

学位論文内容の要旨

北海道科学大学大学院工学研究科

電気工学専攻

博士後期課程

申請者氏名

丹羽 孔明

機械学習のための深層学習による非線形特徴変換

近年、人工知能領域の研究に対する社会の関心と期待が高まっている。この背景には、深層学習と呼ばれる方法論の成果とこれに伴う機械学習分野の発展、および大規模なデータ資源とこれを十分に処理することのできる計算資源の爆発的な進歩がある。深層学習をベースに構築されたコンピュータプログラムが人間のプロ囲碁棋士に勝利したことに代表されるように機械学習分野の研究は飛躍的に進歩しており、自動制御や人工知能による個人あるいは組織をアシストするシステムについて、研究とその応用が加速している。

他方自然界では、社会性を持つ生物は他の個体と協調して、自身の能力以上の仕事をこなすことが可能である。このような複数の個体による協調作業において、コミュニケーションは欠かせない能力である。多種の生物において、各個体間の主要なコミュニケーションは空気の振動、つまりは音が媒体とされる。また、音はコミュニケーションの他にも周辺環境の認識において重要な情報源となっている。音に対する生物の行動をシステムとして見ると、音や音のパターンといった音響信号を環境から観測して適切な出力を行う系と言える。このように、環境から音響信号を観測して適切な出力を行う系のモデル構築は、機械学習分野においても主要な課題となる。

この両者を統合させた先に広がる応用例としては、人間とコンピュータとの自然言語によるコミュニケーションを可能にするシステムから、自律的に動作する複数のロボット群が個体間の音響信号による通信や周辺環境の観測により高度なタスクを達成するシステムなどに至るまで多岐にわたるこれらの研究分野ではこれまで入力である音響信号を何らかの前処理により記号化し、それにより機械学習等の処理を可能にしてきたが、我々生物は環境から音響信号を観測し、記号情報を介さずに適切な行動を行っていることを考慮すると、記号を介さずに入力から出力までを一貫して扱える系のモデルは、多くのシステムに対して新しい有効な方法論の提供が期待できる。

これらを背景として、本研究では、深層学習による概念学習を行うコンポーネントを有し、音響信号より記号情報を介さずに適切なシステムの出力を決定するモデルを強化学習の枠組みを用いて構築している。モデルは音楽や音声・音響に関するデータを記号化せず、時系列に並んだ周波数成分、あるいは信号波形のフレームとして表現された音響信号を深層学習のメカニズムにより概念学習を行い、そこから Actor-Critic 型の強化学習により適切な出力を学習する。これをシステムやロボットが感知する音響信号からの応答や動作決定、また、新しい楽曲信号の生成などに応用することを試みた。本論文では、この目的にしたがい深層学習のメカニズムにより、音響信号の概念学習を行うためのコンポーネントとなる多層ニューラルネットワークについて、いくつかのネットワークモデルを構築し検証を行った。本論文は6章構成となっており、各章の内容は以下のようになっている。

第1章は本論文の序論であり、今日の社会における機械学習の現状、および、音響信号とロボティクスや情報処理の関係、音響信号を対象とした機械学習についての現状を挙げた。これを踏まえ、本研究の目的および意義

を示し、論文の構成について述べている。

第2章では、提案する概念モデルについて述べており、深層学習により音響信号の概念学習を行うコンポーネントを有し、音響信号より記号情報を介さずにシステムの出力を決定するモデルについて、強化学習の枠組みを用いた概念モデルを提示した。また、音響信号を学習するコンポーネントが考慮すべき課題として、音響信号の特徴抽出と時間依存性について述べた。さらに、関連研究として本論文で取り扱う深層学習についてニューラルネットワーク研究のこれまでの歩みとともに述べ、強化学習の中心となる方法論について触れている。

第3章では、深層学習による時間領域の信号波形ベースのモデルを提案している具体的には深層学習により音響信号の概念学習を行うコンポーネントについて、Restricted Boltzmann Machine (RBM) と Conditional RBM を用いた多層ニューラルネットワークについて述べ、これを構築した。また、モデルの訓練対象とするデータには実在する音楽の音響信号を用い、時系列に並んだ信号波形のフレームについて、その予測と復元を対象課題と設定してモデルの検証を行った。モデルから得られた信号波形について、被験者による聴取実験と周波数分析による分析の結果、信号波形上に、学習誤差やパラメータ設定による影響と推測されるノイズ成分が確認されたが、モデルの訓練に用いた信号波形は比較的忠実に再現され、聴取時には訓練データとした音楽が忠実に聞き取れることを確認した。以上により、本章で提案した深層学習のメカニズムによるコンポーネントは、時系列な信号波形のフレームより、特徴量の自動獲得と時間依存性を考慮した学習が可能であることを示した。

第4章は深層学習と聴覚フィルタおよび Echo State Network によるモデルの構築を示している。ここでは深層学習により音響信号の概念学習を行うコンポーネントについて、聴覚フィルタバンクによる周波数分析に加え、Auto Encoder (AE) と Echo State Network (ESN) を用いた多層ニューラルネットワークについて述べ、これを構築した。また、IEEE AASP Challenge の D-CASE challenge に含まれる OL subtask を対象課題としてモデルの検証を行った。この OL subtask は、オフィスで頻繁に発生する音響イベントについて、雑音を含む実環境下での多クラス分類課題であり、課題のための音響信号データセットが提供されている。訓練後のコンポーネントによる対象課題実行の結果、上位のモデルには届かなかったものの、Baseline モデルの精度を超え、F 値にして 30.17% の分類精度を記録した。事前実験として、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network; CNN) と時間方向の入力バッファを用いた実験を行っていたが、これよりも高い分類精度であり、リカレントニューラルネットワークのメカニズムを取り入れることが、音響信号の時間依存性の解決に有効であることが示唆された。以上により、本章で提案した深層学習のメカニズムによるコンポーネントは、聴覚フィルタバンク分析による時系列な周波数成分より、特徴量の自動獲得と時間依存性を考慮した学習が可能であることを示し、また、課題が残るものの、雑音環境下においても音響信号の認識が可能であること示した。

第5章は人間の作曲活動をモデル化した自動作曲システムの構築について述べている。音楽を自動的に生成するシステムは自動作曲システムと呼ばれており、記号を介さずに与えられた音響信号から直接的に行動を決定するようなモデルの対象問題として、達成すべき課題をいくつも内包している。Actor-Critik 型の強化学習を行うコンポーネントについて、まずは記号ベースで Actor の構築を行った。Actor は音楽における音高-音価 (音の高さ-音の長さ) の組をノード、各ノード間を遷移の確率を持った有向のリンクで接続したネットワークとし、ある状態での遷移確率に従ってネットワーク上のノードの音高-音価を順次出力する。この Actor を独立に動作させ、出力となるノードのパターンを得たところ、音楽において定義される2小節程度の断片では、人間に不快感を与えないような音楽的なパターンが得られた。しかしながら、長期的なパターンでは音楽に見られる構造的性質や幾つかの条件を満たさず、人間に不快感を与えるパターンが出力され、長期的な状態履歴への依存を解決するコンポーネントが不可欠であることを示した。

次に、強化学習の報酬として与えるスカラーな量についても検討を行った。この報酬のモデルについて、自身の出力と予測との誤差による報酬と、音楽に関して明らかにされているドーパミン神経系の働きを模擬する報酬のモデルを構築し、それぞれ検証を行った。これらは、それぞれ Elman net 型のリカレントニューラルネットワークを用いてモデルを定義し、予測誤差を用いる報酬のモデルでは、予測されたデータは訓練用データと

よく合致した。また、未知のデータに対しても、訓練データと類似する部分については同様の予測傾向が得られ、類似しない部分については予測を大きく外すという傾向が確認された。人間は音楽的な経験を背景に予測処理をしながら音楽を聴取していると考えられているが、実験の結果から音楽的な経験を背景とした予測処理を表現する報酬のモデルが獲得されている可能性を示した。また、満足度の高い音楽ではドーパミンの分泌が活発になり、分泌量は情動喚起や満足度に相関があり、ドーパミンの分泌活動には期待と体感の2つ局面のがあることも知られている。これに関しては実際の神経系の実データを得ることは現実的ではないため、体感や期待に対応するスカラーな値を人の手で仮定した模擬データを設定し、ドーパミン神経系の働きを模擬する報酬のモデルの訓練を行った。この結果、同じアーティストの曲と異なるアーティストの曲では、出力パターンに著しい差異が見られ、特に未知のデータにおいて、体感に対応する報酬を表す数値の推移が模擬データとして仮定した数値よりも、既知の音楽を背景にした報酬箇所を示すような傾向が見られた。このドーパミン神経系の働きを模擬する報酬のモデルにおいては、体感に対応する模擬データを定義することで、報酬の関数として機能することを示した。

第6章では本論文の結論として提案したモデルに対する各評価実験結果について要約して述べるとともに、本研究で得られた知見を総括している。