

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2008～2009

課題番号：20860074

研究課題名（和文） 情報通信における確率伝播アルゴリズムの改良と性能解析

研究課題名（英文） Improvement and theoretical analysis of belief-propagation algorithm for information-communication technology

研究代表者

細谷 剛（HOSOYA, Gou）

早稲田大学・理工学術院・助手

研究者番号：60514403

研究成果の概要（和文）：

研究成果の概要（英文）：

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	870,000	261,000	1,131,000
2009年度	830,000	249,000	1,079,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：通信・ネットワーク工学

キーワード：(1) 通信・ネットワーク工学，(2) 情報理論，(3) 通信路符号化，(4) 誤り訂正符号，(5) 低密度パリティ検査符号，(6) 確率伝播アルゴリズム，(7) パースト消失，(8) アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

近年 R. G. Gallager によって発明された低密度パリティ検査(LDPC) 符号とその代表的な復号法である確率伝播型(BP) 復号法の組み合わせが注目を浴びており，性能の高い符号化法と復号法の開発は重要である．LDPC 符号と BP 復号法の組み合わせは高い訂正能力をもち，少ない計算量で封号できる．

LDPC 符号に関する成果の多くでは，対象となる通信路にて，消失が時点に対しランダムに発生することを仮定している．現実的にはランダムに消失が発生するモデルは稀であり，パースト消失のように時点に対し連続して消失が発生するモデルも考慮する必要

がある．インターネットなどのパケット通信で通信環境が大幅に変化する際，一度に情報が連続して消失する場合，パースト消失であると考えられている．また，消失訂正に失敗する条件が明確に定義されているため，さらに復号を続行してより多くの消失を訂正することは容易であると考えている．

このような中で申請者が主に取り組んだ研究テーマは下記に掲げる3つの研究テーマ(1)～(3)に取り組んだ．

- (1)パースト消失に適した LDPC 符号の改良とその理論解析
- (2)改良した BP 復号法の理論的な性能解析
- (3)非正則 LDPC 符号の構成法

2. 研究の目的

(1) パースト消失に適した LDPC 符号の改良とその理論解析

パースト消失に適した符号として開発された LR-LDPC 符号は、設計パラメータによっては従来の符号と同じパースト消失の訂正能力になるため（注：大半のパラメータでは LR-LDPC 符号の方が優れている）、パラメータの変化によって変わる従来の符号との性能差を理論的に明らかにする。

(2) 改良した BP 復号法の理論的な性能解析

ストップセットを用いた解析を行うことで BP 復号法の性能を導くことが可能となる。これは、BP 復号法によって訂正できないパターンがストップセットと呼ばれ、明確に定義されているためである。

そこで改良した BP 復号法で訂正できないパターンを明確にすることで、BP 復号法と同様に解析を行い、性能を明らかにする。

(3) 非正則 LR-LDPC 符号への一般化

正則 LDPC 符号で行われた議論を非正則 LDPC 符号で行うことで、解析方法の一般化や符号の構成法について明らかにする。

3. 研究の方法

(1) パースト消失に適した LDPC 符号の改良とその理論解析

パースト消失に適した LR-LDPC 符号を提案し、従来の LDPC 符号との性能を測る評価式より、提案した符号がパースト消失に対し優れた性能であることを、数値計算ではなく理論的に示す。そのためには、入力された設計パラメータによって、2つの評価式の大小関係を明らかにすればよい。評価式を偏微分する、項ごとに分けるなど、その符号の設計パラメータによる振る舞いの違いを詳しく観察し、設計パラメータから符号の優劣を理論的に解析する。また提案した符号で性能が向上しない設計パラメータに対しても、性能を向上させる手がかりに結びつくと思われている。

(2) 改良した BP 復号法の理論的な性能解析

計算機による実験、及び BP 復号法と同様にストップセットを用いた理論解析を行う。その際、改良した BP 復号法においてストップセットのような訂正できない消失パターンを明確に導く必要がある。

(3) 非正則 LR-LDPC 符号への一般化

上記で掲げた計画で得られた結果を適時、非正則 LDPC 符号へ拡張する。非正則 LDPC 符号へ拡張することで、正則 LDPC 符号よりも優れた符号が得られる可能性はある。下記の文献のように、良い設計パラメータを得る成

果がある。

4. 研究成果

(1) パースト消失に適した LDPC 符号の改良とその理論解析

LR-LDPC 符号を構成する3つの符号において、それぞれの符号の性能は、疎行列の程度を示す指標である「密度」が決めてであることが判明した。ただし当初の計画とは違い、解析式の中身をさらに解析して性能の差異を明らかにすることは適わなかった。これらの3つの符号が全て、通常の LDPC 符号符号よりも性能が優れていることが性能が向上する条件であることも判明した。また、符号アンサンブルを用いて理論的に性能解析結果からもそのような傾向が明らかになった。

従来の解析では、復号が失敗する停止条件であるストップセットを用いて解析しているが、得られる下界の厳密性に問題がある。そこで最小ストップセットと呼ばれる、ストップセットよりも細かく場合分けして計算できる条件を適用し、よりタイトなパースト消失訂正能力の下界を得ることができた。

また、符号化率を可変に設定できるパンクチャド符号へ適用できる結果を得た。パンクチャを行うと、要求される訂正能力に応じて符号を無数に用意する必要がなく1つ用意すればよい。LR-LDPC 符号がパンクチャされた符号語ビットを効果的に訂正できる構造を有していることを示し、効果的にパンクチャを行う符号語ビットの選択法を提案した。

(2) 改良した BP 復号法の理論的な性能解析

BP 復号法を改良した2つの復号法を提案した。これらの復号法は、BP 復号法で失敗する停止条件を解消しつつ、訂正能力に対し如何なる劣化を伴わずに、より多くの訂正が可能であることを示した。提案した復号法は BP 復号法で失敗するような消失パターンであってもさらに多くの消失を復号できる。これはストップセットと呼ばれる LDPC 符号に生じるループが原因であるため、検査行列が疎な LDPC 符号から効率良くループを除去することで、いかなる性能の劣化も伴わずに BP 復号法では訂正できない消失ビットを訂正することができ、訂正ができる十分条件を与えた。提案する2つの復号法は探索するループの対象領域が異なり、復号性能と計算量はトレードオフの関係にある。また計算機シミュレーションによる実験から、様々な LDPC 符号に対し約 1/10 ~ 1/20 復号後の誤り率を低減できることを示し、計算量（復号に要する演算回数）の増加も BP 復号法と比べて極僅かであることを示した。

(3) 非正則 LR-LDPC 符号への一般化

(1)で明らかになった結果は正則な LDPC 符号を対象としており,よりクラスが広く,性能が優れた非正則 LDPC 符号へ拡張することも行った.正則の場合と同様に,「密度」と,非正則 LDPC 符号の性能を決定付ける重要な要素であるタナーグラフ上における「次数 2 の変数ノード」が性能を左右されていることが判明した.これらの示唆を生かし,今後の研究成果のさらなる発展が期待される.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

G. Hosoya, H. Yagi, M. Kobayashi, and S. Hirasawa, "Adaptive decoding algorithms for low-density parity-check codes over the binary erasure channel," IEICE Trans. Fundamentals, no.10, pp.2418--2430, vol.E-92, Oct. 2009.

G. Hosoya, T. Matsushima, and S. Hirasawa, "A combined matrix ensemble of low-density parity-check codes for correcting a solid burst erasure," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E-91, no.10, pp.2765--2778, Oct. 2008.

Y. Sato, G. Hosoya, H. Yagi, and S. Hirasawa, "A method of grouping symbol nodes for shuffled BP decoding algorithm," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E-91, no.10, pp.2745--2753, Oct. 2008.

[学会発表](計 12 件)

G. Hosoya, T. Matsushima, and S. Hirasawa, "Construction and performance analysis of irregular low-density parity-check code ensemble for correcting a single solid burst erasure," Proc. Pre-ICM International Convention on Mathematical Sciences, (ICMS2008), Delhi, India, Dec. 2008.

G. Hosoya, T. Matsushima, and S. Hirasawa, "A note on analysing LDPC codes for correcting a burst erasure," IEICE Technical Report, vol.109, no.357, IT2009-52, pp.7--10, Jan. 2010.

細谷 剛, 松嶋 敏泰, 平澤 茂一, "符号化率が適応的に可変で確定的に構成したパンクチャド LDPC 符号の性能," 第 32 回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, pp.264--269, 湯田温泉, 山口, 2009 年 12 月.

谷口 祐樹, 細谷 剛, 後藤 正幸, 平澤 茂一, "メッセージ伝播型復号法に効果的な非正則 LDPC 符号の構成法と復号順

序の決定法," 電子情報通信学会技術研究報告, vol.109, no.143, IT2009-11, pp.31--36 2009 年 7 月.

寺本 賢一, 細谷 剛, 後藤 正幸, 平澤 茂一, "一般化 LDPC 符号に対する部分符号の構造を利用した効率的な符号化法," 電子情報通信学会技術研究報告, vol.109, no.143, IT2009-10, pp.25--30 2009 年 7 月.

G. Hosoya, M. Kobayashi, and S. Hirasawa, "Constructions of Irregular LDPC codes for a burst erasure," IEICE Technical Report, vol.108, no.472, IT2008-111, pp.447--452, March 2009.

石川 祐臣, 佐藤 芳行, 細谷 剛, 平澤 茂一, "グラフを組み合わせた LDPC 符号アンサンブルに対する最小スパンの解析," 電子情報通信学会技術研究報告, vol.108, no.472, IT2008-109, pp.435--440, 2009 年 3 月.

佐藤 芳行, 細谷 剛, 平澤 茂一, "Group Shuffled BP 復号法に対する非正則 LDPC 符号の次数分布を考慮した効果的なグループ分割法," 電子情報通信学会技術研究報告, vol.108, no.472, IT2008-107, pp.421--426, 2009 年 3 月.

細谷 剛, 松嶋 敏泰, 平澤 茂一, "ソリッドバースト消失の訂正に適した非正則 LDPC 符号の構成について," 第 31 回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, pp.843--848, 鬼怒川, 栃木, 2008 年 10 月.

藤田 雄大, 細谷 剛, 八木 秀樹, 平澤 茂一, "オイラーベクトルの特性を利用した局所的に改変された画像の検出手法," 第 31 回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, pp.837--842, 鬼怒川, 栃木, 2008 年 10 月.

佐藤 芳行, 細谷 剛, 八木 秀樹, 平澤 茂一, "次数分布を考慮した非正則 LDPC 符号に対する Replica Shuffled BP 復号法," 第 31 回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, pp.129--134, 鬼怒川, 栃木, 2008 年 10 月.

金井 貴大, 細谷 剛, 八木 秀樹, 平澤 茂一, "一般化 LDPC 符号に対する BF 復号法の修正とその性能解析," 2008 年電子情報通信学会, 基礎・境界ソサイエティ大会, A-6-6, 明治大学, 神奈川, 2008 年 9 月.

[図書](計 0 件)

[産業財産権](計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.aoni.waseda.jp/hosoya/index-j.html>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

細谷 剛 (HOSOYA GOU)

早稲田大学・理工学術院・助手

研究者番号：60514403