

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24年6月11日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560418

研究課題名（和文） 磁気記録用次世代誤り訂正技術

研究課題名（英文） NEXT GENERATION ERROR CORRECTING CODE FOR MAGNETIC RECORDING CHANNEL

研究代表者

三田 誠一（MITA SEIICHI）

豊田工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50319373

研究成果の概要（和文）：高密度磁気記録装置の実現に必要な次世代の符号誤り訂正技術として、2種の特長のある誤り訂正符号の積構成方式を考案した。さらに、隣接するトラック間の干渉に起因する符号誤りを低減できる技術を開発した。これらの提案手法の性能を総合的にシミュレーションにより評価した。この結果、所要の高密度記録状態でも、従来装置と同等の誤り率を達成できることが分かり、次世代磁気ディスク装置の仕様をほぼ満たすことが確認できた。

研究成果の概要（英文）：

In order to implement next generation magnetic recording data storage, I have proposed a novel product code using two kinds of error correction methods. Furthermore, I have proposed a novel canceller to reduce errors caused by inter-track interference. It has been confirmed by simulation that the use of both methods can reduce bit errors at nearly the same bit error rate as that of current equipment in a high density condition.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

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：LDPC 符号, 垂直磁気記録, Partial response, 非線形

1. 研究開始当初の背景

磁気ディスク装置は、情報通信ネットワークを支える大容量データストレージの中心的システムであり、小用量の記憶装置領域では、半導体ディスク装置と競

合しながらも、今後も主記憶装置としての位置付は変わらないものと予測されている。東北大学において発明された垂直磁気記録方式が2005年度に初めて製品化され、現在では、すべての磁気ディス

ク装置が、この垂直磁気記録方式を採用する状態になっている。記録密度が 200 から 300Gb/Inch²に到達し、すでに 2Tb/Inch²が情報ストレージ研究推進機構 (SRC:磁気ディスク関連の民間会社の共同出資による大学の磁気ディスク関連研究の支援機構) の次世代の技術ターゲットに掲げられている。また、記録形態も BPM (Bit Patterned Media:1 bitごとにディスク上に分離して記録する方式) が提案され、その関連技術の研究も活発になっている。しかし、このようにビットを分離する方式では、ディスク作成が高価になることが予想されるため、従来のままの記録を行い、信号処理により 2 次元の干渉を低減する方式 SWR (Shingled Write Recording:瓦ふき記録と呼称されている) の開発も期待されている。いずれの方式が採用されるにしろ、高密度なストレージ装置を実現する上では、磁気ヘッドにより検知された微弱な再生信号から、記録された情報を高い信頼度で復調するための再生信号処理技術 (PRML : Partial Response Maximum Likelihood) や誤り訂正符号化技術の高性能化が必須となる。

磁気ディスクにおける符号誤りは、従来の線形信号処理で対処できるものから高密度化の進展により、非線形処理が必要なものに急速に移行しつつある。非線形性は、(1) 符号間干渉が線形として処理できなくなった (2) 記録媒体から発生する雑音記録するパターンに依存する (パターン依存性雑音) などにより生じ、符号誤りの主要因になってきた。さらに、高密度化に伴う隣接トラックからの信号干渉も符号誤りを引き起こす重大な要因になってきた。

2.研究の目的

磁気ディスクの今後の高密度化に伴う符号誤りを実用レベルで訂正できる高効率な誤り訂正方法を確立することが基本的な目的である。研究開始当初は、Quadratic Programming を用いる SVM と Linear Programming を用いる LDPC 符号 (低密度パリティ検査符号) の融合を可能にする方式の探索を研究目的とした。しかしながら、次世代の磁気記録方式とされている BPM や SWR では、トラック幅の縮小に伴うトラック間干渉が、予想以上に大きく、これに伴う符号誤りを訂正するには、ランダム誤りおよびバースト誤りの両方の誤りを強力に訂正できる新たな誤り訂正方式が必要になった。さらに、研究期間中にトラック間干渉の影響を低減するための新たな信号処理方式の研究開発が急務となった。したがって、これらの要請に答えうる有効な誤り訂正および信号処理方式の確立が、研究の具体的目標である。

3.研究の方法

方式およびこれを具体化するアルゴリズムを考案し、これをシミュレーションで作成したデータ系列に適用し、その性能を確認する。誤り訂正方式に関しては、その性能をランダム誤りに対して、理論検証するとともに、BPM、SWR に基づくシミュレーションデータに適用し、評価する。また、トラック間干渉の影響を低減する手法の評価は、記録モデルに基づくシミュレーションデータにより評価する。

4.研究成果

(1) 誤り訂正符号の高性能化

BPM や SWR による磁気記録に対処できる次世代の誤り訂正符号では、ランダム誤りおよびバースト誤りの両方に対処できる必要があるが、特にランダム誤りに対しては、非常

に振幅が大きい誤りを考慮する必要がある。すなわち、従来の LDPC 符号の性能が最も発揮できるその振幅分布が正規分布する誤りよりは、むしろ、ハードエラーと呼ばれる符号 1 や 0 がほぼ反転する大きな誤り (SHE: scattered hard error) に対する訂正能力の向上が必要になることが、研究期間中に判明した。すなわち、当初考えていた LDPC 符号の性能改善よりさらに、多様な符号誤りに対処できる方式の開発が必要になった。一方従来のリードソロモン誤り訂正符号は、このような SHE には適しているが、シンボル単位でしか訂正できない。これをビット単位で消失訂正できる新たなアルゴリズムを基にして、LDPC 符号とリードソロモン符号を積符号形式で用いる新たな構成を考案した。これを、磁気ディスクで実用化されている 4k バイトのロングセクターに適用できる構成にし、性能評価した。図 1 にこの構成を示す。また、復号手順を図 2 に示す。LDPC の検査行列を有効に活かし、あらかじめ、SHE の発生位置を推定し、この部分の情報を消失訂正可能にする。この後、LDPC 符号で、軟判定し、この訂正結果をさらに、リードソロモン符号によるビットレベルでの消失訂正を行い、さらに、シンボル単位での訂正を行う復号手順を新たに開発した。復号性能を図 3 に示す。次世代磁気記録で発生すると予想される SHE に対して、現状の LDPC 符号やリードソロモン符号より、提案した積符号の構成の方が、誤り訂正能力が高いことが確認できた。

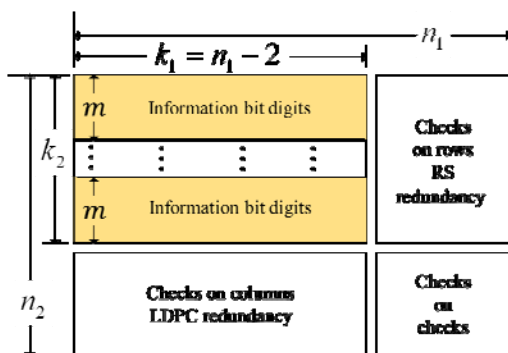


図 1 提案した積符号構成

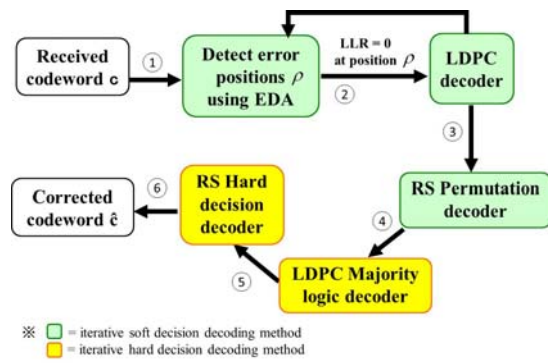


図 2 復号手順

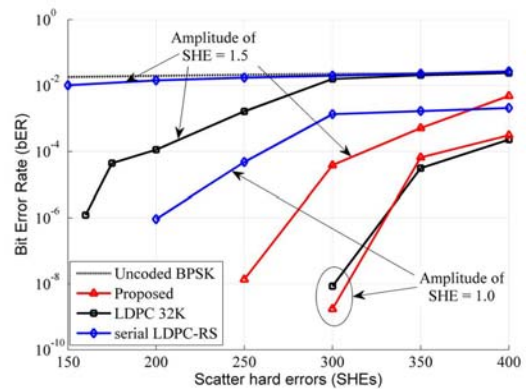


図 3 誤り訂正性能評価結果

さらに、リードソロモン符号によるビットレベルでの消失訂正範囲を拡大するための自己同型群の探索を行い、GF(2⁸)までの、パーミュテーション復号を可能にした。これにより、誤り訂正符号のコードレートの選択範囲を実用的なレベルにできた。コードレートの異なるリードソロモン符号の訂正性能を図 4 に示す。

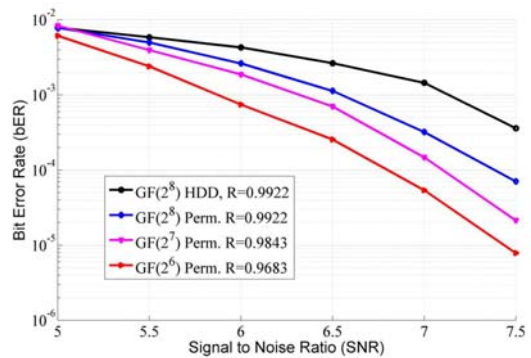


図 4 ビット単位消失誤り訂正性能評価結果

(2) 高密度化における LDPC 符号とトラック間干渉低減信号処理の効果

SWR による記録面は、直行したグレインモデルではなく、ボロノイ図に類似したグレインモデルになると考えられている。この場合、再生信号は、図 5 に示すボロノイ図特有の形状により、信号を取得したいグレイン以外のグレインの信号まで含むことが不可避である。そのため、白色ガウス雑音 (Additive White Gaussian Noise: AWGN) 等の従来の雑音以外に、このボロノイ図から来る雑音が含まれる。シミュレーション上で作成したボロノイ分散モデルに記録した信号を読み取り、復号を行う。復号には LDPC 符号を用い、信号を尤度比へ変換する方式として既存の BCJR アルゴリズムを用いる。また、隣接トラック間の符号間干渉 (Inter-Track Interference: ITI) を低減するための 32 状態のトレリス構造を用いる復号方式を考案した。これにより、ボロノイ分布した信号から来る信号の復号及ビット誤り率の低減能力を比較する。

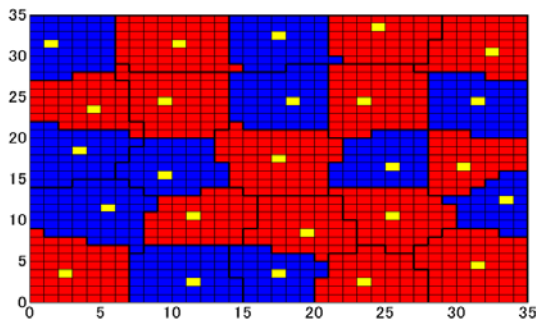


図 5 : ボロノイ分散モデル

①シミュレーション回路の構成

シミュレーション過程を図 6 に示す。ランダムに 2 値の信号を生成し、PG-LDPC 符号のエンコーダにより冗長を含む信号へと変換する。変換した信号を予め作成しておいたボロノイ分散モデルへと書き込む。

ボロノイ分散モデルから AWGN を加えた信号を取得し、BCJR アルゴリズムや ITI を考慮

する方式 (以下 ITI 復号方式と呼ぶ)、提案方式である 32 状態トレリスを用いる方式により尤度比へ変換する。その尤度比を用いて、LDPC 符号のデコーダにより、誤り訂正する。

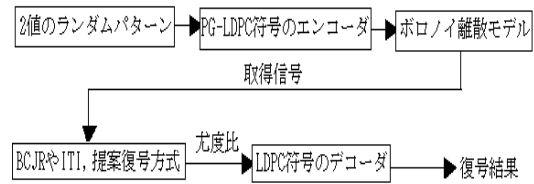


図 6 シミュレーション過程

② 32 状態復号方式の提案

ボロノイモデルを考えると、1 つのグレインに対し、読取りヘッド下に存在する読みたいグレインには、その上下からだけでなく、左右からもグレインの侵食が起こる。このようなモデルから信号を読み取り、復号する場合、隣接トラックの状態のみを考慮するだけでは、不十分である。よって、隣接トラックに加え同一トラック方向の隣接符号 (復号するグレインの左右のグレインがもつ符号) を考慮し、メトリックの重みを計算する復号方式を提案する。全体では 2^5 状態を持つ。また、状態遷移図は図 7 に示すトレリスで表現できる。

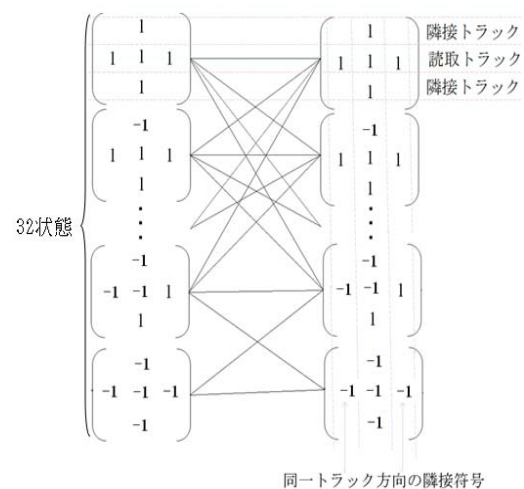


図 7 32 状態復号方式のトレリス線図

32 状態復号方式のメトリックは次式とし

て表せる。

$$-\frac{1}{2\sigma^2} \left(s_k - \sum_{n=0}^1 \begin{pmatrix} a \times U_n + b \times L_n + \\ c \times D_n + d \times R_n + \\ e \times C_n \end{pmatrix} \right)^2$$

$$0 \leq a \leq 1, 0 \leq b \leq 1, 0 \leq c \leq 1, 0 \leq d \leq 1$$

$$0 \leq a + b + c + d \leq 1$$

$$e = 1 - a - b - c - d$$

L_n 、 R_n はそれぞれ、同一トラック方向の左右の隣接グレインに記録された信号の値(1か-1)を表している。

③シミュレーション結果

ボロノイ離散モデルにおける各ビットの分散状態が、標準偏差 1.0 となるモデルから取得した信号に対し、LDPC 符号により 10 回の繰り返し復号を行った結果をそれぞれ図 8 に示す。図の横軸はボロノイモデルから読み取った信号の AWGN に対する SNR、縦軸に復号された信号のエラーレートを示す。なお、縦軸は対数表示をしてある図 8 から BCJR アルゴリズムを用いた場合と比べ、ITI 復号方式と 32 状態復号方式を用いることで大幅に低いエラーレートを実現できることがわかる。よって、両方式ともに、ボロノイ形状のために読取りたいグレインへ周囲のグレインが侵食することにより生じる雑音を低減することで、復号性能を大きく向上させたと言える。

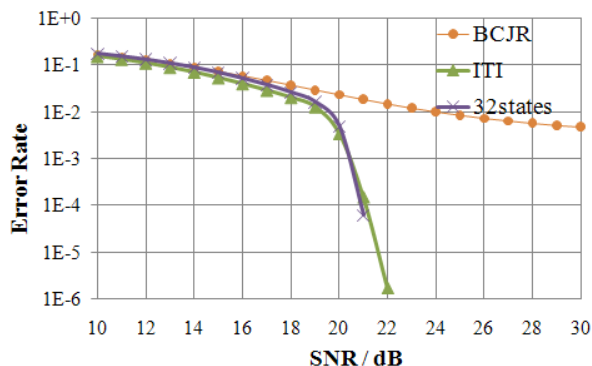


図 8 : 標準偏差 0.5 のモデルでの復号

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 2 件)

- ① S. Mita, Vo Tam Van, F. Haga, Reduction of bit errors due to inter-track interference using LLRs of neighboring tracks, IEEE Trans. Magn. Vol.47, No.10 pp.3316-3319, 2011, Oct. 査読あり
- ② Vo Tam Van, S. Mita, A novel error correcting system based on product codes for future magnetic recording channels, IEEE Trans. Magn. Vol.47, No.10, pp.3320-3323, 2011, Oct. 査読あり

[学会発表] (計 6 件)

- ① Vo Tam Van, S. Mita, A novel error correction strategy using Reed-Solomon binary images for magnetic recording channel, 電子情報通信学会 MR研究会, 2011年12月15日, 愛媛大学, 査読なし
- ② Vo Tam Van, S. Mita, A novel error correcting system based on product codes for future magnetic recording channels, IEEE International Magnetic Conference, 2011, April 27th, Taipei, 査読あり
- ③ S. Mita, Vo Tam Van, F. Haga, Reduction of bit errors due to inter-track interference using LLRs of neighboring tracks, IEEE International Magnetic Conference, 2011, April 27th, Taipei, 査読あり
- ④ 芳賀史也, 三田誠一, ボロノイ離散モデルに対する復号方式の提案, 電子情報通信学会MR研究会, 2011年3月11日, 名古屋大学, 査読なし
- ⑤ Vo Tam Van, H. Matsui and S. Mita, A class of generalized quasi-cyclic LDPC codes: high-rate and low-complexity encoder for data storage devices, IEEE Global Communication Conference, 2010, December 6th Florida, USA 査読あり
- ⑥ 三田誠一, 隣接トラック尤度比を用いたトラック間干渉に起因する符号誤りの低減, 電子情報通信学会 MR研究会, 2009年12月10日, 愛媛大学, 査読なし

[図書] (計 1 件)

- ① 三田誠一, 西谷卓, 澤口秀樹, 松井一, 森北出版株式会社、磁気ディスクの信号処理技術 PRML方式の基礎と実際, 2010, 200

6. 研究組織

- (1) 三田 誠一 (MITA SEIICHI)
豊田工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 50319373