

博士論文

現実世界における視覚探索のメカニズム
— 路線図、運転場面、仮想現実空間における検討 —

日本女子大学人間社会研究科心理学専攻

博士課程後期 3 年 和崎 夏子

目次

第 1 章 序論 – 研究の背景と目的 –	1
1.1 現実場面における視覚探索	1
1.2 本研究において検討する 3 つの要因	7
1.2.1 検討する要因(1)：文脈	8
1.2.2 検討する要因(2)：学習	12
1.2.3 検討する要因(3)：身体動作	16
1.3 視線パターンの定義	19
1.4 学習に基づく視線パターン変化と探索メカニズムの推定	24
第 2 章 路線図における視覚探索	31
2.1 目的	31
2.2 実験 1 初見の路線図における視覚探索	34
2.2.1 目的	34
2.2.2 方法	34
2.2.3 結果と考察	38
2.3 実験 2 路線図における視覚探索：1 週間後の検討	43
2.3.1 目的	43
2.3.2 方法	43

2.3.3 結果と考察	43
2.4 実験 3 初見の無彩色路線図における視覚探索	51
2.4.1 目的	51
2.4.2 方法	51
2.4.3 結果と考察	52
2.5 実験 4 初見の路線図における視覚探索：手の動作の検討	57
2.5.1 目的	57
2.5.2 方法	57
2.5.3 結果と考察	58
2.6 第 2 章：考察	65
第 3 章 運転場面における視覚探索	67
3.1 目的	67
3.2 実験 5 運転場面の静止画像における視覚探索	68
3.2.1 方法	68
3.2.2 結果と考察	73
3.3 実験 6 運転場面の動画像における視覚探索	82
3.3.1 目的	82
3.3.2 方法	82
3.3.3 結果と考察	86

3.4 第 3 章：考察	99
第 4 章 仮想現実空間における視覚探索	101
4.1 目的	101
4.2 実験 7 仮想現実空間における視覚探索	104
4.2.1 方法	104
4.2.2 結果	112
4.3 第 4 章：考察	125
4.3.1 視線パターンの傾向と探索のメカニズム	125
4.3.2 VR 空間における周辺視の効果	126
4.3.3 縦方向の優位性	127
第 5 章 総合考察	130
5.1 結果のまとめ	130
5.2 今後の検討課題と展望	136
5.3 神経生理学的側面	138
5.4 最後に：視覚探索研究の課題	141
謝辞	143
引用文献	144

第 1 章 序論 —研究の背景と目的—

1.1 現実場面における視覚探索

視覚 (vision) に関連したあらゆる認知的活動は探索 (search) から始まっているといっても過言ではない。コーヒーが飲みたい場合にはテーブル上のどこにマグカップがあるかをまず探索する。あるアプリを使いたい場合には、スマートフォンの画面上でそのアプリのアイコンを探索する、といった具合である。こうした探索の際には、現実世界にある膨大な視覚情報に対して、私たちは適切な情報に視覚的注意 (visual attention) を向ける一方で、無関係な情報には注意を向けず、目的達成に向けた行動をすることができ (Carrasco, 2011, Eckstein, 2011)。こうした探索と注意のメカニズムの理解は、視覚研究における大きな目標の 1 つである。

探索行動と注意のメカニズムを明らかにするために、さまざまな研究が行われてきたが、とくに視覚探索 (visual search) パラダイムから数多くの知見が得られてきた (e.g. Treisman & Gelade, 1980; Wolfe et al., 1989; Wolfe, 2020)。一般的な視覚探索課題では、さまざまな視覚属性により決められた目標刺激 (ターゲット) を妨害刺激 (ディストラクタ) の中から見つけ出す。その時の反応時間や正確性 (正答率) を探索の指標とする。Treisman らによる古典的な視覚探索研究では、背景情報の中から特定の目標刺激を探索する課題が行われたが、ここでは抽象的な視覚刺激が用い

られ、色や方位、大きさなどの視覚属性における顕著性(saliency)を操作することにより、探索行動の処理過程が調べられた。図 1.1 はこうした実験において用いられた視覚刺激の典型例である。

Treisman and Gelade (1980)は、こうした視覚探索実験の結果に基づいて、探索行動における視覚的注意の機能を説明するための特徴統合理論 (feature integration theory) を提案した。この理論では、視覚刺激の顕著性(saliency)が重要な要因となる。つまり、背景となる妨害刺激から目標刺激がどの程度目立つか(どれほど顕著か)を定量化すれば、それにより探索行動のパフォーマンスを定量的に推測できることが期待される。例えば図 1.2 の視覚探索刺激例では、目標刺激の顕著性は図 1.1 の場合よりも高い(図 1.1 の視覚探索を結合探索、図 1.2 の視覚探索を特徴探索と呼ぶ)。こうした理論に基づいて、視覚探索における探索行動をモデル化した代表例としては、特徴統合理論を拡張し、画像特徴量から目立ちやすさを数値化した顕著性地図(saliency map)が作られ、そこに視覚的注意が外発的に誘導されターゲットが捕捉されるとする Itti ら(1998)のモデルが挙げられる。こうしたモデルは、顕著性が探索の鍵となるような刺激条件においては効率よく働くことが示されてきた。

しかしながら、ここで現実場面(現実世界において、視覚的な探索が必要となる場面)における情景(シーン)に目を向けると、例えば繁華街では、派手な色の広告など、顕著性が極めて高く、視覚的注意が外発的に誘導される刺激が同時に多数存在している(図 1.3)。こうした場合には、顕著性のみでは目標刺激を見つけるのは難しい。つまり、顕著性が視覚的手がかりとして常に役

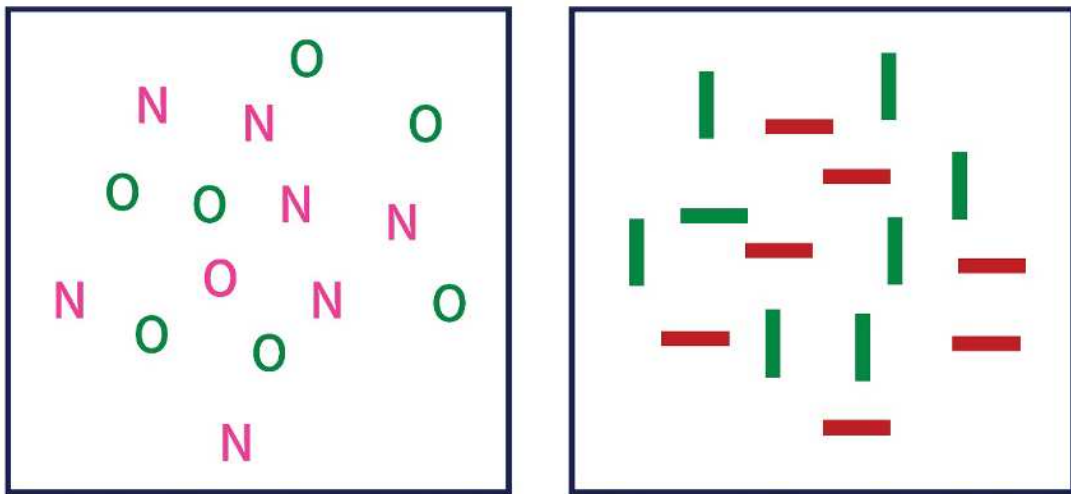


図 1.1 Treisman and Gelade (1980)による視覚探索刺激の典型例
左図では赤い円が目標刺激となり，その他の妨害刺激群の中から探し出す．右図では緑色の横棒が目標刺激となっている．これらは結合探索の例となっている．

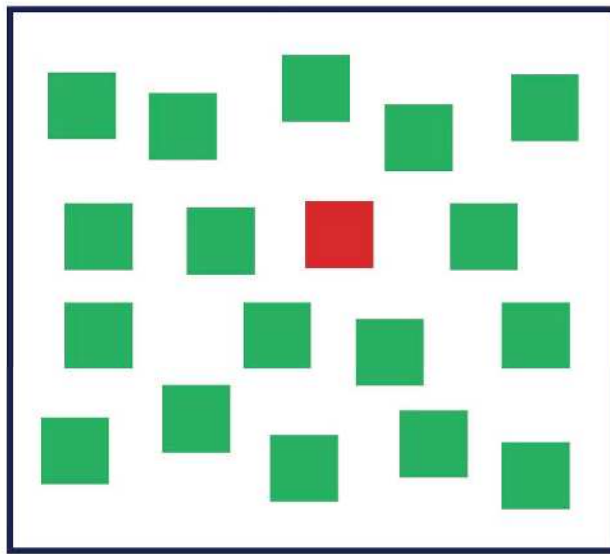


図 1.2 特徴探索刺激の例

目標刺激（赤い四角）は色相の次元のみで妨害刺激と異なっているために，目標刺激の顕著性が高く容易に探索されうる．



図 1.3 繁華街の風景
顕著性が高い視覚刺激が多数存在している。

立つわけではない．日常では，見つけ出すべき目標刺激が妨害刺激と比べて顕著でないといった状況も多々あり得る．つまり，現実場面における探索行動や注意の誘導を理解するためには，顕著性以外の情報も考慮する必要がある．

1.2 本研究において検討する 3 つの要因

視覚探索研究では，図 1.1 や図 1.2 に示したような人工的なパターンがよく用いられてきた．しかしながら，視覚探索に関する近年の総論で指摘されているように（Eckstein, 2011; Carrasco, 2011），現実場面を対象とした視覚探索のメカニズム解明に取り組むことが期待されている．もちろん現実場面における探索の研究はその数が増えつつあるが，視覚探索研究の第一人者である J. Wolfe が記した最新の総論（2020）においても，現実場面を対象にした研究はまだ途上の段階であると総括されている．こうした現状を鑑み，本研究における最終的な目的を，現実場面における視覚探索行動のメカニズムを実験心理学に基づいて理解することとした．現実場面は無数にありうることから，これは非常に大きな問題設定であるために，研究としてはよりの絞る必要がある．そこで本研究では，現実場面の探索行動において鍵となる次の 3 点について検討していく．

- （1） 文脈
- （2） 学習
- （3） 身体動作

以降で記すように，これらは視覚探索における重要な要因であり，顕著性とはまた別の形でそれぞれ探索行動の基軸となっている．本研究では現実場面における視覚探索行動に含まれるこれらの要因を検討するが，その際には視覚探索時における視線変化の

特徴（視線パターン）を共通の指標とする．つまり，課題を遂行している時の，眼球運動（eye movement）や注視（gaze）を機器により測定し，得られた特性に基づいて，探索行動のメカニズムを推定する．これまでの数多くの研究から，ある認知課題における視線パターンは，その課題を達成するために働いている背後の視覚メカニズムを反映すると考えられている（Gegenfurtner et al., 2011; Henderson et al., 1999）．次項以降でこれら 3 点の要因を選択した理由を述べ，続いて視線パターン計測の意味について解説する．

1.2.1 検討する要因（1）：文脈

探索行動に関わる要因の一つ目は「文脈」である．日常の風景の各場面に含まれる特有の視覚情報を視覚的文脈（visual context）と呼ぶ（Eckstein, 2011）．例えば教室に入り空席を探す場合，私たちがまず天井に目を向けてそこから探し始めないのは，一般に天井には座席は設置されていない，という典型的な教室の空間的構造を視覚的文脈として保持しているからである．この場合，たとえ天井に顕著性が高い物（例えばきらびやかな装飾）があったとしても，空席を探している場合はそれに注意が誘導されるわけではない．心理学用語としての「文脈」は，知覚や認知，記憶に影響を与えうる，時空間的な要素を含んだ周辺的情報の総称として定義されている（有斐閣現代心理学辞典，2021）．こうした文脈が探索行動に大きな影響を与えることはこれまでの研究から指摘されている（e.g., Biederman et al., 1982; Maljkovic & Nakayama, 1994）．

文脈の効果を示す一つ目の研究例としては、日常風景の中に異質な物（文脈から逸脱する物）を配置した時の視覚探索である。図 1.4 左側はキッチンのイラストである。右側の 3 点の物（a）（b）（c）を左側のキッチンのどこかに置いた場合、このキッチンが文脈（先の定義によれば、知覚や認知に影響を与える空間的周辺的情報）となり、右側の物品 3 点それぞれの探索のしやすさに影響を与える（Palmer, 1975）。現実場面における探索行動を理解するためには、こうした文脈を手がかりとして、視覚的注意が何に対して、どのように誘導されるか、その説明が課題となる（Wolfe, 2020）。

文脈の効果を示す二つ目の研究例として、文脈手がかり効果（contextual cuing effect）と呼ばれる視覚探索課題がある（図 1.5）（Chun & Jiang, 1998; Chun, 2000）。この課題では、妨害刺激の配置を固定した条件（old 条件）と、毎回その位置をランダムにした新規条件（new 条件）を用意し、その位置が固定された目標刺激の探索を繰り返す。このように探索の学習をさせると、固定条件の方が新規条件よりも探索精度がより高く向上していく。図 1.5 では反応時間の差が徐々に開き、固定条件の方が速くなっていく様子がみてとれる。この結果は、固定条件における妨害刺激の配置が文脈として潜在的に学習され、その結果注意の誘導が促進されていることを意味する（Chun, 2000）。これらの研究においては、図 1.4 や図 1.5 の刺激画像が示すように、画像特徴的な意味での顕著性（例えばより明るい、より大きい、より長いなど、視覚属性において際立っているということ）は注意の誘導に対して大きな意味を持たない。ここでは文脈情報の処理が探索のパフ

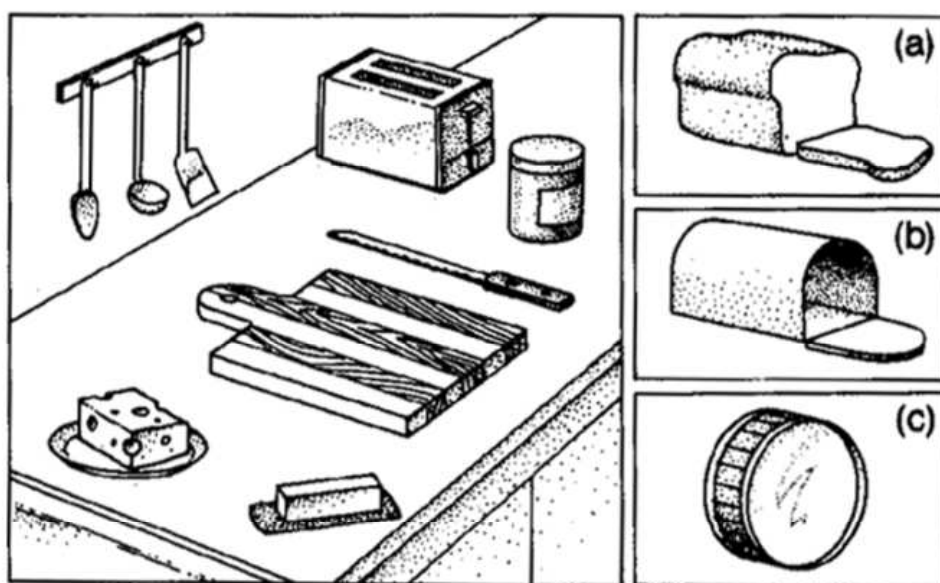


図 1.4 視覚探索における文脈の効果

キッチンという文脈に合致した目標刺激(a)は探索しやすい一方で, 合致していない目標刺激 (b) (c)の探索には時間がかかる. 図は Palmer (1975)より引用.

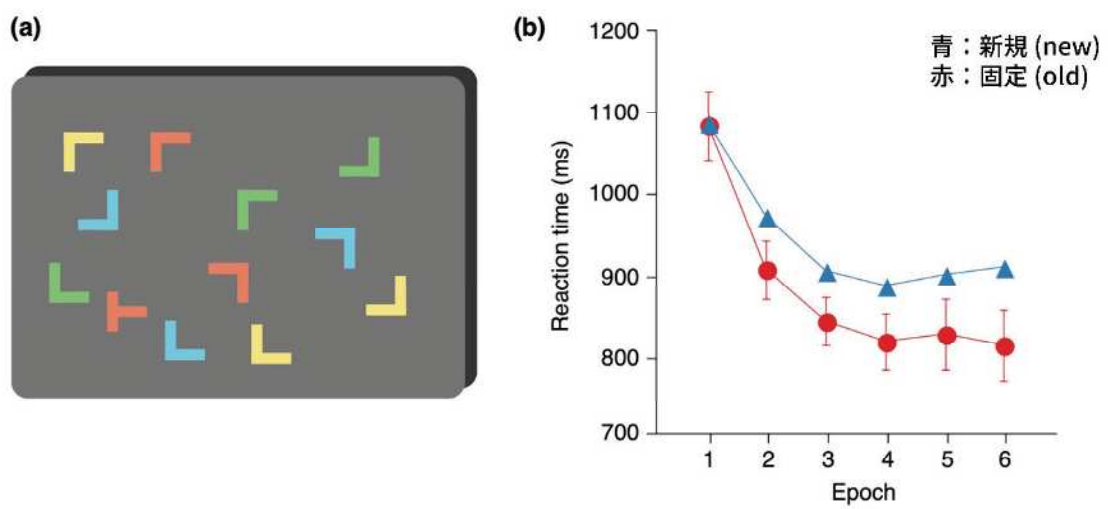


図 1.5 視覚探索における文脈手がかり効果

妨害刺激が固定されている場合の方が，視覚探索が促進される．
図は Chun(2000) より引用．

パフォーマンスを決める要因となっているといえる。

現実場面の探索においては、おそらくは文脈が顕著性よりも重要な要因になる。現実場面は完全にランダムな世界ではなく、ある種の規則性をもっており、その中である特定の画像特徴のみが際立つような場合は少ないと考えられるからである (Eckstein, 2011)。そこで本研究では、無数にある現実場面（例えば図 1.4 ではキッチンを場面を選んでいる）から、交通に関連した文脈を選び、そこでの探索行動を検討する。交通場面を選んだ理由は、それが日常生活において重要であり、時には生命の安全とも結びついていること、場面のバリエーションが豊富であること、そしてすべての実験参加者の日常と結びついていることという 3 点にある。使用した刺激の 1 つは地下鉄の路線図である。探す駅は変わりうるとしても、路線図自体は変わりようがないために、路線図における文脈（空間的周辺の情報）は完全に固定されているといえる。その他の文脈として、運転場面、すなわちドライバーズシートからみた風景の画像及び映像を検討する。この場合には、交通場面という意味での文脈は固定されているが、場面ごとに状況が全く異なるという点で、バリエーションがあるといえる。後述する視線パターンの計測により、こうした視覚探索場面において機能する視覚メカニズムを推測する。

1.2.2 検討する要因 (2)：学習

探索行動のパフォーマンスを決める二つ目の要因として、学習 (learning) を検討する。一般的には、視覚探索課題を繰り返す毎に、反応時間や誤答率として表されるパフォーマンスは向上する。

図 1.6 は Takeuchi ら (2011) による視覚探索の学習例である。ここでは、空間周波数と方位という 2 パラメータを変数としたパターンの中から目標刺激を探し出す結合探索を行っている。目標刺激は左に傾いた高空間周波数のガボールパターンである。毎日 20 試行を行ったところ、反応時間は徐々に速くなり、実験開始から 10 日目あたりでは、反応時間は $1/3 \sim 1/4$ になったことがみてとれる。図 1.6 で示した刺激では、目標刺激と妨害刺激の顕著性には大きな違いがないことから、顕著性の知覚が学習により変容したわけではないといえる。

学習による知覚の精緻化は知覚学習 (perceptual learning) パラダイムにより検討されてきた (e.g., Goldstone, 1998)。方位や運動といった基本的な視覚属性を持つ単独のパターンの検出と弁別に関する知覚学習は、視覚情報処理過程の初期において達成されているとするモデルが主流である (Doshier & Lu, 2017)。その一方で、目標刺激を妨害刺激の中に配置する視覚探索課題では、刺激が提示される網膜偏心度やあるいは左右眼に影響されない、幅広い範囲で学習の転移が生じる、結合探索においても顕著な学習効果がみられるといった実験結果が得られている。そのために、視覚探索の学習は、一般的な知覚学習より高次のレベルで生じていると考えられる (Sireteanu & Rettenback, 2000)。図 1.6 の場合は、ある特定のパターン(ここでは特に目標刺激となるパターン)に対する記憶の構築とその読み出しが、学習により効率的になったといえる。図 1.7 は Sireteanu and Rettenback (2000) による学習課題に用いられた視覚探索用の刺激である。

現実場面のような複雑な情景において視覚探索の学習をおこ

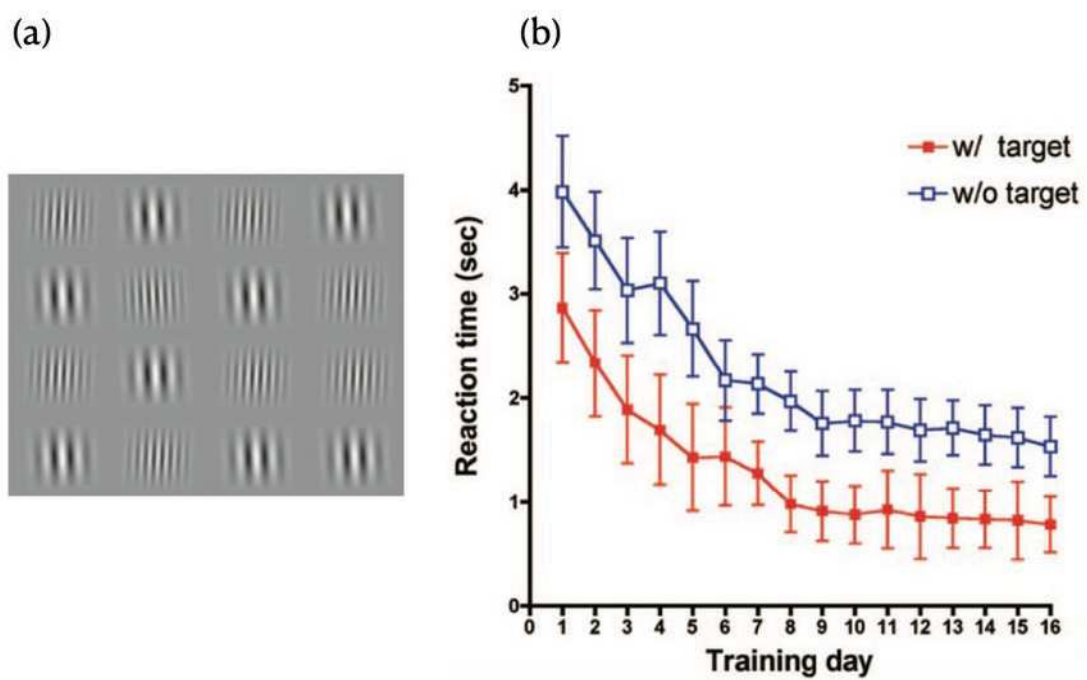


図 1.6 視覚探索における学習例

左に傾いている高空間周波数のガボールパターンが目標刺激になる結合探索である．日々試行を繰り返すと，反応時間は $1/3 \sim 1/4$ になる．関数の違いは，目標刺激が含まれているか否かを示している．図は Takeuchi ら (2011) より引用．

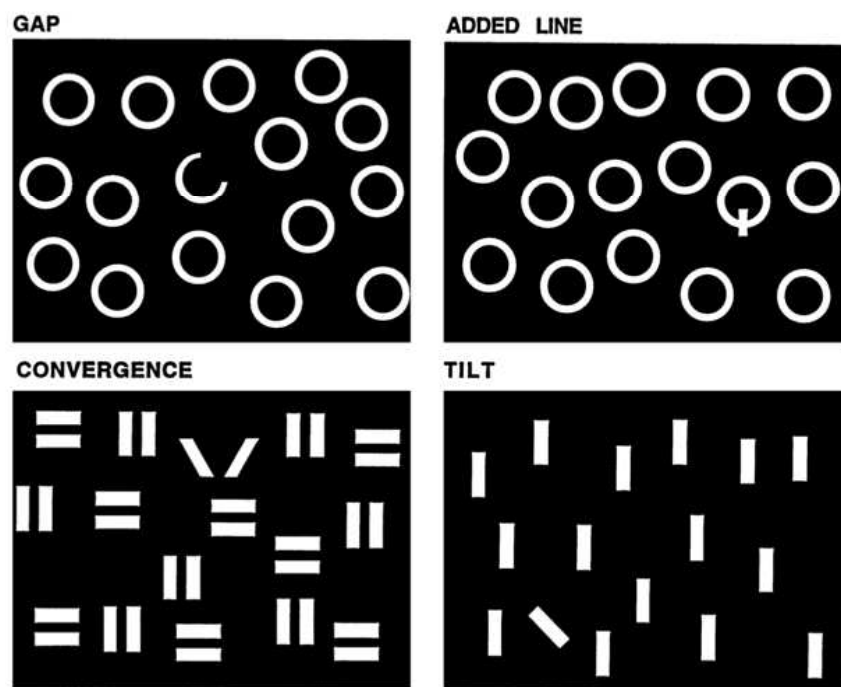


図 1.7 視覚探索の学習において用いられた刺激例
 図は Sireteanu and Rettenback (2000) より引用.

なった場合は、どのようなメカニズムが探索行動のパフォーマンスを決めるであろうか？本研究においては、短期間と長期間双方の学習を扱う。短期間の学習では、試行毎の視線パターンの変化を計測する。長期間の学習としては、運転経験の有無の違いにより実験参加者をグループ分けし、視線パターンの違いを比較する。得られた視線パターンの解析に基づいて、視覚探索場面において機能する視覚メカニズムを推測する。

1.2.3 検討する要因（3）：身体動作

探索行動の理解に重要な三つ目の要因として、探索時における身体動作の効果について検討する。これは、日常における探索活動では、多くの場合身体動作が伴うという観察に基づく。例えば冒頭に記したマグカップを探す行為を、体を完全に静止させた状況で行うことはありえない。探索の際には体を動かす、頭を回すといった動作が生じ、またマグカップが視界に入った場合には手を伸ばすといった動作が生じる。しかしながら、上記で紹介した多くの視覚探索実験では、着席し、顎台（chin and head rest）とよばれる装置により顔が動かないように固定するのが一般的である。身体動作が視覚探索にどのような影響を及ぼすか、現状では未解明ではあるが、関連する研究を2点紹介する。その1つは、Jee ら（2018）は、地球の自転に関する学習について、教室内で実地研究を行った。実験では、(1)特別指導なし、(2)模型を使用した学習、(3)模型の使用に加え、全身動作を伴いながら地球の動きを学習、(4) (2)および(3)に加えて、関連する問題を解きそれにつ

いて解説を受ける，といった条件を用意し，テストの結果から身体動作が学習に及ぼす効果を検討した．その結果，学習に全身動作を伴うことにより，成績が向上することが示された．この結果から，3次元空間の把握には身体動作がポジティブな影響を及ぼすことがわかる．3次元空間における視覚探索において空間の把握が必要なのであれば，探索のパフォーマンスに身体動作が影響を及ぼす可能性が示唆される．

その一方で，視覚探索という課題自体が身体動作を制限するという報告もある．Bonnetら（2019）は，図 1.8 に示した画像（「ウォーリーを探せ」）を自由に観察するだけの課題（free-viewing）と，実際にウォーリーを探させる視覚探索課題を行った．この両課題遂行時の身体動作を計測したところ，視覚探索時には自由観察時よりも身体動作（上半身や頭の動き）が減少した．また，より速く課題が遂行できた時（つまりパフォーマンスがよかった時）には，身体動作が少なくなっていた．この結果は，視覚探索遂行時には，視線を正確に移動させるために身体動作を減少させるという視覚と身体運動の協調メカニズムが機能している可能性を示唆している．両研究を鑑みると，身体動作と視覚探索との関係は複雑であると考えられる．本研究では，視覚探索の際に手の動きを取り入れるといった操作に加えて，バーチャルリアリティ（仮想現実，VR）空間において視覚探索実験を行うことにより，身体動作を伴う探索時の視線パターンを計測した．



図 1.8 ウォーリーを探す視覚探索課題

図は Bonnet ら (2019) より引用.

1.3 視線パターンの定義

人は興味がある箇所に視線を能動的に動かすが，こうした興味対象への視線の動きは無意識的にも起こりうる．「目は心の窓」と言われるように，視線計測は心のメカニズムを解明する有力な方法の一端を担ってきた（Liversedge et al., 2011）．本研究では上記で記したさまざまな視覚探索課題の遂行中の視線パターンを分析することにより，現実場面における視覚探索のメカニズム解明をめざす．そこでまず視線パターンとは何か，その定義を記し，続いてそうした視線パターンの特性と課題遂行の背後にある視覚メカニズムとの関係について述べる．

図 1.9 に，眼球運動計測器（アイトラッキングデバイス，アイトラッカー）により，スーパーマーケットの陳列棚を見ている観察者の視線計測により得られたヒートマップ（heat map）を示す．ヒートマップにおけるより赤い領域に視線が多く（かつ長く）とどまっていたことを示している．つまりより多く注視されていた，ということである．このとどまっている視線の状態を停留（fixation）と呼ぶ．この例では左側や右側に停留が集まっていたことがわかる．図 1.10 は図 1.9 のヒートマップを視線（注視）プロット（gaze plot）として表している．円の中の数字は視線が停留した順番，円の大きさは視線が停留した時間の長さを示している．視線の一回の停留時間は 100～300ms となる（Henderson et al., 1999）．また円を結ぶ線分の長さが長い場合，たとえば図 1.10 における 1 番と 2 番の線分の場合は，視線が高速で遠距離を移動したことを示している．こうした視線の動きをサッカード（急速眼



図 1.9 視線計測から得られたヒートマップ



図 1.10 視線計測から得られた視線プロット

球運動）と呼び，またその移動距離をサッカード振幅と呼ぶ．本研究では，視線速度 $100^{\circ}/s$ 以上の眼球運動をサッカードと定義し，その振幅を記録した．

図 1.11 に視線パターンの模式図を示した．本研究では，サッカード振幅に加えて，60ms 以上一箇所にとどまっていた視線成分を「停留」と定義し，その時間（視線一回の停留時間）を計測した．視線一回の停留時間は図 1.10 と同様に円の大きさで表している．また実験によっては AOI（興味領域，areas of interest）を設定し，その AOI へ最初に停留するまでの時間（初回停留までの時間）や視線一回の停留時間，サッカード振幅を計測した．

視線パターンと視覚メカニズムの関係は，とくに画像理解における能力向上を理解するという目的から研究が進められてきた．さまざまな情報の中から目的に必要な視覚情報を把握し理解する画像認識能力は，例えばチェスのプレイヤーや運動競技の審判，あるいは画像診断医などが持つエキスパートレベルの能力の土台となっている．こうしたエキスパートは，集中的な訓練によって画像認識能力を向上させている．画像認識能力の向上の度合いは，画像の理解そのものにかかる時間やターゲット同定の正確さに加えて，画像観察中の視線パターンの変化に現れる．実際，訓練に多大な時間を費やし経験を積んできたエキスパートの，その専門領域における画像認識時の視線パターンは未熟練者とは異なることが多数の研究で示されており，メタ分析がなされている（Sheridan & Reingold, 2017; Gegenfurtner et al., 2011）．

例えば Sheridan and Reingold (2017) は，チェスのエキスパートと初心者に，駒を動かさない配置と動かせる可能性がある配

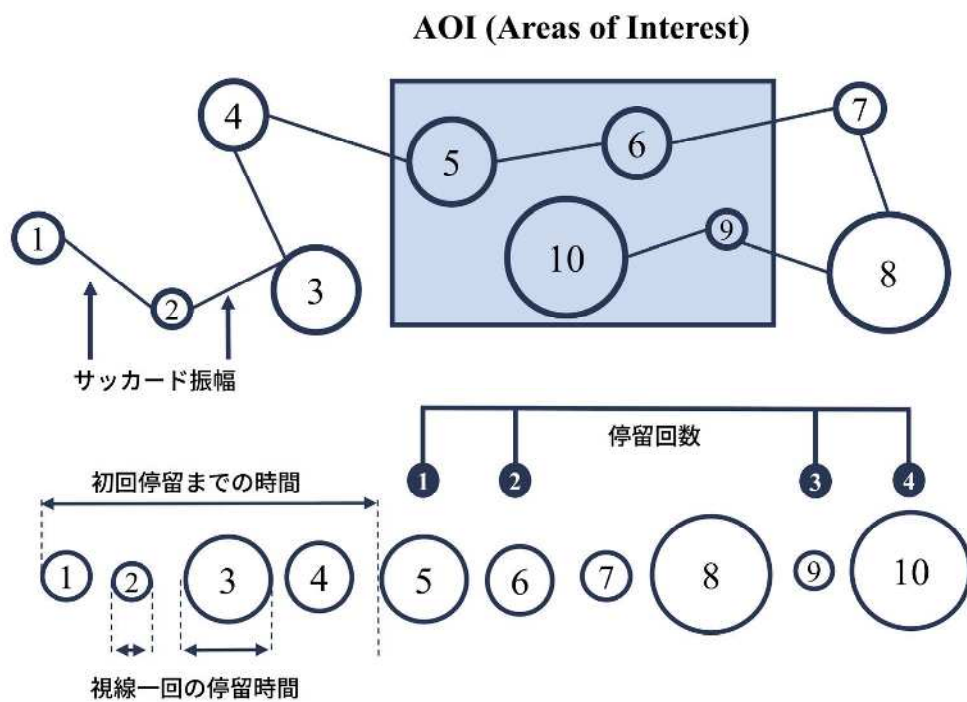


図 1.11 視線パターンの模式図と解析対象

本研究では，サッカード振幅と視線一回の停留時間を主な解析対象とする．

置を提示し、最善な動かし方が可能な駒を探している時の視線を計測した。視線が配置へ最初に滞在し続ける時間である初回滞在時間については、エキスパートの視線は駒を動かさない配置には長く留まらず、可能性がある配置を長く見た。一方、初心者の視線はどちらの配置にも長く留まった。また Assaf ら（2016）は、画像診断の専門医としての経験を 7 年持つエキスパートと最低 2 年の経験を持つ研修医に画像を提示し、疾患を報告させる画像認識課題を行った。画像観察中の視線を計測した結果、エキスパートには未熟練者とは異なる視線パターンがみられた。

訓練や学習、経験により視線パターンが変容すれば、後述するように、その背後で働く視覚メカニズムの類推が可能になる。

1.4 学習に基づく視線パターン変化と探索メカニズムの推定

Sheridan and Reingold (2017) によると、医療画像診断時におけるエキスパートの視線パターンの特徴は非熟練者に比べると、サッカード振幅が大きい、視線一回の停留時間が短い、そして、目標刺激内における視線の停留回数が少ないといった特徴がある。エキスパートにおけるこうした特徴は、医療画像以外、例えば地図、科学捜査、運転時やスポーツの画像や映像における画像理解においてもみられるため、画像領域の分野を超え共通した傾向を持つと考えられる。こうした傾向は、Gegenfurtner ら(2011) が 296 点の研究データに対して行った、視線パターンと画像認識能力との相関に関するメタ分析によりも示されている。

これらのメタ分析において最も重要な点は、長期の学習により変容した視線パターンは、パフォーマンスを向上させる視覚メカニズムと関連していることを明らかにした点にある。この指摘によると、学習によりサッカード振幅量が増加することは、画像に対する全体的処理 (holistic processing) が促進されていることの現れである。ここでいう全体的処理とは画像全体を短時間の間に大きく、非局所的に精査 (スキャン) できる能力一般を示す。走査領域を視覚的スパン (visual span) と呼ぶ。サッカード振幅により定義される精査の大きさは、画像理解の精度と相関している (Kundel et al., 2007; Reingold et al., 2001)。つまり訓練を経たエキスパートは、毎回画像内の各領域を個別に注視せずとも、より広く離れた周辺視野領域から目標刺激を検出できる能力を持つ (Charness et al., 2001, Reingold et al., 2001)。したがって全体的

処理能力の向上は視覚的スパンの拡大とも言い換えられる。

視線一回の停留時間もまた、背後の視覚メカニズムに関して重要な情報を含む。まず長期の訓練を受けたエキスパートは、当該の画像理解が求められた場合に、非熟練者よりも視線一回の停留時間が短くなる。これは、訓練により選択的注意が精緻化したことによると考えられている (Assaf et al., 2016; Krupinski et al., 2013; Donovan et al., 2013)。選択的注意の精緻化とは、画像内で目標刺激が存在する重要箇所へ、正確かつ素早く注意を向けることができるようになることを意味し、結果として課題のパフォーマンスが向上する。上記の先行研究及びメタ分析 (Gegenfurtner et al., 2011; Sheridan & Reingold, 2017) から、視線一回の停留時間の減少と、パフォーマンスの向上および目標刺激に対する視線位置精度の向上には明確な相関がある。

その一方で、課題遂行に伴い視線一回の停留時間が増加する場合もありうる (Henderson et al., 1999; Castelhana et al., 2009)。その典型的な例が、観察している画像に関する視覚記憶課題を行う場合である。この場合は、視覚探索課題のように画像内の物同士を比べて正しい目標刺激を探し出す作業ではなく、画像内の物をすべて覚えるという作業を伴う。Henderson ら (1999) は視覚探索課題遂行時と比較すると、視覚記憶課題遂行時に視線一回の停留時間が 40ms 程度増加することを示している。これは、画像内の物同士を比較することよりも、画像内の物を記憶の方が脳内の認知的処理が遅い、あるいは記憶のためにより多くの処理ステップを踏んでいる可能性を意味する。記憶過程においては、画像内に示されている物の心的表象が短期記憶や長期記憶内に形

作られるため、これが処理ステップ増加の一因となる。こうした心的表象をテンプレート（template）と呼ぶ。作られたテンプレートといま目の前にしている知覚対象との照合（matching）により、記憶課題は達成される。より精緻なテンプレートの構築が記憶課題のパフォーマンスを向上させるが（Ericsson & Kintsch, 1995; Grubert & Eimer, 2018）、そうした構築には時間がかかり、結果として視線一回の停留時間が上昇する（Henderson et al., 1999）。視覚探索時のテンプレートには、ワーキングメモリ（作業記憶）において利用されるテンプレートと、長期記憶において保持されるテンプレートの双方がありうる（Wolfe, 2020）。前者は目標刺激に関する粗い表象で、探索時にのみ用いられるものである。どちらのテンプレートも探索行動の向上に寄与する。

以上の点をまとめたものが表 1.1 となる。本研究では、表 1.1 に示したようにサッカード振幅と視線一回の停留時間を計測する。その際には、これらの指標が、試行の進展（学習）、あるいは課題に対する経験の有無に基づいて、変化するか否か、変化するとすればどのように変化するか（増加するか減少するか）に注目する。本研究の目的は、現実場面における視覚探索のメカニズムの解明であるが、そのために、表 1.1 に記した視線に関する指標の変化から視覚探索に関与する視覚メカニズムを推定するという手法をとる。ここでいうメカニズムとは表 1.1 に記したように、選択的注意を精緻化するメカニズム、記憶を精緻化するメカニズムおよび画面の全体的処理を向上させるメカニズムを指す。

表 1.2 においては、本論文の各章において、上述した視覚探索における 3 つの要因（文脈、学習、身体動作）の操作内容および

表 1.1 視線パターンの特性と認知機能の関係

1回の停留時間	<p>選択的注意と記憶を反映</p> <p>➡ 選択的注意の精緻化</p> <p>➡ 記憶の精緻化とテンプレートの構築</p>
サッカード振幅	<p>➡ 情景の全体的処理能力の向上</p>

指標とした視線パターンについて記した。図 1.12 は、本研究におけるこうした枠組みを簡略化して記した。この図に記したように、各条件下において得られた視線パターンを比較することにより、その変容の傾向から背後のメカニズムを推定する、という方略をとる。

表 1.2 本研究における刺激操作と視線パターン測定に関するまとめ

	実験	視覚刺激	文脈	学習	身体動作	視線の指標
第2章 地下鉄路線図における視覚探索	1	オリジナル路線図	固定	試行を繰り返す	顎台で頭部固定	サッカード振幅 一回の停留時間
	2	オリジナル路線図		実験1から 1週間後に実施		
	3	白黒加工路線図		試行を繰り返す	手の動作 (マウス操作)	
	4	オリジナル路線図				
第3章 運転場面における視覚探索	5	運転場面：静止画像	変動	運転経験の有無	顎台で頭部固定	サッカード振幅 一回の停留時間
	6	運転場面：動画像				
第4章 仮想現実空間における視覚探索	7	立方体とそのパーツ (VR)	ランダム (通常の視覚探索)	試行を繰り返す	身体動作自由 (仮想現実空間)	サッカード振幅 一回の停留時間

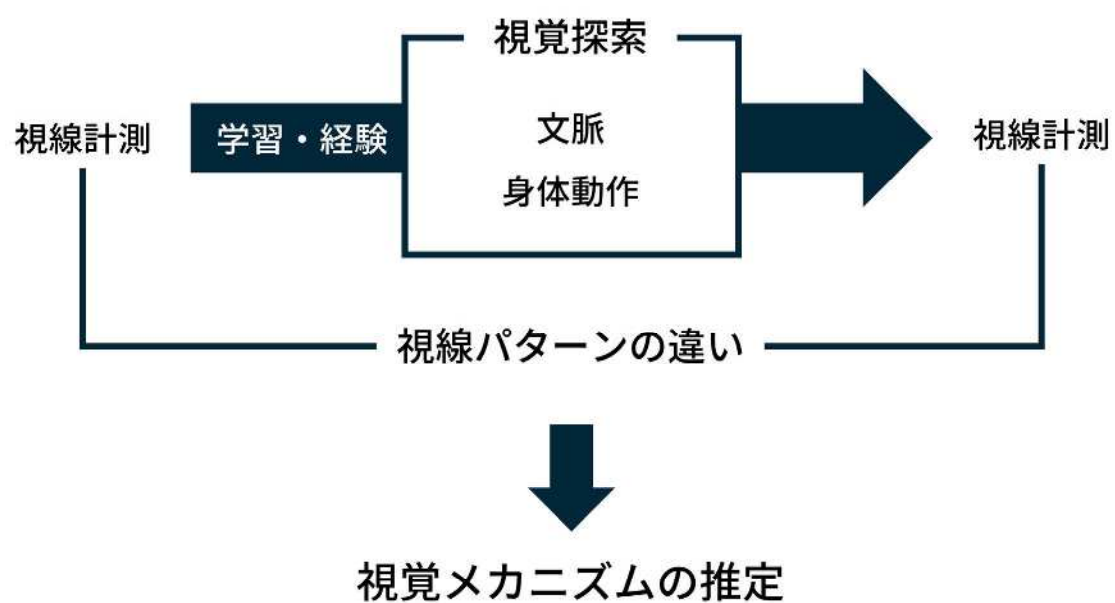


図 1.12 本研究における枠組み

視覚探索遂行時には、刺激の文脈や探索時の身体動作について操作する。そして視覚探索課題の学習中における視線パターンの変化、あるいは経験の有無に基づく視線パターンの違いを記録する。視線パターンのデータから関与する視覚メカニズム（表 1.11）を推定する。

第 2 章 路線図における視覚探索

2.1 目的

第 2 章では、現実世界の視覚探索における文脈（知覚や認知、記憶に影響を与えうる、時空間的な要素を含んだ周辺的情報の総称）を検討する刺激として、地下鉄路線図を用いた。現実世界で接する視覚対象のうちで交通路線図は、文脈が完全に固定されたものであるといえる。

まず実験 1 では、初見の地下鉄路線図上で探索を繰り返し行い、学習させた。その際の探索パフォーマンスおよび視線パターンに変容がみられるのか検討した。そこから、表 1.1 及び図 1.12 の枠組みに従って、路線図探索のメカニズムを明らかにすることを目的とした。実験 2 では、実験 1 の参加者に対して 1 週間後に再度、同一の実験を行うことにより、視覚探索のパフォーマンスおよび視線パターンの変容が長期的に保持されるのか検討した。実験 3 では路線図を無彩色に加工し、色彩情報を利用しづらい状況においても実験 1 と同様の傾向がみられるのか、実験 1 のロバスト性を確認した。実験 4 では、路線図の探索時に入力機器であるマウスの操作が伴うことにより、身体動作の一部である手の動きが探索に与える影響について検討した。

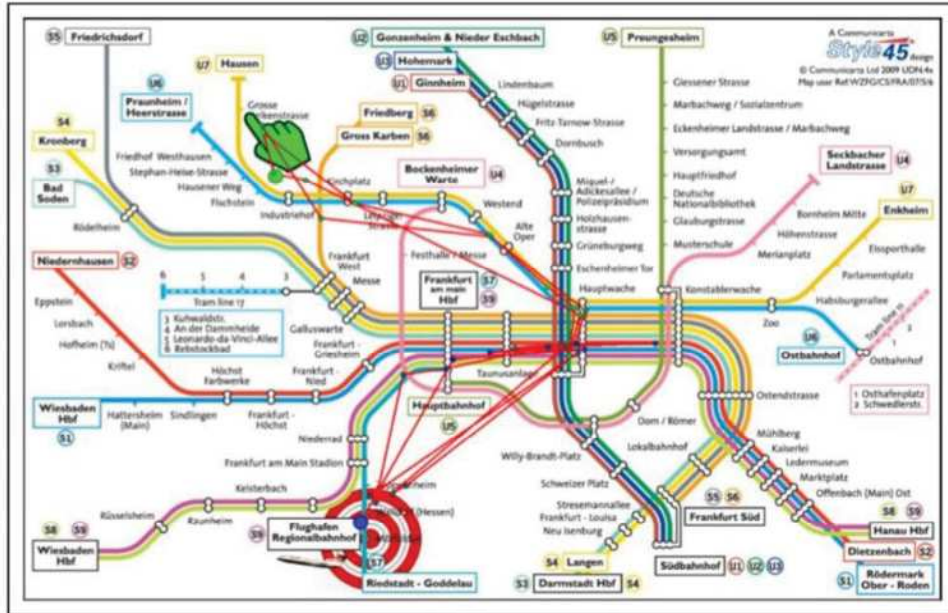
現実場面の画像における文脈の効果を検討する場合、そもそも何を文脈として定義するか、あるいは文脈をどのように定量的に操作するかという問題が生じる (Chun, 2000)。初見の地下鉄路線図を用

いることにより、文脈の定義およびこれまでの経験については明らかになっていると言える。文脈の操作（たとえば無彩色に変化させること）も明確に定義できる。

初見の路線図における視線位置を計測した先行研究では、おもにスキャンパス（視線移動の経路）の変容の解明をターゲットにしている（Netzel et al., 2016, 2017）。Netzel ら（2016）は、世界の 24 都市から集めた地下鉄路線図において、オリジナルの有彩色の路線図と無彩色に加工した路線図を使用し、現在地から目的地までに要する地下鉄の乗り換え回数を報告する課題を行った。課題遂行時の視線を計測した結果、路線図における色の有無により探索方略が異なることを報告している（図 2.1）。一方、本研究の目的はこうしたスキャンパスの変化をもたらした背後のメカニズムを明らかにすることである。そこで、画像の全体処理や選択的注意、記憶メカニズムの関与を検討することが可能である、視線一回の停留時間やサッカード振幅そのものに着目する。

ここで、表 1.1 に示した視線パターンから推定される視覚メカニズムについて再度記述する。サッカード振幅の増加は情景の全体的処理の向上を示す（Kundel et al., 2007; Reingold et al., 2001）。視線の一回の停留時間は、選択的注意と記憶メカニズムを反映する（Gegenfurtner et al., 2011; Sheridan & Reingold, 2017）。その増加は記憶の精緻化とテンプレートの構築（Henderson et al., 1999; Ericsson & Kintsch, 1995; Grubert & Eimer, 2018）、その短縮は選択的注意の精緻化（Assaf et al., 2016; Krupinski et al., 2013; Donovan et al., 2013）を示す。

A



B

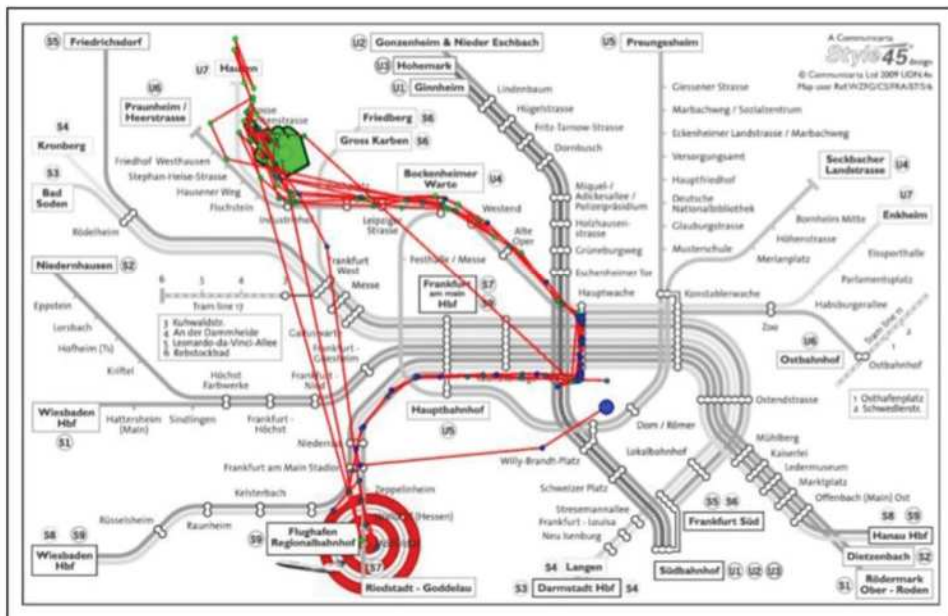


図 2.1 路線図における色彩の有無における注視経路

フランクフルト市内における有彩色(図 2.1A)と無彩色(図 2.1B)に加工した鉄道路線図。路線図上の赤色の線はスキャンパス。緑色の大きな円はスキャンパスのスタート地点、青色の大きな円はスキャンパスの終点を示す。図は Netzel ら(2016)より引用。

2.2 実験 1 初見の路線図における視覚探索

2.2.1 目的

実験 1 では、実験参加者が初見の大阪地下鉄路線図を使用し、2 本の路線が接続する駅名を探索させる課題を行った。試行を繰り返し、反応時間および課題遂行時の視線を計測した。視線パターンの変容から路線図探索の背後に駆動するメカニズムを推定することを目的とした。

2.2.2 方法

参加者

実験 1 の参加者は 30 名 ($M=21.8$ 歳, $SD=2.54$) であった。実験前に、石原色覚検査表Ⅱコンサイス版 14 表 (株式会社半田屋商店) により実験参加者全員が正常色覚であることを確認した。また、全員が矯正視力を含む正常な視力を有していた。全実験参加者の出身地は関東およびその近辺であり、現在の居住地は東京都あるいは神奈川県であった。実験参加者に対しては、実験前に大阪の地下鉄を含む関西の鉄道路線に関する知識を問い、全員がその知識は全くないと回答した。この点に関しては実験後に再確認した。

視覚刺激

刺激画像には、大阪市高速電気軌道株式会社 (Osaka Metro) のホームページに掲載されている大阪府の地下鉄の全線路線図を使用した (<https://subway.osakametro.co.jp/guide/routemap.php>)。大阪府全体の地下鉄の路線図となっており、上方に各路線の路線色と、凡例

として各路線のアルファベット，路線名が示されている．本実験では，この路線図より大阪府の中心部のエリアのみを使用し，その周囲の部分は切り取った．路線図上には地下鉄 8 路線および JR の路線が表示されていた．各線の路線色，アルファベット，路線名は画像上方に示した．さらに，画像の最上部には駅を探し出すための問い（例：「千日前線と中央線が通っている駅の名前は？」）を示した．正答となる駅が異なる課題を 10 問作成した．その際，問いとなる 2 路線は一部の路線に偏りが出ないようにし，正答となる駅においても路線図上の位置に偏りが生じないように選出した．

視線の計測と解析

視覚刺激は，24 インチ液晶カラーディスプレイ（BenQ XL2420T, BenQ Corp.）に提示された．ディスプレイの空間解像度は 1920×1080 ピクセル，リフレッシュレートは 60 Hz であった．実験のセッションはパーソナルコンピュータ（Dell Optiplex9020SF, Dell Inc.）および視線計測解析用ソフトウェア（Tobii Studio Professional 3.4, Tobii Technology Inc.）により制御された．観察距離は 60 cm とし，実験参加者の頭部を顎台で固定した．視覚刺激提示時における視線位置の測定には眼球運動計測器（Tobii Pro X3-120 アイトラッカー，Tobii Technology Inc.）と視線計測解析用ソフトウェア（Tobii Studio Professional 3.4）を使用した．カタログ値による眼球運動計測器のサンプリングレートは 120 Hz, 正確度 0.4° , 精密度 0.24° であった．サッカードと停留の検出には Tobii Studio Professional 3.4 に実装されている I-VT（Identification of Velocity Threshold）フィルター（Olsen, 2012）を使用した．I-VT フィルターでは 2 点の間の速度

が閾値よりも大きい場合はサッカード、閾値を下回った場合は停留として分類される (Salvucci & Goldberg, 2000). 本研究では、風景画像探索時 (Over et al., 2007) や読書時 (Radach et al., 2008) における視線解析手続きに基づき、視線一回の停留を定義するための最小停留時間を 60ms とし、視線速度 $100^{\circ}/s$ 以上をサッカードに分類した (Bahill et al., 1975; Collewyn et al., 1988). この I-VT フィルターでは、ドリフトやマイクロサッカードといった固視微動はノイズとして扱われ、それ以上の解析はされない。視線位置の解析は実験終了後にオフラインで行った。

手続き

課題を決めるために、本実験参加者とは異なる 15 名 ($M = 21.0$ 歳, $SD = 0.87$ 歳, 本実験の参加者と同様、関東およびその近辺の出身であり、現在東京都あるいは神奈川県在住) にアンケートを行った。ディスプレイ上に東京の地下鉄路線図 (東京メトロ線, 都営線) を提示し、その利用方法について記載してもらった。その結果、ある路線 A から別の路線 B に乗り換えることができる駅はどこか (あるいは、ある路線 A と路線 B がどこの駅で接続しているか) を調べるために使うという回答が最も多かった (15 名中 14 名)。Netzel ら (2016) の実験における課題「駅 A から駅 B に行くまでには何回の乗り換えを要するか」という質問は、言い換えれば「A から B に行くまでにはどの路線に乗ればよいか」を探索する課題である。出発駅から目的駅までの行き方について、路線図を利用して探すとした回答数は 15 名中 3 名であった。その主な理由として、東京の地下鉄の路線は複雑であり、目的地まで到達する方法が複数ある場合

が多いという点が挙げられた。アンケートの記載によると、路線図のみを用いて出発地から目的地への路線を特定することは困難であり、出発駅と目的駅を入力することにより乗り換え方法がわかるインターネット上のサービスを利用するとのことであった。出身地や居住地等の共通性から、実験 1 の参加者はアンケート回答者と同様の方法で地下鉄路線図を利用していると推定される。そのために、Netzel ら（2016）の課題は実験 1 の参加者にとって一般的な路線図の利用方法に基づかない課題であると考えられる。そこで実験 1 では、アンケートにおいて最も回答の多かった利用方法に基づき、「2 本の路線が接続する駅名」を答えさせる課題を行った。具体的には、各路線図において、あらかじめ指定された 2 本の路線が交差する駅名を見つけ出し、解答する課題を行った。

実験が開始されるとまず、ディスプレイの中心に黒い十字（ $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ ）が凝視点として 2 s 提示された。また、凝視点の提示部分の上方に、課題の内容を示した文章（例：「千日前線と中央線が通っている駅の名前は？」）が提示された。実験参加者は課題を理解できたら凝視点に視線を合わせ、スペースキーを押した。その直後に視覚刺激として路線図の画像が提示された。路線図の上方には、凝視点提示時と同じように課題の内容を示した文章が提示された。画像提示時間に制限はなく、実験参加者が正答となる駅名を見つけるまで提示された。実験参加者は正解を見つけ次第、反応キーを押すよう教示され、このキー押しにより画像提示が終了した。その後の実験参加者は駅名を口頭で回答した。これを 1 試行とし、続けて 10 試行を行った。問いについては実験参加者間でランダムに提示したが、最終試行は比較のため実験参加者間で共通した問いを提示した。正答

となる駅は全ての試行において異なった。路線図の画像提示開始からキー押しまでにかかった時間を反応時間として算出した。試行前に視線位置のキャリブレーションを行い、画像が提示されている間の実験参加者の視線を計測した。実験終了後に、提示した大阪の地下鉄路線図について尋ねたところ、全員が初見の路線図であったと回答した。

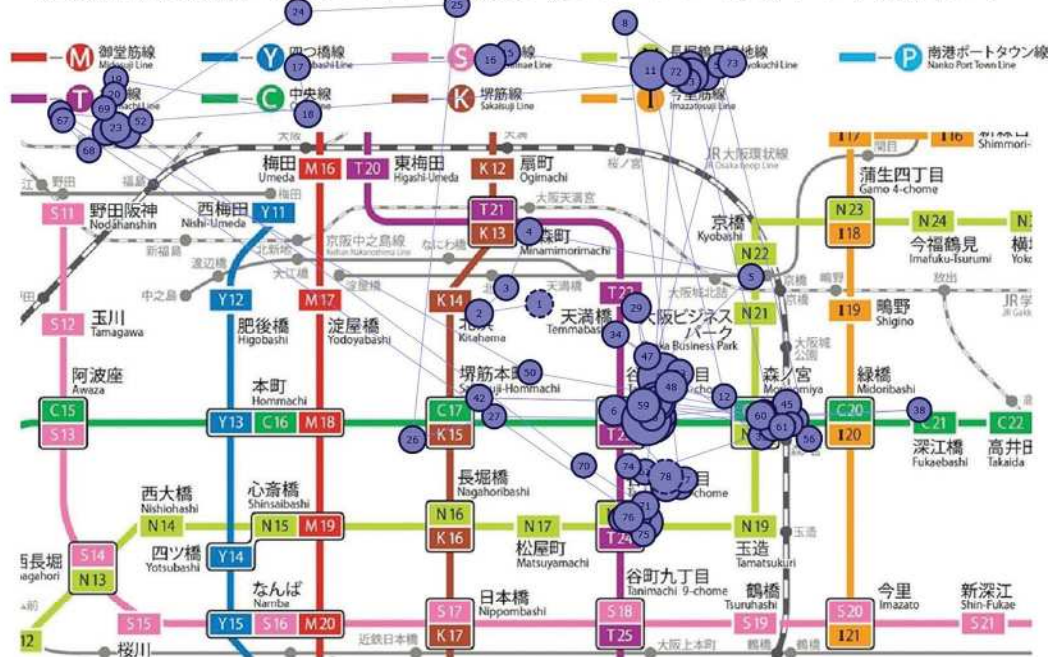
実験開始前に練習試行として、実験参加者の居住地域付近である東京の地下鉄路線図において同様の課題を数回実施した。

2.2.3 結果と考察

図 2.2 に初回試行（1 試行目）と最終試行（10 試行目）における課題遂行時の視線プロット例を示す。初回試行（図 2.2 上図）では、課題と関係がない路線への停留が多くみられる。また、何度も凡例（問いの下に表示されている各線の路線色、アルファベット、路線名）を参照しながら探索を行っていたことがわかる。最終試行になると（図 2.2 下図）、凡例を利用後、問いの 2 路線以外の路線上には視線はほとんど停留しておらず、スムーズに正答となる駅へ直接視線が向かっている様子がみてとれる。

反応時間（図 2.3）は 6 試行近辺で最小となった。Bonferroni 法による多重比較の結果、1 試行目と 2 試行目を除くすべての試行、2 試行目と 6 試行目、10 試行目に有意な差がみられた（ $t_s(29) \geq 4.21$, $p_s < .012$, $d > .89$ ）。また、Cohen（1988）の基準による効果量は大きいといえる。このことより、初見の路線図であっても短期間で学習が完了することがわかった。10 試行全ての平均正答率は 95.5%（ $SE = .01$ ）であった。

長堀鶴見緑地線と谷町線が通っている駅の名前は？



中央線と千日前線が通っている駅の名前は？

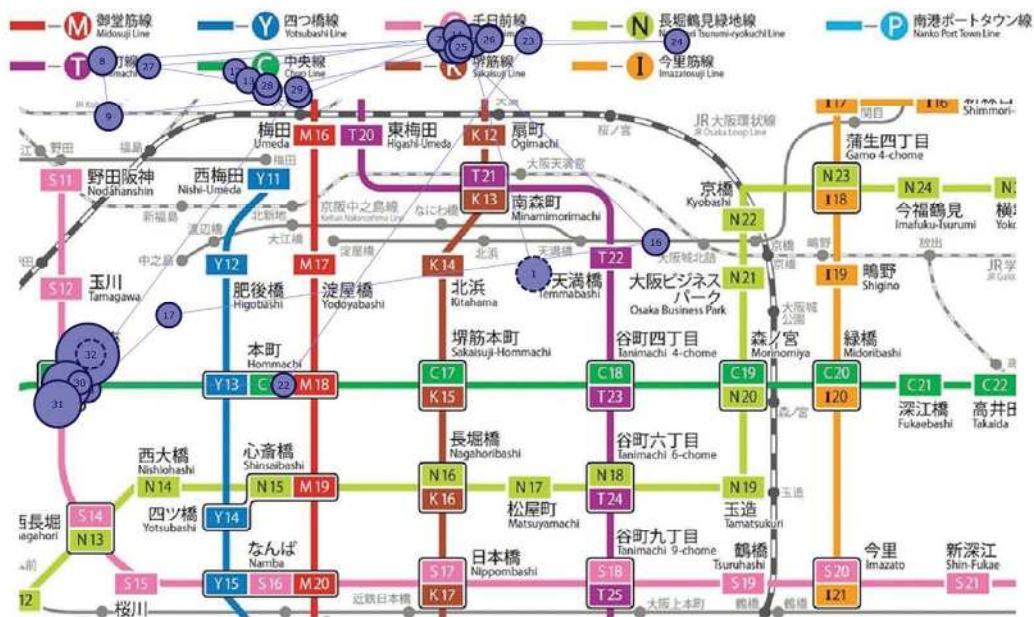


図 2.2 実験 1：初回試行と最終試行における視線プロット例

上図は初回試行（1 試行目），下図は最終試行（10 試行目）における実験参加者 1 名の視線プロット．各円は，視線一回の停留を示す．一回の停留時間が長くなるほど円のサイズは大きく示される．停留同士をつなぐ線はサッカードを示す．

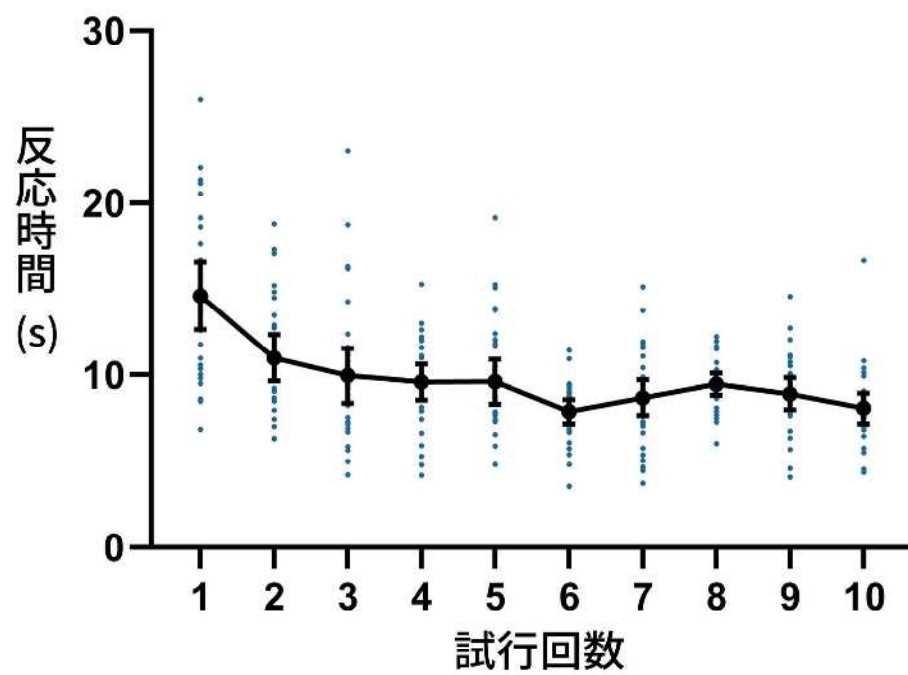


図 2.3 実験 1 の結果：反応時間

縦軸は反応時間(s)，横軸は試行回数を示す．青い点は個人のデータを示している．誤差棒は 95%信頼区間．

続いて、図 2.4 に路線図の画像全体における視線一回の停留時間（図 2.4A）とサッカード振幅（図 2.4B）の結果を示す。視線一回の停留時間（図 2.4A）は試行回数とともに増加している。Bonferroni 法による多重比較を行った結果、1 試行目と 10 試行目の間に有意な差がみられた（ $t(25)=3.81, p=.03, d=.81$ ）。また、効果量は大きいといえる。サッカード振幅（図 2.4B）は試行回数に伴う大きな変化みられなく、Bonferroni 法による多重比較を行った結果、試行間において有意な差はなかった（ $ts(29) \leq 2.25, ps > .99$ ）。

第 1 章で記したように、画像診断医やチェスプレーヤーといった専門家による画像理解に関するメタ分析から、訓練が進むにつれ視線一回の停留時間は減少し、サッカード振幅は増加することがわかっている。こうした結果は訓練に伴う選択的注意の精緻化を反映している（表 1.1）。ところが実験 1 の結果では、視線一回の停留時間は反対に増加し、またサッカード振幅には変化がみられなかった。この結果は、パフォーマンスの向上（図 2.2）が選択的注意の精緻化によりもたらされたとは言えないことを示す。その一方で、これも表 1.1 で示したように、視線一回の停留時間の増加は、記憶の精緻化とテンプレートの構築過程を反映していることが示されている（Henderson et al., 1999; Hollingworth, et al., 2001）。実験 1 の結果から、初見の地下鉄路線図という視覚的文脈を記憶し、探索に利用できるテンプレートを構築するメカニズムがパフォーマンスの向上をもたらしたと考えられる。

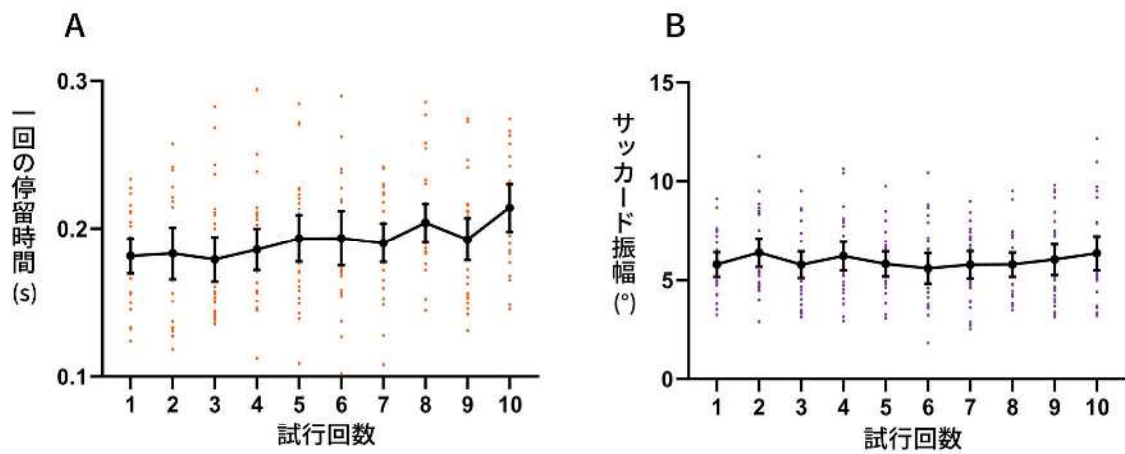


図 2.4 実験 1 の結果：視線一回の停留時間(左)とサッカード振幅(右)
 縦軸はそれぞれ、一回の停留時間(s) (A), サッカード振幅(°) (B) を示す．横軸は試行回数を示す．赤と紫の点は個人のデータを示している．誤差棒は 95%信頼区間．

2.3 実験 2 路線図における視覚探索:1 週間後の検討

2.3.1 目的

実験 1 より，地下鉄路線図における課題の向上は，路線図という文脈を記憶し探索に利用できるテンプレートを構築するメカニズムに基づくことが示唆された．そこで，記憶が関与しているか否かを検討するために，同じ実験を同じ実験参加者に対して一週間後に行った．もし記憶されているとすれば，反応時間は実験 1 における最終試行の値に近く，またすでにテンプレートが脳内表現として構築されているのであれば，視線一回の停留時間に変化はないことが予測される．

2.3.2 方法

参加者

実験 1 の参加者のうち 10 名（ $M=20.6$ 歳， $SD=1.49$ ）が実験 2 に参加した．

視覚刺激・視線の計測と解析・手続き

実験で使用した視覚刺激，視線の計測と解析および手続きは，実験 1 と同じであった．

2.3.3 結果と考察

まず，図 2.5 に実験参加者 1 名の初回試行（1 試行目）と最終試行（10 試行目）における視線プロット例を示す．上段は実験 1，下段は 1 週間後に実施した実験 2 の結果である．図 2.5 より，実験 2

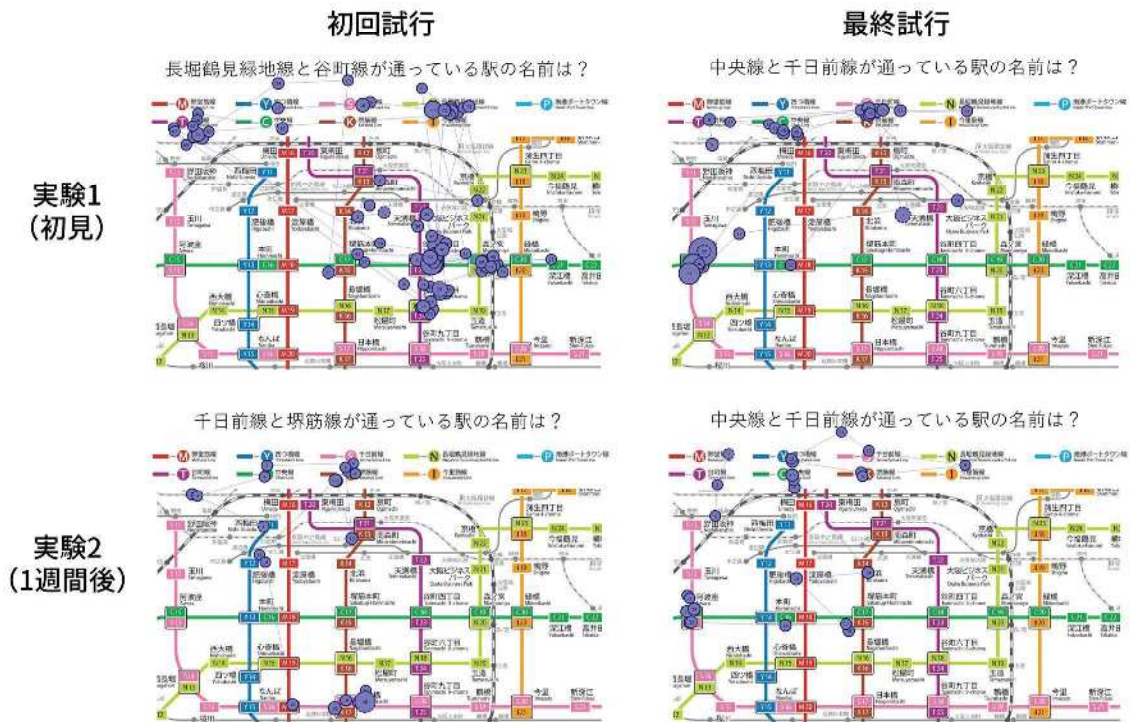


図 2.5 実験 1 と 2 の比較：初回試行と最終試行の視線プロット例
 上段は実験 1，下段は実験 2 における初回試行（1 試行目）および最終試行（10 試行目）における実験参加者 1 名の視線パターンを示す。各円は、視線一回の停留を示す。一回の停留時間が長くなるほど円のサイズは大きく示される。停留同士をつなぐ線はサッカードを示す。

では、初見であった実験 1 の最終試行よりも停留回数が少なく、実験 1 における学習が保持されている様子がうかがえる。10 試行の平均正答率は全員が 100%であった。

図 2.6 に反応時間の結果を示す。反応時間および視線データは、比較のために実験 2 を行う 1 週間前に実施した実験 1 の結果とともに示す。実験 2 における反応時間は(図 2.6B), 初回試行が平均 9.37s, 最終試行が平均 7.13s であった。実験 1 では、初回試行が平均 14.54s, 最終試行が 8.01s であったことから、実験 2 では初回試行から高いパフォーマンスがみられた。

実験 2 における反応時間(図 2.6B)は緩やかに速くなってはいるが、Bonferroni 法による多重比較を行った結果、試行回数による有意な差はみられず ($ts(9) \leq 3.79, ps > .23$)、実験 1 において学習がほぼ完了していることが示された。1 週間前の結果と比較するため、実験 1 および実験 2 双方に参加した実験参加者のデータを使用し(対応のあるデータ)、実験 1 における 10 試行目と実験 2 における 1 試行目および 10 試行目に対し、Bonferroni 法による多重比較を行った結果、実験 1 における 10 試行目(最終試行)と実験 2 における 1 試行目(初回試行)の間、および実験 1 における 10 試行目(最終試行)と実験 2 における 10 試行目(最終試行)の間に有意な差はみられなかった ($ts(8) \leq 1.96, ps > .25$)。つまり、実験 2 における視覚探索のパフォーマンスは、1 週間前(実験 1)の学習成果を保持していた結果だといえる。

続いて、図 2.7 に画像全体における視線一回の停留時間の結果を示す。実験 1(図 2.7A)の最終試行(10 試行目)と比較すると、実験 2(図 2.7B)における初回試行(1 試行目)の視線一回の停留時

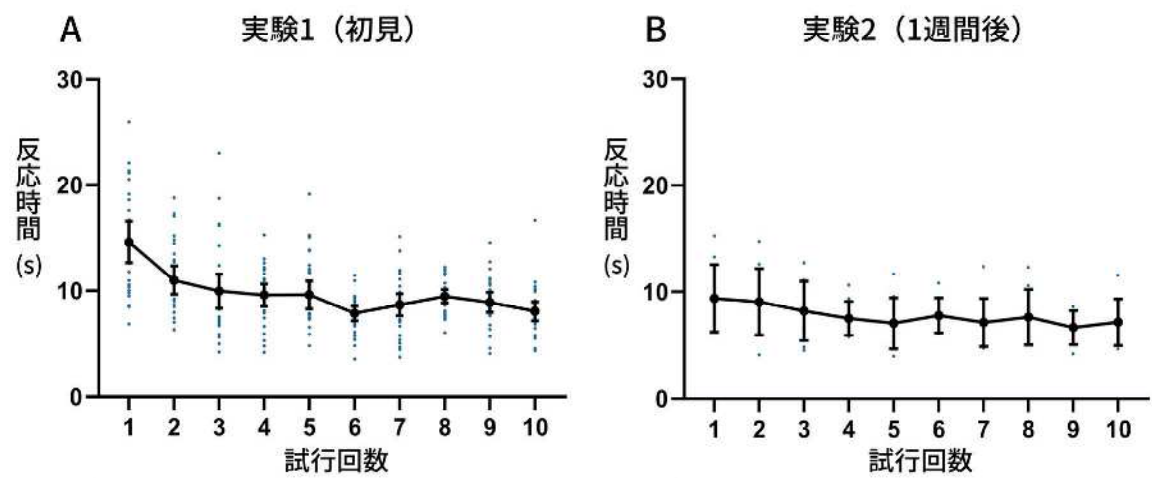


図 2.6 実験 1 と 2 の比較：反応時間

A: 実験 1 における反応時間の結果. B: 実験 2 における反応時間の結果. 縦軸は反応時間 (s), 横軸は試行回数を示す. 青い点は個人のデータを示している. 誤差棒は 95% 信頼区間.

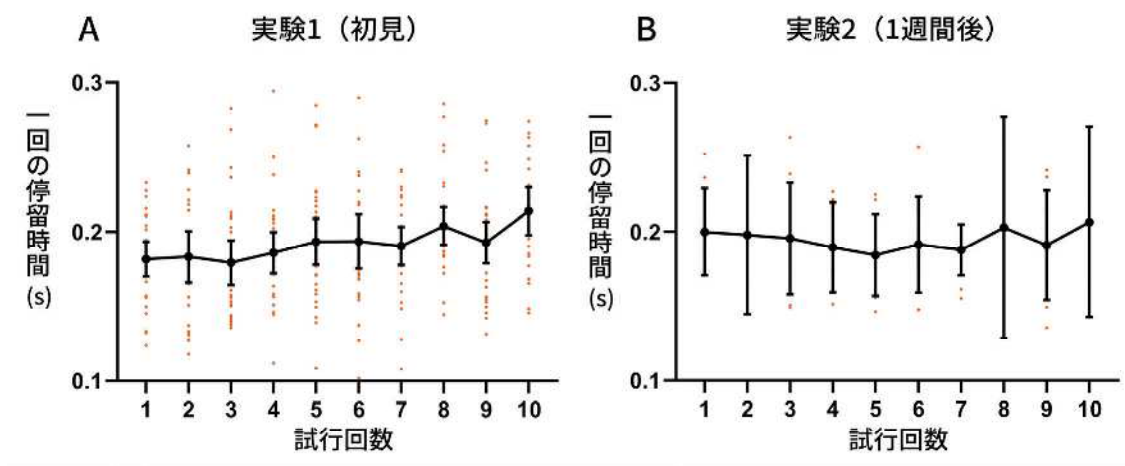


図 2.7 実験 1 と 2 の比較：視線一回の停留時間

A: 実験 1 における一回の停留時間の結果. B: 実験 2 における一回の停留時間の結果. 縦軸は一回の停留時間 (s). 横軸は試行回数を示す. 赤い点は個人のデータを示している. 誤差棒は 95% 信頼区間.

間はやや短くなる傾向がみられたが(実験 1 の 10 試行目:平均 0.25s, 実験 2 の 1 試行目:平均 0.19s), 10 試行目(最終試行)になると, 実験 1 の 10 試行目(最終試行)と同等の長さであった(実験 1 の 10 試行目:平均 0.25s, 実験 2 の 10 試行目:平均 0.21s). Bonferroni 法による多重比較を行った結果, まず, 実験 2 の試行間において視線一回の停留時間(図 2.7B)に有意な差はみられなかった($ts(9) \leq 1.64, ps > .99$). 1 週間前の結果と比較するため, 実験 1 および実験 2 双方に参加した実験参加者のデータを使用し(対応のあるデータ), Bonferroni 法による多重比較を行った. その結果, 実験 1 における最終試行(10 試行目)と実験 2 における初回試行(1 試行目)との間に有意な差がみられたが($t(8)=3.54, p=.02, d=1.34$), 実験 1 における最終試行(10 試行目)と実験 2 における最終試行(10 試行目), および実験 2 における初回試行(1 試行目)と最終試行(10 試行目)の間に有意な差はみられなかった($ts(8) \leq 1.64, ps > .08$). つまり, 実験 2 において試行回数に伴う視線一回の停留時間はさらに長くなるといった変容はみられなかったが, 1 週間前に最大となった視線一回の停留時間の長さを保持していたといえる.

図 2.8 にサッカーカード振幅の結果を示す. Bonferroni 法による多重比較を行った結果, 試行間において有意な差はみられなかった($ts(9) \leq 2.97, ps > .79$). 1 週間前の結果と比較した場合でも有意な差はみられなかった($ts(8) \leq 2.72, ps > .07$).

以上の結果から, 実験 1(1 週間前)のパフォーマンス(反応時間)および視線一回の停留時間が保持されている一方で, サッカーカード振幅には変化がないことがわかった. このことは, 初回の探索時(実験 1)において構築された長期記憶が一週間後も保持されてい

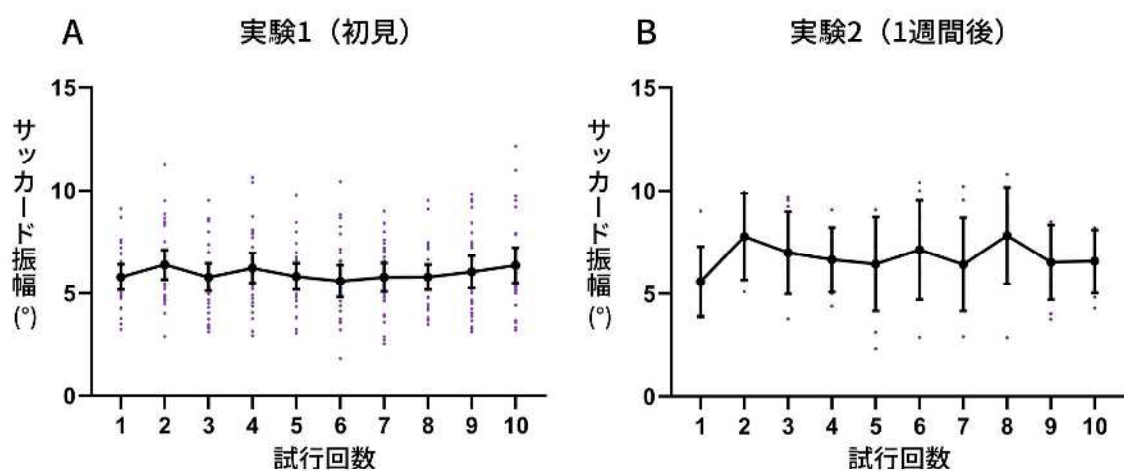


図 2.8 実験 1 と 2 の比較：サッカード振幅

図 2.8A は実験 1, 図 2.8B は実験 2 におけるサッカード振幅を示す. 縦軸はサッカード振幅(°), 横軸は試行回数を示す. 小さい円は個人のデータを示している. 誤差棒は 95%信頼区間.

たこと、また新たにテンプレートが構築されたという証拠がないことも合わせて示している。

2.4 実験 3 初見の無彩色路線図における視覚探索

2.4.1 目的

実験 3 では、地下鉄路線図を無彩色にすることにより、実験参加者が初見の路線図において利用できる情報を限定した。その場合でも実験 1 のように路線図を記憶するようなメカニズムが働くのか、視線計測により明らかにすることを目的とした。

2.4.2 方法

参加者

実験 1 および実験 2 へ未参加の 30 名 ($M=21.7$ 歳, $SD=2.64$) が参加した。全実験参加者の出身地は関東およびその近辺であり、現在の居住地は東京都あるいは神奈川県であった。実験参加者に対しては、実験前に大阪の地下鉄を含む関西の鉄道路線に関する知識を問い、全員がその知識は全くないと回答した。

視覚刺激

実験参加者が初見の路線図（実験 1 において使用した路線図と同じ大阪府の地下鉄路線図）を Adobe Photoshop（version 14.0, Adobe Inc.）で無彩色に加工した。無彩色画像の場合、正答を見つけ出す手がかりは路線上に割り振られたアルファベット（例：千日前線であれば S）になる。無彩色加工時における文字の視認性を確保するために、輝度コントラストが大きく変化しないように有彩色画像を加工した。路線の最大・最小輝度値から算出したマイケルソンコントラストは有彩色画像 69%、無彩色画像 58%となった。有彩色画像

より無彩色画像のコントラスト値が低いのは，無彩色画像において最も明るい路線が背景（白色）と識別困難になることを防ぐため，その路線の輝度値を下げたことによる．加工時の輝度値の測定には，色彩輝度計 ColorCAL MKII（Cambridge Research Systems Ltd.）を使用した．画像サイズは $28.1^{\circ} \times 42.8^{\circ}$ であった．

視線の計測と解析

実験で使用した装置および視線の解析方法は，実験 1 と同じであった．

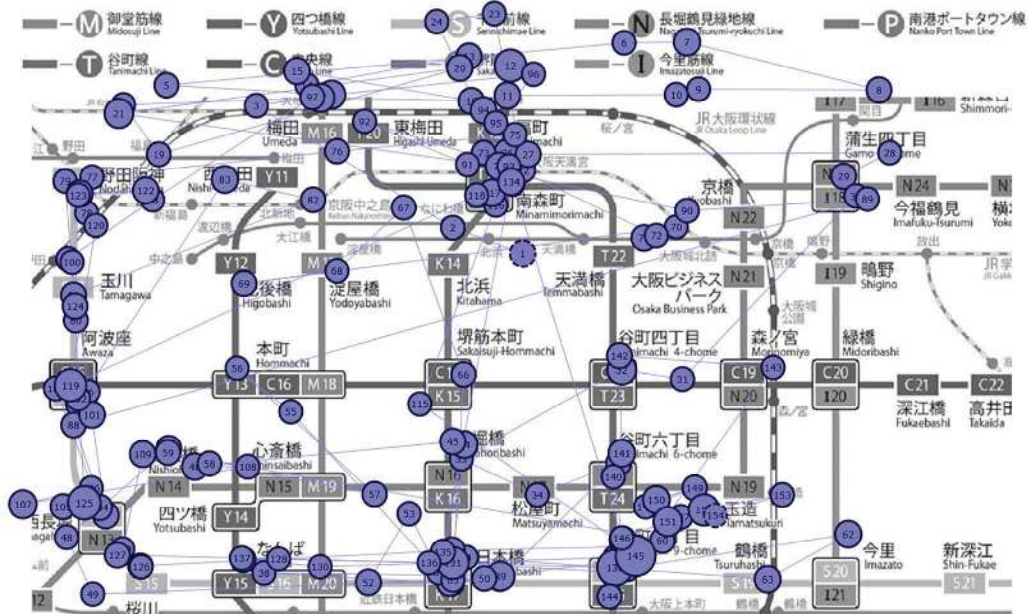
手続き

実験手続きは実験 1 と同じであった．実験終了後に，提示した大阪の地下鉄路線図について尋ねたところ，全員が初見の路線図であったと回答した．

2.4.3 結果と考察

図 2.9 に初回試行（1 試行目）と最終試行（10 試行目）における視線プロット例を示す．実験 1 で使用したオリジナルの路線図と同様，初回試行（図 2.9 上図）では，画像全体に視線が広がっている．最終試行では（図 2.9 下図），問いの 2 路線以外の路線上には視線はほとんど停留しておらず，凡例を利用し，その後正答となる駅へ直接視線が向かっている様子がわかる．図 2.9 の例では，初回試行では視線の停留回数（凝視）は 154 回であったのに対し，最終試行では 48 回まで減少した．

千日前線と谷町線が通っている駅の名前は？



中央線と千日前線が通っている駅の名前は？

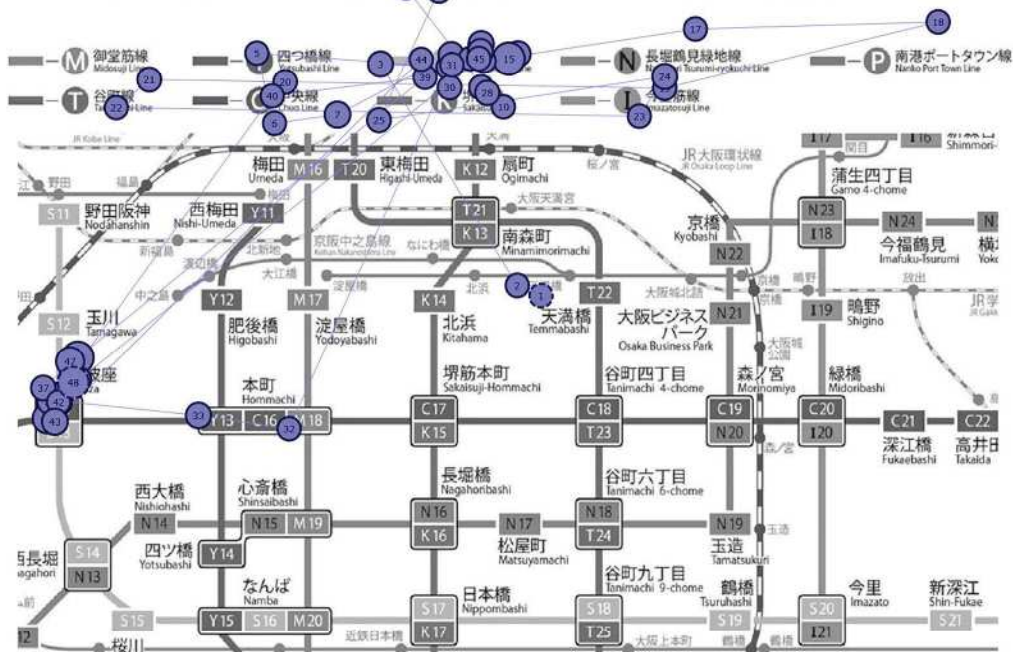


図 2.9 実験 3 の結果：初回試行と最終試行における視線プロット例
上図は初回試行（1 試行目），下図は最終試行（10 試行目）における実験参加者 1 名の視線プロット．各円は，視線一回の停留を示す．一回の停留時間が長くなるほど円のサイズは大きく示される．停留同士をつなぐ線はサッカードを示す．

図 2.10 に反応時間の結果を示す。初回試行における反応時間は、平均 33.2s であったが、2 試行目ではその半分以下である 13.5s ままで短縮し、9 試行目で最小となった (10.0s)。Bonferroni 法による多重比較の結果、1 試行目とすべての試行、2 試行目と 9 試行目、3 試行目と 10 試行目に有意な差がみられた ($ts(28) \geq 3.64$, $ps < .04$, $d > .90$)。また効果量は大きいといえる。10 試行全ての平均正答率は 97.3% ($SE = .93$) であった。

続いて、図 2.11 に視線一回の停留時間 (図 2.11A) とサッカード振幅 (図 2.11B) の結果を示す。視線一回の停留時間 (図 2.11A) は、実験 1 で使用したオリジナルの路線図と同様、試行回数とともに増加する傾向がみられた。Bonferroni 法による多重比較を行った結果、1 試行目と 8 試行目、7 試行目と 8 試行目の間に有意な差がみられた ($ts(26) \geq 3.78$, $ps < .03$, $d > .69$)。また、効果量は大きいといえる。一方、試行間におけるサッカード振幅に有意な差はみられなかった ($ts(29) \leq 2.55$, $ps > .99$)。

以上の結果から、初見の地下鉄路線図という文脈が固定された刺激から色情報をなくすという加工を行ったとしても、パフォーマンスの向上と共にみられた視線パターンの特性は、有彩色の路線図 (実験 1) の場合と類似していたと結論づけられる。このことより、路線図における視覚属性が異なっていたとしても、視覚探索に関与する視覚メカニズムは同様のものであると考えられる。つまり、路線図を記憶し、探索に利用できるテンプレートを構築するメカニズムが学習をもたらしている。

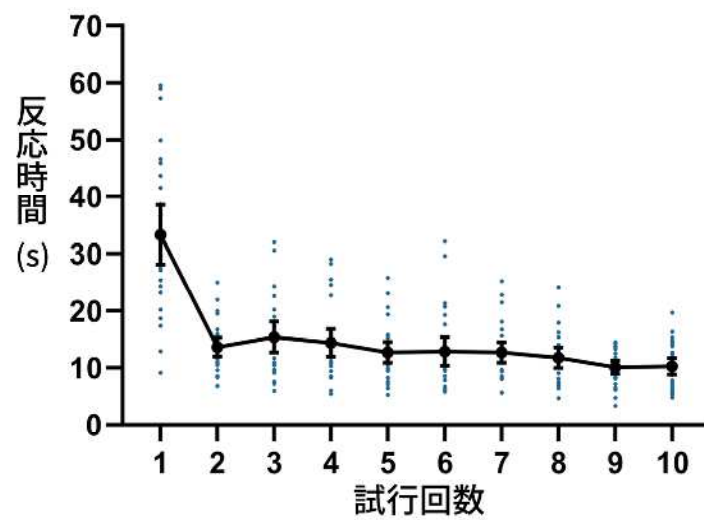


図 2.10 実験 3 の結果：反応時間

縦軸は反応時間(s), 横軸は試行回数を示す. 青い点は個人のデータを示している. 誤差棒は 95%信頼区間.

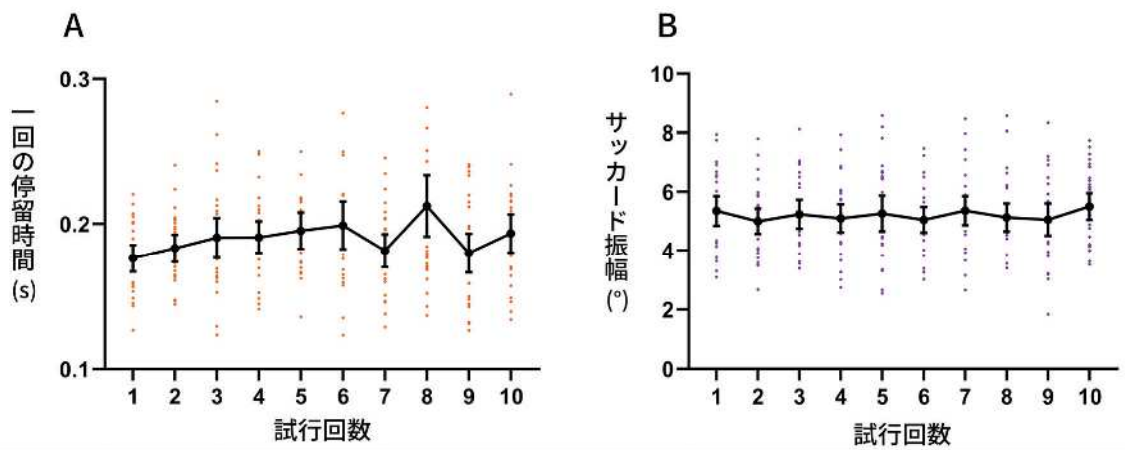


図 2.11 実験 3 の結果：視線一回の停留時間(左)とサッカード振幅(右)
縦軸はそれぞれ、一回の停留時間(s) (A), サッカード振幅(°) (B) を示す。横軸は試行回数を示す。赤と紫の円は個人のデータを示している。誤差棒は 95%信頼区間。

2.5 実験 4 初見の路線図における視覚探索:手の動作の検討

2.5.1 目的

現実世界において、実際に路線図を使用する際には、路線図に描かれた路線を指で辿るなど、探索時に身体動作が伴うことがある。第 1 章（図 1.12）で示したように、本論文では身体動作の影響を理解することを目的の一つとしている。実験 4 の目的は、身体動作の付加により、路線図探索のパフォーマンスおよび視線パターンが変容するか検討することであった。本実験では、探索時にマウス操作を伴わせることにより、手の動作を身体動作として扱った。

2.5.2 方法

参加者

実験 4 には、実験 1, 2, 3 へ未参加の 8 名 ($M=23.2$ 歳, $SD=1.08$) が参加した。実験終了後に、提示した大阪の地下鉄路線図について尋ねたところ、全員が初見の路線図であったと回答した。

視覚刺激・視線の計測と解析

実験で使用した視覚刺激および視線の計測・解析は、実験 1 と同じであった。

手続き

基本的な実験手続きは、次の点を除き実験 1 と同じであった。実験参加者には、マウスを使用しながら課題を行うことが可能であることを教示した。マウスを操作すると、表示されたカーソルがマウ

スの動きに同期して動いた．実験参加者にマウスの操作を強制する教示は行わなかったが，実験では参加者全員がマウスを操作しながら視覚探索課題を行っていた．観察距離は 60 cm とした．実験参加者の頭部は顎台で固定したため，実験参加者は自身の手のみ自由に動かすことが可能であった（図 2.12）．

2.5.3 結果と考察

図 2.13 に初回試行（1 試行目）と最終試行（10 試行目）における視線プロットを示す．視線の散らばりや試行回数に伴う停留回数の減少はこれまでの実験結果と類似していた．10 試行の平均正答率は 96.2%（ $SE=2.46$ ）であった．

図 2.14 に反応時間を示す．初回試行における反応時間は，平均 13.1s であったのに対し，最終試行では平均 7.40s まで短縮した．Bonferroni 法による多重比較の結果，1 試行目と 6 試行目，1 試行目と 9 試行目に有意な差がみられた（ $t_s(6) \geq 6.68$, $p_s < .02$, $d > 1.32$ ）．また，効果量は大きいといえる．なお，実験 1 と実験 4 における反応時間の平均値に有意な差はみられなかった（ $t(18) = .70$, $p = .48$ ）．

図 2.15A に路線図の画像全体における視線一回の停留時間の結果を示す．Bonferroni 法による多重比較の結果，試行間において有意な差はみられなかった（ $t_s(7) \leq 3.49$, $p_s > .45$ ）．この点は実験 1 の結果とは異なっていた．図 2.15B は，実験 1 および実験 4 における視線一回の停留時間の結果を比較している．この 2 つの実験条件における視線一回の停留時間の平均値に対し t 検定を行った結果，実験 1（視線のみ）の方が，実験 4（手の動作）よりも有意に長くなった（ $t(18) = 4.09$, $p = .0007$, $d = 1.92$ ）．また，効果量は大きいといえる．

身体動作なし



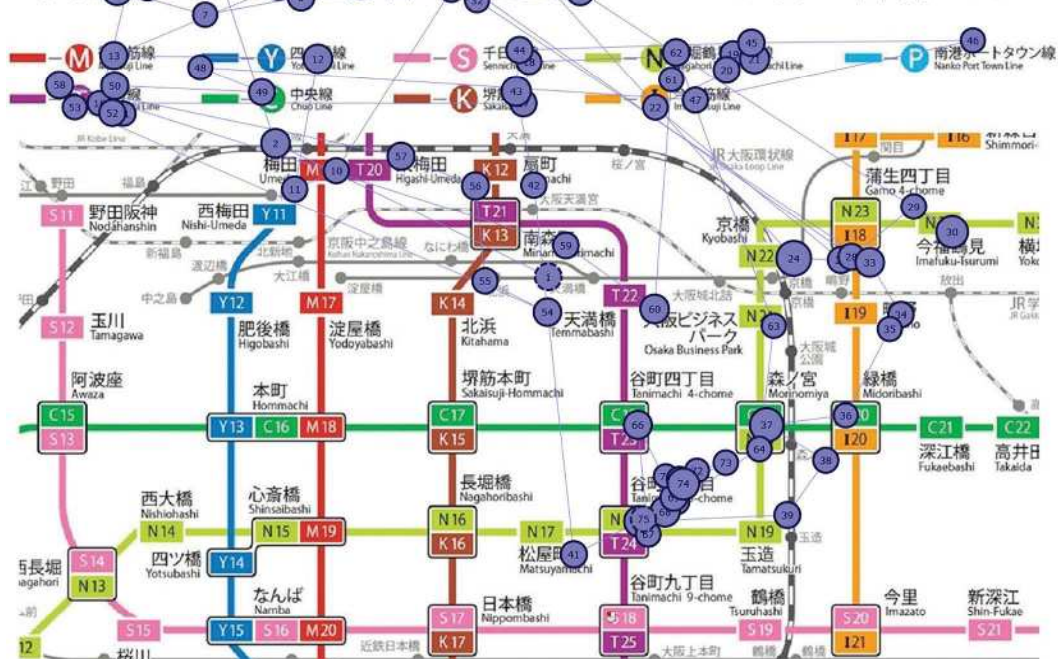
身体動作あり（手の動作）



図 2.12 実験 4 の様子

実験 4 では、右図のように手の動作（マウス操作）のみ自由に行うことができた。

長堀鶴見緑地線と谷町線が通っている駅の名前は？



中央線と千日前線が通っている駅の名前は？

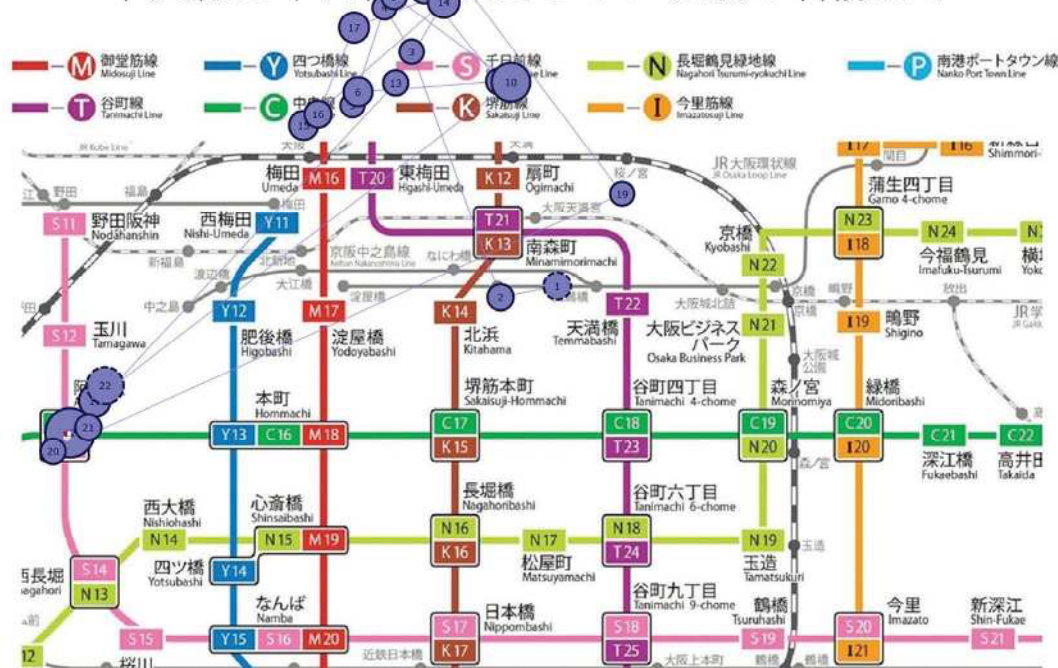


図 2.13 実験 4 の結果：初回試行と最終試行における視線プロット例
 上図は初回試行（1 試行目），下図は最終試行（10 試行目）における実験参加者 1 名の視線プロット．各円は，視線一回の停留を示す．一回の停留時間が長くなるほど円のサイズは大きく示される．停留同士をつなぐ線はサッカードを示す．

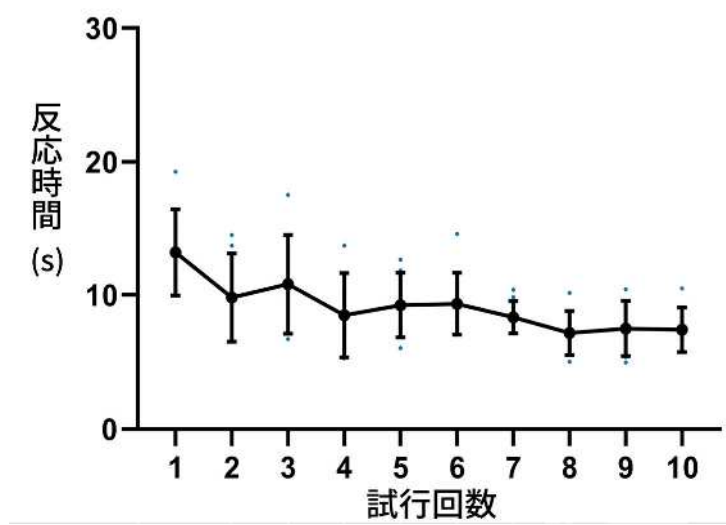


図 2.14 実験 4 の結果：反応時間

縦軸は反応時間(s)，横軸は試行回数を示す．青い点は個人のデータを示している．誤差棒は 95%信頼区間．

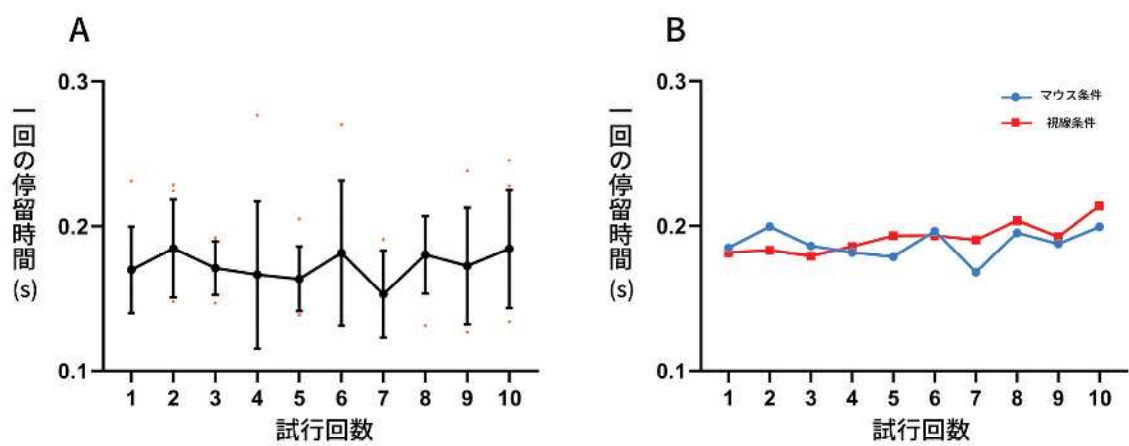


図 2.15 実験 4 の結果：視線一回の停留時間

A：実験 4 における一回の停留時間の結果．赤い点は個人のデータを示している．誤差棒は 95%信頼区間．B：実験 1（視線のみ）と実験 4（手の動作）を比較した一回の停留時間を示す．縦軸は一回の停留時間 (s)．横軸は試行回数を示す．

図 2.16A にサッカード振幅の結果を示す。Bonferroni 法による多重比較の結果，試行間において有意な差はみられなかった ($t_s(7) \leq 3.35$, $p_s > .68$)。この点は実験 1 と一貫していた。図 2.16B は，実験 1 および実験 4 におけるサッカード振幅の結果を比較している。この 2 つの実験条件におけるサッカード振幅の平均値に対し t 検定を行った結果，実験 1 (視線のみ) よりも，実験 4 (手の動作) の方が有意に長くなった ($t(18) = 3.80$, $p = .0013$, $d = 1.63$)。また，効果量は大きいといえる。

手の動作を加えた実験 4 の結果をまとめると，

- 1) 試行の進展に伴い視覚探索のパフォーマンスが向上 (図 2.14)
 - 2) 実験 1 と異なり試行の進展に伴う停留時間の変化はみられなかったが，全般的に停留時間は短縮した。
 - 3) 実験 1 と同様試行の進展に伴うサッカード振幅の変化はみられなかったが，全般的に振幅は増大した。
- となる。

この結果は，手の動作を含めた探索と，視覚のみに依存した実験 1 における探索に関与するメカニズムが異なる可能性を示唆している。サッカード振幅の増加は情景の全体的な処理能力の向上を示す一方で，視線一回の停留時間の短縮は選択的注意の精緻化を示す (表 1.1)。カーソルを動かすことにより視覚的スパンが拡大し，画像全体への注意が誘導されやすくなったため，より記憶に依存しない探索が行われたと考えられる。ただし，身体動作を用いる探索では，10 試行程度では学習効果が現れない可能性も示している。

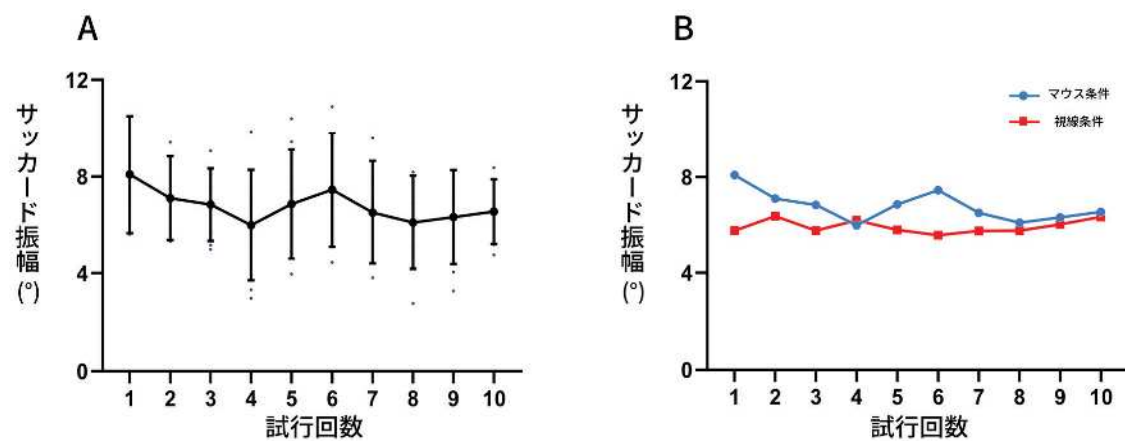


図 2.16 実験 4 の結果：サッカード振幅

A：実験 4 におけるサッカード振幅の結果．紫の点は個人のデータを示している． B：実験 1（視線条件）と実験 4（マウス条件）を比較したサッカード振幅を示す．縦軸はサッカード振幅(°)，横軸は試行回数を示す．誤差棒は 95%信頼区間．

2.6 第 2 章：考察

第 2 章では、交通に関連する場面の中で、路線図という文脈が完全に固定されたものを視覚探索課題の題材とした。学習は短期間で完了し、視線一回の停留時間が学習の進展と共に増加したが、その他の視線パターンに変化はみられなかった。学習の効果は一週間後でも保持され、身体動作を加えた場合にはサッカード振幅の増加がみられた。

抽象的な視覚刺激により文脈手がかり効果を検討した視覚探索実験では、学習と共にサッカード回数が減少したが、視線一回の停留時間に変化はなかったことから (Tseng & Li, 2004)、路線図という日常で接する視覚対象における探索には、抽象的な刺激の場合とは異なるメカニズムが関与していたといえる。専門家による画像理解時 (例えば X 線画像からの病変の発見) における視線パターンの場合、長期の経験により視線一回の停留時間が減少し、サッカード振幅が増加する (Gegenfurtner et al., 2011)。視線一回の停留時間が増加した路線図の学習は、長期学習とも異なる視覚メカニズムによるものであると結論づけられる。専門家による画像理解の過程に視覚探索行動は含まれるが、そもそも目標刺激が一つとは限らず、また発見したから課題が終了というわけではない。こうした課題や目的そのものの違いが、たとえ視覚探索というカテゴリとして分類した場合には課題として類似しているとしても、異なるメカニズムを駆動していたと考えられる。

本章の実験から、文脈が固定され変わることがない場合における視覚探索は、専門家による画像理解における視覚探索とは異なり、

- ・画像の全体的処理よりは長期記憶におけるテンプレート形成が本質である

- ・身体動作は画像の全体的処理の向上に寄与する

- ・身体動作を含まない場合の学習は短期間で完了する

とまとめられる。

第 3 章 運転場面における視覚探索

3.1 目的

第 2 章で用いた路線図は、文脈が完全に固定されているものであった。身体動作がない場合には、長期記憶への文脈情報の保持を担うメカニズムが探索過程の土台にあることがわかった。第 3 章では、運転場面という、文脈は一貫しているものの、その内容の詳細については変動する状況における視覚探索を検討した。文脈の内容が逐一変動する場合には、長期記憶に基づく探索は必ずしも効率的でないことが予測される。

実験では、自動車の運転場面（実験参加者が運転席にいる状況）に限定した静止画像（実験 5）および動画像（実験 6）を用いた。自動車の運転場面は、道路や信号、周囲の自動車、歩行者といった文脈は共通しており、注意すべき対象はある程度限定される。しかしその一方で、情景が刻一刻と変化する、時間帯や天候にも影響されるなど、文脈内での状況は固定されておらず、時空間的に大きく変動する。

第 1 章では実験参加者全員が初見の路線図を使用したために、視線パターンの変容をみるために試行を繰り返した。本章の実験では、状況が変化する運転場面における視線パターンの変容を調べるために、実験参加者を運転経験者および未経験者というグループに分け、そのグループ間での視線パターンの違いから、背後の視覚メカニズムを推定した。

3.2 実験 5 運転場面の静止画像における視覚探索

3.2.1 方法

参加者

20 名 ($M = 21.7$ 歳, $SD = 0.84$) が実験 (視覚探索および視線計測) に参加した。うち 8 名は週に 1~2 回以上自動車の運転をしており (平均運転年数 $M = 2.12$ 年, $SD = 0.92$)、その他の 12 名は運転免許証を取得していないか、または運転免許証を取得してから一度も運転をしていなかった。前者を運転経験群、後者を運転未経験群として視線パターンの解析を行った。運転未経験群に属する実験参加者のうち 1 名の視線が適切に計測できなかったため、解析を行った人数は運転経験群が 8 名、運転未経験群が 11 名となった。後述する事前アンケートには 16 名 ($M = 20.8$ 歳, $SD = 1.10$) が参加した。うち日常的な運転をしている参加者は 7 名であった。

視覚刺激

日本自動車連盟(JAF)が発刊している月刊誌『JAF MATE』に掲載されている「危険予知~JAF 事故回避トレーニング (指導: 長山泰久)」コーナーから選んだ運転場面の画像 10 枚 (2012 年 7 月号, 2013 年 4 月号, 2013 年 7 月号, 2015 年 3 月号, 2014 年 10 月号, 2015 年 4 月号, 2016 年 10 月号, 2016 年 11 月号, 2016 年 12 月号, 2013 年 1 月号) を使用した。複数の画像を使用した理由は、先述のように運転場面という文脈としては固定されているが、その内容については様々に変化しうる状況を検討するためである。

図 3.1 および図 3.2 は、使用した写真をイラスト化したものであ



① 夕暮れ時に住宅街を走っています。
この時、あなたは何に注意しますか？



② 住宅街を走っています。
この時、あなたは何に注意しますか？



③ 幹線道路の交差点を左折しようとしています。
この時、あなたは何に注意しますか？



④ 左車線に進路変更しようとしています。
この時、あなたは何に注意しますか？



⑤ 夜間、横断歩道を通過するところです。
この時、あなたは何に注意しますか？

図 3.1 実験 5 で使用した視覚刺激 (1)

オリジナルの写真をイラスト化している。各交通状況の説明文を画像の下に記述している。実験では、これらの説明文は各刺激が提示される前にディスプレイに提示され、実験参加者は理解するまで読むことができた。



⑥ 朝の通勤時間帯に繁華街を走っています。
この時、あなたは何に注意しますか？



⑧ 歩行者の通過を待って左折しようとしています。
この時、あなたは何に注意しますか？



⑩ 急なカーブに差し掛かっています。
この時、あなたは何に注意しますか？



⑦ 住宅街の交差点を直進するところです。
この時、あなたは何に注意しますか？



⑨ 雨の夜、家族を迎えに駅前に来ています。
この時、あなたは何に注意しますか？

図 3.2 実験 5 で使用した視覚刺激 (2)

る（実験ではオリジナルの写真を使用した）。これらの静止画像は運転席から見た風景となっており，路上駐車，道路を横断中の歩行者，ルームミラー・サイドミラーに映る後続車，カーブの先にある横断歩道への注意喚起を促す標識，カーブミラーに映る対向車，信号という複数の注意すべきオブジェクトが埋め込まれている．また，さまざまな交通状況や時間帯，天候が反映されている．冊子における課題は，あらかじめ正解として定められているオブジェクトを一つだけ見つけ出す視覚探索課題となっている．しかし実験5では正解であるオブジェクトを一つだけ見つけ出す課題は行わず，画像から見つけ出した注意すべきオブジェクトは全て回答するようにした．その理由は，厳密に正解を定義することが困難であるからである．例えば，進行方向と反対側の歩道を歩いている歩行者に対して運転者が注意を向けることが無意味だとは言い切れない．そこで，使用する画像に対してどの部分を注意すべきオブジェクトとして答える傾向があるかを事前に調査した．そのために，本実験の遂行前に，本実験参加者とは別の観察者16名（運転経験者7名，運転未経験者9名）に対し同じ刺激画像10枚を見てもらい，注意すべきオブジェクトを気づいた順に報告させる事前アンケートを実施した．このアンケートに基づき解析対象とするオブジェクトを決定した．

各視覚刺激の交通状況の説明は，冊子に記載されているものをそのまま使用した（例：住宅街の交差点を直進するところです．この時，あなたは何に注意しますか？）．便宜上，図3.1および図3.2の各画像の下に，実験で提示した交通状況に関するインストラクションを記載している．このインストラクションは刺激画像とは独立に

提示された．画像サイズは $28.1^{\circ} \times 42.8^{\circ}$ であった．

手続き

実験参加者の課題は，各静止画像において注意すべきと判断したすべてのオブジェクトについて口頭で回答することであり，課題遂行時の視線を計測した．

実験が開始されるとまず，ディスプレイの中心に黒い十字 ($2^{\circ} \times 2^{\circ}$) が凝視点として 2s 提示された．その後，視覚刺激として提示される運転風景画像に関する交通状況のインストラクション（例：左に車線変更しようと思います．このときあなたは何に注意しますか？）が提示された．実験参加者はインストラクションを理解できたらマウスをクリックした．黒い十字の凝視点が再び 2s 提示されたのち，視覚刺激として運転風景の静止画像が提示された．画像提示時間に制限はなく，実験参加者は注意するオブジェクトが決まったらマウスをクリックし刺激の提示を終了させ，実験者にそのオブジェクトを口頭で回答した．回答するオブジェクトはいくつでもかまわないことをあらかじめ教示した．この手続きを 1 試行とし，計 10 試行（10 枚の異なる運転場面画像に該当）を行った．刺激画像の提示順序は全実験参加者で同じとした．画像が提示されている間の観察者の視線を計測し，また 1 試行ごとに視線位置のキャリブレーションを行った．画像が提示されてから回答が終了するまでの時間を反応時間として計測した．できるだけ早く回答するように，といった制約は設けずに，各実験参加者は自分のペースで回答を行えるようにした．実験終了後，実験参加者に運転経験の有無をインタビューし，運転経験について確認した．

視線の計測と解析

画像刺激の提示や視線パターンの計測および解析のための機器はこれまでに記した実験と同じ物を使用した（2.2.2 に記載）。

視覚刺激提示時より実験参加者のマウスクリックまでを反応時間として算出した。視線の解析については、第2章における実験と同様に、画像全体における視線一回の停留時間およびサッカード振幅に対し行った（表 1.1）。ただし、実験5での課題は運転場面の画像内でみられるオブジェクトを回答させたため、解析の際には AOI（areas of interest, 関心領域）を、他の車（対向車など）、人（歩行者）、ルームミラー・サイドミラー、標識、カーブミラー、信号という6つのオブジェクトにカテゴリー化して設定し、これらのオブジェクトに視線が最初に停留するまでの時間（初回停留までの時間）を算出した。表 3.1 に各画像におけるオブジェクトの出現頻度を示す。図 3.3 には AOI の例を示した。

3.2.2 結果と考察

図 3.4 から図 3.6 に使用した 10 枚の画像における視線プロットを自動車運転経験の有無別により示す。左列が運転経験群、右列が運転未経験群の視線パターンを示している。全体的な傾向としては、運転経験群の方が運転未経験群よりも限られた箇所に視線が向いていた。一方で、運転未経験群は、電線や街路樹などその交通場面において必ずしも優先的に注意されるようなオブジェクトではない箇所に対しても視線が移動している様子がみられた。つまり、運転経験群の方が文脈により適した形での視線移動が見受けられた。

表 3.1 実験 5 で使用した各画像におけるオブジェクトの出現頻度

画像 オブジェクト	画像1	画像2	画像3	画像4	画像5	画像6	画像7	画像8	画像9	画像10	合計	%
車	1	1	3	4	1	2	1	0	2	1	16	27.1
人	2	2	2	0	3	4	2	4	3	1	23	39.0
ルームミラー・サイドミラー	0	0	1	2	0	1	0	1	0	0	5	8.5
標識	1	2	0	1	1	0	1	0	0	1	7	11.9
カーブミラー	0	2	0	0	0	0	1	0	0	1	4	6.8
信号	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	4	6.8
合計	4	7	8	7	5	9	5	5	5	4	59	100



図 3.3 実験 5 における視覚刺激例と AOI の模式図

この画像は表 3.1 の「画像 10」および図 3.2 の⑩に該当する。黄色の矩形は各オブジェクトにおける AOI をオブジェクトごとに設定している。



図 3.4 実験 5 の結果：運転経験の有無による視線プロット（1）

実験参加者（運転経験群：8 名，運転未経験群：11 名）の視線プロット．左列は運転経験群，右列は運転未経験群の視線パターンである．各円は一回の視線の停留を示す．各円の色の違いは実験参加者の違いを示す．一回の停留時間が長くなるほど円のサイズは大きく示される．停留同士をつなぐ線はサッカードを示す．

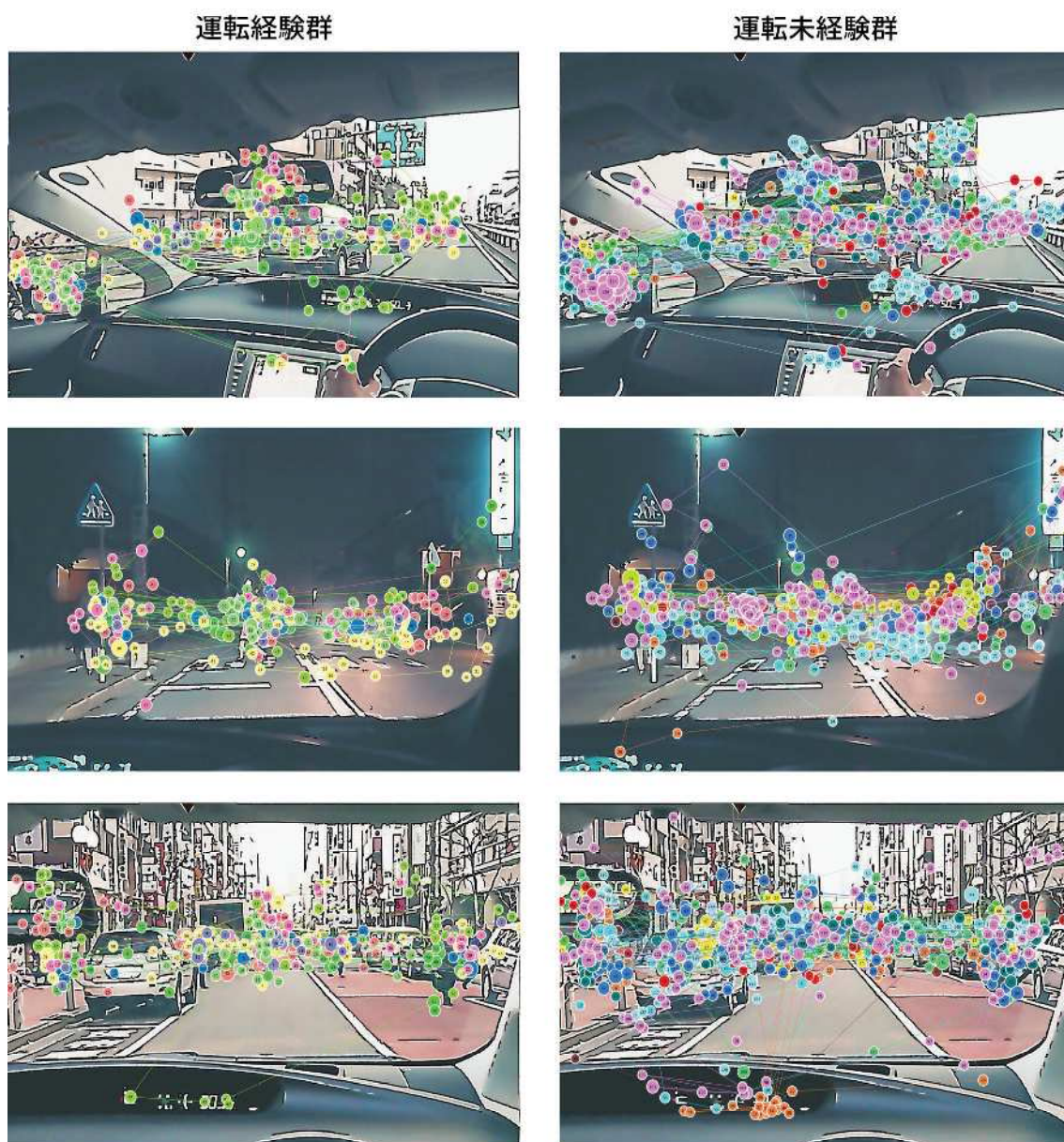


図 3.5 実験 5 の結果：運転経験の有無による視線プロット（2）



図 3.6 実験 5 の結果：運転経験の有無による視線プロット (3)

運転経験の有無における反応時間の違いを図 3.7A に示す。できるだけ早く回答するようにといった教示はしなかったにも関わらず、運転経験群の方が未経験群よりも反応時間が有意に短くなった ($t(17) = 2.53, p < .05, d = 1.18$)。報告されたオブジェクトの個数については、運転経験群と運転未経験群において有意な差はみられなかった (運転経験群: $M = 2.51, SE = .22$, 運転未経験群: $M = 2.05, SE = .23, t(17) = 1.35, p = .19$)。より速い時間で同数のオブジェクトが報告できたことから、運転場面という文脈における視覚探索のパフォーマンスが運転経験により向上したといえる。

運転経験の有無における各オブジェクトへの初回停留までの時間を図 3.7B に示す。単純主効果検定の結果、運転未経験群におけるオブジェクトの種類の間には有意な差がみられた ($F(5,85) = 6.69, p < .001$)。一方、運転経験群ではオブジェクトの種類による有意な差はみられなかった ($F(5,85) = .29, p = .92$)。つまり、運転経験者の視線は、画像内にある複数のオブジェクト全てに素早く移動していたといえる。

視線一回の停留時間の結果を図 3.7C に示す。 t 検定の結果、運転経験の有無において、視線一回の停留時間に差はみられなかった ($t(17) = .06, p = .95$)。一方で、図 3.7D に示すサッカード振幅は、運転経験群の方が未経験群と比較して有意に大きくなった ($t(17) = 3.36, p < .01, d = 1.56$)。Cohen (1988)の基準によればサッカード振幅の効果量は大きかったといえる。

運転経験群のサッカード振幅が運転未経験群よりも増大した一方で、視線一回の停留時間は経験の有無により変容することはなかったことから、実験 5 における視線変容の土台となる視覚メカニズ

ムは、表 1.1 に示したように、画像に対する全体的処理を担うメカニズム（Kundel et al., 2007）であると考えられる。この全体的処理の向上による視覚的スパンの拡大が、注意すべきオブジェクトに対する初回停留までの時間の短縮（図 3.7B）をもたらしたといえる。その一方で、運転経験の有無は、第 2 章（実験 1~3）とは異なり、視線一回の停留時間を変化させなかったことから、得られた結果の違いが記憶メカニズムによるものだとはいえないと考えられる。

それぞれの運転場面を毎回記憶するという方略は、実験 1 の場合とは異なり必ずしも有効でない。そのために、たとえ運転場面という文脈の大枠は一定であっても、その詳細が異なるために、視覚的スパンを拡大し、全体的処理を行うメカニズムにより画面を大きく精査する能力の差が現れたと考えられる。続く実験 6 では、運転場面の静止画像ではなく動画像を用いることにより、この点をさらに確認した。

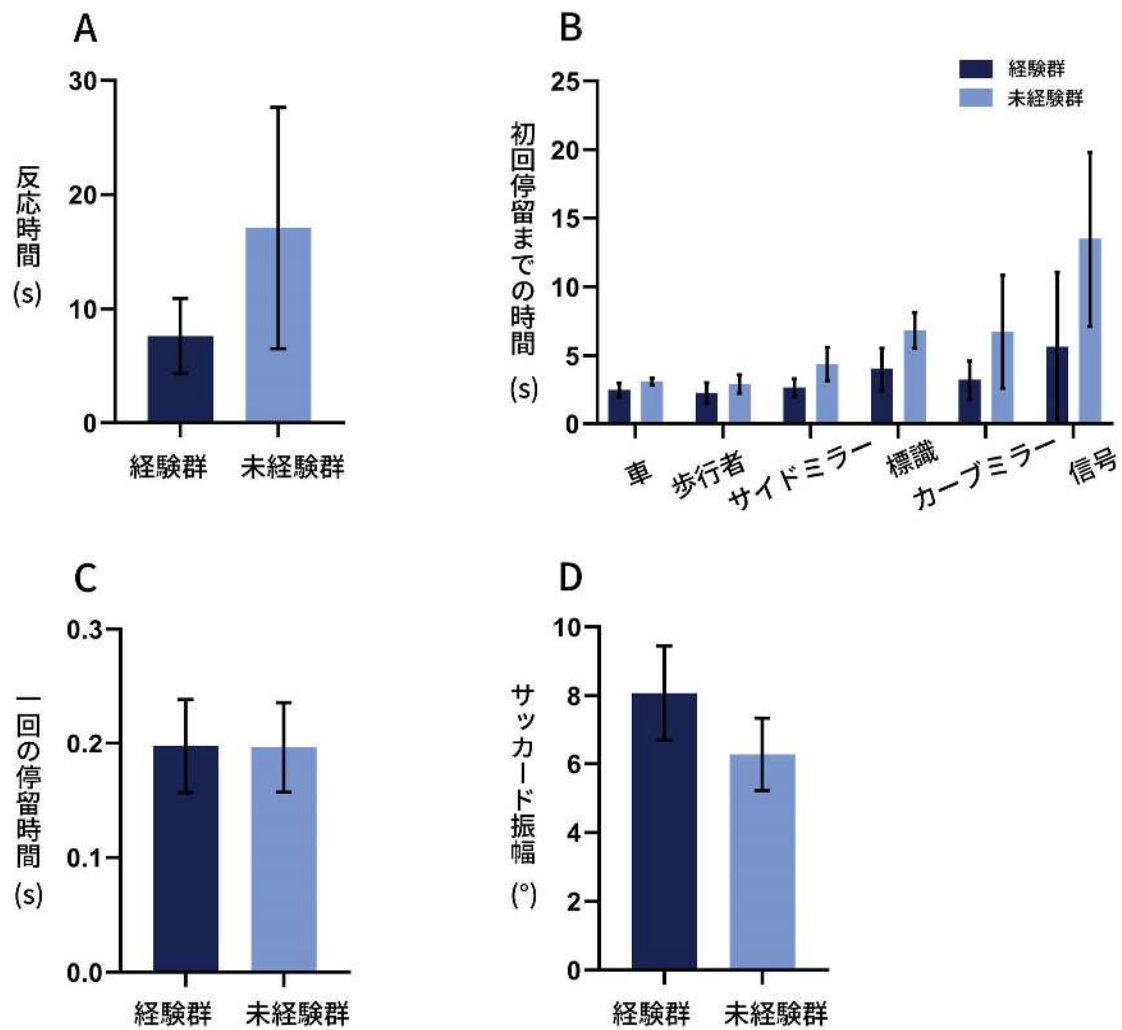


図 3.7 実験 5 の結果：反応時間および視線パターン

A, C, D：横軸は自動車の運転経験の有無（経験群，未経験群），B：横軸は刺激画像内におけるオブジェクトの種類を示している．縦軸はそれぞれ，反応時間(s) (A), 初回停留までの時間(s) (B), 一回の停留時間(s) (C), サッカード振幅(°) (D)を示す．誤差棒は 95%信頼区間．

3.3 実験 6 運転場面の動画像における視覚探索

3.3.1 目的

実験 6 の目的は、実験 5 よりさらに現実的な運転場面に近づけた状況において、自動車運転経験の有無に基づく視線パターンの変容がみられるのか検討することであった。実験 6 では刺激に時間次元が付加され、交通状況における文脈は時空間的に変動することとなった。動画像における文脈の内容が複雑かつ大きく変動することから、視線の解析は各動画像に対して独立に行った。

3.3.2 方法

参加者

19 名 ($M=21.84$ 歳, $SD=1.34$ 歳) が実験に参加した。内 10 名は日常的に運転をしており (運転年数 $M=1.8$ 年, $SD=.78$ 年), その他 9 名は運転免許証を取得していない, または運転免許証を取得してから一度も運転をしていなかった。実験 5 と同様に, 前者を運転経験群, 後者を運転未経験群として視線パターンの解析を行った。実験参加者全員が矯正視力を含む正常な視力を有していた。

視覚刺激

JAF MEDIAWORKS が運営するドライブレコーダー映像投稿サイト (<https://www.drive-drive.jp/index>) より, ドライブレコーダーに記録された交通場面に関する動画像 7 種類を使用した。実験に使用した 7 種類の動画像のうち 4 種類には, ①急な車の割り込み, ②車の飛び出し, ③停車中のバスの陰から歩行者飛び出し, ④夜間見通

しの悪い道路を横断する歩行者，といった事故の可能性が高まる対象や条件であるハザード（危険箇所）（島田ら，2018）が含まれており，それぞれ天候や時間帯は異なっていた．その他 3 種類の動画像にはハザードは記録されておらず，統制条件として使用した．動画像の提示範囲のサイズは $28.1^{\circ} \times 42.8^{\circ}$ であった．動画像は 12s の長さに編集した．

視線の解析はこのハザードを基点とした前後 800ms に対して行った．この区間を選定した理由は，刺激の提示から自動車のブレーキペダルの操作にかかる反応時間を計測すると，ハザード提示からブレーキペダルを踏み始めるまでの時間が約 700ms～900ms となるからである（伊藤・渋川，1954；牧下・松永，2002）．図 3.8 および図 3.9 に視覚刺激の動画像より，ハザードとその前後 800ms の場面を切り取った画像を示す．ここでは，視覚刺激をイラスト化している．

視線の計測と解析

実験の制御や視線測定と解析に使用した機器はこれまでの実験と同じであった（3.2.1 で記載）．解析した視線パターンの指標は，実験 5 と同様に動画像全体における視線一回の停留時間およびサッカード振幅であった．また，初回停留までの時間は，ハザードが出現する位置に対して AOI を動画開始時点より設定することにより解析した．

手続き

本実験における実験参加者の課題は，交通場面に関する 7 種類

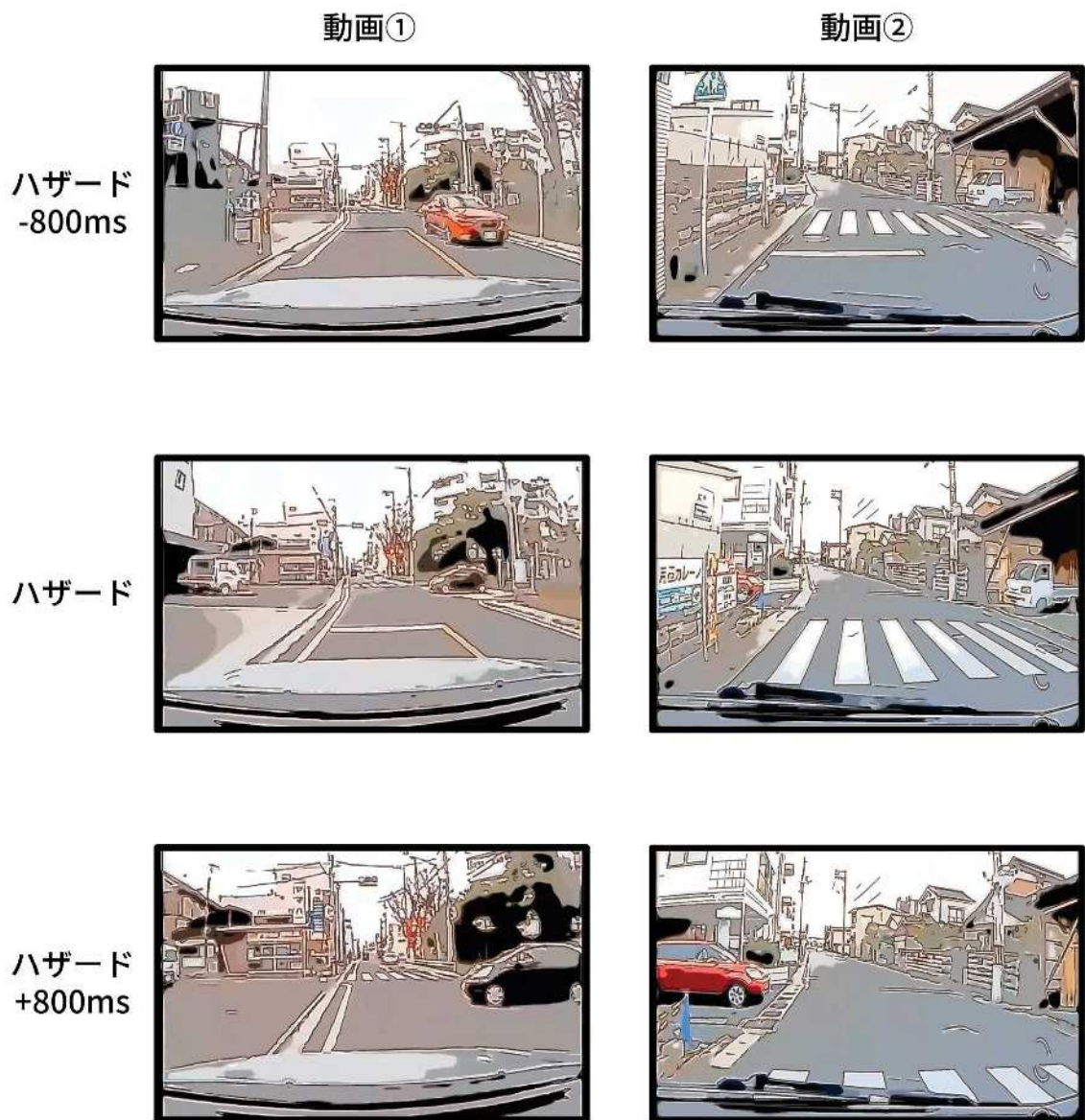


図 3.8 実験 6 で使用した動画像①および②の一場面

左列に示す図は「①急な車の割り込み」の危険場面を含む動画より、ハザード前後 800ms の場面を画像として切り取っている。右列に示す図は「②車の飛び出し」の危険場面を含む動画より、ハザード前後 800ms の場面を画像として切り取っている。

動画③

動画④

ハザード
-800ms



ハザード



ハザード
+800ms



図 3.9 実験 6 で使用した動画像③および④の一場面

「③ 停車中のバスの陰から飛び出し」の危険場面を含む動画より、ハザード前後 800ms の場面を画像として切り取っている。「④ 夜間見通しの悪い道路を横断する歩行者」の危険場面を含む動画より、ハザード前後 800ms の場面を画像として切り取っている。

（ハザードあり：4種類，ハザードなし：3種類）の動画像を自らが運転していると仮定しながら観察し，ハザードをできるだけ早く見つけ出しマウスをクリックすることであった．クリックする回数に制限は設けなかった．

実験が開始されると，ディスプレイの中心に黒い十字（ $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ ）が凝視点として2s提示された．その後，運転風景の動画像が提示された．実験参加者は，ハザードが出現したと思ったら素早くその箇所をマウスでクリックした．動画像はクリックに関係なく最後まで提示された．動画像終了後にハザードであると考えた全ての物や箇所について口頭で回答した．動画像提示時から，ハザードに対する実験参加者のマウスクリックまでを反応時間として算出し，また課題遂行時の視線を計測した．この手続きを1試行とし，計7試行行った．動画像の提示順序は実験参加者ごとにランダムとした．実験開始前に，本実験で使用した動画像とは異なるハザードを含む動画像を練習試行として提示した．実験終了後，実験参加者に運転経験の有無を尋ねた．

3.3.3 結果と考察

視線パターンは各動画像に対して独立に解析した．また，視線パターンはハザード出現を基点とした $\pm 800\text{ms}$ の範囲に限定して解析を行った．

①「急な車の割り込み」動画の結果

図 3.10 に運転経験の有無による視線プロットを示す．実験5の場合とは異なり，運転経験群と未経験群で視線の散らばりに顕著な

違いはみられない。

反応時間（図 3.11A）については，運転経験の有無による差はみられなかった（ $t(17)=1.86, p=.07$ ）。ハザードに対する初回停留までの時間（図 3.11B）については，運転経験群よりも運転未経験群の方が有意に短くなった（ $t(17)=3.05, p=.007, d=1.48$ ）。視線一回の停留時間（図 3.11C）については，ハザード出現前後ともに両群間に有意差はみられなかった（出現前： $t(17)=.81, p=.42$ ），出現後： $t(17)=1.12, p=.27$ ）。サッカード振幅（図 3.11D）についても両群間に差はみられなかった（出現前： $t(17)=.79, p=.43$ ），出現後： $t(17)=.73, p=.47$ ）。

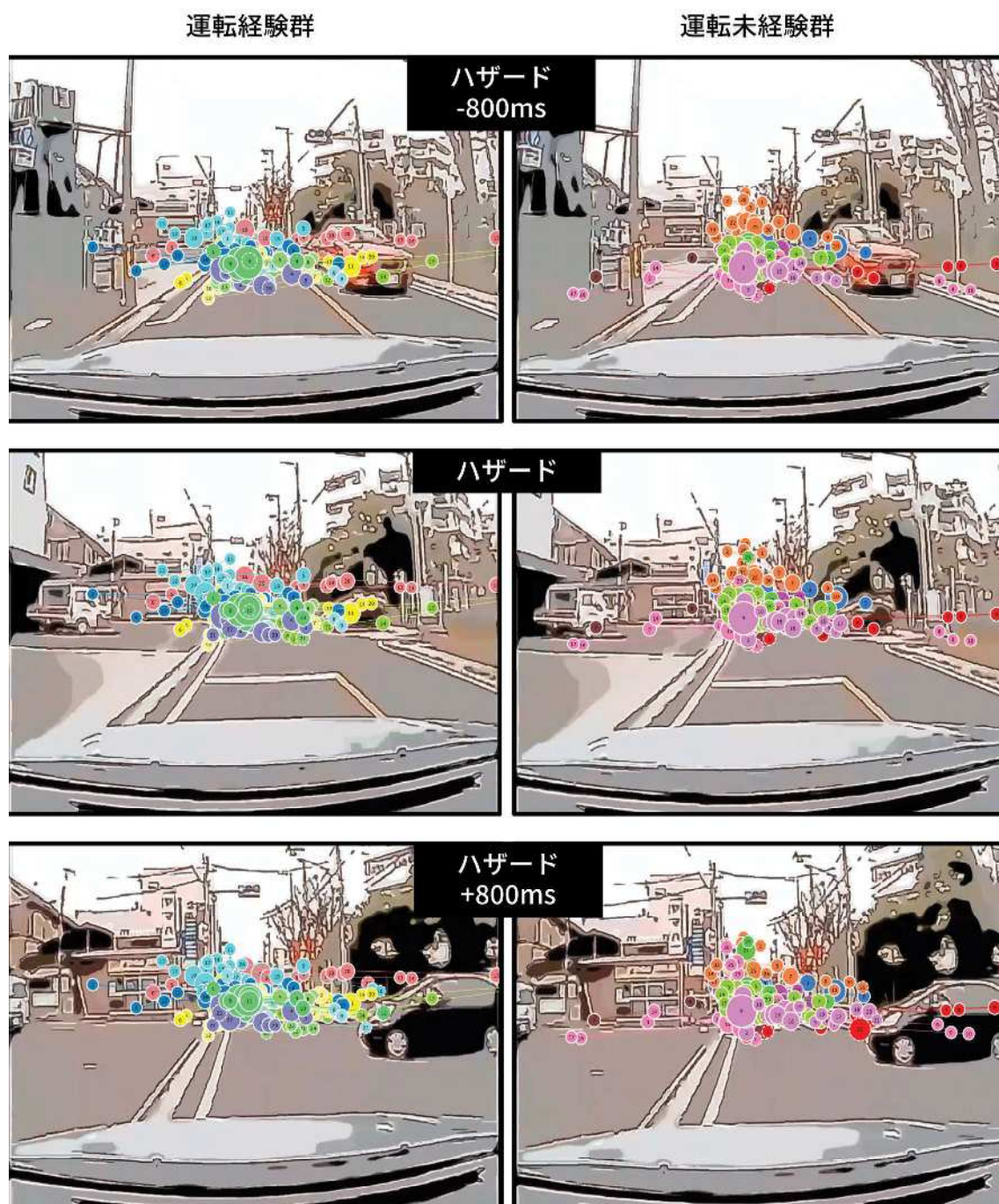


図 3.10 実験 6 (動画①)の結果：運転経験の有無による視線プロット
 左列は運転経験群（10 名），右列は運転未経験群（9 名）の視線プロットである．各円は視線一回の停留を示す．各円の色は実験参加者の違いを示す．一回の停留時間が長くなるほど円のサイズは大きく示される．停留同士をつなぐ線はサックードを示す．

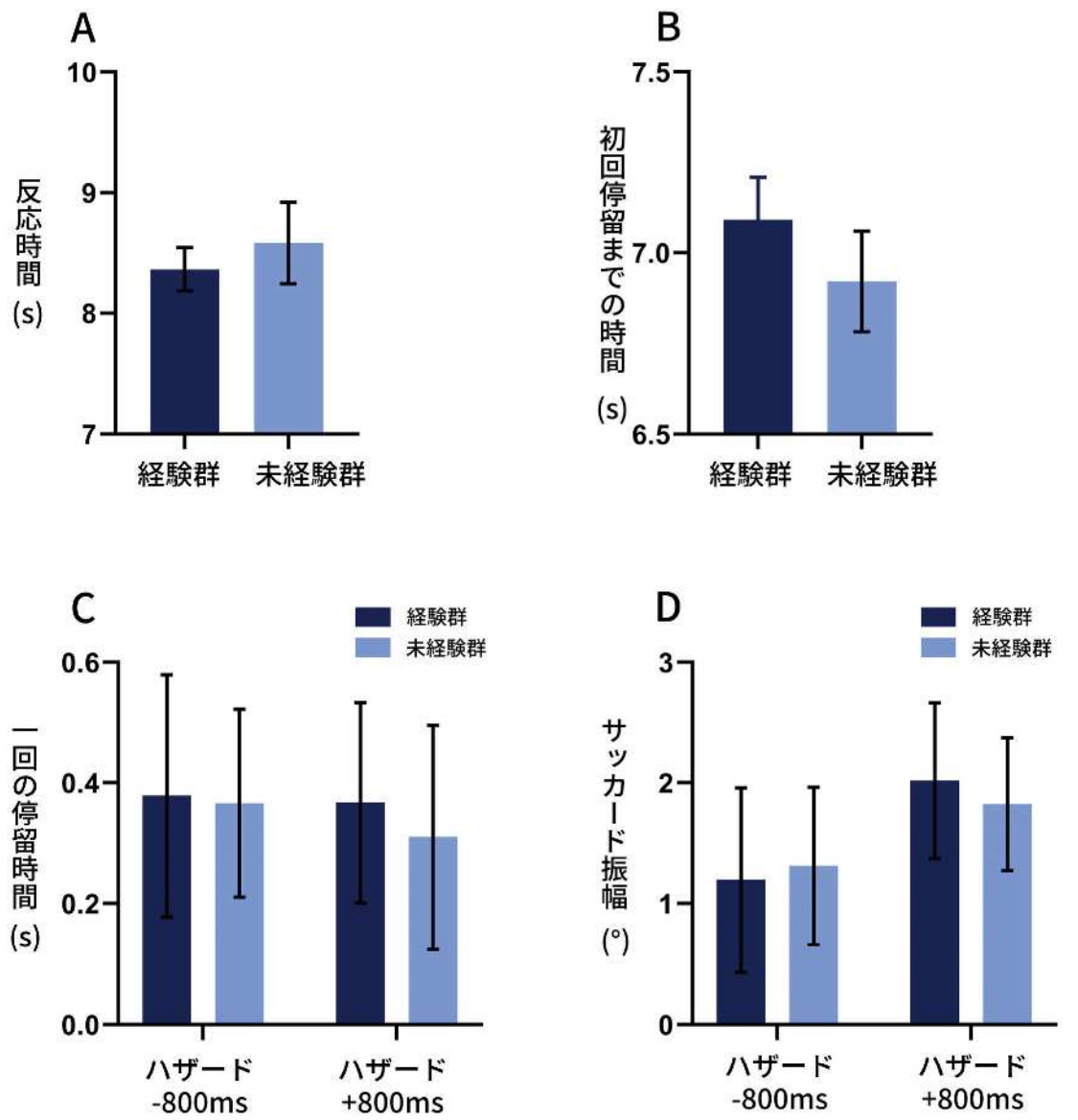


図 3.11 実験 6（動画①）の結果：反応時間および視線パターン
 A, B の横軸：自動車の運転経験の有無．C, D の横軸：ハザード出現前後の時間．縦軸はそれぞれ、反応時間(s) (A), 初回停留までの時間(s) (B), 一回の停留時間(s) (C), サッカード振幅(°) (D)を示す．誤差棒は 95%信頼区間．

②「車の飛び出し」動画の結果

図 3.12 に運転経験の有無による視線プロットを示す．両群において特に目立った違いはみられない．反応時間（図 3.13A）については，運転経験群は運転未経験群と比較して反応時間が有意に短くなった（ $t(17)=2.61, p=.001, d=1.26$ ）．ハザードに対する初回停留までの時間（図 3.13B）については，両群間に差はみられなかった（ $t(17)=.97, p=.34$ ）．視線一回の停留時間（図 3.13C）については，両群間に差はみられなかった（出現前： $t(17)=2.24, p=.03$ ），出現後： $t(17)=.08, p=.93$ ）．サッカード振幅（図 3.13D）についても，両群間に差はみられなかった（出現前： $t(17)=1.30, p=.20$ ），出現後： $t(17)=1.59, p=.12$ ）．

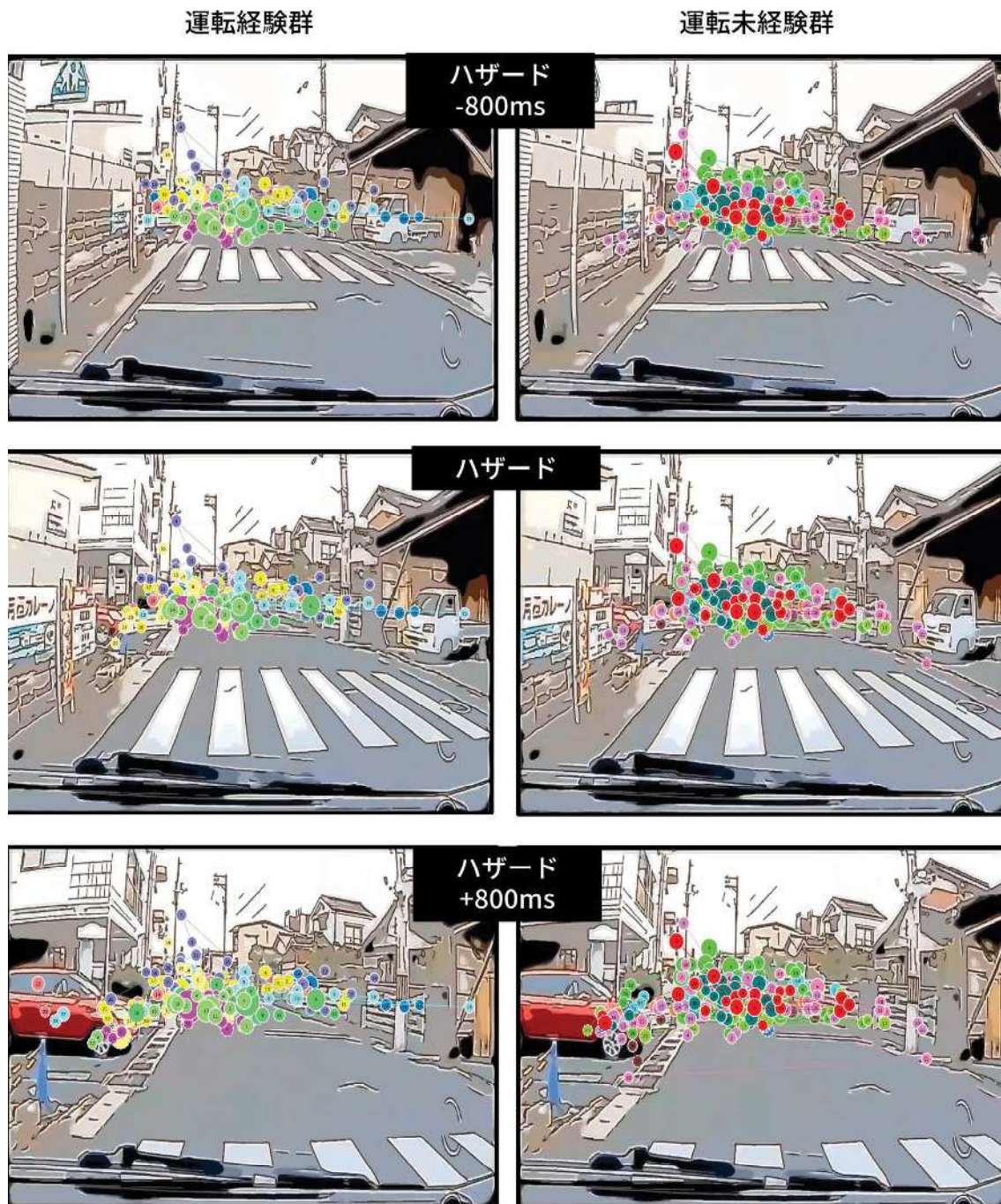


図 3.12 実験 6 (動画②) の結果：運転経験の有無による視線プロット
 左列は運転経験群（10 名）、右列は運転未経験群（9 名）の視線プロットである。各円は視線一回の停留を示す。各円の色は実験参加者の違いを示す。一回の停留時間が長くなるほど円のサイズは大きく示される。停留同士をつなぐ線はサッカードを示す。

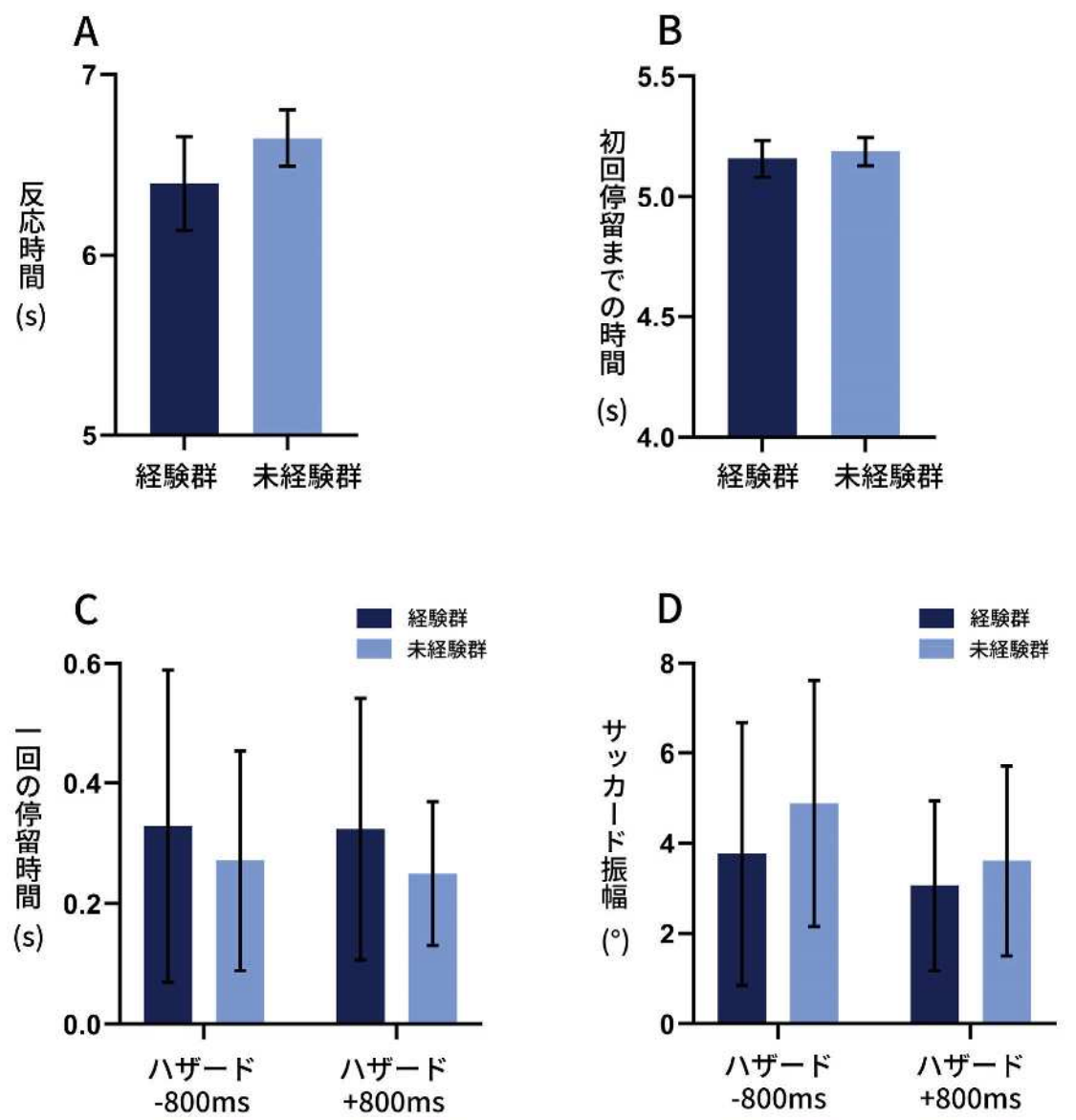


図 3.13 実験 6（動画②）の結果：反応時間および視線パターン
 A, B の横軸：自動車の運転経験の有無．C, D の横軸：ハザード出現前後の時間．縦軸はそれぞれ，反応時間(s) (A), 初回停留までの時間(s) (B), 一回の停留時間(s) (C), サッカード振幅(°) (D)を示す．誤差棒は 95%信頼区間．

③「停車中のバスの陰から歩行者の飛び出し」動画の結果

図 3.14 に運転経験の有無による視線プロットを示す．この視線プロットからは両群において特に目立った傾向はみられない．反応時間（図 3.15A）については，運転経験群と運転未経験群に差はみられなかった（ $t(17)=1.60, p=.12$ ）．ハザードに対する初回停留までの時間（図 3.15B）（ $t(17)=1.87, p=.07$ ）および視線一回の停留時間（図 3.15C）についても，群間で差はみられなかった（出現前： $t(17)=1.80, p=.08$ ），出現後： $t(17)=.96, p=.34$ ）．サッカード振幅（図 3.15D）については，ハザード出現前は両群に有意な差はみられなかったが（ $t(17)=.90, p=.37$ ），出現後は運転未経験群の方が運転経験群よりも有意にサッカード振幅が長くなった（ $t(17)=2.37, p=.02, d=1.15$ ）．

運転経験群

運転未経験群

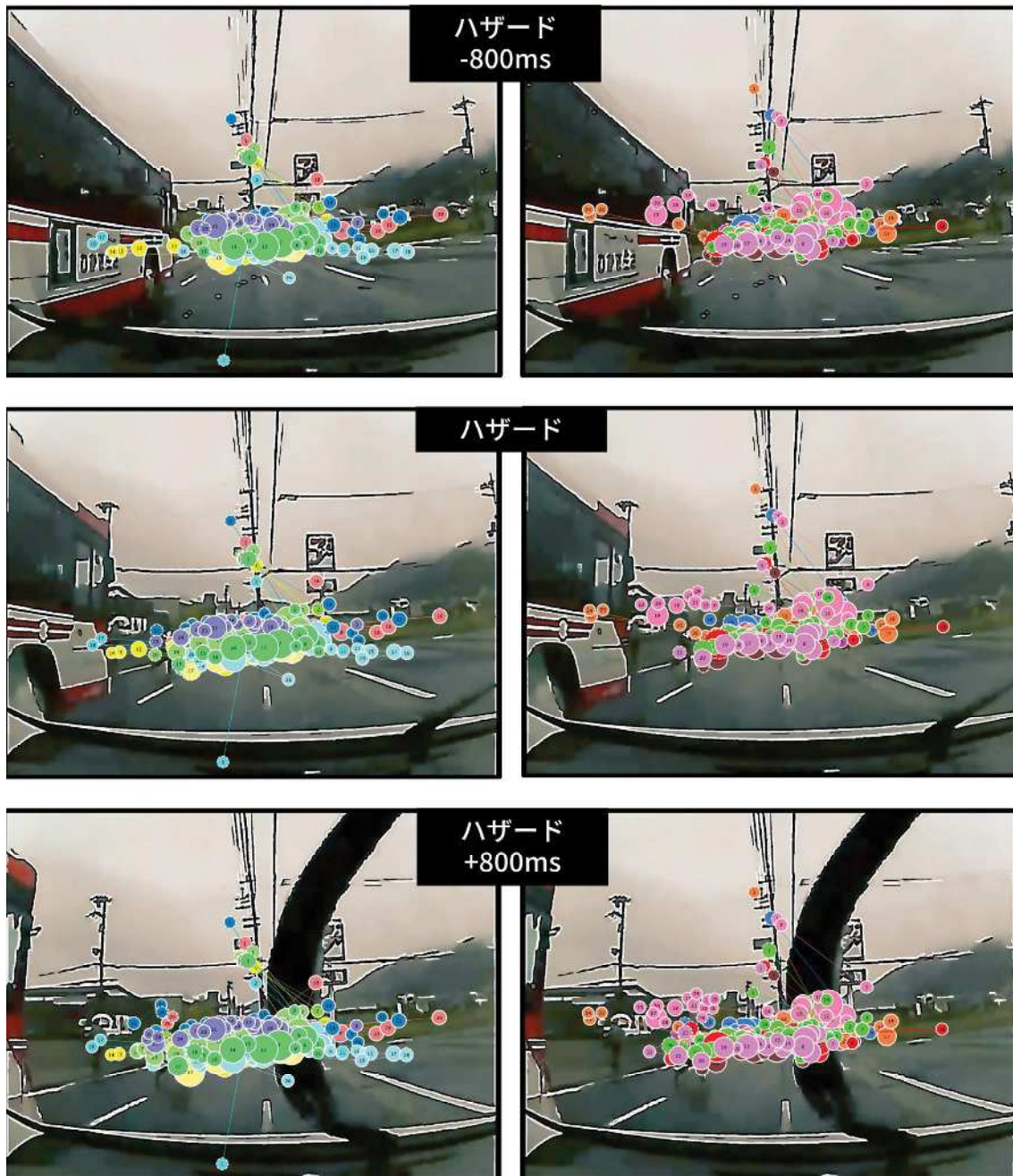


図 3.14 実験 6 (動画③)の結果：運転経験の有無による視線プロット
左列は運転経験群（10 名），右列は運転未経験群（9 名）の視線プロットである．各円は視線一回の停留を示す．各円の色は実験参加者の違いを示す．一回の停留時間が長くなるほど円のサイズは大きく示される．停留同士をつなぐ線はサッカードを示す．

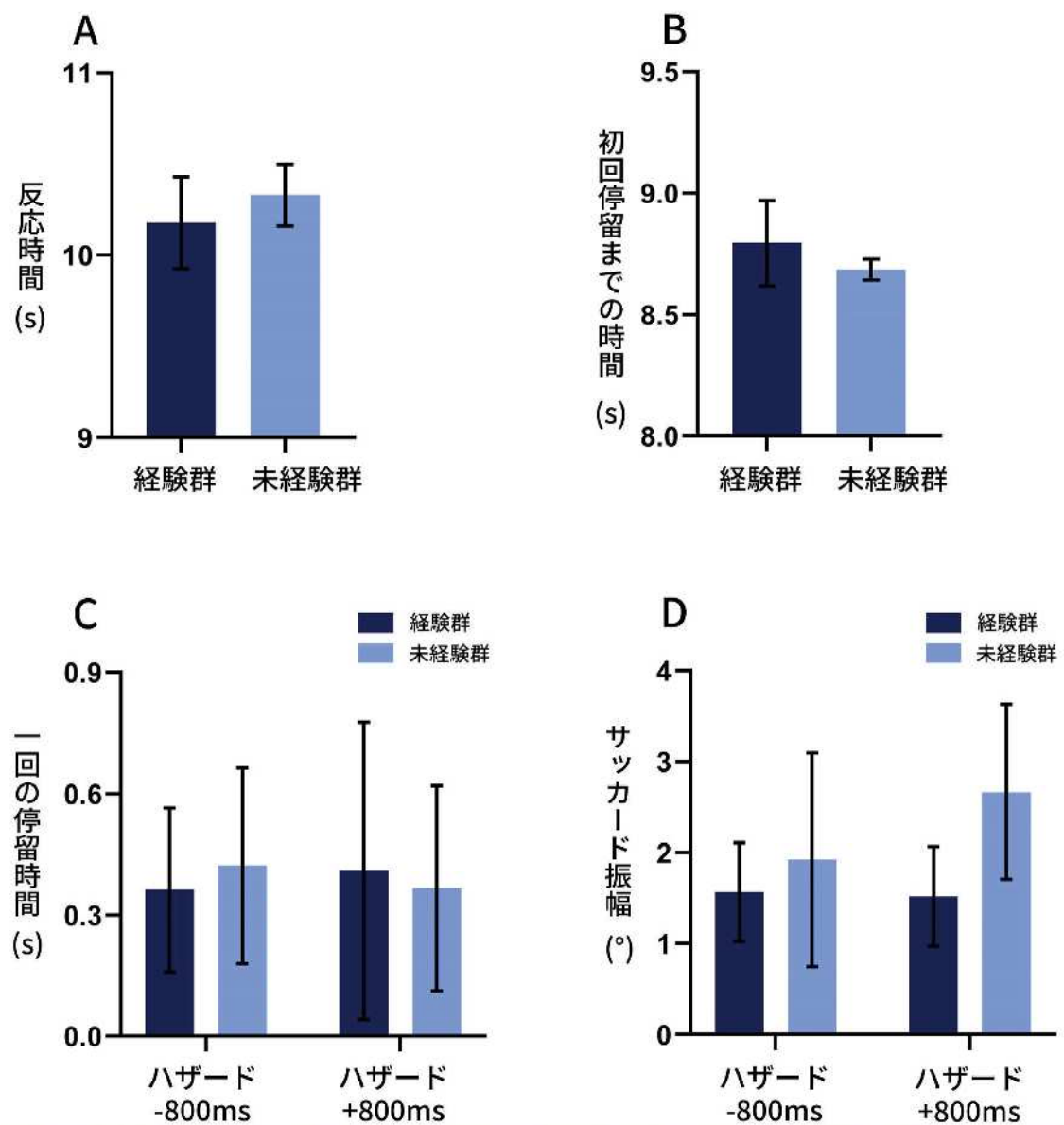


図 3.15 実験 6（動画③）の結果：反応時間および視線パターン
 A, B の横軸：自動車の運転経験の有無．C, D の横軸：ハザード出現前後の時間．縦軸はそれぞれ，反応時間(s) (A), 初回停留までの時間(s) (B), 一回の停留時間(s) (C), サッカード振幅(°) (D)を示す．誤差棒は 95%信頼区間．

④「夜間見通しの悪い道路を横断する歩行者」動画の結果

図 3.16 に視線プロットを示す。プロットからは運転経験，未経験の両群において特に目立った傾向はみられなかった。運転経験の有無により反応時間（図 3.17A）に有意な差はみられなかった（ $t(17)=1.49, p=.15$ ）。ハザードに対する初回停留までの時間（図 3.17B）（ $t(17)=1.18, p=.24$ ）および視線一回の停留時間（図 3.17C）においては，両群間に差はみられなかった（出現前：（ $t(16)=.37, p=.71$ ），出現後：（ $t(17)=1.05, p=.30$ ）。サッカード振幅（図 3.17D）においても両群間に差はみられなかった（出現前：（ $t(17)=.73, p=.47$ ），出現後：（ $t(17)=.62, p=.53$ ））。

以上の結果から，動画像を用いた場合には，運転経験に応じた反応時間に違いが見られたのは動画像②のみとなった。そのために，静止画像のように，運転の経験，未経験に応じて一貫した視線の変容がみられることはなく，動画像に依存した形になった。使用した4点の動画像の結果を統合した場合に，視線のどの指標においても運転経験群と未経験群の間に差はみられなかった。

運転経験群

運転未経験群

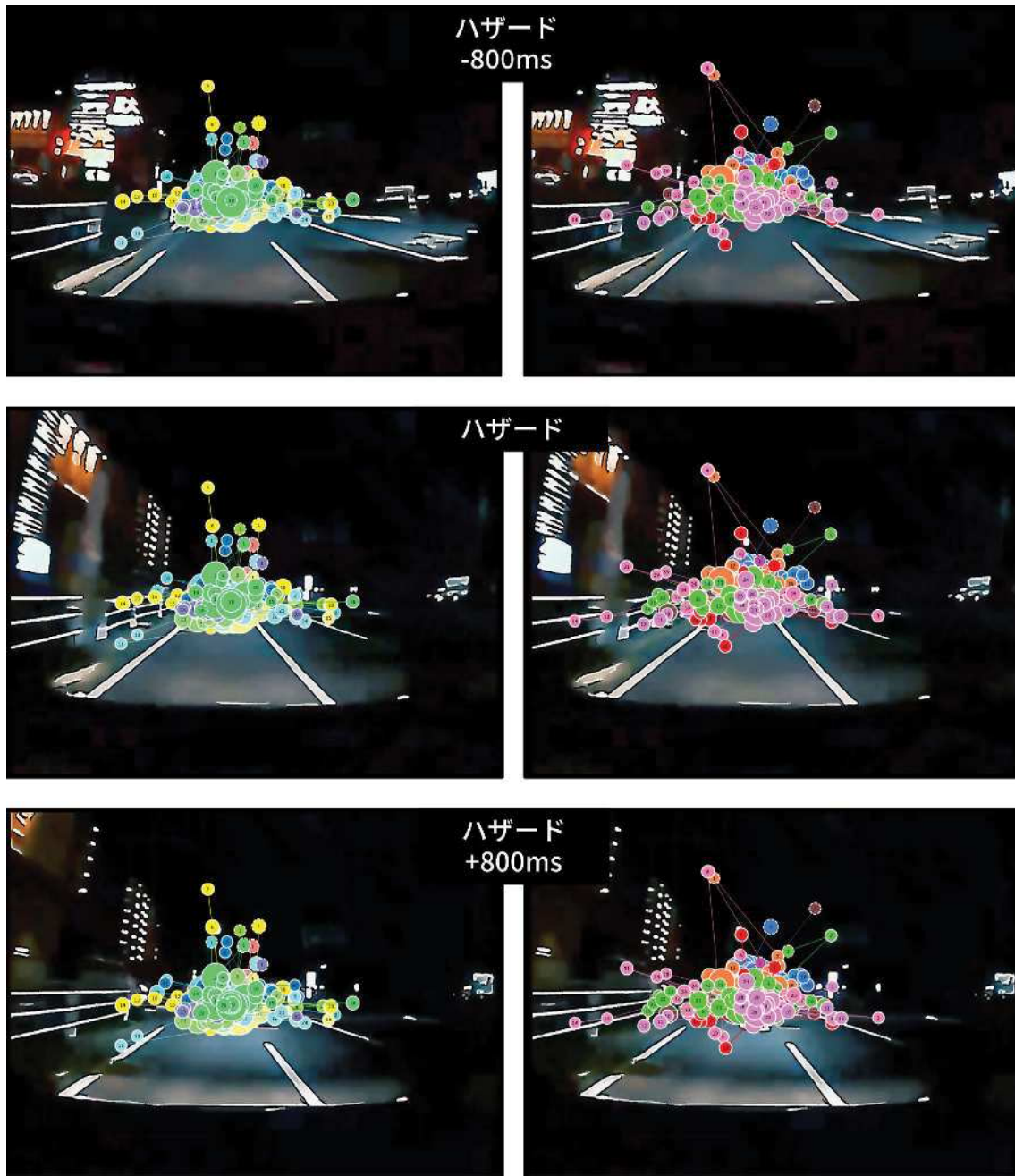


図 3.16 実験 6 (動画④) の結果：運転経験の有無による視線プロット
左列は運転経験群（10 名），右列は運転未経験群（9 名）の視線プロットである．各円は視線一回の停留を示す．各円の色は実験参加者の違いを示す．一回の停留時間が長くなるほど円のサイズは大きく示される．停留同士をつなぐ線はサッカードを示す．

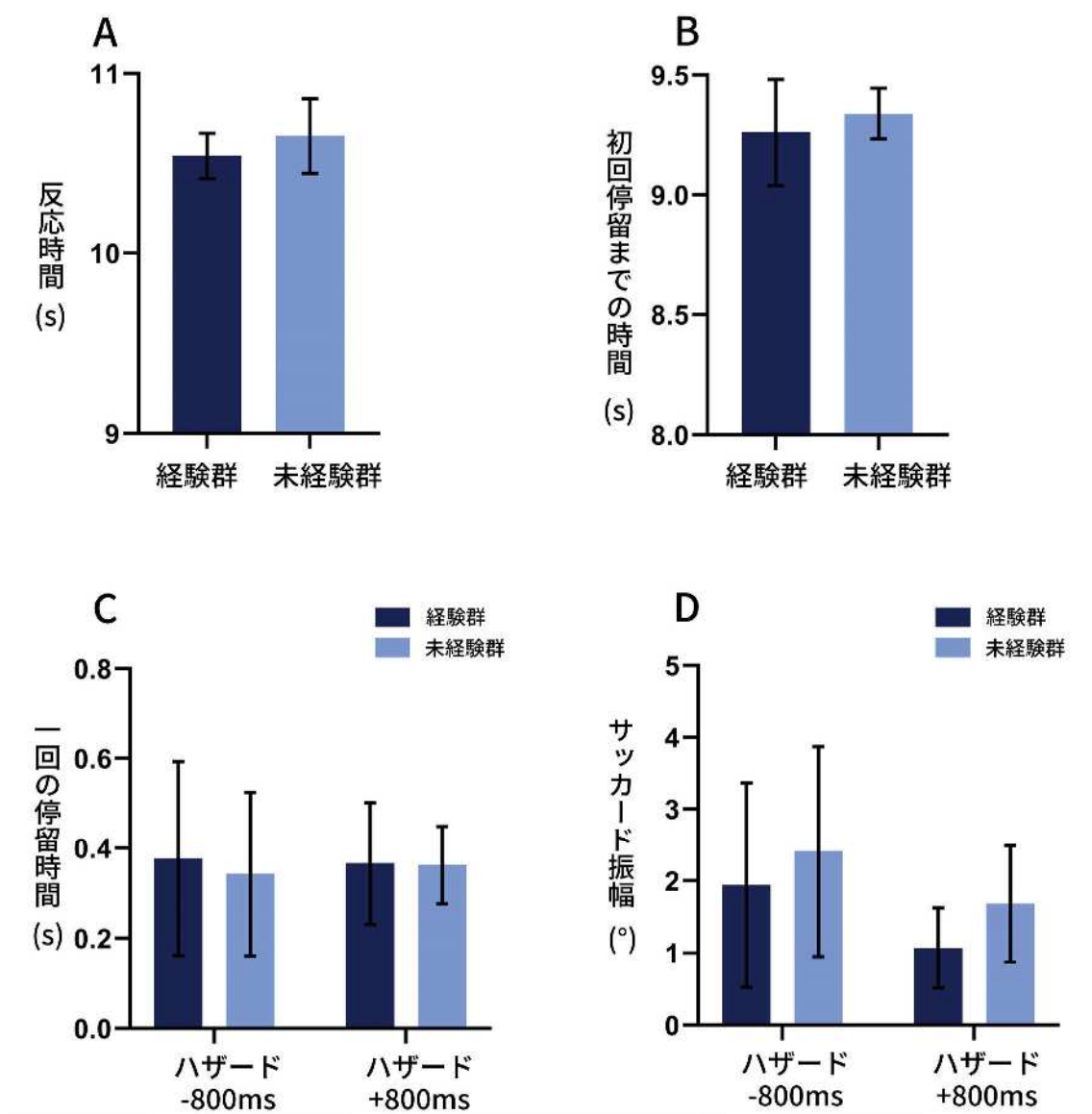


図 3.17 実験 6 (動画④) の結果：反応時間および視線パターン
A, B の横軸：自動車の運転経験の有無. C, D の横軸：ハザード出現前後の時間. 縦軸はそれぞれ, 反応時間 (s) (A), 初回停留までの時間 (s) (B), 一回の停留時間 (s) (C), サッカーダ振幅 (°) (D) を示す. 誤差棒は 95% 信頼区間.

3.4 第 3 章：考察

第 3 章では、文脈内の変動が大きい状況で経験・未経験の違いを調べるために、交通場面（実験参加者が運転席にいる状況）に限定した画像や動画像を使用した。交通場面は文脈の詳細が固定されておらず、刻一刻と変化する。約 2 年の自動車運転歴を持つ群および運転未経験群に対し、さまざまな交通状況の中からハザードを探し出させる視覚探索課題を行った。

その結果、実験 5（運転場面の静止画像使用）では運転経験群においてサッカード振幅が増加した。学習によりサッカード振幅量が増加することは、画像に対する全体的処理が促進されていることの現れである（Kundel et al, 2007; Reingold et al., 2001）。その一方で、視線一回の停留時間は、運転経験の有無により変容することはないことから、記憶メカニズムの関与に差がなかったといえる。

Robbins and Chapman (2019)は、運転経験年数を 3 年以上（経験群）と 3 年以下（未熟練群）に限定し、運転場面における視覚探索中の視線計測がなされた研究のメタ分析を行った。視覚刺激としては静止画像や動画像、観察状況としてはディスプレイでの観察やドライビングシミュレータなど複数の条件を分析した。その結果、どの条件においても両群において視線一回の停留時間に違いはみられなかった。実験 5 および 6 で得られた、どの場合でも視線一回の停留時間に変化はないという結果と合わせると、現実的な運転場面におけるハザード探索では、路線図における目的駅探索の場合と異なり、全体的処理メカニズムへの依存度が高いと結論づけられる。

ハザードの検出課題といった特別な課題を行わない研究では、運

転場面に関する静止画像を提示したり、あるいはドライビングシミュレータを用いたりした場合、経験者は初心者よりも水平方向への視覚的スパンが拡大することが示されている (Robbins & Chapman, 2019; Underwood, 2003). こうした傾向は、経験群でサッカード振幅が増加しているという実験 5 の結果と一貫しているといえる.

実験 6 では、より現実的な交通場面を検討するために、ドライブレコーダーで記録された動画画像を提示したが、運転経験に基づく視線パターンの変容はみられなかった. その一つの可能性は、実験 6 の課題では運転経験年数が結果に差を生み出すほど大きくなかったという点にある. 運転歴 30 年と 1.8 年のドライバーにおける自動車運転時の視線プロットを比較した研究より、運転歴 1.8 年のドライバーの視線はより中央に集中する結果が得られている (Husnain et al., 2010). この傾向は図 3.10 の視線パターンと類似している. 実際の運転場面では、何十年という非常に長期の経験により獲得されていくメカニズムがあると考えられる. 医療における画像診断では、視線パターンは経験年数ごとに段階的に変容することが示されていることから (Wood et al., 2012), 実験 6 のような状況では、経験年数の長さにより結果が変わってくる可能性がある.

その一方で、実験 6 はそのパフォーマンスを運転の経験が左右するような課題設定ではなかったかもしれない. 映像において短時間のうちに、ハザードが水平方向の左右どちらかというほぼ決まった位置から現れることから、ビデオゲームにおけるターゲット検出のような課題となっていた可能性がある. この点は第 5 章で再度記す.

第 4 章 仮想現実空間における視覚探索

4.1 目的

第 4 章では、本研究で検討する視覚探索において鍵となる 3 つの要因（文脈，学習，身体動作）のうち，学習を通じた身体動作の効果に焦点を絞り，身体動作を伴う視覚探索について検討した．実験は，自由な身体動作が可能な仮想現実（virtual reality: VR）空間において実施し，課題遂行時の視線を計測した．そして図 1.12 に示したように，試行の進展に伴う視線の変容を評価した．

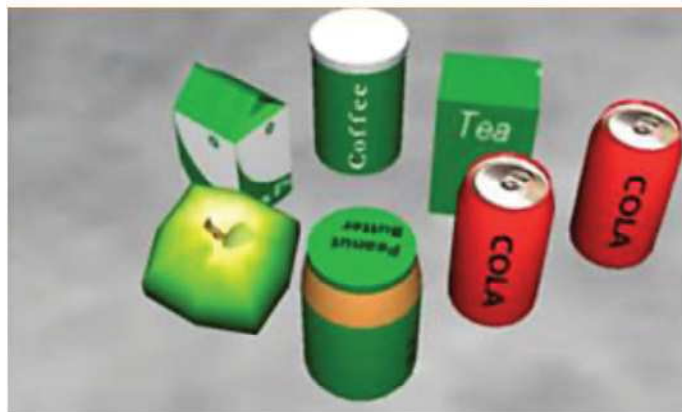
第 1 章に記したように，身体動作は学習の効率を高めるといった知見が得られている（Jee et al., 2018; Lindgren et al., 2016; Kontra et al., 2015）．一方で，VR 空間における視覚探索実験の先行研究は現状としてまだ少ない．図 4.1a は David ら（2021）による実験例であり，VR 空間に構築したリビングルーム内の探索を行っている．図 4.1b は Olk ら（2018）による刺激例で，VR 空間に配置したオブジェクトの探索を行っている．図 4.1c では，Marek and Pollmann（2020）が文脈手がかり効果を VR 空間で再現するために，T と L という刺激（図 1.5）を VR 空間内にちりばめている．後半でも考察するが，こうした研究からの主な知見は，VR 空間における視覚探索では，2 次元ディスプレイ上で得られた結果から想定されるよりも，幅広い視野領域からの情報が利用されているということである．

実験 4 からは，身体動作の付加（手の動作）により探索に関与するメカニズムが変容する可能性が示唆された（図 2.16）．先行研究

a



b



c

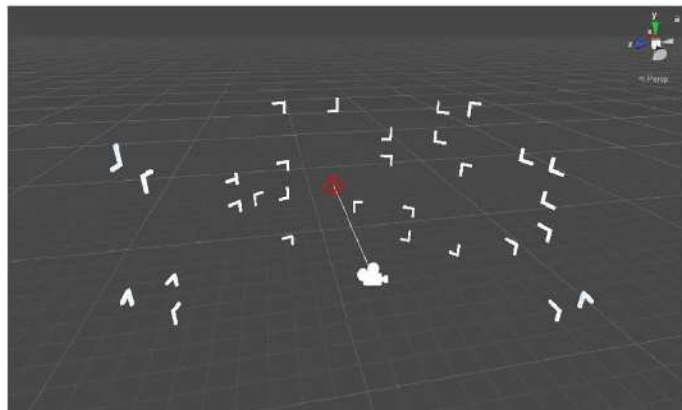


図 4.1 VR 空間における視覚探索の研究例

a)リビングルームにおける探索 (David et al., 2021), b)オブジェクトの探索 (Olk et al., 2018), c)人工的刺激の探索 (Marek & Pollmann, 2020).

のように，より VR 空間の広い領域からの情報が利用できるのであれば，試行を繰り返すたびにサッカード振幅が増加する可能性がある．これはつまり，空間における全体的処理能力の向上を意味する．実験 7 ではこの点を検討した．その際には，VR 空間内にどのような刺激を配置するか，という点が問題になる．2 次元平面上の視覚探索研究と比較すると，仮想現実空間における視覚探索研究は圧倒的に少ないという現状を鑑み，現実 に 似 せ た 何 ら か の（例 えば 交 通 状 況 の）再 現 場 面 に お け る 探 索 を 検 討 す る 前 に，よ り 基 礎 的 な 刺 激 を 用 い た 環 境 に お け る デ ー タ を 取 る こ と に 注 力 し た．そ こ で 実 験 7 で 用 い る 刺 激 は，CG に よ る 限 界 は 明 ら か で あ る も の の，現 実 場 面 を あ る 程 度 模 し た 図 4.1a の よ う な 刺 激 と，古 典 的 な 視 覚 探 索 実 験 で 用 い ら れ て き た，現 実 場 面 と の 関 連 が 必 ず し も 明 確 で は な い 図 4.1c の よ う な 人 工 的 な 刺 激 の 中 間 を と る こ と と し た．そ こ で，物 体（オブジェクト）を記載する際の基本単位とされる一般化円筒（Marr & Nishihara, 1978）を刺激とし，この一般化円筒の組み合わせにより視覚探索における目標刺激を構成した．

4.2 実験 7 仮想現実空間内における視覚探索

4.2.1 方法

参加者

16 名 ($M=23.1$ 歳, $SD=1.36$ 歳) が実験に参加した. うち 6 名に対し課題遂行時の視線を計測した. 実験参加者全員が矯正視力を含む正常な視力を有していた.

装置

視覚刺激はリアルタイム 3D コンテンツ開発プラットフォーム Unity (Unity2019.3, Unity Technologies) およびプログラミング言語 C#により作成し, 実験参加者が装着したヘッドマウンテッドディスプレイ (HMD, VIVE Pro Eye, HTC Corp.) に提示した. 実験のセッションは, パーソナルコンピュータ (Dell Precision 5820, Dell Inc, OS: Windows 10, CPU: Intel Xeon Processor W-2223, RAM: 32.0 GB, GPU: NVIDIA Quadro P1000) および Unity により制御した.

実験に使用した HMD の空間解像度は, 片眼あたり 1440×1600 ピクセル, リフレッシュレートは 90Hz, 視野角は最大 110 deg であった. 視覚刺激提示時における視線位置の測定には HMD に付属する眼球運動計測器と視線計測解析用ソフトウェア (Tobii Pro Lab 1.152) を使用した. カタログ値による HMD における眼球運動計測器のサンプリングレートは 120 Hz, 精密度 $0.5^\circ \sim 1.1^\circ$ であった. サッカーボールと停留の検出には Tobii Pro Lab 1.152 に実装されている I-VT (Identification of Velocity Threshold) フィルターを使用した. 視線の解析は実験終了後にオフラインで行った. 実験参加者は, VIVE

Pro Eye に付属の Vive コントローラーを片手に持ち、反応の入力装置として使用した。

視覚刺激

視覚刺激には現実世界の 3 次元物体を構成すると仮定されている単純な形状を使用した。具体的には、日常における 3 次元物体の認識を説明する構造記述理論において仮定された一般化円筒 (Marr & Nishihara, 1978) からの類推により、3 次元印象をもたらす円柱を視覚刺激の単一の要素として用いた。この形状は、Biederman (1987) の構造記述理論における基本単位であるジオンにも含まれている。一般化円筒として長さ 0.7m、幅 0.2m の円柱をシミュレートし、その表面には立体感をもたらす陰影をつけた。

20×20×20m の 3 次元空間を VR 空間内に設定し、その中に妨害刺激として 1900 個の円柱を、位置及び方位をランダムにした上で、空間上で重ならないように配置した (図 4.2A)。なお、HMD を通して視野に提示されている時は、円柱同士が遮蔽しあって見えることはありうる。

視覚探索課題における目標刺激 7 種類を図 4.3 に示す。要素による立方体構造を基本の目標刺激 (図 4.3 の「立方体 0°」) とした。視覚探索の難易度を可変とするため、この立方体を 4 辺から成る平行構造および 4 辺のみから成る四角に分解した (図 4.3 の「平行」および「四角」)。これらの形状の全体的な傾き (0°~90°) も変数とした。目標刺激を構成する円柱の数からすると、立方体が最も探索の難易度が低いことが予測される。

図 4.3 に示す目標刺激は図 4.2A の空間内に埋め込まれた。目標

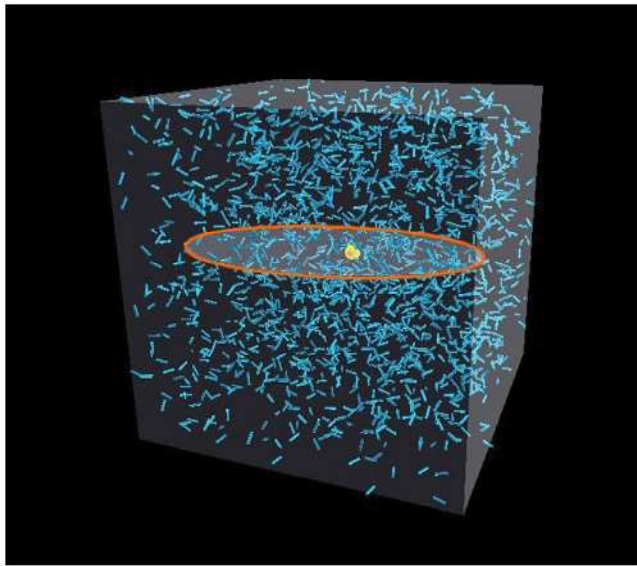
A**B**

図 4.2 実験 7 における仮想空間と実験参加者の様子

A：妨害刺激が配置された仮想現実空間．黄色の円は実験参加者の初期位置を示している．オレンジ色の円は実験参加者の初期位置を中心とした半径 7m の円である．目標刺激はこの円周上に提示された．B：実験参加者の様子．実験参加者は HMD を装着し，手には反応の入力装置としてコントローラーを持った．また，VR 空間内では自由に歩き回ることができ身体動作に制限は設けなかった．

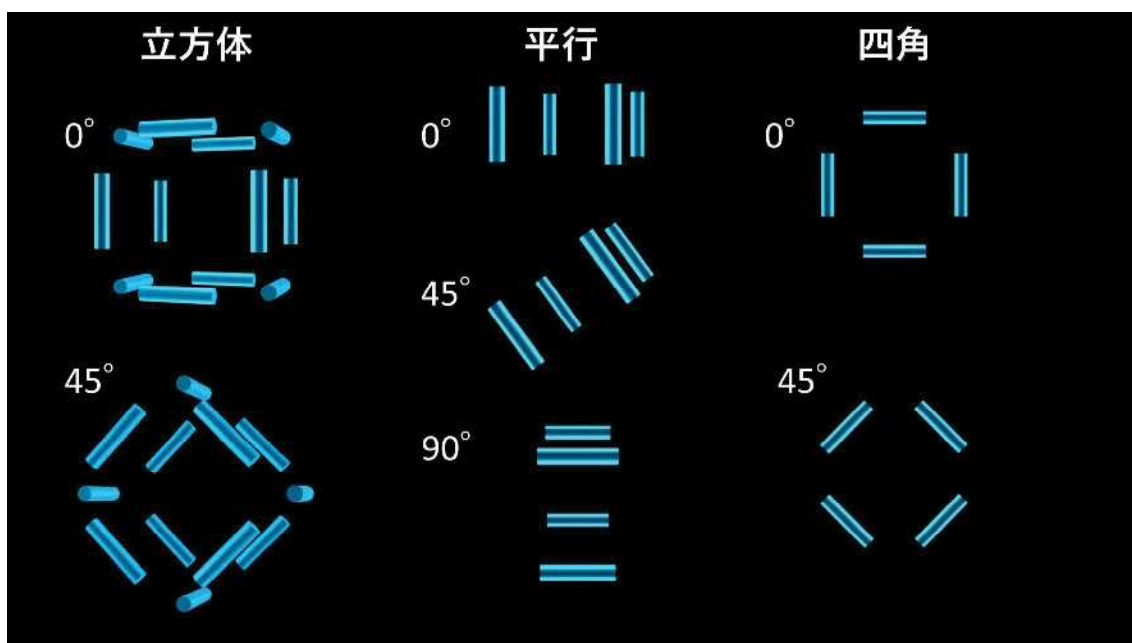


図 4.3 実験 7 に使用した目標刺激

円柱の要素による立方体構造 (A), 立方体を構成する 4 辺から成る平行構造 (B), そして 4 辺のみから成る四角 (C). これらの形状の全体的な傾き ($0^{\circ} \sim 90^{\circ}$) も変数とした.

刺激は、実験参加者を中心とした半径 7m における円周上を仮定し、その円周上においてランダムに提示された。ある範囲における妨害刺激の数は、目標刺激を構成する辺数と同等あるいはそれ以上であり、目標刺激の辺数による密度が目標刺激検出の手がかりに影響しないことを事前に確認した。実験参加者は HMD により仮想空間の中心（黄色の円で示す箇所）に位置した（図 4.2B）。

この実験では、技術上の問題から、視線計測は図 4.2A に示した VR 空間を出力して Unity により作成した 360°画像（図 4.4）に対して行った。この 360°画像を HMD を通して観察した。360°画像を用いた場合でも、図 4.2 のような状況と同様に、身体運動は自由に行うことができたため、実験参加者の課題に違いはなかった。

手続き

実験参加者の課題は、VR 空間内においてランダムに配置された円柱群（妨害刺激）（図 4.2A）の中から、円柱から成る目標刺激（図 4.3）を検出し報告することであった。目標刺激の種類はあらかじめ実験参加者に示しておき、本試行前に練習試行を行った。実験参加者は HMD を装着し、コントローラーを片手に持った上で、VR 空間の中心に立った（図 4.2）。したがって刺激は、実験参加者の頭上や足下にも現れた。

Treisman and Gelade（1980）以来の典型的な視覚探索実験では、目標刺激がある試行とない試行を混在させる。しかしながら、目標刺激（図 4.3）が VR 空間内に存在しない試行も含めた予備実験を行ったところ、目標刺激がない場合には、身体や頭部を大きく動かし空間全体を何度も見回す行動がみられた。そうした場合、探索時

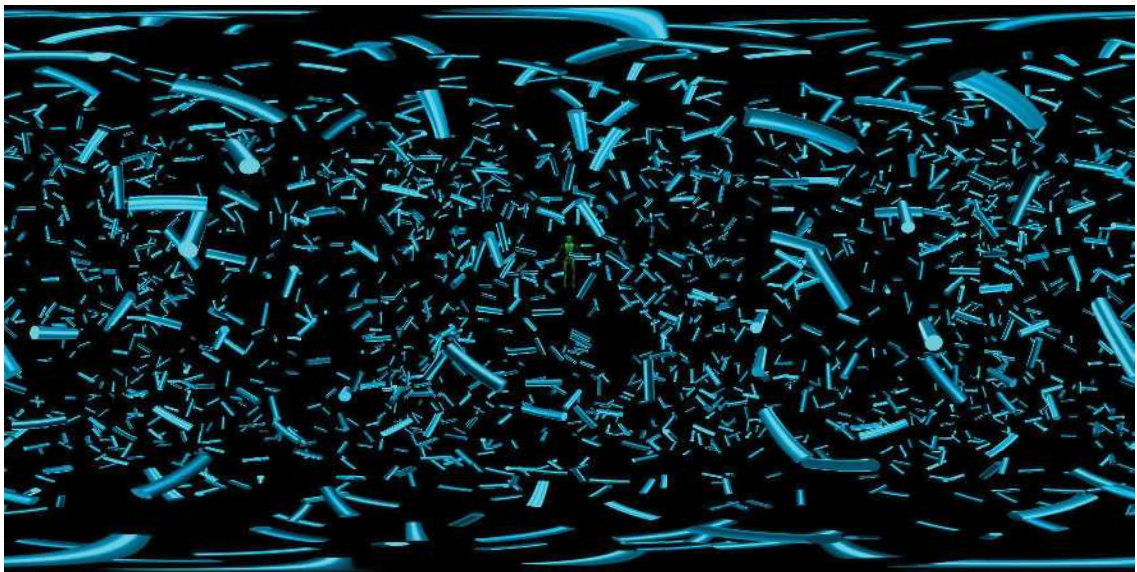


図 4.4 実験 7 に使用した 360°画像

視線計測を行った実験において使用した刺激．VR空間（図 4.2）をそのまま 360°画像として出力している．中央に映る緑色のオブジェクトは初期位置を示す参照マーク．

間が数分にわたるなど，長くなることがあり，HMD を装着した実験参加者の負担感も大きくなった．そのために，本実験においては目標刺激を含まない試行は含めず，全ての試行において目標刺激を提示した．

試行開始前に VR 空間内に緑色の大きな人型のオブジェクトを提示し，それに対峙するように立ってもらうことにより，実験参加者の初期の立ち位置を決めた．実験開始の合図と同時に，探索を開始させた．探索の際には，頭部や身体を動かすことができた．目標刺激は実験参加者を中心として半径 7m における円周上を仮定し，その円周上においてランダムに提示された．目標刺激を見つけた場合には，コントローラーのパッドをできるだけ早く押すように教示した．実験参加者がパッドを押した時には，正誤のフィードバックのために目標刺激の色を赤に変化させた．実験参加者が反応した時の HMD の視野内に目標刺激が存在しなかった場合には，誤答と記録された．どうしても目標刺激が見つからない場合は，実験参加者は口頭で実験者にその旨を知らせることにより，その試行は打ち切られた．その試行も誤答とカウントした．

図 4.5 は，実験参加者が HMD を通して観察した VR 空間の一部を示している．実験参加者は頭部や身体を動かすことができたため，HMD を通して観察する情景は刻一刻と変化した．図 4.5 上図は図 4.3 に示した立方体 0° の目標刺激を含んでいる．図 4.5 下図は，フィードバックのために目標刺激が赤色に変わった様子を示している．

視線計測を行った実験セッションでは，視覚刺激は VR 条件で利用した空間を 360° 画像（図 4.4）として出力したものを提示した．

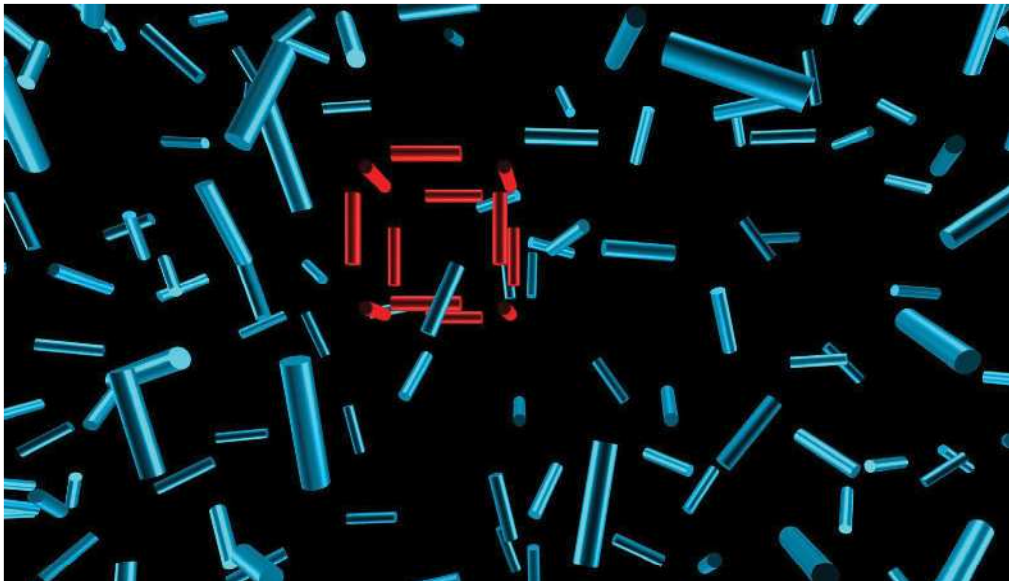
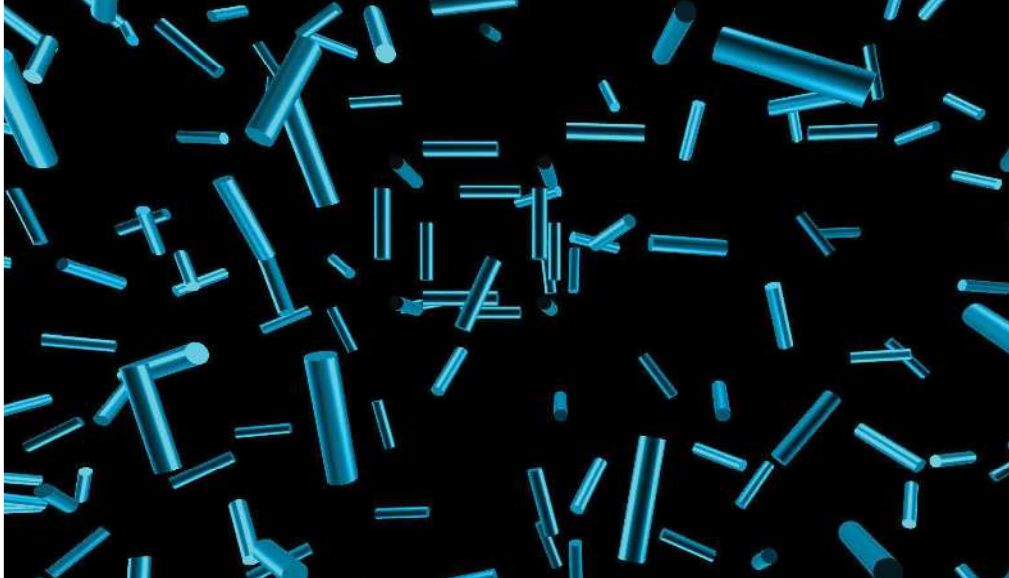


図 4.5 HMD を通して見た VR 空間の一部

上図：立方体 0° の目標刺激（図 4.3）が妨害刺激の中に配置されている。
 下図：立方体 0° の目標刺激を赤く変化したフィードバックの画像。

各実験参加者は、目標刺激 7 種類×繰り返し 4 回の計 28 試行を行った。刺激の提示順序は参加者間でランダムとした。

視線解析

視線の解析は、360°画像内に AOI (areas of interest, 興味領域) を設定することにより行った。図 4.6 に AOI を示す。AOI は目標刺激および妨害刺激に対して設定した。実験参加者には、目標刺激は目線の円周上に提示されることを事前に教示したため、図 4.6 に示すような水平方向のみを妨害刺激の領域とした。なお、AOI の縦幅は視角約 5°とした。これは、私たちが情景から一回の視線停留により意味のある情報を得ることが可能な周辺範囲が約 5°と指摘されているためである (Holmqvist & Andersson, 2017; Kundel et al., 1991)。これらの AOI において、視線一回の停留時間、そして目標刺激における初回停留までの時間について解析を行った。なお、サッカード振幅については、画像の全体処理に関する指標であるため、AOI を設定せず、画像全体のデータについて解析を行った。

4.2.2 結果

まず、視覚探索のパフォーマンスを確認するため、正答率(図 4.7A)および反応時間(図 4.7B)を算出した。正答率(図 4.7A)より、立方体 0°、立方体 45°および平行 0°に対する検出率が高くなった。一方で、平行 45°や平行 90°、四角のパーツに対する感度は、立方体や平行 0°と比較して大きく低下した。これらの傾向を統計的に調べるため、Bonferroni 法による目標刺激間の多重比較を行った。その結果、立方体 45°と平行 0°を除くその他全ての目標刺激と立方体 0°と

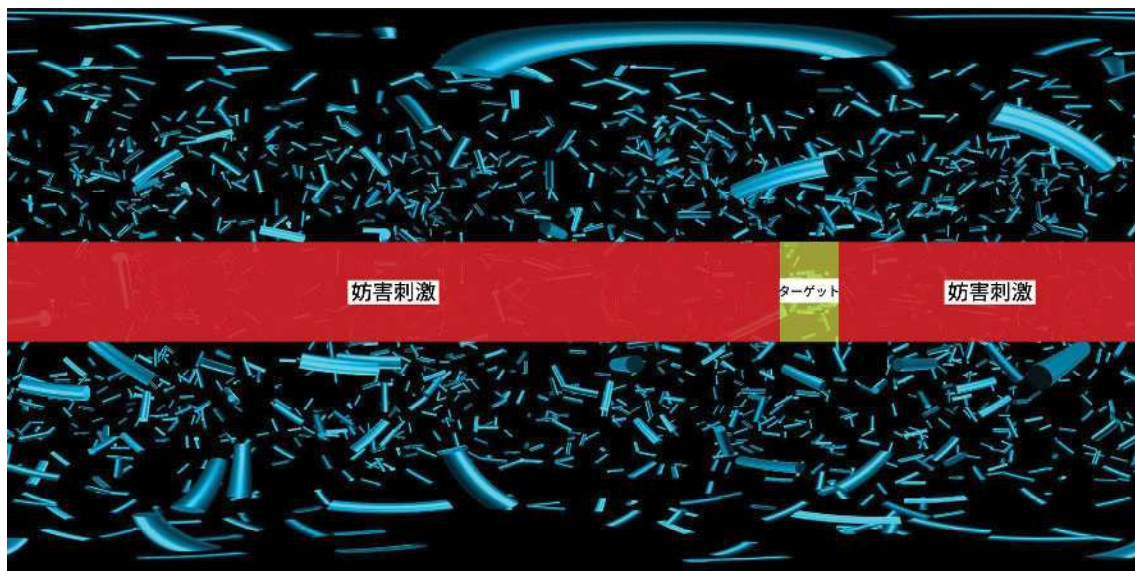


図 4.6 視線解析のための AOI の設定
AOI は目標刺激および妨害刺激に対して設定した。

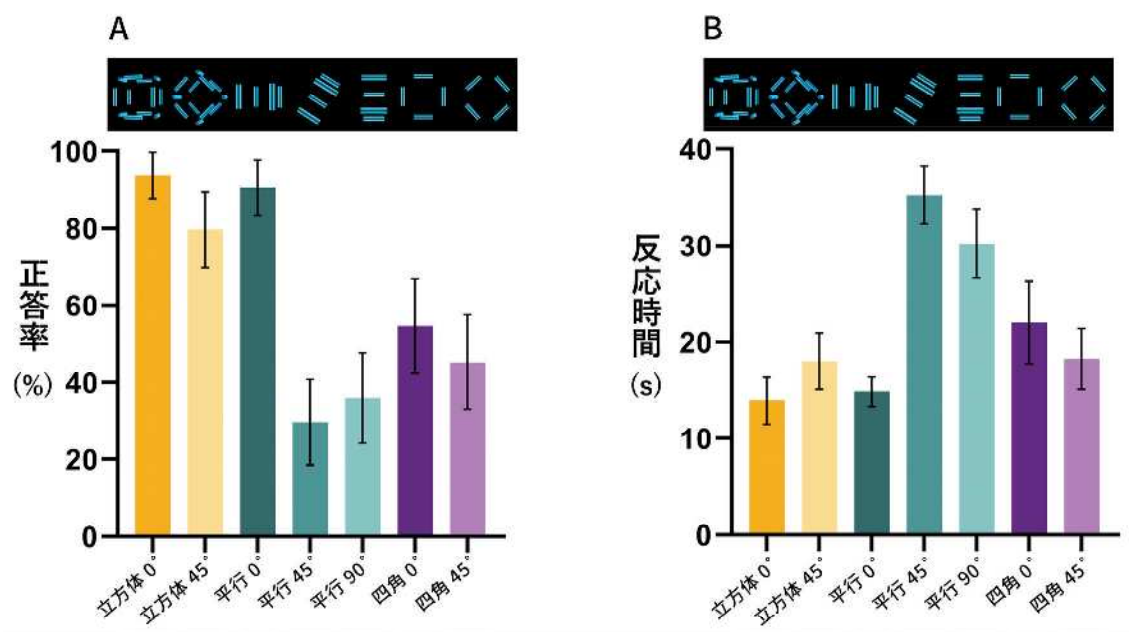


図 4.7 実験 7 の結果：正答率および反応時間

A：横軸は目標刺激の種類，縦軸は正答率を表す．誤差棒は 95%信頼区間を示す． B：横軸は目標刺激の種類，縦軸は反応時間 (s) を表す．誤差棒は 95%信頼区間を示す．

の間、立方体 0°と立方体 45°を除くその他全ての目標刺激と平行 0°との間に有意な差がみられた ($ts(15) \geq 4.05$, $ps < .02$, $d > 1.37$). また効果量も大きいといえる (Cohen, 1988). なお、立方体 0°と立方体 45°および平行 0°の間に有意な差はみられなかった ($ts(15) \leq 3.02$, $ps > .18$, $d < .90$).

反応時間 (図 4.7B) は、目標刺激の正答率 (図 4.7A) に依存する形で変化した。高い検出率を示した目標刺激 (立方体 0°, 立方体 45°および平行 0°) に対する反応時間はその他の目標刺激よりもより短くなる傾向がみられた。Bonferroni 法による目標刺激間の多重比較を行った結果、立方体 0°と平行 45°および平行 90°の間、平行 0°と平行 45°および平行 90°の間、平行 45°と四角 45°の間に有意な差がみられた ($ts(15) \geq 4.08$, $ps < .03$, $d > 1.39$). 立方体 0°と立方体 45°および平行 0°の間に有意な差はみられなかった ($ts(15) \leq 1.59$, $ps > .99$, $d < .60$). 立方体 0°, 立方体 45°および平行 0°への高い検出率は、探索時間を長くとしたことによるトレードオフの結果ではないことが示された。

立方体 0°と立方体 45°の高い正答率は予測されたものであったが、それらに劣らない平行 0°への高い感度は予測していない結果であった。また、縦と横の違いのみである平行 0° (縦方向) と平行 90° (横方向) への大きな感度差についても想定外であった。これらの点については別途考察する。

反応時間のデータ (図 4.7B) に示されている通り、この課題は場合によっては 30s 以上かかることもあった。最も探索が容易であった立方体 0°を検出する際にも 10s 以上を要した。目線以外に目標刺激は出てこないことを事前に知らせたにも関わらず、この探索の

間には、実験参加者全員が体全体を回転させて空間内を見渡す、かがんで上を見上げる、下を見るといったように、これまでに記載した実験とは全く異なり、大きな身体動作を行っていた。そもそも目標刺激が、自分が向いている方向とは反対側に出現するといったこともあるため、身体動作を全く行わない実験参加者はいなかった。したがって VR 空間を利用した実験 7 では、探索時に身体動作が加わっていたといえる。

続いて、視線計測を行った実験セッションの結果について記述する。必要な実験参加者数は、事前検定力分析により 15 名以上と算出されたが、視線計測セッションにおけるサンプル数がそこまでは到達しなかった(目標刺激探索の実験セッションへの参加者:16 名、視線計測の実験セッションへの参加者:6 名)。そのため、結果の解釈は Cohen (1988) の基準による効果量の大きさを加味して記述する。

図 4.8 に全実験参加者の VR 空間における視覚探索時の視線プロットを示す。視覚的スパンは基本的には水平方向に広がっているが、大きな身体運動に伴い、上方向や下方向への視線もみられる。図 4.8 では、停留(凝視)が集まっている箇所(画像左寄り)に目標刺激がある。

本研究では、図 1.12 に示したように、試行の進展に伴う視線変化から関与するメカニズムを推定する。図 4.7 に示すように、探索のパフォーマンスは目標刺激の種類に大きく依存することがわかった。そこで、以降記述する画像全体におけるサッカード振幅、そして目標刺激および妨害刺激において設定した AOI に対する視線パターンの解析は、図 4.7 において最も探索が容易であった立方体 0°

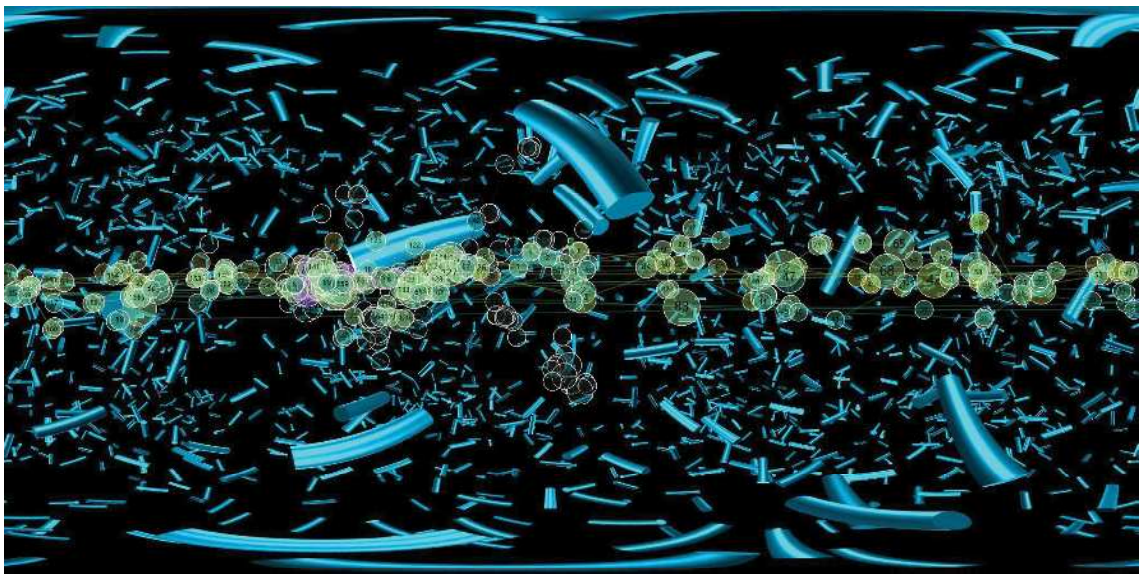


図 4.8 実験 7: VR 空間内における視覚探索時の視線プロット

実験参加者の視線パターンを示す．円の色は実験参加者の違いを示す．各円は，視線一回の停留を示す．一回の停留時間が長くなるほど円のサイズは大きく示される．停留同士をつなぐ線はサッカードを示す．この画像例では，画像左側の視線が多く重なっている箇所に目標刺激が位置する．

と最も探索が困難であった平行 45°に対して行い，比較することとした．

視線パターンがこうした反応時間の傾向を反映しているか確認するために，図 4.9 に AOI として設定した目標刺激への初回停留までの時間を示す．立方体 0°においては，試行の進展に伴い初回停留までの時間が減少する傾向が見てとれる．最初の試行において刺激に対して視線がいくまでには 10s かかっていたが，4 試行目には 2s 程度で視線が目標刺激に到達した．視線がその対象に対して最初に停留するまでの時間と，検出に要する反応時間は必ずしも一致するものではなく，一般には前者の方が速い数値が出る（Holmqvist & Andersson, 2017）．そういった点を加味しても，立方体 0°においては，試行の進展と共に検出のパフォーマンスが急速に上がり，反応が速くなる様子がみてとれる．

平行 45°の場合は，試行の進展に伴う目標刺激への初回停留までの時間が遅くなる傾向にあった．その値は 10s を超えていることから，立方体 0°とは探索難易度が全く異なることがわかる．サンプル数が少ないために，立方体 0°および平行 45°共に一要因分散分析による有意差はみられなかったが，Cohen(1988)の基準による効果量は大きいといえる（立方体 0°： $F(3,12)=1.74, p=.25, \eta_p^2=.30$ ，平行 45°： $F(3,6)=1.58, p=.33, \eta_p^2=.44$ ）．

続いてサッカード振幅および視線一回の停留時間の結果を記す．図 4.10 は，目標刺激が立方体 0°の場合の最終試行の視線プロット（参加者 1 名分）を示している．この試行では，試行開始より 11 回目の視線停留から 12 回目の視線停留（双方を白い矢印で指示）にかけて，サッカード振幅は非常に大きくなった（39.4°）．この 12 回

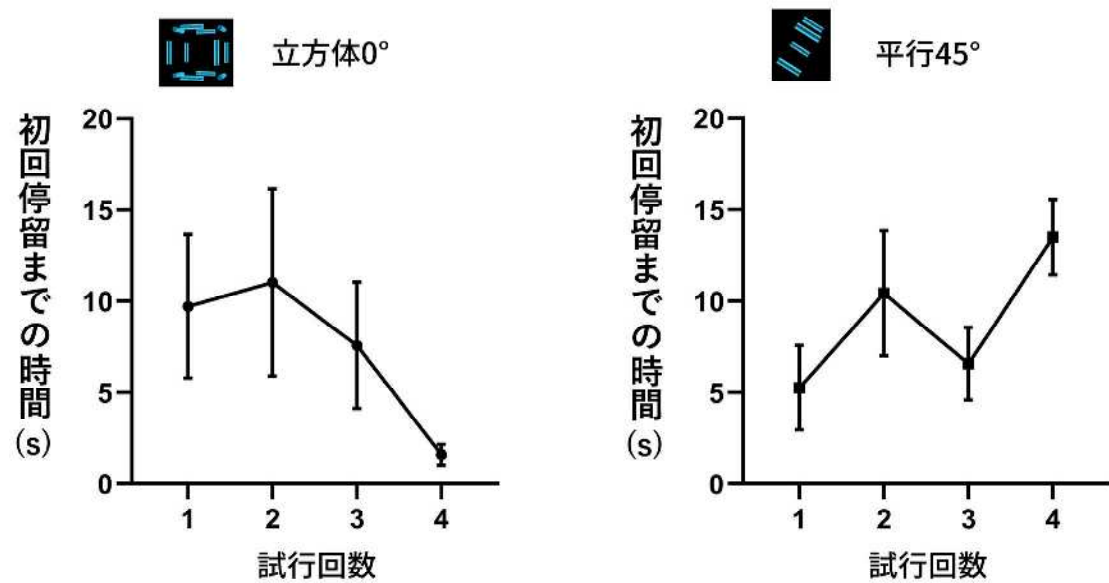


図 4.9 実験 7 の結果： 初回停留までの時間

立方体 0°および平行 45°における目標刺激への初回停留までの時間。縦軸は初回停留までの時間(s)，横軸は試行数を表す。誤差棒は 95%信頼区間を示す。

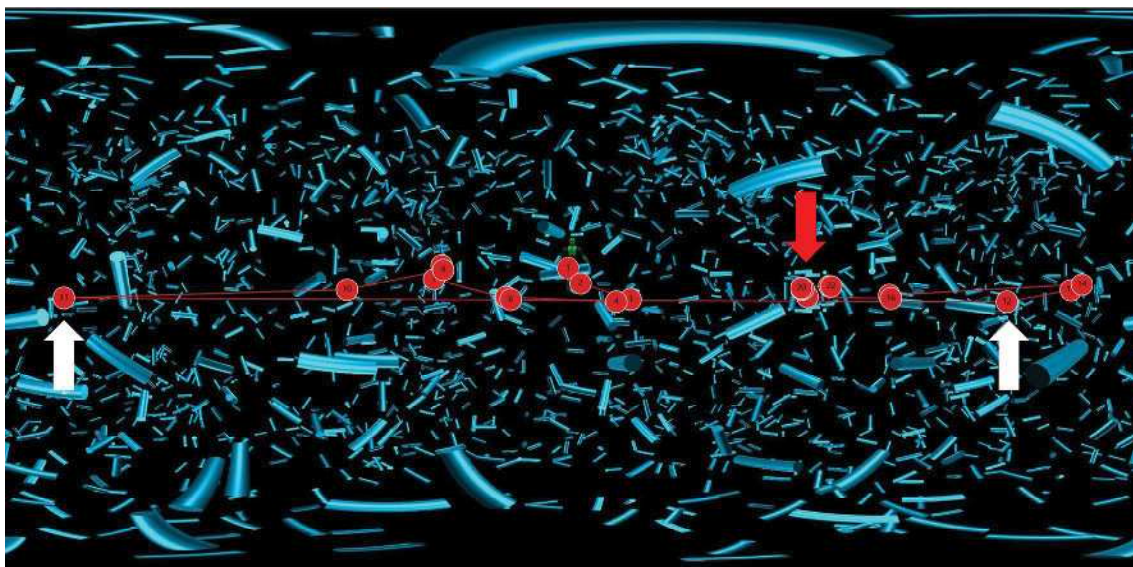


図 4.10 実験 7 の結果：立方体 0° における最終試行の視線プロット
 実験参加者 1 名分の視線プロットを示す．白い矢印は探索が開始されてから 11 回目および 12 回目の視線停留箇所を示している．赤い矢印は目標刺激の位置を示す．

目の視線は，目標刺激付近まで移動しそこで停留している．探索終了までの累計視線停留回数は 22 回であり，目標刺激への初回停留は 20 回目であるが，12 回目における大きなサッカード振幅は探索中盤において既に目標刺激（赤い矢印）が同定されていた可能性を示している．こうした視線の性質は，目標刺激への初回停留時間までの時間が必ずしも反応時間と合致しているわけでもなく，またサッカード振幅はその分散が大きいことも示している．

図 4.11 に試行進展に伴うサッカード振幅の変化を示す．どちらもグラフより，立方体 0° および平行 45° 共に，試行回数が 4 回になると，サッカード振幅が 0.5° 程度増加する傾向がみられる．こうした増加は，図 4.10 に示したように，試行を経るごとにターゲットに向かうサッカード振幅が増加するという特徴を示している．試行に伴う振幅の有意差はみられなかったが，とくに立方体 0° における効果量は大きいといえる．（立方体 0° : $F(3,9)=1.16, p=.35, \eta_p^2=.28$, 平行 45° : $F(3,15)=.22, p=.80, \eta_p^2=.04$ ）．

図 4.12 に目標刺激および妨害刺激に対する視線一回の停留時間の結果を示す．立方体 0° には，試行の進展に伴い，目標刺激と妨害刺激双方に対して，視線一回の停留時間が減少する傾向が見てとれる．目標刺激，妨害刺激の双方において，1 試行目と比較して 4 試行目には 0.02s 程度停留時間が短くなった．一方で，平行 45° には，目標刺激および妨害刺激において一貫した視線パターンの変容はみられなかった．一要因分散分析によると目標刺激では有意差はみられず（立方体 0° : $F(3,12)=.73, p=.50, \eta_p^2=.15$, 平行 45° : $F(3,6)=1.71, p=.32, \eta_p^2=.46$ ），また妨害刺激においても有意差はみられなかった（立方体 0° : $F(3,9)=1.71, p=.24, \eta_p^2=.18$, 平行 45° : $F(3,15)=.14, p=.88$,

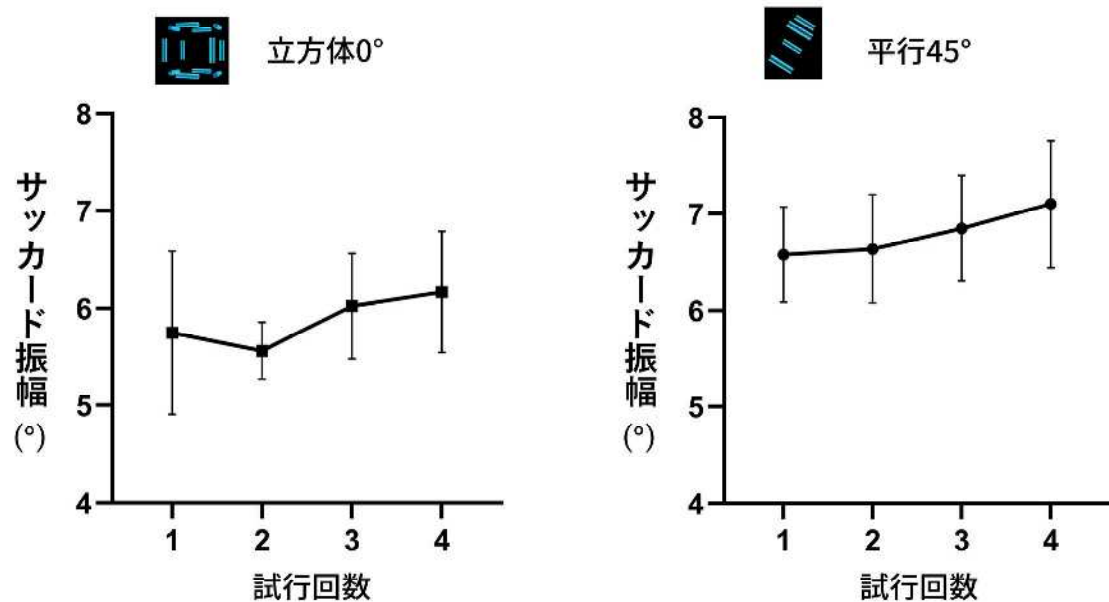


図 4.11 実験 7 の結果： サッカード振幅

立方体 0°および平行 45°におけるサッカード振幅．縦軸はサッカード振幅 (°)，横軸は試行数を表す．誤差棒は 95%信頼区間を示す．

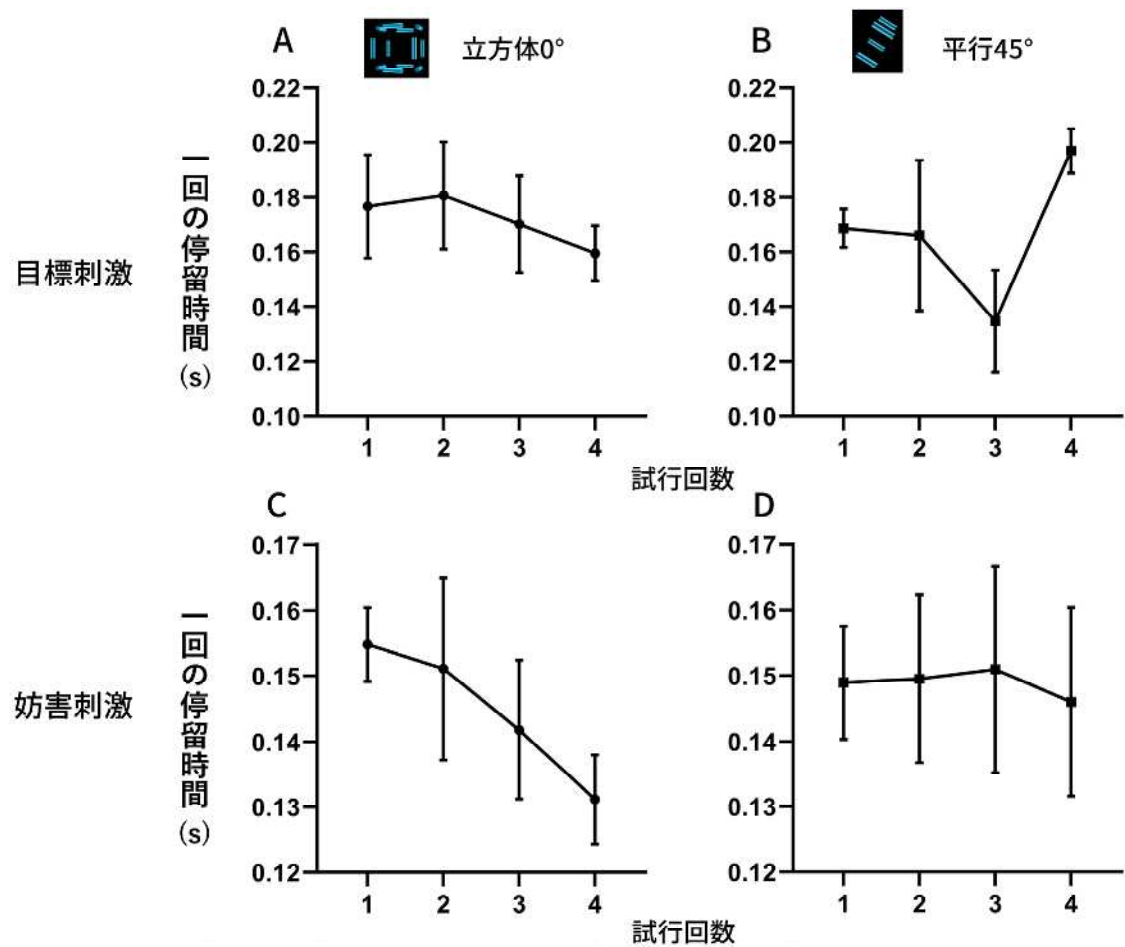


図 4.12 実験 7 の結果：視線一回の停留時間

立方体 0°および平行 45°における目標刺激および妨害刺激に対する視線一回の停留時間. 縦軸は一回の停留時間(s), 横軸は試行数を表す. 誤差棒は 95%信頼区間を示す.

$\eta_p^2=.02$) が, Cohen (1988) の基準によると, 目標刺激および妨害刺激双方に対する立方体 0° の効果量, および目標刺激に対する平行 45° の効果量は大きいといえる.

4.3 第 4 章：考察

4.3.1 視線パターンの傾向と探索のメカニズム

第 4 章では，視覚探索行動における身体動作の効果を検討するために仮想現実空間内において視覚探索課題を行い，課題遂行時の視線を計測した．その結果，試行の進展により探索のパフォーマンスが向上する傾向がみられた．そして高いパフォーマンスがみられた目標刺激（立方体 0°）に対する視線パターンには，サッカード振幅が増加し（図 4.11），視線一回の停留時間が減少する傾向（図 4.12）がみられた．先述した通り，視線計測を行った実験セッションではサンプルサイズ設計の問題が解決されていない．そのため，ここで得られた結果は，あくまでも傾向という程度の記述にとどめる．この点については今後実験を継続し，最終的な結論を出す予定である．

図 4.11, 4.12 でみられた視線パターンの変容傾向は，長期の訓練を経たエキスパートの画像理解時にみられる視線パターンの変容（Gegenfurtner et al., 2011; Sheridan & Reingold, 2017）と一貫する．つまり，身体動作を伴う探索行動の視覚メカニズムは長期の学習によるそれと類似しており，視覚メカニズムとしては，探索のパフォーマンス向上には画像の全体的処理の促進を含む選択的注意の精緻化（表 1.1）が土台となっていると考えられる．Gegenfurtner ら（2011）は，サッカード振幅の増加と合わせて，目標刺激までの初回停留時間の短縮化が見られた場合，視覚的スパンが拡大しており，画像の全体処理（Kundel et al., 2007）の促進の度合いが強化されていると指摘している．この指摘と合致するように，最も高いパフォーマンスを示した立方体 0°では，データの傾向として，試行の進展

に伴うサッカード振幅の増加傾向および目標刺激への初回停留までの時間の減少傾向が一貫してみられた。実験 7 で用いた刺激は、妨害刺激の配置が毎回ランダムであったために（図 4.2）、地下鉄路線図のように文脈を記憶することの利点はない。そのために、視線一回の停留時間の増加により示唆される記憶メカニズムの関与がみられなかったことは、探索課題の方略としては効率的であったといえる。

VR 空間内に構築した CG のリビングルーム内を探索させた場合、オブジェクトは多くの場合記憶されていないという実験結果もあり、身体動作は記憶メカニズムの作動を妨げる可能性も指摘されている（Kit et al., 2014）。身体動作時に記憶が形成されにくいという可能性は、実験 3（手の動作を加えた場合の路線図探索）からも示唆される。

4.3.2 VR 空間における周辺視の効果

4 回の試行という、きわめて短時間の間に視線特性が変容するという可能性がみられた。短時間の経験による視線変容は、6 試行で学習がほぼ完了した実験 1 における地下鉄路線図の場合と合致する。実験 7 における視線変容の特性が、長期間の訓練による視線変容と類似しているということは、視線の特性が長期短期に関わらず学習そのものによるパフォーマンスの変容と結びついていることを示している。

VR 空間内の場合、先行研究によると中心視野を制限しても効率的な視覚探索が可能である（David et al., 2021）。また Chun & Jiang (1998) が示した文脈手がかり（文脈内容を潜在的に記憶し、それを

探索時の手がかりとすること)を、より広い視野内で用いることができる (Marek & Pollmann, 2020). こうした周辺視の重要性は、2次元平面における視覚探索実験では見逃されてきた. VR空間における周辺視の活用は、実験7でみられた大きなサッカード振幅や、目標刺激を周辺視でとらえていると考えられる視線パターンの傾向(図4.10)に現れている. 実験7の結果は、これまでに知られているVR空間における視覚探索の特徴と一貫しており、またそこから、現実世界における探索活動は周辺視への依存度が高いことが示唆される (Haider & Frensch, 1999).

4.3.3 縦方向の優位性

ところで、各目標刺激への正答率(図4.7A)からは、垂直に配置された目標刺激(平行0°)は、元の形状(立方体0°)と同等の感度の高さを示すという、難易度の観点からは予測に反した結果が得られた. さらに、この平行0°の刺激に比較して、平行水平(90°)や斜め(45°)への感度は非常に低いという強い異方性が現れた(図4.7A). 2次元平面上では、垂直/水平線分は45°線分よりも検出・弁別が容易であるという「斜め効果(oblique effect)」(Heeley et al., 1997)がよく知られているが、垂直線に対してのみ感度が高いという実験7の結果は、この斜め効果と合致しない. 2次元平面上における垂直線/水平線に対する感度が斜め線よりも高いという斜め効果は、重力などの環境要因に基づく方位(環境中心座標系, spatiotopic coordinate)および網膜情報に基づく方位(網膜中心座標系, retinotopic coordinate)の双方に由来する (Mikellidou et al., 2015). VR空間では、身体動作が可能であり、実際に体を大きく動かしな

から探索する実験参加者がほとんどであった。体を動かしている場合、網膜中心座標系では平行 0° 刺激は必ずしも垂直な刺激にはならない。網膜上では、頭部や体の方向に基づいて、刺激の方位はいかようにでも変わるからである。その一方で、環境中心座標系から考えれば、平行 0° 刺激は地面（つまり重力方向）に対して常に垂直であり、それは体や頭の動きには依存しない。そのため、大きな身体動作が生じた実験 7 において、平行 0° に対して常に感度が高かったという結果は、環境中心座標系における垂直方向、すなわち重力由来の方向に感度が高いことを意味する。

ビルなどの人工的な造形物では垂直構造は顕著ではあるが、自然界においても、例えば森林の木々やヒトの立ち姿など、重力由来の垂直構造は特徴的である。このことから、環境中心座標系における垂直構造というテンプレートがすでに脳内表象として存在している可能性が示唆される。視線一回の停留時間が試行の進展に伴い増加しなかったことは、目標刺激や妨害刺激を積極的に記憶するメカニズムが働いていなかったことを示しているが、この点もあらかじめテンプレートが存在し、それが探索に利用されたという仮説と合致している。VR により現実世界における類似した探索（つまり身体動作を含めた探索）を再現した時には、現実世界における情報の偏りに基づいたテンプレートの存在が、目標刺激への検出感度の違いとして現れたのかもしれない。身体動作を制限した上で 2 次元平面上において観察される斜め効果と、実験 7 でみられた環境中心座標系における垂直優位性は、身体動作の有無の効果を表しているといえる。

抽象的な視覚刺激から明らかにできることには限界がある。今後

は現実的な場면을 VR 空間および 2 次元平面上に提示して比較検討する必要があるが，その際には，身体動作の定量的な記述と形状への感度との関係を調べることを重要であると考える．

第 5 章 総合考察

5.1 結果のまとめ

本研究は、現実世界で目にする視覚刺激や風景における文脈が鍵となる探索行動のメカニズムを実験心理学的手法により解明することを目的とした。主となる方法は、図 1.12 に記したように、学習や経験に基づく視線パターンの変容から、関与する視覚メカニズム（表 1.1）を推定するというものであった。それぞれの実験結果は各章で記述した通りであるが、本章ではそれらを包括して考察する。

表 5.1 には、表 1.2 に記した内容の再掲に加えて、得られた実験結果およびそこから推測される視覚メカニズムについて追記した。現実世界における探索行動の特徴とメカニズムに関して得られた知見をまとめると、

- (1) 文脈に応じた全体的処理メカニズムと記憶メカニズムの関与
- (2) 身体動作時の記憶メカニズムの抑制
- (3) 環境中心座標系に基づくテンプレートの存在
- (4) 短時間の学習による視線の変容

この 4 点になる。ここで特に重要と考えられる点は (1) と (2) であり、現実世界の構造を反映する文脈は、視覚探索に関わる二

表 5.1 各実験の特徴

	実験	視覚刺激	文脈	学習	身体動作	視線の指標	サッカード振幅	一回の停留時間	メカニズム
第2章 地下鉄路線図における 視覚探索	1	オリジナル路線図	固定	試行を繰り返す	顎台で頭部固定	サッカード振幅 一回の停留時間	無変化	増	文脈を記憶し テンプレートを構築
	2	オリジナル路線図		実験1から 1週間後に実施			無変化	1週間前より増	文脈を長期的に記憶し テンプレートを構築
	3	白黒加工路線図		試行を繰り返す			無変化	増	文脈を記憶し テンプレートを構築
	4	オリジナル路線図			手の動作 (マウス操作)		増	無変化	画像の全体的処理
第3章 運転場面における 視覚探索	5	運転場面：静止画像	変動	運転経験の有無	顎台で頭部固定	サッカード振幅 一回の停留時間	増	無変化	画像の全体的処理
	6	運転場面：動画像					無変化	無変化	2年程度の運転経験は 影響しない
第4章 仮想現実空間における 視覚探索	7	立方体とそのパーツ (VR)	ランダム (通常の視覚探索)	試行を繰り返す	身体動作自由 (仮想現実空間)	サッカード振幅 一回の停留時間	増	減	画像の全体的処理 注意の精緻化 直感成分に対するテンプレート

つのメカニズム（全体的処理と記憶）をスイッチさせること（図5.1），そして身体動作の有無はそうしたメカニズムのスイッチに大きな影響を及ぼす点が見いだされたことにある．

X線写真からの病変の探索や海洋における魚影の探索といった専門的活動において，文脈の重要性が報告されている．たとえば同じ病変や魚影の画像であっても，それが全く違う文脈（画像）の中に埋め込まれた場合には，専門家といえどもそれを検出することができなくなる（Eckstein, 2011）．つまり専門家は，長年の訓練により，目標刺激が存在する空間全体を効率的に処理するメカニズムを構築し，課題遂行にあたってはそれを機能させている．一方で本研究から，効率的な全体的処理が文脈効果の全てではないことがわかった．旅先における初見の地図のように，その文脈（固定された地図情報）に対して経験はないが，できるだけ早くそれを利用できるようになりたい場合には，まず記憶メカニズムが働く方が効率的であろう．視覚探索における記憶機能は，探索を成功に導くテンプレートの構築をもたらす（Grubert & Eimer, 2018, Wolfe, 2020）．地下鉄路線図の実験で示したように，視線の停留時間が増加し，かつパフォーマンスが一週間後も保たれるという結果は，長期記憶において保持されるのはそうしたテンプレートであることを示している．その一方で，運転場面のように刻一刻と周囲の状況が変わり，今現在と完全に同じ状況は将来にわたって決して現れない場合，その時点でのテンプレートが構築され長期記憶に転送されると，探索の柔軟性が失われる可能性がある．視線パターン計測の結果からは，状況が変化しうる場面では，記憶メカニズムよりは画面の全体的処理の精緻化・高速化が優先

場面の
全体的処理の高速化



記憶による
テンプレートの構築

図 5.1 結果のまとめ：現実世界の視覚探索における
二つのメカニズムの関与

される方が効率的であり、実際に実験の結果はそれを示している。

(3) で記したテンプレートは課題遂行中に構築されるばかりではなく、実験 7 のようにあらかじめ長期記憶に存在する場合もありうる。

ここで指摘すべき点として、画像の全体的処理のメカニズムと画像の文脈に関する記憶メカニズムはそもそも排他的な関係にはないということである。これまでの視覚探索に関する研究から、視覚探索において記憶、とくに短期記憶やワーキングメモリの効果が高いことが知られている。短期的な記憶の効果として、復帰抑制 (Klein, 2000) が挙げられる。復帰抑制では、すでに探索した空間箇所と同じ箇所へ注意が再定位されることを記憶により防いでいる。視覚的印付け (Watson & Humphreys, 1997) では、妨害刺激が記憶されることにより、目標刺激以外への注意が抑制される。あるいはポップアウトのプライミング (Maljkovic & Nakayama, 1994) と呼ばれる現象では、目標刺激の特徴に関する記憶が探索のパフォーマンスを向上させる。第 1 章で記した文脈手がかり効果 (Chun & Jiang, 1998) では、目標刺激と妨害刺激との関係性が、長期的潜在的な記憶として徐々に構築されることにより探索が効率的に行われるようになる。

本研究においては、身体動作がない時の地下鉄路線図探索時は、短期記憶やワーキングメモリではなく長期記憶の関与を示す視線パターンが得られたが、探索時に身体動作をさせた場合には、画面の全体的処理を示唆するように視線パターンが変化し、身体動作を伴う VR 空間における探索課題でも同様の傾向がみられた。

(2) に挙げたように、身体動作がなぜ記憶メカニズムを抑制す

る傾向にあるのか，その理由は現時点では不明である．一つの可能性としては，視覚的記憶の構築には脳活動のリソースを取るために，身体を使う場合には，その身体動作が視覚的記憶の役割を担っている可能性がある．路線図で言えば，比較的複雑である路線の形状を視覚的に記憶するよりは，なぞるという動作により形状を身体的に記憶しているのかもしれない．先に，VR環境において身体動作を伴う理科学習（Jee et al., 2018）の効用について記したが，その土台となるメカニズムは視覚探索と共通である可能性もある．

（４）に，学習による視線特性の変容は非常に速いという点を挙げた．本研究における視線解析の土台となっているメタ分析（Gegenfurtner et al., 2011; Sheridan & Reingold, 2017）では，数年の訓練を経た専門家の画像理解における視線変容を扱っている．しかしながら，実験 1, 3, 7（表 5.1）から得られた視線の特徴として，その特性変容がごく短時間（数回の試行内）に生じたことが挙げられる．その変化は長期的に保持されている可能性が実験 2 から示唆されている．また実験 7 では，長期間の訓練に基づく視線変容と，数回の試行に基づく視線変容が，見かけ上は一貫しているという結果が得られている．これらの点は，視線パターンの変容は長期の訓練に基づく結果であるとする先行研究によるメタ分析の前提を崩す可能性があり，今後のさらなる検討が必要である．

5.2 今後の検討課題と展望

今後検討すべき課題について、本研究が焦点を当てた視覚探索行動における鍵となる要因である（１）文脈，（２）学習，（３）身体動作に基づいて論じる．まず，一点目は文脈についてである．Gegenfurtner ら（2011）がエキスパートの画像理解を明らかにするために行ったメタ分析は，医療，スポーツ，科学捜査や地図などの多種多様な専門領域に対して行われたが，私たちの日常に密接な文脈は交通以外にも，教育や労働など多岐にわたる．これらの文脈における探索行動を検討することにより，視覚メカニズムが解明されるだけでなく，教育方法の効率性や作業の安全性への貢献につながると考える．

二点目は学習についてである．「日常における探索行動」を広義に捉えると，発達のとても早い段階から始まっていることに気づく．両親が見当たらず泣く，好きな玩具を探すなど，幼いころからあらゆる認知活動が探索行動と結びついている．文脈効果を含む視覚探索と発達の関連を検討した実験より，月齢 6 か月児および 10 か月児の双方において文脈手がかり効果がみられている（Tummeltshammer & Amso, 2018）．また，Kwon ら（2016）は，乳児の月齢が上がるとともに，段階的に刺激の顕著性に注意が誘導されることなく目標刺激への注視が可能になることを実験的に示した．本研究の実験 7 からは，環境中心座標系における垂直成分に対するテンプレートが既に獲得されている可能性が示唆された．例えばこうしたテンプレートは発達段階で獲得されるものなのだろうか？ 発達という生涯にわたる学習により，視線パタ

ーンおよび視覚メカニズムはどのように変容するのか？この点の解明も現実世界の視覚探索行動の理解に向けて重要な課題となる。

三点目は身体動作についてである。第3章における運転場面は、本研究で扱った文脈の中では身体動作の効果を検討すべき対象であったが、技術的な問題により運転経験の効果を検討するにとどまった。実験6における運転場面の動画像を用いた視覚探索課題において、経験による視線パターンの変容に一貫した傾向がみられなかったことは、運転経験歴の問題というよりは、課題そのものが容易であったことが影響しているかもしれない。危険が出現することを事前に知っていたため、ゲーム感覚で刺激を観察していた可能性がある。本格的なドライビングシミュレータでなくとも簡易的なハンドルのようなものを持たせ、身体動作を付加した場合に経験の効果が生じるか、という問題を今後考えるべきである。また、現実世界における探索行動の理解には、今回算出した正答率、反応時間、視線パターンといった指標だけでは不十分であるかもしれない。注意がどのように誘導されるのか（Wolfe, 2020）という点を、動作解析からアプローチすることもできるだろう。探索時の身体や頭部の動きを上記の指標と合わせて解析することにより、身体動作の意味がより深く理解できるであろう。

5.3 神経生理学的側面

現実場面の視覚探索を理解する上では、その神経生理学的側面の解明が不可欠となる。そこで本項では、関連する神経生理学的研究を概観した上で、実験心理学的手法に基づいた本研究から提言できる点について述べる。本研究のテーマである現実場面の視覚探索では、生体に関する複数の機能の複合としての行動を扱っている。それらは、オブジェクトの知覚、場面（シーン）の認識、視覚探索、眼球運動、記憶、経験と学習、身体運動であり、それぞれに関して膨大な神経科学的知見が蓄積されてきている。そうした知見を合わせると、現実場面の視覚探索は、広範な脳活動に支えられた、神経生理学的にきわめて複雑な行動であると言える。

現実場面の視覚探索では文脈の処理が重要である。そのために、オブジェクト認識に関わる高次視覚メカニズムを支える後頭側頭葉（occipitotemporal cortex）や外側後頭葉（lateral occipital cortex）、探索行動の判断に関わる内側前頭前野（medial prefrontal cortex）に加えて、情景の認識や理解に関わる海馬傍回場所領域（parahippocampal place area）、脳梁膨大後部皮質（retrosplenial cortex）、横後頭溝（transverse occipital sulcus）などが機能している（Peelen & Kastner, 2011, 2014; Eimer, 2014）。

眼球運動の土台となる神経メカニズムは視覚的注意により変調されることがよく知られている。眼球の位置と目標刺激の位置に関する情報を元にして、前頭眼野（frontal eye field）において運動指令が作られ、その信号が上丘や脳幹を通してサッカードが生成される。サッカードの学習には目標刺激とサッカードの位置

のずれを修正する信号が必要であるが、その生成には小脳が関与している (Liversedge et al., 2011). 前頭眼野の反応を抑制すると視覚探索のパフォーマンスが落ちることから、眼球運動の精度は視覚探索のパフォーマンスを左右するという関係にあるといえる (Moore & Fallah, 2001). 本研究でもみられたサッカード振幅の変化は、大脳や小脳を含む広範囲の脳活動の結果である。

身体運動においても、脳内のさまざまな部位が機能する。大脳では身体運動に関与する部位は一次運動野 (primary motor cortex), 運動前野 (premotor cortex), 補足運動野 (supplementary motor cortex) などがあるが、運動の修正には小脳の役割が大きい (Gazzaniga & Mangun, 2014). 身体運動を伴う視覚探索においては、運動に関連した脳内部位の神経回路網が、視覚探索や記憶を担う神経回路網と協調的に機能する必要がある。

神経生理学的メカニズムに関するモデルの構築は本研究の範囲を超えてはいるが、そうしたモデルを考える上で有用と考えられる知見として、視覚探索と長期記憶との関係が挙げられる。視覚探索のパフォーマンスに対する短期記憶、特にワーキングメモリの影響については、先に紹介したようにさまざまな現象が報告されており、両者には密接な関係があることがわかっている (Bundesen, 1990; Duncan & Humphreys, 1989; Woodman & Luck, 2004). ワーキングメモリのおもな責任部位である前頭前野背外側領域 (dorsolateral prefrontal cortex) や前頭前野腹外側領域 (ventrolateral prefrontal cortex) (D'Esposito et al., 1995) における神経回路網は、先に記した視覚探索に関連した神経回路網と相互作用している。一方で、長期記憶である宣言的記憶のおもな責任

部位は、内側側頭葉（medial temporal lobe）にある記憶システムである（Raslau et al., 2015）。海馬傍皮質（parahippocampal cortex）、嗅内皮質（entorhinal cortex）、あるいは嗅周皮質（perirhinal cortex）といった部位と海馬との間の情報処理が記憶を形成していく。Chun & Jiang (2003) は視覚刺激として T と L（図 1.5）を使用して文脈手がかり効果を検討し、学習の一週間後も文脈手がかり効果がみられることを発見した。本研究の実験 1, 2 から路線図という文脈がわずか数回の試行により長期記憶として固定化され、それが一週間後も利用できることがわかった。視覚探索課題においては、ワーキングメモリのみならず、長期記憶において保持される情報が効率的に利用されるという知見（Woodman & Chun, 2006）と合わせて考えると、視覚探索の神経メカニズムを検討する上では長期記憶の神経メカニズムをも含む必要があるといえる。本研究の結果は、視覚探索課題を行うことにより、長期記憶の固定化がより促進される可能性を示唆しており、今後の研究に向けた問題提起となりうる。また、視覚探索時に身体動作を行うと内側側頭葉の記憶メカニズムの活性化が弱まる可能性もあり、興味深い検討課題であるといえる。

5.4 最後に：視覚探索研究の課題

最後に，昨今の視覚探索研究との関連について考察する．注意が何に対してどのように誘導されるか，その解明が視覚探索の課題となる（Wolfe, 2020）．Treisman らによる視覚探索研究では，注意の対象は特徴地図（feature map）として定義された．特徴地図における値は視覚刺激の持つ属性の特徴に基づいてボトムアップ的に計算され，顕著性地図（saliency map）として表現される．その後の研究の進展から，顕著性地図だけでは現実世界の情景における視覚探索の理解には不十分であることがわかってきた．ここで必要なのは，それぞれの視覚刺激が観察者に対して持つ「意味」である．例えば，ある刺激における視覚属性がいくら際立っていたとしても（例えば周囲と比較して際だって明るい，など），それが探索の目標でなければ，その視覚属性は探索に有用ではない．そこで現実世界における刺激（オブジェクト）が，探索者にとって持つ意味（重要性，親密性，既知性など）を数値化した意味地図（meaning map）が提案された（Hayes & Henderson, 2019; Henderson & Hayes, 2018）．繁華街の写真（図 1.3）が示すように，顕著性地図と意味地図は必ずしも重なるわけではなく，この点が視覚探索の理解を困難にしている．顕著性地図は自動的に作成することが可能であり，そうしたモデルはいくつも提案されている．しかし，意味地図は視覚属性に依存しないが故に場面によって変わり，観察者の意図や目的によっても変わりうる．また，現実世界におけるオブジェクトはランダムな位置に現れるわけではなく，「あるべき位置にある」ことが一般的であることから，

視覚探索の理解には、文脈という観点が重要になる。意味地図と文脈は密接な関係にある（Henderson & Hayes, 2018）。本研究が文脈に注目した理由はこうした問題意識にもある。Chun and Jiang（1998）は単純図形を用いて、文脈の存在が視覚探索を速めることを実験的に示している。このような文脈効果は、別の言い方をすれば、現実世界の情景が文脈として機能し注意が誘導されることを示している（Wolfe, 2020）。今後の視覚探索研究では、現実世界における文脈が顕著性地図や意味地図とどのように関係しあうかを理解した上で、注意がどのように目標へと誘導されるかを解明することが重要になる。現実世界には、本研究で検討した交通関連（路線図、運転場面）以外にもさまざまな文脈が存在し、それらはさまざまな意味を持っている。各文脈における探索の様相を検討し、それらの知見を統合することは、現実世界における視覚探索のメカニズムの理解につながると考えられる。

謝 辞

本研究の遂行、学位論文の執筆にあたり、多くの方々にお世話になりました。この場を借りて、感謝の意を申し上げます。

指導教員の竹内龍人教授には、学部3年の時にゼミに所属してから今まで、研究に必要なことをご教授いただきました。国内外における学会発表や学術論文執筆など、大学院進学直後より様々なことに挑戦させていただき、全てが経験値、研究内容を向上させる貴重な機会となりました。本当にありがとうございました。

論文審査におきましては、藤崎和香教授（日本女子大学人間社会学部心理学科）、伊村知子准教授（日本女子大学人間社会学部心理学科）、今井久登教授（学習院大学文学部心理学科）、木村昭悟先生（NTT コミュニケーション科学基礎研究所メディア情報研究部部長）より、丁寧なご指摘、ご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

また、本研究は多くの方々の実験協力のもと完成させることができました。特に心理学専攻の院生および竹内ゼミの学部3、4年生には、度々実験に協力していただきました。ありがとうございました。

本研究の一部は、独立行政法人日本学術振興会 科学研究費補助金（特別研究員奨励費）、日本女子大学大学院学生特別研究奨励金により実施されました。ここに記して感謝の意を表します。

最後に、いつも応援してくれた家族に深い感謝の意を表して謝辞といたします。

引用文献

- Assaf, D., Amar, E., Marwan, N., Neuman, Y., Salai, M., & Rath, E. (2016). Dynamic patterns of expertise: the case of orthopedic medical diagnosis. *PLOS ONE*, **11**: e0158820.
- Bahill, A. T., Clark, M. R. & Stark, L. (1975). The main sequence, a tool for studying human eye movements. *Mathematical Biosciences*, **24**, 191-204.
- Biederman, I., Mezzanotte, R. J. & Rabinowitz, J. C. (1982). Scene perception: Detecting and judging objects undergoing relational violations. *Cognitive Psychology*, **14**, 143-177.
- Biederman, I. (1987). Recognition-by-components: a theory of human image understanding. *Psychological Review*, **94**(2), 115-147.
- Bonnet, C. T., Davin, T., & Baudry, S. (2019). Interaction between eye and body movements to perform visual tasks in upright stance. *Human Movement Science*, **68**:102541.
- Bundesen, C. (1990). A theory of visual attention. *Psychological Review*, **97**(4), 523–547.
- Carrasco, M. (2011). Visual attention: The past 25 years. *Vision Research*, **51**, 1484-1525.
- Castelhano, M. S., Mack, M. L., & Henderson, J. M. (2009). Viewing task influences eye movement control during active scene perception. *Journal of Vision*, **9**(3), 1-15.
- Charness, N., Reingold, E. M., Pomplun, M. (2001). The perceptual aspect of skilled performance in chess: Evidence from eye movements.

- Memory & Cognition*, **29**, 1146–1152.
- Chun, M. M. (2000). Contextual cuing of visual attention. *Trends in Cognitive Sciences*, **4**, 170-178.
- Chun, M. M. & Jiang, Y. (1998). Contextual cueing: Implicit learning and memory of visual context guides spatial attention. *Cognitive Psychology*. **36**, 28-71.
- Chun, M. M. & Jiang, Y. (2003). Implicit, long-term spatial contextual memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, **29**(2), 224-234.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 2nd ed. Lawrence Erlbaum, NJ. Hillsdale.
- Collewyn, H., Erkelens, C. J. & Steinman, R. M. (1988). Binocular coordination of human vertical saccadic eye movements. *The Journal of Physiology*, **404**, 183-197.
- David, E. J., Beitner, J. & Vö, M. L. (2021). The importance of peripheral vision when searching 3D real-world scenes: A gaze-contingent study in virtual reality. *Journal of Vision*. **21**(7):3, 1-17.
- D'Esposito, M., Detre, J. A., Alsop, D. C., Shin, R. K., Atlas, S., & Grossman, M. (1995). The neural basis of the central executive system of working memory. *Nature*, **16**:378(6554), 279-81.
- Donovon, T., & Litchfield, D. (2013). Looking for cancer: Expertise related differences in searching and decision making. *Applied Cognitive Psychology*, **27**, 43–49.
- Dosher, B., & Lu, Z. L. (2017). Visual perceptual learning and models. *Annual Review of Vision Science*. **15**:3, 343-363.

- Duncan, J., & Humphreys, G. W. (1989). Visual search and stimulus similarity. *Psychological Review*, **96**(3), 433–458.
- Eckstein, M. (2011). Visual search: A retrospective. *Journal of Vision*, **11**(5):14, 1-36.
- Eimer, M. (2014). The neural basis of attentional control in visual search. *Trends in Cognitive Sciences*, **18**(10), 526-535.
- Ericsson, K. A., Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review*, **102**, 211-245.
- Gazzaniga, M. S., & Mangun, G. (Eds) (2014). *The Cognitive Neurosciences*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Gegenfurtner, A., Lehtinen, E., & Säljö, R. (2011). Expertise differences in the comprehension of visualizations: A meta-analysis of eye-tracking research in professional domains. *Educational Psychology Review*, **23**, 523-552.
- Goldstone, R. L. (1998). Perceptual learning. *Annual Review of Psychology*, **49**, 585-612.
- Grubert, A. & Eimer, M. (2018). The time course of target template activation processes during preparation for visual search. *Journal of Neuroscience*, **38**(44), 9527-9538.
- Haider, H., & Frensch, P. A. (1999). Eye movement during skill acquisition: More evidence for information reduction hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, **25**, 172-190.
- Hayes, T. R. & Henderson, J. M. (2019). Scene semantics involuntarily guide attention during visual search. *Psychonomic Bulletin and*

Review, **26**, 1683-1689.

Heeley, D. W., Buchanan-Smith, H. M., Cromwell, J. A. & Wright, J. S. (1997). The oblique effect in orientation acuity. *Vision Research*, **37**, 235-242.

Henderson, J. M. & Hayes, T. R. (2018). Meaning guides attention in real-world scene images: Evidence from eye movements and meaning maps. *Journal of Vision*, **18**(6):10, 1-10.

Henderson, J. M., Weeks, P. A., Jr., & Hollingworth, A. (1999). The effects of semantic consistency on eye movements during complex scene viewing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **25**(1), 210–228.

Hollingworth, A., Williams, C. C., & Henderson, J. M. (2001). To see and remember: Visually specific information is retained in memory from previously attended objects in natural scenes. *Psychonomic Bulletin & Review*. **8**(4), 761-768.

Holmqvist, K., & Andersson, R. (2017). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods paradigms and measures*, Lund, Sweden: Lund Eye-Tracking Research Institute.

Husnain, M., Rakotonirainy, A., & Frederic, M. D. (2010). Comprehensive evaluation of driver gaze pattern using fuzzy rules for driver training. *Proceedings of 20th Canadian Multidisciplinary Road Safety Conference*, 6-9 June 2010, Hilton Niagara Falls, Ontario.

Itti, L., Koch, C. & Neibur, E. (1998). A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **20**, **11**, 1254-1259.

- 伊藤政市・渋川侃二 (1954). 自動車を制御する際の空走時間の測定結果. 日本機械学会誌, **57**(424), 311-316.
- Jee, B. D., & Anggoro, F. K. (2018). Relational scaffolding enhances children's understanding of scientific models. *Psychological Science*, **30**, 1287-1302.
- Kit, D., Katz, L., Sullivan, B., Snyder, K., Ballard, D. & Hayhoe, M. (2014). Eye movements, visual search and scene memory, in an immersive virtual environment. *PLOS ONE*, **9**(4): e94632.
- Klein, R. M. (2000). Inhibition of return. *Trends in Cognitive Sciences*, **4**(4), 138-147.
- Kontra, C., Lyons, D. J., Fischer, S. M., & Beilock, S. L. (2005). Physical experience enhances science learning. *Psychological Science*. **26**, 737-749.
- 子安増生・丹野義彦・箱田裕司 (2021). 有斐閣現代心理学辞典 有斐閣.
- Krupinski, A. E., Graham, R. A., & Weinstein, S. R. (2013). Characterizing the development of visual search expertise in pathology residents viewing whole slide images. *Human Pathology*, **44**, 357-364.
- Kundel, H. L., Nodine, C. F., Conant, E. F. & Weinstein, S. P. (2007). Holistic component of image perception in mammogram interpretation: Gaze-tracking study. *Radiology*, **242**, 396-402.
- Kundel, H. L., Nodine, C. F., & Toto, L. C. (1991). Searching for lung nodules: The guidance of visual scanning. *Investigative Radiology*, **26**(9), 777-781.
- Kwon, M.-K., Setoodehnia, M., Baek, J., Luck, S. J., & Oakes, L. M.

- (2016). The development of visual search in infancy: Attention to faces versus salience. *Developmental Psychology*, **52**(4), 537–555.
- Lindgren, R., Tscholl, M., Wang, S. & Johnson, E. (2016). Enhancing learning and engagement through embodied interaction within mixed reality simulation. *Computers & Education*. **95**, 174-187.
- Liversedge, S. P., Gilchrist, I. D., & Everling, S. (Eds.) (2011). *The Oxford Handbook of Eye Movements*. Oxford: Oxford University Press.
- 牧下寛・松永勝也 (2002). 自動車運転中の突然の危険に対する制動反応の時間. 人間工学, **38**(6), 324-332.
- Maljkovic, V. & Nakayama, K. (1994). Priming of pop-out: I. Role of features. *Memory & Cognition*, **22**, 657-672.
- Marek, N. & Pollmann, S. (2020). Contextual-cuing beyond the initial field of view—A virtual reality experiment. *Brain Sciences*, **10**, 446, 1-9.
- Marr, D. & Nishihara, H. K. (1978). Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes. *Proceedings of the Royal Society of London B*. **200**, 269-294.
- Mikellidou, K., Cicchini, G. M., Thompson, P. & Burr, D. (2015). The oblique effect is both allocentric and egocentric. *Journal of Vision*, **15**, 1-10.
- Moore, T., & Fallah, M. (2001). Control of eye movements and spatial attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **98**(3), 1273-1276.
- Netzel, R., Ohlhausen, B., Kurzhals, K., Woods, R., Burch, M., & Weiskopf, D. (2016). User performance and reading strategies for

- metro maps: An eye tracking study. *Spatial Cognition and Computation*, **17**, 39-64.
- Netzel, R., Hlawatsch, M., Burch, M., Balakrishnan, S., Schmauder, H., & Weiskopf, D. (2017). An evolution of visual search support in maps. *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, **23**(1), 421-430.
- Olk, B., Dinu, A., Zielinski, D. J. & Kopper, R. (2018). Measuring visual search and distraction in immersive virtual reality. *Royal Society Open Science*. **5**: 172331.
- Olsen, A. (2012). *The Tobii I-VT fixation filter: Algorithm description*. Tobii Technology.
- Over, E. A. B., Hooge, I. T. C., Vlaskamp, B. N. S., & Erkelens, C. J. (2007). Coarse-to-fine eye movement strategy in visual search. *Vision Research*, **47**, 2272-2280.
- Palmer, S. E. (1975). The effects of contextual scenes on the identification of objects. *Memory & Cognition*, **3**(5), 519-526.
- Peelen, M. V., & Kastner, S. (2011). A neural basis for real-world visual search in human occipitotemporal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **108**(29), 12125-12130.
- Peelen, M. V., & Kastner, S. (2014). Attention in the real world: toward understanding its neural basis. *Trends in Cognitive Sciences*, **18**(5), 242-250.
- Radach, R., Huestegge, L., & Reilly, R. (2008). The role of global top-down factors in local eye-movement control in reading. *Psychological*

Research, **72**, 675-688.

Raslau, F. D., Mark, I. T., Klein, A. P., Ulmer, J. L., Mathews, V., & Mark, L. P. (2015). Memory part 2: the role of the medial temporal lobe. *American Journal of Neuroradiology*, **36**(5), 846-849.

Reingold, M. E., Charness, N., Pomplun, M., & Stampe, D. M. (2001). Visual span in expert chess players: Evidence from eye movements. *Psychological Science*, **12**, 48-55.

Robbins, C., & Chapman, P. (2019). How does drivers' visual search change as a function of experience? A systematic review and meta-analysis. *Accident Analysis & Prevention*, **132**, 105266.

Salvucci, D. D., & Goldberg, H. J. (2000). Identifying fixations and saccades in eye tracking protocols. *The Eye Tracking Research and Applications Symposium*, ACM Press, New York, 71-78.

Sheridan, H., & Reingold, M. E. (2017). The holistic processing account of visual expertise in medical image perception: A review. *Frontiers in Psychology*, **8**, 1620.

島田和典・島田英昭・毛利宏・今関隆志・風間恵介 (2019). 自動車運転者における交通安全能力への意識とその構造. 自動車技術会論文集, **50**(3), 891-896.

Sireteanu, R., & Rettenbach, R. (2000). Perceptual learning in visual search generalizes over tasks, locations, and eyes. *Vision Research*, **40**, 2925-2949.

Takeuchi, T., Puntous, T., Tuladhar, A., Yoshimoto, S., and Shirama, A. (2011). Estimation of mental effort in learning visual search by measuring pupil response. *PLOS ONE*, **6**(7), 1-5.

- Treisman, A. M. & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, **12**, 97-136.
- Tseng, Y. & Li, C. R. (2004). Oculomotor correlates of context-guided learning in visual search. *Perception & Psychophysics*, **66**(8), 1363-1378.
- Tummeltshammer, K., & Amso, D. (2018). Top-down contextual knowledge guides visual attention in infancy. *Developmental Science*, **21**(4):e12499.
- Underwood, G., Chapman, P., Brocklehurst, N., Underwood, J. & Crundall, D. (2003). Visual attention while driving: Sequences of eye fixations made by experienced and novice drivers. *Ergonomics*, **46**, 629-646.
- Watson, D. G., & Humphreys, G. W. (1997). Visual marking: Prioritizing selection for new objects by top-down attentional inhibition of old objects. *Psychological Review*, **104**(1), 90–122.
- Wolfe, J. M. (2020). Visual search: How do we find what we are looking for? *Annual Review of Vision Science*. **6**:2.1-2.24.
- Wolfe, J. M., Cave, K. R. & Franzel, S. L. (1989). Guided Search: An alternative to the Feature Integration model for visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. **15**, 419-433.
- Wood, G., Knapp, M. K., Rock, B., Cousens, C., Roobottom, C., & Wilson, R. M. (2012). Visual expertise in detecting and diagnosing skeletal fractures. *Skeletal Radiology*, **42**, 165–172.
- Woodman, G., & Chun, M. M. (2006). The role of working memory and long-term memory in visual search. *Visual Cognition*, **14**(4-8), 808-

830.

Woodman, G., & Luck, S. (2004). Visual search is slowed when visuospatial working memory is occupied. *Psychonomic Bulletin & Review*, **11**(2), 269-274.