

令和 4 年 9 月 1 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K18143

研究課題名（和文）海中可視光ワイヤレス給電通信のための高電力効率変調法に関する研究

研究課題名（英文）High Power Efficiency Intensity Modulation for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer in Underwater Visible Light Communications

研究代表者

小澤 佑介（Kozawa, Yusuke）

茨城大学・理工学研究科（工学野）・助教

研究者番号：20634215

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）：本研究課題では、水中高速無線通信ネットワーク網を柔軟に構築するために、無人潜水艦や水中ドローンと水中センサ間におけるワイヤレス通信・ワイヤレス給電を同時に実現する水中ワイヤレス給電通信方式を目指している。とくに、海中状況に適応しつつ、安定したワイヤレス給電を実現するために、複数色を用いた適応型カラーシフトキーイング（CSK：Color shift keying）方式を提案している。また、この適応型CSKを提案し、海中水質に応じた通信性能と給電性能を理論解析により評価している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水中空間で用いるあらゆるセンサのバッテリーレス化およびワイヤレス化により、水中センサの海底配置及び水中センサからの情報収集が容易となり、より複数の水中センサをより広範囲に設置することが可能となる。これらの水中センサを用いた大規模水中無線通信ネットワーク網は、日本海域のメタンハイドレート等の国際資源の探索/発掘作業を効率的に進めることができ、環境イノベーションおよび国際競争力への寄与が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research project aims to develop an underwater wireless power transfer communication system that simultaneously realizes wireless communication and wireless power transfer between an unmanned submarine or underwater drone and underwater sensors in order to construct a flexible underwater high-speed wireless communication network. In particular, we propose an adaptive color shift keying (CSK) method using multiple colors to realize stable wireless power transfer while adapting to underwater conditions. The proposed adaptive CSK method has been theoretically analyzed to evaluate its communication performance and power supply performance according to undersea water quality.

研究分野：情報通信工学

キーワード：可視光ワイヤレス給電通信 可視光通信 海中可視光通信 海中通信 可視光ワイヤレス給電 水中通信 水中可視光通信

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国は世界第6位の領海/排他的経済水域/大陸棚の広さを有し、これらの海域では大規模なメタンハイドレート等の国際資源の存在が確認されている。これら海底国際資源の探索/発掘作業を円滑に進めるためには、複数の水中センサや水中ロボットを常に海底に配置し、定期的に潜水する無人潜水艦で各センサが集めた膨大な調査情報を収集するような高速無線ネットワーク網の構築が必要不可欠である。本研究課題では、このような水中高速無線通信ネットワーク網を柔軟に構築するために、水中高速無線通信の実現と水中空間で用いるあらゆるセンサのバッテリーレス化およびワイヤレス化の実現を目指す。

2. 研究の目的

本研究課題では、柔軟な水中高速無線通信ネットワーク網を構築するために、

課題(1)：短距離(約 100m 範囲内)の水中高速無線通信技術、及び

課題(2)：水中センサのバッテリーレス化のための水中ワイヤレス給電技術、の2つの課題を検討し、さらにこの2つを同時に実現する方式として

課題(3)：水中ワイヤレス給電通信システム技術の実現を目指す。

これらの課題解決には、水中可視光通信が海中の水質変化によって、最も減衰の小さい最適な光波長帯が変動するため水質に応じて波長帯域を適応的に変化させる必要がある。また、通信だけでなく給電に対しても最適となる新しい変復調技術の提案が必要となる。とくに電力変換回路部では、入力信号の電圧が急変すると DC-DC コンバータの出力電圧も一時的に変動するため、バッテリーレス水中センサの給電電力を用いた制御へ影響が出てしまう。したがって、一時的な変動の大きさと継続時間はなるべく小さいことが望ましく、受信信号の振幅変動が少ない変調技術を検討する必要がある。そこで、これらの検討課題を同時に解決する“複数色を用いた適応型カラーシフトキーイング方式”の提案とその基礎理論構築を目指す。

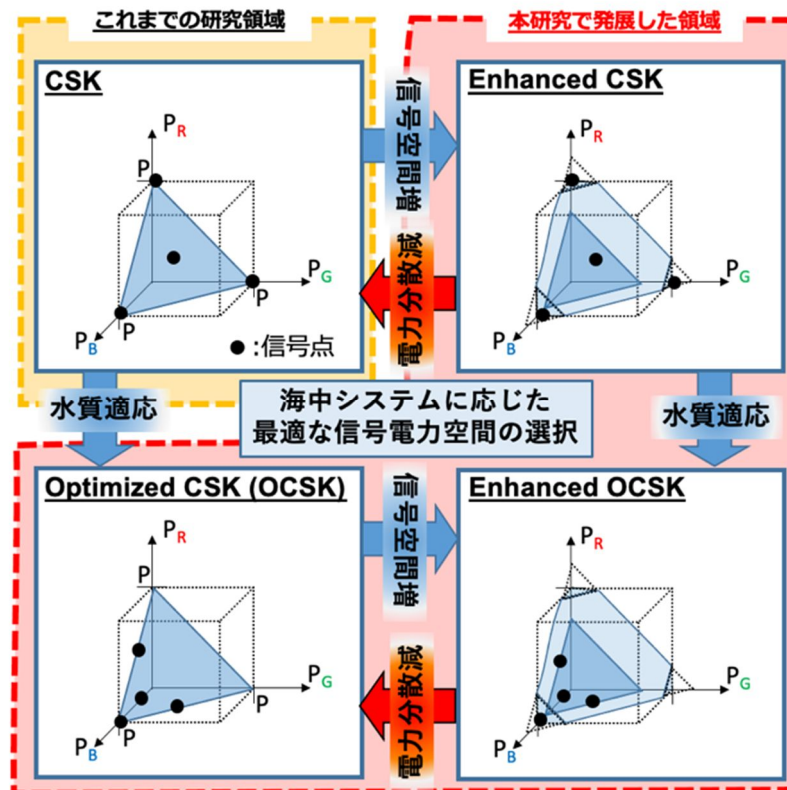


図1：三原色を用いた4値CSKの信号空間拡張技術と水質に応じた信号点最適配置のイメージ図(左上：従来CSK、左下：適応CSK(OCSK)、右上：拡張CSK、右下：拡張OCSK)

3. 研究の方法

本研究課題では、複数色 LD を用いた水中ワイヤレス給電通信システム技術の実現を目指す。とくに、水質・通信・給電の3つの項目に対して最適化制御を可能とする複数色を用いた適応型カラーシフトキーイング方式に着目し以下の3つの研究課題に取り組む。

(1) 水質・給電に対して最適化する**適応型カラーシフトキーイング(CSK: Color Shift Keying)**方式の確立:

複数色を用いた CSK 方式は IEEE802.15.7 標準化で提案されている光強度変復調技術である。この CSK 方式は、情報送信に用いる光波長に光の3原色である赤色、青色、緑色を用い、3色の発光強度比を制御することで「色」を変化させ情報を表現する。例えば、4つのシンボルを送信する4値 CSK の場合、3色の発光強度比を制御することで赤、青、緑、白のシンボルを作成し情報を送信することが可能となる。この4値 CSK の信号点空間と各シンボル点を図1左上に示す。

赤、青、緑を用いた CSK の信号点空間は赤色の電力 P_R 、青色の電力 P_B 、緑色の電力 P_G の電力比で表すことができ、赤、青、緑の各シンボルは P_R 軸、 P_B 軸、 P_G 軸上に配置される。また、白色は赤、青、緑の電力比を均一にすることで表すことができるため、 P_R 軸、 P_B 軸、 P_G 軸上に配置された3つのシンボル点で形成される三角形の中心位置に配置される(厳密には電力比が均一でなくとも様々な白色が表現できるがここでは説明を簡略化するため均一としている)。従来 CSK は、主に照明可視光通信で検討されている光強度変復調技術であり、3色の発光強度の和を一定とすることで CSK を適用した照明のちらつきを軽減することが可能である。図1の例では、各シンボルで常に P_R と P_B と P_G の和が一定 ($P_R+P_B+P_G=P$) となっている。

本研究課題では、この CSK 方式を拡張した適応型 CSK (OCSK: Optimized CSK) 方式を提案する。従来 CSK 方式を拡張する上で、まず本研究課題では、水質・給電・通信の3要素のうち、**水質・給電について最適化**を行った。具体的には、水質に対する最適化として、推定海中通信路チャネルを用いた最適送信信号点生成を行った。この推定海中通信路チャネルモデルは送信機周辺のクロロフィル濃度値を測定または気候データから取得することで推定し、この推定海中通信路チャネルを用いることで、**受信信号点空間の最小信号点間距離を最大化**させるように送信信号点を配置する。かつ、**受信信号の振幅変動を最小化**するためにシンボル点に関わらず受信電力を一定とする送信信号点配置を導出した(図1左下図)。さらに、提案方式について海中水質に応じた給電性能及び通信性能を理論解析により評価する。

(2) 水質・通信に対して最適化する**拡張 CSK 方式の確立**:

次に、水質・給電・通信の3要素のうち、**水質・通信について最適化**を行った。このうち、水質に対する最適化は上述した(1)と同様に、推定海中通信路チャネルを用いることで、最小受信信号点間距離が最大となるように信号点を配置する。さらに、(1)では受信信号の振幅変動を最小化するために受信電力一定の制約があったが、拡張 CSK 方式ではこの制約を撤廃した。したがって、本方式は通信路状態に応じて信号点配置を最適化した波長多重方式と言え、(1)の技術に対して最小信号点間距離を増大することが可能となるが、一方で受信電力の振幅変動が大きくなってしまふ。この方式について、海中状態に応じた給電性能及び通信性能を理論解析により評価する。

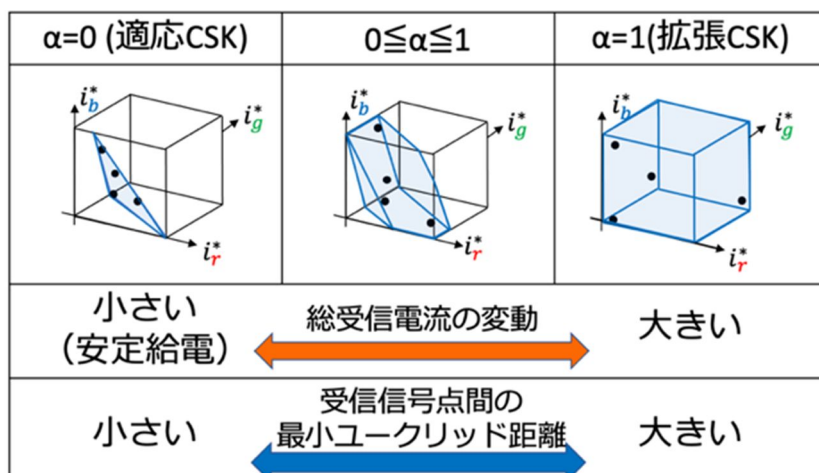


図 2: 信号空間増大比率 α と送受信電流の変動値及び受信信号の最小信号点間距離 (最小ユークリッド距離) の関係

(3) 水質・通信・給電に対して最適化する複数色を用いた**拡張 OCSK 方式の確立** :

最後に、水質・給電・通信の3要素全てに対して最適化を行った。このうち、水質に対する最適化は上述した(1)と同様に、推定海中通信路チャネルを用いることで、最小受信信号点間距離が最大となるように信号点を配置する。さらに、(1)では受信信号の振幅変動を最小化するために受信電力一定の制約があり、(2)では受信信号電力の制約を撤廃したが、本提案方式では、**受信信号電力の一定化を緩和した**信号空間の拡張(図1右下、及び図2)による拡張 OCSK 方式を提案する。

具体的には、図2で定義する**信号空間増大比率** を導入し**受信信号電力変動を制御する**。一般的に、この信号点空間増大比率 α が増大すると信号点空間が増大するため、最小受信信号点間距離も増大することができるが、受信信号の振幅変動は大きくなる。一方で、 α を小さくすると、受信信号の振幅変動は小さくなるが、信号点空間が減少するため最小受信信号点間距離も減少する。この信号空間増大比率 α によって、(1)の最適 CSK と(2)の拡張 CSK は、拡張 OCSK 方式の一部と定義することができ、それぞれ $\alpha=0$ の場合、 $\alpha=\sqrt{2}$ の場合となる。本研究では、この信号空間増大比率 α に応じた給電性能及び通信性能を理論解析により評価する。

4. 研究成果

(1) 水質・給電に対して最適化した**適応型 CSK 技術** :

本提案方式では、シンボルに関わらず受信電力の振幅変動を一定としつつ、推定海中通信路チャネルを用いることで受信信号点空間の最小信号点間距離を最大化させるような送信信号点配置法を提案した。その結果、下記の研究成果が得られた。

- 提案手法では、推定海中通信路チャネルと実際の海中通信路チャネルが理想的に同じ場合、クロロフィル濃度値に応じた全ての水質 (Pure sea, Clear Ocean, Coastal, Harbor) において受信信号の振幅変動の変動値を 0% とすることができた。
- 一方で、受信信号の振幅変動に対する厳しい制約のため、最小受信信号点間距離が小さくなった。その結果、緑色の単色レーザーダイオード (LD: Laser-Diode) を送信機として用い、光強度変復調方式に最もシンプルなオンオフキーイング (OOK: On-Off Keying) 方式を用いた場合に比べて、提案手法の平均ビット誤り率性能が劣化することを確認した。

- また、最も水質の良い Pure sea 以外の水質の場合、OOK 方式に比べて提案方式はワイヤレス給電電力も小さくなることが確認できた。

以上の点より、信号点空間拡張による平均ビット誤り率性能の向上を検討する必要があることが示された。

(2) 水質・通信に対して最適化した**拡張 CSK 技術**：

本提案方式では、受信電力の振幅変動に制約を与えず、推定海中通信路チャネルを用いることで受信信号点空間の最小信号点間距離を最大化させるような送信信号点配置法を提案した。その結果、下記の研究成果が得られた。

- 提案手法では、受信電力の振幅変動に制約を与えず信号点を配置したため、適応型 CSK 方式の際に受信信号の振幅変動率が水質によらず 0%であったのに対し、水質に応じて約 50%から約 70%まで変動率が上昇した（OOK を用いた際の受信信号の振幅変動率は 100%）。
- 一方で、適応型 CSK と緑色 LD を用いた OOK 方式に比べて、拡張 CSK の平均誤り率性能が優れていることを確認した。
- 給電電力については、信号点空間を拡張したとしても最小信号点間距離を最大となるように配置した場合、その平均電力は適応型 CSK とほぼ同じになるため、適応型 CSK と同様に、最も水質の良い Pure sea 以外の水質の場合、OOK 方式に比べて提案方式はワイヤレス給電電力が小さくなることが確認できた。

(3) 水質・通信・給電に対して最適化した**拡張 OCSK 技術**：

本提案方式では、信号空間増大比率 α を導入し受信信号電力変動を制御しつつ、推定海中通信路チャネルを用いることで受信信号点空間の最小信号点間距離を最大化させるような送信信号点配置法を提案した。その結果、下記の研究成果が得られた。

- 信号空間増大比率 α の値に応じて、受信信号の振幅変動率が制御可能であることがわかった。例えば、 α の値が 0.2、0.5、0.8 の場合、変動率は約 20%、約 40%、約 50%となる。
- 同様に、信号空間増大比率 α の値に応じて、平均ビット誤り率性能が変化することも確認できた。とくに水質が Pure-sea の場合では、 α の値を 0.5 に設定することで OOK 方式と同等のビット誤り率性能を達成しつつ、受信信号の振幅変動率を約 40%に抑えることが確認できた。
- また、推定海中通信路チャネルと実際の海中通信路チャネル間に誤差がある場合についても解析を行った。その結果、測定したクロロフィル濃度値と実際の通信路上のクロロフィル濃度値が異なる場合、最大で約 40%程度変動率が劣化することがわかった。一方で、クロロフィル濃度値の誤差が $\pm 0.5\text{mg/m}^3$ 程度であれば、10%程度の変動率劣化に収まることが示されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kogo Takuma, Kozawa Yusuke, Habuchi Hiromasa	4. 巻 1
2. 論文標題 Chlorophyll concentration-based CSK constellation point optimization for Underwater SLIPT using Time Splitting receiver	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE Global Communications Conference Workshop on Optical Wireless Communications 2020	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/GCWkshps50303.2020.9367436	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 Takuma Kogo, Yusuke Kozawa, Hiromasa Habuchi	4. 巻 1
2. 論文標題 Optimized CSK constellations for underwater SLIPT	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing 2020 (NCSP2020)	6. 最初と最後の頁 409-412
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 Yusuke Kozawa, Ryota Kimoto, Yohtaro Umeda	4. 巻 1
2. 論文標題 Inverse Pulse Position Modulation Scheme for Underwater Visible Light Simultaneous Wireless Information and Power Transfer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of The 1st Optical wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT2019) in Optics and Photonics International Congress	6. 最初と最後の頁 1-2
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 Yusuke Matsuda, Yusuke Kozawa, Yohtaro Umeda	4. 巻 22
2. 論文標題 Experimental Evaluation of Hybrid PWM/DPAM Dimming Control Method for Digital Color Shift Keying Using RGB-LED Array	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Signal Processing	6. 最初と最後の頁 165-168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2299/jsp.22.165	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 Ryota Kimoto, Yusuke Kozawa, Yohtaro Umeda, Hiromasa Habuchi	4. 巻 1
2. 論文標題 Underwater Visible Light Simultaneous Wireless Information and Power Transfer using Inverse Pulse Position Modulation Scheme	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing 2019 (NCSP2019)	6. 最初と最後の頁 108-111
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 Jumpei Okumura, Yusuke Kozawa, Yohtaro Umeda, Hiromasa Habuchi	4. 巻 35
2. 論文標題 Hybrid PWM/DPAM Dimming Control for Digital Color Shift Keying Using RGB-LED Array	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Journal on Selected Areas in Communications	6. 最初と最後の頁 45-52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JSAC.2017.2774738	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 Ryota Kimoto, Yusuke Kozawa, Yohtaro Umeda, Hiromasa Habuchi	4. 巻 1
2. 論文標題 Inverse pulse position modulation schemes for simultaneous visible light wireless information and power transfer	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceeding of 27th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ATNAC.2017.8215383	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 Iwase Tatsuhiko, Kozawa Yusuke, Habuchi Hiromasa	4. 巻 1
2. 論文標題 Theoretical analysis of selective variable rate multi-pulse pulse position modulation for visible light communications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceeding of 2021 24th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/WPMC52694.2021.9700459	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 Kogo Takuma, Kozawa Yusuke, Habuchi Hiromasa	4. 巻 1
2. 論文標題 Chlorophyll concentration-based CSK constellation point design for underwater SLIPT with priority on communication performance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceeding of 2021 24th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPIC)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/WPIMC52694.2021.9700409	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 Yokoo Kazune, Kozawa Yusuke, Sawa Takao	4. 巻 1
2. 論文標題 Theoretical analysis of received optical intensity of underwater image sensor based visible light communications using RGB-LEDs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceeding of 2021 24th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPIC)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/WPIMC52694.2021.9700471	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14件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 向後拓磨・小澤佑介・羽淵裕真
2. 発表標題 時間分割型水中可視光ワイヤレス給電通信システムのためのCSK信号点配置の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村陽平、李翼、榎田洋太郎、小澤佑介
2. 発表標題 可視光ワイヤレス給電通信システムにおける通信と給電効率の最適化
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小澤佑介
2. 発表標題 LEDを使った可視光通信とはなにか
3. 学会等名 応用科学学会公開技術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木元亮太、小澤佑介、榎田洋太郎、羽瀨裕真
2. 発表標題 反転パルス位置変調方式を用いた水中可視光ワイヤレス給電通信システムに関する基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小田嶋啓介、榎田洋太郎、小澤佑介、村松大陸
2. 発表標題 太陽電池等価回路パラメータ光強度依存性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木元亮太、小澤佑介、榎田洋太郎、羽瀨裕真
2. 発表標題 光強度変復調法を用いた水中可視光ワイヤレス給電通信システムに関する基礎検討
3. 学会等名 革新的無線通信技術に関する横断型研究会 MIKA
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小澤佑介
2. 発表標題 可視光を用いた水中光無線給電通信方式に関する研究
3. 学会等名 第三回「IoT 時代におけるスマートスペクトラムとその応用」研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田勇介、小澤佑介、榎田洋太郎
2. 発表標題 PWM/DPAMハイブリッド型調光制御法を用いたデジタル制御型カラーシフトキーイングの実験的評価
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 木元亮太、小澤佑介、榎田洋太郎、羽瀨裕真
2. 発表標題 水中可視光ワイヤレス給電通信システムのための交流/直流分離フィルタ設計に関する基礎的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小澤佑介
2. 発表標題 マルチカラー可視光通信技術
3. 学会等名 可視光通信協会拡大ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yusuke Matsuda, Yusuke Kozawa, Yohtaro Umeda
2. 発表標題 Experimental Evaluation of Hybrid PWM/DPAM Dimming Control Method for Digital Color Shift Keying using RGB-LED Array
3. 学会等名 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing 2018 (NCSP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松永慧吾、小澤佑介、羽淵裕真
2. 発表標題 水中可視光通信のための角度ダイバーシティ受信機を用いた背景光雑音軽減法に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 向後拓磨,小澤佑介、羽淵裕真
2. 発表標題 時間分割型USLIPTにおける最適CSK信号点空間拡張に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松永慧吾、小澤佑介、羽淵裕真
2. 発表標題 角度ダイバーシティ受信機を用いた水中可視光通信におけるPDの配置に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

革新的無線通信技術に関する横断型研究会 MIKA2018にて若手最優秀部門のポスター賞受賞
<http://mika-wc.org/award/mika2018prize/>
電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会2018年12月研究会ポスターセッションにて学生奨励賞受賞
<https://www.ieice.org/~wbs/award.html>
電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会2022年3月研究会にてオーラルセッション研究奨励賞受賞
<https://www.ieice.org/~wbs/award.html>

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