

論文審査の結果の要旨

氏名 齋藤 大

脳の学習能力は、ヒトや動物が持つ柔軟で多様な機能を獲得するために必要不可欠なものである。本論文では、脳内に残留する過去の情報の痕跡（トレース）が学習に与える影響を数理的なアプローチで研究している。本論文は全 6 章からなり、第 1 章では論文の背景、第 2, 3 章では報酬型学習における時空間的信頼度割当問題の解決、第 4 章ではマッチング行動の学習理論、第 5 章では将来予測学習の神経基盤、第 6 章では結論を述べている。

第 2, 3 章では、報酬が持つ時空間的な不確実性に対するトレースの効果を論じている。脳の神経活動は時々刻々変化し、また、複数の部位が相互作用しながら動作している。そのため、どの時点のどの部位の活動が報酬獲得に寄与したかが不明であり、学習が困難となる。時間的な不確実性に対しては、適格度トレースによって解決可能であることが Izhikevich によって提案されている。しかしながら、報酬の時間遅れに対する適格度トレースの定量的な効果は不明であった。本論文では、空間的な不確実性への解決策としてノードパータベーション学習則を提案している。この学習則と適格度トレースを組み込んだ神経回路モデルを数理的に解析し、時空間的な不確実性がある学習におけるトレースの効果を議論している。その結果、時空間的な不確実性は相互作用を伴って学習に影響を与えること、適格度トレースが時空間的な不確実性を部分的に解消することが示されている。

第 4 章では、計算論的な観点からヒトや動物が示すマッチング行動の学習理論を提案し、報酬のトレースが学習に与える効果を示唆している。変動時間隔摂餌課題において、被験体は選択肢を選んだ割合がその選択肢によって得た報酬の割合と合致するというマッチング行動を示すことが知られている。近年、Sugrue ら、Glimcher らによって、変動時間隔摂餌課題における選択は直近の報酬履歴に強く影響を受けることが示された。また、その報酬履歴依存性は二重指数や双曲線関数などのロングテールな関数でよく回帰されることが報告されている。しかしながら、この報酬履歴依存性を生み出す計算原理は分かっていない。本論文では、三つの計算論的なベイズ意思決定モデルを提案し、数理解析と数値シミュレーションを行っている。その結果、環境が突然変化する可能性を仮定した計算によって、マッチング行動が生み出されると提案している。さらに、報酬のトレースが環境の不確実性を前提とした計算を実現するアルゴリズムであることを示唆している。

第 5 章では、神経回路による将来予測モデルを提案し、環境状態のトレースが学習に与える影響を論じている。環境の状態は時々刻々と変化するものであり、その将来状態

を経験に基づいて予測することは、ヒトや動物の持っている重要で基本的な能力の一つである。将来状態の予測には状態の遷移確率の学習が必要不可欠であるが、近年の脳機能イメージング研究によって、遷移確率が脳内に符号化されていることが示唆されている。しかしながら、状態遷移確率を学習する生物学的に妥当な学習則は分かっていない。本論文では、ヘブ則と活動依存的な荷重減衰に基づいた神経回路モデルの学習則を提案し、数理解析と数値シミュレーションを行っている。その結果、モデルが状態遷移確率を学習できることが示されている。また、ランダムドット刺激の方向弁別課題において、サル心理測定関数と外側頭頂間野ニューロン活動を再現することが示された。さらに、状態の適格度トレースを導入した場合の解析も行われている。その結果、予測性能が向上すること、環境そのものの変化への追従性が改善されることが示されている。

以上のように、本論文は理論的なアプローチを用いて、脳の学習における情報トレースの効果について新たな知見を得ることに成功している。また、これらの結果は神経科学だけに留まらず、適応的なシステムを扱う分野においても有用な知見を与えるものである。

なお、本論文第 2, 3, 4 章は、片平健太郎、岡ノ谷一夫、岡田真人、第 5 章は、瀧山健、岡田真人との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。

以上 1762 字