

氏 名	みなみ 哲 人
学位の種類	博 士 (情報学)
学位記番号	情 博 第 110 号
学位授与の日付	平成 16 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	情報学研究科知能情報学専攻
学位論文題目	ワーキングメモリの脳内活動ダイナミクスを説明する神経回路網モデル

論文調査委員 (主 査) 教授 乾 敏 郎 教授 松 山 隆 司 教授 石 田 亨

論 文 内 容 の 要 旨

ワーキングメモリは、行動的に意味のある情報を選択・操作して、一時的に保持し、その情報を基に行動に導く機能であり、その仕組みの解明は、認知機能の理解に大きく貢献するものと考えられる。これまで、脳イメージング研究やニューロンレベルの研究が、豊富になされ、ワーキングメモリに関する多くのデータが得られてきたが、ワーキングメモリのニューロン・システムについては、まだ十分に分かっていない。そこで、本研究では、ワーキングメモリを系統的に理解するために、サルを対象として行われた、ワーキングメモリ・タスクにおける前頭前野ニューロン活動をシミュレーションすることにより、ワーキングメモリ・システムを、具体的なニューロン活動の相互作用ネットワークとして表現することを目的とした。

第1章では、ワーキングメモリ研究の背景、流れ、そして、その中での、本研究の目的・意義などを述べた。

第2章では、形態と位置に関するワーキングメモリ・タスク中のニューロン活動における脳内メカニズムを明らかにするために、ワーキングメモリのニューラルネットワークモデルを提案した。そのモデルを用いて、Raoら(1997)の生理実験で示された形態情報に応答するニューロン、位置情報に応答するニューロン、形態と位置の両情報に応答するニューロンの発火パターンを再現できた。さらに3つのモデル構造における結果を比較することにより、ワーキングメモリの領域特異性に関する考察を行い、前頭前野ワーキングメモリには領域特異性がないことを、構成論的手法により示した。

第3・4章では、ワーキングメモリの処理過程におけるダイナミクスに焦点を当てるため、抽象的な情報処理として最近注目されている前頭前野におけるルール情報処理のシミュレーションを行った。その結果、Wallisら(2001)で示されたルール選択性ニューロンの特性を再現することができた。さらに、モデルのユニットの時間パターンと結合荷重を分析し、その特性を生理実験結果と比較した。その結果、結合荷重の分析を通じて、ルールに基づいた遅延見本合わせ課題を行うときの前頭前野の機構を明確にし、ルール選択的なニューロンの機能的な役割を解明した。さらに、学習していない入力に対しても、タスクが出来るように、モデルを拡張して、提示期間、遅延期間、反応期間において、より詳しくユニット特性を見ることにより、生理実験との比較を行い、生理実験結果に対する予測を行った。

第5章では、前頭前野ワーキングメモリ課題の抽象的な情報処理であるカテゴリ情報処理の神経基盤を調べた。カテゴリ情報処理も、ルールと同様に、外部情報から共通点を引き出し、それを保持して、行動に関連づけるという点で、ワーキングメモリの機能といえる。提案したモデルにより、Freedmanら(2001)の生理実験のシミュレーションを行い、各種刺激選択性ニューロンの時間特性を再現し、その機能的役割を示した。その結果、前頭前野におけるカテゴリ選択性活動が、下側頭葉における複雑な形態についての選択性をタスクに応じて分類した結果の脳内ダイナミクスを反映したものであることを明らかにした。

最後に第6章では、本研究の結果を総括し、その結果を議論するとともに、統合的なワーキングメモリモデルを提案し、今後の研究についての展望を述べた。

このように、本モデルは、前頭前野ワーキングメモリのニューロン・システム特性を包括的に再現することが明らかになった。本研究は、ワーキングメモリの機能における保持機能だけではなく、情報操作・加工機能も、リカレントネットワークにより説明できることを示すとともに、実験では一致した見解が得られていないワーキングメモリの脳内機構について、モデルの立場から、前頭前野におけるニューロン・システムとしてのネットワークを提案した。

論文審査の結果の要旨

本論文は、ワーキングメモリを系統的に理解するために、サルの前頭前野ニューロン活動を調べた生理実験をシミュレーションした結果をまとめたものである。シミュレーション結果をもとに、生理実験結果を説明するだけでなく、生理実験結果に対する予測を行い、ワーキングメモリ・システムにおけるニューロン活動の相互作用ネットワークを提案している。得られた主要な研究成果は次の通りである。

(1) Raoらの生理実験で示された形態情報に応答するニューロン、位置情報に応答するニューロン、形態と位置の両情報に応答するニューロンの発火パターンを再現し、さらに3つのモデル構造における結果を比較することにより、ワーキングメモリの領域特異性に関する考察を行い、前頭前野ワーキングメモリには領域特異性がないことを、構成論的手法により示した。

(2) ルールに基づいた遅延見本合わせ課題を行うときの前頭前野の機構を明確にし、ルール選択的なニューロンの機能的な役割を解明した。さらに、学習していない入力に対しても、タスクが出来るように、モデルを拡張して、提示期間、遅延期間、反応期間において、より詳しくユニット特性を見ることにより、生理実験との比較を行い、生理実験結果に対する予測を行った。

(3) Freedman et alらの生理実験のシミュレーションを行い、各種刺激選択性ニューロンの時間特性を再現し、その機能的役割を示した。その結果、前頭前野におけるカテゴリ選択性活動が、下側頭葉における複雑な形態についての選択性をタスクに応じて分類した結果の脳内ダイナミクスを反映したものであることを明らかにした。

本論文は、認知心理学的にも、神経生理学的にも、議論の多いワーキングメモリ・システムについて、ニューラルネットワークモデルを構成するという手法によりアプローチしている。モデル構築の過程では、できるだけ生理実験などの結果に忠実であり、「認知科学的な考え方」を踏まえて、「数理的」なモデルを提案している点で評価できる。また、モデルは、複数の生理実験における前頭前野ワーキングメモリのニューロン・システム特性を包括的に再現しているという点で、重要な意味を持っている。さらに、生理実験結果に対する予測・提案なども行っており、生理学に寄与するところが少なくないと考えられる。この研究は今後より詳細な時間特性を含めることでより現実的かつ定量的なモデルへと発展することが大いに期待される。

よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成16年2月16日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。