

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04143

研究課題名（和文）IoT時代に対応した広帯域LED可視光通信システム構成法の研究

研究課題名（英文）A study of broadband LED visible light communication systems for IoT

研究代表者

富里 繁（Tomisato, Shigeru）

岡山大学・自然科学学域・准教授

研究者番号：60362951

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、LED可視光通信用送受信機において、送信側の非線形歪補償で残留する非線形歪を、受信信号の仮判定結果から受信側でキャンセルし、送信側のプリディストーションと組み合わせる送受協調非線形歪補償手法を提案し、有効性を明らかにした。
また、LEDの周波数特性における振幅偏差について、送信側の振幅偏差補償とその補償により発生する非線形歪を受信側の繰り返しキャンセラで補償する手法を提案し、その有効性を明らかにした。
さらに、複数のLED照明と同じ場所に配置した複数の受光素子を用いて空間的に並列な信号伝送を行う手法を提案し、等価的に伝送信号を高速・広帯域化できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、電波と比較して広がり小さいという可視光の特徴を利用して、可視光通信に適した空間的多重化による高速信号伝送技術を確立できたことと、伝送信号の広帯域化による高速信号伝送と実用的な通信距離を両立できるLED可視光無線通信システムを実現するためのシステム構成技術を確立できたことに学術的な意義がある。また、今後、公共場所や各家庭で普及が見込まれるLED照明を利用した無線通信システムの実現に寄与するシステム構成技術を確立できたことに社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）： This research proposed a collaborative linearization method in both transmitter and receiver to compensate this non-linear distortion which employs digital pre-distortion processing for LED non-linear distortion in a transmitter and iterative cancellation processing for residual distortion noise by the pre-distortion in a receiver, and clarified the effectiveness.

The research also proposed a compensation method which employs amplitude deviation compensation of frequency response in a transmitter and an iterative canceller to compensate non-linear distortion caused by the amplitude deviation compensation in a receiver, and clarified the effectiveness.

Furthermore, the research proposed spatially parallel signal transmission with a lot of LED lighting and photodetectors, and clarified that the proposed method can accelerate the bit rate of visible light communications.

研究分野：移動通信

キーワード：可視光通信 LED 空間的並列信号伝送 非線形歪補償 高速信号伝送

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンの急速な普及と IoT の進展により、無線通信のトラフィックが急激に増大している。このような膨大な需要に応えるため、従来から無線通信では使用する周波数帯域を増やすことにより広帯域化してきた。2020 年に向けて研究開発が進んでいる第 5 世代移動通信方式では、ミリ波帯の利用が検討されている。また、さらなる広帯域化を進めるため、電波の領域でなく可視光領域を利用する可視光無線通信について研究が行われている。

この可視光通信方式として、照明用の LED を送信手段として用いる LED 可視光通信方式が検討されている。この方式では、肉眼では認識できない範囲で光の強度を変化させることにより、LED の照明機能に影響することなく情報を伝送できる。この方式の受光用デバイスとしてデジタルカメラで用いられているイメージセンサを用いたシステムの研究と実用化が進められている。ただし、イメージセンサでは高速に変化する情報信号の受信は困難で、数 10kbit/s 以下の低速の信号伝送システムしか実現できていない。

一方、受光用のデバイスとして高感度のフォトダイオードを用いれば、さらに高速信号伝送が可能で、ギガビット伝送実現の可能性を示す研究論文も発表されている。また、通信の帯域幅として数十 MHz 以上の LED も製造可能となっており、LED のデバイスの進歩と LED 照明普及率の急速な増大を背景に、LED 可視光通信による高速信号伝送の実現が期待できる。このようなシステムが実現した場合、無線通信分野だけでなく、照明器具製造メーカーも含めた産業界への波及効果は非常に大きい。また、他の無線通信システムを同時に利用するシステムアグリゲーションを実現すれば、無線通信周波数帯のより一層の広帯域化が可能となる。

ただし、広帯域で高速な LED 可視光通信を実現するためには解決すべき課題がある。まず、家庭用 LED 照明を用いて無線通信を行う場合、室内で利用するためには 2~3m の距離を安定的に信号伝送できる必要があるが、数百 Mbit/s 以上の高速伝送を実現しているシステムの多くは 1m 以下の通信距離である。通信距離の延伸には送信出力の増大が必要となるが、この場合、LED 出力に非線形歪が発生し伝送品質が劣化する。また、電波を用いた無線通信では、伝送路を多重化する空間多重化技術である MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) チャネル信号伝送が広帯域化技術として用いられるが、電波と可視光では伝搬的な性質が異なるため、新たな技術の創出が必要となる。さらに、今後のギガビット伝送の実現を考慮すると、LED の帯域幅はまだ十分ではなく、広帯域信号の伝送時に高い周波数で送信電力が低下する周波数偏差が発生する。また、実用化のためには高速伝送に適した受光素子を用いたシステムの評価が必要となる。

2. 研究の目的

本研究は、伝送信号の広帯域化による高速信号伝送と実用的な通信距離を両立できる LED 可視光無線通信システムを実現するためのシステム構成法を確立することを目的としている。

送信信号の広帯域化と通信距離の延伸を実現するためには、送信信号電力を増大し受信電力を増大させる必要がある。しかしながら、この場合、LED 回路を非線形領域で使用することになるため、送信信号に非線形歪が生じる。本研究では、信号帯域外の成分を利用して非線形歪を補償する新たな手法を創出し検討する。

電波を用いた無線通信では使用している周波数帯域の帯域外への信号成分の広がりについては厳しい制約があるが、可視光の領域ではこのような制約がない。この特徴を利用して、従来とは異なり、帯域外の成分を利用して非線形歪を補償する手法を検討する。

また、非線形歪を発生させずに送信電力を増大できれば、LED で発生する周波数特性の振幅偏差を効果的に補償できる。従来は送信電力一定の条件で周波数特性の振幅偏差を補償する必要があるため、低い周波数帯の送信出力が低下し、その結果、伝送速度が低下することになる。一方、本研究では、送信電力を増大できるため、低い周波数帯の伝送速度を低下させることなく振幅偏差を補償できる。本研究では、このような周波数特性の振幅偏差の補償手法を検討する。

さらに、可視光は電波と比較すると送信信号の広がりが小さく、空間的に多重化を行った場合に多数の信号が干渉し合う状況は発生しない。また、受信側でミラーやレンズで受光範囲を制限できるため、このような特徴を利用した空間的多重化方法が実現可能と考えられる。本研究では、可視光通信に適した空間的に多重化する方式を検討する。

3. 研究の方法

本研究では、(1) ~ (4) の検討を行う。

(1) 非線形歪と周波数偏差の補償を用いた伝送信号の広帯域化の検討

本検討では、帯域外に生成する信号成分を用いて非線形歪を補償する。この帯域外の信号成分の生成には OFDM 信号のピーク電力低減用のクリップとフィルタリング手法を応用する。また、電力増幅器の非線形歪補償用のプリディストーション手法も併用することを検討する。さらに、これらの手法を適用して LED の周波数偏差の補償を行う。これらの手法の効果を計算機シミュレーションと実験で評価する。

(2) 伝搬路特性の解析と信号伝送方式の検討

可視光通信では、従来の無線通信で問題となるフェージング変動の影響は小さい。本研究では、まず可視光通信における伝搬路特性を実験により解析する。次に、このような伝搬路特性の条件下で使用可能な信号伝送方式を検討する。伝送方式の候補としては、シングルキャリア伝送と OFDM 伝送がある。ここでは、実験により得られた伝搬路特性と(1)の周波数特性の振幅偏差補償の検討結果に基づいて比較評価する。

(3) 空間多重化による広帯域化の検討

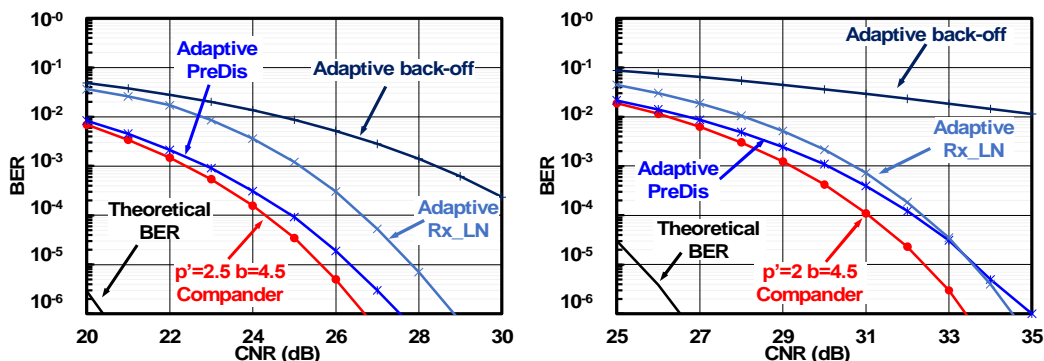
LED の光は広がるものの広がりを予測でき、また、受信機側でミラーやレンズを用いることにより、電波と比較して容易に受光範囲を制限できる。本研究では、このような可視光の特徴と(2)の検討結果に基づき、MIMO チャネル信号伝送技術の可視光通信への適用性について、実験及び計算機シミュレーションにより検討を行う。そして、LED 可視光通信に適した空間多重化技術を明らかにする。

(4) 広帯域 LED 可視光無線通信システム構成技術の検討

(1) ~ (3) の検討結果に基づいて、受光素子としてフォトダイオードを用いる高速信号伝送システムを設計し、実験と計算機シミュレーションにより構成技術を確立する。

4. 研究成果

可視光通信用 LED の非線形歪補償手法として、圧縮・伸長処理を行う非線形歪補償手法とプリディストーションとを組み合わせる提案手法について、実用的なシステムを想定したパラメータで有効性を検討することにより、受信レベルによらず線形化できることを明らかにした。また、受信状況に応じて圧縮・伸長処理の関数を適応的に変更する手法を新たに提案し、その有効性を明らかにした。評価結果から、図 1 に示すように、16QAM と 64QAM で受信特性改善効果が特に高いことを明らかにした。



(a) 16QAM (b) 64QAM
図 1 圧縮・伸長処理を行う非線形歪補償手法の BER 特性

さらに、送信側の非線形歪補償で残留する非線形歪を、受信信号の仮判定結果から受信機側でキャンセルし、送信側のプリディストーションと組み合わせることで、より効果的に非線形歪補償ができる送受協調非線形歪補償手法を提案した。この提案手法を用いることにより、図 2 に示すように、変調方式として 256QAM を使用して、LED における入力バックオフを 4dB とした飽和領域で利用した場合でも、良好な受信特性が得られることを計算機シミュレーションにより明らかにした。また、受信状況に応じて繰り返し回数を変える手法を検討し、その時の計算量削減効果を明らかにした。評価結果から、送受協調することにより、図 3 に示すように、256QAM においても繰り返し処理回数を 3 回程度に抑えることが可能となり、実用的な計算量で処理可能なことを明らかにした。

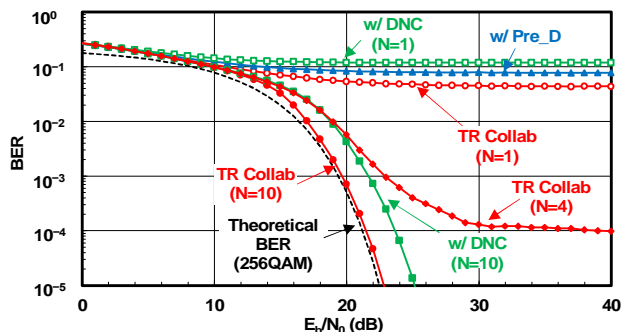


図 2 送受協調非線形歪補償手法の BER 特性 (入力バックオフ 4dB)

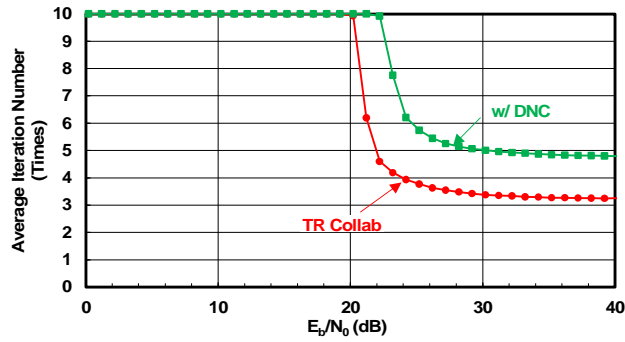


図3 送受協調非線形歪補償手法の所要繰り返し回数

また、広帯域信号伝送時に問題となる LED の周波数特性における振幅偏差について、送信側の振幅偏差補償とその補償により発生する非線形歪を受信側の繰り返しキャンセラで補償する手法を提案し、その有効性を明らかにした。評価結果から、図4に示すように周波数特性における15dBの振幅偏差を効果的に補償できることを明らかにし、可視光通信で用いる信号帯域を拡大できることを示した。

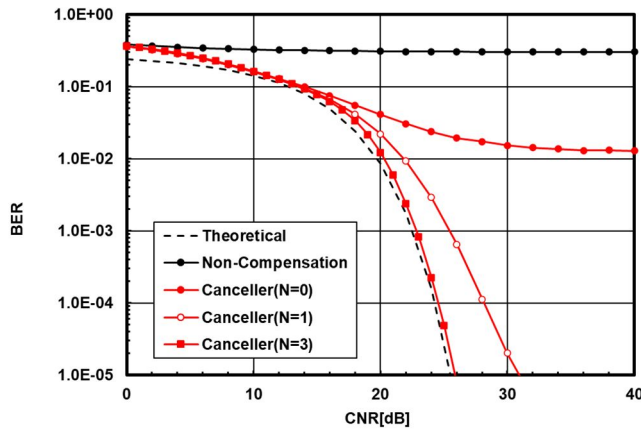


図4 振幅偏差補償手法の BER 特性 (入力バックオフ 4dB, 振幅偏差 15dB)

LED 可視光通信システムの広帯域化のため、複数の LED 照明と同じ場所に配置した複数の受光素子を用いて空間的に並列な信号伝送を行う手法を新たに提案した。また、提案手法の有効性を実験と計算機シミュレーションにより評価した。評価結果から、図5に示すように、受光素子の設置角度の調整により、屋内のほぼ100%の場所で2系列以上の並列伝送が可能で、4~8系列の信号を並列化可能であることを示した。このことから、LED 照明を用いた可視光通信においても空間的並列化することが可能で、等価的に伝送信号を高速・広帯域化できることを明らかにした。

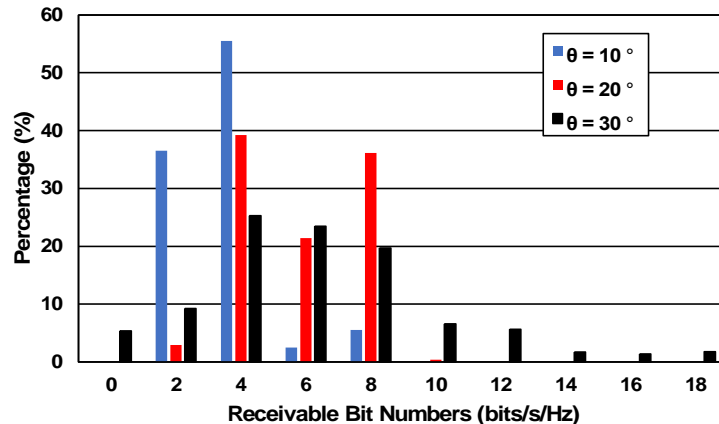


図5 受信可能な並列信号系列数

さらに、高効率な多値変調方式を用いた場合の性能評価を計算機シミュレーションにより行った。評価結果から、図6に示すように、受信状況により変調方式を適応的に変える適応変調方

式の適用により、伝送効率を改善できることを明らかにした。

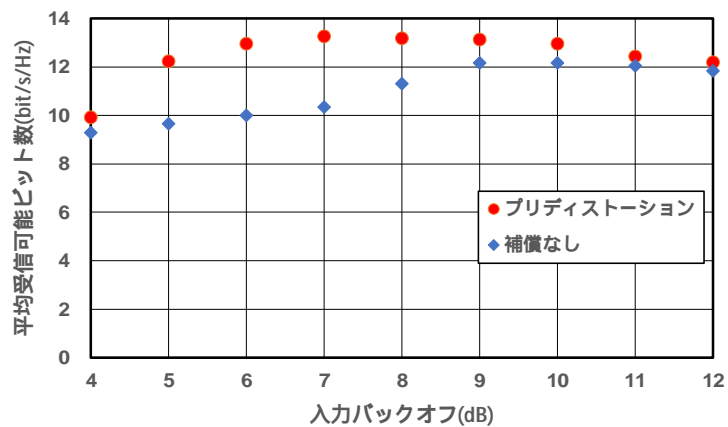


図6 適応変調による平均受信可能ビット数 (bit/s/Hz)

以上の結果から、伝送信号の広帯域化による高速信号伝送と実用的な通信距離を両立できる LED 可視光無線通信システムを実現するためのシステム構成技術を確立できたと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Okamoto Ryosuke, Tomisato Shigeru, Denno Satoshi, Uehara Kazuhiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Receivable Signal Sequence Number Increase in LED Visible Light Wireless Communications by Spatially Parallel Signal Transmission	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 296 ~ 301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2022XBL0028	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24件（うち招待講演 0件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Ryosuke Okamoto, Shigeru Tomisato, Satoshi Denno, Kazuhiro Uehara
2. 発表標題 Receivable Signal Sequence Number Increase by Spatially Parallel Signal Transmission in LED Visible Light Wireless Communications
3. 学会等名 2021 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeru Fukuyama, Shigeru Tomisato, Satoshi Denno, Kazuhiro Uehara
2. 発表標題 A Compensation Method for Both Amplitude Deviation of Frequency Response and Non-Linear Distortion in LED Visible Light Wireless Communications
3. 学会等名 2021 20th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 得居 紀宏, 富里 繁, 田野 哲, 上原 一浩
2. 発表標題 LED可視光通信における周波数特性及び非線形歪補償による受信特性改善
3. 学会等名 第23回IEEE広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日笠 颯汰, 富里 繁, 田野 哲, 上原 一浩
2. 発表標題 空間的並列信号伝送を用いたLED可視光無線通信における 送信信号の適応分配手法の検討
3. 学会等名 第23回IEEE広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 劉 正欣, 富里 繁, 田野 哲, 上原 一浩
2. 発表標題 LED可視光通信用送受協調線形化の高効率変調における受信特性改善効果
3. 学会等名 第23回IEEE広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 得居 紀宏, 富里 繁, 田野 哲, 上原 一浩
2. 発表標題 LED可視光通信用送受協調線形化における プリディストーション特性の誤差の影響
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Saroma Era, Shigeru Tomisato, Satoshi Denno, Kazuhiro Uehara
2. 発表標題 Transmission performance of a digital pre-distortion method followed by adaptive compander for LED visible light communications
3. 学会等名 2020 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keitaro Hirai, Shigeru Tomisato, Satoshi Denno, Kazuhiro Uehara
2. 発表標題 Transmission performance of highly efficient modulation by collaborative linearization processing in both transmitter and receiver for LED visible light communications
3. 学会等名 2020 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2020) 1 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本亮祐, 富里繁, 田野哲, 上原一浩
2. 発表標題 LED可視光無線通信における空間的並列伝送時の受信可能信号系列数の検討
3. 学会等名 第22回IEEE広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福山豪, 富里繁, 田野哲, 上原一浩
2. 発表標題 LED 可視光通信における周波数特性の振幅偏差補償による受信特性改善
3. 学会等名 第22回IEEE広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 劉正欣, 平井啓太郎, 富里繁, 田野哲, 上原一浩
2. 発表標題 送受協調線形化によるLED 可視光通信における高効率変調の受信特性
3. 学会等名 第22回IEEE広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuke Kamei, Shigeru Tomisato, Satoshi Denno, Kazuhiro Uehara
2. 発表標題 LED Lighting Arrangement for Spatially Parallel Signal Transmission in Visible Light Communications
3. 学会等名 2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Denno, Shunsuke Fujitaka, Yafei Hou, Shigeru Tomisato, and Kazuhiro Uehara
2. 発表標題 Optical Radio Channel Propagation in Wireless Communication Systems with LEDs
3. 学会等名 2019 12th Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平井 啓太郎, 富里 繁, 田野 哲, 上原 一浩
2. 発表標題 屋内無線通信用LED可視光通信における干渉と非線形歪雑音除去手法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 恵良 紗呂磨, 富里 繁, 田野 哲, 上原 一浩
2. 発表標題 LED可視光通信用送受協調型非線形歪補償を用いる空間的並列伝送の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀井 裕典, 富里 繁, 田野 哲, 上原 一浩
2. 発表標題 LED可視光通信における空間的並列信号伝送時の伝送特性評価
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 2019年

1. 発表者名 亀井 裕典, 富里 繁, 田野 哲, 上原 一浩
2. 発表標題 LED可視光無線通信の空間的並列伝送時における受信可能信号数の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平井 啓太郎, 富里 繁, 田野 哲, 上原 一浩
2. 発表標題 プリディストーションと非線形歪雑音除去を用いたLED可視光通信方式
3. 学会等名 IEEE広島支部学生シンポジウム (HISS)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 恵良 紗呂磨, 富里 繁, 田野 哲, 上原 一浩
2. 発表標題 非線形歪補償を用いたLED可視光無線通信の空間並列伝送時の伝送特性
3. 学会等名 IEEE広島支部学生シンポジウム (HISS)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平井 啓太郎, 後藤 農兵, 富里 繁, 田野 哲, 上原 一浩
2. 発表標題 高効率変調を用いたLED可視光通信における送受協調線形化手法
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡田 武史, 富里 繁, 田野 哲, 上原 一浩
2. 発表標題 LED可視光通信用送受信機における非線形歪補償の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡田 武史, 富里 繁, 田野 哲, 上原 一浩
2. 発表標題 LED可視光無線通信における送受協調型非線形歪補償法の検討
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 2018年

1. 発表者名 亀井 裕典, 富里 繁, 田野 哲, 上原 一浩
2. 発表標題 LED可視光通信における照明配置方法による干渉特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀井 裕典, 富里 繁, 田野 哲, 上原 一浩
2. 発表標題 LED可視光通信における空間的並列信号伝送のための照明配置方法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会
4. 発表年 2019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
研究分担者	上原 一浩 (Uehara Kazuhiro) (10221798)	岡山大学・自然科学研究科・教授 (15301)	
研究分担者	田野 哲 (Denno Satoshi) (80378835)	岡山大学・自然科学研究科・教授 (15301)	

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