

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：34406

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13845

研究課題名（和文）通信符号のための巡回差集合族の構成とその探索に関する研究

研究課題名（英文）A study on construction and search of cyclic difference families for communication codes

研究代表者

地寄 頌子（CHISAKI, Shoko）

大阪工業大学・情報科学部・講師

研究者番号：90778250

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：巡回差集合族と関連した構造を持つ組合せデザイン及び、既存デザインの応用に関する幾つかの研究を行った。完全二部グラフに関連する組合せ構造 (spanning bipartite block design) の提案と構成法の確立、及び実験計画法への応用に関する研究を行い、ブロックデザインや順序配列といった既存のデザインを用いた構成法を与えた。また、実験計画法に適用した際に見られる最適性について議論し、A-最適性、E最適性を満たす条件について示した。さらに前述の組合せ構造の先行研究であるドロップアウトデザインを用いた深層学習の計算機実験を行い、性能評価を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実験計画法とは、要因の効果を精度良く効率的に調べる統計的方法であり、通常の実験計画では処理集合とその集まりで計画を構成する。本研究では処理に構造を持っている場合を考えており、完全二部グラフの辺集合を処理集合としている。与えた完全二部グラフに関連する組合せ構造は、実験計画法に適用することでA最適計画やD最適計画を与えることができる。また、ドロップアウトデザインを用いた深層学習の実験結果は、限定的な条件下ではあるが、組合せデザインを深層学習に用いたときに現行の手法と同程度の性能が得られることを確認した点においては新規性のある試みであった。

研究成果の概要（英文）：We have studied on combinatorial designs with structures related to cyclic difference families and their applications. We proposed a new combinatorial structure related to complete bipartite graphs (called Spanning Bipartite Block Design, SBBD) and gave the construction methods using known designs such as block designs and ordered designs. We also discussed the optimality observed when SBBD is applied to experimental design, and showed the conditions for satisfying A-optimality and E-optimality. In addition, we conducted experiments on deep learning with dropout designs and evaluated the performance.

研究分野：組合せデザイン理論

キーワード：組合せデザイン 実験計画法 最適性

1. 研究開始当初の背景

近年では、通信需要が急激に高まっている。多くの利用者が複数のメディア（音声・文字・映像など）での通信を同時に、かつ、快適に行うという通信技術の発展には、より実用的な通信符号を構成することは不可欠である。区切りなし符号や光直交符号と呼ばれる符号が提案されているが、これらは組合せデザインの一つである巡回差集合族や差集合を用いて構成される。通信には符号化率やノイズといった実用上の問題点があり、それらを完全に排除することはできない。符号化率は符号を構成する際の組合せデザインのパラメータと密接に関わっている。

1958年にGolombらは任意の符号語の結合がその部分列に符号語を含まないような符号として、区切りなし符号 (comma-free code) を定義した。1971年にLevenshteinは誤りが生じることを仮定した非同期型の通信モデル内で用いるために、インデックスという概念を付加して comma-free code を拡張し、さらにそれらを構成するために、同値な構造を持つ巡回差集合族として Difference System of Sets (DSS) を提案した。

DSSは comma-free code を構成するために提案された組合せデザインであるが、ある条件を満たすとき、splitting ありの最適な認証符号と同値になることが知られている。これは splitting BIBD という組合せデザインの一つとも同値な構造を持つ問題である。また、その他の巡回差集合族である difference family は特定のパラメータを持つとき、最適な光直交符号を構成することが知られている。さらに difference family の条件を緩和した difference packing の存在は周波数ホッピング系列の構成と同値な問題である。周波数ホッピング系列は Bluetooth などの周波数を切り替えながら通信を行う方式に利用される。このような背景から、巡回差集合族並びに、その周辺の組合せ構造について研究することは通信・認証といった様々な方面への発展に寄与し得るものであると考えられる。

また、前述した DSS の構造は多重完全グラフの多部グラフへの分割問題と同値であるため、グラフの分割問題からその構成へとアプローチすることができる。これは研究代表者がこれまでに研究してきた、深層学習に用いるための組合せ構造であるドロップアウトデザインと類似する部分が多く、それらの研究をより発展させることが巡回差集合族の構成を考える上で有用であると考えた。

2. 研究の目的

研究背景を踏まえ、以下の項目を本研究の目的とする。

(1) 新たな組合せ構造 (spanning bipartite block design (SBBD)) を提案し、その構成法について明らかにする。SBBD は完全二部グラフからある条件を満たす部分グラフの集合を選ぶ組合せデザインであり、完全二部グラフの辺を実験計画の処理集合とみなし、辺に対応している重みや流量のパラメータをより精度良く推定する統計モデルを与える。

(2) SBBD を用いた統計モデルを与え、実験を行うとともにその最適性についての議論を行う。

(3) 深層学習に用いられるドロップアウトデザインの構成法の提案とその有用性に関する実証実験を行う。

3. 研究の方法

(1) SBBD の定義として 5 つの条件を定め、既存の組合せデザイン ((r, λ) -design や ordered design, difference matrix など) を用いた構成法を示す。

(2) SBBD は会合数に関して 4 つのパラメータを持つ組合せ構造であり、それを用いた統計モデルにおける情報行列の対角・非対角小行列のそれぞれ対角・非対角要素に 4 つのパラメータが現れる。 (r, λ) -design から得られる計画行列を用いた場合、その情報行列は対角・非対角要素にパラメータが分かれる完全対称構造を持つことが知られているが、SBBD ではそれがさらに小行列ごとに分かれる二重完全対称となる。この性質を利用し、情報行列の固有値を計算することで A-最適性を満たすことを示す。

(3) ドロップアウトデザインとドロップアウト法それぞれの方法で正規化を行った多層ニューラルネットワークの全結合層に対して、訓練時の性能及びテストデータ使用時の汎化性能を評価する。実験では画像分類問題を扱うこととし、データセットは CIFAR-10 を使用する。使用するドロップアウトデザインは、アフィン幾何から構成される組合せ構造を用いる。これは連続する 2 層に出現する 3 つのノードの会合数が一定となるものである。

4. 研究成果

(1) 完全二部グラフ K_{v_1, v_2} の二つの頂点集合を V_1, V_2 とし、次の 5 つの条件を満たす部分グラ

フの集合 $\mathcal{B} = \{B_1, B_2, \dots, B_N\}$ を *spanning bipartite block design* (SBBB) と定義する.

- \mathcal{B} のどの部分グラフ B_i も V_1, V_2 の点を全て含む.
- \mathcal{B} の中に K_{v_1, v_2} のすべての辺はちょうど μ 回ずつ現れる.
- 任意の $x_1 \in V_1, y_1, y_2 \in V_2$ ($y_1 \neq y_2$) に対して, 二つの辺 $(x_1, y_1), (x_1, y_2)$ が同時に含まれる部分グラフは \mathcal{B} 内に λ_{12} 個存在する.
- 任意の $x_1, x_2 \in V_1, (x_1 \neq x_2), y_1 \in V_2$ に対して, 二つの辺 $(x_1, y_1), (x_2, y_1)$ が同時に含まれる部分グラフは \mathcal{B} 内に λ_{21} 個存在する.
- 任意の $x_1, x_2 \in V_1, (x_1 \neq x_2)$ かつ $y_1, y_2 \in V_2$ ($y_1 \neq y_2$) に対して, 二つの辺 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ が同時に含まれる部分グラフは \mathcal{B} 内に λ_{22} 個存在する.

SBBB は 4 つのパラメータ $(\mu, \lambda_{12}, \lambda_{21}, \lambda_{22})$ を持つ組合せデザインである.

SBBB の構成法について, (r, λ) -design (または BIBD) と ordered design を用いるもの, group divisible design (GDD) と difference matrix を用いるものの 3 通りについて示した. BIBD を用いる構成法から得られる SBBB は正則な部分二部グラフの集合となるという特徴を有する. また, GDD を用いた構成法では, 巡回群上だけでなく, 一般の群上の difference matrix を用いる構成法を示した.

(2) SBBB から計画行列を構成する統計モデルを考えた時, その計画行列は variance balanced を満たすことを示した. 一般に A-最適であれば variance balanced となることが知られているが逆は示されていない. また, 実際に SBBB から計画行列を構成し, 同じサイズのランダム 0-1 行列や行・列の 1 の数に制約を与えたランダム行列との, A-最適基準値の比較を行った. その結果, SBBB から構成される計画行列が最小の A-最適基準値を持つことを確認した.

また, (1) で得られた BIBD から構成される SBBB であれば A-最適となることを証明した. GDD を用いて構成される SBBB では GDD の性質から E-最適を満たすパラメータを持つものが存在することがわかっている.

(1), (2) の結果は一部が国際論文誌 *Metrika* に掲載され, 残りは投稿中である.

(3) 画像分類問題での評価実験により, 全結合層が 2, 3, 4 層の時の汎化性能を分析した. 実験を行うニューラルネットワーク構成は MLP とし, ドロップアウトデザインとドロップアウト法はネットワークの全結合層だけに適用した. 各ネットワークの損失関数には交差エントロピーを, パラメータの更新には確率的勾配降下法 (SGD) を使用した. また, 入力層と全結合層の活性化関数は ReLU 関数とし, 出力層の活性化関数は softmax 関数とした. 実験では, 各ネットワーク構成について, 500 エポックの学習を行った. その後, テストデータに対する精度 (正解率) と, 交差エントロピーに基づく損失を評価した. 精度と損失はテストデータの正解クラスについて求めた. この実験をそれぞれのネットワーク構成について 10 回ずつ行った結果を評価した. ドロップアウト法とドロップアウトデザインの正則化効果だけを識別しやすくするため, データ拡張などの他の汎化性能を向上させる技法は使用しなかった. 実験の結果, いずれの場合についても, ドロップアウト法と同程度の汎化性能が得られた一方で, ドロップアウトデザイン固有の特徴的な結果は得られなかった. 本結果は, 限定的な条件下ではあるが, 組合せデザインを深層学習に用いたときに現行の手法と同程度の性能が得られることを確認した点においては新規性のある試みであった. 一方で, 実験計画法等で示されている組合せ構造の優位性が深層学習においては確認されなかったという点については引き続きの課題として議論・検証していきたい. 本結果はソフトウェア・シンポジウム 2022 で論文投稿及び発表を行った.

5. 主な発表論文等

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

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 熊澤 努, 地寄 頌子, 中川 智之, 室井 浩明, 渡邊 卓也 | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 深層学習における正則化へのドロップアウトデザインの適用 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 ソフトウェア・シンポジウム 2022論文集 | 6. 最初と最後の頁 1 -- 10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 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 - |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Chisaki Shoko, Fuji-Hara Ryoh, Miyamoto Nobuko | 4. 巻 89 |
| 2. 論文標題 A construction for circulant type dropout designs | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Designs, Codes and Cryptography | 6. 最初と最後の頁 1839 ~ 1852 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10623-021-00890-8 | 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 - |

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 Chisaki Shoko, Fuji-Hara Ryoh, Miyamoto Nobuko | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Optimality and constructions of spanning bipartite block designs | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 Metrika | 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) 10.1007/s00184-024-00963-3 | 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10件（うち招待講演 4件/うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 熊澤 努, 地寄 頌子, 中川 智之, 室井 浩明, 渡邊 卓也 |
| 2. 発表標題 深層学習における正則化へのドロップアウトデザインの適用 |
| 3. 学会等名 ソフトウェア・シンポジウム 2022 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 地寄 頌子, 栗木 進二, 藤原 良叔, 宮本 暢子 |
| 2. 発表標題 Optimality of spanning bipartite block designs |
| 3. 学会等名 日本数学会 2022年 秋季総合分科会 統計数学科分科会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 地寄 頌子, 栗木 進二, 藤原 良叔, 宮本 暢子 |
| 2. 発表標題 Optimality of spanning bipartite block designs II |
| 3. 学会等名 日本数学会 2023年 年会 統計数学科分科会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 地寄 頌子, 藤原 良叔, 宮本 暢子 |
| 2. 発表標題 Spanning bipartite block design とその応用 |
| 3. 学会等名 応用統計学会 2021 年 年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 地寄 頌子, 栗木 進二, 藤原 良叔, 宮本 暢子 |
| 2. 発表標題 Spanning bipartite block design と最適性 |
| 3. 学会等名 Japanese Conference on Combinatorics and its Applications 2021・離散数学とその応用研究集会 2021 ミニシンポジウム「符号・暗号・人工知能」(招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 熊澤努, 地寄頌子, 中川智之, 室井浩明, 渡邊卓也 |
| 2. 発表標題 ドロップアウトデザインの深層学習への適用と性能評価 |
| 3. 学会等名 Japanese Conference on Combinatorics and its Applications 2021・離散数学とその応用研究集会 2021 ミニシンポジウム「符号・暗号・人工知能」(招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 地寄頌子, 藤原 良叔, 宮本 暢子 |
| 2. 発表標題 A construction for spanning bipartite block designs |
| 3. 学会等名 日本数学会 2021年 秋季総合分科会 統計数学分科会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 地寄頌子 |
| 2. 発表標題 Spanning bipartite block designとその構成 |
| 3. 学会等名 代数的組合せ論セミナー (早稲田大学) (招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 地寄頌子, 藤原 良叔, 宮本 暢子 |
| 2. 発表標題 A construction of regular spanning bipartite block designs |
| 3. 学会等名 日本数学会 2023年 秋季総合分科会 統計数学分科会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 地寄 頌子 |
| 2. 発表標題 深層学習と実験計画法 |
| 3. 学会等名 研究集会「実験計画法と関連する組合せ構造および統計教育」(招待講演) |
| 4. 発表年 2023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 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|