

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06361

研究課題名(和文)カオス理論に基づいた符号設計と近距離通信への応用

研究課題名(英文)Code Design Based on Chaos Theory and Its Application to Short-Range Communication

研究代表者

常田 明夫 (TSUNEDA, Akio)

熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・准教授

研究者番号：40274493

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)：可視光CDMA通信用スペクトル拡散符号については、NFSRに基づいて、非同期CDMA通信で有効な負の自己相関をもつ多数の符号が生成可能であることを明らかにした。また、それらの負相関符号の中で、互いに直交する符号のセットが構成可能であること、およびその有効性を明らかにした。超音波測位用スペクトル拡散符号については、NFSR系列とBarker系列を組み合わせて様々な連接符号を構成し、その非周期自己相関特性を調べ、測位用符号としての有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

可視光通信は、次世代の近距離無線通信の有力な通信方式であり、多重方式としてCDMAが採用された場合、本研究で提案した負相関スペクトル拡散符号は有用である。また、提案した測位用符号は、病院内など電波の利用が制限された環境における屋内測位システムでの利用が考えられる。

研究成果の概要(英文)：It has been shown that many spreading codes with negative auto-correlation suitable for asynchronous CDMA communications can be generated by NFSRs. Also, some sets of such spreading codes which are orthogonal to each other can be generated and they are suitable for optical CDMA communications. Furthermore, we proposed concatenated codes obtained by a Barker sequence and an NFSR sequence for positioning systems and investigated their aperiodic auto-correlation properties. Due to the excellent aperiodic auto-correlation property of Barker sequence, the side lobes of the proposed concatenated sequences are small.

研究分野：情報通信工学、非線形理論

キーワード：カオス理論 CDMA 可視光通信 非線形フィードバックシフトレジスタ 負相関系列 ユニポーラ符号 測位システム

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

携帯電話や放送に代表される無線通信技術は、近年益々発達しており、高速大容量・高品質な通信を可能にしている。例えば、携帯電話はアナログ方式の FDMA (周波数分割多元接続) からデジタル通信の TDMA (時分割多元接続)、CDMA (符号分割多元接続)、そして OFDM (直交周波数分割多重) へと発展し、端末機器もスマートフォンやタブレット端末などが現れ、急速に普及してきている。これらの多くは、携帯電話ネットワークだけでなく、Wi-Fi 無線や GPS の利用も可能であり、その利便性は屋内・屋外を問わず向上している。

このような状況の中、近年注目されている近距離無線通信方式として可視光通信がある。可視光通信は、LED 照明などを利用して、人間の目が感知しないくらい高速に点滅させることで高速なデジタル通信を行うもので、一般的に普及している照明器具などが通信インフラにできるため、低コスト・省エネで実現できるという特長がある。また、可視光通信は照明が当たっている所にだけ情報が届くため、どこで通信を行っているかが明確となり、遮光することで簡単に情報漏洩を防ぐこともでき、セキュリティの面でも優れた方式として注目されている。

可視光通信システムにおいて、複数の光源 (情報源) と受信機が存在する中での通信 (すなわち多重通信) を行う方法の一つとして、CDMA 方式が挙げられる。CDMA 方式は、スペクトル拡散通信技術に基づいた多元接続方式で、耐雑音性や耐干渉性、周波数利用効率などの点で優れ、第 3 世代携帯電話で採用された技術であり、可視光通信においても耐雑音性・耐干渉性は重要な課題であるため、有効な方式であると考えられる。

また、通信技術は GPS に代表されるような位置計測 (測位) にも利用されており、現代社会において様々な利便性を与えている。屋内において、移動する物体や人の正確な位置を認識できれば、自律移動ロボット、視覚障害者等への経路案内、病院内での患者の位置の把握、パーソナルモビリティの移動アシストなどへの応用が期待できる。しかしながら、屋内においては、GPS の電波が届かなかつたり、より高い測位精度が求められるため、例えば、可視光通信や赤外線通信、無線 LAN、RFID、屋内 GPS、超音波などを用いた新しい技術の開発が進められている。ある物体の 3 次元測位を行うには、3 つ以上の異なる固定局 (GPS の場合は衛星) との距離を測れば良く、電波や光、超音波の送受信によって各固定局との距離を測る方式が考えられる。特に、病院内では、GPS 等で用いられている電波の利用は院内の機器や患者への影響の恐れがあり、超音波を利用した屋内測位システムも考えられている。超音波は測位精度の点で電波や光よりも有利であり、また、複数の固定局からの超音波信号を受信・識別するために、GPS と同様、CDMA 方式を利用したシステムも検討されている。

本研究では、上述した可視光通信および超音波測位を対象としており、これらに共通するのは CDMA 技術の利用である。CDMA システムの性能は、情報信号の帯域を拡散するために用いられる擬似乱数系列 (スペクトル拡散符号) の自己相関特性や相互相関特性に大きく依存するので、様々な符号系列の設計が盛んになされてきている。

従来の拡散符号として、線形フィードバックレジスタ (LFSR) により生成される M 系列や Gold 系列が代表的であるが、同じ長さの系列の種類数は限られており、より多くのユーザに対応できない点や、基本的に無相関な系列しか生成できないという制約がある。一方、“カオス現象” をスペクトル拡散符号に応用する試みも盛んに行われてきた。それらの多くは一次元写像から生成されるカオス系列を利用するものであり、1993 年に Kohda & Tsuneda によってカオス 2 値系列を拡散符号として利用する試みがなされて以来、多くの研究者がカオスに基づいた符号を提案している。カオス系列は確率的な振舞をし、用いる写像などに依存して、様々な性質を有するので、その統計的性質が理論的に解析可能であること、および所望の性質をもつ系列が設計可能であることが非常に重要である。

非同期 CDMA 通信において、適切な負の自己相関特性をもつスペクトル拡散符号を用いると、従来の拡散符号よりもビット誤り率が低減できることが Rovatti & Mazzini によって 1998 年に理論的に明らかにされた。また、彼らは、負の自己相関をもつ具体的なカオス系列の生成法も与えていた。本研究代表者も、独自の手法で負 (あるいは正) の自己相関をもつカオス 2 値系列および  $p$  値系列の設計法を与えており、さらにこのカオス理論を従来の符号生成器である線形 / 非線形フィードバックシフトレジスタへ適用することにより、従来よりも性能の高い符号が生成可能であることを明らかにした。

### 2. 研究の目的

本研究代表者は、従来の LFSR およびこれを非線形に一般化した非線形フィードバックシフトレジスタ (NFSR) がカオス写像として有名なベルヌイ写像の近似の一つであると見なすこと出来ることに着目し、ベルヌイ写像から CDMA で有用な負の自己相関をもつカオス 2 値系列を生成する方法を理論的に与え、写像の近似である LFSR/NFSR に簡素な回路を付け加えることで、負の自己相関をもつ周期 2 値系列が生成可能であり、これが従来符号よりも低いビット誤り率を達成できることを明らかにした。

本研究では、上述のこれまでの成果、すなわち、カオス理論に基づいた符号設計が LFSR/NFSR に基づいた符号設計にも有効であることを活かし、CDMA 通信技術を利用した可視光通信・超音波測位システムにおいて有用な符号生成器の実現を目的とする。具体的には以下の課題に取り組む。

- (1) カオス理論に基づいて設計された符号を LFSR および NFSR により実現し、生成される符号の性質（自己 / 相互相関特性など）を明らかにする。
- (2) 設計した符号の可視光通信および超音波測位における性能（ビット誤り率や測位精度など）をシミュレーションにより評価する。
- (3) CDMA 技術を利用した可視光通信や超音波測位において求められる符号特性を検討し、その結果に基づいて最適な符号を再設計し、評価する。

### 3. 研究の方法

LFSR/NFSR に基づいて、非同期 DS/CDMA 通信で有用な負の自己相関特性をもつ周期系列を生成する方法は、例えば図 1 に示すように、LFSR/NFSR のレジスタの上位 3 段分を入力とした組合せ論理回路を付加することにより生成可能である。ここで、LFSR/NFSR がカオス写像の 1 つであるベルヌイ写像の有限精度による実現であることに基づき、カオス理論によって導出した 2 値関数から、付加する組合せ論理回路を設計することができる。LFSR/NFSR に基づいて構成したいいくつかの生成器について、負相関係列が生成可能であること、および非同期 CDMA 通信において従来の Gold 符号よりも低いビット誤り率を達成することを既に確認している。

また、電波を用いた CDMA 通信における 2 値の拡散符号は、通常 1 と -1 の信号を用いるバイポーラ符号であるが、光通信においては、光の点滅により通信を行うため、1 と 0 のユニポーラ符号として利用する必要がある。光 CDMA 用の拡散符号として光直交符号 (Optical Orthogonal Code; OOC) がよく知られているが、同時利用者数が増加すると、各ユーザの拡散符号間の“1 の衝突”による相互干渉によってビット誤り率が大きくなるという問題があった。そこで、ユニポーラ符号を用いた光 CDMA 通信方式として、バイポーラ符号の相関特性を活かせる SIK (Sequence Inversion Keyed) 方式を採用することにより、バイポーラ符号による非同期 CDMA 通信と同様、負の自己相関をもつスペクトル拡散符号を用いることで、ビット誤り率が低減可能であることを明らかにした。

以上の研究成果を踏まえ、本研究では以下の検討を行なう。

#### (1) 符号設計・可視光通信シミュレーション

(1-1) 1 つの M 系列から 30 個の 2 値関数（論理関数）を用いることで、30 種類の負相関係列を生成可能であることを明らかにした。この 30 個の 2 値関数は M 系列を生成する LFSR の上位 4 ビットを用いて 4 入力 1 出力の論理関数として構成される。これらは Gold 系列や NFSR にも応用可能である。さらに多くの負相関係列を生成できるかどうかをカオス理論に基づいて検討し、上位 4 ビットを 5 ビット以上に拡張することも検討する。

(1-2) 設計した符号を用いて、CDMA 技術を利用した可視光通信のシミュレーションを行い、設計した符号の評価を行う。本研究で採用する SIK 方式では、送信する情報ビットが“1”の場合はスペクトル拡散符号をそのまま送信し、情報ビットが“0”の場合はスペクトル拡散符号の 1 と 0 を反転させた符号を送信する。受信側ではバイポーラ符号による相関受信を行うことで、バイポーラ CDMA と同様、負相関スペクトル拡散符号によるビット誤り率低減が可能である。複数の光源（照明）から、ランダムなタイミングで情報が送信される場合（図 2 参照）、非同期 CDMA 通信となり、負相関係列が有用であると考えられる。それまでに設計した負相関係列を用いた SIK 方式非同期光 CDMA 通信のシミュレーションを行い、ビット誤り率やハードウェア性能の面から、どの符号が優れているかの検討を行う。

(1-3) 同一の照明から複数の情報ビットを並列に送信する場合を想定すると、これは同期 CDMA 通信となり、同期状態での符号間干渉が 0 にできる直交符号の利用が有用である。ここで、そのような照明が複数あり、同一の照明から送信される情報は同期しているが、異なる照明間では同期していない場合（図 2 参

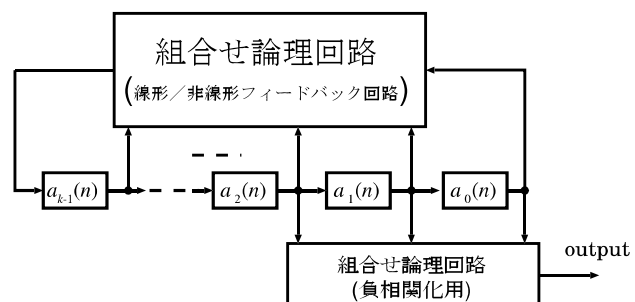


図 1: 非線形フィードバックレジスタ (NFSR)

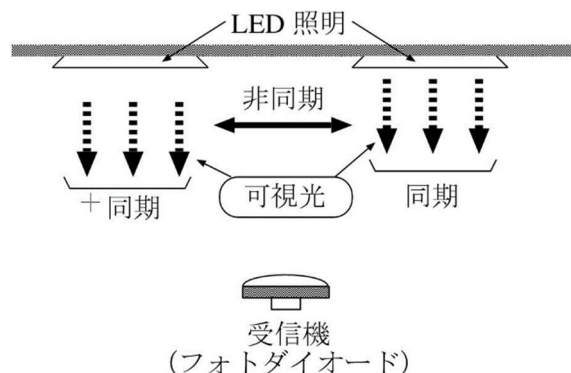


図 2: LED 照明を利用した可視光通信の例

照), 他の照明の送信信号からの干渉を非同期に受けることになる。この場合は, やはり非同期 CDMA の状態となるため, 負相関係列が有用と考えられる。しかしながら, 適切な負の自己相関をもち, かつ直交する符号は, 現在の所, 極めて少数しか知られておらず, そのような特性をもつ符号設計を試みる。その結果, 十分な符号数が得られた場合, その有効性をシミュレーションにより確認する。十分な符号数が確保できない場合は, 同一照明内で有効な直交性と, 異なる照明間で有効な負相関性のどちらをどの程度優先すれば, 全体としての性能が最適化されるかの検討も行う。

## (2) 超音波測位用スペクトル拡散符号

図 3 にスペクトル拡散 CDMA 方式を利用した測位システム概念図を示す。ここでは, ある移動体が 4 つの固定局(固定局同士は有線ネットワーク等で繋がっているものとする)と通信することで, 各固定局との距離を測り, 移動体が自分の位置を計算する。固定局は自身に割り当てられた符号をスペクトル拡散方式で送信し(全ての固定局が同期しているものとする), 移動体が各固定局からの信号をスペクトル拡散復調し, 信号の到着時間の差(TDOA: Time Difference of Arrival)を利用して, 移動体自身の位置を計算する。具体的には, 以下を検討する。

各固定局が自身の符号を超音波として送信するが, 最も単純な方法はオンオフキーイングと呼ばれる方式で, これは, 符号が“1”の場合は超音波の正弦波信号を発信し, 符号が“0”の場合は何も発信しない方式である。すなわち, 光通信のオンオフと同様の方式であり, 可視光通信で採用した SIK 方式を用いることができる。ただし, 測位の場合は, 各固定局からの信号を「捉える」すなわち同期点検出能力が重要であり, 用いる符号の非周期相関関数が重要となるため, 通常の情報通信とは異なる符号特性が求められると考えられる。そこで, 様々な特性の符号を用いた測位シミュレーションを行い, どのような符号特性が有効であるかを検討する。また, その結果に基づいた符号設計を行う。

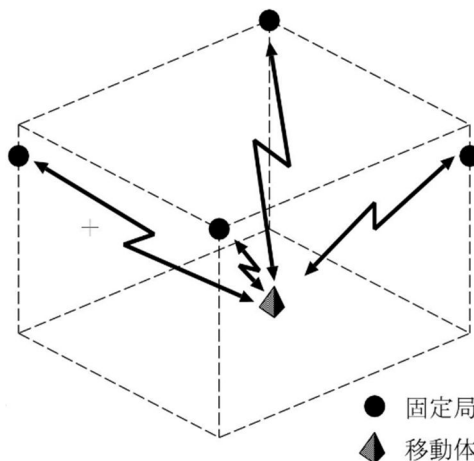


図 3: 屋内測位システム

## 4. 研究成果

### (1) 符号設計・可視光通信シミュレーション

(1-1) ベルヌイ写像と 2 値関数を用いて生成されるカオス 2 値系列の自己相関関数の理論的解析について, これまで実数区間 $[0, 1]$ を 8 等分割した部分区間に基づいた 2 値関数が考えられていたが, これを 2 の  $m$  乗個の部分区間に基づいた 2 値関数へ一般化した。その結果,  $m$  を大きくすることで, CDMA 通信に有用な負相関スペクトル拡散符号がより多く生成できることを明らかにした。

(1-2) LFSR/NFSR の上位 4 ビットを用いて 4 入力 1 出力の論理関数として構成されるもので, さらに多くの負相関係列を生成できるかどうかをカオス理論に基づいて検討したところ, 合計 396 個の 2 値関数が存在することを明らかにした。これらは Gold 系列にも応用可能である。

(1-3) NFSR から生成されるスペクトル拡散符号を用いて, CDMA 技術を利用した可視光通信のシミュレーションを行った。ここで, 一人のユーザが複数のスペクトル拡散符号を用いて複数ビットを同時送信する CDMA 方式を想定し, これに適した負相関直交符号(負の自己相関をもち互いに直交する符号)を構成し, シミュレーションによりそのビット誤り率特性を評価した。また, 負相関をもつ非直交符号, 無相関の直交符号, 無相関の非直交符号を用いた場合の結果と

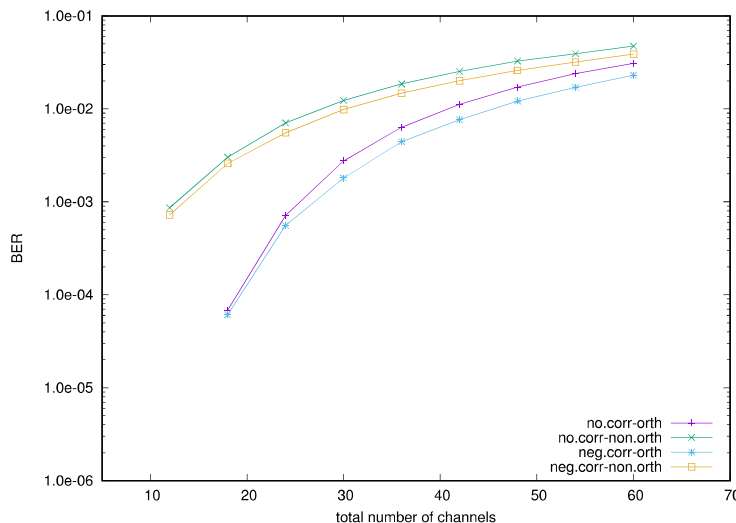


図 4: 光 CDMA シミュレーション結果 (BER 特性)



の比較検討も行き、負相関をもち、かつ互いに直交する系列の特性を活かした光 CDMA 通信が可能であることを明らかにした (図 4 参照)。

(1-4) 負相関直交系列が有効であることが明らかになったので、そのような符号を多数生成するために、実数区間 $[0, 1]$ を 16 等分した部分区間に基づいた 2 値関数について検討し、6 つの互いに直交する負相関スペクトル拡散符号が生成できること明らかにした。また得られた符号を用いて、可視光 CDMA 通信のシミュレーションを行い、そのような負相関直交スペクトル拡散符号が有効であることを明らかにした (図 4 参照)。

## (2) 超音波測位用スペクトル拡散符号

(2-1) 測位用スペクトル拡散符号としては、その非周期相関特性が重要であり、優れた非周期自己相関特性をもつ符号として Barker 系列が知られている。しかし、Barker 系列は、系列長が 2 ~ 13 に限られ、全部で 9 つしか存在せず、系列長 5 以上では、各系列長で 1 つずつしか存在しないため CDMA には適さない。そこで非線形フィードバックシフトレジスタ (NFSR) から生成される最大周期系列と Barker 系列を用いた接続符号を構成し、その非周期自己相関特性を調べた。その結果、Barker 系列の特徴が活かされ、NFSR 系列単体で使用するよりも、良好な非周期自己相関特性をもつことが明らかになった。

(2-2) 優れた非周期自己相関特性をもつ Barker 系列は、系列長 2 ~ 13 が存在するが、これらと非線形フィードバックシフトレジスタ (NFSR) から生成される最大周期系列を組み合わせた接続符号を構成し、その非周期自己相関特性を調べた。また、NFSR 系列については、強い負の相関をもつものについても検討した。その結果、Barker 系列の特徴や NFSR 系列の負相関性を活かした、鋭い自己相関のピークをもつ系列が得られることが明らかになった (図 5 参照)。

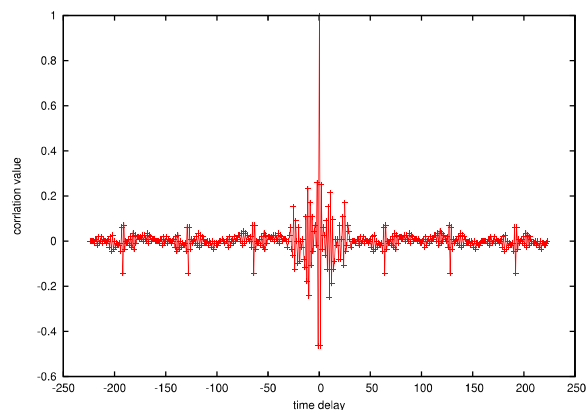


図 5: 提案符号の非周期自己相関関数

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 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tin Ni Ni Kyaw, Akio Tsuneda	4. 巻 vol.E100-A, no.4
2. 論文標題 New Binary Functions for Generating Spreading Codes with Negative Auto-Correlation for Asynchronous DS/CDMA Using Bernoulli Chaotic Map	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Fundamentals	6. 最初と最後の頁 961-964
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.E100.A.961	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 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Akio Tsuneda
2. 発表標題 Study on Spreading Codes with Negative Auto Correlation for SIK Optical CDMA Communications
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 Taku Yoshioka, Akio Tsuneda
2. 発表標題 Study on Optical CDMA Communications Using Orthogonal Codes with Negative Auto-Correlation
3. 学会等名 International Conference on ICT Convergence 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shota Matsuyuki and Akio Tsuneda
2. 発表標題 A Study on Aperiodic Auto-Correlation Properties of Concatenated Codes by Barker Sequences and NFSR Sequences
3. 学会等名 International Conference on ICT Convergence 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Tsuruda, Akio Tsuneda
2. 発表標題 Study on Error-Correcting Using Output Level of Correlation Receivers and Hamming Codes in CDMA Communications
3. 学会等名 International Conference on ICT Convergence 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉岡 拓, 常田明夫
2. 発表標題 光CDMA通信に適した負相関直交符号の構成と性能評価
3. 学会等名 第26回電子情報通信学会九州支部学生会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鶴田勇介, 常田明夫
2. 発表標題 CDMA通信における相関受信機出力レベルとハミング符号を利用した誤り訂正の一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松雪翔太, 常田明夫
2. 発表標題 Barker系列とNFSR系列による連接符号の非周期自己相関特性について
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuya Tsubone and Akio Tsuneda
2. 発表標題 Acquisition Performance of Spreading Codes for CDMA-based Local Positioning Systems under Doppler Effect
3. 学会等名 International Conference on ICT Convergence 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tin Ni Ni Kyaw and Akio Tsuneda
2. 発表標題 New Sets of Binary Functions for Generating Orthogonal Codes with Negative Auto-Correlation Based on Bernoulli Chaotic Map
3. 学会等名 International Conference on ICT Convergence 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 住本尚史, 常田明夫
2. 発表標題 CDMA通信における相関受信機出力レベルとハミング符号を利用した誤り訂正
3. 学会等名 第24回電子情報通信学会九州支部学生会講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 吉牟田京介, 常田明夫
2. 発表標題 負相関をもつ直交符号を利用したCDMA通信の一検討
3. 学会等名 第24回電子情報通信学会九州支部学生会講演会
4. 発表年 2016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
研究協力者	Tin Ni Ni Kyaw (Tin Ni Ni Kyaw)	熊本大学・大学院自然科学研究科・博士後期課程学生  (17401)	
研究協力者	坪根 和哉 (TSUBONE Kazuya)	熊本大学・大学院自然科学研究科・博士前期課程学生  (17401)	
研究協力者	鶴田 勇介 (TSURUDA Yusuke)	熊本大学・大学院自然科学研究科・博士前期課程学生  (17401)	
研究協力者	松雪 翔太 (MATSUYUKI Shota)	熊本大学・大学院自然科学研究科・博士前期課程学生  (17401)	
研究協力者	住本 尚史 (SUMIMOTO Takafumi)	熊本大学・工学部・学生  (17401)	
研究協力者	吉牟田 京介 (YOSHIMUTA Kyosuke)	熊本大学・工学部・学生  (17401)	
研究協力者	吉岡 拓 (YOSHIOKA Taku)	熊本大学・大学院自然科学教育部・博士前期課程学生  (17401)	