

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04477

研究課題名（和文）水中音響通信におけるレトロディレクティブ方式送信ビームフォーミングの実験検証

研究課題名（英文）Experimental Verification of Retrodirective Transmit Beamforming in Underwater Acoustic Communication

研究代表者

吉澤 真吾 (Yoshizawa, Shingo)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20447080

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：水中無線通信は遠隔操作無人探査機(ROV)や自律型無人潜水機(AUV)の遠隔操作や画像・動画データのリアルタイム伝送に利用される。水中音響通信でビームフォーミングを実現する上での課題として端末位置変動があり、送信側端末から受信側端末に音波が届くまでに秒単位を要し、通信中にお互いの端末位置が変動することを想定しなければならない。端末位置変動に対応する手法として、相手端末から発する音波に対して到来方向推定を行い、その逆向きに送信指向制御を行うレトロディレクティブ方式を検討し、その実験検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水中音響通信での受信ビームフォーミングは通信を安定化する手段として利用され、送信ビームフォーミングは通信伝送範囲を拡大する手段として用いられる。水中音響通信で送信ビームフォーミングの実験検証を行った研究事例は少なく、端末位置変動に対応した手法は検討されていなかった。本研究ではレトロディレクティブ方式の通信性能評価を海域試験や水槽試験で実施し、通信品質を示すOutput SNR値で平均12dB改善する成果が得られた。この成果は水中音響通信の伝送範囲を拡大するのに有効であり、水中ロボットや水中ドローンの機能高度化に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Underwater wireless communication is used for remote control of remotely operated vehicles (ROVs) and autonomous unmanned vehicles (AUVs) and for real-time transmission of image and video data. One of the challenges in implementing beamforming in underwater acoustic communication is the fluctuation of the terminal position. In order to cope with such fluctuations, we studied a retrodirective system that the direction of arrival is estimated for the sound wave emitted from the other terminal, and the direction of transmission is controlled in the opposite direction and verified by our experiment.

研究分野：無線通信

キーワード：水中音響通信 ビームフォーミング 到来方向推定

## 1. 研究開始当初の背景

海洋土木業、水産業、研究機関等の海洋調査において水中ロボットが果たす役割が大きくなりつつある。水中ロボットは ROV(遠隔操作無人探査機)と呼ばれており、ロボットアームによる作業やセンサによる測定、カメラによる情報収集など有人潜水作業の代替手段として利用される。水中ロボットの無線伝送に対する潜在的な需要は高く、無線伝送の実用化に向けた研究開発が進められている。水中で遠距離での無線伝送を行うには音波を送受する水中音響通信が必須となる。

水中音響通信分野でのビームフォーミングに関する研究は受信ビームフォーミングの研究結果がほとんどであり、実海域で安定的に遠距離通信を行うことができる送信ビームフォーミングに関する研究事例は少ない。水中音響通信は陸上無線とは異なり、お互いの端末位置が常に変動することを考慮する必要があるが、そのような状況下で最適な通信を行う手法は検討されていなかった。

## 2. 研究の目的

水中音響通信で安定した遠距離データ伝送を実現するため、相手端末から発する音波に対して到来方向推定を行い、その逆向きに送信指向制御を行うレトロディレクティブ方式を検討し、その実験検証を行う。レトロディレクティブ方式は一方の端末のみが送信指向制御を行う単方向と両方の端末が送信指向制御を行う双方向の 2 つがあり、本研究では単方向、双方向のそれぞれでレトロディレクティブ方式を適用したときの通信特性評価を行った。また、通信特性評価ではお互いの端末が見通し内もしくは見通し外となる環境において通信測定を行い、それぞれのくらの通信品質の改善効果があるかを評価した。

## 3. 研究の方法

(1) レトロディレクティブ方式で重要となる到来方向推定について、様々な到来方向推定アルゴリズムをシミュレーションや実試験で測定評価し、音波反射が強い環境でも高い精度を維持できるアルゴリズムを選定する。

(2) 到来方向推定から相手側端末の位置を予測し、お互いの端末で到来方向推定と送信指向制御を繰り返して、最適なビーム形成を行うレトロディレクティブ方式の手法を確立し、シミュレーションや実試験により通信特性の改善効果を確認する。

## 4. 研究成果

到来方向推定では Delay and Sum (DS) 法、Frost 法、MUSIC 法の各種アルゴリズムを比較する。DS は最も基本的な手法であり、アレイアンテナのメインローブを全方向走査し出力電力が大きくなる方向を探索する。Frost 法はある規定した方向に対する周波数特性を拘束し、その拘束の下で適応信号処理により出力信号を最小化する方法である。MUSIC は相関行列を固有値分解し、到来波の方向に指向性のヌルを向け、出力電力が大きくなる方向を検出する方法である。

図 1 は到来方向推定アルゴリズムの評価結果である。縦軸が受信電力の強度、横軸が角度を表しており、図中の赤丸は受信電力のピーク(到来方向)を表している。Frost は DS より分解能が高いため 40 度付近のピークも検出できている。MUSIC は複数のピークは検出できているが、DS や Frost 法と比較すると正しく到来方向推定ができていない。広帯域信号に対する到来方向推定では Frost 法が最も優れていることがわかった。

見通し内および見通し外環境でのレトロディレクティブ方式通信手順を図 2 に示す。図 2(a) は見通し内環境での通信であり、リモート端末からローカル端末にパイロット信号を送信する(図中の Step A)。パイロット信号には PN 符号を用いる。ローカル端末において受波器アレイで受信した信号に対して到来方向推定を行い、到来角  $\theta$  を求める(Step B)。到来方向推定は受波した信号の位相を変えながら合成し、最も高い電力を有する角度を検知する。到来方向の角度  $\theta$  に合わせて送波器に与える信号の遅延調整を行った後、ローカル端末からリモート端末への通信フレームを送信する(Step C)。

図 2(b) は見通し外環境での通信である。見通し外環境ではローカル・リモート端末間で障害物があるため直接波が到達しないが、壁で反射してから到達する反射波を利用する。到来方向推定ではリモート端末で発した音が壁で反射してローカル端末に入射するときの角度が到来方向となる。指向制御ではローカル端末から壁に向けてビームを集中させるように形成する。

レトロディレクティブ方式の水中音響通信試験を北見市民温水プール(幅 25 m、奥行 15 m、水深 1.35 m)で実施した。サンプリング周波数は 250 kHz、ローカル端末の送波及び受波素子数は 16 であり、アレイ間隔 5 cm とした。リモート端末の送波及び受波素子数は 1 とした。パイロット信号並びに OFDM 信号の周波数帯は 12 kHz ~ 32 kHz である。PN 信号長は 82 ms (16384 サンプル) である。OFDM 仕様はサブキャリア本数 1024、QPSK、符号化率 1/2、送信時伝送レート 6kbps とした。見通し内環境での通信特性を図 3 に示す。Output SNR が 5dB を超えたときにビット誤り率(BER)は  $10^{-4}$  未満となる。位相固定の場合はリモート端末  $x=12.5\text{m}$  の位置で CNR や Output SNR が最大となるが、中心から離れていくにつれて低下する。指向制御による位相調整後はどの位置でも良好な通信特性を維持し、CNR で最大 11.5dB、Output SNR で最大 9.1dB の差がみられた。

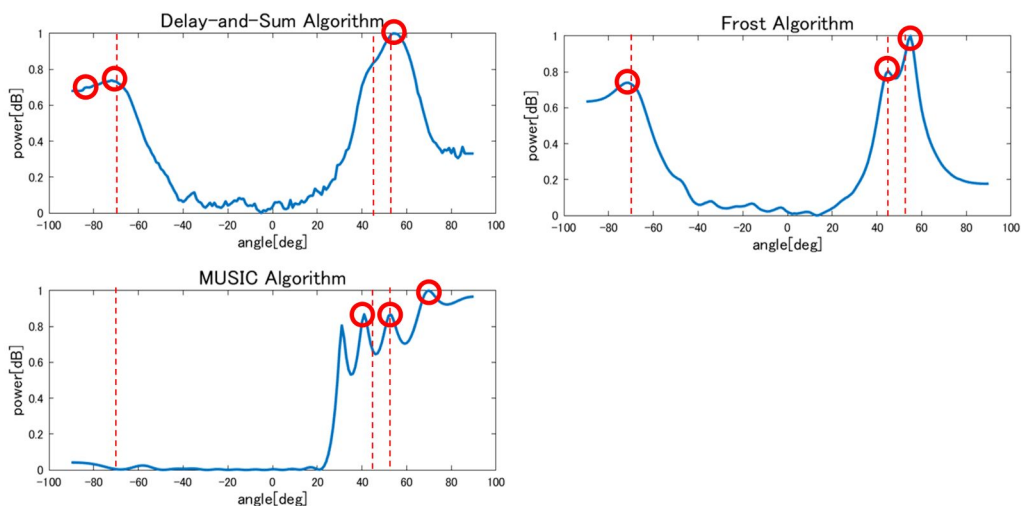


図 1 到来方向推定アルゴリズムの比較評価

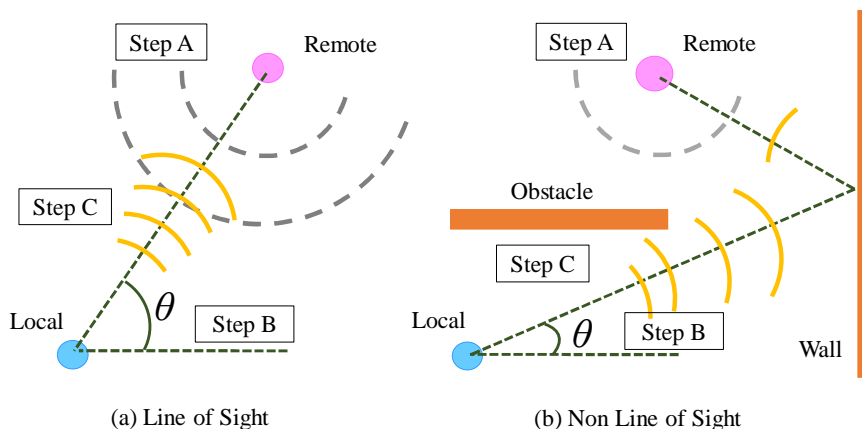


図 2 レトロディレクティブ方式の通信手順

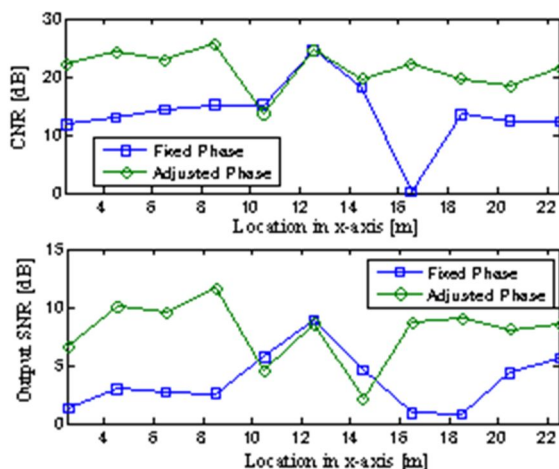


図 3 見通し内環境での通信特性

図 4 に示すローカル端末とリモート端末間に直接波を遮るようにプラスチック段ボールを設置した見通し外での試験評価を行った。OFDM 仕様は見通し内環境の試験時と同様である。

リモート端末位置  $x=5\text{ m}$ 、 $12.5\text{ m}$ 、 $20.5\text{ m}$  に対する到来方向推定の測定結果を図 5 に示す。横軸は受波アレイで指向制御を行ったときの設定角度、縦軸は受信合成後の信号電力を表す。受信電力がピークとなる角度がいくつかあるが、直接波や壁で反射してから到達した反射波の方向を示している。プラスチック段ボールが音波を完全に遮蔽することができず、端末位置によっては直接波が到来する方向で電力が最大となる結果もあるが、反射波が検知される到来方向に合わせて送信ビームの指向制御角を設定した。表 1 は見通し外環境の通信特性である。見通し内環境と比べると CNR や Output SNR の上昇量は少ないものの指向制御を行うことによる通信特性の改善効果を確認することができた。

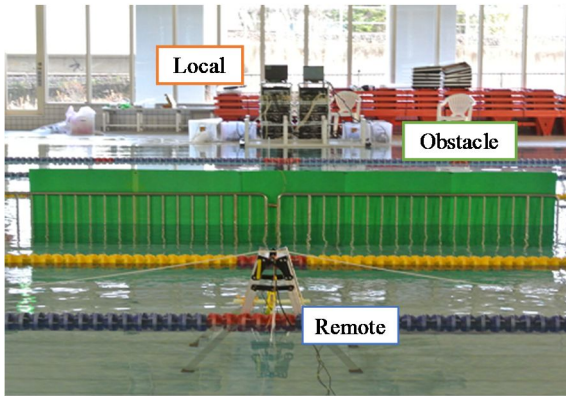


図 4 見通し外環境での試験

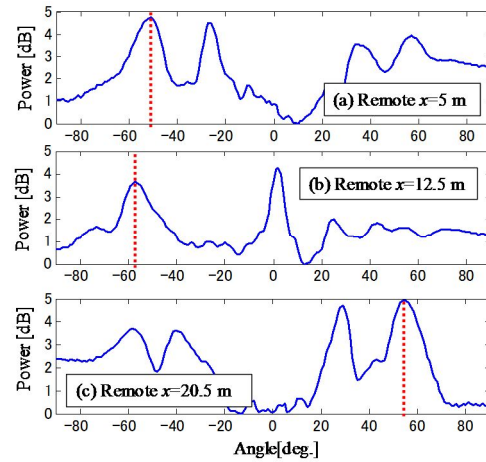


図 5 到来方向推定の測定結果

表 1 見通し外環境の通信特性

(a) Remote  $x=5\text{ m}$ , Obstacle  $x=6\text{ to }10.5\text{ m}$

	Fixed Phase	Adjusted Phase
CNR [dB]	10.8	13.7
Output SNR [dB]	4.0	4.6

(b) Remote  $x=12.5\text{ m}$ , Obstacle  $x=10\text{ to }14.5\text{ m}$

	Fixed Phase	Adjusted Phase
CNR [dB]	4.6	14.9
Output SNR [dB]	0.8	8.1

(c) Remote  $x=20\text{ m}$ , Obstacle  $x=14\text{ to }19.5\text{ m}$

	Fixed Phase	Adjusted Phase
CNR [dB]	12.9	14.8
Output SNR [dB]	3.5	6.3

双方向レトロディレクティブ方式は一方の端末（ローカル端末）だけでなく、もう一方の端末（リモート端末）でも到来方向推定と送信指向制御を行う。双方の端末で到来方向推定と送信指向制御を繰り返すことで通信特性を改善することを目的とする。双方向レトロディレクティブの通信手順を図 6 に示す。送波器と受波器を備えたりモート端末、ローカル端末を配置する。リモート端末の最初の指向制御方向はランダムとし、図中では正面としている (step1)。

ローカル端末の受波器アレイで受信した信号に対し到来方向推定を行い、到来角  $\theta_1$  を求める (step2)。ローカル端末の送波器アレイでビーム方向を到来角  $\theta_1$  に制御し、リモート端末へ通信フレームを送信する (step3)。リモート端末の受波器アレイで受信した信号に対して到来方向推定を行い、到来角  $\theta_2$  を求める (step4)。リモート端末の送波器アレイでビーム方向を到来角  $\theta_2$  に制御し、ローカル端末へ通信フレームを送信する (step5)。step2 から step5 を繰り返すことでビーム方向が双方の端末に対して最適な方向に近づき、到来方向推定時の推定角がより正確になることで通信特性が向上する。

見通し内および見通し外環境で双方向レトロディレクティブ方式の通信特性をシミュレーション

シミュレーション評価した。水中音場は縦 15m、横 25m、水深 1.35m の遊泳用プールを想定するモデルを用いた。水面の音波反射率は 1、水底と周囲壁の反射率は 0.7 とした。ローカル端末(Local)、リモート端末(Remote)、障害物(Obstacle)の配置を図 7 に示す。Local は図中の(x,y)座標で(12.5, 0.5)に固定し、Remote を(2.5, 12)から(22.5, 12)まで x 軸上に 1.0m ずつ位置を変えて測定を行う。Obstacle は(10, 5)~(15, 5)の幅で配置し、遮蔽物の透過率を 0 とした。

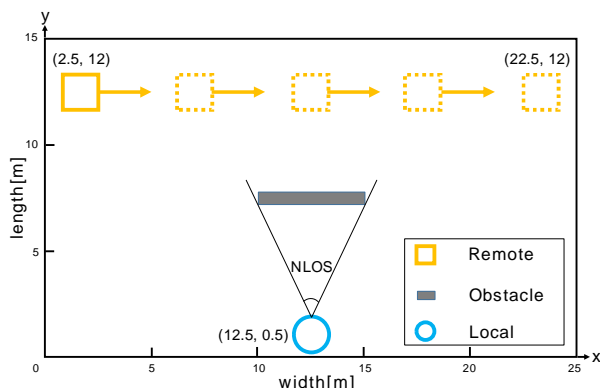
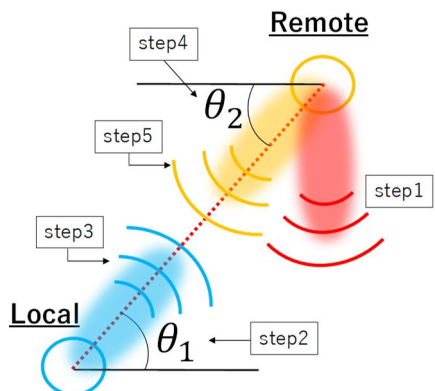


図 6 双方向レトロディレクティブ方式

図 7 ローカル端末、リモート端末、障害物の配置

見通し内環境での結果を図 8、見通し外環境での結果を図 9 に示す。縦軸は Output SNR [dB] を示し、横軸は測定位置[m]を示す。双方向通信 1 回目のローカル端末で受信した結果を local1、リモート端末で受信した結果を remote1、2 回目のローカル端末で受信した結果を local2、リモート端末で受信した結果を remote2 で表している。

Local 端末の Output SNR 値で比較すると見通し内と見通し外環境の全ての位置で local2 の結果が local1 を大きく上回っており、平均で 12.0 dB 上回る結果となった。リモート端末の Output SNR 値で比較すると remote1、remote2 で大きさ差はなかった。これは双方向通信 1 回目の時点でローカル端末のビーム方向がほぼ最適化されたためであると考えられる。リモート端末位置 4.5 m を除いた平均で見ると remote2 が remote1 を 0.9 dB 上回り、最大で 2.0 dB 上回る結果となった。このことから双方向通信を 2 回繰り返すことでリモート端末の通信特性も改善することが確認できた。

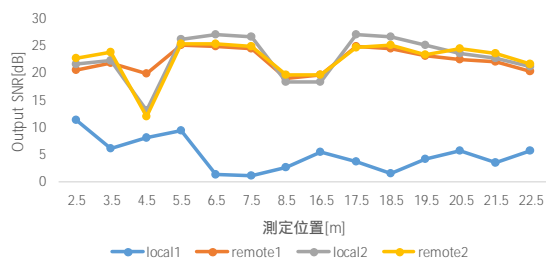


図 8 見通し内環境での通信特性

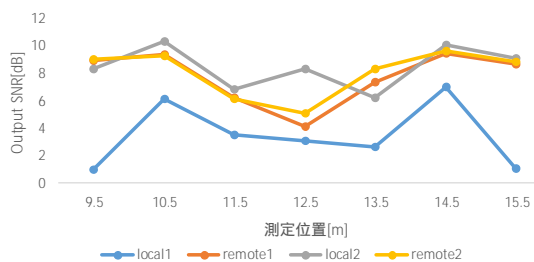


図 9 見通し外環境での通信特性

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Shingo Yoshizawa, Atsushi Wada, Hideki Sugimoto	4. 巻 17
2. 論文標題 Underwater Acoustic Positioning for Close Sources Using Time Division and Code Division Multiplexing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 NAUN International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 170-176
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.46300/9106.2023.17.20	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Atsushi Wada, Shingo Yoshizawa	4. 巻 16
2. 論文標題 Transmission of Depth Data by Pulse Position Modulation for Underwater Acoustic Positioning Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 NAUN International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 999-1006
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.46300/9106.2022.16.122	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Shingo Yoshizawa	4. 巻 15
2. 論文標題 Impulse Response Shortening in TDOA Algorithm for Underwater Acoustic Localization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 NAUN International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 1624-1631
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.46300/9106.2021.15.175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takada Keisaku, Yoshizawa Shingo	4. 巻 25
2. 論文標題 TDOA Measurement Algorithm Resistant to Multipath Interference in Estimating Direction of Arrival of Underwater Sound Source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Signal Processing	6. 最初と最後の頁 33~42
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2299/jsp.25.33	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shingo Yoshizawa	4. 巻 15
2. 論文標題 Underwater Acoustic Localization Based on IR-GCC-PHAT in Reverberant Environments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 NAUN International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 164-171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.46300/9106.2021.15.18	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Atsushi Wada, Shingo Yoshizawa, Satoshi Yuasa, Hideki Sugimoto
2. 発表標題 Underwater Acoustic Localization for Multiple Sound Sources by Time Division and Code Division Multiplexing
3. 学会等名 IEICE International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashiro Ishikawa, Shingo Yoshizawa
2. 発表標題 Underwater Acoustic Communication Using a Bidirectional Retrodirective System
3. 学会等名 IEICE International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashiro Ishikawa, Shingo Yoshizawa
2. 発表標題 RAKE Reception of OFDM Signals in Non-Line-of-Sight Underwater Acoustic Communication
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Wada, Shingo Yoshizawa, Satoshi Yuasa, Hideki Sugimoto
2. 発表標題 Simultaneous Multi-points Measurement in Underwater Acoustic Localization
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeru Obuchi, Shingo Yoshizawa
2. 発表標題 Evaluation of MQTT Application Implementation in Underwater Acoustic Communication Networks
3. 学会等名 IEICE International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Etou Hiromu, Shingo Yoshizawa
2. 発表標題 Automatic Discrimination of Sound Propagation Path Using CNN for Underwater Acoustic Communication
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉澤真吾, 高田溪作, 永田豪
2. 発表標題 水中音響通信における非正常ドップラーシフトに対応したデジタル変復調方式
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 石川貴大, 吉澤真吾
2. 発表標題 双方向レトロディレクティブ方式を用いた水中音響通信の基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会SIS研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田篤士, 吉澤真吾, 湯浅智志, 杉本英樹
2. 発表標題 時分割・符号分割多重による複数音源を対象とした水中音響測位の試験評価
3. 学会等名 電子情報通信学会SIS研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉澤真吾, 土生修平
2. 発表標題 水中ロボット搭載型SBL方式音響測位装置の開発
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川貴大, 吉澤真吾
2. 発表標題 見通し外水中音響通信におけるビームフォーミングを用いた受信機構成の一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会SIS研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鶴原桃香, 吉澤真吾
2. 発表標題 インパルス応答測定に基づく雑音と音波反射に強い水中音響測位方式
3. 学会等名 海洋音響学会2021年度研究発表会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永野碧衣, 吉澤真吾
2. 発表標題 送信・受信ビームフォーミングを用いた水中音響通信の紋別港湾試験報告
3. 学会等名 海洋音響学会2021年度研究発表会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Momoka Tsuruhara, Keisaku Takada, Shingo Yoshizawa
2. 発表標題 A Study of Multipath Error Reduction in Underwater Acoustic Localization
3. 学会等名 IEICE International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Aoi Nagano, Shingo Yoshizawa
2. 発表標題 Experimental Evaluation of Retrodirective System in Underwater Acoustic Communication
3. 学会等名 IEICE International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA) (国際学会)
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------