

論文の内容の要旨

論文題目	視覚背側経路細胞の反応特性およびヒトの速度知覚特性を 統一的に説明する数理モデルの構築
学 位 申 請 者	中村大樹

ヒトは眼球（網膜）から外界の映像を取得し、様々な情報処理を行うことで外界の情報を得ている。視覚情報処理は網膜を含む神経細胞によって実現されており、動き知覚に関してはMiddle Temporal Area（MT野）と呼ばれる脳領野に関与している。視覚研究は学際的であり、主に神経生理学的アプローチ、認知心理学的アプローチ、計算論的アプローチがある。本研究では計算論的アプローチによる視覚システムの解明を目指しており、具体的には、MT細胞の電気生理学の実験結果を再現・説明する視覚計算論の提案と数理モデルの構築を目的としている。

本論文ではまず既存研究の調査と考察をおこない、モデルが再現すべき細胞特性をまとめている。次に、既存の「MT細胞は特定の速度を抽出する時空間周波数フィルタである」という計算論的解釈では、MT細胞の複雑な特性である方向感度のコントラスト依存性などを数理的に説明することが困難であることを主張している。

上記の問題を解決するために本研究では、新たな計算論的解釈に基づいたモデル構築を試みている。具体的には「MT細胞はLukas-Kanade法（LK法）に基づいた速度推定を実行している」という新たな計算論的解釈を提案した。LK法は特定の条件下で推定誤差が最小となる解を求める画像工学的アルゴリズムである。LK法は除算を必要とするが、本研究ではゼロ除算を回避する改良LK法を数理基盤として、新たなMT細胞モデル（提案モデル）を導出した。提案モデルの妥当性を評価するために数値シミュレーションを行った。その結果、提案モデルでもMT細胞の基本的な性質を再現できることを示した。さらに、視覚刺激の運動速度や方向感度のコントラスト依存性も提案モデルで統一的に再現・説明できることが示された。また、シミュレーション結果を詳細に解析することで、方向感度のコントラスト依存性はゼロ除算回避に起因していることを明らかにした。

細胞特性の再現は数理モデルが満たすべき要件の一つであるが、モデルによって知覚特性を予測することも重要である。そこでヒトの知覚特性を提案モデルが予測できるか否かを確認するために視覚心理実験を実施し、モデル予測との比較を実施した。具体的にはdrift illusionと呼ばれる錯視パターンを対象としている。まず約1600万種のモデル入力画像を作成し、対応して1600万種のモデル予測結果を数値シミュレーションによって得た。次に、モデル予測の結果をもとにして33種のパターンを5名の被験者に提示し、ヒトのdrift illusionに関する運動視知覚特性を心理物理実験によって得た。これら33種のパターンに対するモデル予測とヒト視覚特性の相関係数は0.96であった。提案モデルは錯視を再現するために構成されていないにもかかわらず、ヒトの知覚とモデル予測結果に正の相関があることから、提案モデルが視覚心理の観点からも妥当性が高いことを主張している。また、Stepping Feet illusionと呼ばれる錯視も提案モデルで定性的に説明できることを示した。

前述までの議論は、モデルの数値シミュレーション結果を通じた評価と考察であった。次に、モデルの入出力特性を解析的に方程式として導出することを試みている。結果として、入力をグレーティング刺激とした場合、モデルの推定速度を \hat{v} 、真の速度を v とすれば、 $\hat{v} \propto v$ であることを導出した。また、 \hat{v} と v の比例係数は入力パターンの時空間周波数や、提案モデルに含まれる4種のパラメータに依存することが示された。本研究ではさらに、時空間微分とゼロ除算回避を実行するために必要とされる4種のパラメータ値を変化させることで、多様なMT細胞特性を提案モデルで再現できることを示した。ただし、一部のMT細胞特性は、時間微分に非線形性を導入しなければ説明できないことを明らかにしている。この非線形性の計算論的意味や神経生理学的事実性の検証については今後の課題としている。

以上本研究では、①「MT細胞はLukas-Kanade法に基づいた速度推定を実行している」という新しい計算論的解釈に基づいて新たなMT細胞のモデルを提案し、②提案モデルでもMT細胞の速度選択性を再現することができることを示し、③方向感度のコントラスト依存性も提案モデルで再現し、この依存性がゼロ除算回避に起因していることを示した。さらに、④知覚心理学的妥当性を評価するために新たに心理物理実験を実施し、⑤ヒトの知覚特性と提案モデルの予測に正の相関がみられることを示した。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 中村 大樹

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 南 泰浩

本論文は速度視知覚に関わる計算モデルの構築と、構築したモデルの神経生理学的妥当性ならびに知覚心理学的特性を評価・検証することを目的とした研究について論じたものであり、6つの章から構成されている。

第1章は序論である。学際領域である視覚脳科学研究には主に3種のアプローチがあることを示し、本研究ではそのひとつである計算論的アプローチから視覚システムの解明を目指すことが記されている。具体的な研究対象は、速度視知覚に関わる脳細胞である Middle Temporal Area (MT 野) 細胞としている。次に、MT細胞を含めた既存の電気生理実験結果と計算モデルについてまとめている。既存のMTモデルは「(特徴)選択性」すなわち「(特定の)速度を抽出するフィルタ」なる計算論を基盤として構築されている。しかし、「選択性」や「フィルタ」を基盤とした既存のMTモデルではMT細胞の複雑な細胞出力特性を記述したり説明したりすることが困難であることを問題点としてあげている。そこで本研究では、新しい数理基盤から演繹的に新しい数理モデルを導出することで、MT細胞が示す複雑な特性や速度知覚特性を記述・説明することを具体的な目的のひとつとしている。

第2章では、新たな数理基盤として「MT細胞は速度推定器である」と仮定することで新たなMT細胞モデルの導出を試みている。まず、速度推定アルゴリズムのひとつであるLucas-Kanade法(以下LK法)の原理を記している。LK法は特定の条件下で速度推定誤差が最小となるように設計されており、選択性やフィルタの概念を基盤としていない。なおLK法は除算を必要とするが、本章ではゼロ除算を避けるための改良方法を提案している。以降の考察ではこの改良LK法を基盤とした論述が展開されている。本研究では、この改良LK法を数理的基盤として導出した速度推定式を新たなMT細胞モデルとして提案している。

第3章では、第2章で提案したMT細胞モデルの妥当性を数値シミュレーションによって検証している。電気生理実験で計測されたMT細胞の入出力特性を示すために横軸と縦軸をそれぞれ提示刺激の速さと細胞出力としてプロットすると、単峰性のプロファイルを示す。数値シミュレーションの結果、本研究で提案するMT細胞モデルも同様の単峰性プロファイルを示すことから、提案モデルの妥当性が一つ示されたことを主張している。また、MT細胞の方向感度に関するコントラスト依存性も提案モデルによって再現できることを主張している。さらに、モデルの数理的解析結果から、コントラスト依存性はゼロ除算回避による副次的効果として説明できることを示している。一方、いわゆる選択的速度のコントラスト依存性については説明できないことを明らかにしており、この問題の解決は今後の課題としている。本章の末尾では、read-outモデル（複数のMT細胞の出力を統合した最終的な速度推定結果を得るためのモデル）について議論している。既存read-outモデルのひとつである重心モデルは「選択性」の概念に基づいているが、重心モデルではMT細胞の視覚刺激サイズ依存性を説明できないことがこれまでも指摘されている。なお Boyraz と Treue によるread-outモデルは重心モデルを改変することでサイズ依存性が説明できることを明らかにしたが、改変の必然性や計算論的意味は不明であった。一方、本研究が主張する「MT細胞は速度推定器である」という仮定に基づけば、Boyraz と Treue によるread-outモデルは自然に導出されることを主張している。

第4章では、視覚心理実験を通じたモデルの妥当性を検証している。具体的には drift illusion と呼ばれる錯視に着目し、数理モデルの予測とヒトの知覚に正の相関があるかどうかを検証している。ヒトの知覚特性を予測するために1600万種を超える入力画像を用意し、これらの画像に対するモデル出力（すなわちモデル予測）を数値シミュレーションによって得た。並行して5名の被験者を対象とした視覚心理実験を行った。被験者には、モデル予測を基にした33種の視覚刺激を提示した。結果として、33種の視覚刺激に対するヒトの知覚特性とモデル予測の相関係数は0.96であり、提案モデルはヒトの知覚を完全ではないが予測できていると主張している。また、Stepping Feet illusionと呼ばれる錯視も提案モデルで定性的に説明できることを示している。

以上、第3章と第4章では数値シミュレーションによってモデルの妥当性を検証してきた。第5章ではGrating刺激を入力とした場合のモデル出力の解析解を導出している。提案モデルは時空間微分とゼロ除算回避を実行するために4種のパラメータ調節を必要とする。これらのパラメータ値を変化させることで、多様なMT細胞の入出力特性が再現できることを解析的に示している。ただし一部のMT細胞特性は、時間微分に非線形性を導入しなければ説明できないことが明らかになった。この非線形性の意味や神経生理学的事実性の検証については今後の課題としている。

第6章には本論文の決言が記されており、異なる計算論的解釈を提唱することの重要性が述べられている。

以上要するに、本研究では新たな計算論的解釈に基づいて導出したMT細胞モデルが、神経生理実験結果や視覚心理実験結果を再現したり説明できたりすることを示しており、学際的な視覚研究の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。