

到来方向推定のための複数の 特化型深層ニューラルネットワークに関する基礎研究

安藤 ダニエル 明*

Fundamental Research on Specialized Deep Neural Networks for Direction of Arrival Estimation

Daniel Akira ANDO*

Direction of arrival (DOA) estimation is an important antenna array signal processing technique widely used in many different services, such as wireless communication systems and radar/sonar systems. In the author's previous studies, DOA estimation by means of a deep neural network (DNN) applied with principal component analysis (PCA) was investigated. It was shown that this proposed technique can achieve more accurate estimation in comparison to a traditional DOA method when an ideal propagation environment is considered, in which the incoming waves have equal received power. In this study, the estimation performance of PCA-DNN is further investigated for the case when the received powers are different, which better reflects a real-world transmission scenario. The findings in this study can be valuable to the development of signal processing techniques, such as beamforming and channel estimation, supporting the future 6th generation mobile communication system.

1. 研究背景と目的

到来方向 (DOA: Direction of Arrival) 推定は、複数のアンテナが配置された受信機に電波が到来するとき、その到来角を推定する信号処理技術であり、無線通信システムやレーダー・ソナーシステムといった多岐にわたるサービスで重要なものである。無線通信システムを例として挙げると、周波数資源が圧迫している近年では、周波数利用効率の向上のため、ビームフォーミングという技術が鋭意研究されている。ビームフォーミングは、基地局やWi-Fiルーターがユーザの方向のみに電波を放射できるようにする技術である。ただし、ビームフォーミングの利用にはユーザの位置を知る必要があり、そのためにDOA推定技術が重要な役割を果たすことが期待される。

筆者は過去の研究 1), 2) では、深層ニューラルネットワーク (DNN: Deep Neural Network) を基盤とした手法による新たなDOA推定法を提案した。1) では、様々な通信条件についてオフラインに学習した複数のDNNから構成されたDOA推定システムを考案した。2) では、主成分分析 (PCA: Principal Component Analysis) 付きDNNという手法を提案し、これによりSN比が低いときのDNNの推定性能を改善できることを明らかにした。これらの手法により、DOA推定の古典的な手法であるroot-MUSIC (Multiple Signal Classification) 法に比べ計算負荷の軽量化、また雑音の影響が大きい環境における推定性能の向上が可能であることを示した。ただし、これらの検討では、受信機に到来する複数の電波は受信電力が等しいという通信環境を想定していた。実際の環境では、各々の電波の波源が異なる場所に位置するため各電波の受信電力が同一ではない。そのため、1) 2) の手法の特性を、これらのような環境における評価を実施する必要があり、これは本研究の目的とする。本研究の成果により、ビームフォーミング技術の効率的な適用などに貢献することが期待できる。

2. 主成分分析付き深層ニューラルネットワーク (PCA付きDNN) の概要

本研究では、入力層、隠れ層と出力層からなり、構成が比較的簡易で基本的な全結合ニューラルネットワークを用いる。そのDNNへの入力として、受信機で受信した信号から算出した共分散行列をベクトル化したものを用い、出力値として、各離散的な角度に到来信号が存在する確率を表す角度スペクトルが得られる (図1参照)。このDNNでは、root-MUSIC法の推定性能を、高SN比時に上回ることが可能であることが示された。しかし、低SN比時は、DNNの特性が良好ではない。そこで、ベクトル化した共分散行列をDNNに入力させる前に、そのベクトルにPCAを適用することを提案した。それにより、DNNへの出力ベクトルの次元数を縮小するとともに、PCAによる雑音影響の低減のため低SN比時の精度を向上させることを明らかにした。

2026年2月9日 受理

* 豊田理研スカラー

三重大学大学院工学研究科情報工学専攻

3. 計算機シミュレーションによる特性評価

本研究では、10個のアンテナ素子が配置された受信機で2波の電波が、異なる電力で受信された伝搬環境を想定し、下記の検討をこの1年間で行った。

- A) 受信電力が等しいデータのみが含まれた訓練データセットでPCA付きDNNを学習し、受信電力が異なるデータが含まれたテストデータセットでそのPCA付きDNNの推定精度を評価する (文献3) 参照
- B) 受信電力が異なるデータが含まれた訓練データセットでPCA付きDNNを学習し、同様に受信電力が異なるデータが含まれたテストデータセットでそのPCA付きDNNの推定精度を評価する (文献3) 参照
- C) 訓練データセットのサイズ変更によるPCA付きDNNの学習能力を検討する (3月に発表予定)
- D) 受信電力が高い電波と、受信電力が低い電波、それぞれのDOA推定精度を個別に検討する
- E) オートエンコーダという異常の検知・訂正のためのニューラルネットワークの設計を検討する
- F) 高速移動体の位置推定に向けて1個のスナップショットにおけるPCA付きDNNの特性評価を行う

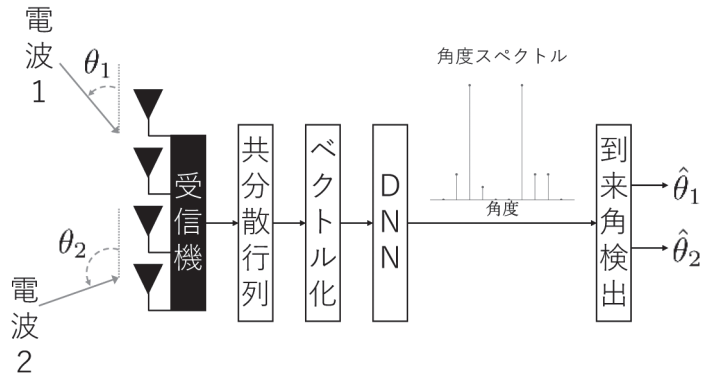


図1 DNNによるDOA推定手法の概要図。

本稿では、検討B)について述べる。ここで、評価指標をRMSE (root mean squared error) とし、図2に、計算機シミュレーションにより得られたroot-MUSIC法、PCA付きDNNとPCAなしDNN (「stag. DNN」と図中に表記) のSN比ごとのRMSE特性を示す。また、図2(a) (b) (c) はそれぞれ、2波間の受信電力差を-3dB、-6dB、-10dBとしたときの結果を示し、SN比は受信電力が高い電波に対して求める。図2の「PCA-DNN」と「root-MUSIC」のRMSE特性より、受信電力差が-3dBと-6dBの場合は、PCA付きDNNはroot-MUSIC法よりほとんど優れた性能をもつことがわかる。例えば、受信電力差が-3dB (図2(a)) で、SN比が10dBのとき、PCA付きDNNのRMSEがroot-MUSIC法より約90%向上している様子がみられる。なお、一方の電波の受信電力が非常に低いという受信電力差が-10dBの場合においても、高SN比域ではPCA付きDNNの精度が良好であることも図2(c) から見て取れる。

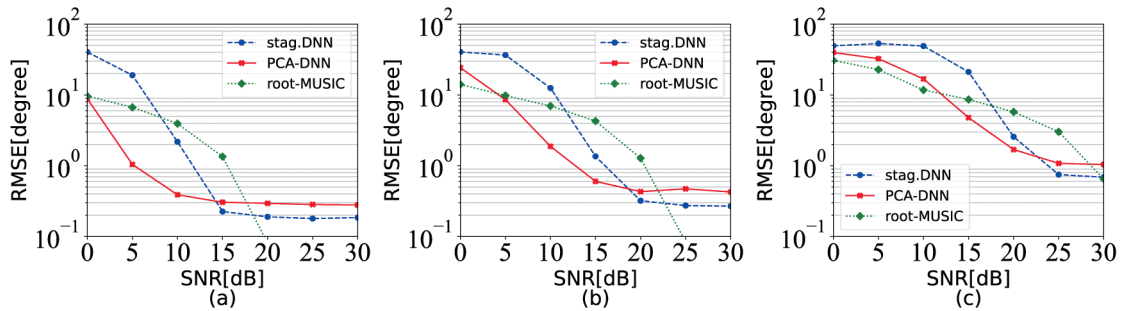


図2 3通りの受信電力差におけるDNNのRMSE特性。
(a) -3dB. (b) -6dB. (c) -10dB. (出典: 文献3))

4. まとめと今後の展望

本研究では2波のみの到来波の受信電力が異なる環境におけるPCA付きDNNの特性を評価した。その結果、受信電力差が-6dBでもroot-MUSIC法より高精度のDOA推定が可能であることがわかった。ただし、それより多くの電波が到来するなど、マルチパス環境では到来波間に相関という好ましくない現象が生じることも考えられる。そのため、今後は、そのような環境にも対応できるDOA推定手法の開発のために、1) の提案手法と併用したPCA付きDNNについて検討する。

REFERENCES

- 1) D. A. Ando, et al., *IEICE Trans. Commun.*, **E106-B** (2023) 1350-1362.
- 2) D. A. Ando, et al., *IEICE Trans. Commun.*, **E108-B** (2025) 94-108.
- 3) 澤田直樹ほか、電子情報通信学会技術研究報告, **RCS2025-179** (2025) 181-186.