

論文の内容の要旨

論文題目	Computational theory of occluded-occluding object perception in early visual cortex
学 位 申 請 者	ZAEM ARIF BIN ZAINAL ABIDIN

外界には物体が多数存在し、ある物体は他の物体を遮蔽したり、または遮蔽されたりする。このとき、遮蔽物体と被遮蔽物体を隔てる境界 (Border) は遮蔽物体に帰属する。「観測された境界の所有権を保持する遮蔽物体が存在する方向」を計算する Border Ownership (BO) 問題は、物体の重なり順序を計算するための基盤的問題である。サル of 電気生理学的実験により、大脳皮質のV2と呼ばれる視覚領野ではBOを符号化していると解釈される結果が観測されている。これまでもBO問題を対象とした視覚数理モデルがいくつか提案されている。しかし、実験結果の再現性にのみ目的を限定とした数理モデルであり、どのような数理的問題を解いているのかを明らかにするモデルではない。

そこで本論文では①BO問題及び重なり順序計算問題を定式化し、②これらの問題を解くための視覚数理モデルを導出し、③既存モデルの数理的基盤を与えることを目的とした研究をおこなった。

本研究の成果①として、境界のOwnerが存在する方向であるBO信号をベクトル場 E 、重なり順序をスカラー場 ϕ として定量化することで、これらの関係が電磁気学の電位と電場に関する定理; $E = \nabla \phi$ によって関連付けられることを発見した。 ∇ は空間微分演算子である。さらに保存場に関する定理 (E の回転はゼロ; $\text{curl } E = 0$) を利用することにより、対象としている問題は最適化問題として定式化できることを発見した。具体的には評価関数 $J = \int \text{curl } E \, dS$ を最小化もしくは極小化する E を計算する問題として定式化した (S は2次元画像領域)。

成果②として、 E のダイナミクスを評価関数 J に最急降下法を適用することで、BO問題を解く神経回路網モデル (提案モデル) を導出した。重なり順序 ϕ の計算は、 E の空間積分を実行する神経回路網モデルとして実装した。

提案モデルは最急降下法による繰り返し計算を実行しているため、Eの初期値によりB0計算結果は一通りに定まる。そこでEの初期値と、B0計算結果・重なり順序計算結果の対応を調べる数値実験を行った。具体的には初期値Eの方向をランダムに設定し、提案モデルの初期値依存性を調査した。その結果、初期値に依存して様々なB0計算結果と様々な重なり順序計算結果が得られることを示した。この結果は、与えられた入力信号に対して多様な解が存在しうることを意味している。

一方、電気生理学的実験では多様な細胞反応は観測されていない。すなわち電気生理学的実験結果を数理モデルで再現するためには、ランダムではなく適当な初期値Eを設定する必要がある。そこで本研究では、閉じている輪郭の曲率和が正である数学的事実と（凸の方が凹の数よりも多い）、凸の内側が図として知覚されやすいという知覚特性（ゲシュタルト性の一つ）を参考にして、初期値Eを与える方法を提案した。具体的にはL-junctionの内側に初期値Eが向くようにした。その結果、提案モデルが電気生理実験結果を定性的に再現できることをモデルの数値シミュレーションによって示した。ただし、定量的な一致性は特定のシミュレーション時間に限ってのみ観測された。

成果③として、評価関数 $J = \int \text{curl } E \, dS$ を極小化する神経回路網モデル（すなわち提案モデル）の細胞間結合強度は、LiモデルとCraftモデルがad-hocに設定した細胞間結合強度と定性的に類似することを明らかにした。この結果は既存モデルに数理的基盤を与えたことを意味する。たとえば「LiモデルのV2皮質内細胞間結合は実質的に $\text{curl } E$ をゼロにする結合である。」という新たな数理的解釈を可能にした。さらに「Craftモデルの円環状受容野はベクトル場Eからスカラー場 ϕ を計算するための結合（積分カーネル）である」という解釈を可能にした。

しかしながら、実際のV2細胞はより複雑な入出力特性を示す。具体的には入力パターンの形状によって反応が異なるV2細胞の存在が確認されているが、提案モデルではこのパターン依存性を再現できないことは問題の一つである。また、明るい面のほうが暗い面よりも手前のように知覚されるなど、実際の視覚特性を十分に反映するモデルの構築も今後の課題の一つである。

以上、B0信号と重なり順序をそれぞれ、ベクトル場とスカラー場として定量化し、B0の符号化問題を保存場の定理を用いて定式化し、問題を解くための神経回路網を演繹的に導出した。このベクトル場とスカラー場の関係を適用できる2種の応用についても議論・考察する。具体的には、(1)エッジ計算と明るさの知覚、(2)主観的輪郭の計算論である。(1)提案モデルのEと ϕ をそれぞれ、エッジ計算結果と明るさの再構成結果として定量化すると、シュブルール錯視を定性的に説明できることを示した。(2)については、 ϕ の評価関数を新たに定義することで主観的輪郭の知覚を説明する神経回路網モデルが得られることを示す。ただし(1)と(2)のいずれも定性的な評価であることと、期待される結果が得られない場合があることについては今後解決すべき課題である。

以上本研究では、①これまでに定式化されていなかったBorder Ownership符号化問題と重なり順序計算問題を同時に定式化することに成功し、②定式化された問題を解く神経回路網モデルを導出し、③既存モデルの数理的基盤を与えた。具体的にはLiモデルとCraftモデルでad-hocに与えられた細胞間結合の数理的意味を与えた。また、提案モデルの応用として2種の視覚特性の再現を試み、定性的にはあるが再現に成功した。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 ZAEM ARIF BIN ZAINAL ABIDIN

審査委員主査 佐藤 俊治

委員 阪口 豊

委員 末廣 尚士

委員 檜森 与志喜

委員 小川 朋宏

本論文は輪郭所有権と物体重なり順序に関わる符号化問題の定式化と、この符号化問題を解く視覚計算モデルの構築と、既存数理モデルの数理的基盤を与えることを目的とした研究について論じたものであり、7つの章から構成されている。

第1章は序論である。外界には複数の物体が異なる奥行きで配置されており、個々の物体はお互いを遮蔽したり遮蔽されたりしている。このとき、異なる物体を分け隔てる境界は一般的に遮蔽している物体が「所有」している。ルビンの図形は図の領域（遮蔽）と地の領域（被遮蔽）が反転して知覚される図形であるが、この反転は、輪郭の所有権方向（以降、Border Ownership; BOと記す）の反転に対応することを示している。すなわち、BOの符号化と面の奥行き符号化には密接な対応関係がある可能性を主張している。次に神経生理学的知見をまとめている。BOの符号化はV2野と呼ばれる視覚領野内の細胞で行われ、面の奥行き知覚にはV4野細胞が強く関与していることを記している。計算理論の観点からは、D. Marrの主張が紹介されており、網膜像から3次元情報を再構成することの重要性が述べられている。そこで本研究では、BO符号化問題を3次元情報の再構成問題とした明確な計算理論を提唱することを目的としている。

第2章は既存研究の調査と本研究のアプローチについて述べられている。既存のBO符号化モデルとして、LiモデルとCraftモデルを紹介し、それぞれの問題点を指摘している。LiモデルはV2内の細胞間結合強度を適切に設定することでBO方向を符号化する。しかし、Liモデルの結合強度はad-hocに設定されており、数理的にどのような問題を解いているのかが不明であることを問題点としてあげている。なおLiモデルでは23種のフリーパラメータ値を適切に設定する必要がある。CraftモデルではGrouping細胞と呼ぶ仮想的な細胞と、円環状の細胞間結合を導入しているが、これらの計算論的意味もLiモデルと同様に明らかにされていない。上記の問題を解決するためには、視覚が解くべき問題の定式化が重要であることを主張している。

第3章では本研究で提唱する計算論が記されている。まず、輪郭の所有権方向をベクトル場 E 、面の重なり順序をスカラー場 ϕ として定量化できることを記している。次に、これらの関係が電磁気学の電場と電位の関係; $E=\nabla\phi$ として関係付けられることを見出している。次に、 $E=\nabla\phi$ が成立するためには ϕ が保存場であること、すなわち $\text{curl } E=0$ である必要があることを記している。これらの数理的定理から、B0符号化問題は「評価関数 $J=\int \text{curl } E \, dS$ の最小化問題 (S は画像領域)として明確に定式化される」ことを本研究の主要な貢献の一つとして提唱している。次に J に最急降下法を適用することで、この最小化問題を解くための時間発展方程式を導出している。面の重なり順序 ϕ は、各時刻におけるベクトル場 E を積分することで計算され、神経生理学的にはV4野で符号化される量であることを記している。

第4章では、第3章で定式化したB0符号化問題を解く神経回路網モデル(提案モデル)を記し、数値計算による動作解析をおこなっている。提案モデルは最急降下法を適用することで導出されているため、 E の初期値はB0計算結果と一対一に対応する。そこで E の初期値と、B0計算結果・重なり順序計算結果の対応を調べる数値実験を行った。具体的には初期値 E の方向をランダムに設定し、提案モデルの初期値依存性を調査した。その結果、 E の初期値に依存して様々なB0計算結果と様々な重なり順序結果が得られることを確認している。一方、電気生理学の実験結果を数理モデルで再現するためには、ランダムではない適当な初期値 E を設定する必要があることを主張している。本研究では、閉じている輪郭の曲率和が正である数学的事実と、凸の内側が図として知覚されやすいという知覚特性を反映させた E の初期値設定方法を提案している。

第5章では、前述のLiモデルとCraftモデルのad-hocな結合強度や仮想的な細胞の計算論的意味について記している。まず、Liモデルの結合強度は、 $\text{curl } E$ をゼロにすることを目的として動作する本モデルの結合強度と定性的に一致することを見出した。すなわち、Liモデルは結果的に $\text{curl } E \rightarrow 0$ を計算していたと解釈できることを主張している。また、 ϕ は E を積分した量であるが、この積分は円環状の受容野を通じた情報伝播によって実現できることを示している。すなわち、CraftのモデルのGrouping細胞と円環状受容野と、面の重なり順序計算とそのための積分カーネルであったという解釈が可能であることを主張している。

第6章では、本研究で提唱する計算論の応用2種を記している。まず、スカラー場 ϕ の評価関数を定義することで、主観的輪郭の知覚が説明できることを記している。ただし、期待される結果は特定のパターンが入力されたときに限られている。また、エッジ検出と明るさ再構成問題への応用や、視覚的注意の効果を導入した発展モデルについても記されている。

第7章で本論文をまとめている。具体的にはベクトル場 E とスカラー場 ϕ の双方向の情報伝播が神経生理学的観点から重要であることと、いわゆるアモードル補間を説明するモデルの必要性について記している。

以上要するに、本研究では輪郭所有権の符号化問題をはじめ定式化した研究であり、提案する神経回路網モデルが既存モデルの数理的基盤であることを示したことは、中低次の計算論研究に新たな知見を与えた研究成果として意義があると判断できる。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として十分な価値を有するものと認める。