

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K21397

研究課題名(和文)照明用LEDによる協調通信技術を有した知的照明システムの高度化に関する研究

研究課題名(英文) Novel lighting constrained visible light communications using digital controlled massive multi-color LED array for an intelligent lighting system

研究代表者

小澤 佑介 (Kozawa, Yusuke)

茨城大学・工学部・助教

研究者番号：20634215

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、大容量通信機能と多彩な照明機能を融合した高度知的照明システム実現のために複数色LED光源(複数色LEDアレイ)を協調利用した照明可視光通信システムを構築している。特に主要技術として、複数色LEDアレイを用いたデジタル制御型カラーシフトキーイング(DCSK: Digital Color Shift Keying)方式を提案し、理論解析・コンピュータシミュレーション・基礎実験評価を行っている。さらに、高速・大容量化技術として空間変調技術・符号分割多重接続技術を用いたDCSK方式、多彩な照明機能実現のために調光制御・調色制御が可能なDCSK方式についても提案・性能評価を行っている。

研究成果の概要(英文)：In this study, novel lighting constrained visible light communications (VLC) using digital controlled massive multi-color LED array are proposed for an intelligent Lighting system. For main technology for the VLC system, a digital color shift keying with multicolor led array is represented to avoid the effect of LED nonlinearity. Especially for high-speed VLC systems, a DCSK system using spatial shift keying and DCSK with code division multiplexing using Hadamard code with on-off signaling are investigated. Furthermore, for intelligent lighting system, DCSK systems with dimming control and target color control are also proposed and evaluated.

研究分野：情報通信工学

キーワード：可視光通信 知的照明システム 光強度/直接検波 カラーシフトキーイング 調光 調色 デジタル制御型LEDアレイ LED

### 1. 研究開始当初の背景

近年、通信トラフィックの急激な増加による周波数資源の枯渇化が問題となっている。この解決法のひとつとして、人間の目に見える光(可視光)を用いた無線通信が着目されている。この可視光通信は、電波法による規制がない、電波無線通信と干渉がない、LEDを用いた人工光源を送信デバイスインフラとしたコピキタス通信が可能、といった特徴があり、これまでとくに「周波数枯渇問題の解決策」、「RF通信が適さない・望ましくない場所での通信手段」として着目されてきた。さらに近年では、応用分野の一つとして室内の照明用LEDを用いた照明可視光通信に関する研究が盛んに進められている。その理由として、上記の特徴に加えて、照明用LEDに用いる数Wから数百Wの電力を通信にも使用可能なこと、室内において見通しがよい天井に照明(通信)器具を設置できること、が挙げられる。本研究では、通信機能と照明機能を融合した照明可視光通信技術の高度化により、新しい知的照明システムの実現を目指す。

### 2. 研究の目的

本研究では、通信機能と照明機能を融合した照明可視光通信による知的照明システムの実現を目的としている。とくにより高度な知的照明システム実現のために、通信機能と照明機能をともに高い品質で提供可能な照明可視光通信技術の確立が必要不可欠であり、そのためには、

- (1) 照明用LEDの周波数応答性と非線形発光特性による通信速度限界、および
- (2) 変調光信号による照明機能(ちらつき軽減、明るさ、色味)の制限、

を同時に解決する必要がある。これらの課題は、従来の照明可視光通信において蛍光体付き青色LED(一般的な白色LED)が用いられていることに原因がある。そこで、本研究課題では、照明可視光通信の送信デバイスとして複数/高密度に配置した複数色LED光源(複数色LEDアレイ)に着目し、この複数色LEDアレイを用いた照明可視光通信技術の実現を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、照明可視光通信の送信デバイスとして複数/高密度に配置した複数色LED光源(複数色LEDアレイ)に着目し、この複数色LEDアレイを用いた照明可視光通信技術の実現を目指す。より具体的には、複数色LEDアレイを用いた光強度変復調法として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) 複数色LEDアレイを用いたデジタル制御型カラーシフトキーイング(CSK: Color Shift Keying)方式の確立：

照明可視光通信の変復調技術として、“調

光”と“ちらつき軽減”を考慮した光強度変復調技術がIEEE802.15.7標準化グループにより提案されている。本研究では、その光強度変復調技術の中から最も周波数利用効率の高CSK方式に着目している。このCSK方式は送信LEDに赤色、青色、緑色の3つのLEDが一つのパッケージとなったRGB-LED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。さらに、3色の発光強度の和を一定とすることでちらつきを軽減することが可能である。しかしながら、CSK方式では情報(色)表現時に多値光強度を用いるため、送信LEDの順方向電流に対する発光強度の非線形性により送信信号の変調制度が劣化してしまう。そこで、本課題では、複数LEDの協調発光により多値光強度を表現するデジタル制御型LEDアレイ技術(図1)を提案し、CSK方式と組み合わせたデジタル制御型CSK方式を提案する。提案方式について、コンピュータシミュレーションや理論解析により評価する。また、提案方式の実験評価系の製作、及びDCSK変調信号のFPGA実装により通信性能を評価する。

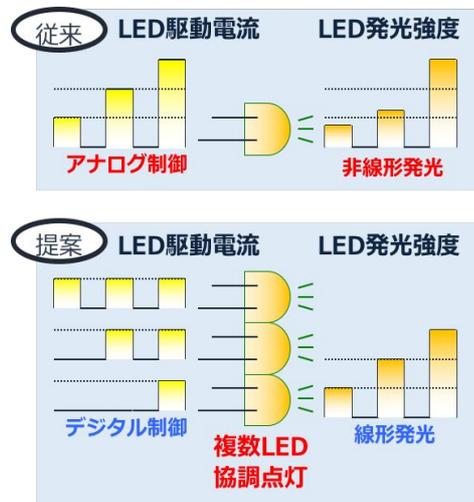


図1 デジタル制御型LEDアレイ技術による多値光強度の線形発光

- (2) 複数色LEDアレイを用いたDCSK方式における大容量通信技術：

DCSK方式の周波数利用効率の向上及び、大容量通信実現のために、DCSK方式を用いた空間変調技術とオンオフ信号形式型疑似雑音符号を用いたDCSK方式の提案を行う。DCSK方式では複数のLEDを用いるため、点光源ではなく面光源となるため、各LEDと受信器間の通信利得に差が生じる。本研究課題ではこの利得差を積極的に用いた空間変調技術の導入によりDCSK方式の周波数利用効率の向上を目指す。また、屋内環境による複数ユーザへの同時通信を可能にするために、オンオフ信号形式型の疑似雑音符号を用いたDCSK方式を提案し、LED非線形発

光の影響を回避しつつ、複数ユーザへの同時通信を目指す。これらの方式について、コンピュータシミュレーションや理論解析により評価する。

### (3) 複数色 LED アレイを用いた DCSK 方式における照明制御技術：

より高度な照明技術として、ちらつき軽減、調光(明るさ)制御、に加えて調色(色味)制御技術の導入を目指す。さらに、既存システムでは考慮する必要のなかった新たな問題として、LED アレイ面での色の偏り(偏色効果)に着目し、送信情報と LED アレイ間のマッピング法により解決を目指す。これらの方式について、コンピュータシミュレーションや理論解析により評価する。さらに、提案方式の実験評価系の製作することで、照明性能についても評価を行う。

## 4. 研究成果

### 4.1 DCSK 方式

#### (1) 複数色 LED アレイを用いた DCSK 方式の LED 線形発光技術

本提案方式では、非線形生を回避しつつ CSK 信号を高精度に生成可能な DCSK 方式を提案した。その結果、下記の研究成果が得られている。

- 9 つの RGB-LED を用いることで、IEEE802.15.7 にて提案されている CSK の全ての信号点配置を誤差 3%以内で再現可能である。
- 9 つの RGB-LED を用いることで面光源化し、各 LED と受信機間の通信利得が生じるが LED 間の距離が 2cm 以内であれば誤り率性能に影響を与えない
- 誤差 3%以内にて制限された際の DCSK 信号のビット誤り率性能は、理想的に LED が線形発光した際の従来 CSK 方式とほとんど同じビット誤り率を達成可能である。さらに、提案方式の誤り率性能は、実験から測定した LED の非線形効果を考慮した際の CSK 方式のビット誤り率性能に比べて、8 値の場合は約 6dB、16 値の場合は約 3dB の性能改善効果がある。一方で 4 値の場合は、非線形効果の影響は少なくほぼ同じビット誤り率性能となった。
- 一方で、最大伝送速度に着目すると、各 LED の遮断周波数が 20MHz の場合、4 値 DCSK と 8 値 DCSK は最大で 80Mbps、16 値 DCSK は最大で 62Mbps を達成可能である。しかしながら、非線形効果を考慮した従来 4 値 CSK は最大で約 100Mbps を達成可能であり DCSK よ

りも優れていることがわかった。この結果より、従来 CSK の色空間上での信号点配置は、受信機において色空間ではなく信号電力空間で復調する際には最適とは言えず、より高い伝送速度を達成するためには、送信側でも信号電力空間上で信号点を配置する必要があることがわかった。

#### (2) DCSK 方式のための信号電力空間における信号点配置

DCSK 方式のための信号点配置法として、光源の色数(3色、4色)次元に拡張した信号電力空間における信号点配置法の提案を行った。その結果、下記の研究成果が得られた。

- DCSK において、従来 CSK の色空間上信号配置配置を誤差 3%以内で表現するのに必要な LED 数に比べて、信号電力空間上での信号点配置法は必要最小限な LED 数を減少することが可能である。具体的には、3 色 LED(RGB-LED)の場合、4 値で 1 個、8 値で 3 個、16 値で 2 個減少可能である。また、4 色 LED(RYGB-LED)を用いた場合、4 値、8 値、16 値では減少できないが、64 値で 3 個減少することが可能である。
- 上記の必要最小限な LED 数時において伝送速度を 20Mbps とした場合、提案のシンボル誤り率は、従来 CSK(線形発光時)方式と、ほぼ同等の性能を達成した。さらに最大伝送速度に着目すると、提案の 4 値 DCSK 方式は最大 170Mbps を達成することが可能であり、従来 4 値 CSK に比べて約 70Mbps 向上可能である。

(注)ここから先の研究成果において、DCSK の信号点配置はすべて信号電力空間上に配置している。

### 4.2 DCSK 方式による大容量通信技術

#### (1) 多色 LED を用いた空間変調技術

LED アレイを送信機として用いることにより空間変調技術の応用が可能であり、本研究課題では、4 色 LED アレイを用いた一般化空間変調方式と 4 色 LED アレイを用いた空間 DCSK の提案を行い、下記の研究成果が得られた。

- 照明可視光通信における一般化空間変調方式では、“発光 LED 数  $n$ ”と“LED アレイの中からどの  $n$  個の LED を発光させるか”により情報を表現する。受信機では、受信した発光強度(振幅)情報のみから情報を復調する。したがって、LED 間の距離が短すぎると情報は復調できず、一方で情報伝送効率を向上させるためには LED ア

レイ内の LED 数を増大させる必要がある。提案方式では、送信 LED として 4 色 LED を用いているため、発光強度（振幅）情報に加えて色でも情報を表現することが可能となる。その結果、屋内環境を想定したシミュレーションにおいて、4 色 LED を 2 個用いた提案方式のシンボル誤り率特性は、白色 LED を 8 個用いた一般化空間変調方式に比べて約 40dB と大幅に性能を改善可能であることを示した。

- 空間 DCSK 方式は、DCSK と空間変調を融合した方式であり、従来の DCSK に必要な LED 数以上に LED 数を確保することで空間変調を行うものである。したがって、LED アレイ内のアレイ数を増大することで従来 DCSK よりも周波数利用効率を増大することが可能である。具体的には、3 色 LED を 5 個用いた場合に 8bit/sec/Hz（DCSK の 2 倍）、4 色 LED を 4 個用いた場合に 8bit/sec/Hz（DCSK の 1.6 倍）が達成可能となった。
- 屋内環境を想定したシミュレーションにより、基本的に空間 DCSK 方式のシンボル誤り率性能は従来 DCSK 方式よりも優れていることが示されている。しかしながら、通信利得差がゼロの場合、空間変調情報を復調できず従来 DCSK よりもシンボル誤り率性能が劣化することがわかり、DCSK 情報と空間変調情報を独立に復調可能な階層化変調等の工夫が必要なことがわかった。

#### (2) 疑似雑音符号を用いた DCSK

本提案方式では、DCSK 方式の複数ユーザへの通信手法として、各ユーザに個別の疑似雑音符号を割当てることで同時接続を可能とする光符号分割多重接続（OCDM：Optical Code Division Multiplexing）に着目し、符号としてオンオフ信号形式型アダマール符号を適用している。その結果、下記の研究成果が得られた。

- DCSK を用いた OCDM 方式の疑似雑音符号として、オンオフ信号形式型アダマール符号を適用することで、従来の DCSK と同様に各 LED はオンオフ（線形）動作のみで情報を送信することが可能となった。
- さらに、オンオフ信号形式型アダマール符号の割り当て方に着目し、符号の切り替えにより情報を不可逆なシーケンスインバージョン（SIK）方式を導入することで、さらに周波数利用効率を向上することが可能である。とくに、周波数利用効率を 5bit/sec/Hz とした場合、CDM/SIK 技術を用いた DCSK 方式のシンボル誤り

率性能は SIK を行わない DCSK/CDM 方式に比べて約 3dBm 改善可能である。

### 4.3 DCSK 方式による照明制御技術

#### (1) 信号点配置による調色制御法

DCSK では、各色の発光強度比を変化させることで信号点を表現する。情報送信時、選択する信号点に応じて複数色 LED アレイの色が変化するが、高速変調時にはその信号の切り替わりは人間には感知できず、各信号の色が平均化された色（ターゲットカラー）が知覚される。提案方式では、M 個の信号点配置を設計することで所望のターゲットカラーを変化させる調色制御法の提案を行い、下記の研究成果が得られた。

- 本研究では、所望の調色性能として ANSI 規格の相関色温度（CCT：Correlated Color Temperature）を対象とし、所望 CCT を達成する DCSK 信号点配置の中から演色評価指数（CRI：Color Rendering Index）が最大となり、かつ DCSK 信号点の信号点間距離が最大となる DCSK 信号点配置について検討を行った。とくに、4 色 LED アレイを用いた DCSK において、所望 CCT として一般的に照明に用いられる 3000K、5000K、6500K を設定した場合、4 色 LED 数と多値数 M を増大することで所望 CCT における CRI 性能が約 80 前後まで向上可能となる。しかしながら、商用に発売されている白色 LED（CRI 値 90 以上）に比べ CRI 値は低い結果となり、これは 4 色 LED の各 LED のスペクトルに原因があることがわかった。また、所望 CCT を 3000K とした場合、他の CCT を設定した DCSK 方式に比べてシンボル誤り率性能が約 3dB 劣化した。
- DCSK 方式の CRI 性能向上のために、LED スペクトルをガウス分布とした疑似 LED スペクトルを用いた際の調色性能について評価を行った。その結果、色数と各色のスペクトルの波長幅を増加させることでより高い CRI 値を達成可能となった。

#### (2) デジタルパルス振幅変調とパルス幅変調による調色制御法

DCSK 方式のための調光制御法として、デジタルパルス振幅変調（DPAM：Digital Pulse Amplitude Modulation）とパルス幅変調（PWM：Pulse Width Modulation）を組み合わせた PWM/DPAM ハイブリット型調光制御法を提案している。その結果、下記の研究成果が得られた。

- 提案法では、二つの調光法を融合することで、PWM 型調光制御法よりも高い周波数利用効率を有し、DPAM 型調光制御法よりも調光範囲を大きくす

ることが可能となった。

屋内環境を想定したシミュレーション評価により、提案手法は約 20Mbps から 200Mbps の場合、従来の PAM 型、PWM 型の調光制御を用いた DCSK よりも優れたシンボル誤り率性能を達成することを示した。一方でより高い伝送速度時は、LED の低い遮断周波数により発生する信号間干渉の影響により PWM 調光制御を用いた DCK 方式の方が優れたシンボル誤り率性能を達成可能である。

(3) サイクリックマッピング法による偏色軽減法

DCSK 方式では複数色 LED アレイ面において、信号点を表現する際の点灯 LED を固定すると、特定の色の点灯頻度が高くなる可能性があり、点灯頻度の高い LED の寿命が短くなること、発光色の偏った LED の存在により発光面内で色の偏り(偏色)が生じること、が実用上の問題となる。そこで本研究課題では、各 LED 間の点灯頻度の平均化のために、情報と発光 LED とのマッピングを 1 シンボル毎にシフトさせるサイクリックマッピング法について提案している。その結果、下記の研究成果が得られた。

- サイクリックマッピング法を適用した場合の通信性能と照明性能を評価するために、3 色 LED アレイを用いた DCSK 方式の実験評価系を製作した。3 色 LED アレイでは 6 個の 3 色 LED を用いており、DCSK 信号とサイクリックマッピング法を FPGA 実装により実現している。また、受信機では赤、青、緑の光フィルター付 PD を用いている。
- 実験により、サイクリックマッピング適用時の DCSK 方式の 3 色 LED を 6 個用いた 3 色 LED アレイのエラーベクトル振幅 (EVM : Error Vector Magnitude) は、従来 DCSK の EVM とほぼ同じ性能を達成した。
- DCSK のターゲットカラーの色温度を 5700K に設計した際の信号点配置を用いた DCSK 方式の通信時の色温度特性を照度計により評価した。その結果、LED アレイ全体の色温度特性についてはサイクリックマッピング適用時と非適用時でほぼ同等の性能となった。一方で、各 3 色 LED の色温度特性を測定したところ、サイクリックマッピング非適用時は各 3 色 LED の色温度特性に大きなばらつき(偏色)があったが、サイクリックマッピング適用時はそのばらつきが大幅に減少し、LED アレイ全体の色温度特性に近づくことが確認できた。

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

- 1) N. Murata, Y. Kozawa, and Y. Umeda, "Digital Color Shift Keying with multi-color LED array", *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 1-14, 2016-08(査読有)  
DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2582645

[学会発表](計 20 件)

- 1) J. Okumura, Y. Kozawa, and Y. Umeda, "A Study on Hybrid PWM/DPAM Dimming Control for Digital Color Shift Keying Using RGB-LED Array", in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, San Francisco(USA), 2017-03-19.
- 2) Z. Kang Y. Matsuda, Y. Kozawa, and Y. Umeda, "Digital Color Shift Keying for Higher Transmission Rate Using LED Driver with Carrier Sweeping Out", in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, San Francisco(USA), 2017-03-19.
- 3) Y. Matsuda, Y. Kozawa, and Y. Umeda, "Cyclic Mapping Method for Digital Color Shift Keying with RGB-LED Array", in *Proc. IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, Phoenix(USA), 2017-01-15.
- 4) S. Igata, Y. Kozawa, Y. Umeda, and H. Habuchi, "BER performance of Digital Color Shift Keying with Target Color Control", in *Proc. International Conferences on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, Gold Coast(Australia), 2016-12-19.
- 5) 奥村淳平, 小澤佑介, 榎田洋太郎, "RGB-LED アレイを用いたデジタル制御型カラーシフトキーイング方式のための PWM/PAM ハイブリッド型調光制御法に関する検討", *信学技報*, vol. 116, no. 337, WBS2016-66, pp. 107-112, サンポートホール高松(香川県), 2016-12-01.
- 6) F. Sato, Y. Kozawa, Y. Umeda, "Performance Evaluation of Multiuser Digital Color Shift Keying Using Pseudo-Noise Code with On-Off Signaling", in *Fourth International Symposium on Computing and Networking (CANDAR)*, Hiroshima(Japan), 2016-11-22
- 7) 伊形俊介, 小澤佑介, 榎田洋太郎, "ガウス型 LED スペクトルモデルを用いたデジタル制御型カラーシフトキーイング方式の照明性能に関する

- る一検討”, 信学技報, vol. 116, no. 236, WBS2016-38, pp. 35-40, 防衛大学校(神奈川県), 2016-10-06.
- 8) 松田勇介, 小澤佑介, 榎田洋太郎 “デジタル制御型カラーシフトキーイング方式における RGB-LED アレイ光源内の偏色軽減法に関する一検討”, 信学技報, Vol. 116, No. 236, WBS2016-39, pp. 41-46, 防衛大学校(神奈川県), 2016-10-06.
- 9) 伊形俊介, 小澤佑介, 榎田洋太郎, “許容色度範囲内ターゲットカラー表現時のデジタル制御型カラーシフトキーイング方式のビット誤り率性能”, 電子情報通信学会 2016 年ソサイエティ大会, A-9-4, 北海道大学(北海道), 2016-09-20.
- 10) 佐藤文則, 小澤佑介, 榎田洋太郎, “オンオフ信号形式型アダマール符号を用いたデジタル制御型 CSK/CDM 方式の性能評価”, 信学技法, Vol.116, No. 40, WBS2016-4, pp. 17-22, 名古屋工業大学(愛知県), 2016-05-19.
- 11) 松田勇介, 小澤佑介, 榎田洋太郎, “RGB-LE アレイを用いたデジタル制御型 CSK 信号の照明色温度とその周波数特性”, 信学技法, Vol.116, No. 40, WBS2016-5, pp. 23-28, 名古屋工業大学(愛知県), 2016-05-19.
- 12) 村田直也, 小澤佑介, 榎田洋太郎, “デジタル制御型 CSK のための調光法の一検討”, 電子情報通信学会 2016 年総合大会, AS-3-6, 九州大学(福岡県), 2016-03-17.
- 13) N. Murata, Y. Kozawa, Y. Umeda, “Dimming scheme for Digital Color Shift Keying”, in *Proc. RISP International Workshop on Nonlinear Circuits Communications and Signal Processing (NCSP)*, Honolulu(USA), 2016-03-06.
- 14) 松田勇介, 小澤佑介, 榎田洋太郎, “デジタル制御型 CSK 方式におけるターゲットカラー制御法の実験的評価”, 電子情報通信学会東京支部学生会, 東海大学(東京都), 2016-03-05.
- 15) 佐藤文則, 小澤佑介, 榎田洋太郎, “オンオフ信号形式型アダマール符号を用いたデジタル制御型 CSK/SIK 方式のシンボル誤り率性能”, 電子情報通信学会東京支部学生会, 東海大学(東京都), 2016-03-05.
- 16) 村田直也, 小澤佑介, 榎田洋太郎, “デジタル制御型 CSK 方式の LED 線形発光による変調精度向上効果”, 信学技報, Vol.115, No. 364, WBS2015-68, pp. 163- 168, 沖縄産業支援センター(沖縄県), 2015-12-17.
- 17) 村田直也, 小澤佑介, 榎田洋太郎, “デジタル制御型カラーシフトキーイング方式のための信号点配置法の検討”, 信学技報, Vol. 115, No. 247, WBS2015-33, pp. 37-42, 早稲田大学(東京都), 2015-10-09.
- 18) 奥村淳平, 村田直也, 小澤佑介, 榎田洋太郎, 羽淵裕真, “4 色 LED を用いた一般化空間変調方式の一検討”, 信学技報, Vol. 115, No. 247, WBS2015-30, pp. 19-24, 早稲田大学(東京都), 2015-10-09.
- 19) 伊形俊介, 村田直也, 小澤佑介, 榎田洋太郎, 羽淵裕真, “デジタル制御型カラーシフトキーイング方式におけるターゲットカラー制御法の一検討”, 信学技報, Vol. 115, No. 247, WBS2015-29, pp. 13-18, 早稲田大学(東京都), 2015-10-09.
- 20) N. Murata, H. Shimamoto, Y. Kozawa, and Y. Umeda, “Performance Evaluation of Digital Colour Shift Keying for Visible Light Communications”, in *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC '2015), Workshop on Visible Light Communications and Networking (VLCN)*, London(UK), 2015-06-08.
- [図書](計 1 件)
- 1) 小澤佑介, 電気書院, 電気計算 第 85 版第 5 号 LED の利用動向 2017 年, pp. 32-36.
- [その他]
- ホームページ等
- 1) <http://www.tus.ac.jp/today/archive/20161205005.html>
- 2) <http://www.tus.ac.jp/today/mb/archive/20151222001.html>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
小澤 佑介 (KOZAWA YUSUKE)  
茨城大学・工学部・助教  
研究者番号: 20634215