

令和 4 年 5 月 18 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04400

研究課題名(和文)位置誤りを訂正する符号化方式の開発

研究課題名(英文)Development of Coding Schemes for Position Errors

研究代表者

細谷 剛 (Hosoya, Gou)

早稲田大学・グローバルエデュケーションセンター・講師(任期付)

研究者番号：60514403

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではデータセンターで用いられるストレージデバイス、また次世代の記録メディアとして開発が進められているビットパターンメディア、レーストラックメモリなどを対象とした誤り訂正符号を用いて符号化・復号方式の開発を行うものである。これらの記録メディアに対し、高性能な空間結合低密度パリティ検査(LDPC)符号やプロトグラフLDPC符号の構成法、ならびにこれらのシステムに適した統合型復号法の開発に取り組んだ。通常の無記憶な誤りが発生するシステムと異なり、符号のグラフ構造や、複数ヘッドによる読み込み方法、位置誤りに適した情報系列の発生方法に注目し新しい方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

オンラインストレージの需要は年々増加しており、大容量なストレージに対する高信頼性で高速な符号化方法・復号法の開発は重要である。複数ヘッドによるデータの読み込みと位置誤りの訂正は非常に相性がよく、理論的な解析や数値計算結果から大きな性能向上が得られることを確認した。本研究で取り組んだ方法は、ストレージに故障が発生しても従来より復旧できる見込みが大きい方法や、冗長なストレージの数を減らす方法、新しい仕組みをもつデータシステムに適した訂正法などである。

研究成果の概要(英文)：In this research, we develop coding and decoding methods using error-correcting codes for storage devices used in data centers, bit-patterned media, and race-track memory, which are being developed as next-generation storage media. For these storage media, we have developed methods for constructing high-performance spatially-coupled low-density parity-check (LDPC) codes and protograph LDPC codes, as well as integrated decoding methods suitable for these systems. Unlike conventional systems that generate memoryless errors, we proposed a new method by focusing on the graph structure of the codes, a method of reading by multiple heads, and a method of generating information sequences suitable for positional errors.

研究分野：符号理論, 情報理論, 通信理論

キーワード：符号化 復号法 ストレージデバイス 位置誤り 記録メディア

1. 研究開始当初の背景

近年リアルタイムのビッグデータ解析やデータセンターなどの需要の高まりにより、オンラインストレージの需要が高まっている。高密度と低遅延を兼ね備えた不揮発性メモリであるレーストラックメモリや、Dropbox や Facebook, Google ドライブなどのオンライン上の、あるいは RAID (Redundant Arrays of Inexpensive Disks) のようなストレージデバイスが注目を浴びている。新しいストレージシステムに対し、より大量のデータを高速で処理するためには、新しい符号化・復号方式の開発が必要となる。

ビットパターンメディアやレーストラックメモリではデータを読み込む際の物理的な振動や注入される電圧の多寡が原因となってビット位置そのものが誤って受信される。レーストラックメモリではデータ読み込みの低遅延化に向け複数の読み込みヘッドによるデータの読み込みが検討されている。RAID では冗長性のある複数の記憶媒体を統合的に運用することで多少の故障が発生しても故障していない記憶媒体からデータを復元することを可能としている。

従来の研究では、符号化・復号は、代数的な符号を用いるのが一般的であるが、本研究では LDPC 符号のようなランダムに構成された確率的な符号を対象としている。これは従来 Reed-Solomon (RS) 符号では、訂正可能なストレージの数を超えると途端に訂正できる保証がなくなる。しかし故障したデバイスでも一部のデータはアクセス可能な部分的な故障の場合も考えられ、そのような RS 符号では訂正できない故障数でも LDPC 符号であれば訂正できる可能性がある。特に空間結合符号やポーラ符号を用いれば理論限界に近い性能をもつため、従来 RS 符号が高い性能をもつ状況においても、高い確率で RS 符号と同程度の性能が期待でき、大きな損失はないと考えられる。また、レーストラックメモリに対する符号化・復号ではデータを読み込むヘッドが複数個ある特徴を利用し、何度も系列を読み込んで訂正する方法や、各ヘッドで読み込んだ情報を多値信号に写像することで位置誤りを訂正しやすくしている。しかしながら確率的な符号や復号法を用いた研究成果は確認されていない。

2. 研究の目的

本研究では記憶メディアを対象として空間結合低密度パリティ検査 (SC-LDPC) 符号を組み合わせ統合した符号化・復号方式の開発を行う。従来、多くの研究成果が得られている符号化・復号法は信号そのものに雑音加わるものであって、データ系列を読み込む際に発生する物理的な振動や注入される電圧の多寡を原因とするビット位置の誤りや雑音が組み合わせた場合の符号化・復号法の開発はまだ多くの課題を残している。本課題では、位置誤りを推定しつつ誤り訂正を行う統合型復号法、およびそのような復号法に適した符号の構成法を取り組み予定である。計算機シミュレーションによる実験および密度発展法による数値計算から提案した符号化・復号方式の性能が向上することを示し、有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) ストレージデバイスに対する符号化・復号法

通常は無記憶通信路に対する符号化と違い、ストレージ通信路に対して LDPC 符号を構成するときは、検査ノード制約と呼ばれる制約を課して構成する。ここでは性能の評価指標として、BP 閾値と呼ばれる訂正可能な故障率の上限を用いる。ストレージ通信路向けに構成された符号の BP 閾値が劣化する現象があるため、さらなる検討が必要である。その一方で 2 元の空間結合 LDPC 符号に対し検査ノード制約を課すと、必ず BP 閾値が向上するが、2 元の符号を一般化した多元の空間結合 LDPC 符号では未検討である。多元の LDPC 符号でも同様の結果が得られるか検討する。

(2) 記録メディアに対する符号化・復号

レーストラックメモリなど記録メディアに対し符号化を検討し、プロトグラフ符号を構成する。プロトグラフ符号は空間結合 LDPC 符号と違い、符号サイズが小さい場合でも通常の LDPC 符号より性能が高い。特に短いサイズの符号の性能は、符号の最小距離に依存するため、BP 閾値が大きくなるようにプロトグラフ符号を最適化すると同時に、最小距離が大きくなるように符号を設計する必要がある。また挿入/削除通信路に適したスライド窓復号法の開発を検討する。空間結合 LDPC 符号は通常の LDPC 符号よりサイズが大きくなる傾向にあり、また繰り返し型の復号法の反復回数も増加する傾向にある。そのような場合は、スライド窓復号を用いて符号全体に対し演算するのではなく、局所的に復号処理を行い、復号に要する演算回数を減らす方法を取る。しかし挿入/削除通信路の場合は、挿入/削除によってずれたビット位置の数を推定しながら復号を行う必要があるため、局所的にスライド窓復号を修正する必要があると考えられる。

4. 研究成果

(1) ビットパターンメディアやレーストラックメモリに対する符号化法

位置誤りを推定しつつ誤り訂正を行う統合型復号法、およびそのような復号法に適した符号の構成法について検討した。誤り訂正符号としてはプロトグラフ低密度パリティ検査符号を用

いて位置誤りの検出にマーカー符号を組み合わせた符号化法を提案した。2つの符号を組み合わせた際に、これら確率的に接続させる遷移行列を定義すると同時に差分進化アルゴリズムを用いて求めた。計算機実験および理論的な性能評価によって空間結合低密度パリティ検査符号より性能が優れていることを示した。理論的な性能評価では2通りの方法で調査し、まず密度発展法によって反復閾値を導出しウォーターフォール領域での性能を、また符号の重み分布から得られる典型的最小距離比によってエラーフロア領域での性能を評価し有効性を示した。

(2) マルコフ情報源にしたがって情報系列が発生する符号化法

レーストラックメモリを対象として、読み込みヘッドごと間隔の異なるマーカー符号を配置した。マーカーの間隔は、与えられたヘッド数に対し対称情報レートをモンテカルロベースの計算法によって最適な値を求めた。マーカー符号を用いた2次元の符号化法を用いると、通信路推定における繰り返しのフィードバックを必要とせず高い復号性能が得られた。

(3) マルコフ情報源にしたがって情報系列が発生する符号化法

挿入/削除誤りが発生する通信路においては、符号化の前にマルコフ情報源によって系列を発生させた方が高い性能をもつことを示した。提案手法としては、マルコフ情報源からトレリス符号に変換する必要があるが、(2)と同様、対称情報レートを数値的に計算し、トレリス符号を構成した。挿入/削除誤りの発生確率が高い領域において、提案手法は従来手法より高い性能を示した。

(4) 多元符号を用いたストレージデバイスに対する符号化法

非2元LDPC符号を用いたストレージデバイスに対する符号の性能解析に取り組んだ。グラフベースの符号を用いて検査制約と多元符号の特徴を考慮し、異なるストレージデバイスに接続するよう修正を加えると、考慮しない場合でも高い性能を示すことを明らかにした。特に空間結合符号に対しては、必ず性能が向上することが確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7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 SHIBATA Ryo, HOSOYA Gou, YASHIMA Hiroyuki | 4. 巻 E103.B |
| 2. 論文標題 A Novel Concatenation Scheme of Protograph-Based LDPC Codes and Markers for Recovering Synchronous Errors | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications | 6. 最初と最後の頁 1318 ~ 1330 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2019EBP3244 | 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 SHIBATA Ryo, HOSOYA Gou, YASHIMA Hiroyuki | 4. 巻 E103.A |
| 2. 論文標題 Concatenated LDPC/Trellis Codes: Surpassing the Symmetric Information Rate of Channels with Synchronization Errors | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences | 6. 最初と最後の頁 1283 ~ 1291 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2020EAP1019 | 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 SHIBATA Ryo, HOSOYA Gou, YASHIMA Hiroyuki | 4. 巻 E103.A |
| 2. 論文標題 Design and Construction of Irregular LDPC Codes for Channels with Synchronization Errors: New Aspect of Degree Profiles | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences | 6. 最初と最後の頁 1237 ~ 1247 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2020EAP1004 | 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 Shibata Ryo, Hosoya Gou, Yashima Hiroyuki | 4. 巻 56 |
| 2. 論文標題 Concatenated LDPC/2-D-Marker Codes and Non-Iterative Detection/Decoding for Recovering Position Errors in Racetrack Memories | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics | 6. 最初と最後の頁 1 ~ 9 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2020.3011447 | 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 由利昌司, 柴田凌, 細谷剛, 八嶋弘幸, | 4. 巻 J103-A |
| 2. 論文標題 擬似乱数系列を用いたビット置換符号化変調に対するシェーピング手法 | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌(A) | 6. 最初と最後の頁 176 ~ 184 |
| 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 SHIBATA Ryo, HOSOYA Gou, YASHIMA Hiroyuki | 4. 巻 E102.A |
| 2. 論文標題 Protograph-Based LDPC Coded System for Position Errors in Racetrack Memories | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences | 6. 最初と最後の頁 1340 ~ 1350 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E102.A.1340 | 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 SHIBATA Ryo, HOSOYA Gou, YASHIMA Hiroyuki | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Design and Construction of Irregular LDPC Codes for Channels with Synchronization Errors: New Aspect of Degree Profiles | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences | 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) 10.1587/transfun.2020EAP1004 | 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13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 G.Hosoya |
| 2. 発表標題 Analysis of Delayed Bit-Interleaved Coded Modulation for APSK |
| 3. 学会等名 2021 20th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 細谷 剛 |
| 2. 発表標題 遅延型ビット置換符号化変調に関する一考察 |
| 3. 学会等名 第44回情報理論とその応用シンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 G. Hosoya and T. Niinomi |
| 2. 発表標題 Performance of non-minary LDPC codes on two-dimensional array erasure models |
| 3. 学会等名 2020 International Symposium on Information Theory and its Applications (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 R. Shibata, G. Hosoya, and H. Yashima |
| 2. 発表標題 Design of irregular LDPC codes without markers for insertion/deletion channels |
| 3. 学会等名 2019 IEEE Global Communications Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Futami, G. Hosoya, and H. Yashima |
| 2. 発表標題 Modeling of free-space optical links and error rate in rain, |
| 3. 学会等名 2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 A. Nabeyama, K. Komatsu, G. Hosoya, and H. Yashima |
| 2. 発表標題 2-Input/3-Input all-optical switchable AND/NOR logic gate |
| 3. 学会等名 OSA Advanced Photonics Congress (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 H. Yashima, K. Komatsu, G. Hosoya |
| 2. 発表標題 Simulation on application of QD-SOA to some all optical logic gates |
| 3. 学会等名 Inter-Photonics 2019 International Conference on Photonics Research (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 大木湧介, 細谷剛, 八嶋弘幸 |
| 2. 発表標題 ガウス近似法を用いた非正則Polar符号の構成 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 細谷剛, 新家稔央, 八嶋弘幸 |
| 2. 発表標題 2次元行列に対する非2元LDPC符号の性能 |
| 3. 学会等名 第42回情報理論とその応用シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 由利昌司, 柴田凌, 細谷剛, 八嶋弘幸 |
| 2. 発表標題 擬似乱数系列を用いた空間結合LDPC 符号化BICM に対するシェーピング方式 |
| 3. 学会等名 第42 回情報理論とその応用シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 橋本大輝, 柴田凌, 細谷剛, 八嶋弘幸 |
| 2. 発表標題 レーストラックメモリに対するスライド窓復号法の性能評価 |
| 3. 学会等名 第42 回情報理論とその応用シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 R. Shibata, G. Hosoya, and H. Yashima |
| 2. 発表標題 Concatenated LDPC/trellis codes: Surpassing symmetric information rate of insertion/deletion channels |
| 3. 学会等名 42th Symposium on Information Theory and its Applications |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大木湧介, 柴田凌, 細谷剛, 八嶋弘幸 |
| 2. 発表標題 Parity Check によるList Pruning を用いたPolar 符号の逐次除去リスト復号の高速化 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告 |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| Researchmap https://researchmap.jp/read0138990 Google site https://sites.google.com/view/ghosoya 早稲田大学研究者DB https://researchers.waseda.jp/profile/ja.28159169ed4875109ea1244ff5e50c84.html 個人Webサイト https://sites.google.com/view/ghosoya |
|--|

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