

FDTD 法による電磁界解析を用いた 3 次元海中位置推定手法の検討

課題責任者

高橋 応明

千葉大学フロンティア医工学センター

著者

阪谷 新之助^{*1}, 高橋 応明^{*2}

^{*1} 千葉大学融合理工学府, ^{*2} 千葉大学フロンティア医工学センター

キーワード: FDTD 法, 海中電磁波伝搬, 位置推定, 機械学習, 疑似スケールモデル

1. はじめに

著者らは海水中における電波利用の 1 つとして水難救助の補助技術を検討している。水難事故は世界中で発生しており、日本では毎年約 1400 件[1]の水難事故が発生している。特に海難事故において、救助を行う際はダイバーの活躍が期待されるが、海中の浮遊物や低体温症など様々な危険が伴う。そこで、海中におけるダイバーの位置の特定によって救助活動を支援することを想定し、kHz 帯の電波を用いた海中位置推定システムの検討を JAMSTEC、東北大学、新潟大学などとの共同研究として行っている。本研究の提案システムでは、ダイバーに装備された送信アンテナ (Tx) の位置を海面に浮かべた複数の受信アンテナ (Rx) の受信電力強度 (RSS [dB]) を用いて推定する。実環境におけるこの提案システムの設置と回収を容易にするために複数の Rx を単一の受信装置としてまとめる手法の検討を行っている[2]。これによって、海面に受信装置を一台投入するだけでダイバーのモニタリングを可能とすることを目指している。

提案システムにおける位置推定アルゴリズムの実装には機械学習モデルの一つであるサポートベクトル回帰 (SVR) を利用しており、実環境で十分に有効な推定精度を得るには学習させる訓練データセットの充実が必須である。しかし、海面上を含んだ海水中の電磁波現象を解析するには膨大な計算資源が必要である。そこで、計算時間を削減するために、実際の海洋における電磁波伝搬実験を水槽サイズで行える手法として提案されている疑似スケールモデル[3]を利用した。この疑似スケールモデルを有限積分法や FDTD 法などの電磁界シミュレーションで実装すると、実スケールの場合よりも少ない時間ステップで解析が可能である。そこで、訓練データセットの作成に疑似スケールモデルを利用できれば大幅な計算資源の削減が可能となる。しかし、実スケールモデルの解析結果と異なる出力を得てしまう危険性がある。よって本検討では「疑似スケールモデルの妥当性調査」を行うために、疑似スケールモデルで作成した訓練データセットを使用して、実スケールモデルで作成したデータの位置推定が可能かを検討した。疑似スケールモデルの実装には有限積分法が計算可能な CST Studio Suite (Dassault Systèmes) を使用し、実スケールモデルの実装には FDTD 法のプログラムを使用して地球シミュレータ上で計算を実行した。

2. 解析モデルとデータセットの作成

図 1 に解析モデルの俯瞰図と平面図を示す。解析モデルは真空と海水 ($\epsilon_r = 80$, $\sigma = 4.0 \text{ S/m}$) で構成されている。位置推定に用いる受信装置は独立した 8 つのダイポールアンテナ (全長 0.50 m) で構成され、各アンテナは図 1(a)に示すように八角柱の辺上に配置される[2]。Tx は 1 つのダイポールアンテナ (全長 0.50 m, 動作周波数 10 kHz) であり、x, z 軸方向の 2 姿勢で海中に配置される。

図 1(b)に位置推定に用いるデータセットのアンテナ配置を示す。受信装置はその八角柱の幾何中心を水深 0.5 m の xy 座標平面の原点 (中心) に配置される。Tx はある水深において図 1(b)の格子点上各 3.0 m 間隔の計 225 地点に配置される。疑似スケールモデルで作成される訓練データセットには水深 2.0 ~ 7.0 m 整数値のデータを使用し、実スケールモデルで作成される試験データには水深 4.5 m のデータを使用した。

疑似スケールモデルは図 1 の寸法が 1/100 倍、動作周波数は 100² 倍の 100 MHz になるように設定された。また、実スケールモデルの試験データは疑似スケールモデルにおける水深 4.5 m のデータと最大値が等しくなるように正規化され、さらに計測のダイナミックレンジを考慮して RSS 下限値を -150 dB とする前処理を行った。

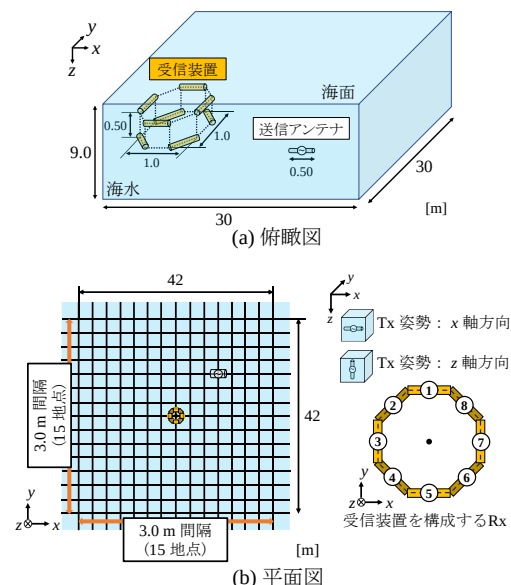


図 1 解析モデル (実スケール)

3. 疑似スケールモデルの妥当性評価

図 2 に疑似スケールモデルと実スケールモデル、そして Tx を微小電流素子とした海面上が存在しない場合における、ある Rx (図 1(b)における①番) の RSS ヒートマップの比較 (全て最大値が疑似スケールモデルと等しくなるように正規化) を示す。図 2 では正規化されているが、全体的に疑似スケールモデルよりも実スケールモデルの方が RSS 値は約 15 dB 小さかった。この原因については、アンテナ (導体棒) が大きい実スケールモデルの方が周囲の海水による損失の影響を大きく受けたためと考えられる。図 2(a)(b)より、受信装置から半径約 10 m の近傍であれば減衰傾向は概ね一致 (RSS 差が約 3 dB 以下) していることが確認できた。受信装置から半径約 10 m 以上の領域の RSS 差については、疑似スケールモデルよりも実スケールモデルの方が RSS 値は小さかった。この原因については、実スケールモデルの FDTD 法におけるタイムステップ数が不足している可能性に加えて、図 2(c)を Tx から Rx への直接波の RSS 分布と解釈すると、Tx から海面上へ垂直に伝搬した後に海面付近を伝搬するラテラル波 [4]において差が生じていることが考えられる。

実スケールモデルの試験データである水深 4.5 m 平面の位置推定誤差を図 3 に示す。本検討での目標誤差は、成人が手足を広げた際の範囲を考慮し 2.0 m 未満とした。Tx 姿勢が x 軸方向の場合、原点を中心とする半径 15 m の円内の大部分、Tx 姿勢が z 軸方向の場合、原点を中心とする半径 12 m の円内の大部分で目標誤差を達成できた。目標誤差未達成の原因としては RSS 下限値 (-150 dB) 以下の領域の影響に加え、上述した疑似スケールモデルと実スケールモデルの RSS 差の影響が考えられる。

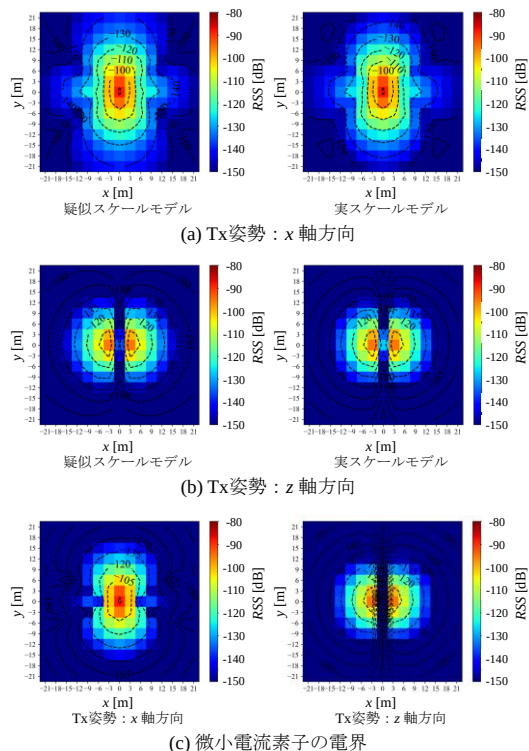


図 2 RSS ヒートマップ比較 (水深 4.5 m, Rx①番)

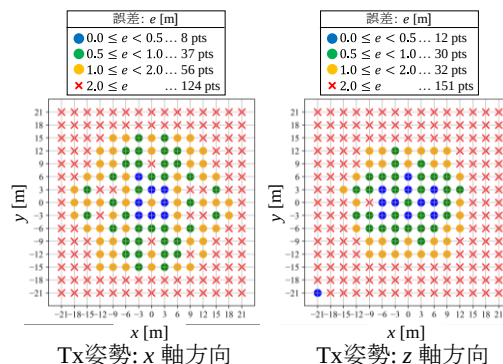


図 3 位置推定結果 (水深 4.5 m, 実スケールモデル)

4. まとめと今後の展望

本検討では提案システムにおける「疑似スケールモデルの妥当性調査」を行うために、地球シミュレータを用いて FDTD 法による海中電磁波伝搬シミュレーションを行った。疑似スケールモデルで作成した訓練データセットを使用して、実スケールモデルで作成した試験データの位置推定が可能かを検討し、水深 4.5 m では原点を中心とする半径 12 m の円内の大部分で目標誤差が達成できることを確認した。しかし、RSS ヒートマップの比較では疑似スケールモデルと実スケールモデルの RSS 差が確認され、位置推定でもその RSS 差に起因する誤差が確認された。

今後の展望としては、半径 12 m の円内であっても一部の領域で大きな誤差が発生しているため、位置推定システムの改良を行う予定である。さらに、疑似スケールモデルと実スケールモデルの RSS 差の影響を小さくするために、実スケールモデルでも実行可能なシミュレーション回数で訓練データセットが作成できるような位置推定アルゴリズムの改良も行う予定である。

謝辞

本研究は科研費 (22H01485) の助成、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2109 の支援を受けた。

文献

- [1] 警察庁生活安全局生活安全企画課, “令和 5 年における水難の概況”, https://www.npa.go.jp/publications/statistics/safetylife/r05_suinan_gaikyou.pdf, Jun, 2024.
- [2] 阪谷新之助, 高橋応明, “海中位置推定システムにおける受信アンテナ配置の基礎検討”, 2024 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1C-36, Sep.2024.
- [3] 石井望, 高橋応明, 陳強 “疑似スケールモデルを用いた微小ダイポールによる海水中電磁界”, 信学技報, AP2016-125, pp.11-16, Dec.2016.
- [4] R. Kato, M. Takahashi, N. Ishii, Q. Chen, and H. Yoshida, “Investigation of a 3D undersea positioning system using electromagnetic waves,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 69, no. 8, pp. 4967–4974, Aug. 2020.