

令和元年6月3日現在

機関番号：13903

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14267

研究課題名(和文) TDMR数理モデルに基づく2次元磁気記録信号処理技術の展開

研究課題名(英文) Expansion of signal processing for 2-dimensional magnetic recording based on TDMR model

研究代表者

和田山 正 (Wadayama, Tadashi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20275374

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)：本プロジェクトは、超高密度ハードディスクドライブ(HDD)信号処理のための通信路モデル(TDMR数理モデル)の提案とその特性評価、ならびにTDMRに適した2次元信号処理・符号化処理の開発を目指すものである。主たる研究成果は、(1) 数理TDMRモデルの提案、(2) 数理TDMRモデルにおける相互情報量評価、(3) 2次元制約符号化に関する研究成果(整数計画法に基づく符号化器・復号器の設計、グラフの支配集合分割に基づく符号化器の設計)、(4) ニューラルネットワーク学習に基づくビリーフプロパゲーション復号法の改善、である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本プロジェクトで得られたTDMRモデルは、シンプルなモデルにも関わらず実際のTDMR記録の様相をうまく掴んだモデルになっており、相互情報量の解析や信号処理方式の開発にも向いている。今後、本研究で確立したTDMRモデルに基づく研究の進展が期待される。また、2次元制約符号は、TDMRシステムの信頼性向上のための重要な方向性だと考えられており、本研究で確立した手法(整数計画法に基づく符号化器の設計、グラフの支配集合分割に基づく符号化器の設計)は今後の2次元記録の可能性を広げる貢献になっていると考えている。

研究成果の概要(英文)：The goal of the project is to establish a mathematical channel model for hard-disk systems with super high areal density and to develop 2-dimensional signal processing algorithms and coding for improving the areal density of the system. The main contribution of this project is (1) proposal of a mathematical channel model for TDMR, (2) An efficient method to evaluate the mutual information of the TDMR model, (3) A method for constructing 2D-constraint codes with integer programming, (4) An improvement of BP decoding based the deep learning tool kit.

研究分野：信号処理 記録符号化 情報理論

キーワード：ハードディスクシステム 2次元信号処理 LDPC符号 制約符号

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

### 1. 研究開始当初の背景

昨今、NAND フラッシュメモリの台頭により、フラッシュメモリと HDD の住み分けが徐々に明確になりつつある。その記録ビット単価(コストパフォーマンス)の点で HDD は現時点でも Flash を大きく凌駕しており、特にデータセンターのように大量のストレージを必要とする場面では、現在も重要な位置を占めている。過去、数十年の技術革新から、単位インチ平方あたり数テラビットの記録密度が達成されている現在においてもなお、消費電力削減の観点から HDD ドライブの単位エネルギーあたりの記録容量の向上が強く求められている。現在のハードディスク記録再生系の大きな課題は 2 次元信号処理の実現である。HDD では、磁性粒子を表面に持つ磁気メディアに対して、書き込みヘッドにより磁界を印加することにより、情報を記録する。1 ビットを記録する領域を「ビットセル」と呼び、ビットセルは複数の磁性粒子(現状では数十個のオーダー)から成る。今後の高密度化に伴い、1 ビットセル内に含まれる磁性粒子の個数は数個のオーダーまで減少することが見込まれている。このような状況において、現状の 1 次元の信号処理から複数個の読み取りヘッドからの信号を処理する 2 次元の信号処理への転換が近い将来に起こることを意味している。

### 2. 研究の目的

本プロジェクトでは、上記の状況・将来予測を踏まえて、独自の観点から高密度 HDD 信号処理のための TDMR 数理モデルにおける信号依存性雑音抑制に適した符号化処理の開発を目標とした。本プロジェクトの第一の目標は、HDD 読み書き系を数学的な取り扱いが容易な TDMR 数理モデルにモデル化する部分にある。このモデルでは、通信路において生起する加法的雑音は信号依存性の共分散行列を持つ多次元ガウス分布として表現される。この数理的単純さが、TDMR 対称相互情報量の評価や TDMR2 次元推定(検出)アルゴリズムの開発に繋がることが期待される。また、TDMR 数理モデルにおいては、隣り合うビットセルが異なる極性を取る場合を減らすことにより、信号依存性の雑音の影響を減らすことができることが分かっている。隣り合うビットセルの極性の差異を最小限にする 2 次元制約符号は、TDMR 通信路における信号依存性雑音の抑制に効果的であることが予想される。このため、2 次元制約符号の効率的符号化法についても検討課題としている。

### 3. 研究の方法

研究は TDMR 数理モデルの開発、ならびにそのモデルにおける相互情報量の計算を第一に行った(寺島 由裕, 和田山 正, ``簡易数理 TDMR モデルにおける相互情報量について'', 電気情報通信学会 総合大会, 福岡, 2016)。その結果、2 次元制約符号の利用が適切であると判断したため、当初予定よりも早めに 2 次元制約符号の研究を展開した(Yoju Fujino, Tadashi Wadayama, ``A Construction of Non-Binary WOM Codes based on Integer Programming'', International Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA), 2016)。また、LDPC 復号法として、ニューラルネットワークに基づく復号アルゴリズムの検討を開始した。TDMR にあられる非線形通信路(信号依存性雑音を含む)を取り扱うために等化と復号の一体化を目指し、その準備として、ビリーブプロパゲーションに含まれるパラメータを誤差逆伝搬法で学習するタイプの復号法の検討を行い、平成 29 年度の情報理論とその応用シンポジウムにおいてその結果を発表した。

### 4. 研究成果

本プロジェクトは、超高密度ハードディスクドライブ(HDD)信号処理のための通信路モデル(TDMR 数理モデル)の提案とその特性評価、ならびに TDMR に適した 2 次元信号処理・符号化処理の開発を目指すものである。主たる研究成果は、(1) 数理 TDMR モデルの提案・数理 TDMR モデルにおける相互情報量評価、(2) 2 次元制約符号化に関する研究成果(整数計画法に基づく符号化器・復号器の設計、グラフの支配集合分割に基づく符号化器の設計)、(3) ニューラルネットワーク学習に基づくビリーブプロパゲーション復号法の改善、である(下記の発表論文等を参照のこと)。以下にその概要を記す。

- (1) 本プロジェクトで得られた TDMR モデルは、シンプルなモデルにも関わらず実際の TDMR 記録の様相をうまく掴んだモデルになっており、相互情報量の解析や信号処理方式の開発にも向いている。当初の目標のひとつである TDMR 数理モデルの構築の一環として、数理 TDMR モデルにおける相互情報量評価の手法の提案を行った(寺島 由裕, 和田山 正, ``簡易数理 TDMR モデルにおける相互情報量について'', 電気情報通信学会 総合大会, 福岡, 2016)。この研究では、相互情報量計算に必要とされる数値計算を大幅に削減する計算技法も合わせて開発した。この手法により、与えられたパラメータの TDMR 数理モデルに書き込める限

界量を表す量として重要な意義を持つ相互情報量の計算が現実的となった。またボロノイモデルに基づく我々の提案(Globecom2015)と組み合わせて利用することで精度と計算量との間のトレードオフを柔軟に設定できるようになった。今後、本研究で確立した TDMR モデルに基づく研究の進展が期待される。

- (2) 2次元制約符号に関しては2つの貢献がある。ひとつは、WOM符号に関する設計技法の確立である(Yoju Fujino and [Tadashi Wadayama](#), Construction of Fixed Rate Non-Binary WOM Code based on Integer Programming)。この研究ではWOM符号の構成を整数計画法に基づき行うというものであり、その手法はTDMR用2次元符号化に容易に転用できるものである。もうひとつの貢献がグラフの支配集合分割から制約符号を構成するという技法の確立([Tadashi Wadayama](#), [Taisuke Izumi](#), ``Bounds on asymptotic rate of capacitive crosstalk avoidance codes for on-chip buses)である。こちらの仕事は理論的色彩の濃い仕事であるが、やはり効率の良い2次元制約符号の構成に資する成果である。2次元制約符号は、TDMRシステムの信頼性向上のための重要な方向性だと考えられており、本研究で確立した手法(整数計画法に基づく符号化器の設計、グラフの支配集合分割に基づく符号化器の設計)は今後の2次元記録の可能性を広げる貢献になっていると考えている。
- (3) LDPC符号のBP復号の改善に関する研究を行った。BP復号の性能は、TDMRシステム全体の信頼性向上に大きく影響する要因である。BP復号中にやり取りされるメッセージにダンピング係数を深層学習技術を利用して調整を行う手法を検討した。初期LLR計算部分を学習可能にする部分などに新規性があり、一定の成果を得た(情報理論とその応用シンポジウムにおいて発表済)。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件)

- (1) [Tadashi Wadayama](#) and Taisuke Izumi, ``Bounds on the Asymptotic Rate for Capacitive Crosstalk Avoidance Codes for On-chip Buses," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E101-A, No.12, Dec. 2018. (査読有)
- (2) Takafumi Nakano and [Tadashi Wadayama](#), ``On Zero Error Capacity of Nearest Neighbor Error Channels with Multilevel Alphabet," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E100.A, No. 12, pp. 2647-2653 (2017) (査読有)
- (3) Yoju Fujino and [Tadashi Wadayama](#), ``Construction of Fixed Rate Non-Binary WOM Code based on Integer Programming," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E100.A, No. 12, pp. 2654-2661, 2017. (査読有)
- (4) Hiroki Mori and [Tadashi Wadayama](#), ``Band Splitting Permutations for Spatially Coupled LDPC Codes Achieving Asymptotically Optimal Burst Erasure Immunity," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E100. A, No. 2, pp. 663-669, 2017. (査読有)

[学会発表](計 2 件)

- (1) Yoju Fujino, [Tadashi Wadayama](#), ``A Construction of Non-Binary WOM Codes based on Integer Programming, " International Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA), 2016. (査読有)
- (2) [Tadashi Wadayama](#), Taisuke Izumi, ``Bounds on asymptotic rate of capacitive crosstalk avoidance codes for on-chip buses, " IEEE International Symposium on Information Theory, Barcelona, June, 2016. (査読有)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔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：鎌部 浩  
ローマ字氏名：Kamabe Hiroshi  
所属研究機関名：岐阜大学  
部局名：工学部  
職名：教授  
研究者番号(8桁)：80169614

### (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。