

氏名 ゲルト ヤコベス ファン トンデル
Gert Jakobus van Tonder
 学位(専攻分野) 博士 (人間・環境学)
 学位記番号 人博第99号
 学位授与の日付 平成12年3月23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 人間・環境学研究科人間・環境学専攻
 学位論文題目 On the modelling of local symmetry in early primate vision
 (霊長類視覚初期過程における局所的対称軸の役割のモデル化に関する研究)

論文調査委員 (主査)
 教授 江島義道 教授 鯨岡峻 教授 船橋新太郎

論文内容の要旨

本学位申請論文は、物体を背景から分離して認識する視覚的機能(図-地分節の機能)に内在する情報処理様式をモデル論的、実験心理学的、神経心理学的に分析したものである。論文は10章より構成されている。

第1章では、従来の関連研究を概観し、本研究の意義を述べている。

次に、第2～8章では、「図-地分節」に関する3段階からなるモデルを提唱して、その妥当性を実験的に検証している。第1段階は、視対象の対称軸(または対称点)を推定する情報処理ユニットで、その計算アルゴリズムをハイブリッド対称変換(HST)法により数式として定式化している。ここで提案したハイブリッド対称変換法は、不連続的な輪郭(エッジ)に小さい重みを、連続的な輪郭に大きな重みをつけることで、ノイズに対する過敏さを制御可能とし、従来のモデルの持つ重大な制約を克服した点に大きな特色がある。このアルゴリズムで推定される対称特性は、心理実験によって明らかにされている対称性に関するヒトの知覚特性によく一致している。

第2段階は、PE(パッチワークエンジン)と名付けた領域分割の情報処理ユニットである。ここでは、画像が、第1段階で得られた対称性の極大値に基づいて「形状関係区画」へ分割される。領域輪郭は、対称性の極小点からの「波動」が広がり、輪郭成分に出会うか、波動同士がぶつかり、ブロックされることによって構成される。ブロックされた場所が異なる画像領域間の境界を示し、対称性極大値を示す場所が領域の幾何学的重心を示す。この新しい概念の有用性に関しては、具体的な幾つかの自然及び合成画像への適用性の良さを示すことによって検証している。

第3の段階は、大域的な形状を見つけるための情報処理ユニットである。この機能を果たすものとして、「滑らかさ」と「凝集性」を様々な区画の組み合わせで比較することにより大域的な形状を見つける形状演算ユニット(SL: Shape Logic)という基本演算子を提案した。

以上の3段階からなる「図-地分節」モデルが、ヒトの知覚特性をどの程度説明できるかに関しては、VEP(視覚誘発電位)実験と心理物理学的実験によって評価している。まずVEP実験によって、図形の対称性を抽出する神経機構が存在するかどうかを検討した。その結果、刺激の保有する対称性がVEPのピーク潜時と対応すること、すなわち対称性が高いほどピーク潜時が短くなること、ピークの生じる神経機構の部位は視覚の初期過程にあることを明らかにした。

次に、「図-地分節」における境界線知覚の大きさ特性に関して心理物理学的実験によって評価した。すなわち、ヒトのテクスチャ分割過程においてはテクスチンの「規則性」対「不規則性」が重要な役割を担うという仮説を立て、種々の「テクスチン-テクスチン間空間」の組み合わせの刺激を作成し、これらに対する知覚特性を測定した。他方で、提案したモデルに基づいて、それぞれの刺激に対して3種の境界線インデックスを計算した。そして、知覚特性とインデックスの対応関係を分析した結果、「テクスチン」と「テクスチン間空間」の両方を使用するインデックスが知覚特性をより良く説明できることを明らかにした。このことは、本論文で提案したモデルが、従来の研究で説明できなかった事項をより良く説明できることを意味する。

一方、ここで提案した3段階からなる「図-地分節」モデルが、従来までに明らかにされている神経機構および心理物理学的知覚特性に関する知見と整合するかどうかについても詳細に検討し、ヒトの視覚モデルとしての妥当性を検証している。すなわち、ヒトの視覚機構のもつ様々な知覚特性（例えば、多様なサイズ変形錯視、アモーダル形状構造特性、両眼像融合特性など）を解析するときの有用性と神経機構構造（視覚皮質におけるフィードフォワード結合、側結合、フィードバック結合などの情報処理構造など）との対応性の良さを明らかにしている。上に述べた他に、モデルの特徴としては、ノイズがあるときの対称性の計算が可能であること、対称性は画像分割と領域再構成において有効であること、画像分割は視覚場面において形状の様々な仮説の質的な生成において有効であることを挙げることができる。テクスト間空間は、従来のモデルでは数学的記述が困難であったが、本モデルはこれを可能にした。

第9章は、ここで提案したモデルがこれまでに提案されているモデルを包括できることを示したものである。

第10章では、今回提案したモデルと申請者が過去に提案したモデルの補完的統合化を図っている。

論文審査の結果の要旨

我々は物体を背景から容易に分離して認識することができる。このような「図-地分節」の性質については、これまでに詳細に分析されているが、その情報処理機構はまだ明らかにされていない。

本論文は、ヒトの「図-地分節」機能を計算論的、実験心理学的、神経心理学的に分析することによって、その情報処理機構の解明を目指したものである。

本論文の最も重要な研究成果は、初期視覚の情報処理に「輪郭処理機構」、「受動的フィリング・イン機構」および「輪郭間空間の処理機構」を含む計算論的モデルを提示するとともに、その存在の根拠を心理学的および神経心理学的実験により検証したことである。提案したモデルのパフォーマンスはヒトの知覚特性をよく説明でき、モデルとしての妥当性は高い。また、所要計算時間が短いことからパターン認識の必要な工学システムへの応用が可能である。

本論文は、3階層の「図-地分節」モデルを提唱している。まず、第1段階は視対象の対称軸（または対称点）を推定する情報処理ユニットである。これは、輪郭線（エッジ）情報を信号源として、その伝搬特性から図形の対称点を計算するもので、ハイブリッド対称変換（HST）法と名付けた数式によって定式化した。ここで提案された方法は、不連続的な輪郭より連続的な輪郭により大きな重みをつけることで、耐ノイズ性を高めることに成功している。この点では、従来のモデルより優れている。

第2段階は、パッチワークエンジン（PE）と名付けた領域分割の情報処理ユニットである。ここでは、画像が、第1段階で得られた対称性の極大値に基づいて「形状関係区画」へ分割される。領域輪郭線は、対称性の極小点からの「波動」が広がり、輪郭成分に出会うか、波動同士がぶつかり、ブロックされることによって形成される。ブロックされた場所が異なる画像領域間の境界を示し、対称性極大を示す点が領域の幾何学的重心になる。この新しい概念の有用性に関しては、具体的な幾つかの自然及び合成画像へ適用性の良さを示すことによって検証している。

第3の段階は、大域的な形状を見つけるための情報処理ユニットである。このユニットの機能は、「滑らかさ」と「凝集性」を様々な区画間で比較することにより大域的な形状を見つけることである。

以上の3段階からなる「図-地分節」モデルが、ヒトの知覚特性をどの程度説明できるかに関しては、VEP（視覚誘発電位）実験と心理物理学的実験によって評価している。まず VEP 実験によって、図形の対称性を抽出する神経機構が存在するかどうかを検討した。その結果、刺激の保有する対称性が VEP のピーク潜時と対応すること、すなわち対称性が高いほどピーク潜時が短くなること、ピークの生じる神経機構部位は視覚の初期過程にあることを明らかにした。

次に、「図-地分節」における境界線知覚の大きさ特性に関して心理物理学的実験によって評価した。すなわち、ヒトのテクスチャ分割過程においてはテクストンの「規則性」対「不規則性」が重要な役割を担うという仮説を立て、種々の「テクストン-テクストン間空間」の組み合わせの刺激を作成し、これらに対する知覚特性を測定した。他方で、提案したモデルに基づいて、それぞれの刺激に対して3種の境界線インデックスを計算した。そして、知覚特性とインデックスの対応関係を分析した結果、「テクストン」と「テクストン間空間」の両方を使用するインデックスが知覚特性をより良く説明できることを明らかにした。このことは、本論文で提案したモデルが、従来の研究で説明できなかった事項をより良く説明できることを意味する。

一方、ここで提案した3段階からなる「図-地分節」モデルが、従来までに明らかにされている神経機構および心理物理学的知覚特性に関する知見と整合するかどうかについても詳細に検討し、ヒトの視覚モデルとしての妥当性を検証している。すなわち、ヒトの視覚機構のもつ様々な知覚特性（例えば、多様なサイズ変形錯視、アモーダル形状構造特性、両眼像融合特性など）を解析するときの有用性と神経機構構造（視覚皮質におけるフィードフォワード結合、側結合、フィードバック結合などの情報処理構造など）との対応性の良さを明らかにしている。

申請者の研究は、ボトムアップ的視点を導入することによって、「図-地分節」の研究に新たな局面を切り開いたもので、この分野の研究に大きく貢献するものと高く評価でき、また環境の認識機構を総合的に考察するという人間・環境学専攻、環境情報認知論講座の目的に添ったものである。

よって本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成12年2月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問をおこなった結果、合格と認めた。