

(74) 音波の伝搬時間群とデータベース照合を用いたマルチパス環境下における移動体の水中測位実験

吉原 到¹・海老原 格²・水谷 孝一³

¹正会員 あおみ建設株式会社 技術事業本部技術開発部 (〒101-0024 東京都千代田区外神田 2-2-3)
E-mail: yoshihara.tohru@aomi.co.jp

²非会員 筑波大学 システム情報系 准教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail: ebihara@iit.tsukuba.ac.jp

³非会員 筑波大学 名誉教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail: mizutani@iit.tsukuba.ac.jp

音波を用いた水中測位における課題の一つとして、浅海域や港湾部における多重反射（マルチパス）環境における欠測の発生や大きな誤差の存在がある。我々は不要な反射波を排除する信号フィルタリング技術を有する新しい「耐マルチパス水中音響測位技術」を構築してきた。この技術は、空間上のある領域に音源が存在する場合、音源から各受波器までの伝搬時間を予め計算機上で求めておき、該遅延時間前後のインパルス応答のみを抽出することで、マルチパス環境でも三角測量に必要な基線長を安定かつ精度良く測定するものである。本稿では、提案手法の性能を移動体環境で評価した。マルチパス環境である大型プールで、船底に音源を設置したボートを移動させながら、その位置をリアルタイム測位した。その結果、移動体の測位平均誤差は0.12~0.24 (m)、欠測率は0%であった。

Key Words: Underwater acoustic positioning, shallow water, multipath

1. はじめに

近年、重要な担い手である潜水士の不足が顕著となっていることから、港湾工事の機械化施工が推進されている。例えば、基礎捨石均し作業では、潜水士が操作する水中バックホウを活用することで、施工能力が大幅に向上している。しかし、既存の水中バックホウは潜水士が直接搭乗して操作するため、気象・海象条件が稼働率に大きく影響する。さらに、潜水士の高気圧障害の発症リスクを低減させるために、作業水深と作業時間に応じて減圧管理を行う必要があり、1日の作業時間に占める潜水作業時間の割合が減少する。そこで、安全性の向上と港湾工事の更なる効率化のために、支援船上から水中バックホウを遠隔操縦する技術が研究されてきた¹⁾³⁾。

水中バックホウ遠隔操縦支援システムを実現するためには、地形をソナーで計測し視覚情報として表示する機能、設計した基礎マウンド形状と現在の機体やバケットの位置をリアルタイムに表示しながら所定の位置に誘導するガイダンス機能、実際に機体を遠隔制御する機能、施工後の形状を計測し記録する機能が必要となる。そして、これらの情報の基点となるのが水中バックホウの自己位置情報であり、水中の座標をリアルタイムに正確か

つ安定して計測する技術が不可欠である。陸上では全球測位衛星システム (Global navigation satellite system; GNSS) が使用できるが、水中では電波が届かないため、超音波を活用した測位技術が広く用いられている⁴⁾。これは、音源から発した超音波が水中を伝搬して座標が既知である複数の受波器に届くまでに要した時間を測定することで、音源と各受波器間の距離を算出し、三角測量の原理で測位するものである。しかし、GNSSによる測量が建物による多重反射 (マルチパス) の影響で測位が不安定になるのと同様に、港湾工事が多く施工されている浅海域では、水面・水底・防波堤などの壁面で音波が多重反射してしまうため、安定した測位の実現は容易ではなかった (図-1)。測位の不安定さは水中建設機械の作業効

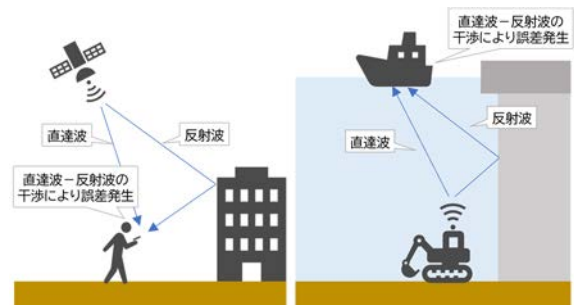


図-1 反射波が測位に与える影響

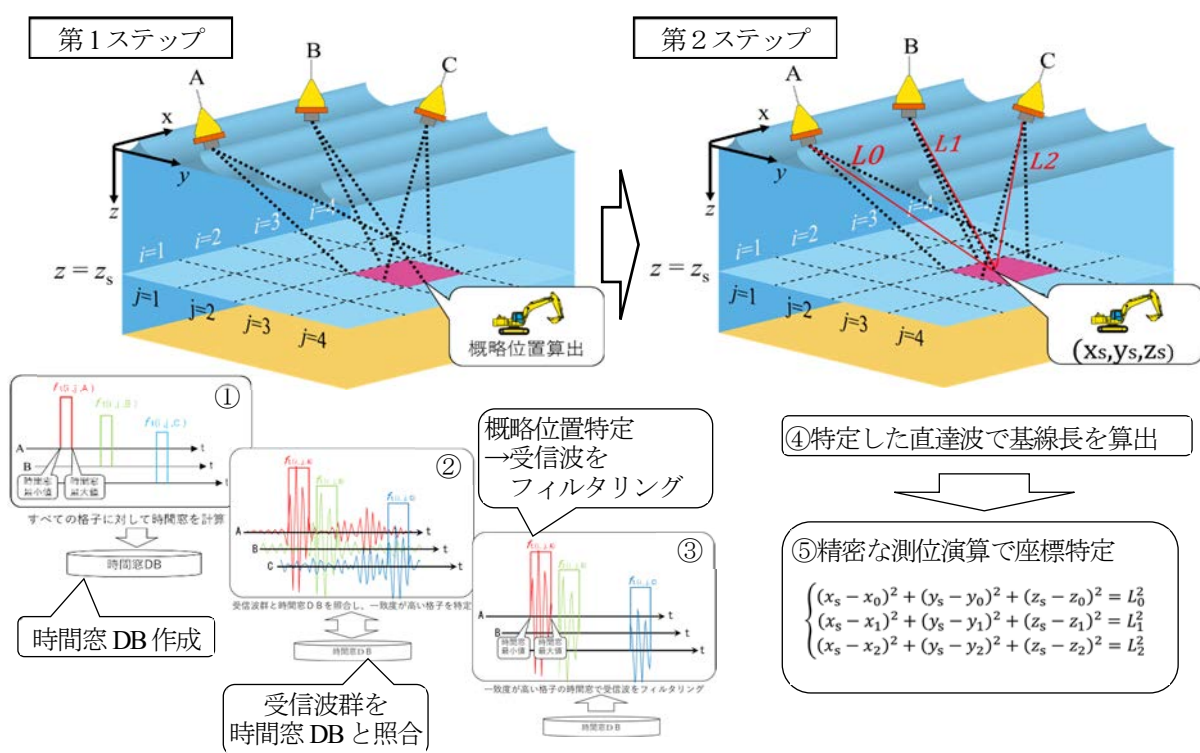


図-2 耐マルチパス水中音響測位技術を用いる測位ステップ

率の低下や事故につながるため、測位の安定性と高精度を両立する水中音響測位技術が求められている。

我々の研究グループは、測位に不要な反射波を排除する信号フィルタリング技術を有する、新しい「耐マルチパス水中音響測位技術」の確立に取り組んでいる。この技術は、空間上のある領域に音源が存在する場合、音源から各受波器までの伝搬時間を予め計算機上で求めておき、該遅延時間前後のインパルス応答のみを抽出することで、マルチパス環境でも三角測量に必要な基線長を安定かつ精度良く測定するものである。多重反射の影響が顕著な静的環境で測位実験を行ったところ、提案手法は約 30mm の精度で音源の位置を測位できることが明らかになっている⁹⁾。しかし、音源が移動する環境（移動体環境）における提案手法の評価はされていなかった。そこで、本稿では、提案手法の移動体への適用性を確認するために、音源を搭載させたボートを大型水槽内で移動させ、その位置をリアルタイム測位する実験を行い、その精度と欠測率を検証した。

2. 耐マルチパス水中音響測位技術

(1) 概要

既存の音響測位技術では、音源からパルス伸張信号を送信し、受波器で受信した信号に対しパルス圧縮処理を行うことで、音源—受波器間のインパルス応答を計測する。そして、インパルス応答のピーク位置から信号の伝

搬時間を検出し、水中の音速と乗算することで音源—受波器間の基線長を算出していった。この手法を浅海域などのマルチパス環境にそのまま用いると、直達波の他に複数の反射波が混在することで、受波信号内にインパルス応答に複数のピークが存在する。反射波同士が干渉すると、直達波よりもピークの大きさが大きくなることもあり、正しい基線長を測定できない場合があった。

これに対し、我々が提案する耐マルチパス水中音響測位技術は、不要な反射波を排除する新しい信号フィルタリング技術を中核としている。この技術では、音波が多重反射する水中において、安定かつ高精度な測位を、以下の要領で実現している（図-2）。

- ① 測位対象エリアをある大きさのメッシュ領域に区切り、メッシュ領域内の音源から発せられた音が受波器群に到達する時刻を、仮想空間で予め計算してデータベースに格納する。
- ② 実空間で受波器群により観測された受信信号を、データベースと比較することで、音源が存在する領域を決定する（第1ステップ：粗測位）。
- ③ 音源が存在する領域の位置情報を用いて、受信信号から不要な反射波を排除する（フィルタリング）。
- ④ 反射波を排除した信号（直達波のみ）を用いて、音源と受波器間の正確な測距を行い、三角測量の原理により音源の正確な位置を決定する（第2ステップ：精密測位）。

(2) 特徴

提案手法は、測位対象エリアをある大きさのメッシュ領域で区切り、各領域から信号を発信した場合、座標既知点に設置した受波器群が受信する時刻の最小値から最大値までを時間窓群としてデータベースに蓄積する。そして、実空間で観測したインパルス応答群と、時間窓群と比較し、両者の相関値が最も大きくなるメッシュ領域を、音源存在領域として特定する。送波器が存在しうる領域を特定できたら、時間窓外の信号は反射波の信号であるとして全て除外する。これにより、測位演算に必要な直達波のインパルス応答を特定することができる。

(3) マルチパス環境下における静止音源の測位結果

マルチパス環境であるコンクリート製実験水槽（大きさ 7.0m×9.0m、深さ 4.6m）内に音源 1 台・受波器 6 台を静止させて、測位実験を実施した。その結果、メッシュ領域の大きさを 0.5×0.5(m)と設定した場合、提案手法の測位平均誤差は 0.03m、標準偏差は 0.02mであった。一方、不要な反射波を排除する信号フィルタリング技術を有しない従来手法の測位平均誤差は 2.66m、標準偏差は 2.87mであった。これらの結果から、マルチパス環境下における提案手法の基本的な有効性を確認することができた⁹⁾。

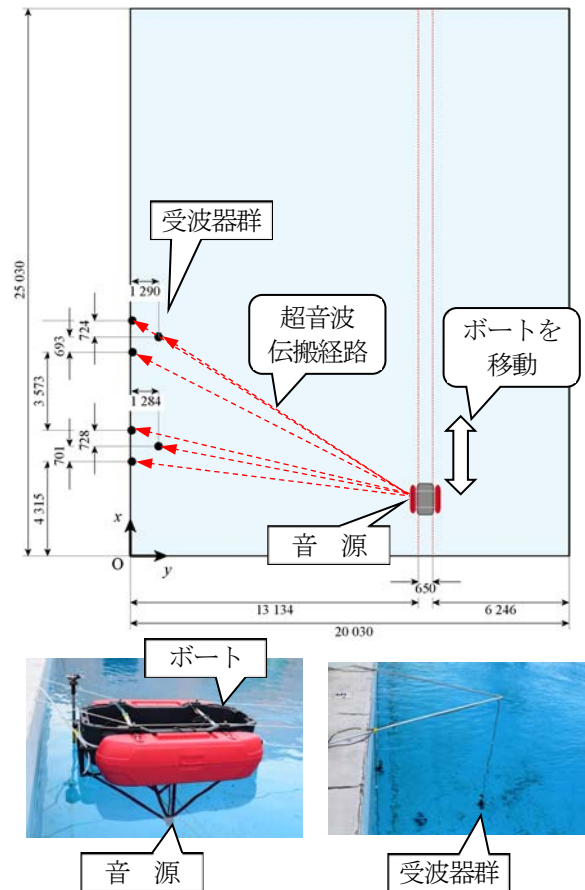


図-3 実験環境

3. マルチパス環境下における移動体の水中測位実験

(1) 実験環境

図-3 に実験環境を示す。マルチパス環境であるコンクリート製飛び込み台プール（大きさ 20m×25m、深さ 5~10m）内に受波器 6 台（BII-7523, Benthowave）を設置した。そして、船底に音源（OST-2120, OKI シーテック）を固定したフロートボート（Z1DR, カーメイト）をプールの x 軸方向に静止または移動させながら、その位置をリアルタイムに音響測位した。ボートの移動速度は、小（0.14~0.19 m/s）と中（0.93~1.30 m/s）の二通りとした。また、実験中は Real-time kinematic (RTK) GNSS（DG-PROIRWS, Drogger）を用いて送波器のリファレンス座標を測位した。

実験に用いた信号の詳細を表-1 に示す。パルス伸張信号として、7 次の M 系列を位相偏移（Phase-shift keying, PSK）変調した信号を用いた。搬送波周波数は音源の共振周波数である 35kHz とした。また、前章(3)のマルチパス環境下における静止音源の測位では、信号帯域幅は 5 kHz であったが、音源が移動することによってドップラースhiftが発生してもパルス圧縮処理が行えるよう、本実験では帯域幅を 35 kHz とした。

表-1 実験に用いた信号の詳細

パラメータ	設定値
M 系列次数	7 (チップ長 127)
変調方式	PSK
搬送波周波数 (kHz)	35
帯域幅 (kHz)	35
信号長 (ms)	10

表-2 飛び込み台プールでの移動体の水中測位実験結果：欠測率と平均誤差

		測位条件	提案手法	従来手法
欠測率 (%)	静止時		0%	66.4%
	移動時	速度・小	0%	83.6%
		速度・中	0%	84.5%
平均誤差 (m)	静止時		0.12m	0.38m
	移動時	速度・小	0.22m	0.25m
		速度・中	0.24m	0.44m

(2) 実験結果

実験結果を表-2 と図-4 に示す。まず、表-2 の欠測率に着目する。ボートが静止している場合、移動している場合、いずれにおいても提案手法の欠測率は 0%であった。一方、不要な反射波を排除する信号フィルタリング

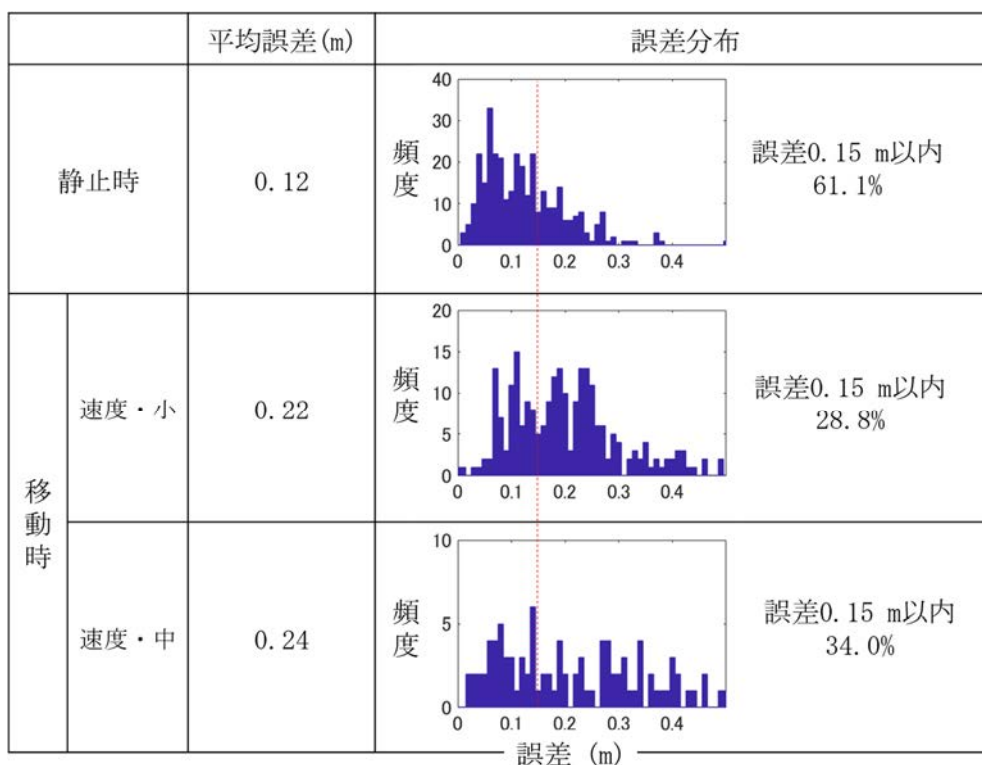


図-4 飛び込み台プールでの移動体の水中測位実験結果：提案手法の誤差分布

技術を有しない従来手法の欠測率は 66.4～84.5%であった。また、測位平均誤差に着目すると、提案手法の平均誤差はボートが静止している場合 0.12 m、ボートが移動している場合 0.22～0.24 m であった。一方、従来手法の平均誤差（欠測の場合を除く）はボートが静止している場合 0.38 m、ボートが移動している場合 0.25～0.44 m であった。

4. 考察

(1) 測位の欠測率の改善

不要な反射波をフィルタリングする技術を用いることで、マルチパス環境下における移動体の水中測位が行えることを確認した。水中バックホウのような移動体を測位するにあたり、欠測率は施工の安全性や施工品質の確保に大きく影響するので、移動体の測位を欠測率 0%で実現できたことは、非常に大きな成果であった。

(2) 測位精度

提案手法での静止時の精度は、大型水槽実験では 0.03 m であったが、飛び込み台プールでの実験では 0.12 m となった。大型水槽実験では水槽の周りを取り囲むように受波器を設置したが、飛び込み台プールでは、実際の工事現場を想定し、受波器を特定の壁面のみに設置したことが、測位精度に影響していると考えられる。

5. まとめ

不要な反射波をフィルタリングする技術を有する水中音響測位技術の性能を移動体環境で評価した。その結果、移動体の測位平均誤差は 120～240 (mm)、欠測率は 0%と良好な成果が得られた。今後は、実海域にて測位実験を行い、現場への適用性の観点からも検証を行いたいと考えている。

謝辞：実験に協力して下さった筑波大学体育センター、および、筑波大学音響システム研究室の大学院生の皆様に感謝いたします。本研究の一部は科研費 19H02351 の支援を受けました。

参考文献

- 1) 土木学会：土木学会誌，技術最前線 水中施工機械（捨石均し機）の開発，pp.18-20，1997年7月号。
- 2) 日本潜水協会：潜水作業マニュアル[Ver.1]，国土交通省港湾局監修，2015。
- 3) 平林丈嗣：港湾空港技術研究所資料 1222，水中建設機械の遠隔作業支援システムに関する研究，2010。
- 4) 海洋音響学会：海洋音響の基礎と応用，pp.236-243，成山堂書店，2004。
- 5) T. Yoshihara, T. Ebihara, K. Mizutani, and Y. Sato: Underwater Acoustic Positioning in Multipath Environment Using Time-of-flight Signal Group and Database Matching, *Jpn. J. Appl. Phys.*, SG1075, 2022