

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：35302

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K18282

研究課題名(和文) 高速回転式LED送信機を用いたカメラ型可視光通信の高速化及び全方位受信の実現

研究課題名(英文) Realization of High-Speed Data Transmission and Omnidirectional Reception of Image-Sensor-Based Visible Light Communication Using High-Speed Rotary LED Transmitter

研究代表者

荒井 伸太郎 (Arai, Shintaro)

岡山理科大学・工学部・准教授

研究者番号：10599195

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)：送信機にLED、受信機にカメラを用いた可視光通信は、カメラの特性を活かして外乱光(雑音)の影響を受けにくいことが知られている。しかしながら、本技術の通信速度はカメラの撮影速度に依存するため、低撮影速度のカメラを受信機に用いた場合、十分な通信速度が得られないことが課題となっている。これを解決するため、本研究課題では送信機自体が高速回転する「回転式LED送信機」を提案した。送信機をカメラの撮影速度以上の速さで回転させ、LEDの時間方向の高速点滅を画像の空間方向で捉えることで可視光通信の高速化を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カメラを受信機に用いた従来の可視光通信では、その通信速度の高速化のために撮影速度の非常に速い高速度カメラを用いる等、受信機側の工夫によって行われるものが多かった。本研究課題で提案した送信機は、それ自体を回転させるというこれまでにない発想で、受信機の機構には改良を加えずに空間サンプリングを行い、通信速度の高速化を実現した。ここに本技術の特色及び独創性がある。さらに、本技術は回転機構を持つ機器への取り付けも可能であるため、様々な応用が期待される送信機であると言える。

研究成果の概要(英文)：This study focuses on visible light communication using an LED (transmitter) and a camera (receiver). The communication system can spatially separate signals and noises in the image, thus providing superior anti-interference ability. However, because this system's communication speed depends on the camera's shooting speed, the receiver suffers from a low data transmission rate when a low-speed camera is used. To solve this problem, we have proposed a "rotary LED transmitter." This transmitter cylindrically rotates the blinking LEDs during the camera's exposure time. The camera captures multiple blinking states of LEDs in a single image, thereby increasing the amount of data received per image.

研究分野：可視光通信

キーワード：可視光通信 LED イメージセンサ 回転

## 1. 研究開始当初の背景

発光ダイオード (LED) を用いた照明機器等の普及に伴い、LED を送信機として用いた「可視光通信」に関する研究が注目を集めている。可視光通信とは、その名の通り人の目に見える光 (可視光) を用いた光無線通信技術である。LED は半導体デバイスであるため、人の目には見えないほど高速に点滅させることにより、LED を照明として利用すると同時に、通信機器としても使用可能となる。また、電波を用いない通信技術であるため、有限な電波資源の逼迫解消に大きく貢献できると期待されている。可視光通信の受信デバイスには光を検知できる素子が用いられ、代表的なものはフォトダイオードとイメージセンサ (カメラ) である。本研究課題ではカメラを用いた可視光通信に注目する。

カメラを用いた可視光通信では LED の点滅によって送信された光を画像として捉え、その画像から抽出される画素値 (輝度値) を用いてデータを復調する。本通信技術はカメラの特性を活かして、送信源の光とそれ以外の外乱光 (雑音) を画像上で分離できる点が大きな特徴である。この特徴は、屋外環境のように太陽光など複数の外乱光が存在する環境で利用できることを意味する。しかしながら、カメラを用いた可視光通信ではその通信速度が受信機であるカメラの撮影速度に依存することが問題となっている。例として、一般的な市販のカメラの撮影速度は 30 ~ 60 frame/sec (fps) である。この時、1 個の LED が点灯したら '1'、消灯したら '0' のように送る On-Off-Keying (OOK) 変調を用いた場合、その通信速度は 15 ~ 60 bit/sec (bps) であり、非常に低速である。

## 2. 研究の目的

この問題を解決するため、本研究課題では送信機自体が高速回転する「回転式 LED 送信機」を提案する。送信機を撮影速度以上の速さで回転させることで、LED の時間方向の高速点滅を画像の空間方向 (水平方向) で捉えられるようになり、可視光通信の高速化を実現できる。加えて、回転させた送信機であれば、受信機はどの方角からも同じ明るさの LED 画像を撮影できるため、可視光通信の全方位 (360°) 受信も同時に実現できると考える。本研究課題では、まず回転式 LED 送信機的设计・開発を行う。そして、開発した送信機とカメラを用いた可視光通信実験を行い、通信性能の評価及び全方位受信の確認を行う。

## 3. 研究の方法

上述の通り、本研究課題ではまず回転式 LED 送信機的设计・開発を行った。図 1 に開発した回転式 LED 送信機の試作機を示す。本送信機は回転部と DC モーターで構成されている。回転部の側面には 9 個のチップ LED が縦一列に配置されており、上部にはロータリーエンコーダーが取り付けられている。また、回転部の中にはマイコンとそれを駆動するバッテリーが搭載されている。本送信機の回転方向は図中の矢印で示している通り、垂直方向を軸として回転する。

本送信機の動作について説明する。まず、DC モーターによって回転部が図 1 の矢印の方向に回転する。その際、連動して回転するロータリーエンコーダーが回転 1 度毎にクロック信号を出力し、マイコンに送られる。マイコンはそのクロック信号に応じて LED の点灯パターンを切り替える。本研究では OOK 変調された信号を点灯させており、回転 1 度毎に異なるデータを送信している。また、回転式 LED 送信機の回転速度は受信機であるカメラの撮影速度以上の速さに設定する。

ここで、送信機の回転部側面がカメラレンズの正面になるように配置し、送信機が回転しながら LED 点灯パターンを切り替える様子をカメラが撮影する時を考える。送信機はカメラの撮影速度以上の速さで回転しているため、カメラがシャッターを開いている間、つまり、露光している間にレンズの前を LED が点滅しながら移動していく。実際に回転している様子を撮影した画像を図 2 に示す。ご覧の通り、回転によって切り替わる LED の点灯パターンが捉えられている。

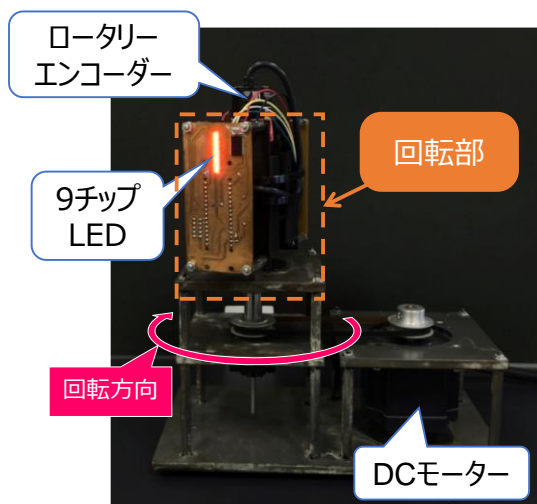


図 1: 回転式 LED 送信機の試作機 [1].

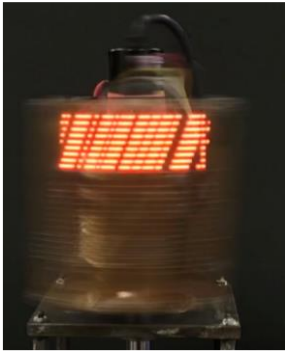


図 2: 回転式 LED 送信機が  
回転している様子[1].

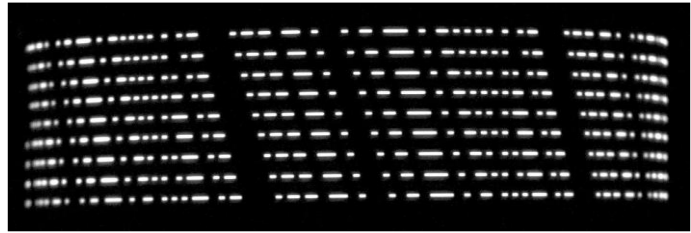


図 3: 回転する送信機をカメラで撮影した画像例[1].

図 3 に回転式 LED 送信機の回転速度を 300rpm, カメラの撮影速度を 5fps と設定して実験を行った時の撮影画像の例を示す. この図から分かるように, 回転 180 度分の点灯パターンが捉えられている. この点灯パターンは全て OOK 変調されたものであることから, 1 枚の画像で非常に多くの信号を受信していることになる. つまり, 回転式 LED 送信機を用いることで通信速度が大幅に向上したことを意味する. また, 本送信機は垂直方向を軸として回転しているため, 回転部の LED は筒状に点灯することから, 回転している回転部の 360° どの側面からも LED の点灯パターンを確認できる.

#### 4. 研究成果

開発した送信機を用いた可視光通信実験を行い, 本送信機の性能を評価した. 図 4 に回転式 LED 送信機を用いた通信システムモデルを示す. 送信機の構成, 及び, 動作については 3. で説明していることから, ここでは受信機の動作について説明する. 受信機はカメラ, 画像処理部, デコーダーで構成されている. まず, 回転式 LED 送信機が回転しながら送信するデータをカメラが画像として捉える. 画像処理部ではその撮影画像から回転毎の点灯パターンの位置を検出し, それらを輝度値として抽出する. デコーダーでは抽出された輝度値を基にデータを復調する. 本研究では OOK 変調された信号が送信されてくるため, デコーダーでは輝度値を閾値判定し, 設定した閾値以上であれば '1', そうでなければ '0' と判定する.

表 1 に実験パラメータを示す. ここでデータ伝送角度範囲について説明する. 図 3 で示した通り, 300rpm で回転する送信機を撮影速度 5fps のカメラで撮影した場合, 点灯パターン 180 度分を 1 枚の画像で捉えられる. しかしながら, 図 3 から分かるように, 捉えられた点灯パターンの左端と右端では, 点灯パターン同士が重なってしまう. これは本送信機が垂直軸を中心に回転することに起因しており, 重なった点灯パターンからデータを復調するのは困難である. そこで, 捉えられた点灯パターンの画像の中心から  $\pm 30^\circ$  の範囲 (合計  $60^\circ$  の範囲) をデータ伝送角度と設定し, 受信機ではこの範囲の信号を復調した. 送信機の LED と受信機のカメラが互いに向かい合うように送受信機を設置した. そして, 送受信機間の通信距離を変えながら通信実験を行い, ビット誤り率 (BER) を測定して本通信システムの復調性能を評価した. 本実験では, カメラで

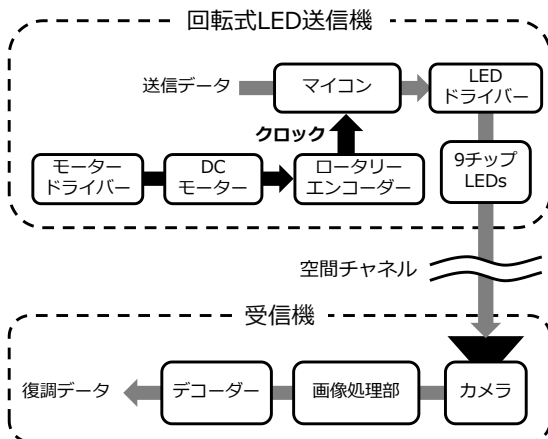


図 4: システムモデル.

表 1: 実験パラメータ.

LED	SML-M13UTT86
LED数	9
LEDの点灯パターンが切り替わる角度	1°
データ伝送角度範囲	60°
送信機の回転速度	300 rpm
送信機の回転半径	58 mm
変調方法	On-Off-Keying (OOK)
使用したカメラ	UI-3250ML
レンズの焦点距離	35 mm
レンズの絞り値	F8
カメラの撮影速度	5 fps
レンズフィルター	ND8
通信距離	0.5~4.0 m

捉えられた回転毎の LED 点灯パターンの位置は既知とした。

図 5 に通信距離毎の BER を示す。比較のため、事前に行った通信シミュレーションの結果も同図に示している。実験結果から分かるように、通信距離 2.5m まで誤りが発生することなく、エラーフリーを達成した。また、距離 3.0m からエラーが発生することも確認した。シミュレーション結果と実験結果のどちらも似たようなカーブを描いていることから、実験で得られた通信性能の妥当性は十分であると結論付けた。回転式 LED 送信機を用いたこの実験での通信速度は 2.7 kbps であった。

なお、表 1 のパラメータを用いて 9 個の LED が回転せずに OOK 変調された信号を送信する従来手法の場合の通信速度は 45 bps である。このことから、今回の回転式 LED 送信機を用いた実験では従来手法の 60 倍の通信速度向上に成功したと言える。この通信速度は LED 数を増やすなどパラメータを変更することでさらに増加可能である。さらに、送信機とカメラの位置を変えて行った通信実験より、可視光通信の全方位受信も確認した。

#### 〈引用文献〉

[1] S. Arai, Z. Tang, A. Nakayama, H. Takata, and T. Yendo, "Rotary LED Transmitter for Improving Data Transmission Rate of Image Sensor Communication," IEEE Photonics Journal, vol. 13, no. 4, pp. 1-11, Aug. 2021.

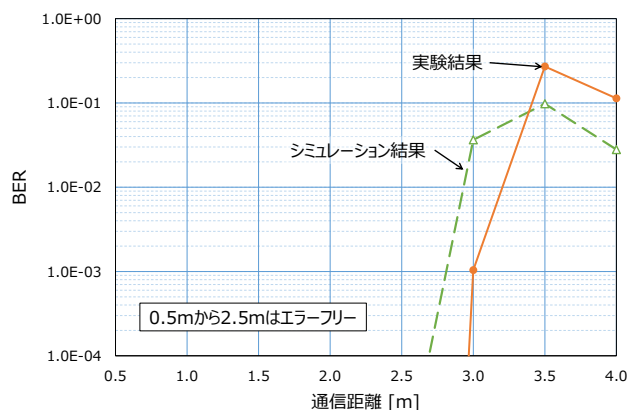


図 5 : 通信距離 vs. BER [1].

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Shintaro Arai, Zhengqiang Tang, Akinori Nakayama, Haruhiro Takata, Tomohiro Yendo	4. 巻 13
2. 論文標題 Rotary LED Transmitter for Improving Data Transmission Rate of Image Sensor Communication	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Journal	6. 最初と最後の頁 1~11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JPHOT.2021.3097772	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 Zhengqiang Tang, Shintaro Arai, Takaya Yamazato	4. 巻 14
2. 論文標題 Simplified Alamouti-Type Space-Time Coding for Image Sensor Communication Using Rotary LED Transmitter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Journal	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JPHOT.2021.3137601	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 Shintaro Arai, Masayuki Kinoshita, Takaya Yamazato	4. 巻 E104.A
2. 論文標題 Optical Wireless Communication: A Candidate 6G Technology?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 227~234
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2020WBI0001	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 Zhengqiang Tang, Shintaro Arai Tomohiro Yendo, Di He, Takaya Yamazato	4. 巻 9
2. 論文標題 Sequential maximum likelihood decoding incorporating reliability determination for image sensor communication	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 365~370
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2020XBL0058	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 該当する

1. 著者名 Yuki Ohira, Tomohiro Yendo, Shintaro Arai, Takaya Yamazato	4. 巻 27
2. 論文標題 High performance demodulation method with less complexity for image-sensor communication	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 21565 ~ 21565
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.021565	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 Shintaro Arai, Haruna Matsushita, Yuki Ohira, Tomohiro Yendo, Di He, and Takaya Yamazato	4. 巻 10
2. 論文標題 Maximum likelihood decoding based on pseudo-captured image templates for image sensor communication	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 173 ~ 189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.10.173	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 該当する

[学会発表] 計18件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 中山晃典, 唐 正強, 荒井伸太郎, 圓道知博
2. 発表標題 回転式LED送信機を用いたイメージセンサ通信のための受信アルゴリズムの一検討
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 2021年

1. 発表者名 荒井伸太郎
2. 発表標題 高速イメージセンサ通信のための回転式LED送信機の開発
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) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shintaro Arai, Zhengqiang Tang, Akinori Nakayama, Haruhiro Takada, Tomohiro Yendo
2. 発表標題 Implementation Experiment of a Rotary LED Transmitter for Improving the Transmission Rate for Image Sensor Communication
3. 学会等名 2020 IEEE Globecom Workshops: OWC (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 唐 正強, 荒井伸太郎
2. 発表標題 回転式LED送信機を用いたイメージセンサ通信のための光の残像に基づくAlamouti型時空間符号化
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 唐 正強, 荒井伸太郎, 山里敬也
2. 発表標題 [ポスター講演] 回転式LED送信機を用いたイメージセンサ通信におけるAlamouti型時空間符号化の実験評価
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 2021年

1. 発表者名 唐 正強, 荒井伸太郎, 山里敬也
2. 発表標題 回転式LED送信機を用いたイメージセンサ通信におけるAlamouti型時空間符号化のためのデータ受信可能範囲の判定法
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒井伸太郎
2. 発表標題 回転式LED送信機を用いた新しいイメージセンサ通信システムの提案
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zhengqiang Tang, Di He, Shintaro Arai, Danping Zou
2. 発表標題 Positioning-Aided Scheme for Image Sensor Communication using Single-View Geometry
3. 学会等名 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiyuki Komi, Shintaro Arai, Tomohiro Yendo
2. 発表標題 A Preliminary Study on Spatial Channel Estimation Method for Image Sensor Communication
3. 学会等名 2019 Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems (TJCAS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shintaro Arai
2. 発表標題 A Study on LED Transmitter of Image Sensor Communication for Improving Data Transmission Rate
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2019 (ICMaSS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 唐 正強, 荒井伸太郎
2. 発表標題 イメージセンサ通信のための多数決判定を導入した最尤推定の分割型復調法に関する一検討
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 2019年

1. 発表者名 Zhengqiang Tang, Akinori Nakayama, Shintaro Arai, Haruhiko Takata, Tomohiro Yendo
2. 発表標題 A Study on Rotary LED Transmitter for Improving Data Transmission Rate of Image Sensor Communication
3. 学会等名 1st Workshop on Optical Wireless Communication for Smart City (1st OWC2)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuyoshi Kanemitsu, Toshiyuki Komi, Shintaro Arai, Tomohiro Yendo
2. 発表標題 Effect of Rank Deficiency in Optical Channel Estimation Using Pseudo-Inverse Matrix for Image Sensor Communication
3. 学会等名 2020 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Rei Okawa, Toshiyuki Komi, Shintaro Arai, and Haruna Matsushita
2. 発表標題 Preliminary Study of Data Demodulation Scheme by Image Estimation Using Deep Learning for Image-Sensor-Based Visible Light Communication
3. 学会等名 2018 Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems (TJCAS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shintaro Arai
2. 発表標題 Introduction of MLD Scheme for Image Sensor Communication
3. 学会等名 3rd International Conference and Exhibition on Visible Light Communications (ICEVLC 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zhengqiang Tang, Shintaro Arai, Tomohiro Yendo
2. 発表標題 A Fundamental Study on Computational Cost Reduction for Signal Demodulation Method Based on Pseudo-Captured Image in Image-Sensor-Based Visible Light Communication
3. 学会等名 2017 Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems (TJCAS 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Zhengqiang Tang, Shintaro Arai, Tomohiro Yendo
2. 発表標題 A Study on Computational Cost Reduction Using Image Division Approach for Data Demodulation Method in Image-Sensor-Based Visible Light Communication
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2017 (ICMaSS2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Zhengqiang Tang, Shintaro Arai, Tomohiro Yendo
2. 発表標題 A Study on Image Division Approach for Signal Demodulation Method Incorporating Reliability Determination in Image-Sensor-Based Visible Light Communication
3. 学会等名 2018 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 可視光通信装置及び可視光通信方法	発明者 荒井伸太郎	権利者 荒井伸太郎、学 校法人 加計学園
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-075266	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

Communication System Laboratory <a href="https://vlc.sakura.ne.jp/">https://vlc.sakura.ne.jp/</a>
--

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
研究協力者	圓道 知博  (Yendo Tomohiro)  (70397470)	長岡技術科学大学   (13102)	
研究協力者	山里 敬也  (Yamazato Takaya)  (20252265)	名古屋大学   (13901)	
研究協力者	岡田 啓  (Okada Hiraku)  (50324463)	名古屋大学   (13901)	
研究協力者	藤井 俊彰  (Fujii Toshiaki)  (30273262)	名古屋大学   (13901)	

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
研究協力者	鎌倉 浩嗣  (Kamakura Koji)  (60344967)	千葉工業大学    (32503)	
研究協力者	木下 雅之  (Kinoshita Masayuki)  (80845149)	千葉工業大学    (32503)	

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		
中国	Shanghai Key Laboratory of Navigation...	Dept. of Electronic Engineering	Shanghai Jiao Tong University