

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04414

研究課題名（和文）移動体への光無線給電と光空間通信のハイブリッドシステムの構築

研究課題名（英文）Construction of a hybrid system of optical wireless power transmission and free space optics to moving object

研究代表者

丸山 武男（Maruyama, Takeo）

金沢大学・電子情報通信学系・准教授

研究者番号：60345379

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：光無線給電・通信伝送システムにおける大電力および高速伝送を実現する要素技術として、異なる波長によるシステムをダイクロイックミラーを用い同じ光軸上で伝送するシステムを構築しました。本システムでは、電力とデータの送受信に影響を与えず、1Wの電力と10GHzのデータの同時伝送に成功しました。PDからレーザーへの受信精度を向上させることで、より高速なデータ伝送を実現しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光無線給電と空間光通信のハイブリッド化は、大電力伝送と超高速通信が同時に可能であるため、情報通信技術やエネルギー技術の分野での研究が進展することが期待できます。今回は給電と通信で異なる波長で行い、ワット級の電力とGHz帯の高周波伝送を同時伝送しました。さらに今回の課題では対象物が移動体であるため、ビーム走査や対象物検知などを組み合わせ、リアルタイム伝送が可能となりました。これにより、災害時に電力と通信の供給が可能となり、インフラの安定化に貢献することが期待されます。

研究成果の概要（英文）：We take advantage of the two receivers of the hybrid optical system to achieve high power and high-rate data transmission this time. In this system, the transmission and reception of power and data are not affected, and the simultaneous transmission of 1 W power and 10 GHz data is successfully demonstrated. We have achieved higher rate data transmission by improving the accuracy of PD to laser reception.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光無線給電 空間光通信 半導体レーザー 太陽電池

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、情報機器のみならずあらゆる機器がインターネットに接続され、機器はそれぞれ制御、管理されている。これらの機器には移動体も含まれており、給電にはバッテリーを用いる方法が一般的である。バッテリー容量は有限であるため、定期的な充電が必要となる。この充電は移動体の自由度を大きく制限するものであり、様々な無線給電技術が提案されている。

無線給電においてエネルギーを空間伝搬させる手段には、電磁界の近傍界を利用する方式と遠方界を利用する方式がある。近傍界の代表例は電界結合および磁界結合であり、それぞれ電界エネルギー $DE/2$ および磁界エネルギー $BH/2$ を介在している(ここで E は電界、D は電束密度、H は磁界、B は磁束密度である)。一方、遠方界の代表例は電磁波(マイクロ波や光)であり、ポインティングベクトル $E \times H$ を介在してエネルギーが伝送される。

図1に各無線給電方式における伝送効率の伝送距離依存性を示す。磁界結合方式はコイルを2個用いたものであり高効率を得られる、コイル径が50cmにおいても伝送距離は1mに満たないため長距離給電に適さない。マイクロ波方式は高効率かつ中距離(10m程度)給電が可能である。光方式は、光源側および受光側での電気・光および光・電気変換効率がそれぞれ50%程度であるため、絶対効率は30%を下回る。

しかし、ビーム広がり小さいため、長距離伝送が可能となり10m以上で光方式が有利となる。また光をエネルギー媒体に用いることで、発振回路やコイルが不要となり、システムの簡略化、小型化が可能となるとともに、ビームのステアリングが容易に実現できる。

光無線給電は光源側に半導体レーザー、受光側に太陽電池を用いる簡潔なシステムであり、これまでに宇宙空間から地上への電力伝送の提案や、スマートフォンへの給電などが報告されている。上述したが、光無線給電の最大の利点は長距離かつ移動体に対してである。移動体への光無線給電を考えた場合、レーザービームの対象物への自動追尾は必須技術となるため、画像認識技術とビームステアリング技術を用いて達成を試みる。

また光給電方式は光ファイバを用いたシステムが先行しており、複数波長をファイバ内に伝送させることで、給電と通信を併用している。これを転用し、光無線給電と光空間通信を融合させることで、同様のシステム構築が可能となる。

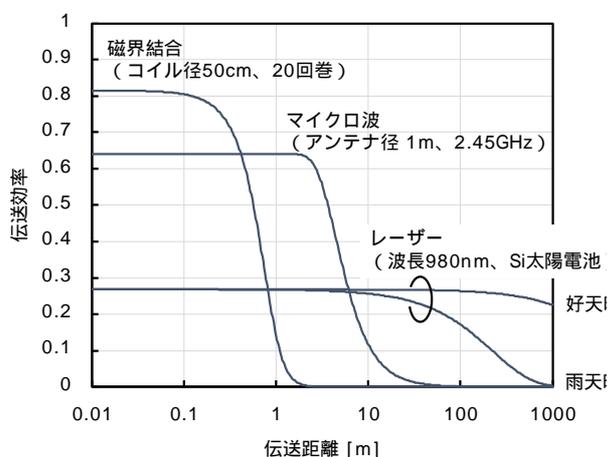


図1: 各方式の伝送効率の伝送距離依存性

2. 研究の目的

本申請は画像認識技術を用いた移動体へのレーザービーム自動追尾システムを構築し、この光無線給電システムと光空間通信技術のハイブリッド化を目指す。具体的には下記の3点を重点的に行う。

1. 画像認識技術と機械学習を考慮した、ビーム追尾システムの開発
2. 2次元移動体への光無線給電システムの実現
3. 光無線給電と光空間通信技術のハイブリッドシステムの構築

3. 研究の方法

上記の目的を個々に解決し、2次元移動体への光無線給電システムを構築する。具体的なシステム構成を図2に示す。カメラで移動体を認識し、PCで角度情報に変換し、ガルバノミラーを回転させレーザービームを対象物へ照射させる。

1. 画像認識技術と機械学習を考慮した、ビーム追従システムの開発

移動体の検出手法として「テンプレートマッチング」と「特定色画素抽出」の2種類で評価する。前者はデジタルカメラでも多用されている顔認証のように、移動体の物体画像をコンピュータに一旦学習し、カメラで撮影している

画像から相関がある領域を目標物と推定する。この方法は、対象物が遠距離にある場合、被写体のピクセルサイズは小さくなり、学習した形と相関があると認識しなくなる。また複雑な物体の場合は、全方位からの情報を取得する必要があり認識に時間を有する。さらに移動体が高速移動している場合、被写体がぼやけてしまい（モーションブラー）認識できなくなる。

後者はクロマキー技術のように、特定色を移動体に付加し、この特定色画素を抽出し目標物と推定する。色のみを扱うので、前述のようなモーションブラーの問題は生じない。ただし、周囲とのコントラストや外乱光の影響を受けやすいため、調整がその都度必要となる。

これまでにテンプレートマッチングでは、モーションブラーの影響で、 $30^\circ/\text{s}$ 以上では物体追跡は失敗している。一方、特定色画素抽出に関しては、モーションブラーが生じても色情報さえ合致していれば物体追跡は可能であるため、全ての移動速度において物体追跡に成功している。ただし特定色画像抽出法は外乱光の影響を受けやすいため、テンプレートマッチング法で高速認識できる方法（ブラーに強いマーカを付けるなど）を実施する。

そして、ビームステアリングには高速移動体への対応も可能なガルバノミラーを用いる。移動物体へのビーム追従は以下の通りである。1. 対象物が移動、2. カメラで撮影、3. 特定色画素抽出による画像認識でpixelの変化分を取得し、回転角情報へ変換、4. D/A変換器でアナログ信号へ変換、5. ガルバノミラー回転しレーザー光が移動物体方向へ向く。

この手法は物体が移動してから、レーザー光が追従するまでに必ず時間遅れが生じる。そのため移動体の移動速度が高速になるに従い、ビーム追従できなくなる。このズレを減少させるため、過去の情報から位置を予測する方法を用いる。これにより、ズレを低減させることができ、さらにシステム固有の遅延（画像処理、D/A変換器への書き込みなどに生じる時間）を考慮し、リアルタイムビーム追従を実現する。

2. 2次元移動体への光無線給電システムの実現

図2を応用し、2次元移動体への光給電システムを構築する。1次元移動体に対してカメラは1台で対応可能であるが、2次元移動体に関しては2台のカメラが必要である。また複数台への給電なども実施する。

実験ではミリワットクラスから光無線給電を実施しながら要素技術を構築し、最終的にはドローンのような数ワットクラスの光無線給電の実現を試みる。そのために、ハイパワーレーザー、小サイズ大電力用太陽電池を導入する。

3. 光無線給電と光空間通信技術のハイブリッドシステムの構築

光無線給電と光空間通信技術の融合には、光軸上に異なる波長の光を合波させる必要がある。今回、光無線給電にはSi太陽電池に対して高効率給電が可能な950nm帯を用い、光空間通信にはこれまでに実績のある830nm帯を用いる。そして合波にはダイクロイックミラーを用いる。このミラーは特定の波長を反射させることが可能であるため、図3に示すように同一光軸上に複数の波長を用意に合波できる。また移動体（受光部側）では分波が必要であるが、光源側と同様

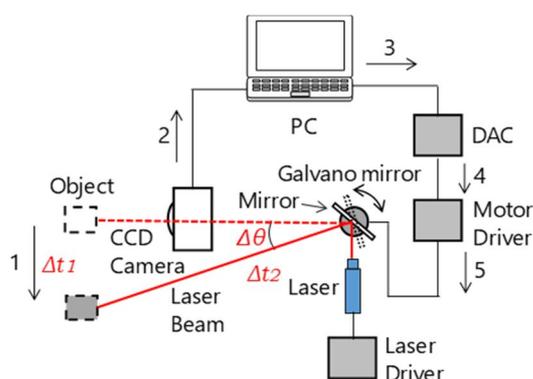


図2：ビーム追従システム

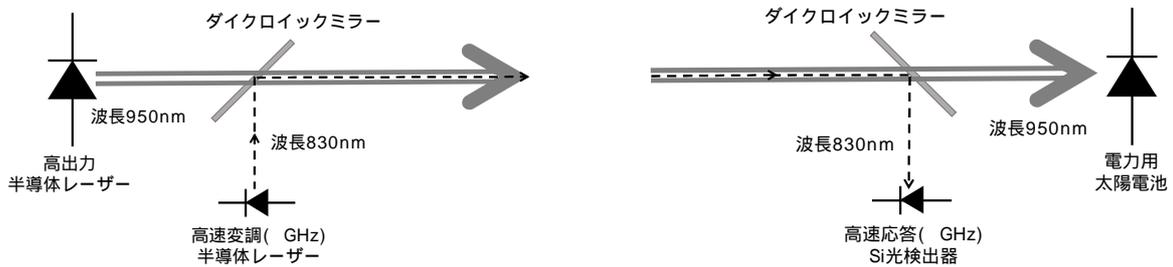


図 3：光無線給電と光空間通信のハイブリッドシステム（（左）光源側、（右）受光部側）

にダイクロイックミラーを用いることで実現できる。

この技術を用いて光無線給電と光空間通信のハイブリッドシステムを構築し、給電と通信の無線化を同時達成を目指す。

4. 研究成果

1. 画像認識技術と機械学習を考慮した、ビーム追従システムの開発

速度および加速度を用いた位置予測

最も古典的な位置予測は、過去の複数フレームから速度ベクトルや加速度ベクトルを算出し位置を推定する手法である。そして速度および加速度ベクトルの算出には、それぞれ2および3フレーム分の過去の位置情報が必要である。速度変化が少なく、方向の変化も規則的（例えばトラック型）の場合、本方式は高い精度で位置予測が可能である。ただし、ドローンのような速度および方向が不規則な移動体に対しては誤差が大きくなる。

図4に位置予測ありなしの角度ズレを示す。位置予測なしの場合は、移動体の速度増加に伴いビームが遅れていることがわかる。一方、位置予測ありの場合は移動体の速度に依存せず、 2° 以内に抑えられた。

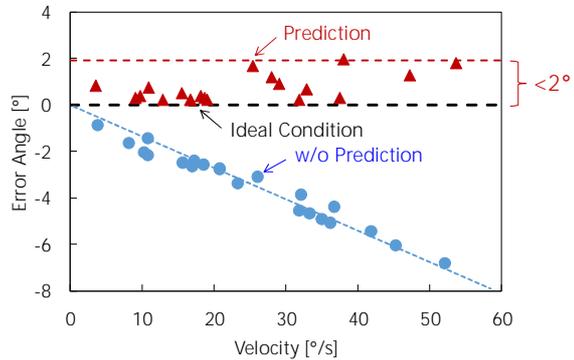


図 4 位置予測による偏角の誤差

機械学習を用いた位置予測

速度や方向が突然変化する移動体に対する位置推定には、移動体の軌跡を事前に学習する機械学習による位置予測が有効である。ただし機械学習はテストデータが重要となるため、対象物に変更するたびに学習が必要となる。コンピュータ内で比較的ランダムな移動をする動きを生成し、典型的な機械学習手法である ANN(Artificial Neural Network)と LSTM(Long-Short Term Memory)の2種類で位置推定を実施したところ、両手法とも古典的な手法と比較し2倍の精度が得られた。

2. 2次元移動体への光無線給電システムの実現

システムの概要

移動体への追従に向け、対象物認識に画像認識（特定色画素抽出）、位置推定に過去2フレームによる速度ベクトルによる推定、ビーム走査に間接走査（ミラー走査）を採用した。そして図2のようなシステムを構築し、ミニカーを移動体と見立てて光無線給電の実証を試みた。光源は波長980nm、強度0.1Wの赤外光半導体レーザーとした。ミニカーには $20 \times 20 \text{ mm}^2$ の太陽電池を取り付け、特定色画素抽出用にピンク色の板を取り付けた。CMOSカメラ（フレームレート30fps、画素数640px \times 480px）による色抽出にはRGBではなくHSV色空間（色相(Hue)、彩度(Saturation)、明度(Value)）を用いた。

1 次元移動体

まずは1次元移動体への光無線給電を試作した。このシステムにおいて移動体（ミニカー）にレーザー光がビーム追従し、光無線給電によってミニカーが移動することを確認した。図5は1次元移動体への光無線給電の動画である（動画はQRコードからアクセスすることで視聴可能）。予測なしでは停止と移動の繰り返しであるが、位置予測することでスムーズな移動を実現している。



図5 1次元移動体への光無線給電（位置予測なし
（上）予測あり（下）

複数移動体

複数の移動体に対して同様の実験を実施した。2台のミニカーにそれぞれ色の異なるマーカーを装荷し、一定時間ごとにレーザーを切り替えながら照射した。また切り替え間隔を1フレーム毎から順に5フレーム毎まで変化させて切り替えながら照射することにより、2つのミニカーが光無線給電により左側のラインから右側のラインまでほぼ同時に移動した。また、スイッチングするフレーム間隔による変化は、1フレーム毎が滑らかにかつ高速で移動した。

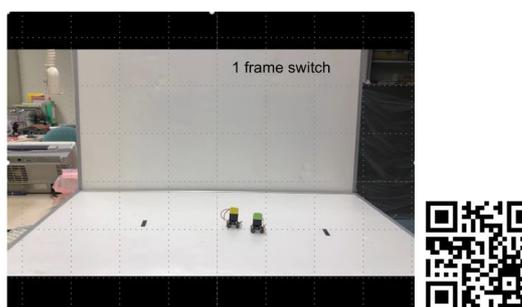


図6 複数移動体への光無線給電

2次元移動体

2次元移動体への光無線給電システムを実現するためには、まずカメラとレーザーの位置関係のズレを補正しなければならない。1次元の場合はそのズレをオフセットとすれば問題ないが、2次元移動体の場合は逆向きになったときに、対象物とビームの関係は反転する。この問題は1つのマーカーと2つのカメラによるシステム、もしくは2つのマーカーと1つのカメラのどちらかで解決できる。カメラを複数用いると画像処理に時間を要するので、後者でシステムを組んだ。

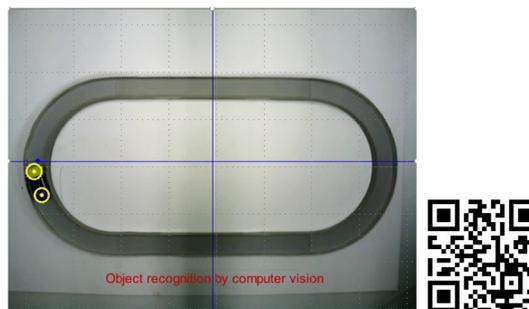


図7 2次元移動体への光無線給電

図7に2次元移動体への光無線給電の結果を示す。オーバルコース内をミニカーが移動している。CMOSカメラは一台でX-Y座標と方向を確定させる必要があるため、色の異なる2種類の板をミニカーに取り付けている。またガルバノミラーを2枚用いて二次元走査を実現している。

3. 光無線給電と光空間通信技術のハイブリッドシステムの構築

給電用半導体レーザーから光出力12Wを出射したときの給電用Si受光器の電流・電圧特性は短絡電流43mA、開放電圧35Vであり、FF(Fill Factor)は0.86となった。また電圧31Vのときに最大出力1.4Wが得られた。この太陽電池モジュールの効率は12%である。

通信用半導体レーザーを周波数100MHzから3GHzまで直接変調した。今回の変調帯域で応答信号の劣化は見られなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3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 丸山武男	4. 巻 51
2. 論文標題 移動体への光無線給電・通信システム,	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 133-136
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 無
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 丸山武男	4. 巻 9
2. 論文標題 画像認識技術とビーム走査技術による移動体への光無線給電	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊車載テクノロジー	6. 最初と最後の頁 19-23
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 無
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 丸山武男	4. 巻 50
2. 論文標題 画像認識技術を用いた移動体への光無線給電	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 484-486
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 Setiawan Putra Alexander William, Kato Hirotaka, Maruyama Takeo	4. 巻 59
2. 論文標題 Infrared LED marker for target recognition in indoor and outdoor applications of optical wireless power transmission system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S00D06 ~ S00D06
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab9489	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 丸山武男, 加藤広隆, Alexander William Setiawan Putra	4. 巻 J103-C
2. 論文標題 画像認識を用いた移動体に対する光無線給電	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 349 ~ 355
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20件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 S. Lu, Y. Iwabuchi, Y. Shimeno, and T. Maruyama
2. 発表標題 Hybrid Optical Wireless Power (~1W) and Data (~1GHz) Transmission System for Meter-range Distance
3. 学会等名 the 4th Optical Wireless and Fiber Power Transmission (OWPT2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Z. Zhou, Y. Shimeno, S. Kawai, and T. Maruyama
2. 発表標題 Design and Analysis of SiN Optical Waveguide for 2D Beam Steering
3. 学会等名 令和4年(2022年)度 応用物理学会北陸・信越支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 示野義和, 河合勝太郎, 桑村有司, 丸山武男
2. 発表標題 ロックイン検出法を用いた光検出磁気共鳴測定系の高感度化
3. 学会等名 令和4年(2022年)度 応用物理学会北陸・信越支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Z. Zhou, Y. Shimeno, S. Kawai, and T. Maruyama
2. 発表標題 Analysis of SiN Optical Waveguide for 2D Beam Steering
3. 学会等名 023年 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 示野 義和, 河合 勝太郎, 桑村 有司, 丸山 武男
2. 発表標題 ロックイン検出法を用いた光検出磁気共鳴の高感度測定
3. 学会等名 2023年 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Sato, S. Lu, A. W. S. Putra, and T. Maruyama
2. 発表標題 Target Recognition for Outdoor Optical Wireless Power Transmission Using Solar-Blind Deep UV LED marker,
3. 学会等名 the 3rd Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Lu, A. W. S. Putra, K. Imamura, and T. Maruyama
2. 発表標題 Moving Target Position Prediction for Optical Wireless Power Transmission System using Machine Learning
3. 学会等名 the 3rd Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Maruyama
2. 発表標題 Optical Wireless Power Transfer for Moving Object
3. 学会等名 the 6th International Symposium on Frontiers of Applied Physics (ISFAP2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩淵 由樹, 示野 義和, 丸山 武男
2. 発表標題 空間光変調器を用いた光無線システムの安定化
3. 学会等名 2021年 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Lu, Y. Iwabuchi, and T. Maruyama
2. 発表標題 Optical Wireless Power (~1W) and Data (~1GHz) Transmission using Hybrid Laser Beam System
3. 学会等名 2021年 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Lu, Y. Iwabuchi, Y. Shimeno, and T. Maruyama
2. 発表標題 Optical Wireless Power (~1W) and Data (~1GHz) Transmission for Meter-range Distance using Hybrid Laser Beam System
3. 学会等名 2022年 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 八木稜平, 江口敬太郎, 丸山武男, 村田英幸
2. 発表標題 光導波路分光法を用いた正孔オンリー素子のオペランド吸収スペクトル
3. 学会等名 2022年 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. W. S. Putra, H. Kato, and T. Maruyama
2. 発表標題 Demonstration of Hybrid Optical Wireless Power Transmission and Free Space Optical Communication System using Dichroic Mirrors
3. 学会等名 The 2nd Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. W. S. Putra, H. Kato, and T. Maruyama
2. 発表標題 Hybrid Optical Wireless Power and Data Transmission System
3. 学会等名 IEEE MTT-S Wireless Power Transfer Conference 2020 (WPTC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Alexander William Setiawan Putra, Shota Sato, and Takeo Maruyama
2. 発表標題 Solar-Blind UV LED Marker for Indoor and Outdoor Applications of Optical Wireless Power Transmission
3. 学会等名 2020年 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丸山武男
2. 発表標題 画像認識技術を用いた光無線給電システムの高機能化
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Kishima and T. Maruyama
2. 発表標題 OWPT (Optical Wireless Power Transmission) by image-guided laser-beam steering
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Lu, A. W. S. Putra, K. Imamura, and T. Maruyama
2. 発表標題 Improvement of Position Prediction for Optical Wireless Power Transmission System using Machine Learning
3. 学会等名 2021年 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 翔太, Alexander William Setiawan Putra, 丸山 武男
2. 発表標題 屋外光無線給電に向けたソーラーブラインド深紫外LEDマーカーを用いた物体認識
3. 学会等名 2021年 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 翔太, Alexander William Setiawan Putra, 丸山 武男
2. 発表標題 屋外光無線給電に向けたソーラーブラインド深紫外LEDマーカーを用いた物体認識
3. 学会等名 2021年 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021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