどうかを回答する (空間記憶課題)。

実験 2 では、四角形の辺にある 4 個の丸のうちどれかどれかの位置が変わったかを回答する空間記憶課題と心的回転課題を行なう (図 1.7B 参照)。実験参加者には始めに四角形の各辺にひとつずつ丸がある図形が呈示される。一定時間が経過するとこれらの丸が一旦消えて文字が呈示されるので、実験参加者はそれが正像か鏡像かを答える (心的回転課題)。するとまた四角形の各辺にひとつずつ丸がある図形が呈示される。実験参加者は最初に見た 4 個の丸と比べて位置が変化したものがあるかどうかを回答する (空間記憶課題)。4 個の丸の位置が変化したかを答える課題では、空間作業記憶が用いられると考えられる。もし心的回転が空間作業記憶を用いるならば、どちらの課題も同じ作業記憶を用いるために干渉が発生することが予想される。

なお、どちらの実験でもコントロールとして心的回転のみを実行する条件とそれぞれの記憶課題のみを実行する条件を実施した。

この実験の結果を図 1.8 に示す。左の 3 個のグラフ (A) は実験 1 に関する結果、右の 3 個のグラフ (B) は実験 2 に関する結果である。横軸は回転角度 (deg), 縦軸は上から順に、心的回転課題だけを行った場合と二重課題の場合の反応時間 (msec), 心的回転課題だけを行った場合と二重課題の場合の正答率 (%), 記憶課題だけを行った場合と二重課題の場合の正答率 (%) を示している。

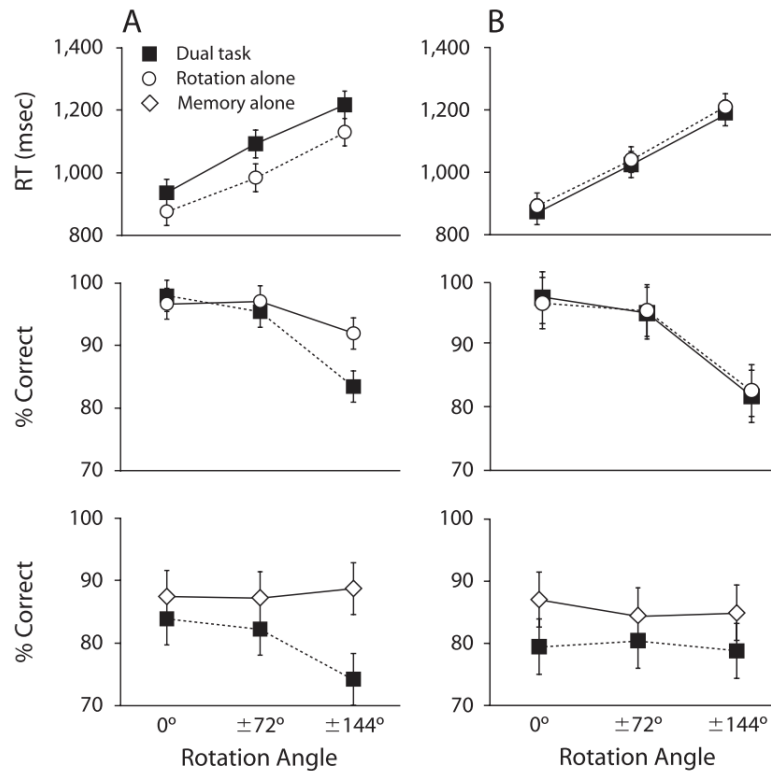


図 1.8 Hyun & Luck (2007) の実験結果 (Hyun & Luck, 2007, p.156, Fig.2)

左の 3 個のグラフ (A) は実験 1 に関する結果、右の 3 個のグラフ (B) は実験 2 に関する結果である。横軸は回転角度 (deg), 縦軸は上から順に、心的回転課題だけを行った場合と二重課題の場合の反応時間 (msec), 心的回転課題だけを行った場合と二重課題の場合の正答率 (%), 記憶課題だけを行った場合と二重課題の場合の正答率 (%) を示している。

まず実験 1 の結果 (図 1.8A) を見ると、反応時間は二重課題の場合と心的回転課題のみの場合で差があるが、回転率 (1° あたりの回転時間, グラフの傾き) は同様である。正答率を見てみると、記憶課題のみの場合に比べて、二重課題の場合は回転角度が大きくなると低下している。このことは、心的回転課題と視覚記憶課題が互いに干渉し合うことを示唆している。

次に、実験 2 の結果 (図 1.8B) を見ると、反応時間は二重課題の場合も心的回転課題のみの場合も大きな差はない。正答率を見てみると、記憶課題のみの場合に比べて二重課題の場合は低下しているが、回転角度とは独立である。このことは、心的回転課題と空間記憶課題は干渉しないことを示唆している。

以上のことから、文字に関する心的回転は視覚作業記憶を利用していると考えられる。

1.5 心的回転の学習効果

私たちは何かを繰り返し行くと、それを速やかに実行することが出来るようになったり、簡単に実行することが出来るようになる。これは学習効果と呼ばれる。心的回転にも学習効果があることが知られている。

1.5.1 図形依存性のある学習効果

Bethell-Fox & Shepard (1988) は心的回転は特定の図形に関して回転操作を繰り返し行うことにより、速やかに実行出来るようになることを示す実験を行った。Bethell-Fox & Shepard (1988) は 3×3 の格子の一部を塗りつぶした図形を刺激として用いた (図 1.9 参照)。

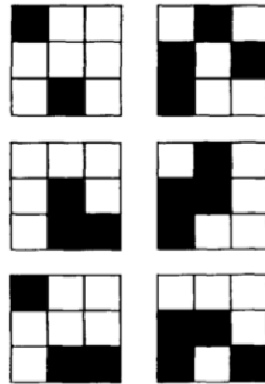


図 1.9 Bethell-Fox & Shepard (1988) が用いた刺激の一例 (Bethell-Fox & Shepard, 1988, p.17, Fig.3)

3×3 の格子の一部を塗りつぶした図形を刺激として用いた。

実験の手続きを図 1.10 に示す。実験参加者は初めに呈示されるひとつの図形を覚える。次に回転角度を指示する画面が呈示される。ここで、実験参加者は指示された回転角度通りに先ほど覚えた図形を頭の中で回転する。最後にテスト画面として図形が呈示される。実験参加者はそれが頭の中で回転したものと同じものか否かを判断し、回答する。ここで、回転角度を指示する画面を呈示してから実験参加者が回転操作終了を報告するまでを回転時間として記録した。

Bethell-Fox & Shepard (1988) はまず実験 1 として 16 個の図形を用いて実験を行った。16 個の図形はいくつのピースで構成されるかによって複雑さが定義されている。この結果、複雑な図形であるほど回転時間が長くなる傾向にあった。

次に実験 2 として心的回転を繰り返し行う実験を行った。実験参加者は実験 1 には参加していない参加者である。実験 1 で回転時間が最も短かった図形と長かった図形を用い、実験参加者は繰り返し心的回転を行った (心的回転の学習)。その後実験 1 で回転時間が中程度だった図形を 6 個加えた 8 個の図形を用いて心的回転を行った。結果を 1.11 に示す。横軸は回転角度 (deg)、縦軸は単位角度あたりの回転時間 (msec/deg) である。実験 1 の結果は単線で示され、実験 2 の結果は二重線で示されている。また、線上には 1° あたりの回転時間である回転率が示されている。回転率は値が小さいほど回転が速やかに出来ることを表す。

実験 1 では複雑であるほど回転時間が長かったが、実験 2 では複雑さに関わらず学習を行った図形の回転時間が短くなっている。また、学習を行っていない図形は、回転時間、回転率がほとんど変化してない。以上より、メンタルローテーションは学習を行うことにより回転時間が短縮されることが示された。また、この学習効果は学習した図形にのみ強く現れることが示唆された。

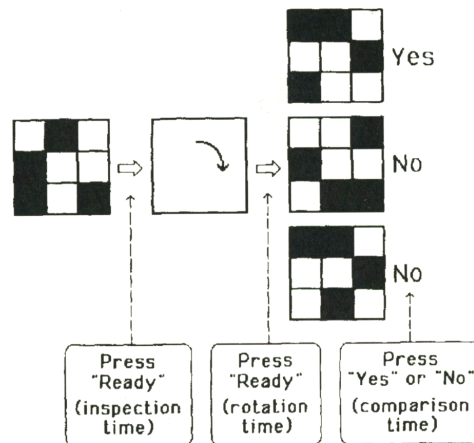


図 1.10 Bethell-Fox & Shepard (1988) の実験手続き (Bethell-Fox & Shepard, 1988, p.14, Fig.2)
 実験参加者は初めに呈示されるひとつの図形を覚える。次に回転角度を指示する画面が呈示される。ここで、実験参加者は指示された回転角度通りに先ほど覚えた図形を頭の中で回転する。最後にテスト画面として図形が呈示される。実験参加者はそれが頭の中で回転したものと同じものか否かを判断し、回答する。

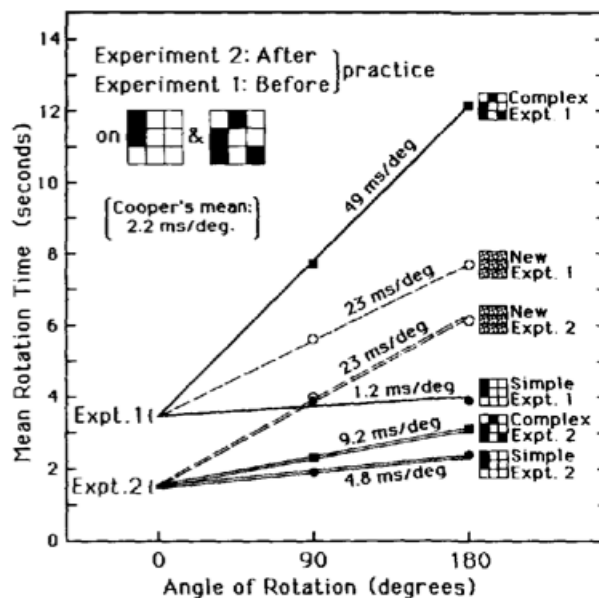


図 1.11 Bethell-Fox & Shepard (1988) の実験結果 (Bethell-Fox & Shepard, 1988, p.19, Fig.5)
 横軸は回転角度 (deg), 縦軸は単位角度あたりの回転時間 (msec/deg) である。実験 1 の結果は単線で示され、実験 2 の結果は二重線で示されている。また、線上には 1° あたりの回転時間である回転率が示されている。回転率は値が小さいほど回転が速やかに出来ることを表す。

1.5.2 心的回転の学習効果は何に起因するのか

Bethell-Fox & Shepard (1988) の実験では、学習により心的回転の実行時間が短縮されることが示された。しかし心的回転の繰り返しにより何が変化し実行時間が短縮されるのか、具体的な要因は解明されていない。そこで、Heil, Rösler, Link & Bajric (1998) は心的回転の学習が何によるものなのかを検証した。

Heil et. al. (1998) は Shepard & Metzler (1971) の実験で使った図形を用いた (1.3 参照)。ただし、回転軸は x,y,z 軸の 3 軸を設けた。図 1.12 に回転前の図形を各回転軸で回転した図形を示す。

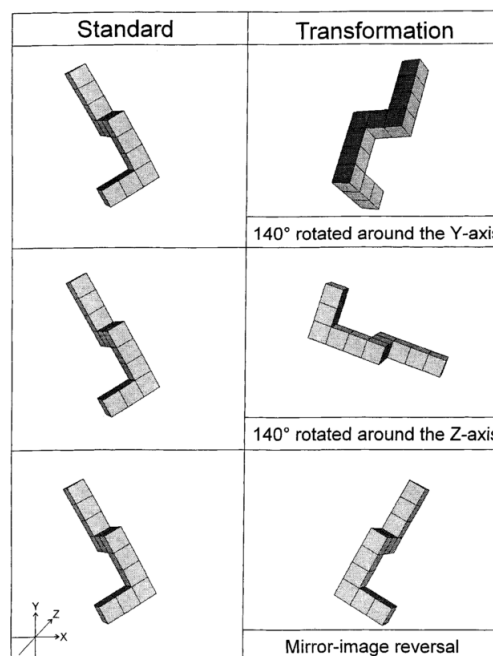


図 1.12 Heil et. al. (1998) が用いた図形と各軸に関する回転後の図形 (Heil et. al., 1998, p.101, Fig.1)

Shepard & Metzler (1971) と同様の図形を用いた。図形の回転軸は x,y,z 軸の 3 軸を設けた。左側の図形を x,y 軸で 140° 回転させたものが右側上段、中段に示されている。上段、中段は正像、下段は鏡像である。

実施する課題もまた、Heil et. al. (1998) は実験参加者を 2 グループに分けた。学習を行うグループ (プラクティスグループ) と行わないグループ (コントロールグループ) である。どちらのグループも 2 週間おきに 3 個のテストセッションを行う。ただし、プラクティスグループは第 1 テストセッションと第 2 テストセッションの間に 4 個のプラクティスセッションを実施した。プラクティスセッションでは一定の図形を一定の回転軸で回転する心的回転を繰り返し実施した。

実験結果を図 1.13 に示す。横軸は図形間の角度差 (deg)、縦軸は反応時間 (msec) である。また、O+P+はプラクティスグループが学習した図形、回転軸を用いて行われた条件である。O+P-はプラクティスグループが学習した図形を用いて行われた条件である。回転軸は学習していないものを用いる。O-P-はプラクティスグループが学習していない図形、回転軸を用いて行われた条件である。

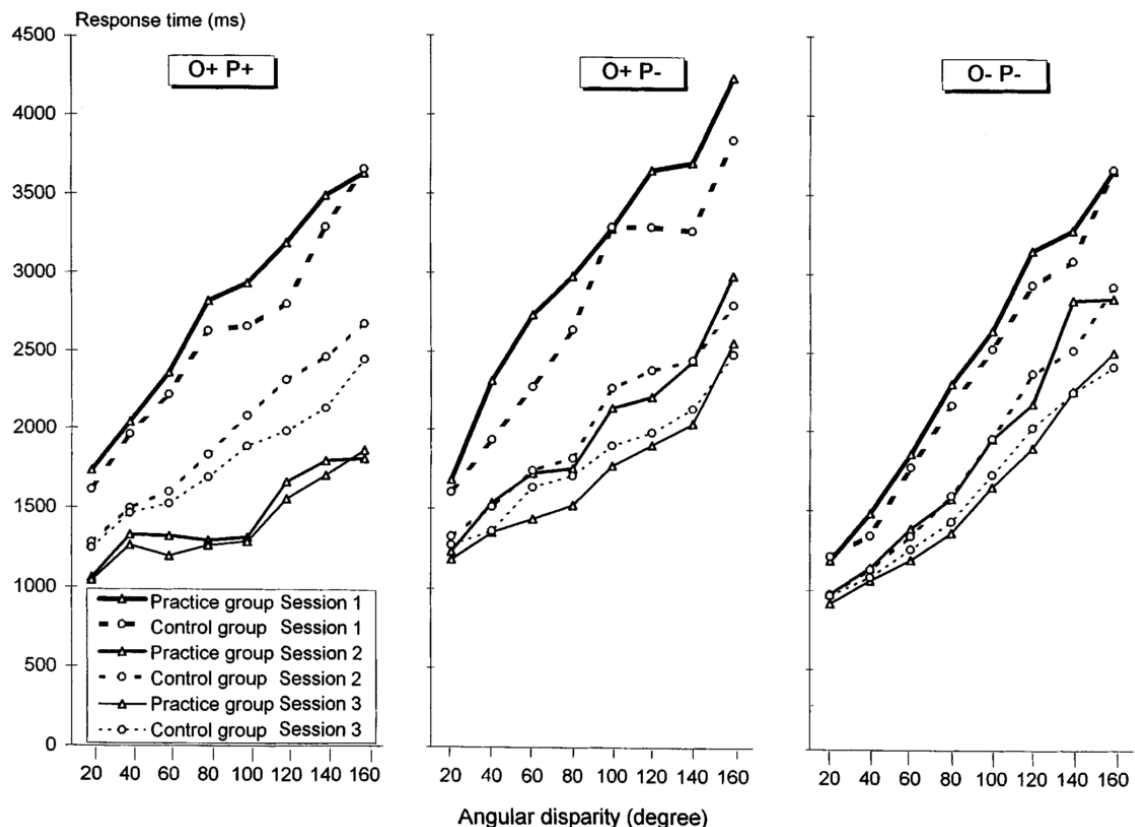


図 1.13 Heil et. al. (1998) の実験結果 (Heil et. al., 1998, p.103, Fig.3)

横軸は図形間の角度差 (deg), 縦軸は反応時間 (msec) である。また, O+P+はプラクティスグループが学習した図形, 回転軸を用いて行われた条件である。O+P-はプラクティスグループが学習した図形を用いて行われた条件である。回転軸は学習していないものを用いる。O-P-はプラクティスグループが学習していない図形, 回転軸を用いて行われた条件である。

この結果を見ると, O+P+条件では学習を行ったあとのテストセッションであるセッション2,3において, プラクティスグループの反応時間が大きく短縮されている。一方, O+P-, O-P-条件では両グループともセッションを重ねるごとに反応時間が短くなっているが, グループ間での差はない。

したがって, 学習効果は学習した図形, 学習した回転軸において強く現れていると言える。このことから, 一定の図形の心的回転の繰り返しによってその図形のさまざまな向きの表象が形成されていくことが考えられる。心的回転の学習では図形のさまざまな向きの表象が形成されることによって心的回転の実行時間が短縮されるのではないだろうか。すなわち, 心的回転は学習初期段階では心的操作によるものであったものが, 学習により記憶の想起によるものになり (対連合学習), そのために操作が速やかに実行されるようになると結論づけられた。

1.5.3 心的回転の学習効果の性質に関する実験

Heil et. al. (1998) は心的回転の学習効果が対連合学習によると説明した。しかし、彼らの実験結果は学習後でも反応時間が角度に依存して大きくなっている。これは学習後でもなお心的回転が行われていることを示唆する。また、学習効果には回転軸依存性が見られたが、さらに回転方向についても依存性は見られるだろうか。もし学習効果に回転方向依存性が見られれば、心的回転にはオブジェクトから独立した回転プロセスが存在する可能性が示される。

寺田・森田 (2011) はこれらを確認するため、心的回転の学習効果に回転方向依存性があるかを検証した。一定の図形を用い、一定の方向に回転する心的回転を繰り返し行なったあとでは、回転する方向によって回転速度の速やかさが異なるかを調べた。例えば、時計回りの回転操作を繰り返し行なったあと、時計回りの回転操作は速やかに実行出来るようになることが予想出来る。では、反時計回りの回転操作も速やかに実行出来るだろうか。もし、時計回りの回転操作の方が反時計回りの回転操作よりも速やかに実行出来た場合、心的回転の学習効果には回転方向依存性があると考えられる。心的回転の学習効果に回転方向依存性が存在すれば、回転プロセスそのものが学習されることが示される。

寺田・森田 (2011) は図 1.14 に示す図形を用いて心的回転課題を実施した。



図 1.14 寺田・森田 (2011) で用いた図形の一例

6 個の正方形をつなげて作成した図形を用いた。

まず一定の図形、一定の回転方向において心的回転を繰り返し行なった。その後、回転方向を学習時と反対方向へ回転するブロックを実施した。さらに、回転方向がランダムに変化する条件下で学習効果がどのような影響を受けるかを調べるため、回転方向が同一ブロック内でランダムに変化するブロックも実施した。

その結果を図 1.15 に示す。横軸は回転角度 (deg)、縦軸は回転時間 (msec) である。

学習と反対方向へ回転するブロックの結果を見ると、(図 1.15 上段) 学習最終ブロックに比べて学習時 (青いグラフ) と反対方向に回転するブロック (赤いグラフ) の回転時間が大きくなっていることがわかる。このことから、心的回転の学習効果には回転方向依存性があると考えられた。

次に、回転方向がランダムに変化するブロックの結果をしてみる (図 1.15 中段)。このグラフは、回転方向がランダムに変化するブロックの中で、学習方向に回転する場合 (緑実線) と学習方向と反対方向に回転する場合 (緑破線) とで分けてプロットしたものである。これを見ると、回転時間は学習方向に回転する場合と学習方向と反対方向に回転する場合では大きな違いはない。そこで、直前試行の回転方向に着目してデータを分析した (図 1.15 下段)。現試行と直前試行の回転方向が同じ場合 (緑実線) と現試行と直前試行の回転方向が反対の場合 (緑点線) とで比較を行った。すると、直前試行と同一方向の回転操作の方が反対方向の回転操作に比べて回転率 (1° あたりの回転時間; グラフの傾き) が小さくなっている。現試行の回転率

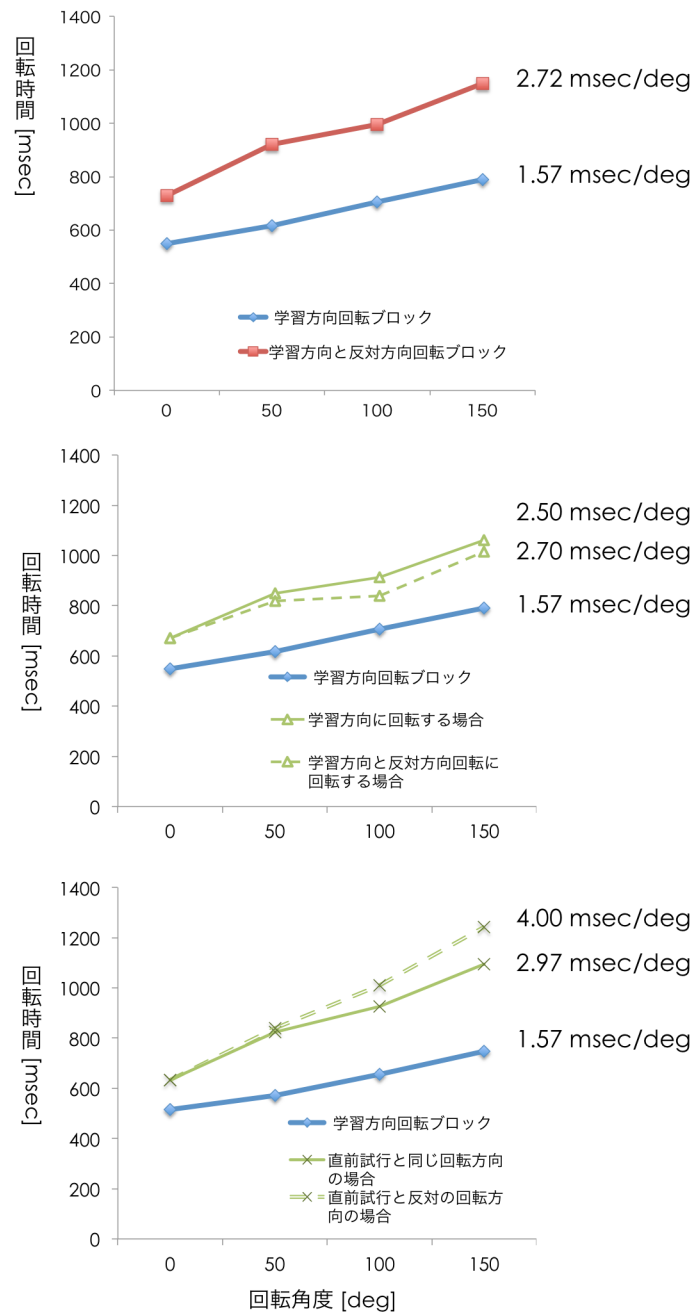


図 1.15 寺田・森田 (2011) の実験結果

横軸は回転角度 (deg), 縦軸は回転時間 msec である。上段は学習と同一方向へ回転するブロックおよび反対方向へ回転するブロックの結果, 中段は学習と同一方向へ回転するブロックと回転方向がランダムに変化するブロックの結果 (学習方向に回転する場合 (緑実線) と学習方向と反対方向に回転する場合 (緑破線) とで分けてプロット), 下段は学習と同一方向へ回転するブロックと回転方向がランダムに変化するブロックの結果 (現試行と直前試行の回転方向が同じ場合 (緑実線) と現試行と直前試行の回転方向が反対の場合 (緑点線) とで分けてプロット) である。

が直前試行の回転方向に左右されることから、これは回転方向のプライミング効果であると考えられる。(プライミング効果とは、先行する刺激によって、後に続く刺激の処理が促進されたり抑制されたりする効果のことである。)

以上より、心的回転の学習効果には回転方向依存性があると結論づけ、心的回転の学習では回転プロセスを学習することを示した。しかし、学習を行ったあとにも関わらず、回転方向がランダムに変化する条件下では回転方向に関する学習効果が見られなくなり、回転方向のプライミング効果が見られた。図 1.15 上段では学習方向の回転と学習方向と反対方向の回転で明確に差が見られたにも関わらず、プライミング効果で簡単に消えてしまうとは考えにくい。このため、この実験結果に関して再考が必要である。

1.6 寺田・森田 (2011) の再考

寺田・森田 (2011) の実験 (1.5.3 参照) では、心的回転の学習効果に回転方向依存性が見られた。しかし、学習を行ったあとにも関わらず、回転方向がランダムに変化する条件下では回転方向に関する学習効果が弱まり、回転方向のプライミング効果が観察された。図 1.15 上段では学習方向の回転と学習方向と反対方向の回転で明確に差が見られたにも関わらず、プライミング効果によって弱められることは考えにくい。したがって、この実験結果は組み合わせて考えてみると疑問の残るものとなっている。

1.6.1 回転方向依存性に関する再考

まず学習効果の回転方向依存性に着目して考えてみる。図 1.15 上段を見ると、学習方向と反対方向に回転するブロックは学習方向回転ブロックに比べて全体的に回転時間が増加している。回転時間では差が見られるが、回転率 (1° あたりの回転時間であり小さいほど回転が速やかであることを示す; グラフの傾き) では差はとても小さい。もし回転プロセスが学習されているならば、回転率に差が出るはずである。しかし、この結果では回転率というよりむしろ切片に差がある。一般的に回転率は回転操作を示し、切片は回転操作以外の処理 (ボタンを押すなど) を示していると考えられている。したがって、これは回転操作以外の処理に差が見られる結果だと言える。

ところで、Heil et. al. (1998) の実験 (1.5.2 参照) では、学習した図形かつ学習した回転軸についての回転操作において強く学習効果が見られた。これは、心的回転の学習によって学習した図形のさまざまな向きの表象が形成されることを示唆している。これ以降、図形の向きを表す言葉を方位と呼ぶこととする。学習した方位が表象として形成されることで心的回転が速やかに実行出来るようになると考えられる。つまり、学習した軸に関する回転操作というより学習時に見たり思い浮かべたりした方位が学習されるのではないだろうか。図 1.16 に学習される方位と学習されない方位を図示する。Heil et. al. (1998) の実験では 3 軸が用意されたが、ここでは簡単のため 1 軸についての回転のみとする。

図中には 2 個の図形が示されている。これらは同一の図形だが、方位が互いに異なる。(a) から (b) への回転操作を学習した場合、心的回転の学習により方位が学習されるのであれば、図中緑色にぬられた領域 (学習区間) に含まれる方位が (中間状態も含めて) 学習されると考え

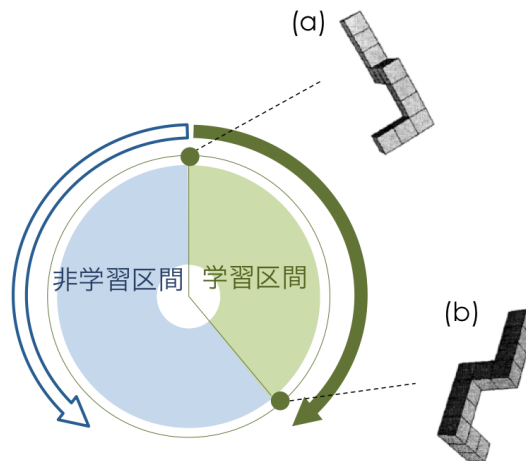


図 1.16 学習される方位と学習されない方位

2 個の図形は同一の図形だが、方位が互いに異なる。(a) から (b) への回転操作を学習した場合、心的回転の学習により方位が学習されるのであれば、図中緑色にぬられた領域 (学習区間) に含まれる方位が (中間状態も含めて) 学習されると考えられる。

られる。こう考えると、図中水色にぬられた領域 (非学習区間) に含まれる方位では学習効果が弱まることが予想される (学習効果の方位依存性)。

寺田・森田 (2011) では、学習後に行った学習方向とは反対方向へ回転するブロックにおいて、非学習区間で回転操作を行っていた。図 1.16 で例えれば、学習ブロックでは緑色の矢印 (回転方向を表す) および緑色にぬられた領域 (方位を表す) における心的回転を行った。一方、学習方向と反対方向へ回転するブロックでは青い白抜きの矢印および水色にぬられた領域における心的回転を行った。したがって、学習方向とは反対方向へ回転するブロックは、2つの要因 (回転方向と方位) が学習方向回転ブロックと異なっている。このため結果で得られた差が回転方向が異なることによるのか、方位が異なることによるのか、または2つの要因の相乗効果なのか切り分けることができない。

以上より、回転方向と方位を切り分けた実験条件のもとで再度回転方向依存性について検討する必要がある。

1.6.2 回転方向のプライミング効果に関する再考

次に、回転方向のプライミング効果に関する結果に焦点をあてる。寺田・森田 (2011) では一定の図形、一定の回転方向を用いて心的回転を繰り返し行なった後、回転方向がランダムに変化するブロックを実施した。その結果、学習した回転方向によらず、現試行の回転方向が直前試行の回転方向と同一方向か否かにより回転率 (1° あたりの回転時間) が左右されることが示された (図 1.15 下段参照)。

ところで、ここで観察された回転方向のプライミング効果は心的回転の学習後であった。学習した回転方向と学習していない回転方向を混合したことにより、回転方向のプライミング効果が見られたのか、心的回転一般において回転方向のプライミング効果が見られるのかは不明である。

回転方向のプライミング効果が見られることは、回転方向が心的回転において構成要素の1つであることを示唆する。寺田・森田(2011)の結果ではプライミング効果は回転率に作用した。回転率は回転プロセスの速やかさを表す値である。したがって「回転方向」は回転プロセスの一部である可能性が考えられ、回転操作対象であるオブジェクトとは独立した普遍的な回転プロセスが存在すると考えられる。このように考えると、回転方向のプライミング効果が見られるとき、普遍的な回転プロセスに当てはめた処理が行われていると言えるだろう。

もし心的回転に習熟していない場合にも回転方向のプライミング効果が現れるならば、心的回転を学習する前から普遍的な回転プロセスに当てはめた処理が行われていると考えられる。もしある程度心的回転を繰り返し行なったあとに回転方向のプライミング効果が現れる場合、学習初期では普遍的な回転プロセスに当てはめる以外の処理が行われ、プライミング効果が現れた時点で普遍的な回転プロセスに当てはめることが出来るようになるのだと考えられる。

回転方向のプライミング効果が心的回転をどの程度習熟すれば現れるのかを調べることにより、普遍的な回転プロセスに当てはめて処理が行われる段階を検証する。

1.7 本論文の目的

私たちは日常的にイメージ操作を行っているが、それがどのようなメカニズムなのかは明らかでない。本論文では心的回転に関する実験を通して、イメージ操作のメカニズムに関する手がかりを得ることを目指した。

具体的には、実験1でまず心的回転の学習効果の方位依存性および回転方向依存性を検証する。学習効果の方位依存性とは、学習した方位に強く学習効果が現れることである。学習効果の回転方向依存性とは、学習した回転方向での回転操作の場合に強く学習効果が現れることである。これらを調べることで、心的回転の学習では何が学習されるのかを明らかにし、心的回転にどのような機構が関与しているかを検証する。

さらに、実験2で一定方向の心的回転を学習する前にも回転方向のプライミング効果が現れるかを検証する。回転方向のプライミング効果が現れるならば、図形に関するサブシステムとは別のサブシステムが存在することが示唆される。このサブシステムが図形独立ならば、それは普遍的なプロセスである可能性が考えられる。また、もしある程度心的回転を繰り返し行なったあとに回転方向のプライミング効果が現れる場合、学習初期では普遍的な回転プロセスを用いない処理が行われ、回転方向のプライミング効果が現れた時点で普遍的な回転プロセスに当てはめることが出来るようになるのだと考えられる。回転方向のプライミング効果が学習前から現れるのか、また、どの段階で現れるのかを調べる。

これらの実験を通して得られた知見を用いて心的回転のモデルを提案する。

第2章 実験1

2.1 目的

心的回転の学習により、何が習熟されるかを調べるため、方位依存性および回転方向依存性を検討する認知心理実験を実施した。

もし心的回転の学習効果が学習した方位のみに強く現れるのであれば、心的回転の学習では連合学習がなされていることが示唆される。もし学習効果が学習した方位の中間状態の方位にも現れるのであれば、心的回転は中間状態を経過して行われていることが示される。

また、もし心的回転の学習効果が学習した方向のみに強く現れるのであれば、心的回転の学習は回転方向ごとに行われることが示唆される。これは、オブジェクトから独立した回転プロセスが存在することを示す。

心的回転の学習において何が習熟されるのかを明らかにし、心的回転のメカニズムを解明することを目指した。

2.2 方法

実施した認知心理実験について詳述する。なお、本実験の教示文と手続きを説明する際に使用した手続き説明書を付録として添付する。

2.2.1 実験参加者

正常な視力(矯正視力を含む)の19～24歳(平均年齢21.9歳)の大学生および大学院生35名(男性21名、女性14名)を実験参加者とした。実験参加者は全員、過去に心的回転を行う実験に参加したことはなかった。

2.2.2 実験環境

Matlabを用いて作成したコンピュータ制御プログラムにより実験を実施した。刺激の呈示にはCRTディスプレイ、反応にはキーボードのスペースキー、左カーソルキー、右カーソルキーを用いた。ディスプレイの表示サイズは縦30.5cm×横40.8cm、解像度は1280×1024であった。使用した機器を表2.1に示す。

実験は簡易暗室内で実施した。観察距離は80cmに設定した。実験参加者は顔面固定器により頭部を固定して実験に参加した。図2.1に観察環境の概略、図2.2に簡易暗室内の様子を示す。

表 2.1 使用機器

Matlab を用いて作成したコンピュータ制御プログラムにより実験を実施した。刺激の呈示には CRT ディスプレイ、反応にはキーボードのスペースキー、左カーソルキー、右カーソルキーを用いた。

	メーカー	機器名
制御用コンピュータ	Apple	Mac Pro(Mac OS X10.6.6)
CRT ディスプレイ	TOTOKU	CV921X
キーボード	DELL	SK-8115

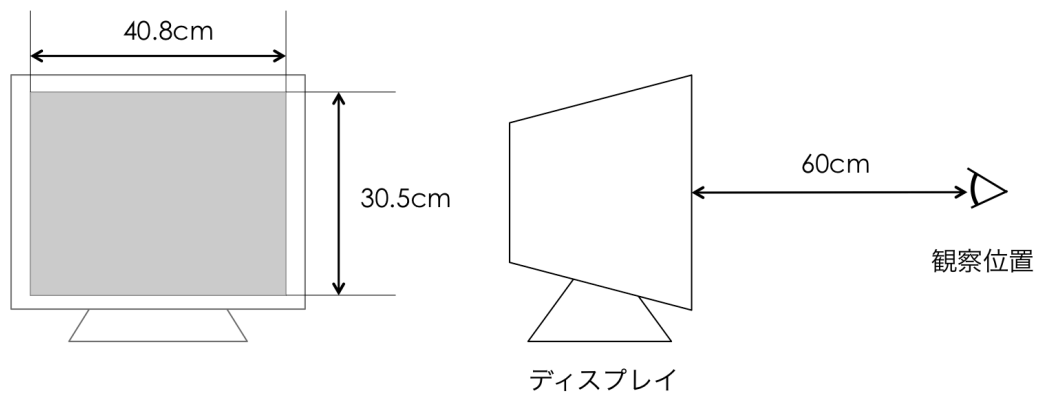


図 2.1 観察環境の概略

観察距離は 80cm に設定した。実験参加者は顔面固定器により頭部を固定して実験に参加した。ディスプレイの表示サイズは縦 30.5cm × 横 40.8cm，解像度は 1280 × 1024 であった。

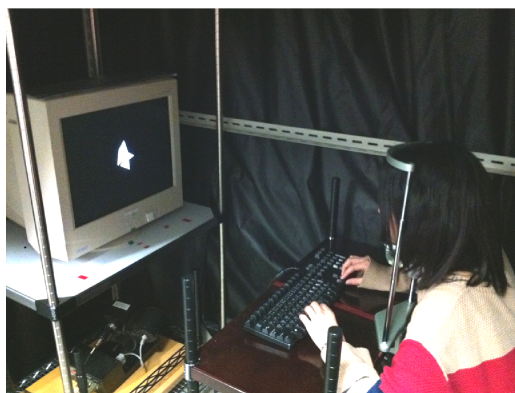


図 2.2 簡易暗室内の様子

実験は簡易暗室内で実施した。左にあるディスプレイに刺激を表示している。顔面固定器に頭部を固定しキーボードで操作を行なっている様子。

2.2.3 手続き

1 試行の流れを図 2.3 に示す。まず開始画面が呈示される。実験参加者はスペースキーを押して 1 試行を開始する。はじめにサンプル画面が 2000ms 呈示される。実験参加者はサンプルとして呈示されたパターンを覚える。アイコニックメモリの影響を除外するため 200ms のブランク画面をはさんだ後、回転角度指示画面が呈示される。実験参加者は矢印の方向に矢印の角度だけサンプルパターンを頭の中で回転するところをイメージする。それができたらスペースキーを押す。次にテスト画面が呈示される。ここで呈示されるパターンはサンプルパターンを回転角度通りに回転したものかサンプルパターンの鏡像を回転角度通りに回転したもののどちらかである。実験参加者は、正像の場合は左カーソルキー、鏡像の場合は右カーソルキーを押す。このキー押しはできるだけ素早くかつ正確に実行するよう教示した。以上で 1 試行が完了する。

ここで、回転角度が呈示されてからスペースキーが押されるまでの時間を回転時間、テストパターンが呈示されてから左または右カーソルキーが押されるまでの時間を判定時間として計測した。

なお、判定時間内に回転操作を行わないよう、判定時間には 1000ms の時間制限を設けた。もし判定時間が 1000ms をこえた場合には警告画面が 1000ms 間呈示される。

1 試行が終了すると、再び開始画面が呈示され、繰り返しとなる。実験参加者には開始画面が呈示されている間であれば適宜休憩をとることができると教示した。

2.2.4 刺激

サンプルパターンは乱数により生成した多角形を用いた。乱数により 10 点を生成し、それらをつなぎ内部をすべて塗りつぶした図形である。これを 50 個程度生成し、以下の基準により 8 個選び出し実験に用いた。

- 線のように細い部分がない
- ひとつの多角形に見える
- 正像と鏡像が似ていない
- 選び出す 8 個同士で類似していない

また、テストパターンはサンプルパターンかサンプルパターンの鏡像を回転角度指示画面で指示した角度で回転して作成した。

8 個の図形を 4 個ずつ 2 セットに分け、学習図形 (Old figure) と新奇図形 (New figure) として使い分けた。この割り当ては実験参加者間でカウンターバランスをとった。

図形は黒背景 (輝度 $0.01\text{cd}/\text{m}^2$) にグレー (輝度 $17.6\text{cd}/\text{m}^2$) で描画した。多角形であるため大きさに多少のばらつきがあるが、視角 $7.3^\circ \times 7.3^\circ$ の範囲に収まる大きさに呈示した。

使用した図形を図 2.4 に示す。

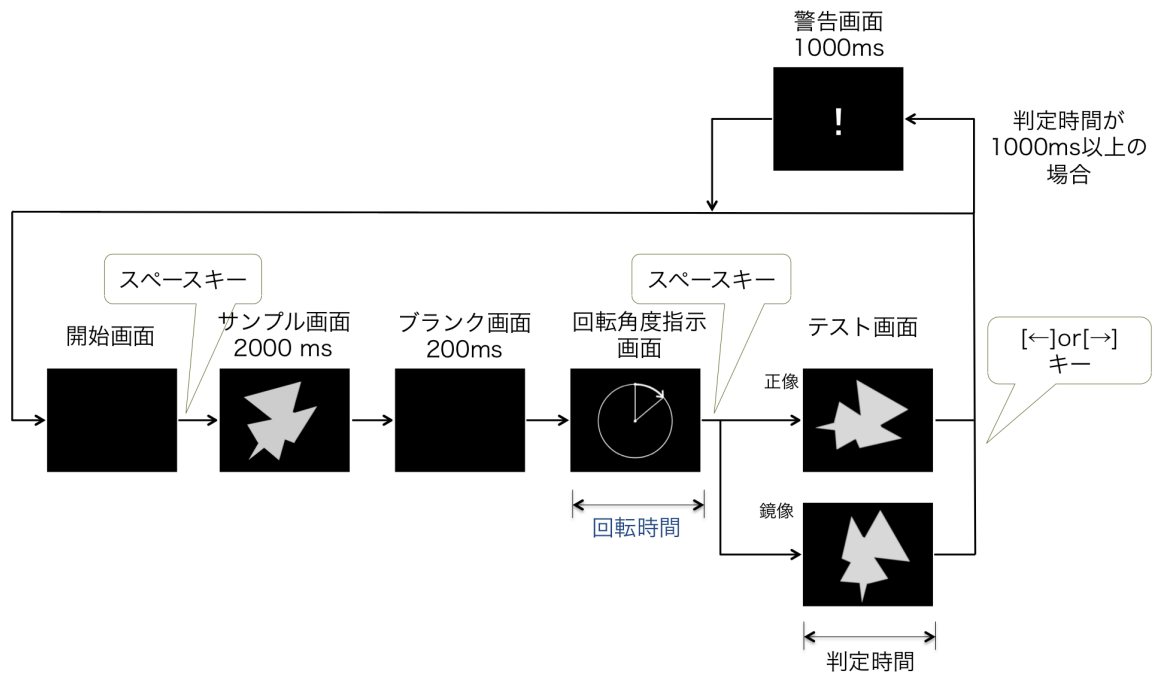


図 2.3 手続き

まず開始画面が呈示される。スペースキーを押して1試行を開始する。はじめにサンプル画面が2000ms呈示される。実験参加者はこのパターンを覚える。200msのブランク画面をはさんだ後、回転角度指示画面が呈示される。ここで矢印の方向に矢印の角度だけサンプルパターンを頭の中で回転するところをイメージする。回転が終了したらスペースキーを押すと、テスト画面が呈示される。テストパターンはサンプルパターンを回転角度通りに回転したものかサンプルパターンの鏡像を回転角度通りに回転したものである。実験参加者は、正像の場合は左カーソルキー、鏡像の場合は右カーソルキーを押す。以上で1試行が完了する。ここで、回転角度が呈示されてからスペースキーが押されるまでの時間を回転時間、テストパターンが呈示されてから左または右カーソルキーが押されるまでの時間を判定時間として計測した。もし判定時間が1000msをこえた場合には警告画面が呈示される。

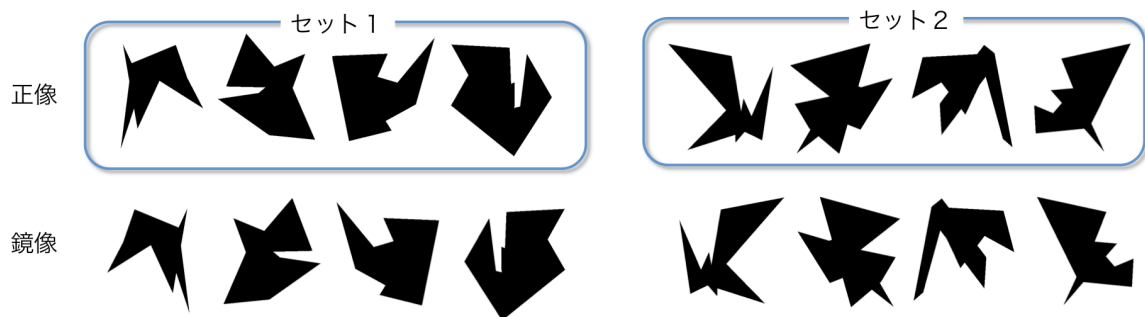


図 2.4 実験1で用いた図形とその鏡像（実験では黒背景に灰色で描画）

実験には乱数により生成した多角形を用いた。乱数により10点を生成し、それらをつなぎ内部をすべて塗りつぶした。8個の図形を4個ずつ2セットに分け、学習図形 (Old figure) と新奇図形 (New figure) として使い分けた。

2.2.5 デザイン

図 2.5 に実験の流れを示す。まず学習セッションを行い心的回転に習熟させた後テストセッションを行った。テストセッションでは方位依存性、回転方向依存性を調べるために方位 (Orientation)、回転方向 (Direction)、図形 (Figure) の 3 個の要素をそれぞれ変化させた 5 条件を設けた。

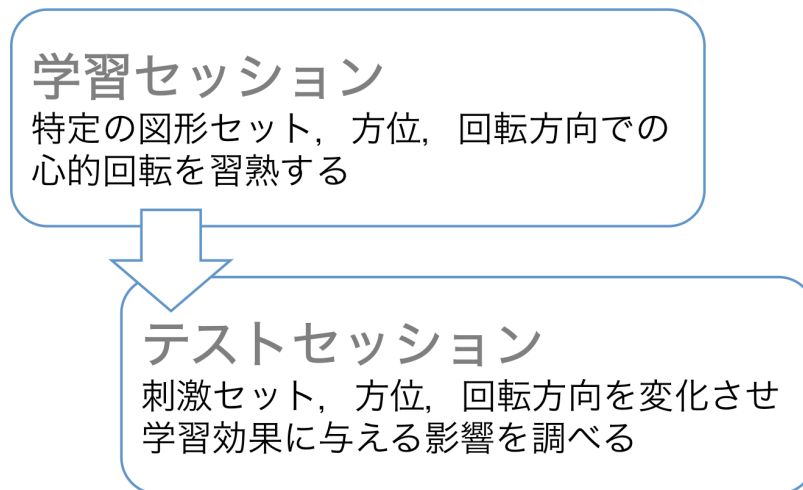


図 2.5 実験 1 の流れ

まず学習セッションを行い心的回転に習熟させた後テストセッションを行った。テストセッションでは方位依存性、回転方向依存性を調べるために方位 (Orientation)、回転方向 (Direction)、図形 (Figure) の 3 個の要素をそれぞれ変化させた 5 条件を設けた。

ここで方位とは、図形の向きのことである。図 2.6 は、同一の図形だが方位が異なる 3 個の刺激である。本稿では方位の大きさを角度で表現する。図形ごとにとある方位を 0° と定め、時計回りに回転した場合には正の角度、反時計回りに回転した場合は負の角度で表す。図 2.6 では (a) を 0° とし、(b) は (a) を時計回りに 45° 回転しているため 45° と表現し、(c) は反時計回りに 45° 回転しているため -45° と表現する。

なお、学習セッションの半分が終了した時点および学習セッションが終了した時点で、暗室から出て 5～10 分程度の休憩を設けた。

学習セッション

同じ図形セット (Old Figure) を用い、一定の方向 (Old Direction) に一定の方位 (Old Orientation) への回転操作を繰り返し行うことにより、一定の条件下での心的回転を習熟させる。学習に用いる図セットおよび回転方向は実験参加者間でカウンターバランスをとった。

サンプルパターンは図形ごとに決まっている 0° の方位に呈示される。回転角度は 0° (回転操作を行わないもの)、 80° 、 120° 、 160° に設定した。

128 試行 (図形 4 個、回転角度 4 個、テストパターン 2 種 (正像／鏡像)、繰り返し 4 回) で 1 ブロックとし、6 ブロック実施した。なお、学習の何ブロック目かを呼び分けるため、第一ブロックを Training1、第二ブロックを Training2、第三ブロックを Training3、... と表記する。



図 2.6 方位の異なる 3 刺激

同一の図形だが方位が異なる 3 個の刺激である。本稿では方位の大きさを角度で表現する。図形ごとにとある方位を 0° と定め、時計回りに回転した場合には正の角度、反時計回りに回転した場合は負の角度で表す。(a) を 0° とし、(b) は (a) を時計回りに 45° 回転しているため 45° と表現し、(c) は反時計回りに 45° 回転しているため -45° と表現する。

テストセッション

方位 (Orientation)、方向 (Direction)、図形 (Figure) の 3 個の要素を変化させた次の 5 個の条件を実施する。学習で用いたものをそれぞれ Old Orientation, Old Direction, Old Figure と表現する。なお、図 2.7 には条件ごとの回転方向と方位を図示した。(a) が学習図形 (Old Figure) を用いて回転操作を行うもの、(b) が新奇図形 (New Figure) を用いて回転操作を行うものである。まず各要素の変化について説明する。

方位 方位は学習時に設定しなかった新しい方位を用いた。学習区間に含まれる新しい方位のことを New Orientation, 非学習区間に含まれる新しい方位のことを Novel Orientation と呼ぶ。(New よりも Novel の方がより新奇であることを表す言葉である。) 学習区間とは、学習時に行った回転操作の範囲に含まれる方位の区間のことである。本実験では、学習セッションでは 0° から最大 160° までの回転操作を行った。このとき、学習区間は 0° から 160° までとなる。図 2.7 は、学習で緑色のバツ印 (サンプルパターンの方位) から緑色の各点までの回転操作を行ったことを表している。このとき、黄緑に塗りつぶされた区間が学習区間である。反対に、非学習区間とは学習時に行った回転操作に含まれない方位の区間のことである。図 2.7 では水色に塗りつぶされた区間が非学習区間となる。図 2.8 には、New Orientation と Novel Orientation の一例を示した。(a)~(d) は学習時に用いた方位である。このとき、(e) は学習区間に含まれる新しい方位のため New Orientation となり、(f) は学習区間に含まれない新しい方位のため Novel Orientation となる。

方向 方向は学習時と同じ方向か逆方向を用いた。学習時の方向は Old Direction, 学習時と逆方向は New Direction と呼ぶ。図 2.7 では緑の矢印を学習時に行った回転操作の方向としている。このとき、オレンジの矢印や水色の矢印は学習時と同じ方向である。一方、白抜きの矢印は学習時とは逆方向の回転操作である。

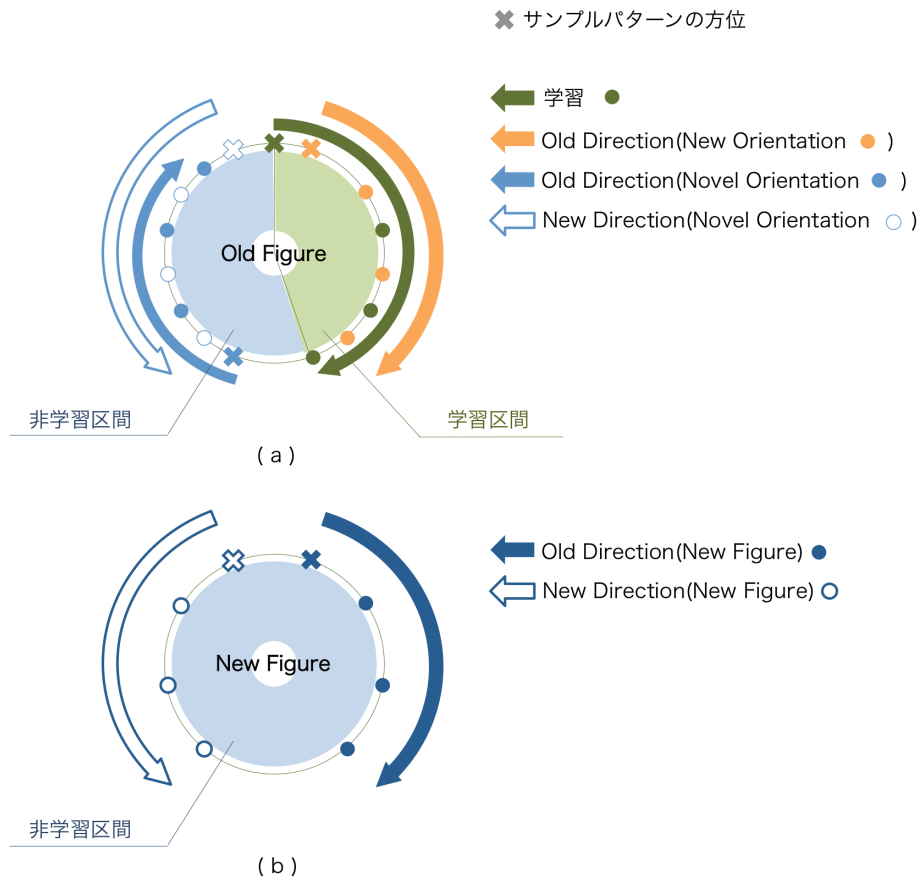


図 2.7 条件ごとの方位，回転方向，図形

緑で示した点，矢印をそれぞれ学習時の方位，回転方向とする。このとき，(a) の黄緑色にぬられた区間が学習区間となり，水色にぬられた区間が非学習区間になる。Old Direction(New Orientation) は学習区間内にある新しい方位 New Orientation での回転操作を行う ((a) オレンジ)。Old Direction(Novel Orientation) 条件は，非学習区間内にある新しい方位 New Orientation での回転操作を行う ((a) 水色)。New Direction(Novel Orientation) 条件は，学習時とは逆方向の回転操作を行う ((a) 白抜き水色)。Old Direction(New Figure) 条件は，学習時に使用しなかった図形セットを用いて回転操作を行う ((b) 紺)。New Direction(New Figure) 条件は，学習時に使用しなかった図形セットを用いて回転操作を行う ((b) 白抜き紺)。

図形 図形は学習時と同じ図セットおよび学習時に用いなかった図形セットを用いた。学習時と同じ図形セットを Old Figure，学習時に用いなかった図形セットを New Figure と呼ぶ。

次に，設定した 5 条件について説明する。表 2.2 にそれぞれの条件での要素の違いをまとめる。

Old Direction(New Orientation) 条件は，学習区間内にある新しい方位 New Orientation での回転操作を行う。回転操作を行う図形セットは学習時と同様のもので，回転方向も学習時と同じ方向だ。図 2.7 ではオレンジの点，矢印で示してある。サンプルパターンは方位 20° で呈示する。

Old Direction(Novel Orientation) 条件は，非学習区間内にある新しい方位 New Orientation での回転操作を行う。回転操作を行う図形セットは学習時と同様のもので，回転方向も学習時

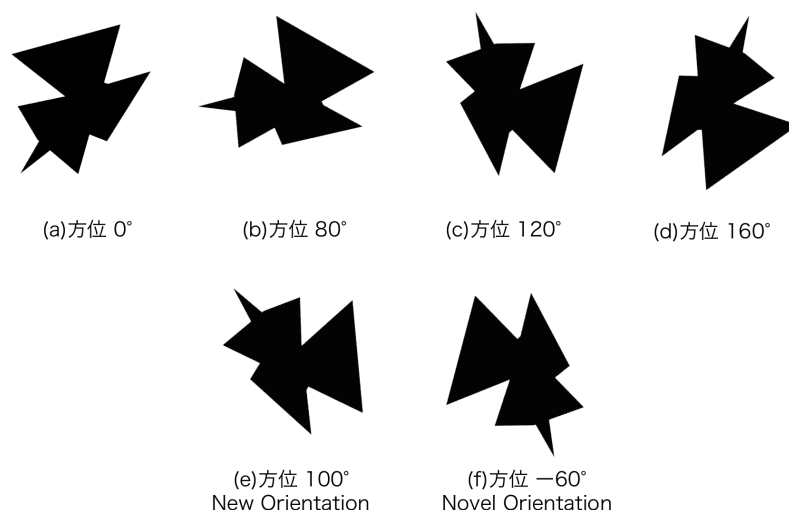


図 2.8 Old Orientation 全 4 通りと New Orientation および Novel Orientation の一例
(a)～(d) は学習時に用いた方位である。このとき，(e) は学習区間に含まれる新しい方位のため New Orientation となり，(f) は学習区間に含まれない新しい方位のため Novel Orientation となる。

表 2.2 実験 1 の条件

条件ごとに方位 (Orientation)，方向 (Direction)，図形 (Figure) の 3 要素がどのように異なるかをまとめた。学習と同じであることを Old と表す。学習とは異なるものを New または Novel と表す。

セッション	条件名	各要素		
		方位 (Orientation)	方向 (Direction)	図形 (Figure)
学習	Training1 - 6	Old	Old	Old
	Old Direction(New Orientation)	New	Old	Old
	Old Direction(Novel Orientation)	Novel	Old	Old
テスト	Old Direction(New Figure)	-	Old	New
	New Direction(Novel Orientation)	Novel	New	Old
	New Direction(New Figure)	-	New	New

と同じ方向だ。図 2.7 では水色の点，矢印で示してある。サンプルパターンは方位 -160° で呈示する。

New Direction(Novel Orientation) 条件は，学習時とは逆方向の回転操作を行う。方位は非学習区間内にある新しい方位 New Orientation を用いる。回転操作を施す図形セットは学習時と同様のものだ。図 2.7 では水色の白抜きの矢印で示してある。サンプルパターンは方位 -20° で呈示する。

Old Direction(New Figure) 条件は，学習時に使用しなかった図形セットを用いて回転操作を行う。回転方向は学習時と同様の方向である。図 2.7 では紺色の矢印で示してある。サンプルパターンは方位 20° で呈示する。

New Direction(New Figure) 条件は、学習時に使用しなかった図形セットを用いて回転操作を行う。回転方向は学習時とは逆方向である。図 2.7 では紺色の白抜き矢印で示してある。サンプルパターンは方位 -20° で呈示する。

なお、回転角度は 5 条件ですべて同様に 0° , 40° , 80° , 120° に設定した。ただし、サンプルパターンが学習時とは異なっている (図 2.7 参照) ため、回転後の方位は異なる。また、各条件は 1 ブロック 64 試行 (図形 4 個、回転角度 4 通り、テストパターン 2 種 (正像/鏡像)、繰り返し 2 回) としてそれぞれ 1 ブロック実施した。

テストセッション内の各条件実施順序は実験参加者間で次のようにカウンターバランスをとった。回転方向の反転する影響がを最小にするよう回転方向 (Old direction と New direction) ごとに条件をまとめたグループ間でカウンターバランスをとった。さらに Old direction の 3 個の条件の中で Old direction(new orientation) と Old direction(novel orientation) の順序についてカウンターバランスをとった。Old direction(new figure) と New direction(new figure) は、それぞれの回転方向のグループの最後に実施した。

結果の比較方法

学習セッションの最終ブロック (Training6) とテストセッションの 5 条件の間で回転操作の速やかさの比較を行う。

まず、学習効果の方位依存性を検討するため、Training6, Old Direction(New Orientation), Old Direction(Novel Orientation) を比較する。この 3 条件は回転方向や図形は同じで方位が互いに異なる (表 2.2 参照)。Training6 は学習効果が最大の条件である。もし Training6 と比較して Old Direction(New Orientation), Old Direction(Novel Orientation) の回転操作が遅くなった場合、方位が学習時と変化することによって学習効果が弱まると言える。つまり、方位依存性があると言える。また、New Orientation よりも Novel Orientation の方が回転操作が遅くなった場合、学習効果は学習区間内の方位の方が強く現れると言える。このことは、学習時に回転をイメージする際に途中で通過した方位も学習されることを示唆する。

次に、回転方向依存性を検討するために、まず Old Direction(Novel Orientation) と New Direction(Novel Orientation) を比較する。この 2 条件は、新奇の方位同士で、回転方向だけが異なる (表 2.2 参照)。もし Old Direction(Novel Orientation) よりも New Direction(Novel Orientation) の回転操作の方が遅くなれば、学習時と異なる回転方向での回転操作では学習効果が弱まると言える。つまり、回転方向依存性があると言える。しかし、これは学習時と同様の図形セットを用いた回転操作にのみ言えることである。そこで、図形セットに関係なく回転方向依存性が現れるかを調べるため、新奇の図形セットを用いた Old Direction(New Figure) と New Direction(New Figure) を比較する。もし Old Direction(New Figure) よりも New Direction(New Figure) の回転操作の方が遅くなれば、学習時に用いていない図形セットにおいても回転方向依存性があると言える。もし、回転操作の速やかさが回転方向に影響されない場合、特定の回転方向に特化した学習はなされないと言えるだろう。

2.3 結果

35 名分の実験参加者の回転時間，判定時間を計測した。なお，1 名は実験を終了することができなかったため分析時にはデータから除外した。また 4 名はテストセッションでの回転時間が回転角度に比例せず，判定時間が回転角度に比例していた。これは判定時間内に回転操作を行っていた可能性が高いため分析時にはデータから除外した。したがって，30 名分のデータを分析した。全ブロックの平均エラーレートは 6.85%であった。特出してエラーレートが高い実験参加者はいなかった。

正答かつ判定時間が 1000ms 以内の試行を分析対象とした。これは，判定時間が長い場合は，そこで判定だけではなく回転操作も行っていた可能性があるためである。分析に用いたデータは全体の 88.7%だった。

2.3.1 回転率

実験参加者ごとに，各ブロックでの回転時間の回転率を算出した。回転率とは， 1° あたりの回転時間である。各回転角度における回転時間 (または判定時間) の幾何平均を算出し，それを従属変数，回転角度を独立変数として

$$y = ax + b$$

に線形回帰したとき， a が回転率となる。これが小さいほど回転操作が速やかと言える。

回転時間と判定時間それぞれの回転率を表 2.3，図 2.9 に示す。図 2.9 では横軸がブロック，縦軸が回転率 [msec/deg] である。なお，テストセッションのブロック名は長いため，グラフでは次のように省略する。Orientation を Ori，Direction を Dir，Figure を Fig とし，例えば Old Direction(New Orientation) ブロックは Old Dir(New Ori) と書く。

表 2.3 実験 1 におけるブロックごとの回転率

回転率とは， 1° あたりの回転時間である。ブロックごとに回転時間と判定時間からそれぞれ回転率および決定係数を計算した。

ブロック名	回転時間から計算		判定時間から計算	
	回転率 [msec/deg]	決定係数 R^2	回転率 [msec/deg]	決定係数 R^2
Training 1	11.76	0.919	0.74	0.871
Training 2	8.977	0.931	0.694	0.918
Training 3	7.409	0.972	0.664	0.97
Training 4	4.586	0.938	0.605	0.914
Training 5	4.245	0.962	0.521	0.978
Training 6	3.07	0.917	0.46	0.945
Old Direction(New Orientation)	3.612	0.986	0.514	0.69
Old Direction(Novel Orientation)	6.121	0.999	0.908	0.927
Old Direction(New Figure)	7.092	0.999	1.078	0.982
New Direction(Novel Orientation)	5.689	0.999	0.956	0.957
New Direction(New Figure)	6.138	0.991	1.005	0.88

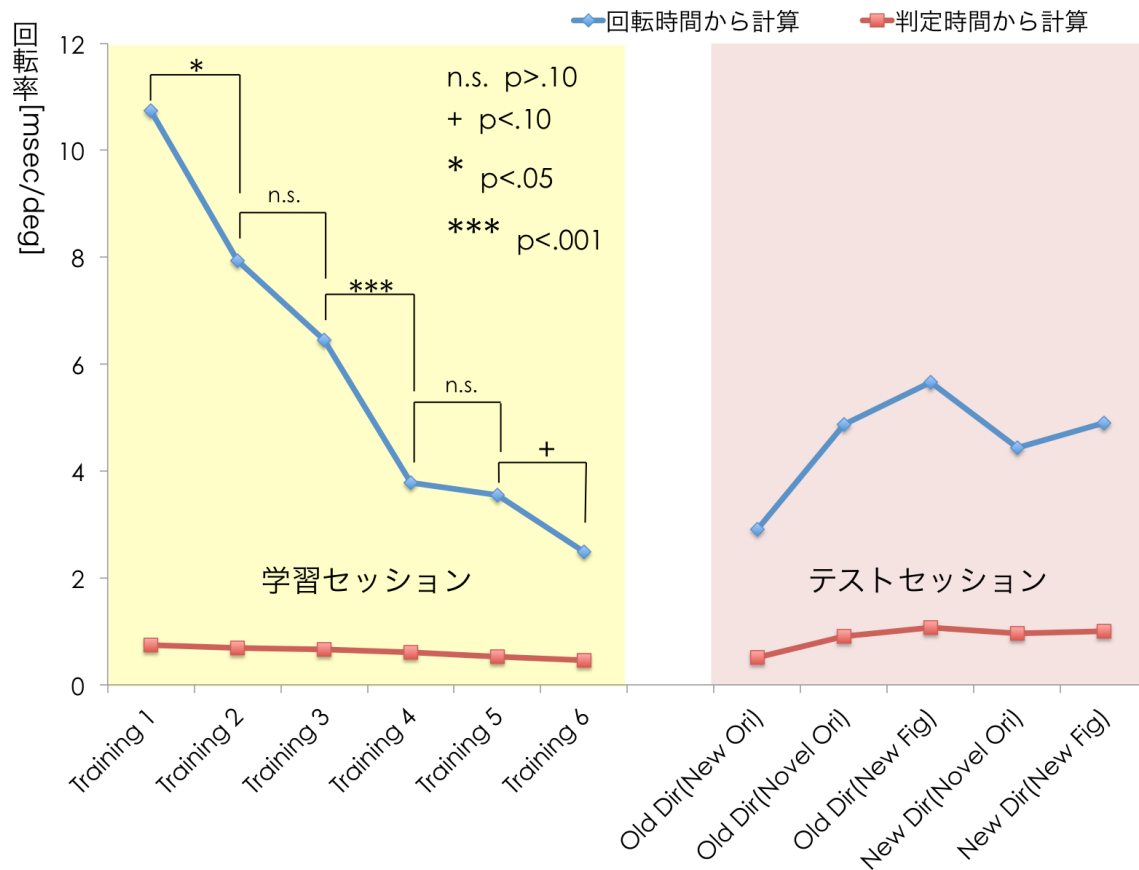


図 2.9 実験 1 におけるブロックごとの回転率

横軸がブロック、縦軸が回転率 [msec/deg] である。回転時間から計算した回転率を青い折れ線グラフ、判定時間から計算した回転率を赤い折れ線グラフでプロットした。なお、テストセッションのブロック名は長いので、グラフでは次のように省略する。Orientation を Ori, Direction を Dir, Figure を Fig とし、例えば Old Direction(New Orientation) ブロックは Old Dir(New Ori) と書く。黄色い背景は学習セッション、ピンクの背景はテストセッションである。

グラフから読み取れるように、判定時間の回転率は回転時間のそれに比べじゅうぶん小さく (回転時間の回転率の標準偏差の 15% 程度)、この時間内に回転操作を行っていたとは考えにくい。したがって回転時間内にきちんと回転操作を行っていたと考えられるため、以降は回転時間にのみ着目する。

2.3.2 心的回転の学習

本実験は学習効果の性質を調べることを目的としているため、まず学習セッションにおいて心的回転の学習が行われたかを調べる。表 2.3 および図 2.9 を見ると、Training 1~Training 6 を見ると、徐々に回転率が低下しており回転操作が速くなったことがわかる。このことを統計的に確かめるため、ブロックを要因とした 1 要因 6 水準の分散分析を実施した。その結果、ブロックの主効果がみられた ($F(5, 150) = 33.766, p < .001$)。さらに多重比較を行ったところ、

学習最終ブロックである Training6 と他の 5 ブロックの間には有意差または有意傾向がみられた (Training1 との間は $p < .001$, Training2 との間は $p < .001$, Training3 との間は $p < .001$, Training4 との間は $p < .05$, Training5 との間は $p < .10$, 図 2.9 参照)。したがって Training6 は他のブロックより回転率が小さく, 速やかに回転操作が行えていたと言える。このことは, 本実験でも先行研究同様に心的回転の学習を行うことができたことを示している。

2.3.3 エラーレート

ブロックごとのエラーレートを表 2.4, 図 2.10 に示す。なお, 図 2.10 は棒グラフがエラーレート, 折れ線グラフが回転時間から計算した回転率である。横軸がブロック, 左の縦軸がエラーレート [%], 右の縦軸が回転率 [$msec/deg$] である。

表 2.4 実験 1 におけるブロックごとのエラーレート

1 ブロック中, 間違えた試行数の割合 (エラーレート) をブロックごとに算出した。

ブロック名	エラーレート [%]
Training 1	16.59
Training 2	9.69
Training 3	6.98
Training 4	5.03
Training 5	3.57
Training 6	3.39
Old Direction(New Orientation)	2.45
Old Direction(Novel Orientation)	5.57
Old Direction(New Figure)	8.13
New Direction(Novel Orientation)	5.83
New Direction(New Figure)	8.18

グラフを見ると, 学習セッションでは徐々にエラーレートが小さくなっていることがわかる。テストセッションでは, 回転操作が速やかであるブロックほど, エラーレートも小さくなっている。このことから, 速さと正確さのトレードオフはほぼなかったと考えられる。

2.3.4 学習した図形セットの違いによる影響

実験では図形を 2 セットに分け, 一方のセットを用いて心的回転の学習を行った。どちらのセットを用いるかは実験参加者間でカウンターバランスをとっているが, そもそも使用した図形セットにより心的回転の難しさに差がないことを確認するため, 次の検定を実施した。学習セッションの各ブロックにおける回転率に対して, 学習に用いた図形セットを要因とした被験

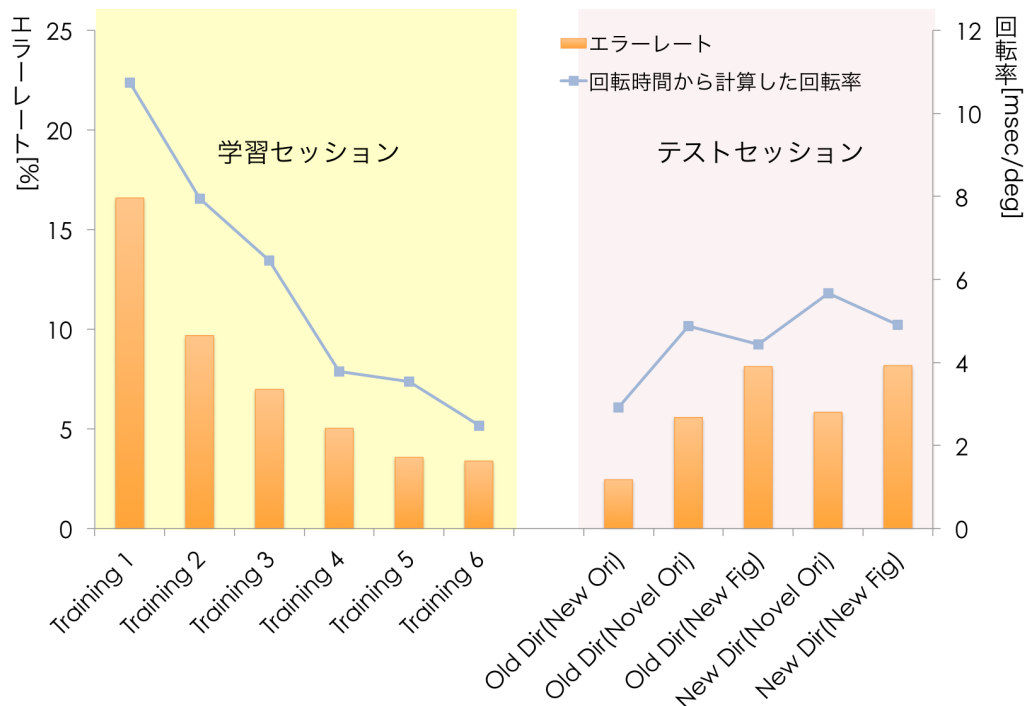


図 2.10 実験 1 におけるブロックごとのエラーレート

棒グラフがエラーレート、折れ線グラフが回転時間から計算した回転率である。横軸がブロック、左の縦軸がエラーレート [%]、右の縦軸が回転率 [msec/deg] である。

者間の t 検定を行った。その結果、どのブロックでも有意差はみられなかった (Training1 では $t(28) = .272, p > .05$, Training2 では $t(28) = .168, p > .05$, Training3 では $t(28) = .756, p > .05$, Training4 では $t(28) = .797, p > .05$, Training5 では $t(28) = .826, p > .05$, Training6 では $t(28) = .878, p > .05$)。したがって、図形セットによる心的回転の速やかさに差はなかったと考えられる。

2.3.5 方位依存性の検討

学習した回転方向において、学習効果の方位依存性を調べるため、Training 6 と Old direction(new orientation) と Old direction(novel orientation) を比較する。図 2.11 はこの 3 条件の回転率を抜き出して並べたものである。横軸はブロック、縦軸は回転率 [msec/deg] である。

これを見ると、Old direction(new orientation) は Training 6 と同程度である。一方、Old direction(novel orientation) は Training6 より回転率が低下していることが読み取れる。

このことを統計的に確かめるため、Training 6, Old direction(new orientation), Old direction(novel orientation) の 3 個のブロックを抜き出し、ブロックを要因とした 1 要因 3 水準の分散分析を行ったところ、主効果が有意であった ($F(2, 60) = 12.856, p < .001$)。さらに多重比較を行うと、Training6 と Old direction(new orientation) の間には有意差はなかったが ($p > .10$), Training 6 と Old direction(novel orientation) の間および、Old direction(new orientation) と Old direction(novel orientation) の間で有意差が見られた (それぞれ $p < .01, p < .001$)。

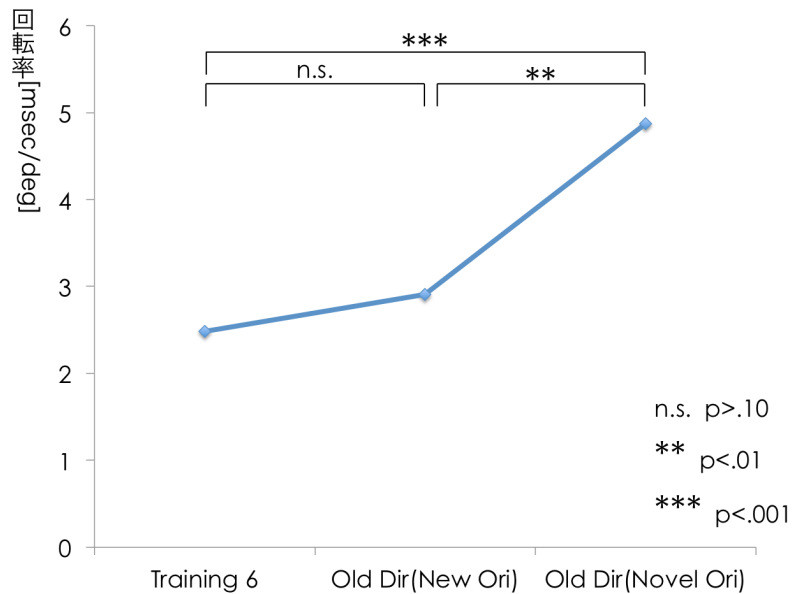


図 2.11 方位の異なる 3 条件の回転率の比較

Training 6 と Old direction(new orientation) と Old direction(novel orientation) の回転率を抜き出して並べた。横軸はブロック、縦軸は回転率 [msec/deg] である。

2.3.6 回転方向依存性の検討

学習効果の回転方向依存性を調べるため、学習時に経験していない方位を用いた Old direction(novel orientation) と New direction(novel orientation), 学習時に経験していない図形を用いた Old direction(new figure) と New direction(new figure) をそれぞれ比較する。図 2.12 はこの 4 条件の回転率を抜き出して並べたものである。横軸はブロック、縦軸は回転率 [msec/deg] である。

これを見ると、それぞれの条件ペアの間で Old Direction と New Direction の間には大きな差は見られない。

このことを統計的に確かめるため、Old direction(novel orientation) と New direction(novel orientation) で対応のある t 検定を行ったところ、両者の間に有意差は見られなかった ($t(30) = .728$, $p > .472$)。また、Old direction(new figure) と New direction(new figure) に対応のある t 検定を行ったところ、両者の間に有意差は見られなかった ($t(30) = .831$, $p > .413$)。

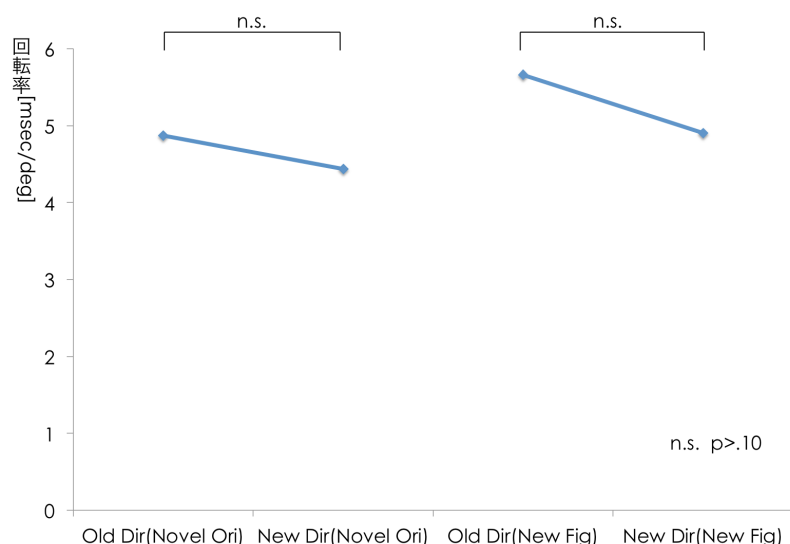


図 2.12 回転方向が互いに異なる 2 ペア（4 条件）の回転率の比較

学習時に経験していない方位を用いた Old direction(novel orientation) と New direction(novel orientation), 学習時に経験していない図形を用いた Old direction(new figure) と New direction(new figure) の回転率を抜き出して並べた。横軸はブロック、縦軸は回転率 [msec/deg] である。

2.4 考察

心的回転の学習により何が習熟されるのかを調べるため、心的回転の学習効果の方位依存性および回転方向依存性を実験 1 により検証した。学習効果の方位依存性を調べることにより、オブジェクトの特定の方位が学習されるのか、もしくは心的回転を行う際に通過する中間状態の方位も学習されるのかを調べた。例えば、 0° の方位から 90° の方位への回転操作を学習した場合、中間にある 45° の方位への回転操作にも学習効果が及ぶかどうか、ということである。もし中間状態にも学習効果が及ぶのであれば、心的回転では中間状態も含めて学習されると言える。また、学習効果の回転方向依存性を調べることにより、回転方向が学習されるかを調べた。回転方向が学習されるのであれば、オブジェクトとは独立した回転プロセスが存在することが示される。実験の結果、それぞれについて以下の結果を得た。

まず方位依存性に関する結果だが、Old Direction(New Orientation) は Training 6 と同程度の回転率であった。このことから、学習区間内にあるが学習時には見たことのない方位である New Orientation での回転操作では学習効果は弱まらず、New Orientation にも学習効果が及んでいると考えられる。したがって、心的回転の学習において、学習区間内の中間状態の Orientation も学習されることが示唆された。一方 Old Direction(Novel Orientation) は Training 6 より有意に回転率が低下した。このことから、学習区間外にある新奇の方位である Novel Orientation では学習効果が弱まった考えられる。したがって、学習区間外の方位への回転操作では、学習効果が弱まることが示唆された。つまり、心的回転の学習ではオブジェクトごとに学習されることが分かっているが (Bethell-Fox & Shepard, 1988), 特にそのオブジェクトにおいて学習区間内の方位がよく学習されることが考えられる。この結果は Heil et. al. (1998) の結果とも一致する。

次に、回転方向依存性に関する結果だが、学習区間外の方位における回転方向による差を見るために Old Direction(Novel Orientation) と New Direction(Novel Orientation) を比較したが有意な差はなかった。加えて、学習時に用いなかった図形セットを用いる Old Direction(New Figure) と New Direction(New Figure) の間にも有意な差はなかった。このことから、心的回転の学習効果には回転方向依存性はないと考えられる。ところで、学習時に用いなかった図形セットを用いて学習とは反対方向へ回転する New Direction(New Figure) は、学習をまったく行っていない条件である。それにも関わらず、学習初期段階よりも回転操作は速やかであった。これは、実験環境への慣れだけによるものとは考えにくく、学習により心的回転一般に関するものが学習されたと予想できる。このことから、学習していない回転方向への回転操作の速やかさが低下しなかったことは、どちらの回転方向への回転操作も学習したためであると考えられる。したがって、心的回転の学習は非学習方向への回転操作に転移することが示唆された。

以上のことから、本実験では心的回転の学習効果は学習区間内にある方位にも現れることが確認できた。このことは、心的回転の学習では回転操作を施すオブジェクトにおいて、学習時に見た方位および中間状態として経由した方位が学習されることを示す。また、心的回転の学習効果は非学習方向への回転操作に転移することが示唆された。したがって、寺田・森田(2011)で示された回転方向依存性は、学習を行っていない方位への回転操作だったため、学習効果が弱かった結果であると言える。

心的回転の学習では、中間状態として経由した方位が学習された。このことより、回転操作を施すオブジェクトが連続的な方位のオブジェクト表象になっており、その中で活性状態を遷移させることで心的回転を行っていることが考えられる。連続的な方位のオブジェクト表象とは、図 2.13(a) に示すように同じオブジェクトに関して、少しずつずれた方位で賦活するニューロンが隣り合っているものである。この中で活性状態を遷移させることで心的回転が行われる。ここで、図 2.13(b) 中の緑で示した遷移で行われる心的回転を繰り返したとき、ニューロン間のつながりは徐々に強固なものになる。図 2.13(c) はニューロン同士を結ぶシナプス結合が強められたことを太い線で示した。結合が強められた中(学習区間)に含まれるため中間の方位(オレンジ)へも学習効果が及ぶこととなる。

ところで、このモデルでは説明できない点がある。まず、遷移する方位はどの方向かどのように決定しているのかという点である。また、遷移を止める方位はどこかどのように判断しているのかという点である。これらを行なう機構が別であり、その機構から命令が出されることで制御を行っていると予想する。この機構が存在することを確認、またどのような機構になっているかを調べるために、寺田・森田(2011)で観察された回転方向のプライミング効果を検証することは有効だと考える。オブジェクトに関係なく回転方向のプライミング効果が観察できれば、それはオブジェクトとは独立した機構が存在することを示すだろう。加えて、その機構がどのようなものかを検討する手がかりにも成り得る。回転方向のプライミング効果を検証するため、実験 2 を実施した。

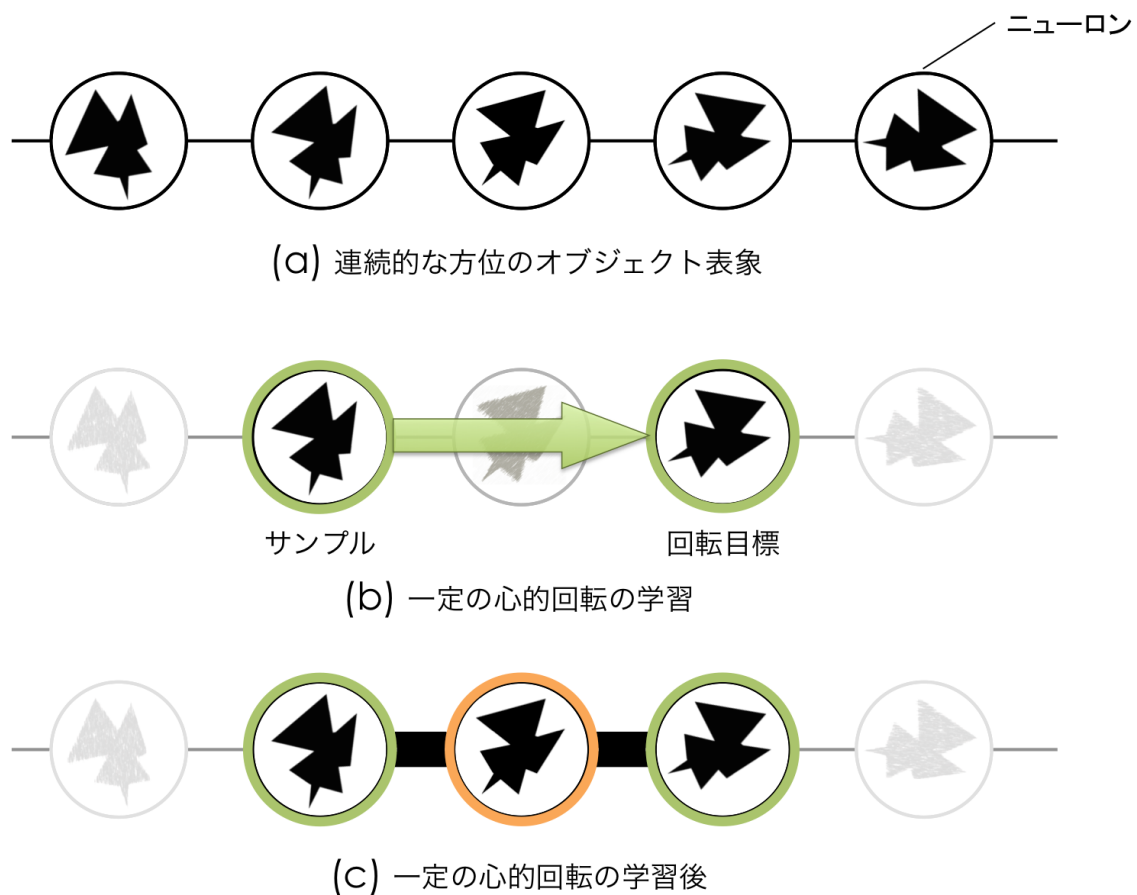


図 2.13 連続的な方位のオブジェクト表象における学習

連続的な方位のオブジェクト表象とは、同じオブジェクトに関して、少しずつずれた方位で賦活するニューロンが隣り合っているものである。この中で活性状態を遷移させることで心的回転が行われる。ここで、(b) 中の緑で示した遷移で行われる心的回転を繰り返し行なったとき、ニューロン間のつながりは徐々に強固なものになる。(c) はニューロン同士を結ぶシナプス結合が強められたことを太い線で示した。結合が強められた中 (学習区間) に含まれるため中間の方位 (オレンジ) へも学習効果が及ぶこととなる。

第3章 実験2

3.1 目的

オブジェクトから独立した回転プロセスが存在するかを確かめるため、認知心理実験を実施した。本実験では寺田・森田 (2011) で確認された回転方向のプライミング効果が回転方向がランダムに変化したために現れた現象であるのか、学習方向と非学習方向を同一ブロック内で混合したために現れた現象であるかを検証した。

もし学習前においても現試行回転方向が直前試行の回転方向と同一方向である場合より逆方向である場合に回転の速やかさが低下するなら、回転方向のプライミング効果があることが言え、このプライミング効果がオブジェクトを越えた効果であり、オブジェクトとは独立した回転プロセスが存在することを示すだろう。

3.2 方法

実施した認知心理実験について詳述する。なお、本実験の教示文を付録として添付する。

3.2.1 実験参加者

正常な視力 (矯正視力を含む) の 18～24 歳 (平均年齢 20.9 歳) の大学生および大学院生 43 名 (男性 22 名, 女性 21 名) を実験参加者とした。実験参加者は全員、過去に心的回転を行う実験に参加したことはなかった。

3.2.2 実験環境

実験 1 と同様の装置を用い、同様の環境下で実施した。実験 1 の実験環境については p.18 の第 2.2.2 節を参照のこと。

3.2.3 手続き

実験 1 と同様の手続きを用いた。実験 1 の手続きについては p.20 の第 2.2.3 節を参照のこと。

3.2.4 刺激

実験1で用いた図形に、新たに4個の図形を加え、12個の図形を用いた。新たに生成した図形は実験1と同様の手法で生成した。6個を1セットとし、2セットに分け、実験参加者ごとに使い分た。これはどの図形を使用したかによる差を少なくするためである。どちらのセットを用いるかは実験参加者間でカウンターバランスをとった。使用した図形を図3.1に示す。

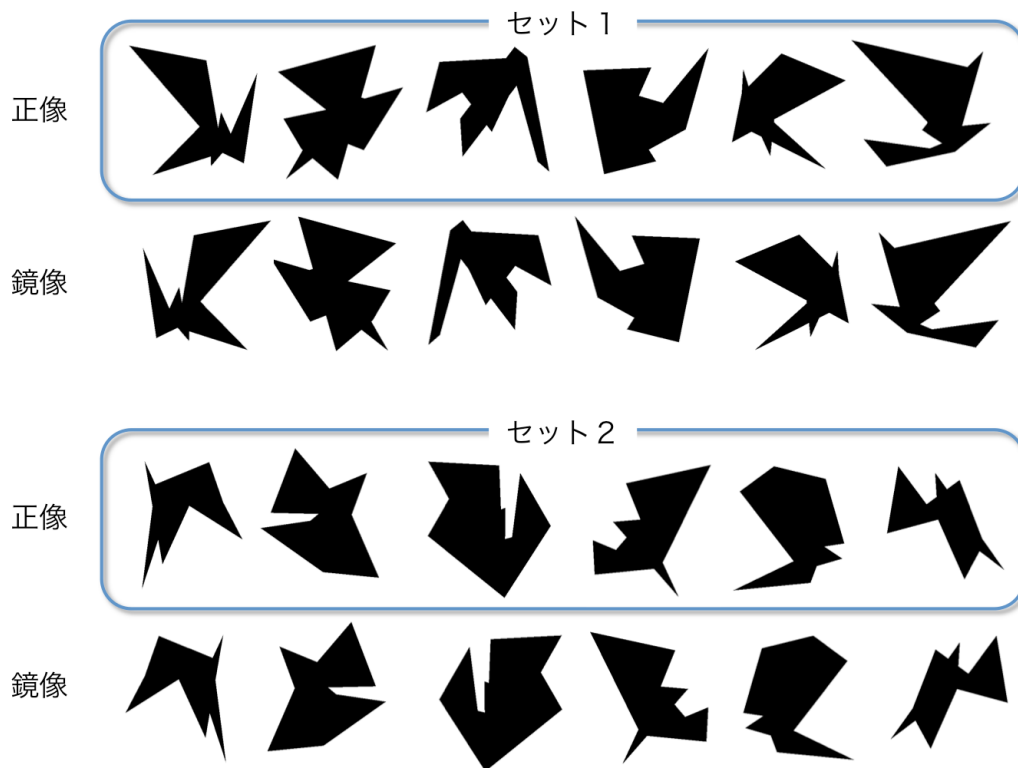


図 3.1 実験2で用いた図形（実験では黒背景に灰色で描画）

実験1で用いた図形に、新たに4個の図形を加え、12個の図形を用いた。新たに生成した図形は実験1と同様の手法で生成した(乱数により生成した10点をつなぎ、内部をすべて塗りつぶして図形を作成した)。6個を1セットとし、2セットに分け、実験参加者ごとに使い分た。これはどの図形を使用したかによる差を少なくするためである。

3.2.5 デザイン

図3.2に実験デザインの概要を示す。回転方向のプライミング効果を検証するため、1ブロック内で回転方向をランダムに変化させた。回転方向は二次元の回転操作のため時計回りと反時計回りである。回転角度は $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 70^\circ$ 、 $\pm 110^\circ$ 、 $\pm 150^\circ$ とした。これはサンプルパターンの方位を 0° と決め、そこから時計回りの回転操作を行う場合を正の角度、反時計回りの場合を負の角度で表している。

回転方向が直前試行と同一条件 (Repeat 条件)、回転方向が直前試行と反対方向になる条件 (Change 条件) が同じブロック内に存在する。図3.3は、ブロックの冒頭の試行の回転方向を

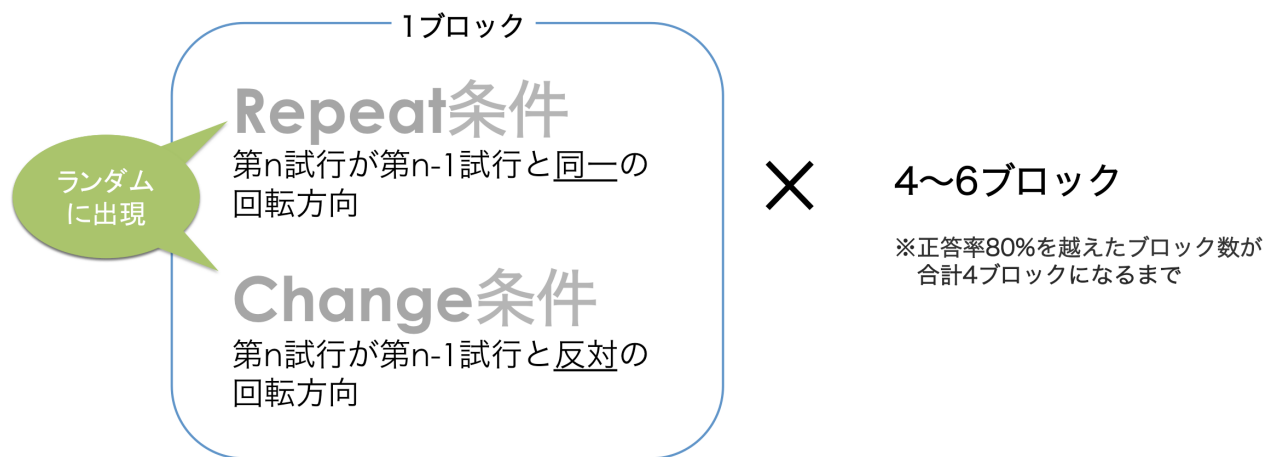


図 3.2 実験 2 のデザイン

回転方向のプライミング効果を検証するため、1 ブロック内で回転方向をランダムに変化させた。回転方向が直前試行と同一条件 (Repeat 条件)、回転方向が直前試行と反対方向になる条件 (Change 条件) が同一ブロック内にある。1 ブロック 96 試行として、4~6 ブロック実施した。正答率が 80%を越えるブロックを 4 ブロック完了した時点で終了となるが、このようなブロックを 4 ブロック完了することができなくとも、6 ブロックが完了した時点で終了となる。

図示した。第 1 試行の回転方向は時計回りである。第 2 試行の回転方向も第 1 試行と同じ時計回りであるため、第 2 試行は Repeat 条件となる。第 3 試行は反時計回りであり、第 2 試行とは逆方向となるため第 3 試行は Change 条件となる。これら 2 条件は、8 個の回転角度をランダムに混ぜることで発生させたため、各条件の発生個数はブロックごとに多少の偏りがある。なお、図形に関しても現試行で用いる図形と直前試行で用いる図形が同一の場合に回転が速やかになるなどのプライミング効果が生じる可能性も予想できる。このプライミング効果の影響が混入することを避けるため、同じ図形が連続することがないようにした。

実験は、正答率が 80%を越えるブロックを 4 ブロック完了した時点で終了となるが、このようなブロックを 4 ブロック完了することができなくとも、6 ブロックが完了した時点で終了となる。寺田・森田 (2011) で確認された、Repeat 条件と Change 条件の間の回転率の差は、数値としては大きな差ではなかった (Repeat 条件は 2.97ms/deg, Change 条件は 4.00ms/deg) が、学習が十分進んでおり、分散が小さかったために有意差が出た。本実験では先行研究のような学習を実施しないため、分散が大きいことが予想される。そこで、エラーの少ないデータを収集することで分散をなるべく小さくしようと考え、実験参加者ごとに実施ブロック数が異なることになるが、正答率に応じて実施ブロック数を変化させることとした。

なお、1 ブロックは 96 試行 (図 6 個、回転角度 8 通り、テストパターン 2 種 (正像／鏡像)) とした。第 2 ブロックが終了した時点で、暗室外で 5~10 分程度の休憩を設けた。なお、5 ブロック以上実施する実験参加者には第 4 ブロック終了時以降、ブロックごとに休憩をとるか確認をとった。図 3.2 に実験 2 のデザインを示す。

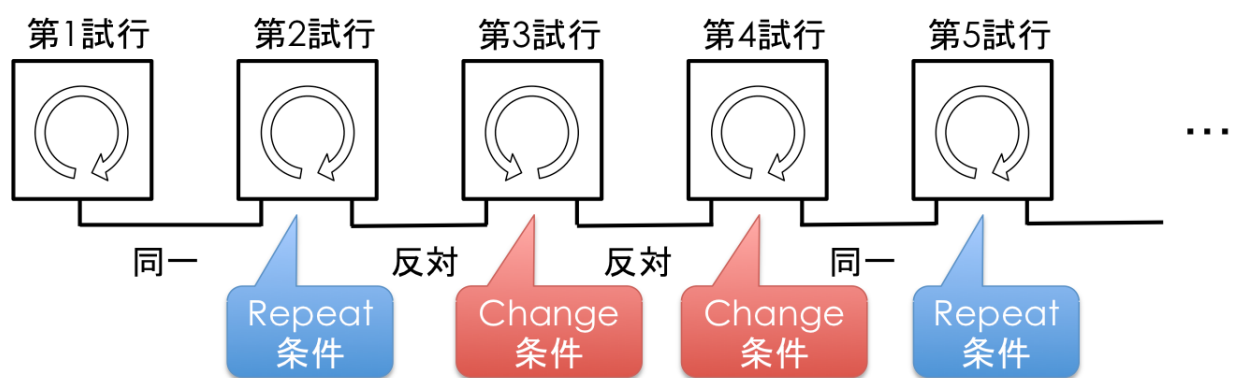


図 3.3 実験 2 の実験条件

Repeat 条件を回転方向が直前試行と同一条件，Change 条件を回転方向が直前試行と反対方向になる条件とした。この例では，第 1 試行の回転方向は時計回りである。第 2 試行の回転方向も第 1 試行と同じ時計回りであるため，第 2 試行は Repeat 条件となる。第 3 試行は反時計回りであり，第 2 試行とは逆方向となるため第 3 試行は Change 条件となる。

3.3 結果

43 名分の実験参加者の回転時間、判定時間を計測した。なお、次の理由から実験参加者 8 名は除外してデータ分析を行った。1 名は回転時間が他の実験参加者と比較して 5 倍以上長く、平均値を算出する際大きく影響を及ぼしてしまうためである。2 名は最終ブロックまで判定時間の制限時間を超える試行が頻発し (最終ブロックにおいても 30% 程度)、回転時間内に回転操作を終了していなかった可能性が高いためである。5 名は第 2~4 ブロックの正答率が 75% を下回ったため、データの信頼性が低いと判断したからである。上記 8 名を除外した 35 名の第 1~4 ブロックの平均エラーレートは 14.1% であった。また、平均実施ブロック数は 4.69 ブロックだった。

実験参加者ごとに第 1~4 ブロックまでを分析した。以降、第 1 ブロックを Block1、第 2 ブロックを Block2... と表記する。なお、本実験では正答率が 80% を越えるブロックを 4 ブロック完了した時点で終了とした。これはデータの分散をなるべく小さくするために計画した。しかし実験を実施してみると、ある程度ブロック数を重ねなければプライミング効果が有意に現れないことがわかった。そこで、実験結果は実験参加者全員が実施した第 4 ブロックまでを分析することとした。これによって繰り返し回数を揃え、学習をどの程度行えばプライミング効果が現れるかを調べた。

正答かつ判定時間が 1000ms 以内の試行を分析対象とした。これは、判定時間が長い場合は、そこで判定だけではなく回転操作も行っていた可能性があるためである。また、外れ値を除外するため、平均値から標準偏差の 3 倍以上離れた回転時間の試行も除外した。分析に用いたデータは全体の 81.6% だった。

また、全実験参加者の第 1~4 ブロックにおける Repeat 条件と Change 条件の発生個数はそれぞれ 49.74% と 50.26% だった。ランダムに発生させたが、ほぼ同程度の発生個数となった。

3.3.1 ブロックごと回転率

実験 1 と同様に、回転時間に対して実験参加者ごとに各ブロックでの回転率を算出した。回転率とは、1° あたりの回転時間である。各回転角度で幾何平均を算出し、それを従属変数、回転角度を独立変数として

$$y = ax + b$$

に線形回帰したとき、 a が回転率となる。これが小さいほど回転操作が速やかと言える。

回転時間と判定時間それぞれについて計算した回転率を表 3.1、図 3.4 に示す。図 3.4 では横軸がブロック、縦軸が回転率 [msec/deg] である。

これを見ると、判定時間の回転率は回転時間のそれに比べ十分に小さく (回転時間の回転率の 7% 以下)、判定時間内に回転操作を行っていたとは考えにくい。したがって実験参加者は回転時間内に回転操作を行っていたと考えられるため、以降は回転時間のみに着目する。

表 3.1 実験 2 におけるブロックごとの回転率

回転率とは、 1° あたりの回転時間である。ブロックごとに回転時間と判定時間からそれぞれ回転率および決定係数を計算した。

ブロック名	回転時間から計算		判定時間から計算	
	回転率 [msec/deg]	決定係数 R^2	回転率 [msec/deg]	決定係数 R^2
Block 1	10.98	0.80	0.44	0.53
Block 2	10.61	0.80	0.40	0.53
Block 3	8.42	0.83	0.44	0.54
Block 4	8.73	0.90	0.46	0.66

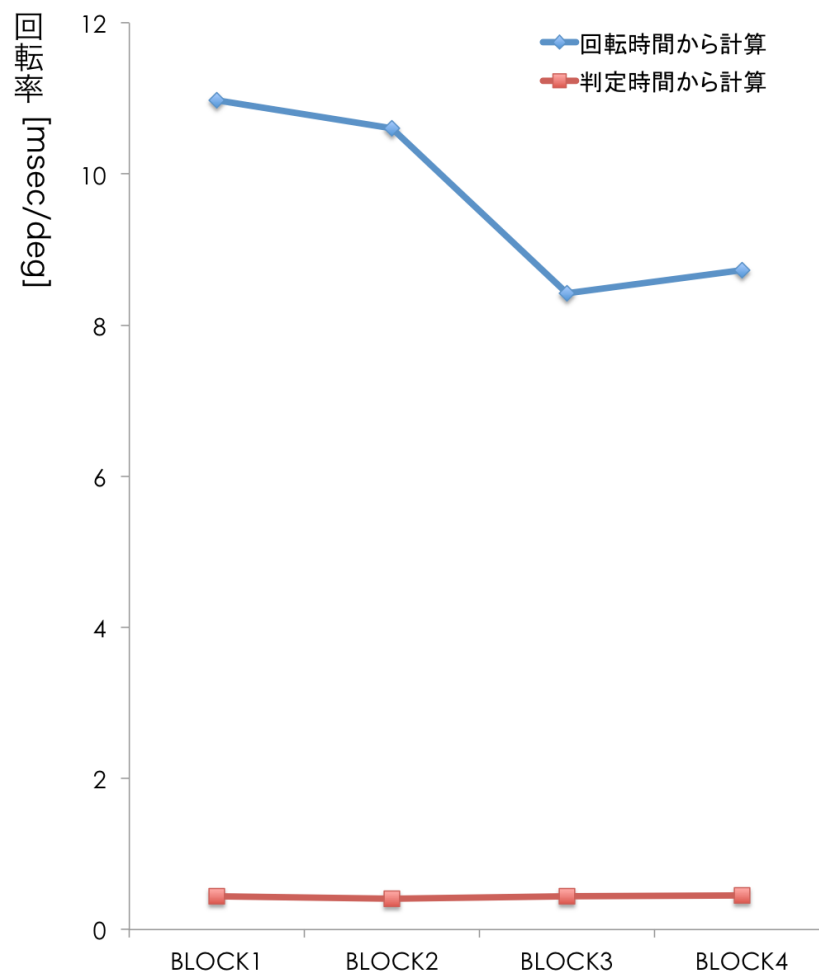


図 3.4 実験 2 におけるブロックごとの回転率

横軸がブロック、縦軸が回転率 [msec/deg] である。回転時間から計算した回転率を青い折れ線グラフ、判定時間から計算した回転率を赤い折れ線グラフでプロットした。

3.3.2 条件ごとのエラーレート

各ブロックにおける Repeat 条件と Change 条件のエラーレートを表 3.2, 図 3.5 に示す。図 3.5 には横軸がブロック, 縦軸がエラーレート [%] である。

表 3.2 実験 2 における条件ごとのエラーレート

1 ブロック中, 間違えた試行数の割合 (エラーレート) を各ブロックにおいて条件ごとに算出した。

ブロック名	エラーレート [%]	
	Repeat 条件	Change 条件
Block 1	9.70	10.86
Block 2	6.04	7.05
Block 3	5.77	6.07
Block 4	5.80	5.00

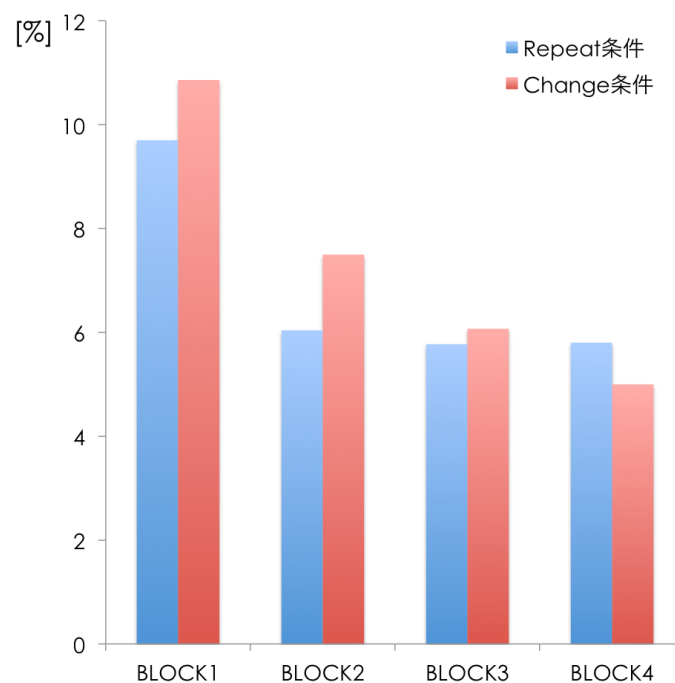


図 3.5 実験 2 における条件ごとのエラーレート

ブロックごとのエラーレートを条件で分けてプロットした。横軸がブロック, 縦軸がエラーレート [%] である。青い棒グラフが Repeat 条件, 赤い棒グラフが Change 条件である。

これを見ると, Repeat 条件と Change 条件で大きな差はみられない。このことを確かめるため, ブロック (4 水準) と条件 (2 水準) を要因とした 2 要因の分散分析を実施した。この結果, ブロッ

クの主効果が見られ、条件の主効果は見られなかった (それぞれ $F(3, 102) = 22.723, p < .001$, $F(1, 34) = 2.092, p > .05$)。また、交互作用もみられなかった ($F(3.102) = 2.649, p > .05$)。したがって、エラーレートは条件によらないと言える。

3.3.3 判定時間の制限時間を越えた試行数の割合

判定時間の制限時間を越えた試行数の割合をブロックごとに表 3.3、図 3.6 に示す。

表 3.3 実験 2 における判定時間の制限時間を越えた試行数の割合

1 ブロック中、判定時間の制限時間を越えた試行数の割合を各ブロックにおいて条件ごとに算出した。

ブロック名	制限時間を越えた試行の割合 [%]	
	Repeat 条件	Change 条件
Block 1	3.69	4.49
Block 2	2.23	1.85
Block 3	1.49	1.13
Block 4	1.31	0.95

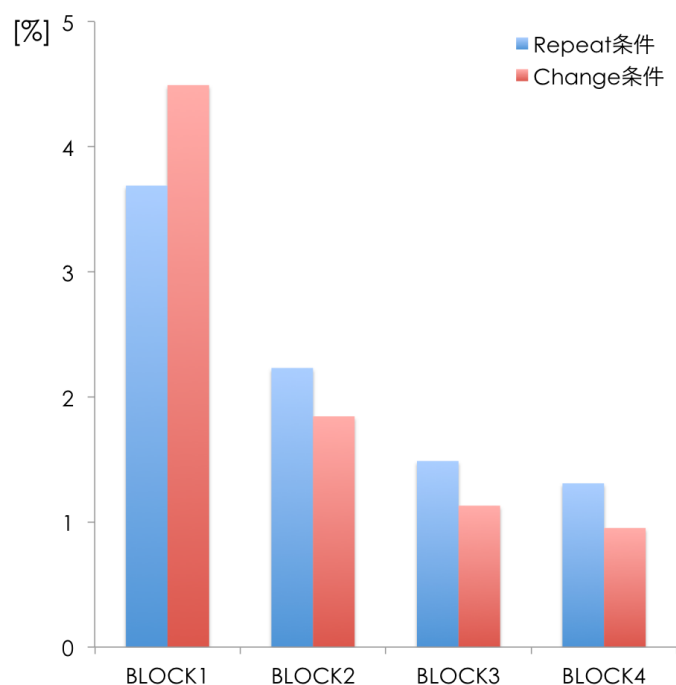


図 3.6 実験 2 における判定時間の制限時間を越えた試行数の割合

ブロックごとに判定時間の制限時間を越えた試行数の割合を条件で分けてプロットした。横軸がブロック、縦軸が判定時間の制限時間を越えた試行数の割合 [%] である。青い棒グラフが Repeat 条件、赤い棒グラフが Change 条件である。

1 ブロックの試行数が96 試行であるため、1 試行は 1.04%にあたる。グラフや表を見ると、制限時間を越えた試行数は少ないことがわかる。Repeat 条件と Change 条件の差はほぼない。このことを確かめるため、ブロック (4 水準) と条件 (2 水準) を要因とした 2 要因の分散分析を実施した。この結果、ブロックの主効果は見られたが、条件の主効果は見られなかった (それぞれ $F(3, 102) = 12.350, p < .001$, $F(1, 34) = .146, p > .05$)。また、交互作用もみられなかった ($F(3, 102) = 1.960, p > .05$)。

したがって、制限時間を越えた試行数の割合は条件にはよらないと言える。

3.3.4 条件ごとの回転率

各ブロックにおける Repeat 条件と Change 条件の回転率を表 3.2, 図 3.5 に示す。横軸はブロック, 左縦軸は回転率 [msec/deg], 右縦軸は切片 [msec] である。折れ線グラフは回転率を示しており, 棒グラフは切片を表している。

表 3.4 実験 2 における条件ごとの回転率

各ブロックにおける条件ごとの回転率および標準偏差を算出した。

ブロック名	Repeat 条件		Change 条件	
	回転率 [msec/deg]	標準偏差	回転率 [msec/deg]	標準偏差
Block 1	11.01	8.39	11.10	8.74
Block 2	10.39	7.24	11.20	8.29
Block 3	8.06	6.90	9.00	7.21
Block 4	8.20	6.17	9.45	7.24

これを見ると、Block1 を除き条件間で回転率に差があるように見える。このことを統計的に確かめるため、ブロック (4 水準) と条件 (2 水準) を要因とした 2 要因の分散分析を実施した。この結果、ブロックの主効果は見られたが、条件の主効果は見られなかった (それぞれ $F(3, 102) = 5.209, p < .01$, $F(1, 34) = 2.224, p > .05$)。また、交互作用はみられなかった ($F(3, 102) = .296, p > .05$)。しかし、各ブロックにおいて条件間の単純主効果をみていくと、Block1~3 までは単純主効果はみられなかったが (それぞれ $F(1, 34) = .005, p > .05$, $F(1, 34) = .650, p > .05$, $F(1, 34) = 1.742, p > .05$)、Block4 では有意傾向が見られた ($F(1, 34) = 3.383, p < .10$)。

なお、回転率はグラフの傾きであるため、切片が大きくなることによっても値が小さくなる。上記の回転率の差が切片によるものではないことを確かめたい。図 3.8 の棒グラフが切片を表している。これを見ると、どのブロックにおいても切片は条件によらないように見える。このことを統計的に調べるため、ブロックごとに t 検定を実施した。その結果、どのブロックでも切片に差はみられなかった (それぞれ $t(34) = .374, p > .05$, $t(34) = .229, p > .05$, $t(34) = .562, p > .05$, $t(34) = .391, p > .05$)。したがって、上記の回転率の差は切片によるものではない。

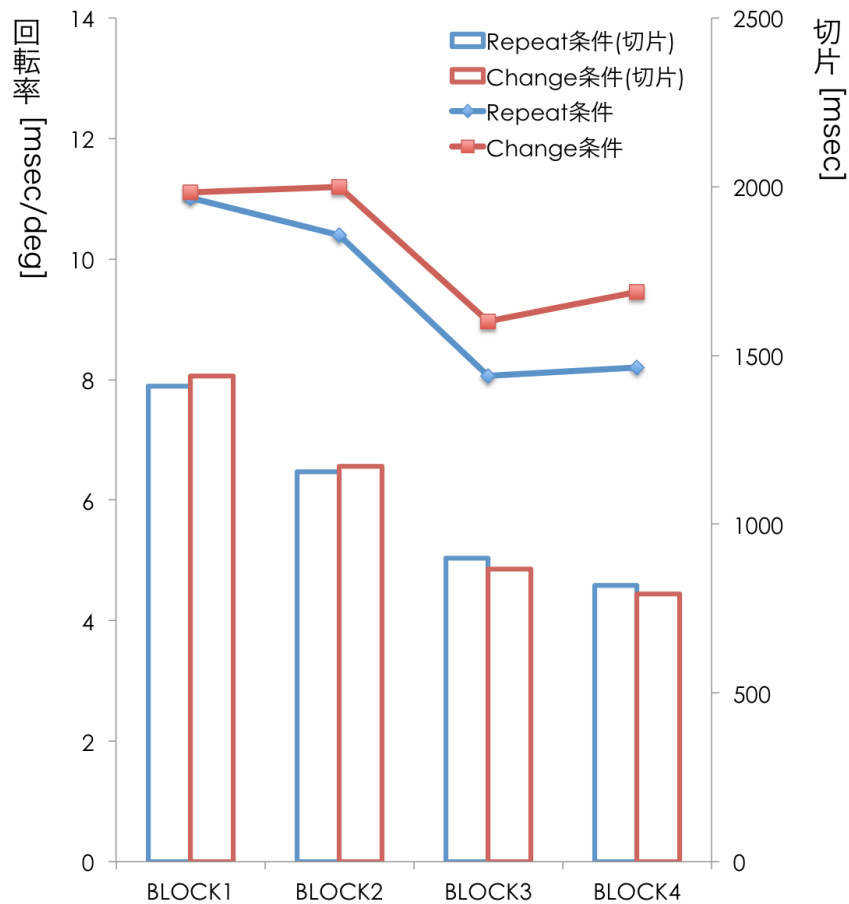


図 3.7 実験 2 における条件ごとの回転率

各ブロックにおける条件ごとの回転率および標準偏差を算出した。横軸はブロック、左縦軸は回転率 [$msec/deg$], 右縦軸は切片 [$msec$] である。折れ線グラフは回転率を示しており、棒グラフは切片を表している。それぞれ青いグラフが Repeat 条件、赤いグラフが Change 条件である。

3.4 考察

心的回転において、オブジェクトとは独立した回転プロセスが存在するかを調べることを目的とし、実験 2 を実施した。実験 2 では寺田・森田 (2011) で確認された回転方向のプライミング効果が学習前にも現れるかを検討した。

具体的には、回転方向がランダムに変化するブロックを 4~6 ブロック実施した (正答率が 80% を超えるブロックを 4 ブロック完了するか、6 ブロック遂行した時点で実験は終了となる。)。現試行と直前試行で回転方向が同一方向の Repeat 条件と反対方向の Change 条件に分け、第 1~4 ブロックの回転率 (1° あたりの回転時間) を比較した。条件 (2 水準) とブロック (4 水準) を要因とした 2 要因の分散分析を実施したところ、ブロックの主効果があり、条件の主効果および交互作用はみられなかった。しかし、ブロックごとに条件の単純主効果をみていくと、第 4 ブロックで条件の単純主効果が有意傾向となった。以上のことから、回転方向のプライミング効果は第 4 ブロックでのみ有意傾向という形で観察できた。したがって、回

転方向のプライミング効果はある程度(本実験では3ブロック程度)の学習を行うことで得られるものだと考えられる。

しかし、回転率の平均値を見ると(表3.4参照)、条件間の回転率の差は第2ブロック以降同程度である。標準偏差を見てみると、ブロックを重ねるごとに小さくなっている。このことから、第2ブロックおよび第3ブロックにおいて条件の単純主効果がみられなかった理由は、データの分散が大きいためであることが考えられる。このように考えると、回転方向のプライミング効果は第2ブロックから既に現れていたとみることもできる。

以上より、本実験結果では第4ブロックにおいて統計的に有意傾向として回転方向のプライミング効果が確認できた。しかしこの回転方向のプライミング効果は第4ブロックで突然出現したのではなく、統計では捉えることが出来なかっただけで、第2ブロックで既に回転方向のプライミング効果が現れていた可能性もある。図形を試行ごとに切り替えていたにも関わらず、回転方向のプライミング効果がみられたことは、オブジェクトとは独立した一般的な回転プロセスが存在することを示唆する。心的回転を1ブロック程度練習することにより、一般的な回転プロセスを利用して実行することが可能になってと考えられる。

また、第1ブロックはエラーレート(図3.5参照)や判定時間の制限時間を越えた試行数の割合(図3.6参照)が大きかった。実験1の結果から、心的回転は連続的な方位のオブジェクト表象が関与していることが示唆された。心的回転において方位で連続したオブジェクト表象の強固さは、心的回転の速やかさに大きく影響する。実験2の第1ブロックでは方位で連続したオブジェクト表象がまだ形成されていなかったため、一般的な回転プロセスがうまく働かなかったのではないかと考えられる。このため、第1ブロックでは回転方向のプライミング効果が現れず、表象が形成された第2ブロック以降で効果が現れたと考えられる。

以上のことから、本実験では心的回転において回転方向のプライミング効果が確認でき、さらにこのプライミング効果は回転操作を施す図形とは独立して生じた。このことは、オブジェクトとは独立し、回転方向などの制御に関するサブシステムが存在することを示唆する。このサブシステムは、一般的な回転プロセスと考えられ、オブジェクト表象を制御する役割を担うメタな存在だと考えられる。さらに、回転方向のプライミング効果は回転率に影響したことから、この一般的な回転プロセスは回転方向切替器のようなサブシステムを持つのではなく、遷移スピードに影響するようなサブシステムを持つこと可能性が考える。

ところで、実験終了後に実験参加者に心的回転を実行しやすかった状況や難しかった状況などはあるかと口頭で質問したところ、図形に関する意見が多く出た。心的回転を実行しやすかった図形として報告されたものは、何かに見立てることができた図形か目印となる凹凸がある図形であった。図形を何かに見立てた例としては、以下の図形であれば横顔やパックマン、なめくじなどであった。どの図形を何に見立てたかは実験参加者によって様々であった。また、目印となる凹凸も実験参加者によって様々であった。

一方、何かに見立てることが出来なかったり、目印となる凹凸を見つけられなかったりした図形は心的回転の実行が難しかったという報告があった。

このことから、心的回転の実行しやすさにおいて図形は重要な要因であることが推測できる。図形を何かに見立てたり目印を決めることで、一般的な回転プロセスを利用することができるようになるのではないだろうか。本実験では1ブロック程度の心的回転を行うことによって、図形を何かに見立てたり目印を決めたりすることができたと考えられる。

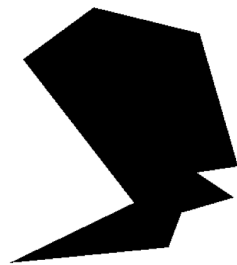


図 3.8 横顔やパックマン等に見立てられた図形

実験参加者が何かに見立てた図形のひとつ。横顔やパックマン，なめくじなどで見立てていた。どの図形を何に見立てたかは実験参加者によって様々であった。何かに見立てることができた図形は心的回転がやりやすかったと報告があった。

第4章 結論

4.1 総合考察

私たちは目の前にないものでも、頭の中に思い浮かべ、さらにそれを操作することもできる。例えば飲み物の入ったカップを逆さまにするとを思い浮かべれば、カップが逆さまになり、さらに中の飲み物がこぼれて落ちるところまで直ちに想像できるだろう。このように、私たちはイメージ操作を簡単に行なうことができるが、それはどのように行われているのだろうか。本研究ではイメージ操作のひとつである心的回転(イメージに施す回転操作のこと)について調査するため、どのようなサブシステムが心的回転に関わるのか、またその性質について調べる2つの実験を実施した。

まず、心的回転の学習において何が学習されるかを調べるため、心的回転の学習効果に回転方向依存性および方位依存性がみられるかを検証する実験を実施した(実験1)。学習により強化されるものが何かを調べることは、心的回転においてどのようなサブシステムが関与しているかを知ることにつながる。実験は、まず一定の回転方向、一定方位、一定図形での心的回転の学習を行なう(学習セッション)。その後回転方向、方位、図形を変化させることでそれぞれの影響を調べた(テストセッション)。その結果、学習時に回転の中間状態として経由された方位への回転操作は学習時と同程度に速やかだった。一方、学習時には経由していないまったく新奇の方位への回転操作は学習最終ブロックよりも遅かった。このことから、心的回転の学習効果は学習時に経由した方位への回転操作に強く現れ、まったく新奇な方位においては学習効果は弱まると言える。このことは、心的回転では回転途中で経由するが刺激としては見たことのないさまざまな方位のオブジェクト表象が用いられていることを示唆する。学習によってこれらの表象が形成され、そのつながりが強化されることにより回転操作が速やかになると考えられる。また、学習した回転方向と反対方向への回転操作の速やかさは、学習した回転方向への回転操作の速やかさと同程度だった。したがって、心的回転の学習効果には回転方向依存性はなく、一定の方向への回転操作を練習するともう一方の回転方向への回転操作も同程度に習熟されることが示唆された。ところで、学習していない図形を学習していない方向へ回転する条件は、学習をまったくしていない条件であるにも関わらず、学習初期よりも回転操作は速やかであった。この原因が実験環境への慣れのみであるとは考えにくい。学習により図形とは独立な心的回転の一般的な基盤的プロセスが学習されたのではないだろうか。このことから、学習した回転方向および反対方向への回転操作の速やかさは、どちらの回転方向への回転操作も学習したためではないかと考えられる。こう考えると、心的回転の学習効果は学習していない回転方向への回転操作においても現れる(転移する)と言える。では、図形とは独立な心的回転の一般的な基盤的プロセスは本当に存在するのだろうか。これを調べるため実験2を実施した。

次に、回転方向のプライミング効果が生じることを検証する実験を実施した(実験2)。実

験は、回転方向がランダムに変化するブロックを実施した。このとき、現試行と直前試行の回転操作が同一方向の条件を Repeat 条件、現試行と直前試行の回転操作が反対方向の条件を Change 条件と呼んだ。その結果、一定の練習を重ねたあと、Repeat 条件よりも Change 条件の方が回転操作が遅くなった。現試行の回転操作の速やかさに直前試行の回転方向が影響を及ぼしたことから、回転方向のプライミング効果がみられたと言える。試行ごとに図形を変えていたにも関わらず、回転方向のプライミング効果は回転操作を施す図形とは独立して生じた。このことは、心的回転ではオブジェクトとは独立し、回転方向などの制御に関与するサブシステムが存在することを示唆する。このサブシステムは、一般的な回転プロセスと考えられ、オブジェクト表象を制御する役割を担うメタな存在だと考えられる。さらに、回転方向のプライミング効果は回転率に影響したことから、この一般的な回転プロセスは回転方向切替器のようなサブシステムを持つのではなく、遷移スピードに影響するようなサブシステムを持つことが考えられる。ところで、実験1の結果より心的回転にはさまざまな方位のオブジェクト表象が用いられていることが示唆された。実験2ではプライミング効果が現れるまでに一定の練習が必要になったが、これは練習によってさまざまな方位のオブジェクト表象を形成しているためだと予想する。さまざまな方位のオブジェクト表象が形成されなければ、一般的な回転プロセスがうまく働かないためにプライミング効果が現れるまでに練習が必要だと考えられる。

4.2 心的回転のモデル

本研究で行った2つの実験により、次の結果を得た。

まず、心的回転の学習では学習区間内の方位に関して学習がなされることが示された。学習した方位の中間状態においても学習効果が強くみられたことから、心的回転には中間的な方位も含む方位で連続した表象が関わっていると言える。このように考えると、これらの表象間で連続的にその活性状態を遷移させることで心的回転を実現していると考えられる。このことを図4.1に示した。図4.1では、同一の図形だが、方位が少しずつずれている表象が隣り合っている。これらの間を活性状態が遷移していくことで心的回転が実行される。

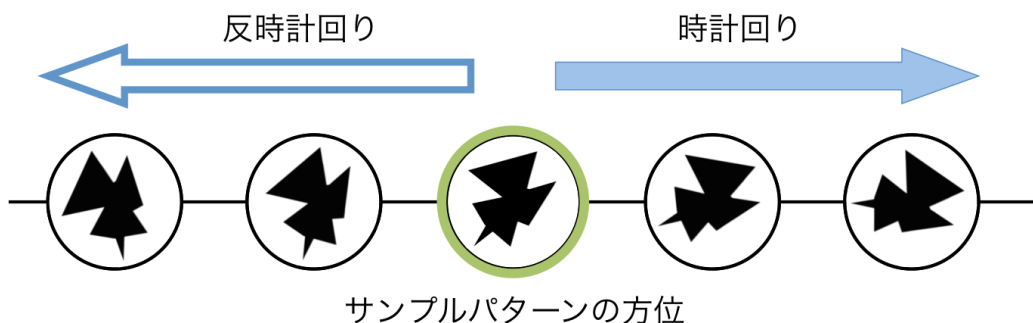


図 4.1 方位で連続したオブジェクト表象の概念図

心的回転にはこのような中間的な方位も含む方位で連続した表象が関わっていることが考えられる。これらは同一の図形だが方位が少しずつ異なり、方位で連続的に結びついている。これらの表象間で連続的にその活性状態を遷移させることで心的回転を実現していると考えられる。

また、回転対象の図形が切り替わっても回転方向のプライミング効果がみられた。さらに、一定の回転方向への回転操作を学習すると、対となるもう一方向への回転操作にも学習効果が完全に及ぶことが示された。これらのことは、オブジェクト表象からは独立した一般的な回転プロセスが存在することを示唆する。この回転プロセスは、オブジェクト表象よりも抽象度の高いサブシステムであり、オブジェクト表象の遷移方向を決定したり遷移を止めたりする処理など心的回転のより上位コントロールの処理を担っていると考えられる(図4.2)。

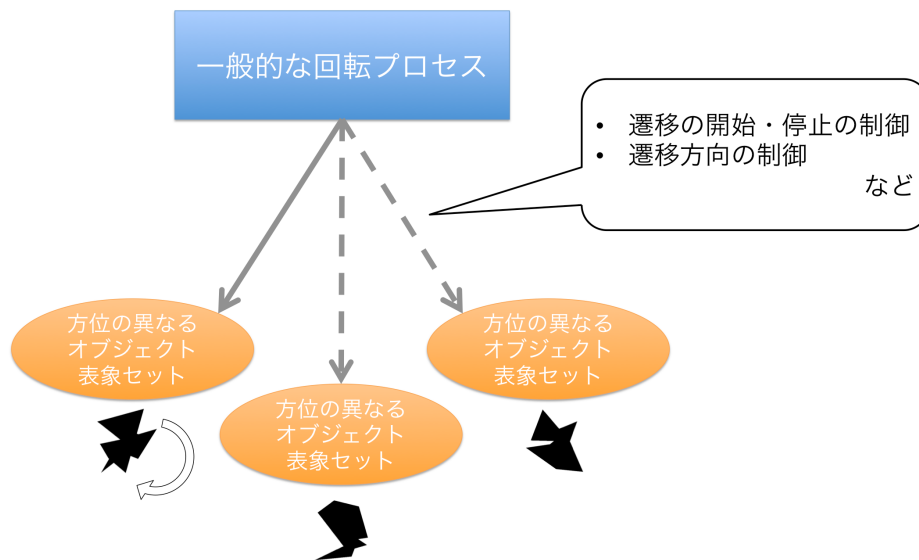


図 4.2 一般的な回転プロセスの概念図

心的回転にはこのようにオブジェクト表象からは独立した一般的な回転プロセスが関与していると考えられる。この回転プロセスは、オブジェクト表象よりも抽象度の高いサブシステムであり、オブジェクト表象の遷移方向を決定したり遷移を止めたりする処理など心的回転のより上位コントロールの処理を担っていると考えられる。

以上より、方位で連続なオブジェクト表象と一般的な回転プロセスを組み合わせることにより心的回転は実現されているモデルを考える(図4.3)。

このモデルでは、一般的な回転プロセスが異なる方位のオブジェクト表象のセットから特定の方位を参照することで心的回転を行なう。一般的な回転プロセスが読みだしたオブジェクトの方位が最終状態として目指している方位と同じかどうかを判断する。同じ場合はそこで処理は終了となる。異なる場合(まだ操作が不十分な場合)は、さらに処理を加えるため、遷移する方向を計算して次の読み出しを行なう。この処理を目標の方位まで逐次的に繰り返す。このとき、例えば目標状態の方位と現在の方位の差分をとってどちらの方向へ回転するかを決定する。その結果から、回転する方向に対応するサブシステムには促進をかける。そして促進となったサブシステムからオブジェクト表象へ命令が送られることで、次に読み出す方位が決定される。

このモデルにおいて、実験1のように一定方向、一定図形、一定方位での回転操作を繰り返し実行すると、オブジェクト表象の中の特定の方位間(学習区間)の結合が強められ、活性状態の遷移が速やかになる。また、現試行の回転方向が直前試行の回転方向と同一方向の場合、一般的な回転プロセスにおいて直前試行では一定の回転方向への遷移を促進するサブシステムが活性状態にあったため、引き続き活性となり遷移の速やかさが向上する。逆に反対

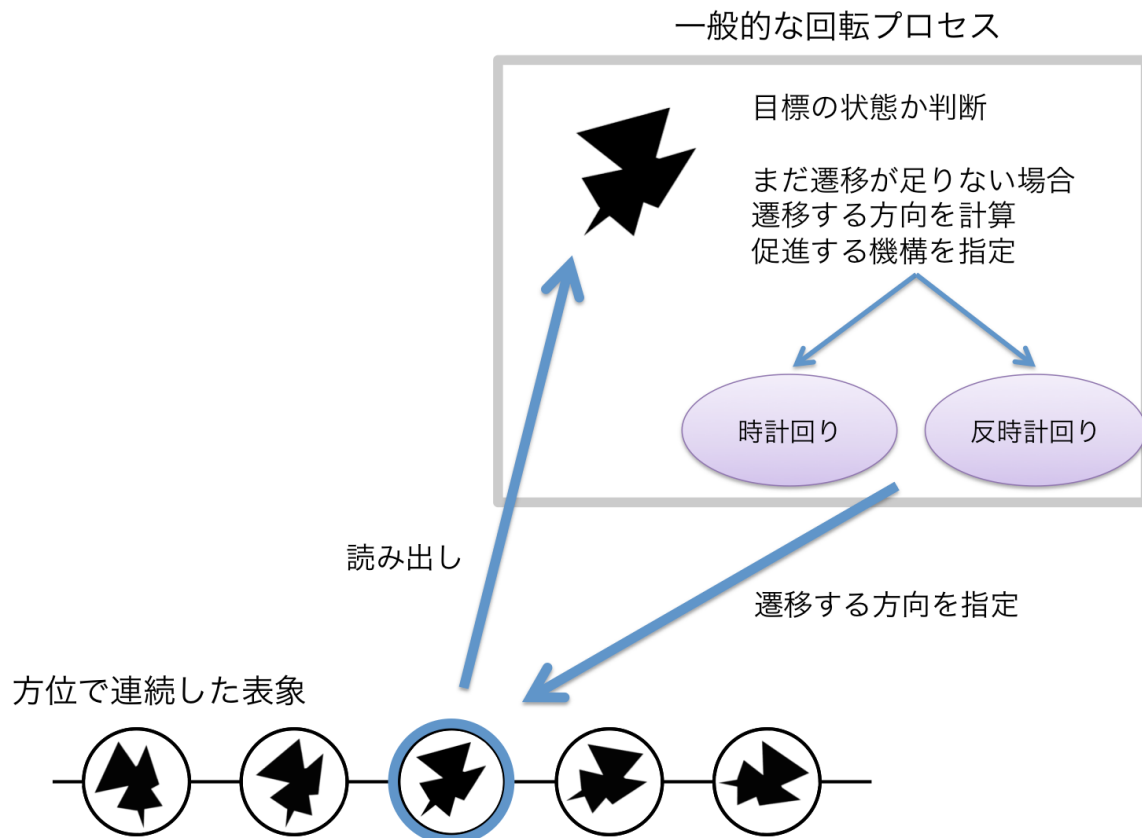


図 4.3 心的回転モデル

このモデルでは、一般的な回転プロセスが異なる方位のオブジェクト表象のセットから特定の方位を参照することで心的回転を行なう。一般的な回転プロセスが読み出したオブジェクトの方位が最終状態として目指している方位と同じかどうかを判断する。同じ場合はそこで処理は終了となる。異なる場合(まだ操作が不十分な場合)は、さらに処理を加えるため、遷移する方向を計算して次の読み出しを行なう。この処理を目標の方位まで逐次的に繰り返す。このとき、例えば目標状態の方位と現在の方位の差分をとってどちらの方向へ回転するかを決定する。その結果から、回転する方向に対応するサブシステムには促進をかける。そして促進となったサブシステムからオブジェクト表象へ命令が送られることで、次に読み出す方位が決定される。

方向であれば、これまで抑制されたサブシステムを活性にするため、時間がかかる。

なお、このモデルでは一般的な回転プロセスが目標状態のオブジェクトの方位を保持していると仮定している。一度の計算で目標状態に到達する処理も考えることができるため、この仮定は逐次遷移とは相反しているように見える。しかし、著者はイメージ操作の目的は実世界で起こり得る現象を脳内で再現し、様々な予測、推論などを行うことだと予想している。実世界の現象は連続的である。このため、イメージ操作を行なうサブシステムは逐次的な処理になっており、心的回転に関しても逐次的な処理を行なうと考える。

ここで、このモデルと作業記憶の関わりについて考察する。Hyun & Luck (2007) によると、文字の心的回転は視覚作業記憶が関与していることが示唆された。このことから、操作対象のオブジェクト表象を視覚作業記憶に保持し、それに処理を加えることで心的回転を実施していることが予想される。したがって、このモデルにおける方位で連続的なオブジェクト表

象が視覚作業記憶に保持され、それに一般的な回転プロセスが処理を加えることで心的回転が行われると考えられる。

4.3 今後の課題

本研究では、心的回転のモデルを提案した。ただし、このモデルのような処理が行われていることを示唆する証拠は十分でない。実験1の結果から、心的回転には中間的な方位も含む方位で連続した表象が関わっていることが示唆された。また実験2の結果から、心的回転を制御する一般的な回転処理サブシステムが存在することが示唆された。したがって図4.1, 4.2に示したサブシステムは存在している可能性がある。しかし、この2つのサブシステムがどのように連携を行い、処理を進めているかを示唆するような結果はない。今後はこの2つのサブシステムがどのように情報をやりとりし、また処理を進めるかについて調べていく必要がある。方位で連続した表象内の遷移をどのように開始・終了しているのか、また遷移する方向(回転方向)をどのように決定しているのかを調べることでより精度の高いモデルを提案することができるだろう。

4.4 まとめ

本研究では、イメージ操作のメカニズムに関する手がかりを得るため、心的回転の回転方向に着目した実験を行った。

心的回転の学習効果に回転方向依存性がみられるかを検証したところ、回転方向依存性はみられず、学習しなかった回転方向への回転操作にも学習効果が及んだ。また、心的回転の学習効果は学習時に見たまたは中間状態として経由した方位に強く現れることが示された。学習しなかった回転方向への回転操作にも学習効果が及んだことは、学習効果は同一の回転軸での非学習方向への回転操作にも転移することを示唆している。また、学習時に見たまたは中間状態として経由した方位に学習効果が現れたことから、心的回転は方位で連続したオブジェクト表象が関与していることを示唆している。

さらに、心的回転について一定の練習を重ねたあと、直前試行と図形が異なってもみられる回転方向のプライミング効果が生じることを確認した。このことは、心的回転のメカニズムには、オブジェクトから独立した回転プロセスが存在することが示唆された。

以上より、心的回転は方位で連続したオブジェクト表象と一般的な回転プロセスにより実行されている可能性が示された。このことから、他のイメージ操作に関してもオブジェクト表象と一般的なプロセスにより実行されていることが予想される。

学習により、主として回転操作対象に関する処理が強化された。したがって、地図を読むことが苦手(地図の心的回転が苦手)な人が特定の地図についての心的回転を練習した場合、練習した地図では地図そのものを回転させなくとも進む方向がわかるようになる(速やかに心的回転が実行出来るようになる)が、練習していない地図では、練習した地図ほどすぐには考えられず(心的回転の速やかさが低下する)、心的回転を行なうより地図を手で回転するほうが速いかもしれない。しかし、一般的な回転プロセスについても学習が行われる可能性がある。かなりの数の練習をこなせば、地図を読むことが得意になるかもしれない。

謝辞

本研究は多くの方々からご支援、ご助言があったからこそ実りあるものにすることができました。

平賀譲先生は、ご多忙にも関わらず研究指導教員を引き受けて下さいました。心より感謝申し上げます。

森田ひろみ先生は、大変熱心に、また懇切丁寧にご指導いただきました。実験の結果が何を示すのかさっぱりわからず考察が迷走したり行き詰まるときもありました。そんなときにも森田先生は最後まで辛抱強く議論に付き合ってくださいました。社会に出て働くときに必要になる考え方や心構えなど、研究以外のことに關してもさまざまなご助言をいただきました。心より厚く御礼申し上げます。先生から教えていただいたことを活かして春から頑張っていきたいと思います。

研究室のメンバーにも大変お世話になりました。研究に関する議論はとても有意義で参考になりました。行き詰まったときにいただいたアドバイスには励まされました。本当にありがとうございました。

学会で出会った他大学、研究機関の方々にも多くの有益なご助言をいただきました。さまざまな研究を見聞きすることで、研究に対するモチベーションを高めることができました。

学部からの3年間で、117人の方に実験協力をしていただきました。お忙しい中時間を割いてくださった方も多数いらっしゃいました。大変感謝しております。

最後に、私がのびのびと研究を行なうことができたのは、家族の支えがあったからです。心から謝意を評します。

参考文献

- [1] 苅阪直行 (2000). 『脳とワーキングメモリ』. 京都大学学術出版会.
- [2] Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1974). Working memory. G.H. Bower (Ed.), The psychology of learning and motivation, 8, 47-89.
- [3] Baddeley, A. D. (2003). Working Memory : Looking Back And Looking Forward. Neuroscience, 4, 829-839.
- [4] Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. Science, 171, 701-703.
- [5] Cooper, L. A., & Shepard, R. N. (1975). Mental Rotation of Random Two-Dimensional Shapes. Cognitive Psychology, 7, 20-43.
- [6] Hyun, J.S., & Luck, S. J.(2007) Visual working memory as the substrate for mental rotation. Psychonomic Bulletin & Review, 14, 1, 154-158.
- [7] Bethell-Fox, C. E., & Shepard, R. N. (1988). Mental Rotation: Effect of Stimulus Complexity and Familiarity. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 14(1), 12-23.
- [8] Heil, M., & Frank, R. (1998). What is improved, if a mental rotation task is repeated - Efficiency of memory access or the speed of a transformation routine?. Psychological Research, 61, 99-106.
- [9] 寺田春菜, & 森田ひろみ. (2011). 心的回転における学習効果の回転方向依存性の検討. 信学技報 (IEICE Technical Report), 111, 59, 73-78.

在学中に行った学会発表

1. Terada,H. & Morita,H. The nature of the training effects of mental rotation: the limit for transfer to novel orientation. CogSci2012. Sapporo,Japan. August, 2012.
2. 寺田春菜, 森田ひろみ. 心的回転のくり返しにより何が学習されるのか：回転方向依存性の検討から. 日本視覚学会 2012 年冬季大会. 東京. 2012 年 1 月.
3. 寺田春菜, 森田ひろみ. 心的回転における学習効果の回転方向依存性の検討. 電子情報通信学会 HIP/HCS 研究会. 沖縄. 2011 年 5 月.

付録

付録 1：実験 1 教示文

付録 2：実験 2 教示文

付録 3：手続き説明ボード (手続きを説明する際に用いた。実験 1,2 で共通。)

付録1：実験1 教示文

手順書・教示文

【準備】

- ・CRT の電源を入れる
- ・実験参加者 ID およびグループの確認
- ・事前・事後アンケート、実験記録表に ID、グループを記入
- ・同意書の準備
- ・ウイルスソフト無効化
- ・携帯電話のバイブレーション OFF
- ・プログラムテスト
- ・プリンタの電源 OFF

【はじめに】

- ・実験中のボードをドアに設置

「実験を担当する森田研の寺田です。本日は実験へのご参加ありがとうございます。この実験ではイメージに関する心理実験を行っていただきます。実験を行うにあたり、まず実験参加への同意書の記入が必要になります。こちらを一読していただき、同意していただける場合には2枚ともご署名をお願いします。また、こちらのアンケートもご記入をお願いします。」

- ・記入事項を確認

「ありがとうございます。同意書は1枚が控えなのでお持ちください。お手数ですが、実験中に携帯電話がなくなってしまうと妨げになりますので、電源を切るかマナーモードに設定をお願いします。」

- ・開始時刻記入

【実験の説明】

「では、これから実験の手続きの説明を行います。実験はあちらの暗室内で行います。ディスプレイに画面が表示されるので、それに対してキーボードで操作をしてください。この実験では同じ操作を繰り返し行ないます。この繰り返しのまとまりのことをブロックと呼ぶので覚えておいてください。ではこちらをごらんください。」

- ・説明書を呈示

☒まずブロックの一番最初にこのブロック開始画面が出ます。準備ができたらスペースキーを押して始めてください。各回のはじめには何も表示されない真っ暗な画面が表示されます。準備ができたらスペースキーを押してください。☒するとこのような図形が表示されるので図形を覚えてください。この画面は2秒で切り替わります。☒次にこのように角度が表示されます。ここで、矢印の方向へ矢印の角度だけ覚えた図形を回転するところを想像してください。この例では右に45°回転したところを想像します。想像できたらただちにスペースキーを押してください。☒そうするとまた図形が表示されます。これは先ほど覚えた図形か、覚えた図形の鏡像が回転されて表示されます。先ほど頭の中で回転したものと同じであれば左カーソルキー、鏡像であれば右カーソルキーを押してください。これは素早くかつ正確をお願いします。

- ・紙を裏返す

☒もし、キーを押すまでに1秒以上かかると警告としてこのように中央にビックリマークが表示されます。なるべくビックリマークが表示されないように、かつ正確にお願いします。なお、ビックリマークは1秒たつと自動で切り替わるので消えるのを待ってください。

ここまでで1回です。1回終わるとまた☒の画面に戻ります。途中で疲れたときは☒の何も表示されていない画面で休んでください。

☒ブロックの一番最後にはこのように正答率が表示されます。これが80%以上になるように頑張って回答してください。ここまでで質問はありますか？」

【練習】

「では、練習を行います。暗室に移動してください。」

・暗室に移動

「実験中はあご台に顔を固定して行うので、ちょうどいい高さになるように椅子を調節してください。」

「キーボードの位置も調度良くなるように動かしてください。キーボードは必ずスペースキーを左手、左カーソルキーを右手の人差指、右カーソルキーを右手の薬指で押してください。それ以外のキーは押さないように気をつけてください。では、練習を始めるのでお待ちください。」

・プログラム開始

「最初は確認のために一緒に回答します。」

1～3 試行

「ここまでで何か質問はありますか？ では、このままお待ちください。」

・暗幕セット、光漏れ確認

「では、最後にもう一度確認します。必ずスペースキーは左手、左カーソルキーは右手の人差指、右カーソルキーは右手の薬指で押してください。図形を回転する画面では、回転し終わったら直ちにスペースキーを押してください。判定する画面では、表示される図形が頭の中で回転したものと同じときは左カーソルキー、鏡像のときは右カーソルキーを押してください。これはできるだけはやく正確にお願いします。それではスペースキーを押して初めてください。」

【実験開始】

「では本番をはじめます。ここからはブロック中の回数が先ほどより多くなります。途中で疲れたときは何も表示されていない画面で休憩してください。実験中はあご台に顔を固定したままで行ってください。何か質問はありますか？でははじめますのでお待ちください。」

・プログラム開始

「ではスペースキーを押して始めてください。」

・正答率 80%以下の場合は注意する

【休憩】

「お疲れ様です。ここで一旦休憩を取りたいと思います。」

・暗室開ける。時刻確認。

「ではそろそろ実験に戻りますので暗室に移動してください。」

- ・暗室に移動

「あご台は調度良い位置にありますか？では、はじめますのでお待ちください。」

- ・暗幕セット
- ・光漏れ確認
- ・プログラム開始

「では、始める前に確認します。必ずスペースキーは左手，左カーソルキーは右手の人差指，右カーソルキーは右手の薬指で押してください。図形を回転する画面では，回転し終わったら直ちにスペースキーを押してください。判定する画面では，表示される図形が頭の中で回転したものと同じときは左カーソルキー，鏡像のときは右カーソルキーを押してください。これはできるだけはやく正確をお願いします。それではスペースキーを押して初めてください。」

【実験後アンケート】

「お疲れ様です。以上で実験は終了です。」

- ・暗室を開ける
- 「最後にアンケートにご協力お願いします。」
- ・アンケート実施
- ・回答内容チェック

【最後】

- ・記録表に終了時刻記入
- ・謝礼を渡す

【片付け】

- ・実験中ボード回収
- ・実験時間確認書に時間と謝礼金額記入
- ・ウィルスソフト有効化
- ・プリンタの電源 ON
- ・CRT の電源 OFF
- ・携帯電話のバイブレーション ON

付録2：実験2 教示文

手順書・教示文

- ・30分前にディスプレイの電源 ON
- ・実験書類（同意書，実験前・後アンケート，記録票）の準備
- ・実験記録表に ID，グループを記入
- ・ウイルスソフト無効化
- ・プログラムテスト
- ・携帯電話のバイブレーション，プリンタ OFF

【はじめに】

- ・実験中のボードをドアに設置

実験を担当する寺田です。実験へのご協力ありがとうございます。この実験ではイメージに関する心理実験を行います。まず実験参加への同意書の記入が必要なので，こちらを読んで，同意できる場合には署名をお願いします。こちらにも記入をお願いします。

- ・記入内容確認

携帯電話の着信音やバイブレーションは実験の妨げになるので，電源を切るかサイレントモードに設定をお願いします。

- ・開始時刻記入

【実験の説明】

それでは実験の説明をします。実験は暗室内で行います。ディスプレイ表示に応じてキーボードで操作をしてください。この実験では同じ操作を繰り返し行ないます。繰り返しのまとまりのことをブロックと呼びます。では，操作を説明します。

- ・手続き説明書 NO.1

(1) ブロックの始めにはこのブロック開始画面が出ます。スペースキーを押すと 1 ブロックが始まります。

(2) 各回のはじめには何も表示されない真っ暗な画面が表示されます。スペースキーを押すと 1 回目が始まります。

(3) まずこのような図形が表示されるので図形を覚えてください。この画面は 2 秒で次の画面に切り替わります。

(4) 切り替わるとこのように角度と方向を指示する図が表示されます。ここで，矢印の方向へ矢印の角度だけ覚えた図形を回転するところを想像してください。この例では右に 45° の回転を表します。想像できたらすぐスペースキーを押してください。

(5) そうするとまた図形が表示されます。これは先ほど覚えた図形か，覚えた図形の鏡像が回転されて表示されます。先ほど頭の中で回転したものと同じであれば左カーソルキー，鏡像であれば右カーソルキーを押してください。これは素早くかつ正確をお願いします。

これで 1 回です。1 回終わるとまた図の画面に戻ります。

- ・手続き説明書 NO.2

(警告画面) もし、判断画面でカーソルキーを押すまでに 1 秒以上かかった場合、警告としてビックリマークが表示されます。なるべくこの画面が出ないように、かつ正確にキーを押してください。なお、この画面は 1 秒たつと自動で切り替わり、(2) の画面に戻ります。

(正答率) ブロックの最後には正答率が表示されます。これが 80%以上になるように頑張って回答してください。

実験中に疲れた場合は (2) の画面で休むようにしてください。
何か質問はありますか？

【練習】

暗室で練習を行います。

暗室に移動

実験中はあご台に顔を固定します。丁度良い高さになるように椅子を調節してください。
キーボードは必ずスペースキーを左手、左カーソルキーを右手の人差指、右カーソルキーを右手の薬指で押してください。キーボードの位置も調節してください。

プログラム開始

1～2 試行確認しながら一緒に回答

何か質問はありますか？

暗幕セット・光漏れ確認

練習の前にもう一度確認します。

(*) 必ずスペースキーは左手、左カーソルキーは右手の人差指、右カーソルキーは右手の薬指で押してください。図形を回転する画面では、回転し終わってからスペースキーを押してください。判断する画面では、表示される図形が頭の中で回転したものと同じときは左カーソルキー、鏡像のときは右カーソルキーを押してください。これはできるだけ早く正確にお願いします。

それではスペースキーを押して初めてください。

【実験開始】

何か質問はありますか？

本番をはじめます。ここからはブロック中の回数が先ほどより多くなります。途中で疲れたときは何も表示されていない画面で休憩してください。実験中はあご台に顔を固定してください。何か質問はありますか？

プログラム開始

ではスペースキーを押して始めてください。

正答率 80%を下回る場合は注意・1 ブロック追加

【休憩】2 ブロック終了後

お疲れ様です。5 分から 10 分程度休憩を取ります。

暗室を開ける

そろそろ再開します。

暗室に移動

あご台，キーボードの位置は調度良いですか？

暗幕セット・光漏れ確認

プログラム開始

始める前に確認します。(＊)

【実験終了】

お疲れ様です。実験は終了です。

実験の感想

【最後】

- ・記録表に終了時刻記入
- ・謝礼を渡す
- ・同意書等に ID を記入

- ・実験中ボード回収
- ・実験時間確認書に時間と謝礼金額記入
- ・ウィルスソフト有効化
- ・プリンタの電源 ON
- ・ディスプレイの電源 OFF

付録3：手続き説明ボード



①

ブロック開始画面

[スペース]を押すとブロックが始まります。



②

1 回ごとの開始画面（何も表示されない画面）

[スペース]を押すと始まります。

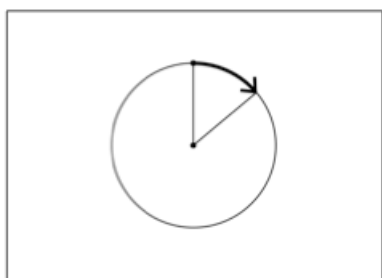
※休憩はこの画面でとってください。



③

図形表示画面

ここで表示される図形を覚えてください。2 秒たつと次の画面に進みます。

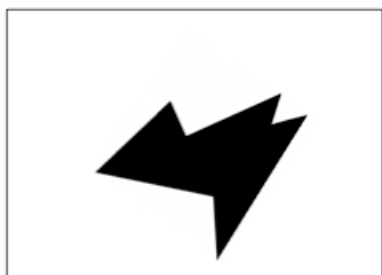


④

回転画面

矢印が示す角度通りに、先ほど覚えた図形を頭の中で回転してください。

回転し終わったら[スペース]を押して進んでください。



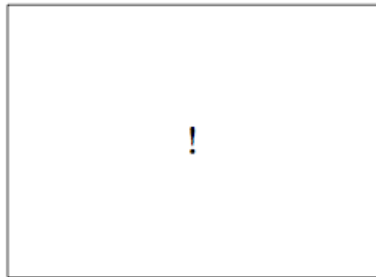
⑤

判断画面

この図形と頭の中で回転した図形が同じだったら [←], 違ったら [→] を押してください。これはできるだけ速くかつ正確に行ってください。

キーを押すと②に戻ります。

警告画面



正答率画面

