

電磁波による3次元海中ポジショニングシステム

Three-dimensional underwater positioning system by electromagnetic waves

高橋 応明[†] 加藤 涼介[†] 石井 望[‡] 陳 強^{††} 吉田 弘^{†††}
 Masaharu Takahashi Ryosuke Kato Nozomu Ishii Qiang Chen Hiroshi Yoshida

[†]千葉大学 Chiba University [‡]新潟大学 Niigata University ^{††}東北大学 Tohoku University ^{†††}海洋研究開発機構 Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1. はじめに

水難事故の発生件数はここ数年ほぼ一定で、ほとんど減少が見られない。水難事故の際に救助活動を行うのはダイバーであるが、海中には様々な漂流物が存在し、救助中のダイバーに常に危険が伴う。本研究では、水中におけるダイバーの位置の特定により、救助活動を支援することを想定し、中波以下の低周波数帯の電波を用いた海中位置推定システムの検討を行う。海中位置推定システムのイメージ図を図1に示す。先行研究において、10 kHzの超長波電波は、理論上1 mあたり3.5 dB減衰し、30 m以上の距離を伝送できる[1]。また、深さ方向における2次元の位置推定についてはすでに報告されている[2]。

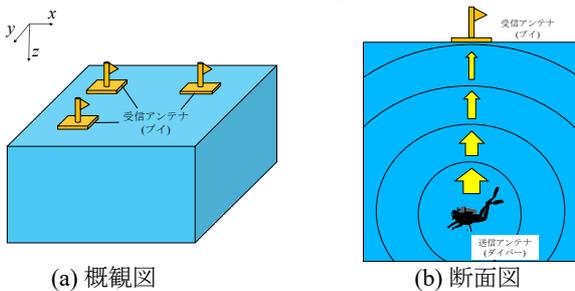


図1. 位置推定システムのイメージ

従来、海洋における無線通信では音波の利用が主流であった。しかし、音波は海中における伝搬速度が電波と比較して低速であり、雑音や海面、海底からの多重反射の影響を受けやすい[3]。また、光波に関しても海水中の濁りによる散乱減衰が大きいことから、水中における通信には適さないとされている。電波は減衰量の大きさが問題点として挙げられるが、その大きさゆえに反射波や回折波の影響を無視できると考えられ、海水中における電波の利用を考える余地は十分にあるといえる[4]。本研究では、10 kHzの電磁波を用いた海中位置推定システムにおける受信電力強度(RSS)使用の優位性について述べる。また、RSSを用いた深さ2 mから8 mまでの3次元位置推定シミュレーションを行ったので、併せて報告する。

2. 解析モデル

図2(a)に解析モデルの概観、図2(b)にその俯瞰図を示す。解析モデルは自由空間と海水($\epsilon_r = 80$, $\sigma = 4 \text{ S/m}$)から構成されている。海面に2 mの受信アンテナ、海中に0.7 mの送信アンテナを配置し、共にダイポールアンテナとした。送信アンテナは、図2(b)の格子点上に各3 m間隔、計225地点に配置することで、深さ2 mから8 mまでの位置推定シミュレーションを行った。解析手法はFDTD法である。なお本研究では、水深計を用いることで送信アンテナの水深は既知のものであるとする。

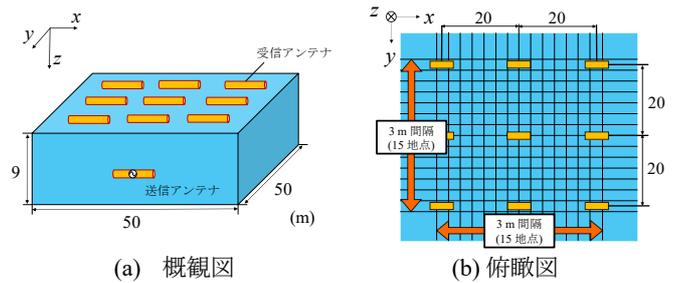


図2. 解析モデル

3. 位相差に対するRSS使用の優位性

図3に送受信アンテナにおける位相差とアンテナ間距離の関係、図4にRSSとアンテナ間距離の関係を示す。本研究では、送受信アンテナ間の位相差やRSSをアンテナ間距離に変換することで、送信アンテナの位置推定を行っている。そのため、アンテナ間距離を算出する際、受信信号から得られるパラメータとアンテナ間距離は1:1に対応している必要がある。図3より、位相差はある一定のアンテナ間距離を超えると変位が見られなくなる。これは、一度海面に鉛直に伝わった後に海表面を水平に伝搬するラテラル波によるものと考えられる[5]。ラテラル波は鉛直方向への伝搬時のみ海中を伝わり、その後空气中を水平に伝搬する。空气中を伝搬している際は、波長が長いので、位相変化がほぼ無く、送受信アンテナにおける位相差は水深にだけ依存することになる。図3より、位相差をアンテナ間距離に換算できる限界は15 m程度である。一方、RSSの場合は、図4より30 m以上のアンテナ間距離を識別できる。ゆえに、海中における電波を用いた位置推定では、位相差よりもRSSを使用することが好ましい。

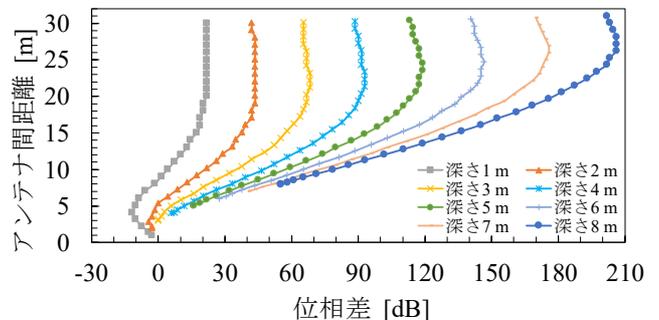
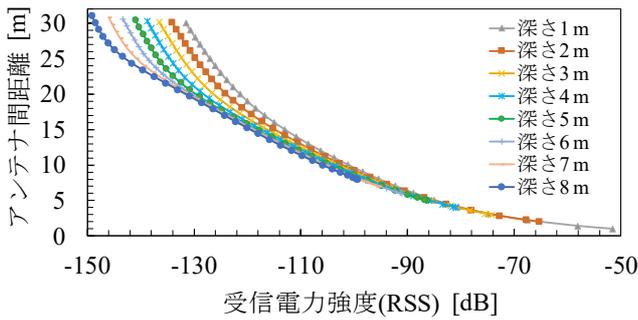


図3 位相差とアンテナ間距離の関係



$$\text{RSS [dB]} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{受信電力 [W]}}{\text{入力電力 [W]}} \right)$$

図4 RSS とアンテナ間距離の関係

4. 3次元の位置推定シミュレーション

位置推定アルゴリズムを図5に示す。まず、9つの受信アンテナの中で、受信電力の大きい方から順に3つの受信アンテナを選択する。次に、選択した受信アンテナのRSSをアンテナ間距離に変換し、その距離を半径とした球面の交点を推定位置とする。このとき、アンテナ間距離の算出には、図4の水深ごとのRSSとアンテナ間距離の関係を多項式近似して式(1)のように表す。

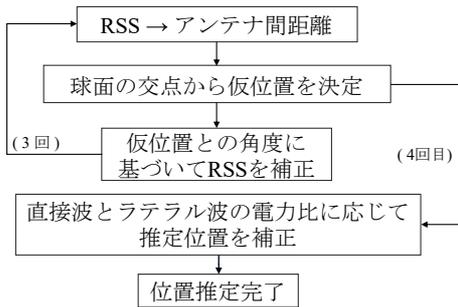


図5 位置推定フロー

$$r = \sum_{k=0}^5 \left(\sum_{l=0}^5 C_{k,l} z^l \right) p^k \quad (1)$$

ここで、 r はアンテナ間距離、 z は送信アンテナの水深、 p はRSSを表している。また、送信アンテナの水深 z を変数にすることで一つにまとめたものである。図4の関係における近似多項式であるこの式は、送信アンテナの水深 z が整数値の場合を基に決定しているが、任意の深さに送信アンテナが存在する場合でも、RSSからアンテナ間距離を算出することができる。

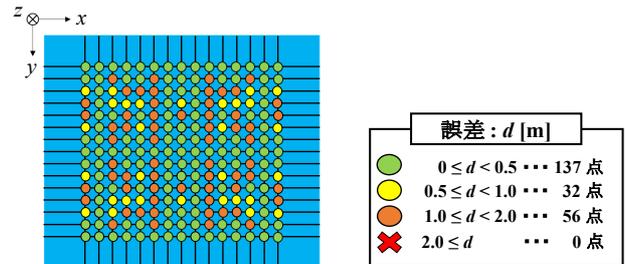
各アンテナの受信電力はアンテナの指向性やラテラル波の影響により、必ずしもアンテナ間距離に対応した値であるとは限らない。そのため、本手法ではRSSから求めた距離により送信アンテナの仮位置を算出し、その仮位置による送受信アンテナ間の角度を基に、アンテナ指向性を考慮してRSSを補正した。この位置補正を3回行うことにより、位置精度がほぼ収束する。最後に、この推定位置による直接波とラテラル波の理論的な電力比に応じて位置を微妙に補正することにより、位置精度を向上させている。

これまでの過程で、225地点のほとんどで送信アンテナの正しい位置を推定できるが、ごく少数の地点において、推定位置誤差が大きい地点が存在する。よって、これまで

の過程を経た後の送信アンテナの推定座標を考慮したRSSの角度補正を行い、送信アンテナの推定位置を再度算出した。

推定精度は、送信アンテナの実際の座標と推定座標との距離を誤差として評価した。目標誤差としては、成人が手足を広げた際の範囲を考慮し2m以内とした。

位置推定結果を図6に示す。図6(a)より、6割の場所で推定誤差0.5m以内となっており、全位置で目標精度の2m以内を達成している。図6(b)より、任意の水深2~8m全てで位置推定誤差2m以内を達成できている。



(a) 水深4mの位置推定結果

水深	<0.5 m	<1.0 m	<2.0 m
2 m	36.0	71.6	100
3 m	68.0	85.8	100
4 m	60.9	75.1	100
5 m	53.8	76.9	100
6 m	52.0	78.7	100
7 m	55.6	91.1	100
8 m	44.9	87.6	100

[%]

(b) 水深2~8mの位置推定結果の割合

図6 位置推定結果

5. まとめと今後の展望

今回は電波を使用した海中位置推定システムにおいての位相差に対するRSS使用の優位性を確認した。また、海を模したモデルにおける深さ2~8mにおける3次元の位置推定シミュレーションを行い、深さ2~8m全ての平面で誤差2m以内を達成した。今後は、海面の波等を考慮した、より実環境に近いモデルでの位置推定シミュレーションを行う予定である。

・参考文献

- [1] 陳強, 高橋応明, 石井望, “電波の海中応用へのアプローチ”, 信学技報, AP2016-92, pp.25-28, Sep. 2016.
- [2] 高橋応明, 野田耕司, 陳強, 石井望, “海中位置推定へのアプローチ”, 信学技報, AP2016-188, pp.59-62, Mar. 2017.
- [3] (社)海洋産業研究会, “水中音響通信の高度化による海洋産業の発展と新事業創出等 効果に関する調査研究報告書”, (社)日本機械工業連合会・(社)海洋産業研究会, 東京, 2005.
- [4] 大浜俊樹, 滝沢賢一, 井家上哲史, “海中における電磁波利用無線通信に関する一検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.113, no275, WBS2013-32, pp.k65-70, Oct. 2013.
- [5] M. Siegel and R.W.P. King, Electromagnetic Propagation Between Antennas Submerged in the Ocean, IEEE Transactions Antennas and Propagation, vol.21, pp.507-513, 1973.