

審査の結果の要旨

氏名 中村光晃

「スパイク時刻依存シナプス可塑性によるシナプス集団の学習への影響」と題する本論文は、シナプス結合強度のスパイク時刻依存シナプス可塑性(STDP)に着目し、シナプス結合強度分布の理論的な予測手法、および神経回路の働きに有利になると考えられる機能を発現しうる新たなSTDP更新則を提案している。また、生体内で実際の情報処理を行うのに用いられると考えられている神経回路を学習によって獲得するモデルにおいてSTDP以外に適切な水平結合を必要とすることを示している。本論文は大きく2部構成、全体で9章から構成されている。

第1章は序論であり、本論文が対象とする、STDPに関する電気生理学的な知見、およびSTDPの存在によって実現されると考えられる機能について、大まかに説明している。近年になって新たに知られるようになった、STDPによるシナプス結合強度の変化量が元のシナプス結合強度にも依存する、乗法的STDPについても簡単に説明している。

第2章は本論文の目的を述べている。まず第I部では、乗法的STDPの存在下におけるシナプス集団の結合強度分布変化を記述するFokker-Planck方程式を提案している。合わせて、機能的にシナプス競合や発火率調整を示しうる乗法的STDP更新則も提案している。また第II部では、音源定位神経回路のSTDPによる学習について、ニューロン間にメキシカンハット型の結合強度分布を持つ水平結合を導入することで確率的Winner-Take-Allが実現し、複数のニューロンが回路全体として適切に役割を分担できるようになることを述べている。さらに、第I部で提案する乗法的STDP更新則を用いても、加法的STDPと同様に音源定位神経回路を学習できることを示している。

第I部はFokker-Planck方程式をシナプス集団の結合強度分布のSTDPによる経時変化に適用する手法を拡張し、乗法的STDPによるシナプス結合強度分布の時間変化を予測する手法を提案している。

第3章はSTDPによるシナプス結合強度分布への影響に関する先行研究についてより詳細に説明している。乗法的STDP以前に知られていた加法的STDPを対象にしてシミュレーションで調べられた結果ではシナプス競合や発火率調整といった機能が実現されるのに対して、ある種の乗法的STDPではそれらの機能が実現しない、とされていることを紹介している。

第4章はFokker-Planck方程式を用い、モデルニューロンの挙動を時間に沿って追跡することなく、シナプス結合強度分布のSTDPによる変化を予測する手法を乗法的STDP更新則全般に適用できるよう拡張する手法を提案している。

第5章は第4章で提案したFokker-Planck方程式を用い、シミュレーションによる先行研究で用いられたある種の乗法的STDPに基づいて平衡状態におけるシナプス結合強度分布を導出している。この結果は、先行研究のシミュレーションによる結果と一致するとしている。また、加法的STDPと同様にシナプス競合や発火率調整を示すような乗法的STDPを提案し、このSTDP更新則に対してFokker-Planck方程式およびモデルニューロンを用いたシミュレーションでその性質を示している。

第II部はSTDPによって音源定位回路を学習するモデルについて、複数のニューロンが存在する場合はSTDPに加えて水平結合を用いることで位相保存マップを形成できることを示そうとしている。

第6章はニューロンの情報符号化に関する大きな二つの仮説、発火率符号化と時間符号化のうち、時間符号化

的な性質が強いという観点から音源定位能力に着目し、音源定位に関する生理学的な知見、およびシミュレーションを用いた先行研究について紹介している。音源定位神経回路の後天的な獲得手段としてSTDPによる学習のみのモデルが抱える問題点を指摘している。

第7章は第6章でSTDPのみを用いる音源定位回路学習モデルの問題点を解決する手段として、ニューロン間に広い範囲の抑制性結合を持たせることで確率的なWinner-Take-Allを実現してニューロン相互の役割を分担させ、同時に狭い範囲の興奮性結合を持たせることによって位相関係を保存し、全体として位相保存マップを形成できることを示している。

第8章は第5章で提案した、加法的STDPと同様にシナプス競合・発火率調整を可能にする乗法的STDP更新則を用い、単一ニューロンで加法的STDPと同様の学習が可能であり、複数ニューロンを持つネットワークモデルでは広い範囲に抑制性、狭い範囲に興奮性の水平結合を導入することで、全体として位相保存マップを形成しうることを示している。

第9章は論文全体を結論し、乗法的STDPに対応したFokker-Planck方程式によるシナプス結合強度分布予測手法を提案し、シナプス競合・発火率調整機能を持ちうる乗法的STDP更新則が存在しうることを示したとしている。また、音源定位神経回路において、STDPに加えて適切な水平結合を導入することで位相保存マップを形成できると主張している。

以上、近年発見されたスパイク時刻依存シナプス可塑性に対して、理論的、数値シミュレーション的解析を行うことによって、生体神経網の自己組織化および学習の研究に大きく貢献している。よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。