

氏名	佐久間 俊
学位の種類	博士（応用情報科学）
学位記番号	博情第 48 号
学位授与年月日	平成 30 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当（課程博士）
論文題目	2次元メッシュニューラルネットワークにおけるスパイク波伝播と発信源の識別—シミュレーションによる解析検証—
論文審査委員	（主査）教授 水野（松本） 由子 （副査）教授 竹村 匡正 （副査）准教授 原口 亮

### 学位論文の要旨

脳は、およそ 140 億個の神経細胞（ニューロン）と、その 10 倍以上の数の神経グリア細胞から構成され、活動電位（スパイク）と呼ばれるニューロンから生理学的に発生する短い電気信号により情報が伝播される膨大なネットワークを形成している。このスパイクにより脳内情報の表現・記憶・処理・通信などいわゆる知的活動が行われていると考えられている。人間の脳は、現在のコンピュータや情報処理装置では、実現できない高度な情報処理能力を多く持っているが、脳内のメカニズムの詳細については、依然未解明のままである。筆者は、田村進一大阪大学名誉教授をリーダーとする研究グループ（以下田村グループ）と共同で、脳情報処理に関する研究に取り組み、本研究では通信の観点から神経回路網のシミュレーションを行ない、個々のニューロン特性を調べ、通信識別が可能か探った。

第 1 章において、本研究の基礎となる記憶、神経細胞、ニューロンの発火モデル、ニューラルネットにおける学習則について述べる。

第 2 章では本研究と関連した先行研究について述べる。

第 3 章では、発火シミュレーションにおけるスパイク波伝播と DTW 法による発信源識別についての研究成果を述べる。個々のニューロンで全く異なる性質を持ち、そのニューロン同士が通信できることを確認する。3 つの刺激されたニューロン群を刺激ニューロン群とした。スパイク波は、刺激されたニューロン群から他のニューロンに伝播した。シナプス伝播遅延と不応期間の分散は、0.167、0.333、0.500、0.617、1.000、または 2.000 [bin<sup>2</sup>] (bin=0.1msec) の 6 種類に設定した。刺激は上、左、斜め上から与える 3 種類のシミュレーションを用意した。1 つのニューロンのスパイク間隔シーケンスを 10 回の試行で 0.0-100 msec の間で計算した。上からの刺激の試行のスパイク間隔の時間差を計算するために、10

回の試行の組み合わせ（合計45セット）でDTW値を計算した。DTW値を、各ニューロンについて10回の試行の間に計算した。同様に、左からの刺激の試行でのスパイク間隔の時間差を計算するために、10回の試行の組み合わせ（合計45セット）でDTW値を計算した。同じ刺激群（上または左）を用いた10回の試行の組み合わせにおけるDTW値を測定し、90組（上と左の合計組）の平均を計算した。これらの計算を *Local DTW* と定義した。上からの刺激と左からの刺激の試行間のスパイク間隔の時間差を計算するために、それぞれの10試行の組み合わせ（合計100セット）についてDTWを計算した。この100セットの平均を計算した。これらの計算を *Inter DTW* と定義した。

*Local DTW* と *Inter DTW* の値の結果を比較するために、5%有意水準で両側 t 検定を使用した。*Inter DTW* が *Local DTW* より有意に値が高値を示すニューロンの数を数えた。有意に値が高値を示したニューロンは、上からの刺激または左からの刺激を識別できると考えられた。分散値2.0の伝播速度は、分散値0.167の伝播速度よりも速かった。したがって、シナプス遅延および不応期が変更された場合、分散値が増加するにつれて伝播速度が増加すると考えられる。シナプス遅延および不応期の分散値が0.167から0.667に増加すると、上からの刺激および左からの刺激を識別できるニューロン数の割合が増加した。しかし、分散値が0.667を超えると、刺激されたニューロンを識別できる割合が減少した。本研究より、ニューロンの発火伝播経路を変化・短縮させるためには、シナプス伝播遅延および不応期間のいくつかの変動が必要であることを示唆した。

第4章ではDTW法を用いた刺激部位の識別可能領域についての研究成果を述べる。変動する特性を持つニューロンからなるニューラルネットワークがどのようにして情報を伝達することができるかは依然謎である。この謎を解く試みとして、スパイク符号化、時空間コーディングモデル、同期モデルなど、多くのアプローチが提示されている。通信の観点から、ニューラルネットワークの中で多重通信ができることを第3章で示した。本研究では、各ニューロンの出力遅延時間、シナプス伝播遅延にゆらぎを持たせたスパイク波の伝播シミュレーションを行い、第3章と同じくDTW法を用いて刺激を識別できるニューロンのエリアが分散ごとにどのようになっているかを調べた。その結果、刺激を与えるニューロン群間の距離が遠い程、刺激を識別できる受信ニューロンの個数が増加した。また2種類の刺激ニューロン群と受信ニューロンとの間の3つの距離を算出し、送受信間の差が大きければ識別ができ、近ければ識別できないと考えられた。

第5章では、ニューラルネットワークにおけるHebb則による刺激位置の識別と伝播経路の短縮に必要な学習時間についての研究成果を述べる。本研究では、学習効果に重点を置くため9×9のスパイク応答をシミュレートし、各通信が3種類全ての刺激の識別が成功するまでの学習回数を数えた。さらに、学習前（第1回の試行）の発火伝播時間と学習後の

発火伝播時間を比較した。各通信が 3 種類の刺激に成功するまでの学習回数を数えた。その結果、垂直方向、水平方向、斜め方向の様々な方向に配置した方が学習回数は少なくなることを示し、学習後の発火伝播時間は学習前の発火伝播時間が減少することを示した。したがって、Hebb 則が発火経路の短縮に寄与し、ニューラルネットワークにおける通信の高速化に寄与することを提案する。

第 6 章では刺激数を変化させた際のシミュレーション結果とランダムに配置した時の刺激発信源の識別に必要な学習回数の結果を示す。第 7 章では今後の課題を述べる。第 8 章では総括を述べる。本研究のシミュレーションを用いてニューロンの刺激発信源の識別が可能かを調べた。このシミュレーションを用いて、より詳細にシミュレーションを解析することは可能である。したがって、将来の研究では、各ニューロンの生来の特性を調べる必要がある。

本博士論文の成果は、ニューラルネットワークにおける通信が可能であると見出すことができたことが研究から得られた一連の知見である。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、通信の観点から神経回路網のシミュレーションを行ない、個々のニューロン特性を調べ、通信識別が可能かを調べたものである。博士論文は次の章より構成されている。

第 1 章において、本研究の基礎となる記憶、神経細胞、ニューロンの発火モデル、ニューラルネットにおける学習則について解説した。

第 2 章では本研究と関連した基礎となる先行研究について述べた。

第 3 章では、発火シミュレーションにおけるスパイク波伝播と DTW 法による発信源識別についての研究成果を述べた。個々のニューロンで全く異なる性質を持ち、そのニューロン同士が通信できることを確認した。3 つの刺激されたニューロン群を刺激ニューロン群とし、スパイク波は、刺激されたニューロン群から他のニューロンに伝播させた。刺激の試行のスパイク間隔の時間差を計算するために、試行の組み合わせで DTW 値を計算した。Inter DTW が Local DTW より有意に高値を示すニューロンの数を数えた。有意に値が高値を示したニューロンは、上からの刺激または左からの刺激を識別することができると考えられた。本研究より、ニューロンの発火の伝播経路を変化させるためには、シナプス伝播遅延および不応期間のいくつかの変動が必要であることを示した。

第 4 章ではインテグレートファイアモデルを用いて、2 次元神経回路網における刺激部位の識別についての研究成果を述べた。各ニューロンの出力遅延時間、シナプス伝播遅延にゆらぎを持たせたスパイク波の伝播シミュレーションを行い、DTW 法を用いて刺激

を識別できるニューロンのエリアが分散ごとにどのようになっているかを調べた。その結果、刺激を与えるニューロン群間の距離が遠い程、刺激を識別できる受信ニューロンの個数が増加した。送受信間の差が大きければ識別ができ、近ければ識別できないと考えられた。

第5章では、ニューラルネットワークにおける Hebb 則による刺激位置の同定と伝播経路の短縮に必要な学習時間についての研究成果を述べた。9×9 のスパイク応答をシミュレートし、各通信が3種類の刺激に成功するまでの学習回数を数えた。本研究のシミュレーションを用いてニューロンの刺激発信源の識別が可能であることを示した。

第6章では刺激数を変化させた際のシミュレーション結果とランダムに配置した時の刺激発信源の識別に必要な学習回数の結果を示した。第7章では第3章から第6章までに得られた結果の考察を述べ、第8章では総括を述べた。

本博士論文より得られた一連の成果は、ニューラルネットワークにおける通信が可能であると見出すことができたことである。これらの成果は、将来、脳内情報の表現・記憶・処理・通信などいわゆる知的活動の解明の一助となる意義の高い知見であったと考えられる。

以上を総合した結果、本審査委員会では、本論文が「博士（応用情報科学）」の学位授与に値する論文であると全員一致により判定した。