

平成 2 7 年 6 月 3 0 日現在

機関番号： 1 7 2 0 1

研究種目： 若手研究(B)

研究期間： 2012 ~ 2014

課題番号： 2 4 7 6 0 3 0 3

研究課題名 (和文) 各種通信路における LDPC 畳込み符号の能力評価と性能改善に関する研究

研究課題名 (英文) Evaluation and Improvement of the Decoding Performance of LDPC Convolutional Codes over Several Channels

研究代表者

廣友 雅徳 (HIROTOMO, Masanori)

佐賀大学・工学 (系) 研究科 (研究院) ・准教授

研究者番号： 0 0 5 2 9 7 9 5

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,200,000 円

研究成果の概要 (和文) : LDPC畳込み符号は、低密度のパリティ検査行列を畳込み符号の構造を持たせて設計する誤り訂正符号である。そのような符号の設計方法によって優れた復号特性が得られる。本研究では、各種通信路における能力評価のためのパラメータ (最小自由距離、重み分布) を高速に計算する方法を開発する。LDPC畳込み符号のグラフ構造と代数構造を統合的に活用し、効率的な計算法を実現する。さらに、その能力評価に基づき、LDPC畳込み符号の性能改善を検討する。

研究成果の概要 (英文) : Low-density parity-check (LDPC) convolutional codes are error correcting codes constructed by sparse parity-check matrices of convolutional codes. The codes show good performance when they are decoded by iterative algorithms. In this research, we proposed an efficient methods for computing the free distance and the weight spectrum of LDPC convolutional codes. We focus on structural property of parity-check matrices of LDPC convolutional codes, and reduce the complexity of computing the free distance and the weight spectrum. Furthermore, we discuss about the improvement of decoding performance of LDPC convolutional codes over several channels.

研究分野：情報通信工学

キーワード：誤り訂正符号 LDPC畳込み符号 重み分布 最小自由距離 復号特性

1. 研究開始当初の背景

今日の情報化社会では、ネットワーク上に保存されたデータをモバイル通信やインターネット接続回線を介して利用するクラウドベースのサービスが普及している。そのサービスを利用するためには高速な通信インフラが必要になる。次世代の通信技術として IEEE802.16m 規格のモバイルブロードバンドや 40Gb/100Gb Ethernet が検討されており、ネットワークの高速化は著しい。通信品質の向上（誤り率の低減）はサービスの信頼性にかかわるため、高速な通信基盤を構築するにあたり重要な課題になっている。

誤り訂正符号は送信する側でデータに冗長を付加することによって、通信路で発生した誤りを受信側で訂正可能にする符号化技術である。その一つである低密度パリティ検査（Low Density Parity Check：LDPC）符号は Shannon 限界（Shannon の第二定理で示されている通信路容量の限界）に迫る復号特性（誤り訂正能力）を示す符号として注目され、次世代の無線通信規格 WiMAX2（IEEE802.16m）や LTE-Advanced で実用化が検討されている。LDPC 符号はブロック符号に分類され、疎な（行列内の 1 の密度が低い）パリティ検査行列によって設計される線形ブロック符号である。その検査行列を最適に設計することによって優れた能力を発揮する。一方、ブロック符号とは異なる種類である畳込み符号を用い、畳込み符号の検査行列を疎にして設計する LDPC 畳込み符号が近年注目されている。

2. 研究の目的

誤り訂正符号のクラスである LDPC 畳込み符号は優れた復号特性が得られる符号である。その設計法は拘束長を無限大にした場合の漸近的性能の解析に基づいている。しかしながら、工学的実用面においては、実装可能なサイズの符号設計や能力評価が必要になるにもかかわらず、十分な研究がなされていない。本研究では、LDPC 畳込み符号の能力評価パラメータ（復号誤りの要因となる符号構造の特徴）を高速に計算する方法を開発する。LDPC 畳込み符号のグラフ構造と代

数構造を統合的に活用し、効率的な計算法を実現することによって、能力評価法を構築する。

3. 研究の方法

本研究では、各種通信路における LDPC 畳込み符号の能力評価手法を構築することを目的に、LDPC 畳込み符号の最小自由距離、重み分布と呼ばれる能力評価パラメータを高速に計算する方法を開発する。開発する方法では、重み分布計算のための木探索アルゴリズムを高速化する。更に、実用的なサイズの LDPC 畳込み符号に対しても導出可能にするため、グラフ構造と代数構造を統合的に活用し、アルゴリズムの計算量削減を図る。開発した手法を用いて最小自由距離、重み分布が計算可能になれば、能力評価のみならず、復号誤りの要因を除去するように符号設計を行い、性能改善も可能である。開発した能力評価パラメータを計算する方法を応用し、各種通信路において優れた性能を発揮する LDPC 畳込み符号の設計方法を与える。

4. 研究成果

(1) 擬巡回符号から構成される LDPC 畳込み符号の重み分布計算法

擬巡回符号に基づいて設計される LDPC 畳込み符号を対象として、その重み分布を効率的に計算する方法を開発した。開発した手法では、擬巡回符号から構成される LDPC 畳込み符号の多項式形式のパリティ検査行列が単項式のみになることに着目し、等価な距離構造を持ち、メモリサイズが小さいパリティ検査行列に変換する。重み分布計算のための木探索の計算量はメモリサイズに依存するため、メモリサイズを小さくすることによって重み分布計算に必要となる探索ノード数が削減できる。メモリサイズを削減したパリティ検査行列を用い、それから構成される符号木に前方・後方木探索アルゴリズムを適用することで、計算対象とする LDPC 畳込み符号の重み分布を求める。

開発した手法を用いて、いくつかの LDPC 畳込み符号の重み分布を求めた結果を表 1 に示す。表 1 の $\mathbf{H}_i(D)$ はそれぞれ Circulant 行

表 1: 元のパリティ検査行列 $\mathbf{H}_i(D)$ とメモリサイズが削減されたパリティ検査行列 $\mathbf{H}_i''(D)$, および、それから得られた重み分布

	$\mathbf{H}_i(D)$	m_s	$\mathbf{H}_i''(D)$	m_s''	d_{free}	$A_{d_{\text{free}}}, A_{d_{\text{free}}+1}, \dots, A_{d_{\text{free}}+N}$
$\mathbf{H}_2(D)$	$\begin{bmatrix} D & D^2 & D^4 & D^8 & D^{16} \\ D^5 & D^{10} & D^{20} & D^9 & D^{18} \\ D^{25} & D^{19} & D^7 & D^{14} & D^{28} \end{bmatrix}$	21	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & D^4 & D^3 & D^2 \\ 1 & D^4 & D^{16} & 1 & 1 \\ D^{17} & D^{10} & 1 & D^2 & D^7 \end{bmatrix}$	17	24	6, 0, 6, 0, 8, 0, 45, 0, 120, 0, 462
$\mathbf{H}_3(D)$	$\begin{bmatrix} D & D^9 & D^{20} & D^{58} & D^{34} \\ D^{13} & D^{56} & D^{16} & D^{22} & D^{15} \\ D^{47} & D^{57} & D^{25} & D^{42} & D^{12} \end{bmatrix}$	57	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & D^{10} & D^{42} & D^{37} \\ D^6 & D^{41} & 1 & 1 & D^{12} \\ D^{31} & D^{33} & 1 & D^{11} & 1 \end{bmatrix}$	42	24	5, 0, 0, 0, 0, 0, 0
$\mathbf{H}_4(D)$	$\begin{bmatrix} D & D^8 & D^{64} & D^{59} & D^{19} \\ D^{32} & D^{105} & D^{85} & D^{76} & D^4 \\ D^{118} & D^{38} & D^2 & D^{16} & D^{128} \end{bmatrix}$	126	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & D^{85} & D^{66} & D^{18} \\ D^{28} & D^{94} & D^{103} & D^{80} & 1 \\ D^{94} & D^7 & 1 & 1 & D^{104} \end{bmatrix}$	104	24	5
$\mathbf{H}_5(D)$	$\begin{bmatrix} D & D^{42} & D^{135} & D^{59} & D^{125} \\ D^{48} & D^{25} & D^{145} & D^{117} & D^{27} \\ D^{132} & D^{114} & D^{82} & D^5 & D^{29} \end{bmatrix}$	134	$\begin{bmatrix} 1 & D^{33} & D^{70} & D^{71} & D^{114} \\ D^{31} & 1 & D^{64} & D^{113} & 1 \\ D^{114} & D^{88} & 1 & 1 & D^2 \end{bmatrix}$	114	24	3

- ① 廣友雅徳，森井昌克，“擬巡回符号から構成される LDPC 畳込み符号の重み分布計算について，” 電子情報通信学会情報理

表 2: Felstrom らの構成法で設計した周期的時変 LDPC 畳込み符号の重み分布

w	符号化率 1/2 の $(m_s, 3(2), 5)$ LDPC 畳込み符号の重み分布 A_w					
	$m_s = 129$	$m_s = 257$	$m_s = 513$	$m_s = 1025$	$m_s = 2049$	$m_s = 4097$
5	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	4	4	4	4	4	4
9	1	0	0	0	0	0
10	125	253	509	1021	2045	4093
11	23	24	26	26	24	28
12	7	0	0	0	0	—
13	1236	2514	5274	10169	20830	—
14	420	193	211	220	—	—
15	15451	63514	257869	—	—	—
16	11591	24285	52941	—	—	—
17	4781	1802	—	—	—	—
18	259163	1074877	—	—	—	—
19	154446	249461	—	—	—	—
20	1933019	—	—	—	—	—
21	3382240	—	—	—	—	—
22	2002387	—	—	—	—	—

- 論研究会, 2012 年 9 月, 群馬県.
- ② 鶴見淳一, 廣友雅徳, 森井昌克, “多元 LDPC 符号の確率的な重み分布計算法について,” 第 35 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2012), 2012 年 12 月, 大分県.
- ③ 廣友雅徳, 森井昌克, “擬巡回符号から構成される LDPC 畳込み符号の重み分布計算法,” 第 35 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2012), 2012 年 12 月, 大分県.
- ④ 鶴見淳一, 廣友雅徳, 森井昌克, “多元 LDPC 符号の確率的な重み分布計算法について (II),” 電子情報通信学会情報理論研究会, 2013 年 3 月, 大阪府.
- ⑤ 廣友雅徳, 渡邊江実日, 上原健, “2 元線形符号の Trapping Redundancy の評価について,” 電子情報通信学会情報理論研究会, 2013 年 5 月, 福井県.
- ⑥ 杉本卓也, 廣友雅徳, 森井昌克, “巡回符号の構造を用いた最小ペア距離を求める方法,” 電子情報通信学会情報理論研究会, 2013 年 7 月, 東京都.
- ⑦ 杉本卓也, 廣友雅徳, 森井昌克, “シンボルペア符号の最小ペア距離を求める方法について,” 第 36 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2013), 2013 年 11 月, 静岡県.
- ⑧ 廣友雅徳, 森井昌克, “時変 LDPC 畳込み符号の重み分布の評価について,” 第 36 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2013), 2013 年 11 月, 静岡県.
- ⑨ 瀧田慎, 廣友雅徳, 森井昌克, “シンボルペア符号のシンδροーム復号法について,” 電子情報通信学会情報理論研究会, 2014 年 3 月, 愛知県.
- ⑩ 笹倉力, 廣友雅徳, 森井昌克, “シンボルペア畳込み符号の構成と最小ペア自由距

- 離の評価について,” 電子情報通信学会情報理論研究会, 2014 年 7 月, 兵庫県.
- ⑪ 瀧田慎, 廣友雅徳, 森井昌克, “シンボルペア通信路における巡回符号の復号法について,” 電子情報通信学会情報理論研究会, 2014 年 9 月, 千葉県.
- ⑫ 瀧田慎, 廣友雅徳, 森井昌克, “シンボルペア符号のシンδροーム復号法について,” 第 36 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2014), 2014 年 12 月, 富山県.
- ⑬ 廣友雅徳, 鶴見淳一, 森井昌克, “多元 LDPC 符号の確率的な重み分布計算法について (III),” 第 36 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2014), 2014 年 12 月, 富山県.

〔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〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣友 雅徳 (HIROTOMO, Masanori)
佐賀大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 00529795

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし