

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K16007

研究課題名(和文) LDPC符号に対する並列符号化法

研究課題名(英文) Parallel Encoding Algorithm for LDPC Codes

研究代表者

野崎 隆之 (Nozaki, Takayuki)

山口大学・大学院創成科学研究科 ・講師

研究者番号：70707497

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、低密度パリティ検査(LDPC)符号に対して効率的な並列符号化法を提案するとともにその数理を解明した。加えて、この研究結果をもとにして、符号理論とハイパーグラフの関連を調査し、一般の符号に対する効率的な符号化を検討した。本研究の主要な成果は次のとおりである。(1)ハイパーグラフアンサンブルに対するK均等カットサイズの期待値を明らかにし、並列符号化をするための必要条件を明らかにした。(2)多元LDPC符号に対する並列符号化法を与えた。(3)(1)の手法をもとにノード故障モデルにおけるネットワーク分断確率を与えた。(4)SVT符号、多元SVT符号、RLL-VT符号の符号化法を与えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(学術的意義)本研究の解析手法ならびに結果は、符号理論で用いられるアンサンブル解析法がネットワークの分断確率の推定にも有効であることを示している。この結果から、より広範な分野に対してグラフならびにハイパーグラフアンサンブル解析が有効であることが期待される。

(社会的意義)本研究結果によって高速な符号化法が構成された。この結果を通信・記録システムに適用すれば遅延の少ないシステムの構築が可能になる。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have proposed an efficient parallel encoding algorithm for low-density parity-check (LDPC) codes and have analyzed a necessary condition that most of the codes in a code ensemble are K-parallel encodable. Moreover, based on this result, we have investigated the relationship between coding theory and hypergraphs and have researched efficient encoding algorithms for general codes.

The main results of this study are the following; (1) We have clarified the ensemble average of cutsize in K-balanced partitioning for hypergraph ensembles and derived a necessary condition that most of the codes in a code ensemble are K-parallel encodable. (2) We have proposed efficient parallel encoding algorithms for non-binary LDPC codes. (3) Based on the analysis technique of (1), we have analyzed network breakdown probability in the node fault model. (4) We have proposed efficient encoding algorithms for shifted-VT (SVT) code, non-binary SVT code, and run-length-limited VT code.

研究分野：符号理論

キーワード：符号理論 LDPC符号 誤り訂正符号 符号化法 並列計算 ハイパーグラフ アンサンブル解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、インターネットにおいては動画の放送や音声通話など即時性の高い通信の需要が増加している。現状では、通信の即時性を高めることと引き換えに、通信で生じた誤りによる配送コンテンツの品質劣化を許容している。高品質かつ即時性の高い通信を実現するためには、通信による誤りを高速に訂正する仕組みが必要になっている。

デジタルデータに生じた誤りを除去する技術に誤り訂正符号がある。誤り訂正符号を利用した通信システムでは、送信データに冗長性をもたせる処理である符号化と送信データの推定処理である復号が新たに追加される。したがって、高品質かつ即時性の高い通信を実現するためには、符号化と復号の高速化が必要不可欠な研究課題として挙げられる。

低密度パリティ検査(LDPC)符号は、Sum product 復号法によって短時間で復号が可能で、高い訂正能力を発揮する誤り訂正符号であり、現代の無線・有線通信で広く利用されている。一方で符号化の計算時間は復号に比べて大きいので、通信の高速化には符号化の計算時間の短縮が不可欠である。

2. 研究の目的

本研究の目的はLDPC符号ならびに多元LDPC符号に対する高速な符号化法の提案とそれに適した高性能かつ高速符号化可能な符号を構成することである。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、「並列計算アルゴリズムを提案することによる符号化の高速化」と「非並列アルゴリズムの改良による符号化の高速化」の2種類のアプローチを採用する。それぞれに関して、数値実験によって符号化時間を測定することでその効果を調べるとともに、その動作条件を数理的手法で明らかにする。

4. 研究成果

(1) 研究の主たる成果とその概要

本研究では、第一に「LDPC符号の並列符号化アルゴリズムの提案」をした。このアルゴリズムの前処理ではハイパーグラフのK均等分割を利用してパリティ検査行列の検査部に対応する部分行列をブロック対角行列に変形する。符号化処理を対角小行列毎に分割することで並列符号化法を与えた(図1)。数値実験によって計算量を評価したところ既存法に比べ並列数Kに反比例して符号化計算量が減少することが分かった。

第二に、前述のアルゴリズムの計算時間を数理的に評価するために「LDPC符号の並列符号化アルゴリズムの並列数の解析」をした。この研究では、ハイパーグラフのK均等分割のカットサイズに注目してK並列計算ができるための必要条件を示した。本解析では、符号理論で広く用いられているアンサンブル解析と呼ばれる手法をハイパーグラフのカットサイズの評価に応用している。この解析の結果、パリティ検査行列の密度が低いまたは行数に比べ列数が多いほど、符号化の並列数が大きくなることがわかった。さらに、列重みが2の時には、符号長を十分に大きくすると、並列数は任意の値を取ることがわかった。

第三に、以上のアルゴリズムを拡張して「多元LDPC符号の並列符号化アルゴリズムの構成」を目指した。位数64以上の多元LDPC符号においては、列重み2のパリティ検査行列で定義される符号が復号性能が良いことが知られているので、この研究では列重みが2のパリティ検査行列で定義される符号に限定して符号化アルゴリズムの構成を目指した。列重みが2のパリティ検査行列に対応するグラフ表現であるアソシエイトグラフに対してサイクルカバーを利用してパリティ検査行列の検査部に対応する部分行列をブロック対角行列に変形した。その結果、対角ブロックのサイズが非均一になることがわかり、並列計算に適した形に変形することが難しいことがわかった。

そこで、第四に「多元LDPC符号の非並列な符号化アルゴリズムの提案」をした。この手法では、パリティ検査行列の検査部に対応する部分行列をブロック上三角行列に変形することで符号化計算量を低減させた。数値実験によって計算量を評価したところ既存法よりも低い計算量で符号化が可能であることが示せた。

以上の4つの成果によって研究の目的は達成されたので、本研究から派生して以下のような関連研究を進めた。

関連研究の一つ目として、並列符号化の並列数の解析で用いたハイパーグラフアンサンブルのK均等分割のカットサイズの平均の導出を発展させ、ハイパーグラフまたはグラフで定義されるシステムへのアンサンブル解析の適用を目指した。その結果、「ノード故障モデルにおけるネットワーク分断確率の解析」に成功した。

関連研究の二つ目として、LDPC符号に限らず、広く符号に対して効率的な符号化アルゴリズムを考えた。その結果、削除訂正符号と呼ばれる符号のうちShifted VT符号、多元Shifted VT符号、連長制限の加わったVT符号に対して、それぞれ効率的な符号化アルゴリズムの提案をすることができた。

関連研究の三つ目として、広く符号理論において、ハイパーグラフによる解析手法が有用であるかを調査した。その結果、符号語数の上界の導出がハイパーグラフのマッチング問題に帰着可能であることが分かった。

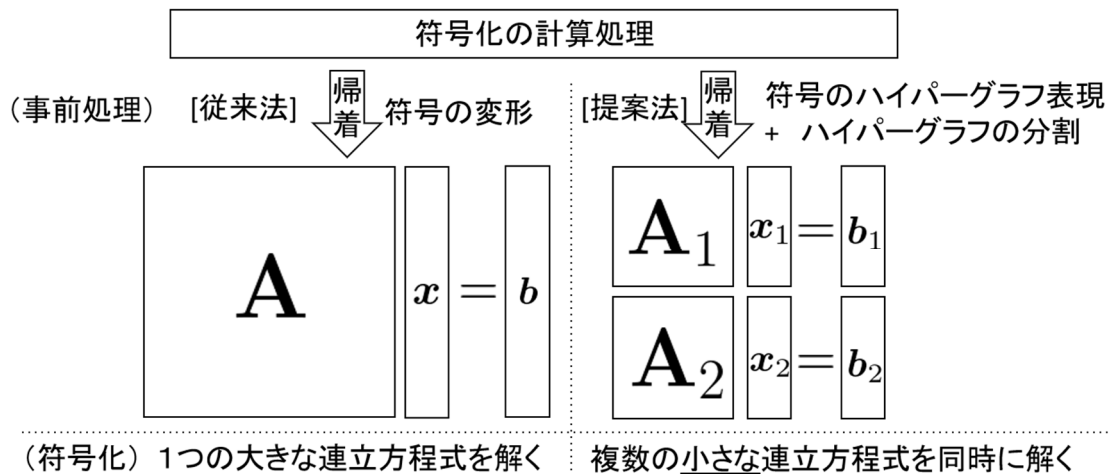


図1 研究の主たるアイデア

(2) 得られた成果の国内外での位置づけ

[RU2001] の手法を発展させた従来の符号化に関する研究では、符号化の高速化のために計算量の削減のみに焦点が当てられており、符号化の処理時間は[RU2001] の手法と比べ数%程度しか削減することができていなかった。本研究は符号化の並列化に焦点を当てた世界初の研究であり、[RU2001] の手法と比べて数分の1程度まで処理時間を削減している。

また、派生研究で行ったネットワークの分断確率の解析については、エッジ故障モデルに基づく解析は[MS1956]にまで遡ることができる。一方で、確率的手法を用いたノード故障モデルに基づくネットワーク分断確率の解析については、これまでなされてこなかった。すなわち、この派生研究はノード故障モデルに基づくネットワーク分断確率を解析した世界初の研究である。また、近年の無線センサーネットワークにおいては、ノード故障を考えることが重要になると予想している。

(3) 今後の展望

4-(1) で示した派生研究を推し進め、符号理論における解析手法を広く他の研究分野に適用していく。このようなアプローチをとることで分野融合的な新たな研究分野を開拓できると予期している。

[RU2001] T. Richardson and R. Urbanke, "Efficient encoding of low-density parity-check codes," IEEE Trans. on Inform. Theory, vol.47, no.2, pp.638-656, Feb. 2001.

[MS1956] E. F. Moore and C. E. Shannon, "Reliable circuits using less reliable relays," Journal of the Franklin Institute, vol. 262, no. 3, pp. 191-208, 1956.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 SAEKI Toyohiko, NOZAKI Takayuki	4. 巻 E102.A
2. 論文標題 An Improvement of Non-Binary Single i -Burst of Insertion/Deletion Correcting Code	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 1591 ~ 1599
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.E102.A.1591	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12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Y. Hanaki, T. Nozaki
2. 発表標題 Erasure Correcting Codes by Using Shift Operation and Exclusive OR
3. 学会等名 International Symposium on Information theory (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐伯豊彦, 野崎隆之
2. 発表標題 2元Shifted VT 符号と多元Shifted VT 符号の組織符号化
3. 学会等名 電子情報学会 情報理論研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takayuki Nozaki
2. 発表標題 Analysis of Breakdown Probability of Wireless Sensor Networks with Unreliable Relay Nodes
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Information Theory 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野崎 隆之
2. 発表標題 LDPC符号の並列符号化法
3. 学会等名 第2回情報理論および符号理論とその応用ワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takayuki Nozaki
2. 発表標題 Cutsizes Distributions of Balanced Hypergraph Bipartitions for Random Hypergraphs
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Information Theory (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Takayuki Nozaki
2. 発表標題 Reduction of Decoding Iterations for Zigzag Decodable Fountain Codes
3. 学会等名 International Symposium on Information Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 野崎 隆之
2. 発表標題 ランダムハイパーグラフに対する K 均等分割のカットサイズ分布
3. 学会等名 第 39 回 情報理論とその応用シンポジウム 2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 池埜 祐汰, 野崎 隆之
2. 発表標題 低重みな対角小行列を有するブロック三角行列による 二元および多元非正則LDPC 符号の符号化法
3. 学会等名 電子情報学会 情報理論研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武元 玲央南, 野崎 隆之
2. 発表標題 最大ラン長が制限された単一挿入/削除訂正符号の符 号化法
3. 学会等名 電子情報学会 情報理論研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 花木 勇太, 野崎 隆之
2. 発表標題 シフト演算と排他的論理和を用いた消失訂正符号に対する組織符号化
3. 学会等名 電子情報学会 情報理論研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野崎隆之
2. 発表標題 ランダムハイパーグラフに対するK 均等分割のカットサイズ分布
3. 学会等名 研究集会「実験計画法と符号および関連 する組合せ構造」2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toyohiko Saeki, Takayuki Nozaki
2. 発表標題 An Improvement of Non-binary Code Correcting Single b-Burst of Insertions or Deletions
3. 学会等名 International Symposium on Information Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>通信理論研究室 野崎隆之 http://comm.sci.yamaguchi-u.ac.jp/nozaki/index.html 通信理論研究室 山口大学 http://comm.sci.yamaguchi-u.ac.jp/nozaki/res_noz.html 山口大学通信理論研究室 http://comm.sci.yamaguchi-u.ac.jp/ 山口大学研究者総覧 http://kyouin02.atm-y.jimu.yamaguchi-u.ac.jp/search/IST?ISTActId=FINDJPDetail&ISTKidoKbn=&ISTErrorChkKbn=&ISTFormSetKbn=&ISTTokenChkKbn=&userId=100001608</p>

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