

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K19757

研究課題名（和文）環境を計測し自律的に最適信号を選抜する音響モデムによる高精度屋内音響GPSの実現

研究課題名（英文）High-precision indoor acoustic GPS using an acoustic modem that measures the acoustic channel environment

研究代表者

海老原 格（Ebihara, Tadashi）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：80581602

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：申請者がこれまで携わってきたデジタル通信技術を鍵に、マルチパスやドップラーに強い高精度な音響測位システムを構築した。スピーカ-マイクロフォン間の距離を計測するための信号、および、通信データを時間-周波数空間にマッピングして送信し、マルチパスやドップラーを受信機側で精度良く計測することで、安定したデータ伝送と測距が可能な通信方式を設計した。また、データベース探索に基づき、測位に必要な直達波のみを低コストで精度良く抽出する仕組みを確立した。これらを測位システムとして実装し、実験でその性能を検証した結果、センチメートルオーダーの精度で送受信機間の距離が推定できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、申請者がこれまで携わってきたデジタル通信技術を鍵に、マルチパスやドップラーに強い高精度な音響測位システムを構築した。この成果は、新しいビッグデータである「屋内位置情報」の収集基盤確立につながるものであり、データと屋内位置情報を紐付けた、革新的なマーケティング、防災、バリアフリーの開拓に貢献することが出来る。

研究成果の概要（英文）：We propose a novel acoustic positioning system that utilizes digital communication technology to address multipath and Doppler effects. The positioning system was designed to achieve stable data transmission and ranging by precisely measuring multipath and Doppler effects at the receiver side. A low-cost mechanism to accurately filter only the direct waves necessary for positioning utilizing a database search was also proposed. The performance of the positioning system was evaluated through experiments. The results suggest that the distance between the transmitter and receiver can be estimated with centimeter-level accuracy.

研究分野：情報通信工学

キーワード：音響測位 マルチパス ドップラー

### 1. 研究開始当初の背景

位置情報は、IoT・5G・AIの世界で流通する膨大なデータを紐付ける最重要情報である。そして、高精度な測位ツールの提供が、データの効率的な連携、分析、効果的な利活用には不可欠である。例えば、社会に広く普及しているスマートフォンに搭載されたカメラやセンサを利用して位置情報を計測するための研究が多く行われている。遍在する放送設備とスマートフォンを活用する音響測位も、新しい測位ツールとしてのポテンシャルを十分に有しているが、屋内空間特有の課題により、正確な測位が容易ではないとされてきた。

例えば、座標既知の送信機から発信された音波を座標未知の受信機群で受信すると、その音波の伝搬時間 (Time-of-flight; ToF) から送受信機間の射距離を計測し、三角測量の原理により送信機の位置を計算することができる。しかし、送信機から発信された音波は、壁面などで多重反射を繰り返し、複数の経路を経て (マルチパス) 受信機に到達する。そのため、受信機は強いエコーのかかった信号から、直達波を抽出する必要がある。さらに、送受信機が移動すると信号の周波数が変化する (ドップラーシフト)。この時、音波の伝搬速度は電波よりも遙かに遅いため、送受信機が僅かに移動するだけでも大きな周波数シフトが発生し、正確な測位の妨げとなる。

従って、高精度な屋内測位を実現するツールの新しいあり方を実現するためには、マルチパスやドップラーの課題を同時に解決し、正確な射距離の計測を実現する技術が必要であった。

### 2. 研究の目的

本研究は、申請者がこれまで携わってきたデジタル通信技術を鍵に、マルチパスやドップラーに強い高精度な音響測位システムを構築し、広範な利用が期待できる技術としてのブレイクスルーを狙うことを目的とする。

### 3. 研究の方法

デジタル通信技術の一つである直交信号分割多重 (Orthogonal signal division multiplexing; OSDM) 方式を音響測位に導入する。OSDM はデータと計測信号を時間 - 周波数空間にマッピングして送信し、マルチパスやドップラーの影響を受信機が精度良く計測することで、時間 - 周波数領域に広がったすべての信号電力を通信に活用する技術である。本研究では、この OSDM をベースに、マルチパスやドップラーを計測し、その情報を測位に反映する仕組みを確立する。さらに、計測されたマルチパスやドップラーを踏まえ、測位に必要な直達波のみを抽出する仕組みも確立する。これらを測位システムとして統合することで、マルチパスやドップラーの影響が顕著な環境においても、高精度な測位を実現する技術を確立する。

### 4. 研究成果

#### (1) マルチパス・ドップラー対応モデムの創成

スピーカ - マイクロフォン間の距離を計測するための信号、および、通信データを時間 - 周波数空間にマッピングして送信し、マルチパスやドップラーを受信機側で精度良く計測し、その情報を活用することで、安定したデータ伝送と測距が可能な通信方式を設計した (図 1)。さらに、それをモデムとして実装し、屋内空間における測距実験を実施した。その結果、提案したモデムは、マルチパスやドップラーの発生する条件下においても、スピーカ - マイクロフォン間の距離をセンチメートルオーダの精度で計測できることを実証した。

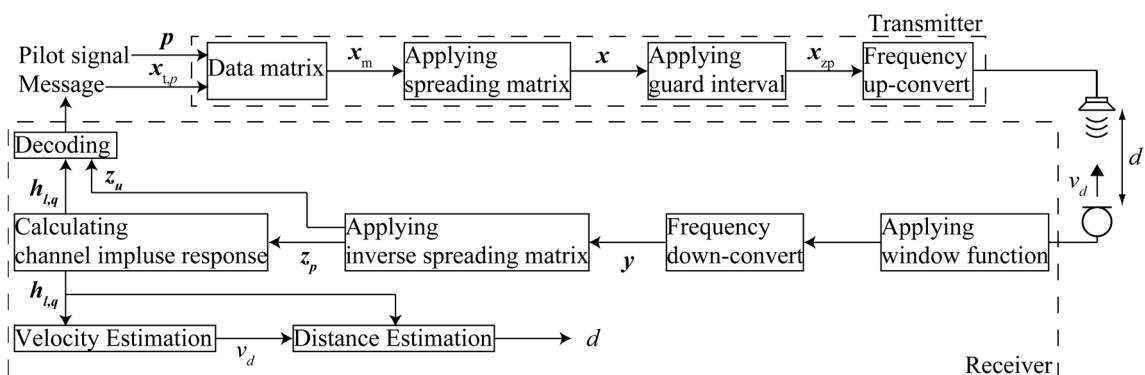


図 1：本研究で構築したマルチパス・ドップラー対応モデム

#### (2) 通信環境の計測とパラメータ設計

移動体の測位を想定し、受信機が 0.2 ~ 0.3 m/s で移動する動的環境下における通信路の遅延広がりやドップラー広がりを実験で計測した (図 2)。そして、観測された通信路の遅延広がり

とドップラー広がりを利用して、既存の放送機器やスマートフォンが有する周波数帯域を考慮に入れながら、構築したマルチパス・ドップラー対応音響モデムにおける信号の最適パラメータ（搬送波周波数、帯域幅、ガードバンド等）を設計した。

### (3) 測位に必要な直達波のみを抽出する仕組みの確立

データベース探索に基づき、測位に必要な直達波のみを低コストで精度良く抽出する仕組みを確立した。まず、測位対象エリアをある大きさのメッシュで区切り、送信機から発せられた音がメッシュ領域内の受信機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しておく。次に、実空間で観測された受信信号と、データベースを比較することで、音源が存在する領域を決定することが出来る。この時、音源が存在する領域における直達波の到達時間の最小値と最大値は明らかであることから、それより遅れて到達する信号は不要な反射波として排除することができる。これにより、測位に必要な直達波のみを精度良く抽出できることを、実験により確認した。

### (3) 実環境における検証

OSDM を用いる音響測位システムの性能を、シミュレーションおよび実験で評価した。周期的な M 系列信号を送受信することで距離を推定する信号処理方式をベンチマークとして選定した。その結果、受信機が 0.2 ~ 0.3 m/s で移動する環境において、提案したマルチパス・ドップラー対応モデムは、受信信号の信号電力対雑音電力比 (Signal-to-noise ratio; SNR) が低下しても、ベンチマークを上回る 10mm オーダの精度で送受信機間の距離が推定できること (図 2)、SNR が大きければ等化後のビット誤り率 (Bit-error-rate; BER) が 0 になることが明らかになった (図 3)。

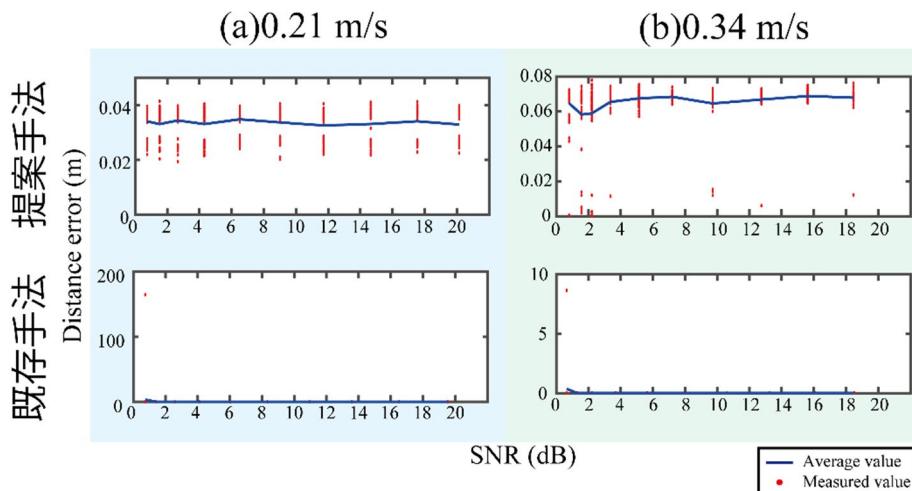


図 2：提案手法および既存手法を用いた射距離計測結果  
(a) 受信機の移動速度が 0.21 m/s, (b) 0.34 m/s .

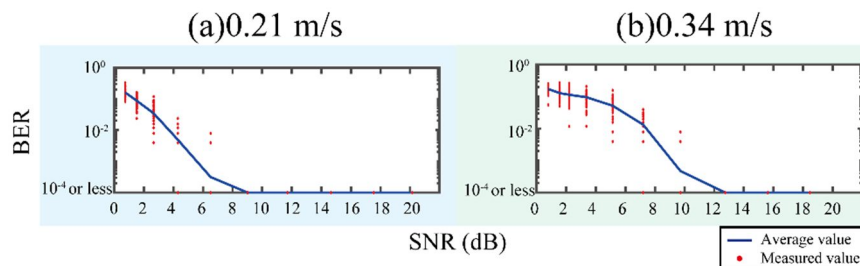


図 3：提案手法を用いた通信品質  
(a) 受信機の移動速度が 0.21 m/s, (b) 0.34 m/s .

### (4) 水中音響測位への応用

確立した音響測位システムの性能を、屋内空間と同様に大きなマルチパスとドップラーが発生することで知られている水中でも検証した。ここでは、屋内測位と異なり、座標未知の送信機から発信された音波を座標既知の受信機群で受信する構成とした。そして、水中においても、移動する音源の位置や速度を送受信機間の距離が推定できること、SNR が大きければ等化後のビット誤り率が 0 になることを実験で明らかにした。また、前記(3)のフィルタリング技術を用いることで、水中においても測位に必要な直達波のみを抽出することが出来、欠測率を大幅に下げることが出来ることも確認した。

以上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Wada Kohei, Ebihara Tadashi, Wakatsuki Naoto, Zempo Keiichi, Mizutani Koichi	4. 巻 62
2. 論文標題 Simultaneous distance measurement and information transmission in mobile environment using digital acoustic communication	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SJ1037 ~ SJ1037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acbf5c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Reo Okawara, Tadashi Ebihara, Naoto Wakatsuki, Keiichi Zempo, and Koichi Mizutani	4. 巻 -
2. 論文標題 Smartphone Camera-Based Indoor Positioning System Utilizing Optical Diffusion Filter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. Int. Conf. Emerging Tech. Commun. (ICETC2022)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34385/proc.72.S9-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 和田康平, 海老原格, 若槻尚斗, 善甫啓一, 水谷孝一	4. 巻 42
2. 論文標題 デジタル音響通信と Basis expansion model を用いた移動体の測距	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第42回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 吉原到, 海老原格, 水谷孝一	4. 巻 50
2. 論文標題 耐マルチパス水中音響測位技術の開発と水中バックホウの水中測位への応用	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 海洋音響学会誌	6. 最初と最後の頁 123 ~ 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 YOSHIHARA Tohru、EBIHARA Tadashi、MIZUTANI Koichi	4. 巻 79
2. 論文標題 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	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.22-22012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishijima Ryoichi、Ebihara Tadashi、Wakatsuki Naoto、Maeda Yuka、Mizutani Koichi	4. 巻 63
2. 論文標題 Measurement of distance and speed between transmitter and receiver using the propagation time of underwater acoustic communication signals with orthogonal signal division multiplexing	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 057001 - 057001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ad378e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihara Tohru、Ebihara Tadashi、Mizutani Koichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Trial Experiment of Positioning of Underwater Backhoe Using Time-of-flight of Acoustic Signal Group and Database Matching for Realization of Unmanned and Remote Underwater Construction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. Int. Symp. Underwater Tech. (UT23)	6. 最初と最後の頁 263 - 267
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/UT49729.2023.10103442	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Atsushi Tsuchiya, Naoto Wakatsuki, Tadashi Ebihara, Keiichi Zempo and Koichi Mizutani -	4. 巻 -
2. 論文標題 Time-of-arrival measurement method for reflected waves from multiple directions using Doppler effect by a single coaxially placed omnidirectional SP and MIC	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 29th International Congress on Sound and Vibration (ICSV29) -	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Atsushi Tsuchiya, Naoto Wakatsuki, Tadashi Ebihara, Keiichi Zempo and Koichi Mizutani -	4. 巻 -
2. 論文標題 Method of Reconstructing Wall Positions Using Direction-of-Arrival Estimation Based on the Doppler Effect of Omnidirectional Active Sonar	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the Work-in-Progress Papers at the 13th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 和田康平, 海老原格, 若槻尚斗, 善甫啓一, 水谷孝一
2. 発表標題 デジタル音響通信と Basis expansion model を用いた移動体の距離・速度計測
3. 学会等名 第43回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田康平, 海老原格, 若槻尚斗, 善甫啓一, 水谷孝一
2. 発表標題 デジタル音響通信と Basis expansion model を用いた移動体の測距
3. 学会等名 第42回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉原到, 海老原格, 水谷孝一
2. 発表標題 耐マルチパス水中音響測位技術の開発と水中バックホウの水中測位への応用
3. 学会等名 海洋音響学会2023年度研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 土屋充志, 若槻尚斗, 海老原格, 善雨啓一, 水谷孝一
2. 発表標題 ドップラー効果に基づいて計測された音波の到来方向と到来時間を用いた自己位置推定
3. 学会等名 第44回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石島諒一, 海老原格, 若槻尚斗, 前田祐佳, 水谷孝一
2. 発表標題 直交信号分割多重を用いる水中音響通信信号の伝搬時間計測による送受信機間の距離計測
3. 学会等名 第44回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石島諒一, 海老原格, 若槻尚斗, 前田祐佳, 水谷孝一
2. 発表標題 直交信号分割多重方式を用いる水中音響通信・測距システムの検討
3. 学会等名 IEEE主催2023年度第2回学生研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	若槻 尚斗  (Wakatsuki Naoto)  (40294433)	筑波大学・システム情報系・教授    (12102)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	水谷 孝一  (Mizutani Koichi)  (50241790)	筑波大学・システム情報系・研究員    (12102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関