

もと
本

よし
吉

いさむ
勇

学位の種類 博士(文学)

学位記番号 文博第75号

学位授与年月日 平成11年3月25日

学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当

研究科・専攻 東北大学大学院文学研究科(博士課程後期3年の課程)
心理学専攻

学位論文題目 テクスチャ知覚の心理物理学
—分凝・群化・面形成の脳内機構—

論文審査委員 (主査)

教授 仁平 義明 教授 大橋 英寿
教授 畑山 俊輝
教授 大淵 憲一
教授 海野 道郎
助教授 行場 次朗

論文内容の要旨

本論では、著者自身による心理物理学実験の成果を中心に、静止した視覚パタンの分凝や群化、および面形成のメカニズムに関する理解を目指す。

本論の構成は以下の通りである。まず、テクスチャ知覚に関する心理物理学的知見を手がかりとして、分凝や群化のメカニズムに関する現在の一般的な見解と、その理論的・実証的背景について述べる(第1章)。次に、現在の見解にひそむ問題点を指摘し、主に著者の心理物理学実験の結果を土台に、分凝や群化のメカニズムに関するより精緻な見解を呈示する(第2章)。つづいて、分凝や群化の最終的な産物の一つである「面」の知覚が、充填と呼ばれる独立の処理過程により達成されることを、著者の発見したテクスチャ面の領域マスキング現象を用いて例証する(第3章)。最終に、それまでの議論を総括する(第4章)。

なお、各章の具体的な内容は以下の通りである。

1 分凝と群化の脳内機構

1.1 網膜に与えられた画像を分割したり、まとめること、つまり分凝や群化は、視覚パターンの認知に不可欠のはたらきである。これを知覚的体制化という。知覚的体制化は非常に複雑な過程であるため、それを最初に取り上げたゲシュタルト心理学者たちは、現象の法則性を記述するにとどまった。しかし、近年では、知覚的体制化の脳内機構そのものが解明されつつある。

1.2 その先導役となってきたのが、テクスチャ・パターンを用いた心理物理学的研究である。テクスチャ知覚に関する多くの実験的研究は、異なるテクスチャ・パターンの自動的で素早い分凝が、局所的な特徴の差異（特徴勾配）の検出に基づくことを明らかにしている。この知見は、視覚パターンの分凝や群化を、低次の単純かつ局所的な過程の間の相互作用に還元することを可能にするものである。

1.3 低次の局所的な過程では、時空間および時空間周波数次元で局在した準線形フィルタがはたらいっている。一般に、個々の空間フィルタは局所的で、かつ特定の方位と空間周波数に対して選択的に感度をもつと考えられている。また、近年では、空間フィルタのあいだに、促進性および抑制性の相互作用がそれぞれ異なる組織性をもってはたらくこともわかっている。テクスチャ・パターンの分凝も、このような相互作用に基づくと考えられる。

1.4 最近では、空間的に近接した空間フィルタのあいだの相互作用に基づいて、種々のテクスチャ画像で生じる分凝を定量的に予測することのできる計算モデルも提出されている。しかし、現行のモデルで想定されている相互作用は、1.3で述べたそれに比較するとあまりに単純である。したがって、現行のモデルには修正が必要である。

2 分凝・群化に関与する空間的相互作用の構造

2.1 実際、いくつかの心理物理学の実験の結果も、テクスチャ・パターンの分凝に関する現行のモデルに修正が必要なことを示している。それらの研究は、テクスチャ分凝の直接の引き金となっている特徴勾配の検出に先立って、広範囲にわたる特徴の統合（群化）が起こっている可能性を示唆している。しかし、現行のモデルでは、この群化の要因はほとんど考慮されていない。

2.2 テクスチャの分凝に関与する群化の要因のうち、特に注目されるのは、特定の局所的な方位成分が、それと同じグローバルな方位（共線的な方位）で広範囲に統合され、それが特徴勾配の検出に影響するというものである。著者は、この共線性の効果を考慮したうえで、特徴勾配の検出に関与するメカニズムの空間構造を実験的に推定した（Motoyoshi, *submitted*）。

その結果、テクスチャの分凝には、共線的な方位とそれ以外の方位とで、異なるタイプの空間的相互作用が関与することが新たに判明した。つまり、共線的な方位では空間周波数に選択的な相互作用が、それ以外の方位では空間周波数にあまり選択的でない相互作用が、テクスチャの分凝に関与することが示唆された。

2.3 他の心理物理学的知見を参照すると、共線的な方位ではたらく、空間周波数選択的な相互作用は、特徴勾配の検出に直接関与するものであると考えられた。一方、それと異なる方位ではたらく、空間周波数にあまり選択でない相互作用は、それに先立って起こる特徴の群化やシステムの出力の正規化に関与するものであると考えられた。この二つの相互作用の特性や機能の違いは、1.3で述べた促進性の相互作用と抑制性の相互作用の違いと対応するものである。テクスチャ分凝には、これらの相互作用が、異なる空間特性をもって関与するという結論が得られた。

2.4 なお、近年の神経生理学的研究によると、心理物理学実験で明らかにされてきた視覚パタンの分凝や群化のメカニズムは、一次視覚野（V1）に実装されている可能性が高い。V1の神経細胞の応答は、その受容野から離れた位置に提示された別の刺激に影響される。その特性は、心理物理学的に推定される空間フィルタ間の相互作用のそれと合致するものである。また、解剖学的にも、V1の神経細胞どうしの広範囲な結合が確認されており、それが相互作用を支えていると考えられている。さらに、2.2、2.3で扱った共線性の効果に対応するようなV1内部の神経回路も見出されている。

2.5 それまでの議論では、視覚パタンの分凝や群化が、空間フィルタ間の相互作用に基づくと思われてきたが、それだけでは説明しがたい現象も報告されている。一つは、空間フィルタの出力よりも明らかに高次の表現に基づいて分凝や群化が成立することである。もう一つは、視覚パタンの分凝や群化が、局所的特徴の勾配ではなく特徴自体により影響されることである。これらの現象は、分凝や群化のメカニズムに関する現在の理解がまだ部分的であることを意味している。

3 分凝と面の知覚

3.1 視覚パタンの分凝や群化に限らず、視覚処理は一般に、画像に含まれる特徴の差異を抽出する過程であると見なされている。このことは逆に、視覚系が、特徴の差異を含まない部分、つまり等質な面をそれとして処理しないことを意味する。しかし、この考えは、われわれがふだん等質な面の明るさや色、テクスチャなどを見ているという経験と鋭く対立する。加えて、面の明るさの知覚に関する古典的な現象の多くが、空間フィルタのような差異抽出の過程だけでは説明しきれないことも指摘されている。そこで、面の知覚に対応する神経表現は、高

次の充填過程で再構成されるという考えが提出されている。

3.2 実際に、視覚処理に関する神経回路モデルのいくつかは、空間フィルタリングを基礎とする境界検出の過程と、面の表現を再構成する充填過程を組み合わせることにより、様々な視覚現象を統一的に説明することに成功している。また、面の表現の実在性に対する本質的な批判がある一方で、多くの心理物理学研究では、面の表現および充填過程が実在する可能性が示唆されている。特に注目されるのは、等質な刺激パターンと小さなリング状のマスク刺激を続けて瞬間提示すると、面の明るさが知覚的に抑制される現象である。この領域マスキング現象は、等質面の明るさの充填が、即座に提示されたマスクの輪郭で阻害されたために生じると解釈されるものである。

3.3 著者は、領域マスキングがテクスチャ・パターンについても生じることを見出した。つまり、テクスチャ・パターンと小さなリングを続けて瞬間提示すると、テクスチャ面が知覚されなくなったのである。さらに興味深いことに、著者は、テクスチャのなかの異質な特徴が領域マスキングを選択的に免れることも見出した。これら二つの代表的な実験結果 (Motoyoshi, *in press*) と、他の多くの実験結果 (本吉, 1966他) から、この現象は、古くから知られるメタコントラスト・マスキング現象や、等質面の領域マスキングと類似した特性をもちつつも、同一の機序では説明できないことが示された。

3.4 テクスチャ領域のマスキング現象は、テクスチャの境界を検出する過程と、テクスチャ面を充填する過程が、それぞれ別のものであることを示している。前者の境界過程では、1.3や2.4でも述べたように、テクスチャ面に対する空間フィルタの出力が相互抑制され、特徴勾配の部分に境界を形成する。一方、後者の充填過程では、それらの境界を始点として、テクスチャ面の知覚に対応する表現が充填される。領域マスキングは、後者の充填過程のみを阻害したと考えると、全ての実験結果が説明可能である。

4 まとめ

4.1 視覚系では、形、色、動きなどに関する情報が、それぞれ独立にいくつかの段階をへて処理される。本論で扱った分凝・群化・面形成は、そのうち、中次の形状処理過程でおこなわれると考えられる。この処理過程の最大の機能は、面の境界を抽出することである。境界は、形のみならず運動や奥行きに関する高次の過程にとってのきわめて有効な情報である。

4.2 本論の目的の第一は、境界が抽出されるメカニズムを低次の空間フィルタ間の相互作用に基づいて明らかにすることだった。2.2で述べた著者の心理物理学実験の結果は、境界の検出に、現行のモデルでは想定されていない二種類の異なる相互作用が関与することを明らかにした。こうして抽出される境界の表現は、いわゆる前注意過程の最終出力であると見なすこ

とができる。

4.3 しかし、中次の形状処理過程は、形や運動、奥行き知覚の基礎となる境界とは別に、明るさや色、テクスチャ知覚をもたらす面の表現を抽出していると考えられる。ただ、その面表現を抽出するメカニズムに関しては、まだよく解明されておらず、その存在すら議論の対象となっている。しかし、本論では、面形成過程（充填過程）が境界検出過程とは独立に存在することを示す心理物理学的根拠を得ることができた。

4.4 今後、境界と面の形成メカニズムを低次の過程に基づいて明らかにすることができれば、前注意過程の全貌を体系的に理解しうると考えられる。それは、高次のパターン認知過程を解明するための最も確実な足がかりになることが期待される。

論文審査結果の要旨

本論文は、視覚パターン知覚の基礎過程、特に刺激要素の分布によって構成されるテクスチャ知覚における分凝や群化、および面形成のメカニズムに関する従来の知見を集積し、さらにテクスチャ知覚には境界過程と充填過程が関与していることを心理物理学的実験を通して解明し、得られた結果を神経生理学的知見と対応づけて考察したものである。

第1章は、視覚処理における分凝と群化の脳内機構について、従来の一般的見解と、理論的・実証的背景を整理し、問題点を指摘したものである。古くから、ゲシュタルト心理学的アプローチにより、網膜に与えられた刺激画像を分割したり（分凝）、まとめたりすること（群化）、すなわち知覚的体制化のはたらきがパターン知覚にとって重要であることが指摘されてきた。しかし、知覚的体制化は非常に複雑な過程であるため、ゲシュタルト心理学の知見は、現象の法則性の定性的記述にとどまった。近年では、知覚的体制化の脳内機構が解明されつつある。具体的には、大脳皮質視覚第1野における低次の視覚処理には、時空間次元で特異な特性をもつフィルタが存在し、知覚的体制化は、これらのフィルタ間の促進性および抑制性の相互作用（主として、出力エネルギーのプーリング）に基づくことが明らかになってきた。

第2章は、分凝や群化のメカニズムをさらに深く解明する心理物理学的実験を行い、より精緻な見解を提示したものである。従来の理論で説明できない現象の一つに、共線性の効果がある。これはテクスチャ刺激の局所的な方位成分が同一方位にならぶとき、その特徴勾配が検出されやすいというものである。コンピュータ画像処理を駆使して精密な心理物理学的実験を行った結果、共線的な方位では空間周波数に選択的な相互作用が、それに直交する方位では空間周波数非選択的な相互作用がはたらき、異なるタイプのメカニズムが存在することが新たに発見

された。そして、最新の神経生理学的知見と対応づけた結果、共線的な方位では狭帯域の空間周波数フィルタの出力プーリングが、共線的方位に直交する方位では、広帯域の空間周波数選択性をもつ抑制性のフィルタがはたらいている可能性が指摘された。

第3章は、分凝や群化のメカニズムの最終的な産物の一つである「面」の知覚が、充填と呼ばれる処理過程により達成されることを、テクスチャ面の領域マスキング現象を用いて例証したものである。領域マスキングとは、等質な面刺激と小さなリング状のマスク刺激を続けて瞬間提示すると、面の表面属性の知覚が阻害される現象である。この現象は、視覚処理において等質な面は、その境界における属性情報が内側に充填されて表現されていることを示唆するものである。これまでは、明るさの情報の充填などが報告されてきたが、本論文では、テクスチャの差異にもとづく面も充填されて表現されることを示す心理物理学の実験データを世界に先駆けて報告した。さらに、テクスチャ中の異質な特徴がマスキングを選択的に免れることも見いだされた。

第4章は、テクスチャの知覚が境界過程と充填過程により説明可能であることを、これまで示した実験データや神経生理学的知見を総合して論証したものである。前者は、テクスチャ面に対する空間フィルタの出力が相互抑制され、特徴勾配があるところに境界を形成する過程であり、後者は、それらの境界を始点として、テクスチャ属性が内側に充填される過程である。そして、境界過程と充填過程はテクスチャ知覚ばかりでなく、色、形、運動などの特徴情報を統合し、より高次の認識の基本単位となる「面」の形成、すなわち視覚情報の中間表現の形成に広く関与していることが論証された。

以上のように、本論文は視覚処理における分凝や群化、面形成のメカニズムに関して、豊富な実験データの提出と緻密な理論的考察を行っているが、複雑なテクスチャ情報（明るさなどの情報と違って単純な連続量では表現できない）を境界領域においてどのように圧縮し、それがどのような神経信号として具体的に内部に伝播されるのかに関しては、まだ実験的・理論的検討の余地がある。しかし、現在の視覚研究においては、低次特徴処理と高次パターン認知の研究が盛んである一方、両者がどのように連結するのかに関する研究は非常に少ない。本論文は、そのような中次視覚プロセスの解明に寄与するところが大きいと評価される。

よって、本論文の提出者は、博士（文学）の学位を授与されるに十分な資格を有するものと認められる。