

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8日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360188

研究課題名（和文） 超高密度垂直磁気記録のための信号処理方式開発に関する研究

研究課題名（英文） A Study on Development of Signal Processing Systems
for Ultrahigh-Density Perpendicular Magnetic Recording

研究代表者

大沢 寿 (OSAWA HISASHI)

愛媛大学・大学院理工学研究科・客員教授

研究者番号：50029336

研究成果の概要（和文）：2Tb/in²（1平方インチ当たり2兆ビット）を超える超高密度記録が望まれる次世代ハードディスク装置のための信号処理方式として二次元信号処理方式に関する研究を行った。超高密度磁気記録のための二次元信号処理方式として二次元ニューラルネットワーク等化器を開発した。これにより、従来の一次元線形等化器では困難である4Tb/in²を達成できることを示した。

研究成果の概要（英文）：As a signal processing system for the next-generation hard disk drive in which ultra-high density recording of more than 2Tb/in²（2 trillion bits per square inch） is required, the two-dimensional signal processing system is studied. A two-dimensional neural network equalizer as the two-dimensional signal processing system for ultra-high density magnetic recording is developed. It is shown that the equalizer can attain 4Tb/in² which the conventional one-dimensional linear equalizer cannot achieve.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2010年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

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：超高密度記録、垂直磁気記録、二次元磁気記録、シングル（瓦）記録、二次元信号処理方式、媒体モデル、記録再生モデル、二次元ニューラルネットワーク等化器

1. 研究開始当初の背景

本課題申請時における最先端のハードディスク装置（HDD）製品の記録密度は400Gb/in²程度であった。最近のHDDで採用されている垂直磁気記録において高密度化を図るためには、磁性粒子の微細化、熱的に安

定な磁性粒子、情報の書き換えが容易という三つの相反する特性（トリレンマ）を同時に満たす必要があり、既存技術の改良で1Tb/in²を超えることは難しいと言われていた。本研究代表者らは30年近くに亘って信号処理による磁気記録の高密度化の研究を続け

てきており、その過程で蓄積された技術を基に $2\text{Tb}/\text{in}^2$ を超えるような超高密度記録のための信号処理方式を開発しようとした。

2. 研究の目的

$2\text{Tb}/\text{in}^2$ を超える超高密度垂直磁気記録を達成できるような信号処理方式を開発する。

3. 研究の方法

(1) 次世代磁気記録方式として期待されている二次元磁気記録のための信号処理方式を実波形により開発することは超高密度領域においては困難を伴う。このため計算機シミュレーションにより短時間で精度良く実際のグラニューラ媒体及び記録過程・再生過程を表現できる二次元磁気記録再生系モデルの構築が望まれている。本研究では、このような要求をみたく離散グラニューラ媒体モデルと記録再生モデルを構築する。

(2) 二次元磁気記録では、上記のトリレンマを解決するために幅広のヘッドを用いて互葺きをするように直前に書かれたトラックを部分的に重ねて上書きして順次トラックを形成する互記録を採用する。これにより狭トラック化による高密度化が可能であるが、隣接トラックからのクロストーク（トラック間干渉）が性能劣化をもたらす。更に、垂直磁気記録に用いられるグラニューラ媒体によるジッタ性媒体雑音は高密度記録となる程大となり、これも性能劣化の要因となる。これらの問題を信号処理方式により解決することが切望されている。本研究では、トラック間干渉とジッタ性媒体雑音の影響を共に軽減できる二次元ニューラルネットワーク等化器を開発する。

4. 研究成果

(1) 媒体モデルの構築

従来の離散ポロノイ図による媒体モデルでは、理想核をランダムに揺らしてポロノイセルを構築している。このため、理想核からの変動量が小であると磁性粒子の形状や位置に周期性が現れる。逆に、ランダム性を付与するために変動量を大きくするとアスペクト比の大きなセルが顕著に現れると共に粒径分散も大となって実際のグラニューラ媒体を忠実にモデル化することが困難である。本研究では、ポアソンディスクサンプリングとロイドの緩和法に基づく新たな媒体モデルの構築法を開発した。これにより、磁性粒子の形状及び配置のランダム性と適度な粒径分散を兼ね備えた媒体モデルが得られた（下記雑誌論文⑦参照）。更に、ポロノイセルに凸包トリミングを繰り返し施すことにより、非磁性粒界を持つ実際のグラニューラ媒体に酷似した媒体モデルを構築できた（雑誌論文⑦参照）。

(2) 記録再生モデルの構築

記録過程モデルとして、記録ヘッドの磁界勾配、媒体スイッチング分散、静磁界及び交換結合磁界による磁性粒子間の相互作用磁界を考慮したモデルを構築した（雑誌論文①、③参照）。(1)で述べた手法により生成した媒体モデル上に、この記録過程モデルを用いてランダム系列を互記録した磁化パターンを図1に示す。但し、白色多角形は上向きに磁化された磁性粒子、黒色多角形は下向きに磁化された磁性粒子、灰色の線は磁性粒子間の非磁性粒界を表す。磁性粒子の平均粒径は 4.6nm 、平均粒径で規格化した粒径分散は 0.09 、平均非磁性粒界は 0.9nm である（その他のヘッド・媒体に関する条件は雑誌論文①参照）。また、黄色で示すひとつの格子は1ビットセルを表し、その縦の長さはトラックピッチで 16.8nm 、横の長さはチャンネルビット長で 8.2nm である。これは、以下で述べる符号化の際の符号化率 0.88 を考慮すると $4\text{Tb}/\text{in}^2$ の記録密度に相当する。図に見られるように、ランダムな形状と配置を持ち、しかも非磁性粒界を伴う磁性粒子が得られていることが分かる。また、得られた磁化パターンから超高密度記録における特徴的な磁化の様子が見て取れる。

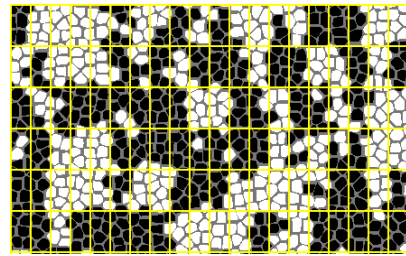


図1 媒体モデル上の磁化パターン

再生過程モデルでは、再生ヘッド出力電圧は上記の手法により得られた媒体磁化と再生ヘッドの再生感度関数の畳み込みにより求められる。本研究では、再生感度関数として \tanh （双曲線正接）関数による平易な閉形式表現を求めた（雑誌論文⑦参照）。これにより、従来の二次元有限要素法による再生感度関数を精度良く近似できる上に計算機シミュレーションの高速化を図ることができる。

(3) 二次元信号処理方式の開発

本研究で提案する二次元磁気記録再生系の符号化・復号化方式として、一般化パーシャルレスポンス1 (GPR1) チャネルを伴う低密度パリティ検査 (LDPC) 符号化・繰り返し復号化方式を図2に示す。入力系列を $128/130(0, 16/8)$ ラン長制約 (RLL) 符号化及び列重み 30、行重み 3、4096 バイト/セクタの LDPC 符号化した後、上記の記録過程モデルに基づいて離散グラニューラ媒体に記録

する。システム雑音として白色ガウス雑音を仮定し、読み出し点のSN比(SNR)を孤立再生波形の飽和レベルと、ジッタ性媒体雑音とシステム雑音からなる雑音の実効値の比で定義する。1番目のトラック(メイントラック)からの時刻 kTs における再生データを v_{lk} とする。但し、 T_s はチャンネルビット時間長である。メイントラックとその前後のトラックからの再生データをメモリに記録し、その出力を二次元等化器に入力する。図3に、3層階層型の二次元ニューラルネットワーク等化器(2D-NNE)の構成図を示す。

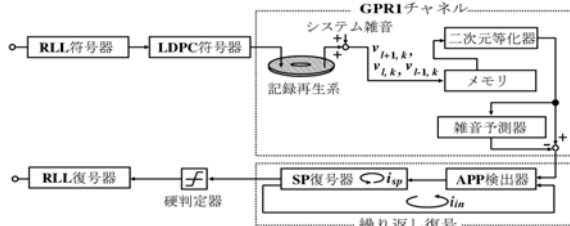


図2 LDPC符号化・繰り返し復号化方式

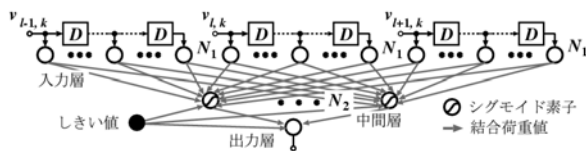


図3 二次元ニューラルネットワーク等化器

ここに、 D は T_s の遅延を表す遅延演算子、 N_1 、 N_2 は入力層及び中間層の素子数を表す。ビットレートで規格化された遮断周波数が0.4のローパスフィルタと2D-NNEによりメイントラックの再生系列がPR1チャンネルとなるように波形等化される。GPR1チャンネル出力はPR1チャンネル出力から M 次の雑音予測器出力を差し引くことにより得られる。更に、事後確率(APP)検出器とサムプロダクト(SP)復号器による繰り返し復号が行われて、零をしきい値とする硬判定器及びRLL復号器を介することで得られた出力系列と入力系列が比較されてビット誤り率が求まる。ここで、 i_{sp} はSP復号器内での繰り返し回数、 i_m はAPP検出器とSP復号器間の繰り返し回数である。

2D-NNEの構成と素子数及び結合数は誤差逆伝搬法と遺伝的アルゴリズム(GA)の組み合わせであるハイブリッドGAにより定めた。但し、入力層、中間層、出力層の素子数の初期値を、それぞれ54(18×3)、7、1とした。また、適応度は、理想的なPR1等化波形を教師信号としてこれに対する2D-NNE出力の平均二乗等化誤差(MSE)、高レベルの等化誤差の発生頻度、結合数を減らすように定めた(雑誌論文①参照)。これにより結合数は385から374に減った。図4に、2D-NNEを伴う

LDPC符号化・繰り返し復号化方式のビット誤り率特性を○印で示す。但し、記録密度を4 Tb/in²とし、 $M=3$ 、 $i_{sp}=20$ 、 $i_m=10$ としている。比較対象として従来の一次元及び二次元有限インパルス応答等化器(1D-FIRE、2D-FIRE)の場合の特性も×印と□印で示す。2D-FIREの構成は図3における中間層がないものと等化であり、タップ数は54である。1D-FIREはメイントラックに対する等化器のみから構成され、タップ数は18としている。これらのタップ係数は共に最急降下法を用いて定めた。図に見られるように、2D-NNEの場合は2D-FIREや1D-FIREの場合に比べて大幅に誤り率特性が改善されることがわかる。以上のように、超高密度磁気記録のための二次元信号処理方式として二次元ニューラルネットワーク等化器により、従来の一次元及び二次元線形等化器では困難な低い所要SNR比で4Tb/in²を達成できることが明らかとなった。

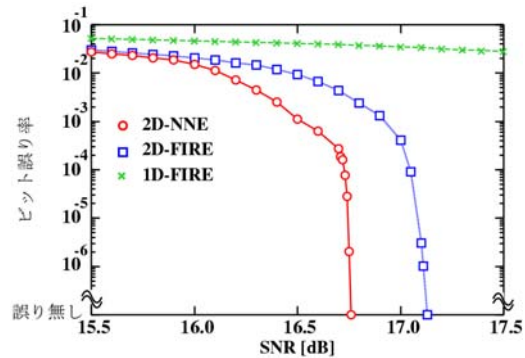


図4 ビット誤り率特性

(4) 得られた成果の国内外での位置づけとインパクト

超高密度領域においては、二次元磁気記録のための信号処理方式の実波形を用いた開発は困難であることから、離散ボロノイ図を用いた媒体モデル及び記録再生モデルによる二次元磁気記録再生系モデルの開発研究が国内外で盛んに行われている。本研究では、媒体モデルに関しては、従来モデルに比べて非磁性粒界を伴うグラニュー媒体を忠実に表現できる手法を開発した。また、記録過程モデルに関しては、従来モデルではビットセル中に重心が含まれるボロノイセルがすべて同一方向に磁化されると仮定する手法が用いられてきた。本研究では、従来モデルでは困難であった記録ヘッドの磁界勾配、媒体スイッチング分散、静磁界及び交換結合磁界による磁性粒子間の相互作用磁界等が磁性粒子の磁化反転に反映したモデルを開発できた。更に、従来の二次元有限要素法による再生感度関数を精度良く近似でき、計算機シミュレーションの高速化を図ることができ、平易な閉形式表現を開発した。計算機シ

ミュレーションにより、図4のような信号処理方式の性能評価に必要な誤り率特性を求めるためには図1の大きさのグラニュー媒体モデルを1万枚以上生成する必要がある。更に、媒体を構成する磁性粒子を忠実に磁化した後、再生信号処理するには膨大な処理過程が必要となる。これを市販の計算機でも現実的な処理時間内で可能とする忠実度の高いモデルを開発できたことから、昨年及び本年の国際会議 (INTERMAG、MMM) における本研究代表者らの発表 (学会発表①、④、⑥参照) は内外の超高密度記録を目指す研究者の注目を集めた。更に、これらのモデルを用いて超高密度磁気記録のための二次元信号処理方式としての二次元ニューラルネットワーク等化器によって従来の一次元及び二次元線形等化器では困難な低い所要 S R 比で 4Tb/in² を達成できることを世界に先駆けて示した。

(5) 今後の展望

本研究では、4Tb/in² の記録密度を達成すべく、二次元磁気記録再生系モデルを構築し、二次元信号処理方式としての LDPC 符号化・復号化方式のための等化器として二次元ニューラルネットワーク等化器を新たに設計して、従来の等化器の場合に比べて大幅な性能改善が得られることを示した。ここでは、LDPC 符号として binary LDPC 符号を採用したが、non-binary LDPC 符号とターボ等化の採用により更なる性能改善が期待できる (雑誌論文②参照)。また、本研究では二次元磁気記録を対象とする研究を行ったが、本研究で得られた研究成果をビットパターン媒体 (BPM) を採用する次世代磁気記録方式 (雑誌論文②、⑥、⑧参照) に適用することにより更なる高密度化が期待できる。

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 17 件)

- ① M. Yamashita, Y. Okamoto, Y. Nakamura, H. Osawa, K. Miura, S. Greaves, H. Aoi, Y. Kanai, H. Muraoka, “Modeling of writing process for two-dimensional magnetic recording and performance evaluation of two-dimensional neural network equalizer,” *IEEE Transactions on Magnetics*, 査読有,

vol. 48. no. 11, Nov. 2012 (to be appeared).

- ② Y. Nakamura, Y. Bandai, Y. Okamoto, H. Osawa, H. Aoi, H. Muraoka, “Turbo equalization effect for non-binary LDPC code in BPM R/W Channel,” *IEEE Transactions on Magnetics*, 査読有, vol. 48. no. 11, Nov. 2012 (to be appeared).
- ③ M. Yamashita, Y. Okamoto, Y. Nakamura, H. Osawa, K. Miura, S. Greaves, H. Aoi, Y. Kanai, H. Muraoka, “A study on modeling of the writing process and two-dimensional neural network equalization for two-dimensional magnetic recording,” *Journal of Applied Physics*, 査読有, vol. 111, no. 7, pp. 07B727-1-07B727-3, 2012.
- ④ H. Osawa, M. Kawae, Y. Okamoto, Y. Nakamura, H. Muraoka, “Neural network equalizer for GPRML system with post-processor,” *Physics Procedia*, 査読有, vol. 16, pp. 75-82, 2011.
- ⑤ K. Ozaki, Y. Okamoto, Y. Nakamura, H. Osawa, H. Muraoka, “ITI canceller for reading shingle-recorded tracks,” *Physics Procedia*, 査読有, vol. 16, pp. 83-87, 2011.
- ⑥ Y. Nakamura, Y. Okamoto, H. Osawa, H. Aoi, H. Muraoka, “Performance evaluation of LDPC coding and iterative decoding system in BPM R/W channel affected by head field gradient, media SFD and demagnetization field,” *Physics*

- Procedia, 査読有, vol. 16, pp. 88-93, 2011.
- ⑦ M. Yamashita, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Nakamura, Y. Suzuki, K. Miura, H. Muraoka, “Read/Write channel modeling and two-dimensional neural network equalization for two-dimensional magnetic recording,” IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, vol. 47. no. 10, pp. 3558-3561, Oct. 2011.
- ⑧ Y. Nakamura, Y. Bandai, Y. Okamoto, H. Osawa, H. Aoi, H. Muraoka, “A study on non-binary LDPC coding and iterative decoding system in BPM R/W channel,” IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, vol. 47, no. 10, pp. 3566-3569, Oct. 2011.
- ⑨ Y. Okamoto, K. Ozaki, M. Yamashita, Y. Nakamura, H. Osawa, H. Muraoka, “Performance evaluation of ITI canceller using granular medium model,” IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, vol. 47. no. 10, pp. 3570-3573, Oct. 2011.
- ⑩ Y. Suppakhun, P. Supnithi, Y. Okamoto, Y. Nakamura, H. Osawa, “Performance improvement system for perpendicular magnetic recording with thermal asperity,” IEICE Transactions on Electronics, 査読有, vol. E94-C. no. 9, pp. 1472-1478, Sept. 2011.
- ⑪ H. Osawa, S. Natsui, Y. Okamoto, Y. Nakamura, “Neural network equalizer matched to recording code in holographic data storage,” Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, vol. 50, pp. 09MB05-1-09MB05-4, Sept. 2011.
- ⑫ 大沢 寿, 河江政幸, 岡本好弘, 仲村泰明, 村岡裕明, “ポストプロセスを伴う PRML 方式のためのニューラルネットワーク等化器の設計,” 電子情報通信学会論文誌(C), 査読有, vol. J94-C. no. 9, pp. 261-268, Sept. 2011.
- ⑬ H. Osawa, M. Yamashita, Y. Okamoto, Y. Nakamura, “Neuro-interpolator for holographic data storage,” Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, vol. 49, no. 8, pp. 08KD10-1-08KD10-3, Aug. 2010.
- ⑭ 大沢 寿, 日野雅也, 岡本好弘, 仲村泰明, 村岡裕明, “サーマルディケイを伴う GPRML チャンネルのためのニューラルネットワーク等化器の単純化,” 電子情報通信学会論文誌(C), 査読有, vol. J93-C. no. 4, pp. 119-127, April 2010.
- ⑮ 岡本好弘, 武士末 卓, 仲村泰明, 大沢 寿, 村岡裕明, “NLTS を伴う垂直磁気記録再生系における特徴的な誤りパターンと パリティ検査符号を組み合わせたポストプロセスの性能評価,” 電子情報通信学会論文誌(C), 査読有, vol. J93-C. no. 4, pp. 128-137, April 2010.
- ⑯ Y. Nakamura, Y. Okamoto, H. Osawa, H. Aoi, H. Muraoka, “A study of LDPC coding and iterative decoding system in magnetic recording system using bit-patterned medium with write-error,” IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, vol. 45. no. 10, pp. 3753-3756, Oct. 2009.

[学会発表] (計 68 件)

- ① Y. Okamoto, “Modeling of writing process for two-dimensional magnetic recording and performance evaluation of two-dimensional neural network equalizer,” IEEE International Magnetism Conference, May 2012, Vancouver, Canada.
- ② Y. Nakamura, “Turbo equalization effect for non-binary LDPC code in BPM R/W Channel,” IEEE International Magnetism Conference, May 2012, Vancouver, Canada.
- ③ Y. Nakamura, “Overview of signal processing technology for hard disk drives,” Workshop on Signal Processing Technology for High Density Magnetic Recording (IEEE Magnetism Society Sendai Chapter), Dec. 2011, Sendai, JAPAN.
- ④ Y. Okamoto, “A study on modeling of writing process and two-dimensional neural network equalization for two-dimensional magnetic recording,” The 56th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials, Oct. 2011, Scottsdale, U.S.A.
- ⑤ Y. Nakamura, “Performance evaluation of non-binary LDPC coding and iterative decoding system in BPM-R/W channel with write-error,” The Magnetic Recording Conference, Aug. 2011, Minneapolis, U.S.A.

- ⑥ H. Osawa, “A study of R/W channel modeling for TDMR,” IEEE International Magnetism Conference, April 2011, Taipei, Taiwan.
- ⑦ Y. Nakamura, “A study on NB-LDPC coding in BPM R/W channel,” IEEE International Magnetism Conference, April 2011, Taipei, Taiwan.
- ⑧ Y. Okamoto, “Performance evaluation of ITI canceller using granular medium model,” IEEE International Magnetism Conference, April 2011, Taipei, Taiwan.
- ⑨ H. Osawa, “Neural network equalizer matched to recording code in holographic data storage,” International Symposium on Optical Memory 2010, Oct. 2010, Hualien, TAIWAN.

[図書] (計 1 件)

岡本 好弘, 仲村 泰明, “映像情報メディア工学大辞典 (技術編),” オーム社, 2010, 総ページ数 879 (担当 : pp. 178-187).

[その他]

ホームページ等

<http://kenqweb.office.ehime-u.ac.jp/Profiles/0009/0000650/profile.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大沢 寿 (OSAWA HISASHI)

愛媛大学・大学院理工学研究科・客員教授
研究者番号 : 50029336

(2) 研究分担者

岡本 好弘 (OKAMOTO YOSHIHIRO)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号 : 20224082

仲村 泰明 (NAKAMURA YASUAKI)

愛媛大学・大学院理工学研究科・講師
研究者番号 : 50380259