

平成 21 年 6 月 4 日現在

研究種目： 若手研究(B)
研究期間： 2006～2008
課題番号： 18760288
研究課題名（和文） 磁気記録の高密度化に向けた高性能誤り訂正符号の構成と評価
研究課題名（英文） Construction and Evaluation of Error Correcting Codes for High-Density Magnetic Recording
研究代表者
井坂 元彦（ISAKA MOTOHIKO）
関西学院大学・理工学部・准教授
研究者番号： 50351739

研究成果の概要：

本研究では、磁気記録の高密度化に向けて符号化と信号処理の立場から研究を行った。特に磁気ディスクでの信号検出の際に生じる広義の雑音から情報を保護するため、性能の高い誤り訂正符号を主たるテーマとして検討した。ストレージ機器では非常に高い信頼性が求められることから、小さな復号後誤り率を達成可能なターボ符号・低密度パリティ検査符号の構成を行い、かつ効率的に実行可能な復号アルゴリズムの提案、評価を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,300,000	0	1,300,000
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	300,000	3,800,000

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： 符号化, 反復復号, 磁気記録, 信号処理

1. 研究開始当初の背景

ハードディスクは記憶装置として広く利用され、重要性が急速に高まっているが、同時に大容量化が強く求められている。磁気記録系は多様な技術の複合体であるが、蓄積され

る情報の高密度化を図る上では、(広義の)信号処理からのアプローチが有力な手段の一つであると考えられている。特にストレージの信頼性向上の上では誤り訂正符号の使用が重要な役割を果たしているが、従来はリード・ソロモン符号が用いられることが多かつ

た。しかし、アナログ情報の利用が難しいことなど解決すべき事項が残されていた。一方、1990年代半ばに提案されたターボ符号や低密度パリティ検査 (LDPC) 符号と呼ばれる誤り訂正符号は、符号長が大きい場合にはシャノンの通信路容量に迫る性能を発揮すること、また信号検出との親和性が高いことから、今後の磁気記録系で使用する誤り訂正符号として有力な候補と考えられている。しかし、磁気記録で要求される信頼性の水準は非常に厳しく、その条件を十分に満足するような符号化と復号の方式が、これまでに提案されているとは言い難い状況にあった。

2. 研究の目的

磁気記録向けの符号化と信号処理には、必要とされる処理量が小さいことと併せて「符号化により付加される冗長度が小さく、かつ復号後の誤り率が十分小さい」という要件がデジタル通信などの他の応用と比べてより強く求められる。従来、リード・ソロモン符号とポスト処理と呼ばれる方式を組み合わせたものが主流となっていたが、最近になってターボ符号・LDPC符号およびターボ等化が注目されてきた。これらの符号化方式は、シャノンの通信路容量に迫る特性を達成しえることからデジタル通信分野で盛んに研究されており、その復号と信号処理との結合処理を効率的に実現し得る (ターボ等化) 点にも利点がある。しかし、磁気記録系への適用に当たっては、符号長が比較的小さい場合に観察される「エラーフロア」現象のため、当初期待された水準の有効性が示されておらず、既存の手法に対する優位性に関して結論がでない。

そこで本研究ではターボ符号・LDPC符号とその効率的な復号アルゴリズムの開発を統合的に扱うことで、符号化率が高く、実用的な

符号長においても十分な信頼性を確保する手法を提案することを目的とした。

3. 研究の方法

上で述べたように、従来のターボ符号・LDPC符号研究では、必要とされる信頼性の水準を満たすことが難しい状況にあった。このため、誤り訂正能力に優れた符号を設計すること、またそれに対する効率的な復号法を新たに開発することを主眼として研究を遂行した。また、実用的な観点からは符号長が比較的小さく制限される場合の検討が不可欠である。

これらの問題を解決するために、まず符号が有する構造と復号性能の関係を明らかにすることが必要となる。特に、確率的反復復号法を含めた既存の復号法の振る舞いに関して詳細な分析を行い、誤り訂正能力が高い符号を復号するにあたって求められる機構を明確にする。また、その結果に基づいて高符号化率の符号を対象とした新たな復号法の提案と符号の設計へつなげる。また、符号化および復号法の能力を評価する上では、

- ・ (ワード誤り率に関して最適な) 最尤復号の下での誤り率,
- ・ 実際に用いられる復号アルゴリズムの非最適性に起因する誤り率,

の双方に配慮する必要がある。これらについて理論的な検討とともに計算機シミュレーションを通して、その性能を評価した。

4. 研究成果

本研究における成果を以下に示す。

- (1) 直列接続符号化方式の提案とその性能評価

磁気記録で求められる「高符号化率・高信頼性」を実現する符号化方式として、ターボ符号（並列接続符号）に類する符号化方式である直列接続符号化とその反復復号法に関する検討を行った。これは、2種類の符号を接続することで得られるものであり、蓄積される情報はまず外符号と呼ばれる比較的短い線形ブロック符号で符号化される。さらに記号ごとのインタリーブ（ブロックをまたぐ記号の並びかえ）を経た後、符号化率1の畳込み符号化を行って符号語を得るものである。

ここで外符号としては、拡大ハミング符号と最小ハミング距離が6であるような拡大BCH符号を用い、内符号化では遅延素子を1個のみ含む差動符号化器としている。このように構成された高符号化率の符号に対してその漸近的な（符号の長さが非常に大きい場合）性能の評価を行った。その結果、以下のことが明らかになった：

- ① 復号後のワード誤り率に関して最適である最尤復号法を適用した場合に達成可能な漸近的性能について、符号の重み分布を用いて理論的に解析を行った。任意に小さいワード誤り率を達成し得る信号対雑音比の下限を計算したところ、シャノンの通信路容量に迫る性能を達成し得ることを確認できた。
- ② 上記の直列接続符号化法に対して、現実的な計算量で処理が可能な確率的反復復号法を適用した場合でも、シャノンの通信路容量に迫る優れた特性を達成することを確認した。

(2) 実用的な符号長における符号の設計と復号法の提案

前項では符号長が任意に大きくできる状況

における符号の評価を行ったが、実用化を考えた場合、数百から数千ビット程度の長さの符号を用いざるをえない。しかしながら、反復復号法がもつある種の非最適性により復号後の誤り率が高くなってしまいう「エラーフロア」と呼ばれる現象が生じる恐れがある。そこで、本研究では以下の検討を通して、現実的な環境でもよい性能を示す符号化・復号の方式を提案した：

- ① 反復復号法で発生し得る誤りのパターンを整理した上で、その発生を防ぐような確定的なインタリーブを設計した。これによりランダムに作成されるインタリーブを用いた符号と比して性能を大幅に向上させることに成功した。
- ② 反復復号の過程で計算される確率に対してスケーリングなどの処理を行うことで、誤り率特性が改善されることを見出した。これにより、シミュレーションにより確認できる誤り率の範囲においてはエラーフロアが生じないことが確認された。

以上の成果(1)および(2)により、実用的なストレージ機器での信頼性確保に有用な誤り訂正符号化と復号方式の一手法が示されたと考えられる。

(3) 信頼性に基づくLDPC符号の復号法に関する検討

LDPC符号に対して反復復号法を用いると、符号長が比較的短い場合には特性の劣化が生じる。この影響を軽減するために、信頼度に基づく復号法をLDPC符号の反復復号法と組み合わせることを検討した。ここでは、従来の反復復号で出力される軟出力値を信頼度として用いることで、線形符号に対する効率的に実行可能な軟判定復号を併用する。本研究における主たる貢献は、軟判定復号法に

おける候補符号語の効率的な列挙の部分であり，従来のよい性能を達成しつつ，同一の誤り率特性を得るために必要な計算量の削減に成功した。

この成果で得られた符号長が500ビット程度の符号に対する復号後の誤り率特性は，従来の文献で示されているものより優れている。さらに実用的な観点からは，処理量の増大を許容してでも性能の向上が求められる応用において有効な手法を提案している点に意義がある。

(4) ストレージの安全性のための符号化に関する基礎的検討

磁気記録系においては機密性の高い情報が蓄積されることも多いため，今後は信頼性のみならず情報の安全性を踏まえた符号化方式が有用であると考えられる。これらの性質を兼ね備えた方式を検討するため，誤り訂正符号を利用した暗号技術に関して基礎的検討を行った。また，そこで用い得るLDPC符号の設計も行った。

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 3 件)

1. 井坂 元彦,”確率推論に基づく復号法の情報理論的側面,” 日本神経回路学会誌, vol. 15, no. 4, pp. 256-265, Dec. 2008. 査読なし (学会からの依頼により執筆)

2. M. Isaka, P.A. Martin, and M.P.C. Fossorier,” Design of high-rate serially concatenated codes with low error floor,” IEICE Trans. Fundamentals, vol. 90E-A, no. 9, pp. 1754-1762, Sep. 2007. 査読あり

3. 井坂 元彦,”理論限界に迫る誤り訂正符号の手法,” 映像メディア学会誌, vol. 60, no. 9, pp. 1367-1372, 2006年9月. 査読なし(学会からの依頼により執筆)

[学会発表] (計 8 件)

1. M. Isaka,” Unconditionally secure protocol from lattices over the additive white Gaussian noise channel,” in Proc. of International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2008), pp. 1361-1366, Auckland, New Zealand, Dec. 10, 2008.

2. Y. Ueda, K. Yasunaga, and M. Isaka,” One-dimensional signal sets for cryptographic protocol,” 2008 情報理論とその応用シンポジウム (SITA2008), 鬼怒川, 2008年10月7日.

3. M. Isaka and Y. Shimizu,” Cryptographic primitives based on discrete-input additive white Gaussian noise channels,” in Proc. of International Symposium on Information Theory (ISIT2008), pp. 737-741, Toronto, Canada, July 8th, 2008.

4. 松田雄介, 井坂元彦,”信頼性に基づくLDPC符号の復号に関する一検討,” 平成20年度電子情報通信学会総合大会, 北九州市, 2008年3月20日.

5. M. Isaka and Y. Shimizu,” On the efficiency of oblivious transfer based on noisy channels,” Technical Report of IEICE, CS2007-77, 山口大学, 2008年3月5日.

6. M. Isaka,” Interleaver design for a class of high-rate serially concatenated codes,” in Proc. of International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2006), pp. 224-228, Seoul, Korea, Oct. 30th, 2006.

7.
M. Isaka, "Error floor and decoding with message scaling for accumulator-based and LDPC codes," in Proc. of IEEE Information Theory Workshop (ITW2006), 2.26, pp. 117-121, Chengdu, China, Oct. 25th, 2006.

8.
P. Martin, M. Isaka, and M.P.C. Fossorier, "Serial concatenation of linear block codes and a rate-1 convolutional code," in Proc. of 4th International Symposium on Turbo Codes and Related Topics, 109, Munich, Germany, Apr. 6th, 2006.

〔図書〕（計 1 件）

井坂 元彦, "第2章：情報と通信の数理（分担共著）", 現代数理入門, 宮西正宜, 茨木俊秀編, 関西学院大学出版会, 2009年（印刷中）.

6. 研究組織
(1) 研究代表者

井坂 元彦 (ISAKA MOTOHIKO)
関西学院大学・理工学部・准教授
研究者番号：50351739

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし