

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 1日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560370

研究課題名（和文）凸最適化手法に基づくLDPC符号の復号法とその応用

 研究課題名（英文） Decoding Algorithms for LDPC Codes based on
Convex Optimization and Its Applications

研究代表者

和田山 正 (WADAYAMA TADASHI)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：20275374

研究成果の概要（和文）：本計画研究では、凸最適化の考えに基づくLDPC(低密度パリティ検査)符号の復号法を提案するとともに、その応用としてCDMA方式におけるマルチユーザ検出アルゴリズム、2次元シンボル間干渉通信路に適した等化アルゴリズムの開発を行った。さらに、最急勾配法、線形計画法といった連続最適化手法を通信系のアルゴリズムに適用するときに生じる諸問題について得られた理解に立脚して最適化の見地から、新しいビットフリップ型復号法や線形計画復号により復号可能な置換符号を開発した。

研究成果の概要（英文）：In this project, we have developed a class of decoding algorithms for LDPC codes based on convex optimization. As other applications of convex optimization based decoding, a multi-user detection algorithm for CDMA systems and a two dimensional equalization algorithm were devised. Furthermore, thorough the concept of continuous optimization, such as gradient descent method and linear programming, a novel class of bit-flipping algorithms, called GDBF algorithms, was invented.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

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：符号理論, 凸最適化, LDPC符号, 情報理論

1. 研究開始当初の背景

誤り訂正符号の復号法に連続最適化の考え方が導入されたのは比較的最近(2002年頃)であり、その先駆的な仕事としてFeldmanらによる線形計画法に基づく復号法が挙げられる。Feldmanらの仕事に刺激され、Vontobel, Koetter, Yang, Burshteinらにより線形計画復号法の改良、および理論的解析

がなされてきており、それらは符号理論における新しい潮流となりつつある。

2. 研究の目的

本計画研究の目標は次の3つである。

目標1：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。凸最適化に基づく受信器の設計原理の確立：内点法などの凸最適化手法に基づく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す。

目標 2: BP の復号性能を超える。現実的な計算量で BP (Belief propagation) 復号法の復号性能を上回るアルゴリズムの構成を目指す。

目標 3: 連続世界の符号理論の確立：通信工学、情報理論、連続最適化、組み合わせ最適化のクロスする領域において、新しい符号理論の可能性を追求する。

3. 研究の方法

本計画研究においては、理論的な側面と実験的側面がある。理論的側面においては、様々なアイデアを研究室所属の学生たちと議論を重ねながら出していった。そのアイデアについては、まず計算機実験によりアイデアの妥当性を検証し、有望なものについては、アルゴリズム設計、理論の展開を進めていった。

4. 研究成果

本計画研究における主な研究成果を挙げる。

(1) 勾配降下型ビットフリップ復号法(2010, Wadayama et al.)

ビットフリップ型復号法は、BP には復号性能では及ばないものの、計算量が少なく回路実装に向いているため、LDPC 符号の復号法として注目されている。従来のビットフリップ型復号法においては、比較的アドホックな考え方でビットフリップルールが決められていた。本研究では、LDPC 符号の復号問題において、ある非線形の目的関数を定義し、その目的関数の最大化の形に復号問題を定式化しなおした。この定式化により勾配降下型のビットフリップアルゴリズムを自然に導くことが可能となった。提案アルゴリズムは、従来法と比較して優れたビット誤り率特性を発揮することに加えて、その収束特性も良好である。この成果は近年、復号器の回路規模に興味を持つ研究者の間で興味を持たれており、しばしば引用されている。

(2) 内点法に基づく LDPC 符号の復号法(2010, Wadayama)

Feldman の LDPC 符号の線形計画復号法においては、LDPC 符号の復号問題が検査行列により定まる緩和多面体に関する線形計画問題として近似的に定式化できることが示されている。本研究では、緩和多面体に基づき対数バリア関数を定義することにより、内点法による LDPC 符号の復号が可能であることを実証した。特に線形干渉が生じる通信路において提案方式は、従来法と比較して、十分に競争力を持つことが示され、連続最適化に基づく復号法という新しいクラスの復号法の潜在的可能性を明らかにした。

(3) 2次計画法に基づく CDMA マルチユーザ検出アルゴリズム(2011, 伊藤・和田山)

CDMA におけるマルチユーザ検出問題は、計算量的に困難な問題の通信関連の問題のひとつである。本研究では、ニュートン法を利用することにより、収束速度の速いマルチユーザ検出アルゴリズムの構成を目指した。提案アルゴリズムは、高速性と低い誤り率を両立するものであり、マルチユーザ検出問題への最適化アプローチの有効性を実証するものである。

(4) 線形計画復号可能な置換符号(2012, Wadayama and Hagiwara)

置換符号とは、ベクトル $(1, 2, 3, \dots, n)$ にいくつかの置換を作用させて得られるベクトルの集合である。最近では、フラッシュメモリ符号化などの応用分野において興味を持たれている符号クラスである。本研究では、線形制約条件で置換行列を制約するというアイデアに基づいた、新しい置換符号のクラスを提案した。提案符号は、線形計画法を用いて効率よく復号が可能であるという特長を持つ。

以上の成果は、IEEE の論文誌、または電子情報通信学会の論文誌に掲載されている。

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. 和田山 正, ``最適化手法に基づく誤り訂正符号の復号アルゴリズムについて(総報告)'', 統計数理, 採録決定, 2013

2. Tadashi Wadayama, Manabu Hagiwara, ``LP Decodable Permutation Codes based on

Linearly Constrained Permutation Matrices,' ' *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 5454-5470, vol. 58, no. 6, Aug. (2012)

3. 伊藤慎吾, 和田山 正, ``2次計画法に基づく同期 CDMA マルチユーザ検出アルゴリズム,' ' 電子情報通信学会和文誌 A, Vol. J94-A, No. 8, 649-656, 2011

4. Tadashi Wadayama, ``Interior Point Decoding for Linear Vector Channels based on Convex Optimization,' ' *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 4905-4921, vol. 56, no. 10, Oct. (2010)

5. 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)

[学会発表] (計 7件)

1. 不破 和広, 和田山 正, ``Pure involution 置換符号に基づく新しい置換符号について", 電子情報通信学会技術研究報告, 1/20, 筑波大学, 2012

2. Akiyuki Yano and Tadashi Wadayama, Probabilistic analysis of the network reliability problem on a random graph ensemble, *International Symposium on Information Theory and Its Applications* (ISITA 2012), Honolulu (2012)

3. Yuki Fujii and Tadashi Wadayama, A coding theoretic approach for evaluating accumulate distribution on minimum cut capacity of weighted random graphs, *International Symposium on Information Theory and Its Applications* (ISITA 2012), Honolulu (2012)

4. Tadashi Wadayama and Manabu Hagiwara, LP decodable permutation codes based on linearly constrained permutation matrices, *Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory* (ISIT2011), St. Petersburg (2011)

5. 不破和広, 和田山正, ``差分写像法に基づく LDPC 符号に適した反復復号法", 電子情報通信学会技術研究報告, 9/22, 東北学院大学, 2010

6. 伊藤 慎吾, 和田山 正, ``2次計画法に基づく CDMA マルチユーザ検出アルゴリズム-ビット反転法による性能改善-'', 第33回情報理論とその応用シンポジウム, 12/1, 信州松代ロイヤルホテル, 2010

7. 今西 洋介, 和田山 正, ``MIMO 通信路に適した半正定値計画緩和符号'', 第33回情報理論とその応用シンポジウム, 12/2, 信州松代ロイヤルホテル, 2010

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

和田山 正 (WADAYAMA TADASHI)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号 : 20275374

(2)研究分担者

()

研究者番号 :

(3)連携研究者

()

研究者番号：

|