HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	深層学習を用いた電波の到来方向推定［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	加瀬，裕也
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15077号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85363
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yuya_Kase_review.pdf，審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

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　加瀬　裕也

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

深層学習を用いた電波の到来方向推定
（DOA Estimation of Radio Signals with Deep Learning）

電波の到来方向 (Direction Of Arrival, DOA) 推定は, 車からの歩行者検知や遭難者の追跡, 天文観測など, 信号源または散乱体の位置を推定する様々なサービスで使用される技術である.

これまで, beamformer 法に始まり, Capon 法, MUSIC, ESPRIT など多くの信号処理技術が開発されてきた. 特に, MUSIC と ESPRIT は, レイリー限界を超える高い推定精度をもつ手法として広く知られている. 計算資源が発展した近年では, 圧縮センシングが到来方向推定の分野に適用されている. 圧縮センシングは信号処理やデータ圧縮などの分野で主に用いられる手法で, スパース性をもつ原信号を, その次元より少ない観測から復元するものである. 到来方向推定では, アンテナ周囲の角度領域を細かく分割すると到来波数はその分割数よりも十分に小さくなるため, 圧縮センシングを適用することができる. ただし, 事前に決められた角度グリッドで量子化されることから, 圧縮センシングを用いた到来方向推定法はオングリッド推定に分類される. つまり, MUSIC のような一般的なオフグリッド推定法と異なり, オングリッド推定では事前に決められたグリッド間隔に依存する量子化誤差を避けられない. しかし, 量子化誤差を許容しても, MUSIC よりも高い精度が得られることも報告されている.

深層学習は, オングリッド推定に適したその典型的な手法である. 訓練済みのネットワークを用いた場合その計算量は比較的少なく, また, ある特定の環境に特化した推定器を構築できる点も, DNN を用いた推定法の利点の 1 つである. 本論文は, 線形アレーアンテナに 2 波の狭帯域信号が到来する基本的な条件において, DNN の適用可能性を検討することを目的としている.

第 1 章では, 以上の背景について詳しく述べている.

第 2 章は, アレーアンテナを用いた一般的な到来方向推定法について, beamformer 法, Capon 法, Spectral-MUSIC, Root-MUSIC を取り上げて説明している.

第 3 章では, 基本的な順伝播型全結合ネットワークの定式化と誤差逆伝播法による訓練について説明し, 線形アレーアンテナに等しい電力を有する無相関な狭帯域信号 2 波が互いに重複しない 2 つの整数角度から到来する条件において, DNN の基本的な性能評価を行っている. 訓練データの SNR を 6 種のパターンで変化させた結果, SNR が 30dB で一定のデータを学習した DNN が高 SNR 時の推定に最も適していること, SNR がランダムに変化するデータを学習した DNN は幅広い SNR に適したものになることが確認された. SNR がランダムに変化するデータを学習した DNN を用いたランダム 2 波推定において, 推定成功率は SNR 30dB 時の推定でも 80% に満たないものの, 絶対値誤差が 0° または 1° となる割合は約 97% であった. また, 1° 近接という厳しい到来条件

であっても, 1° 近接条件で学習させた DNN を用いることで極めて高い精度で推定が行えることが確認された. このような, ある特定の環境に特化したモデルを補完的に用いることでランダム 2 波推定の精度をさらに改善できる可能性があることを示した.

第 4 章では, 線形アレーアンテナに等しい電力を有する無相関な狭帯域信号 2 波が, DNN の出力として設定した角度グリッドに拘束されないランダムな実数角度から到来する条件において, DNN の到来方向推定性能を評価している. ランダム 2 波推定では, DNN はどの SNR においても Root-MUSIC よりも低い推定成功率となった. これは, DNN の出力として設定したグリッドの境界上に信号が到来した場合に, 隣接ユニットを到来方向と誤る場合があるためであった. この問題を解決するため, 境界が重ならないようグリッドをスタッガード配置した 2 つの DNN を組み合わせる手法を提案した. 提案手法により, 許容誤差 ±0.5° の推定成功率が SNR 15dB 以上で Root-MUSIC を超え, 20dB 以上で 99% となった. さらに, 1° 近接条件で DNN を訓練し, そのような厳しい到来条件であっても, 97% を超える高い精度で推定が行えることを確認した.

第 5 章では, 推定精度の更なる向上のため複数 DNN の具体的な組み合わせ手法を検討している. 具体的には, (1) 到来角度差が 1° であったかを検出する DNN を構築し, その結果に基づいてスタッガード配置または DNN C どちらの推定結果を採用するかを決定する手法と, (2) SNR を推定する DNN を構築し, その結果に基づいて異なる SNR で訓練した DNN を切り替えて推定する手法を検討している. 1° 近接波を検出する DNN P により, 到来角度差に関する事前知識がなくとも, スタッガード配置または DNN C を選択可能となった. その結果, SNR が 25dB と 30dB のときは, 下限に近い RMSE が得られた. また, 到来波の SNR に関する事前知識がなくとも, SNR を推定する DNN S に基づき, 異なる SNR で訓練した DNN から最適なものを選択できることを示した. これにより, 高 SNR 時の推定成功率を維持しつつ, 低 SNR 時の推定成功率が大幅に改善した.

第 6 章では, これまでの検討結果をまとめ, 結論を述べている.

これを要するに, 著者は, 等電力・無相関の信号 2 波が到来する環境において, 全結合 DNN を用いて到来方向を推定する際, 入力データ形式, 学習方法, スタッガード配置によるグリッド境界問題解決, 学習データの異なる DNN の併用と選択方法を提案・確立したものである. 深層学習を用いたオングリッド型到来方向推定の欠点を克服するとともに, 特化型 DNN 組み合わせの可能性を示したことは, 無線工学に貢献するところ大なるものがある. よって, 著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める.