

平成22年 4月 22日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006 ～ 2009

課題番号：18079009

研究課題名（和文） 通信系における確率推論アルゴリズムの性能解析

研究課題名（英文） Analysis of the capabilities of the probabilistic inference algorithm in communications systems

研究代表者 和田山 正 (Tadashi Wadayama)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20075374

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、LDPC 符号の重み分布、ストップセット重み分布など LDPC 符号に関して重要な量に関する統計量(平均・分散・共分散など)の導出を行い、「統計的符号理論」の基礎付けを行うことと、凸最適化・線形計画法・最急勾配法など最適化手法の考え方を取り入れて、新しい LDPC 符号の復号原理を確立することにある。これらの目標に関する研究成果は、5編の雑誌論文（国際論文誌に掲載）と8件の国際会議発表（査読有）にまとめられている。

研究成果の概要（英文）：

In this project, we focus the following two research goals: [1] development of statistical coding theory: many important parameters of LDPC codes can be regarded as a random variable. It is worth studying their statistics based on combinatorial techniques. [2] development of novel decoding algorithms based on optimization techniques such as linear programming, gradient descent method. The outputs of this project are reported in 5-academic journal papers and 8-international conference paper.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,500,000	0	2,500,000
2007年度	2,500,000	0	2,500,000
2008年度	2,500,000	0	2,500,000
2009年度	2,500,000	0	2,500,000
年度			
総計	10,000,000	0	10,000,000

研究分野：情報理論

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信ネットワーク工学

キーワード：確率推論、情報理論、LDPC 符号、情報統計力学、符号理論

1. 研究開始当初の背景

高い信頼性が要求される通信システムにおいては、LDPC（低密度パリティ検査）符号をはじめとした疎グラフに基づく符号（疎

グラフ符号）と BP（Belief Propagation）などの確率推論アルゴリズムを組み合わせがスタンダードになってきている。これらのシステムに対する理論的な性能解析は、工学的に重要な問題であり、解決が求められている

状況にある。また、BP 以外の復号原理に基づく LDPC 符号の復号手法についての関心が高まりつつある。

2. 研究の目的

上記の背景を元にして、LDPC 符号の復号法に関して、その性能解析と新しい復号原理の追求を本研究の目的としている。もう少し具体的に見ると本研究の目的は大きく次の2つに分類することができる。

[目的 1]

LDPC 符号の重み分布、ストップセット重み分布など LDPC 符号に関して重要な量に関する理論的知見を低密度 2 元行列のアンサンブル解析の手法を通してより強固なものとする。特に重み分布等を確率変数と見なし、その統計量(平均・分散・共分散など)の導出を行い、「統計的符号理論」の基礎付けを行う。

[目的 2]

凸最適化・線形計画法・最急勾配法など最適化手法の考え方を取り入れて、新しい LDPC 符号の復号原理を確立する。従来、符号理論は本質的に有限体の世界でその理論が展開されてきた。本アプローチにおいては、復号問題・信号検出問題が完全に実数空間における最適化問題として定式化される。凸解析、連続最適化(KKT 条件、最急降下法、ニュートン法など)、凸多面体などと深い関係のある、いわば「連続世界の符号理論」を追求していくことは学問的に大いに価値がある。

3. 研究の方法

目的 1 に関しては、主として理論解析となるため、アンサンブル解析の手法に基づき検討を進めてきた。一方、目的 2 の最適化に基づく復号手法については、主として内点法に基づく凸最適化の文脈で復号問題を捉え直すという観点から研究を進めるとともに、線形計画法・勾配降下法の考え方にに基づく復号手法の開発と検討を進めてきた。

4. 研究成果

本計画研究の主要な研究成果は、5 編の雑誌論文(国際論文誌に掲載)と 8 件の国際会議発表(査読有)にまとめられている。目的 1・目的 2 に分けて以下に簡単に成果の概要を述べる。

[目的 1]

- (1) LDPC 符号を利用した消失訂正システムの解析に重要となるストップセットの

重み分布について、その重み分布の平均解析を行った。また、その漸近的な振る舞いについて検討した。この研究の成果として、冗長行を含む検査行列アンサンブルの性質について初めてその消失訂正能力の評価が可能となった。

- (2) また、重み分布の漸近的な振る舞いの評価を行うための上界・下界の導出を行った。また、スパース 2 元行列アンサンブルにおける重み分布について、共分散公式を導出し、誤り見逃し確率の評価を行った。見逃し誤り率の評価は、ARQ など誤り検出システムの性能評価に重要な役割を果たす。

これらの成果は、情報理論分野で最も評価の高い国際論文誌である IEEE Trans. Inform. Theory に掲載された(論文番号(1), (5))。

[目的 2]

最適化(数理計画法)の考え方に基づく LDPC 符号の復号として凸計画問題に基づく復号法の検討を行うとともに非線形最適化の考え方に基づくビットフリッピング型復号法の検討も同時に進めた。

この復号法の特徴は、LDPC 符号の復号問題を凸計画問題として定式化し、バリア関数を利用した内点法でその最適化問題を高速に解く、という点にある。本手法は、線形ベクトル通信路の範疇に入る無記憶通信路、シンボル間干渉通信路、MIMO 通信路、マルチプルアクセス通信路など様々な通信路に適用が可能であり、幅広い応用が期待されている。

LDPC 符号の復号問題の凸計画問題としての定式化、および内点法の適用、アルゴリズムの詳細等の基本アイデアは完全に代表研究者のオリジナルである。情報理論に関する最大の国際会議である International Symposium on Information Theory ISIT 2008(トロント)では線形ベクトル通信路に適した内点復号法を発表している。また、ISIT 2009(ソウル)では主パス追跡型内点法に基づく線形計画復号法を発表するなど国際会議を通しての関連研究のプライオリティ確保への取り組みは十分に行なわれている。また、CDMA 検出問題、2 次元干渉通信路における等化問題への凸最適化からのアプローチの研究を展開している。なお、主論文については、IEEE Trans. Inform. Theory に掲載が決定されている。

本アプローチの特徴を一言で述べると受信器の処理である等化・誤り訂正処理などをすべて凸最適化問題として定式化し、内点法により一気にその最適化問題を解いてしまお

うというものである。通信伝送、情報源圧縮といった応用を最終的な目標としておいているため1つの最適化問題を数マイクロ秒以下という非常に短い時間内に解く必要がある。このような高速リアルタイム処理を目指すためには、定式化した問題に既存の最適化パッケージ(ソフトウェア)を適用する、というアプローチは力不足である。通信伝送路の性質、LDPC符号の特徴を十分に利用した高速な復号アルゴリズムを構成し、かつ実現可能性を持つ実装法を開発する必要がある。このような観点から、復号アルゴリズムの構成と理論解析の両面から受信器の設計原理の確立を目指してきた。

提案アプローチは、従来の誤り訂正符号の復号法と異なる復号原理に基づく手法であり、現在の受信器の設計原理とは根本的に異なるアプローチを目指している。この意味から、本研究計画は、十分な独創性に基づくものであると考えている。さらに、研究結果が従来法に対して十分に競争力を持つことが明確になれば、本手法が現在の受信器(有線、無線、記録システム)の構成原理に大きなインパクトを与えると考えられる。また、符号理論の新しい展開を生み出す可能性もあり、実用的意味のみならず学術的な意味からも本研究を進める意義は極めて高いと考えている。

主たる成果は次の通りである。

(1)凸最適化の考え方に基づき、内点法をベースとする復号法を開発した。提案法は、特に線形ベクトル通信路などの通信路で優れた特性を発揮することが実験的に確認されている(国際会議番号(4))。

(2)線形計画復号法の性能向上のために、組合せ最適化分野で利用される切除平面法のアイデアを利用する手法を考案した。切除平面法に基づく基本多面体の緊密化により、あLDPC符号の復号性能の向上が確認されている。(論文番号(2))

(3)勾配降下法の考え方に基づく新しいビットフリップ型復号法を開発を行った。提案法は、従来法と比較して良好なビット誤り率特性を与えることが実験的に明らかになった(論文番号(4))。

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5件)

(1) (査読有) Tadashi Wadayama, ``On Undetected Error Probability of Binary Matrix Ensembles'', IEEE Trans. Inform. Theory, pp.2168-2176, vol.56, no. 5, May (2010).

(2) (査読有) Tadashi Wadayama, Keisuke Nakamura, Masayuki Yagita, Yuuki Funahashi, Shogo Usami, Ichi Takumi, ``Gradient Descent Bit Flipping Algorithms for Decoding LDPC Codes'', IEEE Trans. Comm., pp.1610-1614, vol.58, no.6, June (2010).

(3) (査読有) Yoshiyuki Kabashima, Tadashi Wadayama, Toshiyuki Tanaka, ``A typical reconstruction limit for compressed sensing based on Lp-norm minimization'', Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, L09003, <http://www.iop.org/EJ/abstract/1742-5468/2009/09/L09003>, (2009)

(4) (査読有) Makoto Miwa, Tadashi Wadayama, Ichi Takumi, ``A Cutting-Plane Method based on Redundant Rows for Improving Fractional Distance'', IEEE Journal on Selected Areas in Communications, pp.1005-1012, vol.27, no.6, Aug. (2009)

(5) (査読有) Tadashi Wadayama, ``Average Stopping Set Weight Distributions of Redundant Random Ensembles'', IEEE Trans. Inform. Theory, pp.4991-5004, vol.54, no.11, Nov (2008).

[学会発表] (計8件) (査読有国際会議)

(1) Tadashi Wadayama, "On random construction of bipolar sensing matrix with compact representation" in Proceedings of IEEE Information Theory workshop (Taormina, Sicily, Italy) (October 11-16, 2009)

(2) Tadashi Wadayama, "An LP decoding algorithm based on primal path-following interior point method", in Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2009), Seoul

(June 28-July 3, 2009)

(3)Tadashi Wadayama, Keisuke Nakamura, Masayuki Yagita, Yuuki Funahashi, Shogo Usami, Ichi Takumi, "Gradient descent bit flipping algorithms for decoding LDPC codes" in Proceedings of International Symposium on Information Theory and Its Applications, Auckland (December 7-10, 2008).

(4)Makoto Miwa, Tadashi Wadayama, Ichi Takumi, "A cutting plane method based on redundant rows for improving fractional distance", in Proceedings of International Symposium on Turbo coding & Related Topics, Lausanne (September 1-5, 2008).

(5)Tadashi Wadayama, "Interior Point Decoding for Linear Vector Channels based on Convex Optimization", in Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (July 6-11, 2008), Toronto (2008).

(6)Tadashi Wadayama, "On Undetected Error Probability of Binary Matrix Ensembles", in Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2008), Toronto (July 6-11, 2008).

(7)Tadashi Wadayama, "Interior point decoding for linear vector channels," in Proceedings of International Workshop on Statistical-Mechanical Informatics 2007, Kyoto (September 16-19, 2007)

(8)Tadashi Wadayama, "Average Stopping Set Weight Distribution of Redundant Random Matrix Ensembles," in Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2007), Nice (June 24-29 2007).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://twlab.web.nitech.ac.jp/wadayama/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

名古屋工業大学大学院工学研究科 教授
和田山 正 (Tadashi WADAYAMA)

研究者番号 : 20075374

(2)研究分担者 : なし

(3)連携研究者 : なし