2版

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２７ 年　 ６ 月 １３ 日現在

機関番号：３２７０２
研究種目：研究活動スタート支援
研究期間：2013～2014
課題番号：２５８８９０６１

研究課題名（和文）長寿命・高信頼なフラッシュメモリシステムの構成

研究課題名（英文）Construction of Flash Memory System with Long Service Life and Reliability

研究代表者
野崎　隆之（Nozaki, Takayuki）

神奈川大学・工学部・助手

研究者番号：７０７０７４９７

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題の成果は大きく２つに分けられる．(1)フラッシュメモリの符号化への貢献が期待できるzigzag decodable符号の適用を検討した．その結果，副成果として低計算量かつ復号性能のよい噴水符号システムの提案に成功した．(2)フラッシュメモリへの書き込み時間を短縮するためにLDPC符号の符号化の並列化に成功した．

研究成果の概要（英文）：(1) We consider the application of the zigzag decodable code for encoding of flash memory systems. As a result, we propose a high performance and low-complexity fountain coding system. (2) We propose a parallel encoding algorithm for the low-density parity-check (LDPC) codes to reduce the write time of the flash memory system.

研究分野：符号理論

キーワード：符号理論　LDPC符号　符号化　噴水符号

１．研究開始当初の背景

フラッシュメモリは記憶媒体のひとつであり,SDカード,USBメモリ,SSD(Solid State Drive)などで広く利用されている．フラッシュメモリでは，「セル状態」と呼ばれる複数個の記憶素子の電荷量によって，保存される情報は表現される．フラッシュメモリの特徴として，記憶素子の電荷量を減らす操作は，記憶素子の物理構造を大きく劣化させ，記憶素子を記録に適さないものにしてしまう．フラッシュメモリの寿命を長くするためには，記憶素子の電荷除去回数をなるべく減らすことが重要である．

一方，フラッシュメモリシステムをはじめとする記録システムの信頼性を向上させる技術に誤り訂正符号がある．研究開始当初の従来研究では電化除去回数を少なく保ちつつ誤り訂正が可能なシステムが十分に検討されていなかった．

２．研究の目的

本研究の目的は，長寿命・高信頼かつ符号化率の高いフラッシュメモリシステムを構成することにある．

３．研究の方法

本研究課題においては誤り訂正符号の研究を中心にフラッシュメモリシステムの性能向上を検討した．それぞれの研究において数理的なアプローチによるアルゴリズムの開発ならびに性能解析を行い，数値実験によってその性能を確認した．

本研究課題では特にマルチレベルフラッシュメモリシステムでの適用が期待される多元符号に関する性能解析ならびに性能向上に必要なアルゴリズムの提案をまず行った．さらに記録の高密度化を目指すために他の記録システムで用いられている符号化をフラッシュメモリシステムに適用することを検討した．加えて，現在問題になっているフラッシュメモリシステムへの書き込み時間を短縮する手法を提案する．

４．研究成果

（１）　多元クラスタLDPC符号に対する重み分布の解析

低密度パリティ検査(LDPC: Low-Density Parity-Check)符号にはエラーフロア領域とよばれる通信路の誤り率が十分によい際に通信路の誤り率に対して復号誤り率がなだらかにしか減少しない現象が生じる．エラーフロア領域は重みの小さな符号語が原因で生じることが知られており，重みの小さな符号語を除去することでエラーフロアの改善が見込まれる．

多元クラスタ LDPC 符号は高性能な誤り訂正符号のひとつである．従来研究によって，多元クラスタ LDPC 符号は符号語の最小重みが符号長に比例することがあることが計算機実験によって知られていた．しかしながら,符号語の最小重みが符号長に比例するための条件が数理的に明らかにされていなかった．

本研究では，(i)多元クラスタLDPC符号の符号語重み分布を導出し，(ii)符号長が十分大きいときの多元クラスタ LDPC 符号の符号語重み分布の漸近的性質を明らかにし，(iii)最小距離が符号長に比例するために必要な符号の設計パラメタの条件を明らかにした．

従来の研究で，通常の多元 LDPC 符号ではウォータフォール領域における復号性能のよい(2,d_c)正則符号は符号語の最小重みが符号長に対して線形に増加しないことが明らかになっていた．一方，本研究によって，多元クラスタLDPC符号の場合では，(2,d_c)正則符号の符号語の最小重みはある条件化で符号長に対して線形に伸びることが示された．したがって，(2,d_c)正則多元クラスタ LDPC 符号はウォータフォール領域・エラーフロア領域共に性能がよい符号の条件を満たしていることが示された．

本研究から，マルチレベルフラッシュメモリに対する，誤り訂正符号として(2,d_c)正則多元クラスタ LDPC 符号が有用であるという知見を得た．

本研究の今後の展望としては，(i)多元クラスタ LDPC 符号に対するエラーフロア領域の復号誤り率の解析を行うこと，(ii)多元クラスタ LDPC 符号に対する低計算量な復号法を開発することにある．

（２）　多元LDPC符号に対するエラーフロアを低減させる復号アルゴリズムの開発

多元 LDPC 符号はメッセージパッシング復号法によって効率よく復号可能であることが知られている．しかしながら，従来の復号法では符号を定義する二部グラフ中のサイクルの影響により重みの小さな復号誤りが残る場合があった．本研究では従来の復号法に加えて新たにサイクル中の復号誤りを除去するメッセージパッシングアルゴリズムを開発することに成功した．その結果，重みの小さな復号誤りが原因で生じるエラーフロア領域を改善することに成功した．

図１は従来の復号法と提案復号法の復号誤り率の比較をしている．縦軸は復号誤り率を表しており，下に行くほど性能がよいことを現している．横軸は通信路の誤り率を示している．緑線が従来法の性能曲線で，赤線が提案法の性能曲線である．図１より提案復号法は従来法に比べエラーフロア領域における

復号誤り率が低いことがわかる．すなわち，提案復号法は従来法を上回る復号性能を有していることがわかる．

本研究の成果より，記録に生じた誤りを従来法で十分に除去できない際には，提案法を用いることで更なる誤りの訂正が実現できる．

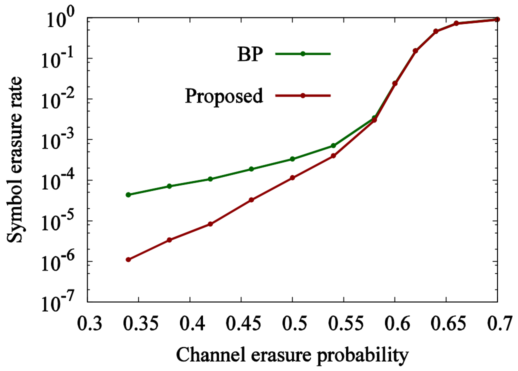

図 1 従来復号法と提案復号法の性能比較

（3） zigzag 復号可能な噴水符号システムの開発

Zigzag 復号可能な (ZZD: ZigZag Decodable)符号は分散ストレージシステムの高密度化を実現するための符号のひとつである．本研究では，ZZD 符号のフラッシュメモリシステムへの適用を検討した際の副成果として，高性能な噴水符号システムの構成に成功した．

インターネットにおけるマルチキャストは一つのユーザが複数のユーザに対してデータを送信する通信方式であり，動画配信などで広く用いられている．マルチキャストでは UDP (User Datagram Protocol)を用いているため通信の信頼性が確保されておらず，動画品質の低下が問題となっている．噴水符号は高信頼なマルチキャストを実現する技術であり，誤り訂正符号を応用した研究である．

本研究では，噴水符号と ZZD 符号を組み合わせることによって，新しい噴水符号システムを提案した．提案した噴水符号システムは従来の噴水符号に比べ復号誤り率が低いことを数理的に証明し，数値実験によって確認をした．

図 2 は数値実験の結果を示している．縦軸は復号誤り率を表しており，下に行くほど性能がよい．横軸は復号の際に余分に受け取るパケットの割合を表すオーバヘッドと呼ばれる値で，左に行くほど性能がよい．紫の線が提案法の性能曲線で赤線が従来法の性能曲線である．この図から任意のデータ長に対して，提案法のほうが既存法よりも性能がよいことがわかる．

本研究の今後の展望は ZZD 符号のフラッシュメモリへの適用について再度検討することにある．

なお，本研究は高い評価を得ており，学会発表 2 によって，IEEE Information Theory Society Japan Chapter Young Researcher Best Paper Award を受賞している．

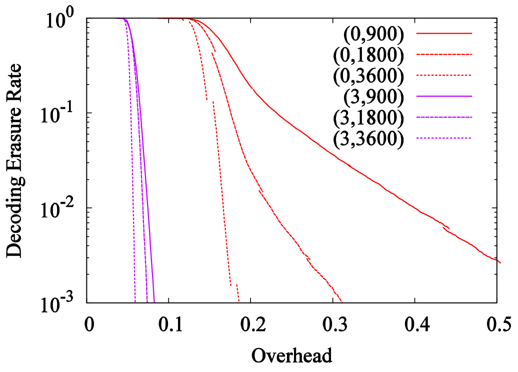

図 2 噴水符号の性能比較

（4） LDPC 符号に対する並列計算可能な符号化アルゴリズムの開発

LDPC 符号は記録の読み込み時に行う「復号」には符号長に比例した計算量しかかからず，並列計算も容易であることが知られている．一方で，記録の書き込み時に行う「符号化」の計算量は符号長の二乗に比例しており，効率的な並列計算法も知られていなかった．

LDPC 符号の符号化は検査行列の解を求める問題に等しい．すなわち，符号化は一つの大きな線型方程式を解く問題に帰着することができる．従来研究ではこの線型方程式を効率よく解くことのみに主眼が置かれていた．本研究では，この線型方程式を複数の小さな線型方程式に分解するアルゴリズムを提案し，小さな線型方程式をそれぞれ別のプロセッサで効率的に解くことによって符号化アルゴリズムの並列化に成功した．

線型方程式を分解するに当たり，本研究では検査行列のハイパーグラフ表現を与えた．このハイパーグラフに対して分割問題を解くことによって検査行列を singly bordered ブロック対角行列と呼ばれる形式に変形した．さらに情報部に対応する列を適切に選ぶことによって，線型方程式の分解を実現した．さらに数値例によって提案アルゴリズムが書くプロセッサにほぼ均等に処理を割り振っていることがわかった．加えて，提案符号化法は従来の符号化法に比べ，符号化にかかる時間を 1/5～1/2 程度まで減少させることに成功した．

図 3,4,5 はそれぞれ変形前の検査行列，従来法によって変形された検査行列，提案法によって変形された検査行列を表している．それぞれの図の黒い点は行列の非ゼロ要素を表している．従来法は検査行列の一部を三角行列にすることによって，線型方程式を高速に解いている．提案法は 2 つのブロックに分割をし，それぞれの行列の一部を三角行列に

することによって，並列かつ高速に線型方程式を解くことができる．

以上をまとめると，本研究の主たる成果は，(i)LDPC 符号に対する効率的な並列符号化アルゴリズムを提案したこと，(ii)数値例によって従来法と比べ符号化の処理時間を 1/5～1/2 程度まで減少させることに成功したことにある．

本研究の新規性は，(i)符号化アルゴリズムに並列計算の概念を導入したこと，(ii)LDPC 符号に対してハイパーグラフ表現を与えたこと，(iii)ハイパーグラフの分割アルゴリズムを利用することで LDPC 符号を並列符号化が容易な形に変形したことにある．

本研究の成果によって，フラッシュメモリシステムへの記録の書き込み時間の短縮が見込まれる．USB メモリにおいては，抜き取り時に記録の書き込みを行っているので，抜き取り時間の短縮が可能になる．

本研究の今後の展望としては、以下の２つの課題を解決することが重要であると考えられる．(i)LPDC 符号のうち，性能が特に高いことで知られている「空間結合符号」および「多元 LDPC 符号」へ符号化法を拡張する．(ii)ハイパーグラフと LDPC 符号の関係性について更なる研究を行い，有益なアルゴリズムを提案する．(iii)並列数の上限を数理的に明らかにする．なお，(iii)については，現在までの研究で符号化率が大きく・符号長が大きく・符号を定義する行列の密度が小さいときほど並列数を大きくできることが数値実験によって示されている．

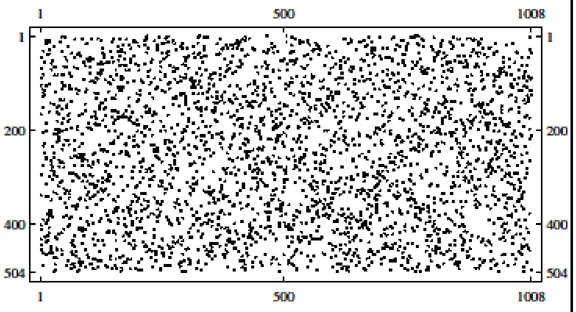

図３　変形前の検査行列

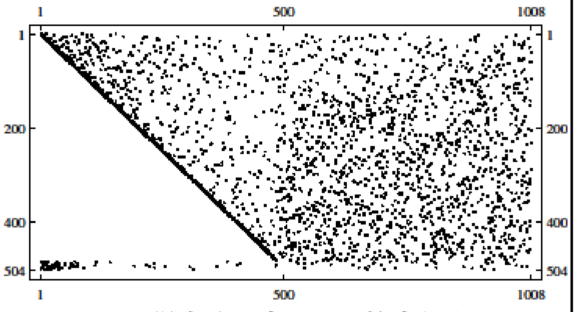

図４　従来法で変形した検査行列

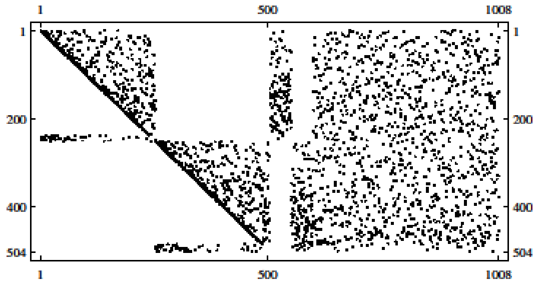

図５　提案法によって変形された検査行列

５．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計２件）

1. T.Nozaki, K.Kasai and K.Sakaniwa, “Message Passing Decoder with Decoding on Zigzag Cycles for Non-binary LDPC Codes,” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, vol.E97-A, no.4, pp.975-984, 2014 年
2. T.Nozaki, M.Maehara, K.Kasai and K.Sakaniwa, “Weight Distribution for Non-binary Cluster LDPC Code Ensemble,” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, vol.E96-A, no.12, pp.2382-2390, 2013 年

〔学会発表〕（計４件）

1. 野崎 隆之, “LDPC 符号に対するブロック対角化による符号化の計算量,” 第 37 回 情報理論とその応用シンポジウム (SITA2014) 予稿集, pp.253-258, 2014 年 12 月 10 日, 富山県宇奈月ニューオータニホテル
2. 野崎 隆之, “ブロック対角化による LDPC 符号の符号化法,” 電子情報通信学会 情報理論研究会, 2014 年 9 月 19 日, 千葉県鳩山荘松庵
3. Takayuki Nozaki, “Fountain Codes Based on Zigzag Decodable Coding,” International Symposium on Information Theory and its Applications, 査読有, 2014 年 10 月 26 日～2014 年 10 月 29 日, Melbourne Australia
4. 野崎 隆之, “Triangular 符号に基づく噴水符号,” 電子情報通信学会 情報理論研究会, 2013 年 9 月 27 日, 沖縄カルチャーリゾートフェストーネ

〔その他〕

ホームページ等
http://www.sci.yamaguchi-u.ac.jp/sci/staff/tnozaki

６．研究組織

(1)研究代表者

野崎　隆之（Takayuki NOZAKI）
神奈川大学・工学部・助手
研究者番号：70707497

(2)研究分担者

（　　　）

研究者番号：

(3)連携研究者

（　　　）

研究者番号：