

令和元年6月24日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00204

研究課題名(和文) 中次視覚機能の定式化と新しい機能的解釈による視覚計算理論

研究課題名(英文) Computational theory of middle-level visual processing and the functional analysis

研究代表者

佐藤 俊治 (Sato, Shunji)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：50333844

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)： 移動物体の速度、面の傾き、物体の重なり順序など、視覚は様々な処理をおこなっている。本研究では、これらの視覚機能はどのようにして実現されているのかを数式として表現し、表現した式をコンピュータシミュレーションを通じて視覚特性を予測することを目的としている。

まず移動物体の速度知覚に関しては、工学的に知られているLucas-Kanade法を基盤とした視覚数理モデルを作成した。このモデルはヒトの錯視も予測できることを示した。面の傾き知覚についても同様に、数理モデルの構築とシミュレーションを行った。物体の重なり順序知覚については、電磁気学の記述や定理が利用できることを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中次視覚機能の定式化はそれ自体が困難である場合が多い。本研究では画像工学的観点や、これまで用いられなかったアイデア(電磁気学の基本や知見)によっていくつかの中次視覚機能を定式化し、シミュレーションによって式の妥当性を評価した。

視覚機能の定式化とシミュレーションは、知覚の予測を可能にする。例えば錯視を引きを越すパターンとひきおこさないパターンの区別が可能となる。また、運転者の視知覚を予測するための基盤的知見を与えたことにもなる。

研究成果の概要(英文)： Our visual system execute various information processing for retinal images, e.g. speed estimation, surface estimation, determining the depth order of occluding objects.

The main purpose of the research is mathematical formation of such middle-level visual processing. A mathematical model for speed perception is given by an improved Lucas-Kanade method. This model is quantitatively plausible because its properties are consistent with human visual properties for illusory patterns. Similar research approach was applied to the process of estimation of the angles of slant surfaces. Moreover, I found that electromagnetism is applicable for describing the visual processing for "depth-order-calculation."

研究分野：視覚計算論

キーワード：視覚モデル MT野 border ownership シミュレーション 視覚野 視覚心理物理実験

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

視覚情報処理の初期段階ではエッジの方位検出や局所運動速度の計算などがおこなわれており、これら初期視覚情報処理を数学的に定式化することに成功している。例えば初期視覚野細胞の特性は数学的な最適化問題を解いた結果として現れることがわかっている。しかし、「物体の重なり順序計算問題」や「面構造知覚」などのより高次の視覚情報処理を数理的な問題として定式化に成功した例は多くない。脳や視覚情報処理を理解するためには、可能であれば数学的な問題としてこれら視覚情報処理を記述する必要がある。錯視についてもその原因を科学的に追究するためには視覚の数理モデル構築が必要になる。

### 2. 研究の目的

「電場と電位」「Maxwell 方程式など」、一見すると視覚情報処理とは全く関係がない事項や数学的定理を基盤にして、中次の視覚情報処理問題を数的にきちんと定義する。また、長らく信じられてきた神経細胞の機能的解釈を見直すことで、視覚計算論研究に新たな考え方を提示する。具体的には「物体の重なり順序計算」「Border Ownership 計算」などの問題を定式化し、これまで ad-hoc に構築されてきた多くの数理モデルの理論的基盤を与える。また、本研究で提示する新解釈に基づけば、視覚細胞の複雑な特性は合理的な特性(当たり前なことであって複雑でもなんでもない)として観測されることを示す。以上、新しい理論基盤と新解釈を提示することで、脳神経系研究の新境地を開拓する。

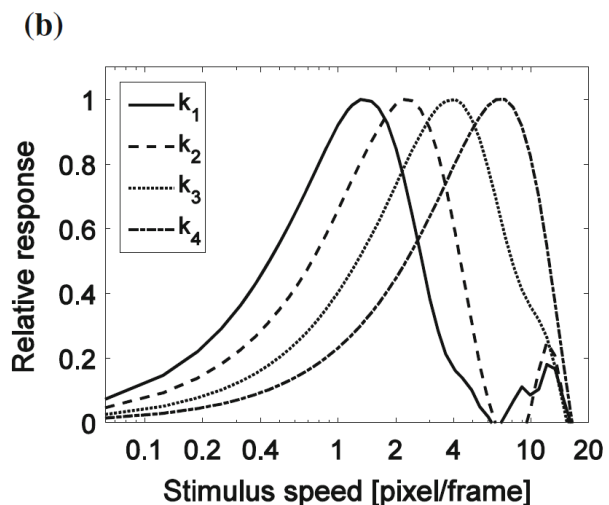
### 3. 研究の方法

種々の視覚情報処理を、最適化問題の枠組みで定式化する。すなわち中次の視覚情報処理においても特定の数学的問題を解くための仕組みとして解釈できるようにする。得られた式、すなわち視覚数理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によってモデル特性を測定し、モデル特性が神経生理学的知見や視覚心理学的知見と整合するかどうかを確認する。

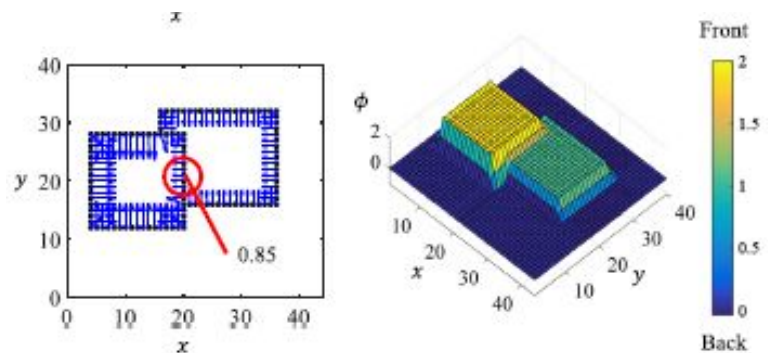
### 4. 研究成果

[Middle Temporal (MT)野モデル]: MT 野と呼ばれる領域の細胞は、特定の速度で移動する画像に対して反応することが知られているが、その特性は画像のコントラストなどに依存して複雑に変化する。また、ヒトは特殊な画像に対して錯視的な動きを知覚することもある。

本研究ではいたずらに複雑な MT 細胞モデルを構築するのではなく、Lucas-Kanade 法と呼ばれる画像解析アルゴリズムを基盤とした MT 細胞モデルを構築した。その結果、複雑な細胞特性を数理モデルによって説明することができた(右図;論文3より引用;MT 細胞の速度選択性を再現できている)。さらに Fraser-Wilcox 型刺激と呼ばれる錯視画像に対するヒトの視覚特性を、同じ数理モデルで説明できることを示した。



[輪郭所有権問題]: ヒトは単眼情報であっても(片目だけの像であっても)物体の重なり順序を計算・知覚する。この重なり順序を計算するためには、2つの物体を分け隔てている輪郭がどちらの物体に属しているか推定しなければならない(輪郭所有権問題と呼ばれている)。輪郭所有権問題は V2 野と呼ばれる

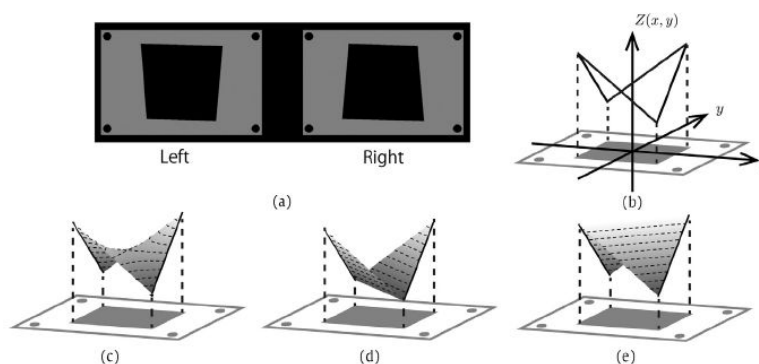


る脳領域内の細胞が解いていると考えられる電気生理実験結果が報告されており、この実験結果を記述する数理モデルも複数提案されている。しかし、多くのモデルは実験結果を ad-hoc に説明するモデルであり、結果的にどのような問題を解いているのかを明確にするモデルではない。

本研究では、物体の重なり順序と輪郭所有権問題は、電磁気学における電位と電場の関係として記述できることを見出した。さらに、ベクトル解析に関する基本定理(保存場の回転; rot はゼロである)から演繹的に輪郭所有権問題を最適化問題として定式化することに成功した。

また、既存モデルの基本構造も演繹的に導出できることを示した。上図左は輪郭の所有権方向を計算した結果であるベクトル場（電場）、図右は計算された重なり順序（電位）を示す（論文1より引用）。図は本研究で導出した視覚数理モデルを数値シミュレーションによって動作させた結果を示す。

〔面構造の知覚〕：ヒトは左右両眼像のずれ量（両眼視差）を計算することで、物体面の凹凸を推定していると考えられている。しかし、真っ黒な紙の中などの均一色領域では、両眼視差の計算は原理的に不可能である。ヒトは均一色領域においても凹凸を推定していると考えられている。Ishikawa による研究の成果として、ヒトが均一色内で知覚する面は「ガウス曲率がゼロ」として記述できることが分かっている（上図の(c)ではなく、(d)または(e)の面構造を知覚する場合が多い。論文2より引用）。



そこで本研究では実際に、上図の Left と Right の像を入力とした場合、図(d)または(e)を出力として得る視覚数理モデルを構築した。ただし、「ガウス曲率を最小化（ゼロ）」となる視覚数理モデルを直接導出すると複雑な式となり、期待する数値シミュレーション結果を得ることができなかった。そこで断熱近似とよばれる手段と、近似による不整合を解消する項を導入することで簡略化された式を導出し、期待する数値シミュレーション結果を得た。さらに、数理モデルの解析結果から視覚特性を予測し、実際に視覚心理実験をおこなうことで、モデル予測結果とヒトの知覚の整合性を確認した。

以上まとめると本研究では、いくつかの視覚情報処理を最適化問題の枠組みで定式化することで、視覚数理モデルを演繹的に導出し、数値シミュレーションや視覚心理実験結果との整合性を評価することで数理モデルの妥当性を示すことができた。視覚数理モデルはヒトの視覚予測するため、例えば自動車運転者の見えの推定や、錯視を引き起こす画像か否かの判断を可能にするため、応用上も重要な基盤を与えたと考えている。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計4件)

Zaem Zainal Abidin, [Shunji Satoh](#), A border ownership model based on computational electromagnetism, *Neural Networks*, 査読有, 99, 2018, 114-122

DOI: 10.1016/j.neunet.2017.12.004

Eiichi Mitsukura, [Shunji Satoh](#), Computational study of depth completion consistent with human bi-stable perception for ambiguous figures, 査読有, 99, 2018, 42-55

DOI: 10.1016/j.neunet.2017.11.016

Daiki Nakamura, [Shunji Satoh](#), Simple Speed Estimators Reproduce MT Responses and Identify Strength of Visual Illusion, *Neural Computing and Applications*, 査読有, online, 1-13, 2017

DOI: 10.1007/s00521-017-3211-5

### 〔学会発表〕(計7件)

Zaem Arif Zainal, [佐藤俊治](#), 境界帰属方向と物体の重なり順序を同一の計算理論により再現する視覚モデル, 日本視覚学会冬季大会, 2018

米田浩貴, [佐藤俊治](#), 水平視差推定及び視差不定領域検出アルゴリズムの構築, 電子情報通信学会総合大会, 2018

中村大樹, 柳田悠介, [佐藤俊治](#), 吉永 努, 視覚数理モデルによる錯視パターンの網羅的探索とその検証, 日本視覚学会 2018 年冬季大会, 2018

Zaem Zainal Abidin, [Shunji Satoh](#), Formulation of Border-Ownership Assignment in Area V2 as an Optimization Problem, *International Conference On Neural Information Processing*, 査読有, 2017

中村大樹, [佐藤俊治](#), 計算論的に最適な速度推定器によって MT 野細胞の複雑な反応特性を説明する, 日本神経回路学会全国大会, 2017

青島初帆, [佐藤俊治](#), 曲面知覚の観察距離依存性に関する研究, 映像情報メディア学会, 2017

Daiki Nakamura, [Shunji Satoh](#), A simple visual model accounts for drift illusion and

reveals illusory patterns, 査読有, Neural Information Processing, 2016

〔その他〕

[https://visiome.neuroinf.jp/modules/xoonips/detail.php?item\\_id=7350](https://visiome.neuroinf.jp/modules/xoonips/detail.php?item_id=7350)

[https://visiome.neuroinf.jp/modules/xoonips/detail.php?item\\_id=7305](https://visiome.neuroinf.jp/modules/xoonips/detail.php?item_id=7305)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表

研究代表者氏名：佐藤 俊治

ローマ字氏名：SATO H Shunji

所属研究機関名：電気通信大学

部局名：大学院情報理工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）： 50333844

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。