

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06371

研究課題名（和文）イメージセンサとLEDアレイによる双方向マルチアクセス可視光通信の高速化

研究課題名（英文）Study on High-Speed, Two-Way, and Multi-Access Visible Light Communication by Image Sensor and LED Array

研究代表者

中條 渉 (CHUJO, WATARU)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：40292289

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：LED照明を送信機，スマートフォン内蔵カメラ等を受信機とするダウンリンクと，スマートフォンの液晶ディスプレイ等を送信機，室内カメラを受信機とするアップリンクを用いた室内双方向マルチアクセス可視光通信の高速化を実現した．ダウンリンクは，受信シンボルの周期パターンを利用した非同期通信，2眼ローリングシャッターカメラによるアンサンブル平均，空間輝度分布によるしきい値判定法を開発した．LEDアレイとスマートフォン内蔵カメラを用いて156kシンボル/秒を達成した．一方，アップリンクは空間多重技術を用いて高速化を行った．空間シンボル間干渉を考慮した適応閾値処理により，168.75kシンボル/秒を達成した．

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では，既存のスマートフォン内蔵カメラと液晶ディスプレイ，LED照明と室内カメラを用いて双方向可視光通信を実現した．スマートフォンを用いて双方向可視光通信を実現した例は，国内外を含めてなく独自のシステムであり学術的意義は高い．可視光は電波に比べて，免許や混信，情報漏洩の心配がなく，安全・安心に利用することができる．モノのインターネット（IoT）には環境に適應した様々な通信手段が必要と考えられる．電波にない特長を有する可視光通信をイメージセンサを用いて双方向化し，高速化できたことは社会的に意義がある．

研究成果の概要（英文）：High-speed, two-way, and multi-access optical camera communication was achieved. Downlink consists of LED lighting transmitter and smartphones' built-in camera receiver. Uplink consists of smartphones' built-in LCD display transmitter and indoor surveillance camera receiver.

To increase the symbol rate for downlink, we developed rolling-shutter asynchronous communication with variable symbol rates based on a cycle pattern of received symbols, ensemble average using dual rolling-shutter camera, and threshold decision based on spatial luminance distribution. On the other hand, adaptive thresholding considering spatial inter-symbol interference was developed for uplink.

In downlink, 156k symbol/s was achieved with LED array and smartphones' built-in rolling-shutter camera. In uplink, 168.75k symbol/s was achieved with smartphones' built-in LCD display and indoor camera based on space division multiplexing.

研究分野：可視光通信

キーワード：可視光通信 イメージセンサ ローリングシャッター 空間輝度分布 空間多重 スマートフォン LED LCD

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

可視光通信の受信機は、フォトダイオード(PD)単体を用いる方式と、多数のPDで構成されるイメージセンサを用いる方式に大別される。PD方式は、1Gビット/秒を超える伝送レートを実現できるが、背景光や干渉光による雑音や、双方向通信やマルチアクセスが困難といった欠点がある。これに対してイメージセンサ方式は、送信LED光の捕捉追尾が容易になる利点に加えて、背景光や干渉光の空間的分離や、双方向通信やマルチアクセスが容易であること、LEDアレイを用いた空間分割多重で伝送レートを向上できる等の利点がある。

しかし、イメージセンサ可視光通信のシンボルレートは、イメージセンサの画像フレームレートで制限されるため、汎用イメージセンサでは30~60シンボル/秒と遅いことが最大の課題である。代表者は研究開始当初までに、フレームレート以下の可変シンボルレートで伝送可能な同期アルゴリズムを開発した。この同期アルゴリズムをローリングシャッター方式のイメージセンサに発展させて、伝送レートを向上させた。更にLEDアレイ送信機を用いて空間分割多重を組み合わせることで、更なる伝送レートの向上を図った。

2. 研究の目的

本研究はチップLEDで構成されるLEDアレイ送信機と、スマートフォン内蔵カメラ等のイメージセンサを用いて、双方向マルチアクセス可視光通信技術の開発を目的とした。

具体的には、(1) フレーム画像を用いた高速シンボル同期技術、(2) 双方向マルチアクセス技術、(3) イメージセンサとLEDアレイを組み合わせた空間分割多重技術、(4) 直交周波数分割多重技術(OFDM)、(5) ちらつき防止技術を開発し、統合してイメージセンサ可視光通信の伝送レートの高速化を図ることとした。

3. 研究の方法

(1) フレーム画像を用いた高速シンボル同期技術

イメージセンサ通信ではフレーム毎に得られる受信画像を用いて送信シンボルとの同期を行う。画像フレームタイミングを送信シンボルタイミングに合わせることはできないため、得られたフレーム画像から送信シンボルのタイミングを推定する同期アルゴリズムを開発した。

一方、受信シンボルの周期パターンは、送信シンボル長 T_s とローリングシャッターのライン間隔 T_l の比で決定される。この受信シンボルの周期パターンを利用して、可変シンボルレートの非同期可視光通信を実現した。図1に $T_l/T_s=3/4$ のときの送信シンボルと受信シンボルの周期パターンの関係を示す。

さらに2眼ローリングシャッターカメラを用いて非同期可視光通信のシンボルレートの向上を図った。

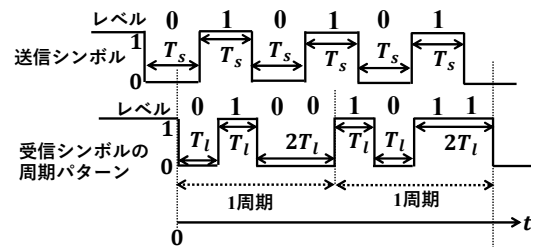


図1 送信シンボルと受信シンボルの周期パターンの関係 ($T_l/T_s=3/4$)

(2) 双方向マルチアクセス技術

可視光通信の受信機としてイメージセンサが有する広角にわたる高い空間分解能特性を利用し、また送信機に広角LEDを用いることで双方向マルチアクセス可視光通信を実現した。

一方、図2に示す白色LEDを送信機、スマートフォン内蔵カメラを受信機とするダウンリンクに加えて、スマートフォンのディスプレイを送信機、室内カメラを受信機とするアップリンクで室内双方向可視光通信を実現した。

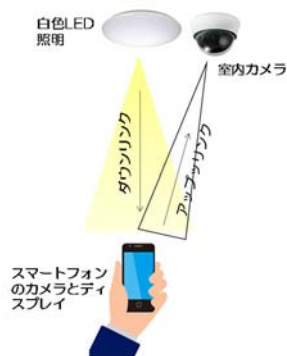


図2 LED照明、室内カメラとスマートフォンを用いた双方向可視光通信

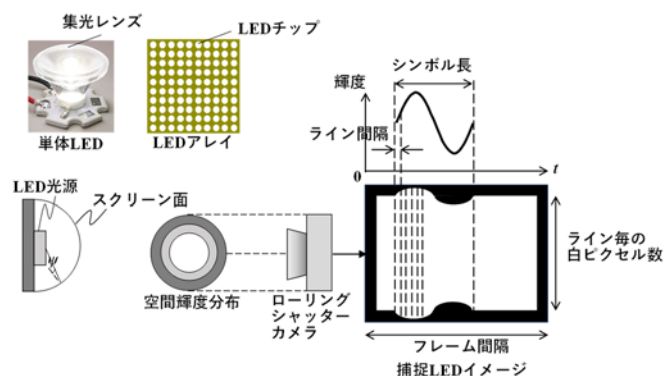


図3 空間輝度分布による多値QAM及びOFDMの原理

(3) イメージセンサと LED アレイを組み合わせた空間分割多重技術

LED チップで構成された LED アレイとローリングシャッターカメラを組み合わせて、空間分割多重技術を組み合わせることでシンボルレートの向上を図った。

(4) 直交周波数分割多重技術(OFDM)

正弦波サブキャリアを用いて LED 光源の輝度を時間的に変化させると、スクリーン面の空間輝度分布も正弦波状に変化する。捕捉した LED 画像の白ピクセル数はライン間隔毎に正弦波状に変化するので、ライン間隔毎の白ピクセル数をカウントすることで、正弦波サブキャリアの振幅と位相を復元することができる。図 3 に空間輝度分布による多値 QAM 及び OFDM の原理を示す。

(5) ちらつき防止技術

IEEE Std. 1789-2015 で LED 照明の安全レベルとして、最大パーセントフリッカが定義されている。この最大パーセントフリッカの条件下で、人が知覚出来ないフリッカの影響を防止し、多値変調でビットレートの向上を図った。

4. 研究成果

(1) フレーム画像を用いた高速シンボル同期技術

スマートフォン内蔵カメラのイメージセンサのローリングシャッターを利用した非同期通信技術を開発した。ローリングシャッター方式の 30 フレーム/秒のイメージセンサに非同期通信技術を適用して、オンオフキーイング(OOK)で 7.5k シンボル/秒の伝送レートを実現した。

また 2 眼ローリングシャッターカメラを用いて、受信シンボルをアンサンブル平均して、シンボルレートの向上を図った。60 フレーム/秒の 2 眼ローリングシャッターカメラにより、OOK で 10.016k シンボル/秒を達成した。図 4 に単眼カメラと 2 眼カメラのシンボル誤り率(SER)の比較を示す。

また露光時間を設定できるイメージセンサを用いて、露光時間とシンボル長の比とシンボル誤り率の関係性を明らかにした。空間輝度分布によるしきい値判定により、露光時間とシンボル長が等しい状態で 40.388k シンボル/秒の伝送レートを達成した。

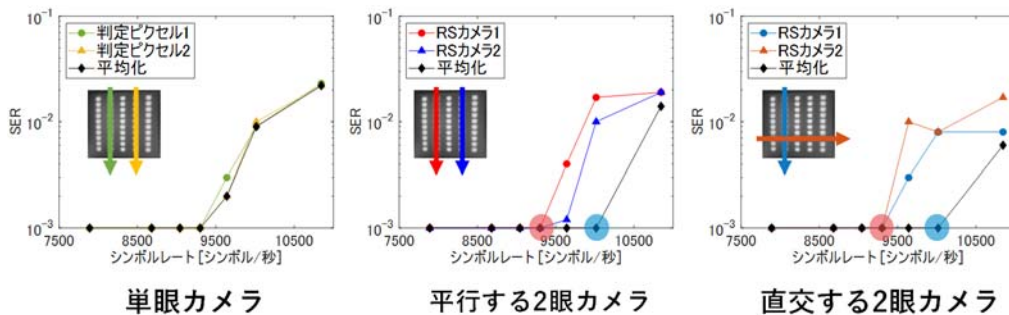


図 4 単眼カメラと 2 眼カメラのシンボル誤り率(SER)の比較

(2) 双方向マルチアクセス技術

広角 LED とイメージセンサで構成された送受信機を双方向で用いて、視野角 70 度にわたり 150dB 以上の送受信間アイソレーション特性が得られることを明らかにした。

更にスマートフォンの液晶ディスプレイを送信機、室内カメラを受信機とする、アップリンクの空間分割多重イメージセンサ可視光通信を新たに開発した。

空間シンボル間干渉を考慮した適応閾値処理を用いて、3m の距離で 168.75k シンボル/秒の伝送

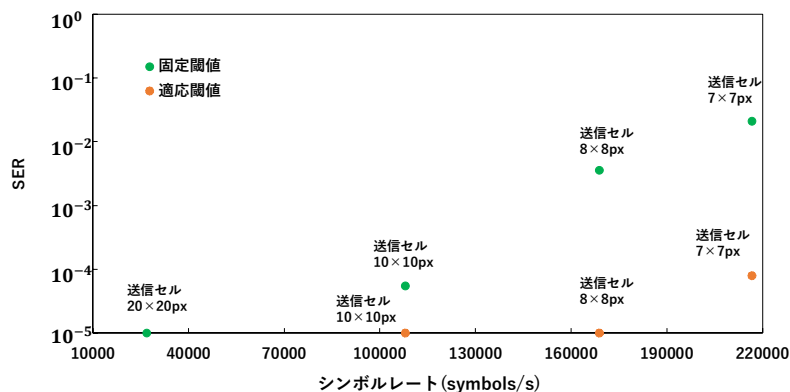


図 5 アップリンク可視光通信のシンボル誤り率(SER)の比較

レート達成した。図5にアップリンク可視光通信のシンボル誤り率(SER)の比較を示す。

(3) イメージセンサとLEDアレイを組み合わせた空間分割多重技術

8×8のチップLEDを用いた64素子のLEDアレイと30フレーム/秒のイメージセンサを組み合わせて、9.6kビット/秒のスループットを実現した。

更に、30フレーム/秒のスマートフォン内蔵ローリングシャッターカメラを高解像度(3264×2448ピクセル)で用い、LEDアレイによる空間分割多重を組み合わせることで、156kシンボル/秒の伝送レート達成した。図6にローリングシャッターカメラで捕捉したLEDアレイ画像の一例を示す。

(4) 直交周波数分割多重技術 (OFDM)

直交振幅変調64QAMでサブキャリア数7のOFDMを実現した。更にローリングシャッター方式の30フレーム/秒のイメージセンサを利用して、画像サイズQVGA(320ピクセル×280ピクセル)で、サブキャリア数4, 8, 16波のQPSK OFDMにより、何れも5.315kビット/秒を実現した。図7に64QAM-OFDMのコンスタレーションを示す。

(5) ちらつき防止技術

最大パーセントフリッカを満たす条件下で、サブキャリア周波数20Hz、シンボルレート20シンボル/秒、パーセントフリッカ0.25%の条件で、直交振幅変調16QAMにより伝送レート80ビット/秒でちらつき防止を実現した。図8に最大パーセントフリッカ条件下で、距離0.7mでの16QAMコンスタレーションを示す。

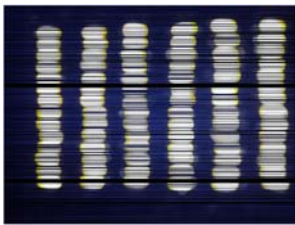


図6 ローリングシャッターカメラで捕捉したLEDアレイの画像

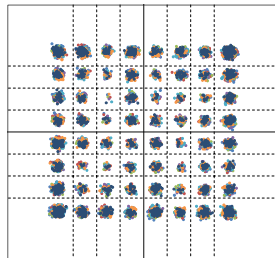


図7 64QAM-OFDMコンスタレーション

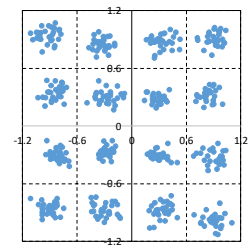


図8 16QAMコンスタレーション

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Noma Yamato, Murakami Kazufumi, Kato Taiju, Chujo Wataru	4. 巻 -
2. 論文標題 Increasing symbol rate by ensemble averaging with dual camera in rolling-shutter optical camera communication	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	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） https://doi.org/10.1587/comex.2020XBL0032	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 Chujo Wataru, Kinoshita Masahiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Rolling-shutter-based 16-QAM optical camera communication by spatial luminance distribution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 566～571
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1587/comex.2019GCL0055	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 Ohshima Kazuki, Naramoto Takuji, Yamaguchi Keisuke, Chujo Wataru	4. 巻 8
2. 論文標題 Rolling-shutter-based asynchronous optical camera communication by a cycle pattern of received symbols using smartphones	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 49～54
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1587/comex.2018XBL0141	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 近藤那樹, 北岡涼太郎, 水野翔太, 中條渉	4. 巻 J100-B
2. 論文標題 逐次推定法を用いたイメージセンサ可視光通信の同期方式	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 77-89
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14923/transcomj.2016GTP0003	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38件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 16件）

1. 発表者名 種村 太希, 中條 渉
2. 発表標題 ローリングシャッター可視光通信の露光時間とSERの関係
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 市村 陸, 中條 渉
2. 発表標題 空間ISIを考慮した適応閾値処理による空間分割多重OCC
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 W. Chujo
2. 発表標題 Rolling-shutter asynchronous OCC by spatial luminance distribution
3. 学会等名 1st Workshop on Optical Wireless Communication for Smart City (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Noma, M. Tsuruta, and W. Chujo
2. 発表標題 Symbol error rate improvement by dual-camera receiver with orthogonal scanning directions for rolling-shutter-based optical camera communication
3. 学会等名 1st Workshop on Optical Wireless Communication for Smart City (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Noma, M. Tsuruta, and W. Chujo
2. 発表標題 Symbol error rate improvement by dual-camera receiver with orthogonal scanning directions for optical camera communication
3. 学会等名 The first International workshop on Control, Communication, and Multimedia 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野間 大和, 中條 渉
2. 発表標題 走査方向が直交する2眼カメラによる可視光通信のシンボル誤り率改善
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 野間 大和, 村上 和史, 加藤 大樹, 中條 渉
2. 発表標題 走査方向が直交する2眼カメラを用いた最大比合成による可視光通信のSER改善手法
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中條 渉
2. 発表標題 空間輝度分布によるQPSK OFDM ローリングシャッター可視光通信
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 W. Chujo, K. Ohshima, and T. Kato
2. 発表標題 16-QAM Rolling Shutter Optical Camera Communication by Spatial Luminance Distribution
3. 学会等名 International Conference and Exhibition on Visible Light Communications 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中條 渉
2. 発表標題 空間輝度分布による16QAMローリングシャッター可視光通信
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 W. Chujo and M. Kinoshita
2. 発表標題 Rolling-Shutter-Based QPSK by Spatial Luminance Distribution for Optical Camera Communication
3. 学会等名 2018 IEEE Globecom Workshops (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Kinoshita, T. Zinda, and W. Chujo
2. 発表標題 Multilevel Modulation by LED Luminance Distribution for Optical Camera Communication
3. 学会等名 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大嶋 和輝, 新村 侑大, 加藤 大樹, 中條 渉
2. 発表標題 スマートフォン内蔵ローリングシャッターカメラを用いた周期パターンによる非同期可視光通信
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 大嶋 和輝, 橋本 卓司, 山口 佳介, 中條 渉
2. 発表標題 受信シンボルの周期性を利用したスマートフォン非同期可視光通信
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤 大樹, 新帯 康生, 毛利 洸太, 中條 渉
2. 発表標題 ローリングシャッターカメラを用いた可視光通信の同期特性
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Naramoto, K. Yamaguchi, T. Zinda, and W. Chujo
2. 発表標題 Asynchronous Symbol Discrimination for Optical Camera Communication Using Smartphone with Rolling Shutter Camera
3. 学会等名 Progress In Electromagnetics Research Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Zinda, K. Ito, and W. Chujo
2. 発表標題 Rolling-Shutter-Based Optical Camera Communication Using Distributed LED Array
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Communication Systems, Networks, and Digital Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Shintai, K. Mohri, T. Zinda, and W. Chujo
2. 発表標題 Error-Free Transmission for Rolling-Shutter-Based Optical Camera Communication
3. 学会等名 The 23st OptoElectronics and Communications Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 陣田 拓哉, 伊藤 和真, 中條 涉
2. 発表標題 LEDアレイとローリングシャッターを用いたイメージセンサ可視光通信のシンボル同期
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Zinda and W. Chujo
2. 発表標題 Symbol Synchronization Performance of Image-Sensor VLC with Rolling Shutter
3. 学会等名 International Conference and Exhibition on Visible Light Communications 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kondo, T. Zinda and W. Chujo
2. 発表標題 Symbol Rate and Timing Estimation for Image-Sensor VLC by a Cycle Pattern of Received Symbols
3. 学会等名 IEEE GLOBECOM 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Kondo, T. Zinda and W. Chujo
2. 発表標題 Wide-Angle Isolation Characteristics of Full-Duplex Image-Sensor Visible Light Communication
3. 学会等名 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Zinda and W. Chujo
2. 発表標題 Symbol Synchronization Method of Image-Sensor Visible Light Communication Using Rolling Shutter
3. 学会等名 2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 陣田 拓哉, 新帯 康生, 中條 渉
2. 発表標題 ローリングシャッターによるイメージセンサ可視光通信の高速シンボル同期
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 陣田 拓哉, 木下 雅裕, 中條 渉
2. 発表標題 サブキャリア変調による256QAMイメージセンサ可視光通信
3. 学会等名 2017年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 陣田 拓哉, 近藤 那樹, 中條 渉
2. 発表標題 イメージセンサ可視光通信のシンボル同期法の比較
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 陣田 拓哉, 近藤 那樹, 中條 渉
2. 発表標題 逐次推定法によるイメージセンサ可視光通信のシンボル同期改善
3. 学会等名 2017年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊 誠司, 近藤 那樹, 中條 渉
2. 発表標題 受信シンボルの周期性を用いたイメージセンサ可視光通信の同期法
3. 学会等名 2017年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤 那樹, 北岡 涼太郎, 中條 渉
2. 発表標題 広角レンズとLEDを用いた双方向イメージセンサ可視光通信のアイソレーション特性
3. 学会等名 電子情報通信学会ITS研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 北岡 涼太郎, 近藤 那樹, 中條 渉
2. 発表標題 最大パーセントフリッカ条件下でのイメージセンサ可視光通信のちらつき防止変調
3. 学会等名 電子情報通信学会ITS研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤 那樹, 渡邊 誠司, 陣田 拓哉, 中條 渉
2. 発表標題 受信シンボルの周期性を利用したイメージセンサ可視光通信のシンボル長算出方式
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 2016年

1. 発表者名 T. Kondo, R. Kitaoka, and W. Chujo
2. 発表標題 Isolation Characteristics of Full-Duplex Visible Light Communication with Image Sensor
3. 学会等名 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 北岡 涼太郎, 近藤 那樹, 中條 渉
2. 発表標題 三角波マルチサブキャリアによるちらつきを防止したイメージセンサ可視光通信のビットレート・距離積の向上
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 2016年

1. 発表者名 近藤 那樹, 北岡 涼太郎, 中條 渉
2. 発表標題 イメージセンサ可視光通信のシンボル長算出精度の向上
3. 学会等名 2016年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 北岡 涼太郎, 近藤 那樹, 中條 渉
2. 発表標題 マルチサブキャリア変調によるちらつきを防止したイメージセンサ可視光通信のビットレート向上
3. 学会等名 2016年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 R. Kitaoka, T. Kondo, and W. Chujo
2. 発表標題 Improvement of Bit Rate in Flicker-Free Visible Light Communication Using Image Sensor
3. 学会等名 The 13th IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Kondo, R. Kitaoka, and W. Chujo
2. 発表標題 Multiple-access and two-way visible light communication with image sensor and LED array
3. 学会等名 The 21st OptoElectronics and Communications Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 近藤 那樹, 北岡 涼太郎, 水野 翔太, 中條 渉
2. 発表標題 120fpsイメージセンサと16素子LEDアレイを用いた可視光通信のシンボルレート限界とビットレート
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 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

教員情報 中條 渉 https://kyoinjoho.meijo-u.ac.jp/search/profile/ja.55a6c5ce8169f13c.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