



Title	Deep Neural Networks-Based Direction of Arrival Estimation : Advantages and Limitations of Deep Learning [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	安藤, ダニエル 明
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16175号
Issue Date	2024-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/93498
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Daniel_Akira_Ando_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 安藤 ダニエル 明

審査担当者 主 査 教 授 大鐘 武雄
 副 査 教 授 齊藤 晋聖
 副 査 教 授 西村 寿彦

学位論文題名

Deep Neural Networks-Based Direction of Arrival Estimation: Advantages and Limitations of Deep Learning

(深層ニューラルネットワークによる到来方向推定: 深層学習の利点と限界)

到来方向 (DOA) 推定は, レーダーシステム, 屋内位置測位, 無線チャネル推定といった多様なアプリケーションにおける応用が考えられるため, アンテナアレー信号処理の中でも重要な技術の一つであるといえる. DOA 推定の従来法の一つは root multiple signal classification (root-MUSIC) 法というアルゴリズムであり, 十分に高い推定精度を持つ手法としてよく知られている. しかし, root-MUSIC 法には, アンテナアレーでの受信信号の相関行列の固有値分解が必要となるため, アンテナアレーのサイズの増大につれて, 計算量が非常に大きくなる課題がある.

近年, 情報通信技術において, 深層学習応用が鋭意研究されている. DOA 推定においても, 深層学習の適用の有効性はいくつかの文献で報告されている. ある先行研究では, 簡易な構造で設計されたディープニューラルネットワーク (DNN) が DOA 推定に有用な手法であることが示された. しかし, その単一の汎用 DNN のみでは, root-MUSIC 法の推定精度を上回ることが困難であることも明らかとなった. 加えて, その研究では, 5 つのアンテナ素子を有するアンテナアレー, およびそのアンテナアレーへの到来信号数が 2 つ, という想定のみのもとで検討が行われており, 多様な状況における DOA 推定問題に, 簡易な構造の DNN を適用する有効性を究明することが必須な検討だと考えられる.

そこで, 本論文では, 1)DOA 推定のための DNN の精度を更に改善する方法をいくつか提案すること, 2) より多くのアンテナ素子を有するアンテナアレーと到来信号数という状況においても提案手法の有用性を解明すること, 3) これらにより, DOA 推定問題に DNN を利用することの利点, 限界を考察している.

第 1 章では, 以上の背景と課題を述べている.

第 2 章では, アンテナアレーを用いた DOA 推定の定式化を行った後に, MUSIC 法と, その派生版であり, 本論文で提案する方法と比較対象になる root-MUSIC 法の動作を説明している.

第 3 章では, DNN について説明している.

第 4 章では, まず, 本論文の参考となる先行研究の概要を述べる. DOA 推定のための DNN の構造や学習方法について解説した後に, 先行研究で紹介された, その DNN の推定精度を向上させる 2 つの方法を説明する. それらの手法により得られた特性と root-MUSIC 法と比較しつつ, 問題点を発掘し述べる. 次に, 本論文で新たに検討した, 到来信号が 3 つであるときの DNN の精度への変化について述べる. 最後に, 一般に機械学習の手法の推測性能と訓練データセットの妥当性を評価す

ることが目的である K-fold cross validation 法を用いて DOA 推定用の DNN についてこれらの評価を行う。以上の計算機シミュレーションによる評価の結果, 先行研究の DNN における課題を指摘している。

第 5 章では, 先行研究の DNN の推定精度の向上を可能にする 4 つの手法を提案している。

1 つ目の手法は, DNN の出力として求める角度スペクトルから DOA 情報を検出するための新たな手法である。計算機シミュレーションでは, 到来信号数が 2 つと 3 つ両方のときについても, 提案したアルゴリズムで推定精度を大幅に改善できることを示した。

2 つ目の手法は, DNN を用いた到来信号数の推定も含めた DOA 推定システムである。信号対雑音比 (SNR) を 30dB と固定したときの DNN をそれ以外の SNR でテストした場合, 十分な推定精度が得られないことが先行研究で報告されていた。そこで, 各 SNR で学習した専用の, 先行研究で紹介された Staggered DNN という改良型 DNN を複数用意し, アンテナアレーの受信信号の SNR に応じて Staggered DNN を選択して DOA 推定を行う, という手法を提案する。加えて, 到来信号数を推定する DNN, SNR を推定する線形回帰モデルも提案する。計算機シミュレーションでそのシステムの性能を評価した結果, 特に 0dB~15dB のときの性能を大きく改善できることが明らかとなった。

3 つ目の手法は, 機械学習の分野においてよく知られている主成分分析 (PCA) を併用した DNN であり, DNN の訓練データセットに PCA を適用することについて検討する。計算機シミュレーションによる評価の結果, DNN への入力ベクトルの次元をおよそ 80% 縮小することで, SNR が 0dB と 5dB のときの推定精度を大きく改善できること, また, アンテナ素子数を 5~15 個, 信号数を 3~5 つとしたときについても, 上述に近い性能改善が保てるため, DNN-PCA が有効であることを明らかとした。

4 つ目の手法は, 信号数が 3 つである場合に, 高 SNR で推定誤りをよく発生させる, 20 度という狭い角度範囲内に入射する 3 つの信号に対応できる新たな構造の DNN である。この提案方法では, 当初の DNN がカバーする角度スペクトルの範囲を縮小し, 近い DOA の信号に特化した DNN を複数利用する。それにより, 高 SNR のときの性能を高めることが可能であることが明らかとなった。

第 6 章では本論文のまとめを述べている。先行研究で検討された DOA 推定専用の DNN の推定精度をさらに改善する手法を提案し, 高い推定精度が得られることを明らかにした。DOA 推定が必要となる様々なアプリケーションに, 以上の対策と併用する DNN を導入すれば, 従来法より優れた性能の確保が可能であり, 高い精度が必須条件となるサービスの創造が可能である。

これを要するに, 著者は汎用の DNN の代わりにある特定の学習データで訓練した DNN を様々な環境パターン分用意し, この DNN 群から適切な DNN を選択して到来方向推定する手法を新たに開発した。加えて, 性能劣化が見られる環境において個別の適切な対策を行うことで, 最終的にどのような環境でも高い推定性能を有する DNN ベースの到来方向推定手法を確立したことは, 無線工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は, 博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。