

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820161

研究課題名(和文) 多元LDPC符号による二次元磁気記録の高密度化に関する研究

研究課題名(英文) A study for two-dimensional magnetic recording of high recording density by non-binary LDPC code

研究代表者

仲村 泰明 (NAKAMURA, Yasuaki)

愛媛大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：50380259

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：4Tbit平方インチの高面記録密度想定した二次元磁気記録再生系モデルに低密度パリティ検査(LDPC：low-density parity-check)符号を誤り訂正符号として用い、複数の再生素子を有するアレイヘッド再生により得られた再生波形を用いた二次元等化を行い計算機シミュレーションを用いてビット誤り率(BER：bit error rate)特性による性能評価を行った。その結果、アレイヘッドと二次元等化器を用いることで、より大きなヘッドスキュー角の場合においても良いBER特性を示すことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：I evaluate the bit error rate (BER) performance of two-dimensional magnetic recording (TDMR) R/W channel with head skew under a specification of 4 Tbit per square inch employing low-density parity check coding and iterative decoding system using a two-dimensional finite-impulse response filter with the array head by computer simulation. The results show that our system can achieve the reliable BER performances by appropriately setting the reader scanning positions at the larger head skew angle.

研究分野：工学

キーワード：高密度磁気記録 瓦磁気記録 二次元磁気記録 アレイヘッド再生 LDPC符号

1. 研究開始当初の背景

ハードディスク装置 (HDD : hard disk drive) は小型化、大容量化が望まれている。HDD の小型化、大容量化を図るためには、面記録密度を高めることが重要であり、その向上は、ヘッド、記録媒体やヘッドディスクインターフェース等の要素技術の進展に支えられているのは勿論であるが、パーシャルレスポンス方式と最尤復号法を組み合わせた PRML (Partial Response Maximum Likelihood) 方式等の信号処理方式の進展に負うところも大きい。また、2000 年ごろより HDD の誤り訂正技術として研究されてきた LDPC (Low-Density Parity-Check) 符号とアナログ的な情報を繰り返し復号操作に利用する繰り返し復号は、“0”と“1”の硬判定情報を用いた従来の誤り訂正符号であるリード・ソロモン符号を凌駕する訂正能力を持つとして LSI 化されコンシューマモデルの HDD には既に採用され始めており、記録密度の向上に一役買っている。

HDD において超高密度記録を実現できる磁気記録方式としてシングル磁気記録 (SMR : Shingled Magnetic Recording) 方式と二次元信号処理方式を組み合わせた二次元磁気記録 (TDMR : Two-Dimensional Magnetic Recording) が注目されている。SMR では直前に書いたトラックのデータを部分的に上書きして実効的なトラック幅を狭めてトラック密度を高めようとする方式でガードバンドが存在しないため、隣接トラックからの波形干渉を考慮した信号処理が必要となる。また、超高密度記録状態における TDMR 方式は開発途上にあり、記録再生実験によって得られた実波形を信号処理方式の開発に用いることは困難であるため、記録再生系モデルを用いた計算機シミュレーションを繰り返し行いながら方式検討を実施せざるを得ない。

2. 研究の目的

本研究では、記録媒体の記録層に非磁性層を有するグラニューラ媒体と記録磁界勾配を考慮した記録ヘッド及び再生ヘッドの再生感度を考慮した磁気記録再生系モデルにおいて、8Tbit/inch²を超えるような超高密度記録を達成するためのトラック間干渉を制御できる信号等化方式を開発する。まず、非磁性粒界を有するポロノイ図を用いた磁気記録再生モデルの再生波形がスピンドルによる記録再生実験で得られた再生波形に比べて遜色ないこと示す。そして、今まで HDD で用いられてきたトラック干渉を考慮しない信号等化方式に比べてトラック間干渉を制御することにより性能改善が得られることを計算機シミュレーションによって確認する。さらに、多次元 LDPC 符号化・繰り返し復号化方式にトラック間干渉を制御できる信号等化方式を適用することで大幅記録密度向上が得られることを示す。また、超高密度記録による消費電力削減効果について

も示す。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために、まずマイクロマグネティクスによるヘッド・媒体モデルの妥当性を 200 Gbit/inch² の記録密度におけるスピンドルを用いた磁気記録再生実験で確認する。そして、そのヘッド・媒体モデルを用いてトラック間干渉を制御できる信号等化方式の開発を行い、多次元 LDPC 符号化・繰り返し復号化方式に適用してその性能評価を行う。また、トラック間干渉の影響を繰り返し復号における状態遷移確率計算に導入して繰り返し復号における訂正能力の向上に努める。最終的に、10 Tbit/inch² の超高密度記録を想定した記録再生シミュレーションを行い、超高密度記録を達成できることを示す。また、高密度記録による電力削減効果も併せて示す。

4. 研究成果

- (1) グラニューラ媒体モデルと用いた磁気記録再生系において 4 Tbit/inch² の記録密度を想定した計算機シミュレーションにより、最適なビットアスペクト比 (BAR : bit aspect ratio) の検討を行った。その結果、BAR が 3 の場合、最も良い特性が得られることを明らかとしている。
- (2) 4 Tbit/inch² の記録密度を想定した磁気記録再生系において、2 つの再生ヘッドを有するアレイヘッドと二次元等化器を用いて、LDPC 符号化・繰り返し復号化方式の性能評価を行った。その結果、2 つの再生ヘッドにより、2 本のトラックから再生した再生波形を用いて二次元等化することで一つの再生波形を用いた一次元波形等化の場合に比べてよい特性が得られることが明らかとなった。
- (3) グラニューラ媒体を用いた磁気記録再生系において 4 Tbit/inch² の記録密度を想定したシミュレーションを行い、二次元信号処理の効果について評価を行った。その結果、1 次元信号処理の場合に比べて面記録密度が 10% 増加することが明らかとなった。
- (4) ヘッドスキューを考慮したグラニューラ媒体を用いた磁気記録再生系において 4 Tbit/inch² の記録密度を想定したシミュレーションを行なった結果、正方向にヘッドスキューを与えた場合に BER (bit error ratio) 特性が急激に悪化することが明らかとなった。
- (5) 4 Tbit/inch² の記録密度を想定した SMR 記録再生系において、信号依存性雑音推定器の性能を評価した。その結果、自己回帰モデルを用いて信号依存性雑音を予測することで BER 特性が良くなることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- (1) J. R. Barry, B. Vasic, M. Khatami, M. Bahrami, Y. Nakamura, Y. Okamoto, Y. Kanai, Optimization of bit geometry and multi-reader geometry for two-dimensional magnetic recording, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, vol.52, 2016, 3100507
DOI : 10.1109/TMAG.2015.2483593
- (2) R. Suzutou, Y. Nakamura, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Kanai, H. Muraoka, Performance evaluation of TDMR R/W channel with head skew by LDPC coding and iterative decoding system, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, vol.51, 2015, 3002004
DOI : 10.1109/TMAG.2015.2445372
- (3) S. Kawamura, Y. Okamoto, Y. Nakamura, H. Osawa, Y. Kanai, H. Muraoka, Performance evaluation of signal dependent noise predictive maximum likelihood detector for two-dimensional magnetic recording read/write channel, Journal of Applied physics, 査読有, vol.117, 2015, 17D112-1
DOI : 10.1063/1.4908145
- (4) Y. Nakamura, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Kanai, H. Muraoka, Bit error rate performance for head skew angle in shingled magnetic recording using dual reader heads, Journal of Applied physics, 査読有, vol.117, 2015, 17D901-1
DOI : 10.1063/1.4906965
- (5) Y. Nakamura, N. Fujimoto, Y. Okamoto, H. Osawa, H. Muraoka, Evaluation of multiple reader location for TDMR R/W channel, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, vol.50, 2014, 3002104
DOI : 10.1109/TMAG.2013.2245863
- (6) H. Nobuhara, Y. Okamoto, M. Yamashita, Y. Nakamura, H. Osawa, H. Muraoka, Influence of writing and reading intertrack interferences in terms of bit aspect ratio in shingled magnetic recording, Journal of Applied physics, 査読有, vol.115, 2014, 17B729-1
DOI : 10.1063/1.4866393

〔学会発表〕(計 24 件)

- (1) 鈴藤稜太, 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好弘, 金井 靖, 村岡裕明, SMR におけるヘッドスキュー角に対するビット信頼度, 2016 年電子情報通信学会 総合大会, 2016 年 3 月 15~18 日, 九州大学 伊都キャンパス (福岡県福岡市)
- (2) 鈴藤稜太, 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本

- 好弘, 金井 靖, 村岡裕明, TDMR のためのアレイヘッドにおけるリードサイズ余裕に関する一検討, 電子情報通信学会 磁気記録・情報ストレージ研究会, 2015 年 12 月 10~11 日, 愛媛大学 総合情報メディアセンター (愛媛県松山市)
- (3) 村中雄大, 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好弘, 金井 靖, 村岡裕明, シングル磁気記録における記録ヘッド形状に対するビット信頼度評価, 平成 27 年度電気関係学会四国支部連合大会, 2015 年 9 月 26 日, 高知工科大学 香美キャンパス (高知県香美市)
- (4) 近藤宰吉, 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好弘, 金井 靖, 村岡裕明, SMR における MIMO-VD に対する隣接トラック間の記録位相ずれの影響, 平成 27 年度電気関係学会四国支部連合大会, 2015 年 9 月 26 日, 高知工科大学 香美キャンパス (高知県香美市)
- (5) 鈴藤稜太, 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好弘, 金井 靖, 村岡裕明, SMR におけるビット信頼度への隣接ビットの影響, 第 39 回 日本磁気学会学術講演会, 2015 年 9 月 8~11 日, 名古屋大学 東山キャンパス (愛知県名古屋市)
- (6) 鈴藤稜太, 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好弘, 金井 靖, 村岡裕明, シングル磁気記録における再生感度回転の一検討, 2015 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2015 年 9 月 8~11 日, 東北大学 川内北キャンパス (宮城県仙台市)
- (7) Y. Nakamura, R. Suzuto, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Kanai, H. Muraoka. A study on rotation of reading sensitivity in SMR R/W channel, IEEE The 26th Magnetic Recording Conference, Aug. 17-19, 2015, Minneapolis, USA
- (8) J. R. Barry, B. Vasic, M. Khatami, M. Bahrami, Y. Nakamura, Y. Okamoto, Y. Kanai, Optimization of bit geometry and multi-reader geometry for TDMR, IEEE The 26th Magnetic Recording Conference, Aug. 17-19, 2015, Minneapolis, USA
- (9) 鈴藤稜太, 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好弘, 金井 靖, 村岡裕明, TDMR におけるアレイヘッド再生のヘッドスキューに対する性能評価, 電子情報通信学会 磁気記録・情報ストレージ研究会, 2015 年 6 月 4~5 日, 東北大学 電気通信研究所 (宮城県仙台市)
- (10) 鈴藤稜太, 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好弘, 金井 靖, 村岡裕明, TDMR のためのマルチ入出力ビタビ復号器の性能評価, 電子情報通信学会 磁気記録・情報ストレージ研究会, 2015 年 6 月 4~5 日, 東北大学 電気通信研究所 (宮城県仙台市)
- (11) R. Suzuto, Y. Nakamura, H. Osawa, Y.

- Okamoto, Y. Kanai, H. Muraoka, Performance evaluation of LDPC coding and iterative decoding system in TDMR R/W channel with head skew, IEEE International Magnetics Conference, May 11-15, 2015, Beijing, China
- (12) 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好弘, 金井 靖, 村岡裕明, SMR における再生感度とトラックピッチの一検討, 2015 年電子情報通信学会 総合大会, 2015 年 3 月 10 ~ 13 日, 立命館大学 びわこ・くさつキャンパス (滋賀県草津市)
- (13) 河村俊哉, 岡本好弘, 仲村泰明, 大沢 寿, 金井 靖, 村岡裕明, シングル磁気記録におけるアレイヘッド再生に対する SDNP の性能に関する一検討, 2015 年電子情報通信学会 総合大会, 2015 年 3 月 10 ~ 13 日, 立命館大学 びわこ・くさつキャンパス (滋賀県草津市)
- (14) 鈴藤稜太, 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好弘, 金井 靖, 村岡裕明, ヘッドスキューのある SMR における LDPC 符号化・繰返し復号化方式の性能評価, 電子情報通信学会 磁気記録・情報ストレージ研究会, 2014 年 12 月 11 ~ 12 日, 愛媛大学 総合情報メディアセンター (愛媛県松山市)
- (15) 藤本直樹, 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好弘, 金井 靖, 村岡裕明, SMR におけるアレイヘッド再生のための二次元等化に関する一検討, 電子情報通信学会 磁気記録・情報ストレージ研究会, 2014 年 12 月 11 ~ 12 日, 愛媛大学 総合情報メディアセンター (愛媛県松山市)
- (16) S. Kawamura, Y. Okamoto, Y. Nakamura, H. Osawa, Y. Kanai, H. Muraoka, Performance evaluation of signal dependent noise predictive ML detector for TDMR R/W channel, The 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials, Nov. 3-7, 2014, Honolulu, USA
- (17) Y. Nakamura, Y. Okamoto, H. Osawa, Y. Kanai, H. Muraoka, Bit error rate performance for head skew angle in shingled magnetic recording using dual reader heads, The 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials, Nov. 3-7, 2014, Honolulu, USA
- (18) 河村俊哉, 岡本好弘, 仲村泰明, 大沢 寿, 金井 靖, 村岡裕明, シングル磁気記録における媒体雑音の原因に関する一検討, 平成 26 年度電気関係学会四国支部連合大会, 2014 年 9 月 13 日, 徳島大学 常三島キャンパス (徳島県徳島市)
- (19) 鈴藤稜太, 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好弘, 金井 靖, 村岡裕明, SMR におけるヘッドスキュー角に対する複数ヘッド再生による BER 特性, 平成 26 年度電気関係学会四国支部連合大会, 2014 年 9 月 13 日, 徳島大学 常三島キャンパス (徳島県徳島市)
- (20) 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好弘, 金井 靖, 村岡裕明, SMR におけるヘッドスキュー角に対するビット誤り率特性, 第 38 回日本磁気学会学術講演, 2014 年 9 月 2 ~ 5 日, 慶應義塾大学 日吉キャンパス (神奈川県横浜市)
- (21) B. Vasic, M. Khatami, Y. Nakamura, Y. Okamoto, Y. Kanai, J. R. Barry, S. W. Mclaughlin, E. B. Sadeghian, A study of TDMR signal-processing opportunities based on quasi-micromagnetic simulations, IEEE The 25th Magnetic Recording Conference, Aug. 11-13, 2014, California, USA
- (22) 岡本好弘, 仲村泰明, 大沢 寿, 金井 靖, 村岡裕明, シングル磁気記録再生シミュレーションの一検討, 電子情報通信学会 磁気記録・情報ストレージ研究会, 2014 年 6 月 12 ~ 13 日, 東北大学 電気通信研究所 (宮城県仙台市)
- (23) H. Nobuhara, Y. Okamoto, M. Yamashita, Y. Nakamura, H. Osawa, H. Muraoka, Influence of writing and reading ITI's depending on the recording patterns in shingled magnetic recording, IEEE International Magnetics Conference, May, 4-8, 2014, Dresden, Germany
- (24) Y. Nakamura, N. Fujimoto, Y. Okamoto, H. Osawa, H. Muraoka, Evaluation of multiple reader location for TDMR R/W channel, IEEE International Magnetics Conference, May, 4-8, 2014 Dresden, Germany.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rec.ee.ehime-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仲村 泰明 (NAKAMURA, Yasuaki)

愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：50380259