

2024 年度 若手・女性研究者奨励金 レポート

研究課題	表面テクスチャーの視知覚における局所情報の統合分 凝法則の解明
キーワード	①テクスチャー知覚、②視覚情報表現、③情報統合と分離

研究者の所属・氏名等

フリガナ 氏 名	タケバヤシ ヒカリ 竹林 ひかり
配付時の所属先・職位等 (令和6年4月1日現在)	立命館大学 立命館グローバル・イノベーション研究機構 専門研究員
現在の所属先・職位等	立命館大学 立命館グローバル・イノベーション研究機構 専門研究員
プロフィール	略歴 2023年3月に京都大学大学院人間・環境学研究科博士後期課程を修了、学位（人間・環境学）取得。2023年4月より現職。 研究の関心 私たちが目にする「見え方」がどのように脳で生み出されているのかを研究している。特に、視覚刺激の物理的な強さ（例：明るさや模様の細かさ）が、実際の知覚の強さとどのように結びついているのかを調べ、その関係を数理モデルとして表現することで、大脳皮質における視覚情報の表現メカニズムを明らかにすることを目指す。ヒトを対象とした研究を通して「ものの見え方」の本質に迫り、視覚障害の理解や人と協調するAI技術の基盤づくりに貢献したいと考えている。

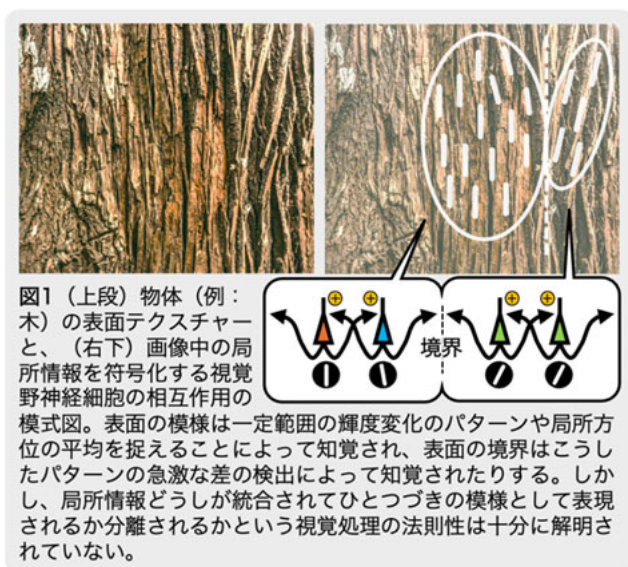
1. 研究の概要

問題

物体を認識するうえで、その形態やテクスチャーの理解は不可欠である。ヒトはこうした視覚情報をもとに物体にラベルを与え、記憶と照合したり、対象に対して行動を起こしたりする。形態知覚やテクスチャー知覚は、主に「輪郭の検出」と「表面構造の分析」によって成り立っており、それぞれの処理は局所的な視覚情報を統合するか分離するかという選択に基づいている（図1上段参照）。特に、画像内の輝度差、方位差、空間周波数差※は統合・分離の判断に関わる重要な因子であるが、それらの差がどの程度で上記の境界を生むのかは未解明である。

※ 空間周波数：

「一定の視覚空間内で明暗がどれくらいの頻度で繰り返されるか」を表す指標である。例えば、視角1度の範囲で明暗が繰り返される波数はcycles per degree (cpd) で表記する。



本研究の基盤となる既存の知見

網膜から入力された視覚情報は、大脳皮質の後頭葉に位置する一次視覚野 (V1) において初期処理される。どのような複雑な信号でも単純な正弦波の組み合わせとして分解でき (Fourier変換)、これは二次元の光の分布でも当てはまる。そして、V1の神経集団には特徴選択性があり、例えば急峻な輝度変化をとらえる高空間周波数に敏感な集団と、緩やかな輝度変化をとらえる低空間周波数に敏感な集団が存在し、それぞれが異なる情報を分担して符号化している。さらに、V1の神経集団は特定の方位 (水平・垂直・斜めなど) に応答する性質も備えており、空間周波数と方位は密接に関連しながら共同で符号化されている (Chua, 1990)。

明らかにしたいこと

本研究では、異なる空間周波数帯域間における方位情報の統合および分離の効率を検証することで、ヒトの大脳皮質視覚野における神経集団間の相互作用メカニズムに迫った (図1右下参照)。

2. 研究の動機、目的

研究の動機

完全自動化が社会に浸透しつつある現代において、状況に応じて柔軟に外界と相互作用できる AI ロボットの必要性は今後ますます高まると考えられる。しかしながら、AI が学習に用いるデータはいかなる知覚も伴わず、外界の捉え方はヒトとは本質的に異なる。例えば、Deep Neural Networks (DNNs) は構成概念 (construct) を持たずに画像を認識する一方で、性能の高い DNN ほどヒト脳の階層構造と乖離する傾向があることが報告されている (Nonaka et al., 2021)。

こうした点を踏まえ、機械の視覚をヒトの見え方に近づけるためには、ヒトの視覚情報表現の法則性を明らかにする必要があると考えた。

目的

視野内のごく一部の光情報を受容する網膜神経節細胞からの信号は、大脳皮質へと伝達され、その空間的位置関係は V1 においても保持される。V1 の神経集団は視野内の局所情報を個別に処理しながら、相互作用を通して視野全体の情報を表現する。V1 には空間周波数に基づくチャンネル構造が存在し、それぞれのチャンネルはおおよそ 1~1.5 オクターブ幅の空間周波数範囲にチューニングされて応答することが知られている (Graham & Nachmias, 1971)。また、局所的な方位情報の統合過程においては、応答する神経細胞数に比例してパターン知覚が促進される「プーリング処理」の関与が指摘されている (Parkes et al., 2001)。

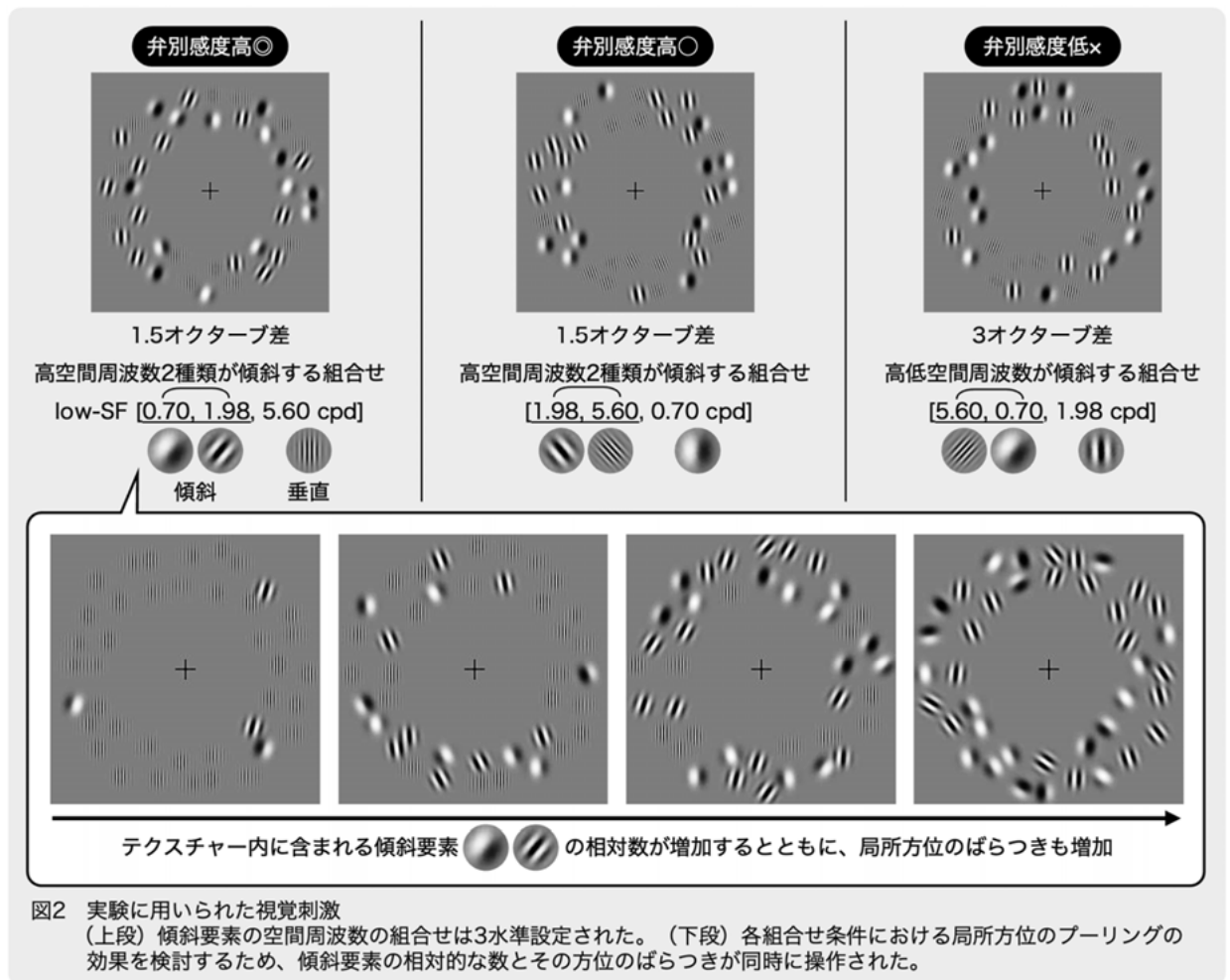
このことから、同一または類似の空間周波数に属する局所方位が多数存在する場合、それらは効率的に統合され、全体的なテクスチャーとして知覚されやすくなると考えられる。一方で、空間周波数の差が大きい局所方位同士がプーリングによって同様に統合されうるかについては、依然として明らかではない。局所情報の統合は、物体の表面構造の知覚を支える一方、統合されずに分離が促進される場合には、輪郭 (境界) 検出に寄与すると考えられる。そこで本研究では、局所方位の数・空間周波数差・方位差を同時に操作し、情報統合と分離が切り替わる境界条件を検証した。

3. 研究の結果

実験概要

本研究では、空間周波数が 1.5 オクターブずつ異なる 3 種類の縞刺激 (0.70、1.98、5.60 cpd のガボールパッチ) ※を用いた。これらは方位・空間周波数・位相・輝度をパラメトリックに操作可能であり、V1 神経細胞が符号化する情報特性を模倣する視覚刺激として広く用いられている。各試行では、これらの刺激を画面上の一定範囲内に 40 個配置し、1 つの全体的なテクスチャー刺激を構成した (図 2 上段参照)。

実験課題として、瞬間提示されたテクスチャー刺激の方位 (すべての局所要素の方位平均) が垂直方向から左右いずれに傾いているかを判別する 2 択弁別課題を実施した。



テクスチャー内の局所方位は3種類で構成され、うち2種類は垂直から±約15度傾いた目標要素、1種類は垂直な妨害要素とした。試行ごとに目標要素の相対数を操作するとともに、各要素の方位のばらつきも段階的に変化させた(図2下段参照)。

この弁別課題により、平均方位が識別困難となる方位のばらつき強度(=弁別閾)を算出し、その逆数を弁別感度とした。さらに、傾斜要素における空間周波数の組み合わせが弁別閾に与える影響を調べることで、異なる空間周波数帯域間での方位統合の効率と限界を検討した。

※ 3種類の縞刺激の Michelson コントラストは参加者ごとに異なっていた。各空間周波数で傍中心窩における絶対閾の2倍となるコントラストを個別に階段法で算出した。したがって、3種類の縞刺激間での主観的コントラストを個人内で等価にした上でこれらを本課題に適用した。

結果

傾斜要素間の空間周波数差が1.5オクターブであれば、局所方位の数の増加に伴って平均方位の弁別感度が上昇した。一方、空間周波数差が3オクターブの場合には、いかなる条件下でも感度の向上は見られなかった(図2上段参照)。これらの結果を先行研究の知見とあわせて考察すると、V1レベルに存在する空間周波数チャンネルはおおよそ1.5オクターブの範囲内であれば視野内の離散した局所方位情報を効率的に統合できるが、3オクターブを超えると統合ではなく分離的に作用する可能性が示唆された。すなわち、後者の場合はひとつづきのテクスチャーとしての認識が困難になると考えられる。

本研究は、視覚入力から図(figure)を切り出す際の「方位的かつ空間周波数的な基準」を明らかにする一端を担うものであり、その成果の一部は2024年度に開催された国際会議“The 16th Asia Pacific Conference on Vision”および国内学会「日本心理学会第88回大会」にて発表した。現在、成果を総括し、査読付き国際誌への論文投稿を準備中である。

4. 研究者としてのこれからの展望

高性能な DNN ほどヒト脳の階層性と乖離するという事実は、たとえ高性能な AI ロボット（例：車）であっても、思わぬ事故を起こした際、人にとって法的に複雑な事態を招きうるという問題を内包しているかもしれません。外界の見方はヒトと機械で異なり、その相違を埋めるための基礎的知見を揃える作業は認知科学者が真摯に取り組まなければならない課題と考えています。

ヒトの知覚に根差した AI 社会の実現に向けて、今後もヒトの視覚系がどのような情報を選択的に統合し、あるいは分離しているのかを明らかにする実験的研究を進めていきたいと考えています。特に、ヒトと AI の「見え方のズレ」が生じやすい空間的特徴や文脈依存的処理に着目し、それらが知覚判断にどのような影響を及ぼすのかを検証することで、人間中心の設計思想に基づいた視覚 AI の基盤を構築する一助となることを目指します。さらに、今後は異なる感覚モダリティとの統合処理にも視野を広げ、より多様な知覚経験をモデル化することで、ヒトと協調的に共存できるインタラクティブな AI システムや視覚障害ケアのあり方を模索していきたいと考えています。

5. 支援者（寄付企業等や社会一般）等へのメッセージ

2024 年度若手・女性研究者奨励金によるご支援を賜りましたこと、心より御礼申し上げます。ご寄付いただいた企業様、ご関係者の皆様、ならびに日本私立学校振興・共済事業団の方々に深く感謝いたします。

本研究のような基礎研究は、すぐに社会実装につながるものではありませんが、地道な蓄積が将来の応用や社会貢献につながると信じております。賜ったご支援のもと、本研究を着実に進めることができました。

今後も研究の発展と成果の社会還元に努めるとともに、認知科学の魅力を次世代へ伝えていけるよう精進してまいります。引き続き温かいご支援を賜りますようお願い申し上げます。



学会ポスター発表の様子