

令和元年6月27日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05281

研究課題名(和文) 多次元化と構造化による新規系列の生成法とその数理と応用

研究課題名(英文) Novel Construction Scheme of High-Dimensional Sequence having Particular Structures

研究代表者

林 隆史 (Hayashi, Takafumi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：20218580

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：相関関数の値がある範囲で零となるZCZ系列セットについて、新規生成法の開発や応用システムの検討を行った。研究代表者らが発見した、異なる系列サブセットに属する系列間の相関関数が零となる範囲が、同一サブセットに属する系列間の相関関数よりも広いZCZ系列は、それ以前のものに比べて応用上有用であるものの、より性能の高い応用システムには、相関範囲の広さをより精密に制御できることが必要であった。本研究課題では、系列セットの系列メンバにインデックスをわりふり、系列ペアのインデックスの組に応じてその零相関範囲を制御できる方法を検討し、数種類の方法を発見した。また、それらの応用システムの検討も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

相関関数の値がある位相差範囲で零となるZCZ系列セットを何等かの応用システムで用いる場合、従来のZCZ系列セットでは、系列セットペアの組み合わせによって、系統的に零相関となる位相差を制御することが困難であった。応用システムでは、システムで用いるセンサーや、無線ノードの組合せによって必要な零相関範囲が異なる。本研究課題では、ZCZ系列にサブセットをもたせ、異なるサブセットにそれぞれ属する系列ペアの相関関数について、サブセットの組み合わせによって零相関範囲を制御有する方法を複数発見した。これによって、ZCZ系列セットそのものと、ZCZ系列セットの応用の両方において新たな道を拓くことができた。

研究成果の概要(英文)：We have investigated schemes for novel construction schemes of sequence sets having a zero-correlation zone, so-called ZCZ sequence sets consisting of subsets. The correlation function of the sequences pair of different subsets has a ZCZ with a greater width than that of the correlation function of sequences of the same subset. The width of the ZCZ of the inter-subset is designed with a particular structure as follows; 1) The subsets of sequence set can be associated with a perfect binary tree. For a longer distance between the corresponding leaves to the sequences pair, the ZCZ is wider. 2) The subsets of the proposed sequence set can be associated with a perfect quad-tree. 3) The width of the ZCZ between a sequence of the j -th subset and one of the k -th subset of the proposed sequence sets is almost proportional to the $|j-k|$. We have evaluated the performance of several applications, including wireless communications, ultrasonic imaging, and visible secret sharing.

研究分野：応用数理

キーワード：系列設計 離散数学 計測工学 無線通信

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究は相関関数の値がある範囲で零となる“零相関範囲系列”(ZCZ 系列)を用いて従来方法では不可能であったような計測や通信法を提案するとともに、全く新しい概念に基づいた ZCZ 系列生成法を開発するものである。本研究構想では、新しく提案する物理計測方法や通信システムを実現するために、研究代表者が考案した ZCZ 系列の新しい応用システムの提案とその評価を行う。3次元に配置された発信源・受信器を用いる合成開口イメージング(超音波及び電波)次世代(第5世代)の携帯電話のクラウドを使った無線システム(CRAN)への応用、可視光無線への応用、ロバスト Massive MIMO などの開発/提案を行う。本課題で、提案する新しい物性計測法は、新たな物性研究へ大きな貢献が期待できる。本研究で扱う零相関範囲系列とは、長さ L の系列 N 本から構成され、 N 本の系列は $n(\geq 2)$ 個のサブセットに分割することができる。

1) 系列の自己相関関数が、位相差 θ_j が $0 < \theta_j < 2\pi$ となる範囲(零相関範囲)で、値 0 をとる。

2) 任意の系列ペアの相互相関関数が、 $0 < \theta_j < 2\pi$ で、値 0 をとる。

3) 異なるサブセットに属する系列ペアの相互相関関数が、 $0 < |\theta_j| < 2\pi$ で、値 0 をとる。 $(z > 2)$ という性質を有したものである。

従来の ZCZ 系列セットは、 $n=1$ でサブセットを考慮していない。以下、零相関範囲系列(Zero Correlation Zone Sequence)を、ZCZ 系列、異なるサブセットに属する系列ペアの相互相関関数をサブセット間相関関数とそれぞれ略す。ZCZ 系列の応用対象の一つである携帯電話では、セルとよばれる範囲内で、基地局と電話器が通信する。隣接するセルからの電波は、通信の妨げとなる。同一セル内に比べて、異なるセル間は距離が長いので、より長く時間がずれて電波信号が届く。ZCZ 系列を用いた携帯電話では、零相関範囲で、時刻がずれて届いた電波信号を識別するため、サブセットをもった ZCZ 系列が必要となる。この 1 次元系列を 2 次元以上に拡張したものと、その他関連する系列を高次元化したものが本研究の対象である。本研究での“多次元化”は、単に 1 次元系列をかけあわせるようなものではなく、それぞれの系列専用の新しい構成方法で、新しい系列生成法を開発するものである。例えば、我々が発見した特別な形の零相関範囲をもつことで、他よりも広範囲の零相関関数をもつ系列は、1 次元系列からは生成できない。

2. 研究の目的

本研究は、

1) サブセット間相関関数が長い零相関範囲(長いサブセット間 ZCZ)を有する($n > 1; z > 2$) となる系列([2] 他)。

2) 一本の系列の中に数理的に特別な構造(部分系列)をもつ ZCZ 系列([4] 他)。

3) 系列の一部に極少数の 0 を挟み込むことで、周期的系列としても有限長系列としても零相関範囲をもつ系列([3] 他)などを発表してきた。これらの研究成果から、単に系列そのものや系列のセットに構造を持たせるのではなく、“構造化”という新しい視点でどのような構造を持たせるとどのような性質をもった系列を生成できるかを研究することが、理論的にも応用面でも重要であることに着目したのが本研究である。

“高次元化”については、これまでの我々の 2-3 次元の ZCZ 系列、擬似白色雑音系列の生成方法や数理的性質の研究と、後述する有限幾何学で見られる次元依存性の存在が本研究の動機となっている。また、系列に特別な構造をもたせる“系列の構造化”は、系列設計の自由度のあがる高次元系列でこそ、新しい性質をもった系列やより高い性能をもった系列の実現性は高くなることも考慮した。2 次元以上の ZCZ 系列についての研究例は 1 次元系列に比べて極端に少ない。その中で、我々は様々な系列生成方法を提案してきたので、その成果を本研究で活用する。

本研究では、新しい系列生成法とその数理と、系列の新しい応用を扱う。

(a) 新しい ZCZ 系列について、以下の 3 項目を本研究で明らかにする。

1) 【長い ZCZ を持つ系列】互いに直交する長さ L は L 本位下であるため、ZCZ 系列には、 $L(N-1)$ という理論的制約がある。サブセットを持つことで、同一サブセット内または異なるサブセットに属する系列間の相関関数の零相関範囲が、系列セット全体の零相関範囲よりも長くなるような 2-3 次元 ZCZ 系列セットの検討。

2) 【サブセット間距離に比例したサブセット間 ZCZ を持つ系列】サブセット間に“距離”に該当する概念を導入し、より遠いサブセット間では、サブセット間 ZCZ が長くなるような系列セットの検討。サブセット $\{s_0; s_1; s_2; s_3\}$ について、添字の差を 4 の剰余を距離とすると、 s_1 と s_2 の距離は 1、 s_1 と s_3 の距離は 2 となる。

3) 【一部のサブセットについて特別な性質を有する系列】一部のサブセットに属する系列について、その相関関数が特別な性質をもち、何らかの応用に役立てることができる系列生成法の検討。本研究で開発する系列セットの有効性を証明するために、系列の応用システムの性能を応用システムのシミュレーションや実証システムの試作・実験によって評価する。また、得られた系列の数理的性質を理論的に明らかにし、論文等に発表する。

(b) 新しい応用システムの提案・開発については、本研究で開発した ZCZ 系列を用いた計測システムや音声・画像への暗号組み込み応用を中心にの開発を行い、シミュレーションなどによ

ってその評価を行う。多次元系列のフーリエ特性についての理論的検討は分担者（前田）が、秘密分散については、分担者（渡辺）が担当する。ZCZ 系列研究の多くは無線などの通信に限定されているが、幅広い応用を扱っている点にも、本研究の独自性がある。開発したシステムは、それを利用しそうな学会や産業界、社会に広く提案していく。

本研究で扱う”長いサブセット間 ZCZ を有する ZCZ 系列”などの構造化 ZCZ 系列の研究はまだ研究代表者を含めてごくわずかし報告が無い。さらに、高次元で構造を持つ系列は皆無といってよい。そのため、本研究課題の成果は、学術的に大きな貢献が期待できる。さらに本研究課題ではニーズのある実システムへの応用を検討しているため、社会への貢献もできると考えている。全く新しい概念の系列セット生成方法の開発は、その対象自体に独創性がある。本研究では、さらに、従来存在しなかった、リアルタイム複数点観測光散乱をはじめとした、独創的な応用の提案を行う。本研究課題で扱う応用システムは、例えば、従来は観測できなかったような物理現象を観測できるようになるなど、学術にも、産業界や社会にも貢献できると考える。2次元以上の系列については、次元に依存した数理は従来研究されてこなかった。M 系列などと密接な関係のある有限体については、次元によって異なるふるまいをするものがある。例えば、有限射影幾何では、直線を巡回的にもれなく生成できるが、その周期が奇数次元と偶数次元で異なっていることが知られている。本研究では、いくつかの系列について、次元に依存した数理的性質について理論的研究を行う点が本研究の特色であり、その成果は系列設計だけでなく、離散数学やその応用に寄与できるものと考えている。

3. 研究の方法

本研究は、(a) 新しい ZCZ 系列セットの開発と (b) ZCZ 系列を用いた新しい応用の開発を行う。

研究で用いる主な方法

(a) 構造化と高次元化による新規 ZCZ 系列の開発

1) 【系列生成方法の発見・開発】既存の系列の数理的性質や、組合せ理論を含む離散数学の理論等を用いて目的とする ZCZ 系列を生成できる方法を発見する。

2) 【新しい系列の性能、性質】新しく発見した系列生成方法の有効性を確かめるために、得られる系列の数理的性質の理論的検討と、応用システムの性能評価を行う。

研究代表者と分担者が共同して検討を行う。

(b) 新しい応用システムの提案・開発

1) 2次元系列または3次元系列を用いて、ZCZ 系列入射レーザー光の制御に用いた複数点同時光散乱解析システム、2) 通信局ないしはアクセスポイントを中心に形成されるセルごとに、サブセットを割り当てることによって、セル内よりも時刻がずれて受信されるセル外の通信データをより効果的に除去できるようになる無線システム、3) 2次元系列の Multi Input Multi Output (MIMO) や Massive MIMO への応用システム、4) 系列を用いて、時間変化するパターンを対象物に投射し、それを用いて位置合せと距離測定を行うシステム、5) 暗号を組み込んだ音声信号や画像から暗号化データを取り出すための新しい同期・位置合わせ方法の開発を検討する。

4. 研究成果

3年間の研究の中で、複数種類の新たな系列生成方法を発見・開発し、それらについて理論的検討と応用方法の検討を行った。得られた結果は、学術雑誌、国際学会などで発表を行った。

2016年度の主な成果：

2016年度は、検討開始初期に、構造を持った系列セットの新規構成方法についていくつかの発見をすることができた。そこで、平成28年度は、本課題のうち、構造を持った系列セットの検討を重点的に行った。

構造化零相関範囲系列セットの一つとして、二分木に対応付けできる系列セットの構成方法を発見した。この系列セットは3値（ ± 1 と0）系列で構成され、 n 次のアダマール行列から生成され、非負整数のパラメータ m に対して、長さ $n^{\{4m\}} + 2^{\{m+1\}} (2^m - 1)$ の系列を n^{2^m} 本の系列をもつ。系列セットは、 2^{2^m} 本の系列からなるサブセットを n 個している。系列セット全体としての零相関範囲は $2^{2^m - 1}$ である。長さ $n^{\{4m\}} + 2^{\{m+1\}} (2^m - 1)$ あたりの非零要素の数は $n^{\{4m\}}$ で、非零要素の割合は常に $n/(n+2)$ より大きい。 n 個のサブセットは、深さ n の完全二分木の葉に対応づけることができる。サブセット間距離をこの系列長に等しいものと定義することができる。異なるサブセットに属する系列間の零相関範囲は、それぞれの系列が属するサブセット間の距離にほぼ比例した零相関範囲を有する。この性質を使うことで、従来よりも高い性能をもった合成開口イメージングや通信が可能になる。超音波イメージングへの応用では、超音波トランスデューサーの配置を工夫し、トランスデューサー間の距離の長短が、それぞれのトランスデューサーで用いる系列の属する系列サブセット間の距離の長短と一致するようにすることで、従来の零相関範囲系列セットの応用よりもクリアなイメージを得ることができた。現在その応用についての検討を進めている。さらに、系列構成法を改良して4分木

に対応するものを発見し、その性質や応用についての検討を開始した。2次元の2値(±1)の零相関範囲系列を用いた物性測定についての新しい方法についての検討を行い、いくつかの知見を得ることができた。この点についての検討を継続する。平成28年度は、当初計画になかった機械学習を用いた系列探索とパターン認識への系列の応用の検討を開始した。

2017年度の主な成果

2017年度は前年度までの研究内容を拡張し、新規構造化零相関範囲系列セットのとして、新たに、1) 剰余系に対応付けできる系列セット 2) 4分木に対応付けできる系列セットの構成方法を発見した。1)の系列セットn次のアダマール行列と長さ ℓ の完全系列から生成される。非負のパラメータ m に対して、 $2^m 2^{(n+1)\ell}$ の長さの系列が $2n\ell$ 本生成される。系列セット全体の零相関範囲は 2^{m-1} で、 ℓ 個のサブセットを持つ。j番目とk番目のサブセット系列間の零相関範囲は、 $2^{\lfloor m+1 \rfloor \ell |j-k|}$ で、異なるサブセットに属する系列間の零相関範囲は全体のそれに比べて広い。4分木に対応した系列セットは、長さnのアダマール行列から生成され、非負パラメータ m に対して、 $4(8^m(\ell+1) + 2^m(4^m-1)/3)$ の長さの系列 $2^{2m+1}n$ 本からなり、全体の零相関範囲は 2^{m-1} で、 4^m のサブセットを持つ。それぞれのサブセットは高さmの完全4分木の葉に対応づけることができ、j,k番目の葉に対応付けされるサブセットに属する系列間の零相関範囲は4分木の葉の間のパスの長さに比例する。これらの系列は前述の性質を使うことで、従来よりも高い性能をもった合成開口イメージングや通信が可能になる。超音波イメージングへの応用では、超音波トランスデューサーの配置を工夫し、トランスデューサー間の距離の長短が、それぞれのトランスデューサーで用いる系列の属する系列サブセット間の距離の長短と一致するようにすることで、従来の零相関範囲系列セットの応用よりもクリアなイメージを得ることができた。現在それらの新たな応用についての検討を進めている。系列生成法については8分木に対応した系列セットや必要とされる性能に応じたオーダーメード系列の生成法の検討を開始した。ZCZ系列の応用としてZCZ系列とスパースモデリングを用いた通信・計測システムのための検討として、辞書学習の検討を行い、いくつかの新たな発見を論文で発表した。

2018年度の主な成果

2018年度は複数の系列からなる系列セットでそのセットに属する系列の自己相関のサイドローブと任意の系列ペアの相互相関がある位相差範囲で0に等しくなる零相関範囲系列セットを対象としている。相関関数が0となる位相差範囲を零相関範囲と呼び、系列セットがサブセットをもち、異なるサブセットに属する系列ペアの相関関数が同一サブセットに属する系列ペアよりも長い零相関範囲を持ち、その零相関範囲が何等かの数理構造に対応して変わるものが「構造化零相関範囲系列セット」であり、その新規系列生成方法の発見・開発と応用の検討が本研究である。平成18年度は、系列セットの各系列を完全4分木の葉に対応づけできるものの構造的生成方法を発見した。この系列セットは3値(±1と0)系列で構成され、n次のアダマール行列から生成され、非負整数のパラメータ m に対して、長さ $8(8^m(n+1) + 2^m(4^m-1)/3)$ 系列 n 本からなるサブセットを 4^m 個有する。系列セット全体としての零相関範囲は 2^{m-1} である。長さあたりの非零要素の割合は常に $n/(n+(4/3))$ より大きい。n個のサブセットは、深さnの完全四分木の葉に対応づけることができる。系列ペアのそれぞれに対応づけした葉の間の経路長で系列ペアの距離と定義すると、異なるサブセットに属する系列間の零相関範囲は、それぞれの系列が属するサブセット間の距離にほぼ比例した零相関範囲を有する。4分木の葉に対応づけることで、超音波トランスデューサーや無線基地局の2次元配置に合わせてサブセットを振り分けて、従来よりも高いS/Nをもった合成開口イメージングや障害に強い通信が可能になることを示した。上記の完全4分木を完全8分木に対応させることのできる系列の構成方法も発見した。8分木を使うことで応用で用いる信号発信・受信機を3次元配置に対して適切な系列をわり分けることができるようになる。また、ZCZ系列の応用として、マルチユーザ可視光通信の研究を行い、いくつかの成果をあげることができた。その一部は査読付き論文で発表した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 7 件)

Thanh V. Pham, Takafumi Hayashi and Anh T. Pham, "Artificial-Noise-Aided Precoding Design for Multi-User Visible Light Communication Channels," in IEEE Access. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2889119

Takafumi Hayashi, Takao Maeda, Anh T. Pham Shinya Matsufuji, "A Novel Class of Structured Zero-Correlation Zone Sequence Sets," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E100-A, No.10, pp.953-960, Oct. 2017, DOI: 10.4236/ait.2017.74009

Takafumi Hayashi, Yodai Watanabe, Takao Maeda, Shinya Matsufuji, "A Novel Construction of Tree-Structured Zero-Correlation Zone Sequence Sets," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E100-A, No.10, pp.953-960, Oct. 2017, DOI: 10.4236/ait.2017.74009

Takafumi Hayashi, Yodai Watanabe, Toshiaki Miyazaki, Anh Pham, Takao Maeda, Shinya Matsufuji, "A Novel Class of Quadriphase Zero-Correlation Zone Sequence Sets," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E100-A, No.4, pp.953-960, 2017.

Zhenni Li, Shuxue Ding and Takafumi Hayashi, "Analysis Dictionary Learning using Coordinate descent with Proximal Operators," Neurocomputing, Volume 239, 24 May 2017, pp. 165-180, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2017.02.014>

Zhenni Li, Takafumi Hayashi, Shuxue Ding and Yujie Li, "Dictionary Learning with $\ell_{1/2}$ -regularizer and the Coherence Penalty and Its Convergence Analysis," International Journal of Machine Learning and Cybernetics, pp.1-14, 2017, <https://doi.org/10.1007/s13042-017-0649-9>

Zhenn Li, Shuxue Ding, Takafumi Hayashi, Yujie Li., "Incoherent dictionary learning with log-regularizer based on proximal operators," Digital Signal Processing: A Review Journal, 63, pp. 86-99. , 2017 , <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2016.12.014>

〔学会発表〕(計 2 件)

Takafumi Hayashi, Anh T. Pham, Kensaku Kawauchi, Yoshinobu Tanno, Shinya Matsufuji, Takao Maeda, "A Novel Construction of Quadtree-Structured Zero-Correlation Zone Sequence Sets," ISITA 2018, pp,476-480, Singapore, Oct., 2018,

Thanh V. Pham, Takafumi Hayashi, and Anh T. Pham. Artificial-Noise-Aided Precoding Design for Multi-User Visible Light Communication Channels, In the Proc. of the 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC'18), WS on OWC. Kansas City, USA. May, 2018.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：前田 多可雄

ローマ字氏名：Takao Maeda
所属研究機関名：会津大学
部局名：コンピュータ理工学部
職名：上級准教授
研究者番号（8桁）：00264565

研究分担者氏名：渡辺 曜大
ローマ字氏名：Yodai Watanabe
所属研究機関名：会津大学
部局名：コンピュータ理工学部
職名：上級准教授
研究者番号（8桁）：70360675

(2)研究協力者
研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

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。