

## 学位論文審査の結果の要旨

氏名	Marcello Salustri	
学位の種類	博士（理学）	
学位記番号	甲第1993号	※論文博士は乙
学位授与の日付	令和6年3月25日	
学位授与の要件	文部科学省令学位規則第4条第1項該当	※論文博士は第4条第2項
学位論文題目	Heterogeneous axonal delay improves the spiking activity propagation on a toroidal network	
主指導教員	Ruggero Micheletto	
論文審査委員	(主査) 吉本 和生	教授
	(副査) 篠崎 一英	教授
	(副査) 立川 正志	准教授
	(副査) 島崎 智実	准教授
	(副査) 北城 圭一 (外部委員)	教授

## 論文内容の要旨

脳の研究は、科学の新たなフロンティアのひとつであり、近い将来、社会に革命をもたらすような人工的な知的システムを実現化できる可能性がある。脳はニューロンの複雑なネットワークとして構成されており、その機能を模擬した理論モデルがここ数十年にわたり研究されてきた。これらのモデルは非常に複雑であり、多くの重要なパラメータを含んでいる。脳を構成する個々のニューロンの特性は異なるため、理論モデルの構成要素のパラメータはある値を中心に分布すると考えるのが適当である。本研究では、ネットワークパラメータの不均一性に注目し、新規の数学的フレームワークで表現した理論モデルの特性を効率的なシミュレーションアプローチを用いて評価することにより、不均一性の影響を定量化することに成功した。その結果、不均一性によるネットワーク特性の強化現象として Stochastic Grid Enhancement (SGE) や Stochastic Neural Enhancement (SNE) などを発見した。

本論文では、初めに、脳を構成するニューロンの反応特性について簡単に説明し、続けて、本研究で理論モデルに採用したIzhikevichモデルについて詳細に説明した。同モデルは2変数による単純な微分方程式であり、シミュレーションにおける計算効率が高く、大規模なネットワークの応答を短いCPU時間で評価できる。この高効率に

も関わらず、Izhikevichモデルは生体内のニューロンの振る舞いをよく表現できる。実際、このモデルでは、いくつかのパラメータの値を変えるだけで多様なタイプの生体ニューロンを表現できる。本研究では、ニューロンがトーラス状に接合したネットワークの応答特性について評価した。隣接するニューロンはフォン・ノイマン近傍モデルによって接続した。このネットワークは、生体の脳と同様に有限の規模ではあるが、特徴的な始点や終点を持たない構造である。

シミュレーションでは、ひとつのニューロン（入力ニューロン）だけが、外部電流によって刺激され、規則的な電気インパルスを連続的に放出するものとした。このシミュレーションにより、ニューロン間の距離に不均一性を加えた場合に、ネットワーク内における信号の伝播速度が大きくなる現象（SGE）を見出した。また、この現象の理論的な解析により、入力インパルスが複数ある場合には、ニューロンの応答時間は短くなり、入力信号の重なりが不均一性が高まると伝播速度が速くなる原因であることをモデルによって説明した。さらにシミュレーションにおいて、Izhikevichモデルのパラメータを変化させてニューロンの発火特性に不均一性を導入した。その結果、ニューロンの発火特性の不均一性が信号の伝播特性（ロバスト性）を向上させること、すなわち単位時間当たりの電気インパルス数を増加させる現象（SNE）を発見した。

さらに、上述の2つの現象について、ネットワークの幾何学的次元を増やすことによって、それらの特性に変化が見られるかどうか検討した。具体的には、3次元のトーラスから4次元のトーラス、そして5次元のトーラスへと、次元の増加に伴う2つの現象の変化を評価した。その結果、多項係数の近似式を用いたアプローチにより、ネットワークの幾何学的次元を大きくすることで、信号が通る経路の数が増えるため、SGEがより強化されることを示した。

本研究では、2つのニューロン間の最小距離とその間の伝播時間についても分析した。パルス列のエントロピーの測定によって、等価クラスと呼ばれる数学的構造が形成されることを見出した。クラスの解析によって、その幾何学的形状は八面体の形状と決定された。様々なクラスにおけるパルス列の詳細な特性が定義され、クラスに属するニューロンが類似した特性を持つことが明らかになった。この発見は、同じ特徴を持つあるクラスのニューロンを分析することで、時間を節約し、特定のプロセスをよりよく理解することができる可能性を示すものである。

上記の本研究の成果は、新しい数学的アプローチによるニューロンネットワークの研究への扉を開くものである。ニューロン間の距離の不均一性の影響の研究、およびニューロンパラメータの変動の研究は、信号がより高速度でロバストに伝播する、より優れたネットワークの実現化に役立つものと考えられる。さらに、等価クラスの研究は、ニューロンネットワークを新たな視点から分析することを可能にし、ニューロンの単一クラスの研究の進展が期待される。



## 論文審査結果の要旨

初めに学位申請者であるMarcello Salustriより、トロイダルネットワーク内の不均一性とスパイク信号の伝播の関係について、①ニューロンの距離とニューロンの発火特性の不均一性による信号伝播特性の強化、②ニューロンネットワークの幾何学的次元による信号伝播特性の変化、③ニューロンネットワークの等価クラス、に関する発表が行われた。

この発表に関して、まず専門分野について質疑応答が行われた。立川副査より「統計的に同程度の不均一性のネットワークでも、個々のネットワークには信号の伝播特性にばらつきがあるので、その統計的な評価は重要でないか」と指摘があり、「そのことは認識している。十分な標本数を用いた統計的な解析は今後の研究課題である」と回答があった。続いて、「チャタリングニューロンをより活発化するようにパラメータを変動させてシミュレーションを行うと、どのような結果が得られるか」と質問があり、「本研究では、Izhikevichによって提案された生物学的なモデルパラメータに限定して解析を行った」と回答があった。吉本主査より「入力ニューロンの位置は評価結果に影響しないのか」と質問があり、「入力ニューロンの位置は関係ない。ネットワーク内の信号の伝播速度は、入力ニューロンと出力ニューロンの距離だけで特徴付けられる」と回答があった。続いて「シミュレーションにおけるニューロンの応答がより短時間で、デルタ関数的である場合にも、SGEとSNEは確認できるのか」と質問があり、「その問題は詳細に検討する必要があるが、それらの現象はある程度は確認されると推測される」と回答があった。また、「幾何学的次元が高くなるにつれて、SGEが強化される理由は？」と質問があり、「同じマンハッタン距離でも、信号が出力ニューロンに到達するまでの経路の数が増えるためである」と回答があった。篠崎副査より「ニューロンネットワークの不均一性の増大によって、信号の伝播速度が大きくなることは理解できるが、今後の課題として、信号の強度の変化についても明らかにしてほしい」と指摘があった。続いて、「トロイダルネットワーク内の等価クラスはどのように決定しているのか」と質問があり、「マンハッタン距離の最小値と出力ニューロンまでの経路数に基づいて決定している」と回答があった。島崎副査より「どのような仕組みでSGEは発現するのか」と質問があり、「軸索上の信号の伝達時間が短く、ニューロンがまだ前の入力信号を処理しているときに別の信号が到達すると、反応が増強されて出力信号が早く出されるため」と回答があった。また、「SGEが発現しているときにネットワークのロバスト性はどのようになっているか、また、この効果と脳における生物学的機能との関連は？」と質問があり、「ネットワークの振る舞いはネットワークパラメータによって特徴づけられ、実際の脳との関係は不明であるが、今後シミュレーションから推測することが可能かもしれない」と回答があった。北城副

査より「SNEが発現したときに、スパイクタイミングの精度はどうか」と質問があり、「スパイクタイミングの信頼性が増し、数が増えるので精度も向上すると考えられる」と回答があった。続いて、「実際の脳の構造は複雑であり、脳構造の不均一性が脳機能に与える影響についての研究は重要である」と指摘があり、「その影響をSGEとSNEに注目して詳しく調べるために、今後とも理論およびシミュレーションを行っていきたい」と回答があった。以上を総合的に踏まえ、専門分野について高い学識を備えていると判断した。

次に、関連する専門分野について質疑応答が行われた。立川副査より「実際の生物学的モデルへの応用にはどれくらいの段階が必要なのか」と質問があり、「少なくとも3つのステップが必要である。初めにシミュレーションの規模を大きくすること、次により現実的なパラメータを導入すること、そして生物学的な実験を行いシミュレーションと比較することである」と回答があった。吉本主査より「Izhikevichモデルを他の生物学的モデルで置き換えることは可能か、また、このネットワークの応用例はあるか」と質問があり、「他の神経細胞モデルを用いたシミュレーションは可能である。また、このネットワークは画像解析のような他の分野や、類似した問題がある宇宙研究の分野にも応用できる」と回答があった。島崎副査より「ネットワーク特性の非線形性の原因はニューロンモデルだけか？また、本研究内容の発展的な応用は考えられるか」と質問があり、「そのように思う。ただし、厳密な検証には異なるニューロンモデルを用いたシミュレーションが必要である。また、本研究内容の自然な応用分野は画像解析であるが、医学分野における脳の機能障害の研究などにも有用であると考えられる」と回答があった。以上を総合的に踏まえ、関連分野について幅広い知識は十分にあると判断した。

最後に、英語能力について質疑応答が行われた。吉本主査より、「国際学会に参加して英語で研究発表をした経験はあるか」と質問があり、「新型コロナウイルスの影響で回数は多くないものの経験はある」と回答があった。また、「国際ジャーナルへの論文投稿はどのように行ったか」と質問があり、「初めての論文では執筆やエディターとのやり取りを指導教員に手伝ってもらったが、それ以後の論文ではほぼ自分でやっている」と回答があった。以上を踏まえ、英語に関して十分な能力があると判断した。

以上の理由より、学位申請者は専門分野だけではなく、関連する理学の知識も十分に有しており、今後自力で研究を遂行する能力を備えていると判断し、総合的に博士（理学）の学位を授与するのに相応しいと判断した。