

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26540065

研究課題名(和文)探索行動の非線形動力学モデル：眼球運動と触覚探索による検討

研究課題名(英文)Non-linear dynamic models of search behavior: Eye movement and haptic search

研究代表者

齋木 潤 (Saiki, Jun)

京都大学・人間・環境学研究科(研究院)・教授

研究者番号：60283470

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：視覚探索における眼球運動から探索行動の非線形性、及び従来の線形的な顕著性マップの限界を検討した。自然画像の視覚探索における眼球運動軌跡の解析から風景の構造をもつ自然画像と構造のないノイズ画像の間で眼球運動の非線形特性に違いは見られなかった。しかし、画面全体の顕著性に加えて、画像の消失点に眼球運動が誘引されることが示され、顕著性マップモデルの限界が明らかになった。また、視覚探索における画像のグローバルな統計情報(アンサンブル情報)の効果、標的刺激の個数とその顕著性を操作した刺激個数判断課題によって検討した結果、局所的な顕著性だけでなく、アンサンブル情報も眼球運動に寄与することが分かった。

研究成果の概要(英文)：Using eye movement data in visual search, we investigated non-linear dynamics in search behavior and examined the limitation of saliency map models. Eye movement analysis in visual search tasks revealed no significant differences in non-linearity of eye movement dynamics between natural scenes with structural properties and noise images without them. However, in addition to saliency, a vanishing point of the scene attracts eye movement, indicating a limitation of saliency map models. To examine the role of global statistical information of an image (ensemble information) in visual search, we devised a task judging the number of targets, which manipulates both targets' saliency and their numbers. The results showed that ensemble information as well as saliency contributes to eye movements.

研究分野：認知神経科学

キーワード：視覚探索 眼球運動 非線形力学 顕著性マップ アンサンブル情報 自然画像

## 1. 研究開始当初の背景

探索行動は我々の生活に不可欠である。視覚探索、記憶探索、ナビゲーションなど我々は常に探索を行っていると言っても過言ではない。理論的には、探索行動は目標刺激の記憶保持、探索画面の知覚、注意や眼球・身体運動、意思決定など多くの要素を含む複雑な活動であり、認知機能のシステム特性の理解に適している。特に要素的過程の相互作用の様態は重要なテーマであるが、認知科学研究は独立したモジュールの加算的作用を前提とした研究が主流であり、相互作用するシステムの乗算的作用を組み込んだ理論モデルは考慮されていない。

他方、近年の機能的脳イメージングの知見などはヒトの認知システムを相互作用する複雑ネットワークととらえる見方を支持しており、モジュール加算モデルの限界が認識されつつある。ごく最近、非線形物理の分野を中心に探索行動を相互作用的なネットワークとして定式化しようとする試みが出現している。現状では、認知科学の主流であるモジュール加算モデルと非線形物理における乗算的相互作用モデルの研究の間に交流がない。この背景には、認知科学が統制された実験による綿密なデータ収集、解析を重視するのに対し、非線形物理ではモデルの理論的側面を重視しデータの詳細にはあまりこだわらないという「研究文化」の違いがあるように思われる。

このような現状を踏まえ、本研究では、視覚探索における眼球運動測定を用いて、相互作用モデルの妥当性を示すような証拠を探索した。具体的には、視覚探索課題における眼球運動の軌跡を分析した。モジュール加算モデルの代表である顕著性マップモデルを土台とし、眼球運動軌跡がどこまで顕著性マップで説明できるのか、その限界がどこにあるかを検討した。特に、非線形的な相互作用の証拠と見なされる眼球運動の軌跡のレヴィウォーク性を検討した。さらに、探索行動におけるレヴィウォークの背後にある最適採餌理論を念頭に置いて、採餌行動に類似した視覚探索課題を設計し、探索行動における利得・損失の効果を検討する行動実験を実施した。

## 2. 研究の目的

2つの研究プロジェクトを実施した。一つは、視覚探索時の眼球運動軌跡の解析、もう一つは、複数標的探索を用いた顕著性とアンサンブル情報の効果の検討である。

### (1) 視覚探索時の眼球運動軌跡

視覚探索における眼球運動を説明するモデルの代表として顕著性マップモデルがある。顕著性マップでは、視覚に呈示された刺激の方位・色・輝度を基に顕著性を算出して目の動きを予測しており、これらの情報はヒトが瞬時に処理できる要素的特徴として知られている。顕著性マップは、これら要素的視覚

特徴の加算によって計算され非線形的な特性は含まれない。他方、視覚探索における眼球運動軌跡が非線形動力学特性を持つことが報告されている (Credidio et al. 2012)。こうした特性は顕著性マップによっては直接的に説明することは難しい。また、ヒトが瞬時に処理できる情報はこれらの低次特徴の情報だけではなく、風景が屋外のものであるか屋内のものであるか、森の風景なのか海岸の風景なのか、といった「風景の構造」も含まれる。しかしながら、顕著性マップモデルにはこうした高次の情報は含まれていない。本研究では、視覚探索課題を行っているときの眼球運動を測定し、その軌跡の様々な特性を解析することにより、眼球運動に含まれる非線形動力学特性、及び顕著性マップモデルには含まれない風景の構造に関する情報の役割を検討する。

風景の構造には様々な要素が含まれているが、本研究では、特に消失点の効果に着目した。消失点は、奥行き手掛かりの一つであり、無限遠点を示している。この点に近づけば近づくほど、物体は観察者から遠くに置かれていることを意味し、その大きさは縮小する。ヒトの目は、中心視で最も解像度が高く、中心視の視野を処理する大脳皮質の領域も大きい。一方で、周辺視になるにしたがって解像度が低下する。これらの特徴を考えると、消失点を中心視で捉える(すなわち、消失点に目を向けること)は、小さな物体を解像度の高い中心視で捉え、大きな物体を解像度の低い周辺視で捉えることになるため、最も効率良く風景の内容を理解することに繋がると考えられる。

### (2) 視覚探索における顕著性とアンサンブル情報

視覚探索における眼球運動の非線形動力学特性、とりわけレヴィウォーク性の研究は動物の採餌行動の軌跡のレヴィウォーク性の発見に端を発している。採餌行動におけるレヴィウォーク性は採餌行動の最適性を反映したものであると考えられているが、その理論モデルにおいては、探索環境に関する情報をもたない状態でランダムサーチを行っていることと仮定している。この仮定は動物の採餌行動においては一定の妥当性を持つが、視覚探索事態においては妥当性を欠く。なぜなら、視覚探索は、探索画面にある様々な視覚情報を積極的に利用して探索を行うためである。視覚探索の理解には、視覚情報の利用様式の理解が不可欠である。

従来の視覚探索研究は、単一の標的刺激の探索がほとんどであったため、探索画面中の局所的な顕著性を用いたモデルが十分に機能した。しかし、動物の採餌行動に類似した状況を考えてみると、たくさんの標的刺激が存在し、それらを順次探索する必要がある状況は日常的に多く存在する。そうした状況における視覚情報の利用様式を考えた場合、局所的な顕著性だけでは不十分である可能性があ

る。複数標的状况においては、画面全体、或いは画面の広い領域に分散した情報の要約情報であるアンサンプル情報が重要な役割を果たしている可能性がある。本研究では、複数標的を持つ視覚探索課題を用い、局所的な顕著性と大域的なアンサンプル情報がそれぞれどのように寄与するのかを実験的に検討した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 視覚探索時の眼球運動軌跡

本研究では、3つの実験を通じて、眼球運動軌跡の非線形力学特性と、消失点が眼球運動に与える影響を検討した。

実験1では、自然画像にガボールパッチを付与し、これを標的とする探索課題を行った。参加者は画像中に埋め込まれたガボールパッチを探索し、その傾きの方位を解答するように教示された。

実験2では、自然画像を見る際に消失点がどれくらい有効な情報であるのかを明らかにするために、特定の課題を行わないフリービューイングの状況で自然画像を見るように、実験参加者に教示した。

実験1および実験2ではコントロール条件として、消失点がない自然画像および自然画像を位相ランダム化して元画像と等しいパワースペクトラムを持つノイズ画像を用いた場合の眼球運動を測定し、元画像と比較した。ノイズ画像ではパワースペクトラムは保たれているが、自然画像が持つ構造は破壊されているため、消失点の画像で見られるような効果は見られないと考えられる。

自然画像においては、画像中の顕著性が高い部分と消失点の間に関連がある可能性が高い。顕著性と独立に、風景の構造が眼球運動に与える影響を検討するために、実験3では、自然画像ではなく、人工的に作成した幾何学画像を用いた探索課題を行った。これにより、消失点の効果をより統制された状況で検討できる。課題では、線の交差によって表現された消失点の風景を背景とし、この背景に多数の正方形を配置した。参加者は、画像中の正方形の中に一つだけある長方形を探索し、長方形の縦の辺と横の辺のどちらが長いかを報告するように教示された。

#### (2) 視覚探索における顕著性とアンサンプル情報

色によって異なる点数が割り当てられた多数のガボールパッチからなる探索画面を用い、画面の左側と右側の合計点数を数えて、ちょうど20点ある側をできるだけ速く見つけて判断する課題を開発した。個々の探索画面においては1個を除いてすべてのガボールパッチはグレーであり、1個だけグレー以外の色をもち、グレーは1点、それ以外の色には2-5点が割り当てられた。たかだか1個だけ存在するグレー以外のパッチは画面上で最も局所的な顕著性が高い刺激となる。課題の難易度は左右の点数の差によって操作さ

れた。また、単に点数の多い方が正解(20点)とならないように、一定の割合で左右両方とも正解でない試行を含めていた。制限時間を設けて課題を実施し、課題成績に応じて制限時間を適応的に調節した。顕著なパッチがある側が正解である一致条件、反対側が正解である不一致条件を設定し、眼球運動や反応時間、正答率などを比較した。また、左右の点数差による効果も検討した。

### 4. 研究成果

#### (1) 視覚探索時の眼球運動軌跡

実験1の探索課題における眼球運動データを用いてその非線形力学特性を検討した。眼球運動の距離分布を分析すると、先行研究同様、距離の短いマイクロサッカードの範囲ではレヴィウォーク性を示すベキ分布が得られたが、実際の探索に寄与すると考えられるより距離の大きなサッカードにおいては、ベキ分布は得られず、レヴィウォーク性は示されなかった。さらに、風景の構造の有無による有意な距離分布の違いは見いだせなかった。視覚探索における眼球運動では視野全体の情報を取得して、最も標的の存在する可能性が高い領域に絞り込んで探索を行う。これらのメカニズムは風景の構造の有無では変化しないことが示唆される。また、動物の採餌行動等で報告されているレヴィウォーク性が眼球運動軌跡では観察されなかった理由については、画面の大きさが限定されていることによる一種のアーチファクト、採餌行動と視覚探索の間の本源的な差異などいくつかの可能性が考えられるが、今後の検討が待たれる。

消失点の効果については、探索中の眼球運動が消失点の位置に集まることが示された。この場所の情報を取得することで、自然画像全体の情報を効率よく取得していたことが示唆される。これに対して、消失点がない自然画像やノイズ画像では、このような眼球運動の分布の偏りは見られなかった。また、できるだけ速く標的刺激を見つけ出すという探索課題の特徴を考えると、消失点の周りに注視が集まるのは、探索開始直後の眼球運動で顕著に生じると予測される。探索開始直後の最初の注視点を分析したところ、消失点の周囲に偏って分布していることが示された。

実験2のフリービューイング課題でも同様に、自然画像中の消失点の位置に、参加者の注視が集まることが示された。消失点がない自然画像では、画像中のヒトの顔や文字などに注視が集まっており、消失点がある場合には、これらと同じ程度に視線が集まっていることが示唆された。

実験3の幾何学画像を用いた探索でも、探索中の眼球運動が消失点の位置に集まることが示された。画像上で最も顕著な点と消失点の関係性を検討したところ、画像が呈示される前に見ていた場所が、最も顕著な点よりも消失点に近かった場合、最初の注視が消失

点周辺に向く可能性が高かった。一方、画像が呈示される前に見ていた場所が、消失点よりも最も顕著な点に近かった場合、最初の注視は消失点よりも顕著性モデルにしたがって移動する可能性が高かった。これらの結果は、消失点は顕著性マップモデルに従えば顕著な点とは見なされないものの、顕著な点と同じくらい観察者の注視を誘導することを示している。

風景の構造の一つである消失点が、方位・色・輝度に基づいて計算される顕著性と同程度の影響力を持つことが示唆されたが、今後、本研究で得られた眼球運動データ、行動指標などを基に、自然画像場面における新たな眼球運動の予測モデルを構築することが求められる。

## (2) 視覚探索における顕著性とアンサンプル情報

選択反応の正答率については、点数差が大きいほど正答率は高くなった。一致条件と不一致条件の間には点数差が最小(1点)の時には有意差が見られたが、5点以上の条件では差は見られなかった。

眼球運動の解析は、課題開始から最初の10回の注視を対象に、注視位置が正解領域にあるか否かを注視正答率と定義し、注視正答率の変化を一致/不一致条件、点数差に関して分析した。その結果、一致条件では、第1注視から一貫して正答側を注視する傾向があり、注視正答率は、点数差が大きいほど高くなった。これに対して不一致条件では、第1注視では注視正答率がチャンスレベルよりも有意に低く、これは、第1注視が顕著な色付きのガボールパッチに誘導されていることを示す。第2注視以降は、点数差が大きい条件においては、注視正答率が急速に上昇し、ガボールの個数の多い正解側に比較的早い段階に注視が移動することが分かった。しかし、点数差が最小の条件では、この移動はほとんど生じしなかった。これらの結果を総合すると、第1注視は、探索画面の局所的な顕著性によって主としてコントロールされているが、画面のより大域的な情報であるアンサンプル情報がそれに遅れて利用可能になることが示された。

本研究の結果から、複数標的を含む視覚探索事態においては、局所的な刺激の顕著性の情報に加えて、画面の広い領域に分散したアンサンプル情報が利用されていることが明らかになった。しかし、先行研究において、アンサンプル情報の知覚は自動的、短時間で成立するとされているのは異なり、眼球運動にアンサンプル情報の効果が表れるのは、顕著性の効果よりも遅れることが示された。この遅延の原因としては、知覚課題とは異なり、眼球運動においては、アンサンプルを抽出したのちにその情報を利用して眼球運動を計画する必要があり、これによる眼球運動計画の遅延が考えられる。また、本実験における局所的顕著性の効果が、純粋に物理的な

刺激特性を反映しているのか、点数という価値の情報も含んでいるのかという問題も今後の課題である。さらに、アンサンプル情報の効果を組み込んだ視覚探索のモデルを構築するという課題も今後取り組んでいく必要がある。

## (3) 関連する研究成果

研究期間中に実施した、本課題と密接に関連する、視覚探索課題を用いた研究成果を以下に示す。

### 報酬と注意の関連に関する研究

近年、報酬と結びついた視覚刺激特徴が注意を捕捉するようになるという現象が注目されている。これは、顕著性が刺激の物理特性によってのみ決まるのではなく、過去の報酬履歴に影響されることを示している。価値駆動的注意捕捉(Value-Driven attentional capture: VDAC)と呼ばれるこの現象に関して、報酬と結びつく視覚特徴は学習時の課題と無関連でもよいことを世界で初めて明らかにした。(Mine & Saiki, 2015; 雑誌論文)

### 視覚探索における文脈手がかり効果

視覚探索において、探索画面が持つ規則性が標的刺激に対する注意を誘導することが知られている。特に、探索項目の空間配置が繰り返されることで探索成績が促進する文脈手がかり効果は、局所的な顕著性とは異なり、より大域的な情報の探索行動への影響を示すものといえる。文脈手がかり効果を用いて、以下の2つの研究を行った。まず、文脈手がかり効果が探索時に眼球運動を行う場合に特異的なのかどうかを視野周辺部の刺激を拡大して視認性を調整し、眼球運動が不要な探索画面を用いて検討した。その結果、眼球運動を行わない視覚探索においても文脈手がかり効果は得られ、眼球運動は文脈手がかり効果の必要条件ではないことが分かった(Higuchi & Saiki, 2014; 学会発表)。第2に、文脈手がかり効果を生起させる空間配置がどの程度項目位置の変動に対して頑健であるのかを実験的に検討した。その結果、項目位置の変動にかなり頑健に効果が持続することが分かった(Higuchi, Ueda & Saiki, 2015; 学会発表)。

### 探索非対称性と刺激の物理特性

標的刺激と妨害刺激を入れ替えると探索効率が有意に変動する探索非対称性はいまだにその生起メカニズムが解明されていないが、近年、顕著性マップの特性によって説明できるのではないかとされている。探索非対称性と刺激の物理特性の関連を明らかにするために、同一被験者に対して探索非対称性を生じる様々な刺激を用いた探索課題を実施し、探索非対称性の生起の相関関係を検討した。その結果、探索非対称性の個人間相関関係は、探索刺激の物理特性によって複雑な変動を示すことが分かった。このことは、探索非対称性が、単一の原因によって生じるのではなく、探索刺激の物理特性によってい

くつかの異なる生起因が存在することを示唆する(Ueda, Kurosu & Saiki, 2015; 学会発表 )。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Mine, C. & Saiki, J. (2015). Task-irrelevant stimulus-reward association induces value-driven attentional capture. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 77, 1896-1907. [査読有]

DOI 10.3758/s13414-015-0894-5

齋木 潤 (2014). 視覚認知の心理学. *Clinical Neuroscience*, 32, 140-143. [査読無]

〔学会発表〕(計 7 件)

Higuchi, Y., & Saiki, J. Contextual cueing effect without eye movements. *Vision Sciences Society Annual Meeting*. May 16-21 2014. St.Pete Beach FL, USA.

Higuchi, Y., Ueda, Y., & Saiki, J. Variability during learning facilitates generalization in contextual cueing. *Vision Sciences Society Annual Meeting*. May 19 2015. St.Pete Beach FL, USA.

Ueda, Y., Kurosu, S., & Saiki, J. Intensity of visual search asymmetry depends on physical property in target-present trials and search type in target-absent trials. *Vision Sciences Society Annual Meeting*. May 20 2015. St.Pete Beach FL, USA.

峯知里・齋木 潤、課題非関連特徴が価値駆動的に注意を捕捉する、日本基礎心理学会第 33 回大会 2014 年 12 月 6-7 日、八王子市

樋口洋子・上田祥行・齋木 潤、学習時の変動が潜在学習の般化に及ぼす影響、日本心理学会第 79 回大会 2015 年 9 月 6-7 日、名古屋市

熊切俊祐・上田祥行・齋木 潤、顕著性とアンサンブル情報の眼球運動への影響、日本心理学会「注意と認知」研究会 2016 年 3 月 13 日、名古屋市

鎌倉裕介・上田祥行・齋木 潤、シーンの意味と構造が眼球運動に与える効果 -写真画像とノイズ画像の比較研究-、日本心理学会「注意と認知」研究会 2016 年 3 月 13 日、名古屋市

〔図書〕(計 2 件)

齋木 潤 (2015) 注意 榊原洋一・米田英嗣(編)『発達科学ハンドブック 第 8 巻『脳の発達科学』』Pp 158-168 (総 317 頁). 新曜社.

齋木 潤 (2014) 注意と認知的制御、その他, 誠信心理学事典, 誠信書房.

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ

齋木研究室ホームページ

<http://www.cv.jinkan.kyoto-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

齋木 潤 (SAIKI, Jun)

京都大学・大学院人間・環境学研究科・教授

研究者番号: 60283470

(2)研究分担者

上田 祥行 (UEDA, Yoshiyuki)

京都大学・こころの未来研究センター・特定助教

研究者番号: 80582494

(3)連携研究者

阪上 雅昭 (SAKAGAMI, Masaaki)

京都大学・大学院人間・環境学研究科・教授

研究者番号: 70202083