

学位論文題名

Theoretical Study of Artificial Neural Networks
With Magnetic Field Information

(磁場情報付き人工神経回路網の理論的研究)

学位論文内容の要旨

多数の情報処理単体機構(以下ユニットと呼ぶ)により並列分散的に情報処理を行うメカニズムとして、これまで二つのモデルが提示されていた。すなわち人工神経回路網に代表されるユニット間の結線結合構造を採るモデル(ネットワークモデル)と、ユニット間に結線結合を持たずに波動などを媒体とした場における情報処理を目的とするモデル(場モデル)である。ネットワークモデルには以下の三つの利点が考えられる。すなわち構造の可塑性、または記憶能力を持っていること;情報伝達時におけるその情報の純度を保証できること;およびユニット同士の間の距離は情報伝播と関係がないこと;である。しかし欠点は結線の多さに起因する機能の妨げが起こることである。一方、場モデルの利点はユニット同士の間での情報交換の自由度が高い、情報処理の柔軟性が高くなるということである。しかしこのようなモデルは構造の可塑性、または記憶能力を持っていないメモリレス(memoryless)モデルと考えられる。自由度が高くなると共に、不要な情報による妨害問題も出てくる。また、情報の伝播はユニット間の物理的距離と関係する。上述のようにこれら二種類のモデルにはそれぞれ長短の特徴があるが、人間社会を含め自然界における情報処理の構造はこれらの二つの混合型構造(Hybrid-Architecture)を示すことが多い。このような認識の下に、本研究は磁場情報を導入したことによって、これらの混合型構造の取り得る一つの「人工神経電磁場モデル」と呼ばれるモデルを理論的に構築しその情報処理機構としての妥当性を検証することを目的とする。

まず、本研究では「人工神経電磁場モデル」と呼ばれるモデルの中で基本的構成要素である単一ユニット(単一ニューロン)の場合について考える。磁場という情報媒体を従来の人工神経回路網におけるニューロンモデルに導入した、単一ニューロンモデル(以下簡便さのためこれをU-Hynuronモデルと呼ぶ)を構築した。U-Hynuronモデルの定性的動作特性は以下のような特徴を持つものと仮定する。(1). 入力信号には電気信号と磁気信号の2種類を考える、(2). U-Hynuronが活性化し、電位と磁位とも急に変化することを興奮(発火)とする、(3). 膜電位があるしきい値以上に高くなればU-Hynuronは出力電気パルスを発生し、それ以外の場合は発生しないものとする、(4). 出力信号には出力電気信号と出力磁気信号の2種類を考える、(5). U-Hynuronは興奮し続けることにより興奮しにくくなり疲労する。このような特性を実現するU-Hynuron数理モデルを構築した。その構築方法は以下のように展開される。McCulloch-Pittsらの連続時間ニューロンモデルに磁場情報を導入し、Maxwellの方程式とFaradayの法則に従って、U-Hynuronが持つ特性による内在関係を数理モデルとして表現する。この数理モデルは一種の非線形情報処理モデルであり、このモデルには、学習と記憶の関係を含んでいる。つまり、本モデルに関する期待機能としての一般の人工神経回路網の場合と同様に、学習機能発現があ

る。上述の数理モデルから学習と記憶との数学関係式を導出することができる。この関係式を学習ルールと呼ぶ。この学習ルールは学習機能のメカニズムを数学的に表わす。その学習メカニズムによって、U-Hynuronは磁場情報を通じて、結合荷重を変化させ、学習することになる。上述の学習メカニズムは従来の学習メカニズムとは異なり、“人間の評価基準”によるものではなく、物理的相互作用（電気情報と磁気情報との相互作用）の中で自然法則から必然的に誘導されたものである。U-Hynuronはこのような学習メカニズムを用いて、自ら学習目標に達することができる。このために、U-Hynuronモデルは学習能力と自律能力を持っていると考えられる。学習ルールからも明らかのように制御情報としての磁場情報は内部磁場情報（U-Hynuron自ら生じた磁場情報）と外部磁場情報（ほかのU-Hynuronからの磁場情報）に分かれる。それらの制御作用に基づき、二種類の学習方式を考案した。すなわち、リフレックス(reflex)学習とユニオン(union)学習である。リフレックス学習では、制御情報としての磁場情報には内部磁場情報のみを含む。ユニオン学習では、制御情報としての磁場情報には内部磁場情報と外部磁場情報の両者を含む。導出した学習ルールに基づいて、リフレックス学習定理とユニオン学習定理をそれぞれ導き、その正当性を証明した。さらに、この二つの学習定理からリフレックス学習公式とユニオン学習公式がそれぞれを導出される。その正当性を議論することによって、学習メカニズムにおける磁場情報の作用が明らかになった。また、計算機実験によって、外部磁場情報がU-Hynuronに与える影響も明示した。

次に、以上展開したU-Hynuronモデルの機能を検証することを目的として紙幣の識別問題を取り上げる。従来の識別手法（バックプロパゲーション方法）より、多数のU-Hynuronを用いる本提案手法はかなり良い結果をもたらした。この応用問題を通して、U-Hynuronの有効性と有用性を示した。また、応用問題特性と関係するU-Hynuronの汎化能力に関する若干の考察を行った。その結果によって、本研究で提案した汎化能力を増加する手法は、Reedによるニューラルネットワークにおけるそれよりもっと簡単、しかも効果が顕著であることを示した。

最後に、ネットワークモデルと場モデルからの二つの混合型構造（Hybrid Architecture）の取得の一つのモデル、すなわち“人工神経電磁場モデル”を理論的に構築しその情報処理としての妥当性を検証した。

上述したU-Hynuronモデルは非線形モデルであり、学習能力と自律能力を持っているが、一個のU-Hynuronとして、情報処理能力に局限性がある。つまり、一個のU-Hynuronにおける記憶容量 n が有限で、学習目標の数も一つしか設定できないので、一個のU-Hynuronのみでは協調能力、自己組織化能力及び創発(Emergence)能力に限界がある。この限界を克服するために、複数U-Hynuronを構成する人工神経電磁場モデルの開発を行った。一般に、U-Hynuronの数、U-Hynuronの間の結線結合の有無、U-Hynuronらの発火順序及びU-Hynuron間の相対位置などの時空間における物理構造によって、モデルの構成方法は無数に存在するが、モデルの持つ基本的性質を明らかにするためには、情報処理のメカニズムの本質を損なわない限りで、なるべく簡単なモデルを作る方がよいと考えられる。以上を勘案して本研究は、ケーススタディとして3個のU-Hynuron N1、N2とN3が、N1とN2が結線され、N3はそれらと結線されずに場に存在する場合を取り上げた。このような3個のU-Hynuronを構成するモデルをM-Hynuron (Multi-Hynuron)モデルと呼ぶことにする。そして、物理学の電磁場理論に基づいて、4次元時空間の中で、M-Hynuronモデルの数理的構築を試みた。M-Hynuronモデルにおける情報処理は、上述のような3個の結線があるU-Hynuron同士と結線がないU-Hynuron同士との間で、電気情報と磁場情報の相互作用を通じて行われる。その情報処理能力の解析によって、M-Hynuronモデルの中で、三つの情報処理過程が実行されることが明かになった。すなわち、自己想起過程、記銘過程と連想創造過程という三つの情報処理過程である。これは、M-Hynuronモデルが自律、並列、分散、創発という情報処理能力を持っていることを暗示する。ところで、M-Hynuronモデルに対して、すべてのことを覚えさせる必要はないが、既知知識を持っているU-Hynuron同士の相互作用によって、自らが新しく合目的な情報を創ること

ができる。また、計算機シミュレーションの結果により、以下のようなことが明らかになった。すなわち、M-Hynuronモデルにおいて、N1とN2はネットワークとしてトレーニングされた状況に対応できるが、もしモデルの外部状況が一時的に突然変化すると、しかも改めてトレーニングする必要がない場合、N3を学習させれば、問題を解決できると考えられる。すなわちM-Hynuronモデルのような複数U-Hynuron間の組み合わせることによって、外部状況に柔軟に対応可能となる。従来の人工神経回路網はいろいろ応用問題に対して大きな役割を果たしたが、これと共により高い柔軟性が求められるようになってきた。この要求に対して本研究はある一つ可能性を提供したと考える。最後に、情報処理機構としてのM-Hynuronモデルは従来の情報処理モデルより以下の三つの利点を持つことを示した。すなわち、情報処理における柔軟性の増加；Working Memoryにおける情報処理のメカニズムによる推論機能の付与；自律能力を持っているU-Hynuronの間の相互作用による創発機能の発現である。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 嘉 数 侑 昇
副 査 教 授 島 公 脩
副 査 教 授 大 内 東
副 査 教 授 伊 達 惇

学 位 論 文 題 名

Theoretical Study of Artificial Neural Networks With Magnetic Field Information

(磁場情報付き人工神経回路網の理論的研究)

近年、人工神経回路網 (ニューラル・ネットワーク) に関する研究が盛んに行われているが、その多くはネットワークそのもののみ注目して理論構築されている。一方、多数の情報処理単体機構により並列分散的に情報処理を行うメカニズムとして、これまで二種類のモデル、すなわちネットワークモデルと場モデルが提示されてきた。これらのモデルにはそれぞれ長短の特徴があるが、人間社会を含め自然界における情報処理の構造はこれらの二つの混合型構造 (Hybrid--Architecture) を示すことが多い。今後、このような混合型構造を有する人工神経回路網の発展が待たれている状況にある。

本論文は、このような現況にある人工神経回路網について、新しいモデルの提案を試みたものである。すなわち、磁場情報を用いて、ネットワークモデルと場モデルからの二つの混合型構造の取り得る一つのモデル、すなわち「人工神経電磁場モデル」と呼ばれるモデルを理論的に構築しその情報処理機構としての妥当性を検証することを目的としている。その主要な成果は、次の4点に要約される。

1. McCulloch--Pittsらの連続時間ニューロンモデルに磁場情報を導入し、人工神経電磁場モデルの中で基本的構成要素である単一ニューロン (U-Hynuron) モデルを構築している。このモデルは一種の非線形情報処理モデルであり、学習能力と自律能力を持っている。
2. U-Hynuron モデルにおいて、物理的相互作用 (電気情報と磁気情報との相互作用) の中で物理法則による学習メカニズムを提案している。この学習メカニズムにより、U-Hynuronは磁場情報を通じて、結合荷重を変化させ、自律的に学習が実行される。
3. パターン認識における一つの応用問題としての紙幣の識別問題へ適用することにより、U-Hynuronの有効性と有用性を示している。
4. 複数個のHynuronが存在する場合、すなわちM-Hynuron (Multi-Hynuron) 問題へのアプローチを行っている。3個のU-Hynuron : N1, N2とN3が、N1とN2が結線され、N3はそれらと結線されずに場に存在する場合によるM-Hynuronをケーススタディとしている。M-Hynuron モデルにおける情報処理能力の解析及び計算機シミュレーションにより、新たな情報処理機構としてのM-Hynuron モデルは従来の情報処理モデルより以下のように三つの利点を持つことを示している。すなわち、情報処理における柔軟性の増加；Working Memory における情報処理のメカニズムによる推論機能の付与；自律能力を持っているU-Hynuronの間の相互作用による協調創発機

能の発現である。

以上のように本論文は、人工神経回路網における、学習機能、自己組織機能、推論機能などを工学的に実現するための有益な新知見を得ており、情報工学、精密工学の発展に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。