

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420358

研究課題名(和文)超高密度HDDに対するアレイヘッド対応信号処理方式

研究課題名(英文)Signal processing for array head reading in super high density HDD

研究代表者

岡本 好弘 (Okamoto, Yoshihiro)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・教授

研究者番号：20224082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：瓦磁気記録による超高密度HDDでは狭トラック化に伴う再生ヘッド感度の広がり、磁化遷移点変動によるジッタ性媒体雑音とともに性能劣化の要因となっている。そこで、グラニューラ媒体により計算機シミュレーションにより記録・再生過程での隣接トラックからの影響を明らかにし、アレイヘッド再生と二次元等化の適用によりトラックピッチを狭めてビット長を長くしてジッタ性媒体雑音の影響を緩和し、良好な性能を達成している。

研究成果の概要(英文)：The spreading of reader sensitivity for narrow-track recording is a degrading factor with the jitter-like medium noise due to the fluctuation of magnetic transitions in super high density HDD by shingled magnetic recording. The influence from the adjacent tracks in read and write processes is clarified by computer simulation using granular media. Array head reading and two-dimensional equalization enable a smaller bit-aspect ratio with narrower track pitch and longer bit-length to be choose, and achieve good performance.

研究分野：Information storage

キーワード：HDD SMR array head signal processing narrow track pitch TDMR 2D-equalization

1. 研究開始当初の背景

ハードディスク装置 (HDD: Hard disk drive) は、信頼性、記録容量、コスト等の面から多方面で使われており、今後も情報ストレージシステムの中核を担う電子デバイスとして期待されている。HDD はその誕生から長手磁気記録方式を採用して半世紀の間、記録密度の向上を維持してきたが、長手磁気記録方式の限界から 2005 年には垂直磁気記録方式に移行してその後も社会からの要求に応えるべく記録密度の向上を続けてきた。しかし、面記録密度が 1 テラビット/平方インチに迫るとそのスピードは鈍化し、第二世代の垂直磁気記録として、瓦磁気記録 (SMR: shingled magnetic recording) および熱アシスト磁気記録 (HAMR: heat-assisted magnetic recording)、マイクロ波アシスト磁気記録 (MAMR: microwave-assisted magnetic recording) といったエネルギーアシスト記録の導入が盛んに検討されていた。

これらの次世代記録方式によって狭トラック化が進むと再生ヘッドの再生感度が隣接トラックに及び所望のトラックからの信号に隣接トラックの信号がクロストーク雑音なり、これが性能劣化につながる。また、SMR では、トラックを重書きすることで記録ヘッドのトラック幅よりも狭いトラックを形成するため、記録時にもトラック間干渉 (ITI: inter-track interference) が誤り率劣化の原因となる。

2. 研究の目的

そこで本研究では、4 テラビット/平方インチ以上の記録密度で情報を記録・再生するために必要な記録・再生信号処理方式を考案し、実際の記録媒体、記録再生ヘッドに準じたパラメータを設定可能な記録再生シミュレータを用いて性能評価することで良好な信号処理方式を見出すことを目的とする。

3. 研究の方法

図 1 に隣接トラックの影響を低減するために TD-FIR (two dimensional-finite impulse response) フィルタによる二次元等化器を導入した低密度パリティ検査 (LDPC:

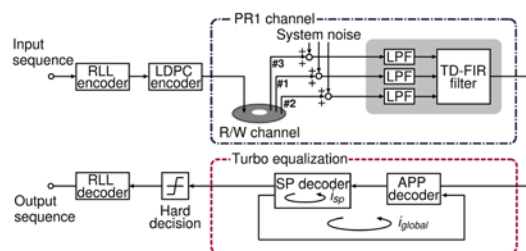


図 1 TD-FIR フィルタによる二次元等化器を導入した LDPC 符号化・繰返し復号方式

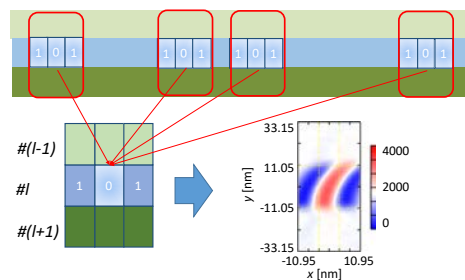


図 2 記録状態の抽出

low density parity check) 符号化・繰返し復号方式のブロック図を示す。

“1”、“0”の二値入力データ系列は RLL (run-length-limited) 符号化器、LDPC 符号化器で符号化されたのち、SMR 記録される。再生時には 3 つの再生素子を備えたアレイヘッドで連続する 3 本のトラックを再生し、ローパスフィルタ (LPF) および TD-FIR フィルタからなる二次元等化器により LDPC 符号化出力系列に対してクラス I-PR(PR1) 特性となるように波形等化する。PR1 チャンネル出力は、チャンネル復号器である事後確率 (APP: a posteriori probability) 復号器と SP (sum-product) 復号器からなるターボ等化器 (繰返し復号器) で信頼度を計算し、硬判定後に RLL 符号を復号して出力データ系列を得る。この記録再生システムを以下の方法で性能評価する。

- (1) SMR では次のトラックによってオーバーライトされない部分が情報を持つトラックとして残る。記録状態を観察することにより記録過程を性能評価する。図 2 に記録状態を観察するために特定のパターンを抽出してピクセルごとに頻度を評価する。
- (2) 二次元等化器出力と隣接トラックの記録情報との相互相関により、アレイヘッド再生と TD-FIR フィルタによって隣接トラックからのクロストーク雑音を低減できることを明らかにする。
- (3) 1 ビットの情報を記録するためのビット形状を示す BAR (bit aspect ratio) がアレイヘッド再生システムの性能に寄与することを示し、4 テラビット/平方インチの面記録密度に適した BAR を誤り率特性より明らかにする。

4. 研究成果

(1) 図 3 に 3 トラックにわたる 9 ビットの中央のビットが隣接ビットの情報によって受ける影響を示す。図には、それぞれ、中央トラックの 3 ビットの中に磁化反転のない“000”、前側に磁化反転のある“100”、後ろ側に磁化反転のある“001”、両側に磁化反転のある“101”を記録した場合の記録状態を示している。

まず、上下の情報に関わらず 4 つのパター

ンを比較すると、中央の情報“0”は“000”のときに最も信頼度が高く、“001”、“100”、“101”の順に信頼度が低下している。これは“000”は両側の情報が同一であるために影響を受けないが反転があれば反転位置が変動するため影響を受ける、磁化反転がトラ

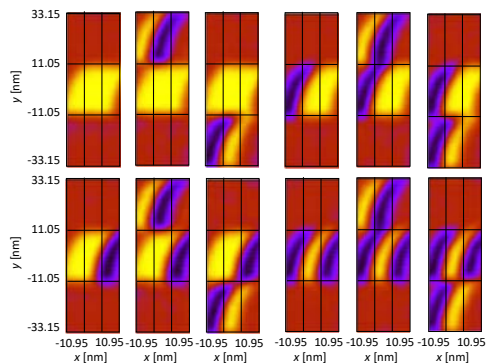


図3 記録時に隣接ビットから受ける影響

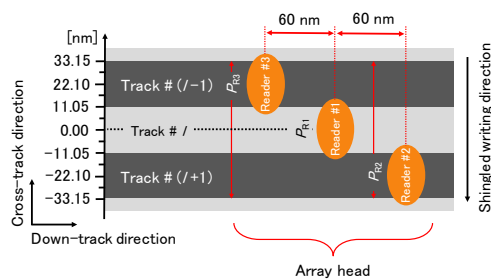


図4 アレイヘッド再生

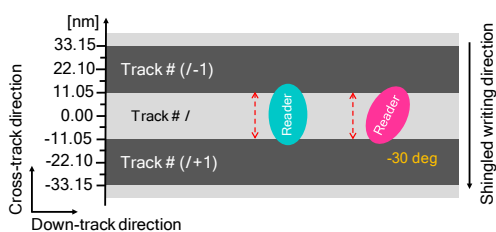


図5 傾斜した再生素子

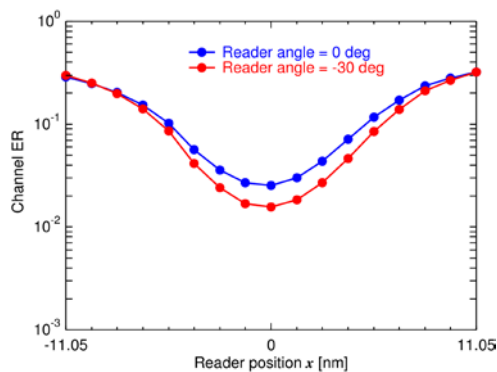
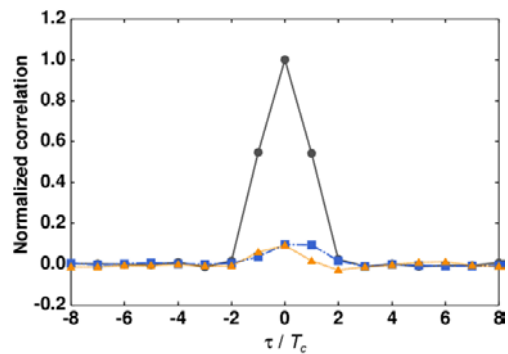
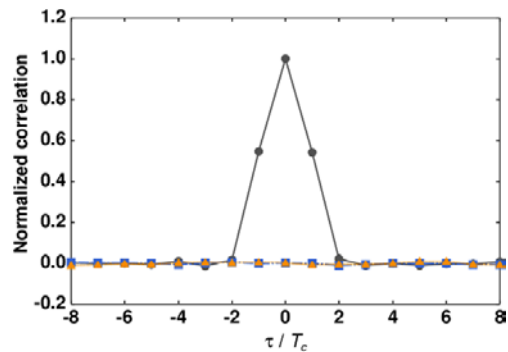


図6 傾斜した再生素子による誤り率特性改善



(a) 一次元等化



(b) 二次元等化

図7 二次元等化器の効果

ック上部で湾曲しているため前側の反転の影響を受けやすいためと考えられる。また、再生時にはこれに加えて再生素子の感度の広がりによる隣接ビットの影響が生じる。

図4に3本のトラックをアレイヘッドで再生する様子を示す。図3と図4を比較すると記録パターンにおけるビット形状と再生素子の感度形状が整合していないことがわかる。そこで、図5に示すように、再生素子を -30° 傾けた再生方法を検討した結果、図6のように誤り率特性の改善が可能であることが明らかとなった。

(2) 次に二次元等化器の効果について図7に示す。ただし、(a)、(b)はそれぞれ、一次元等化器、二次元等化器の場合を示している。図中の▲、●、■印は等化器出力とそれぞれ、トラック#(-1)、#/, #(+1)の記録系列との相互相関を表している。(a)の一次元等化では、●印のトラック#(-1)の信号に対してPR1特性を持たせてはいるが、▲、■印で示す特性が相関を示しており、トラック#(-1)、#(+1)の記録系列に対する成分が等化器出力に含まれており、隣接トラックからのクロストーク雑音が残ったままであることがわかる。一方、(b)の二次元等化では、PR1特性に加えて隣接トラックの記録情報との相関がないことがわかる。これはアレイヘッド再生に2D-FIRによる二次元等化器を適用することにより隣接トラックからの干渉であるクロストーク雑音を低減できたことを示している。

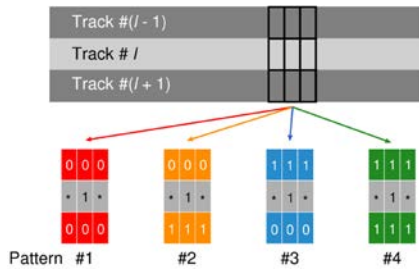
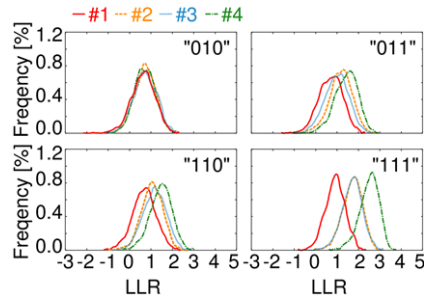
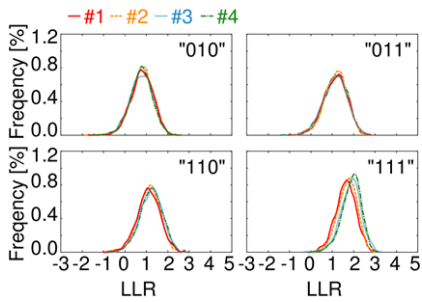


図8 隣接トラックの記録パターン



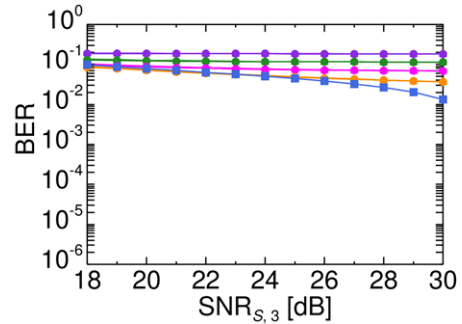
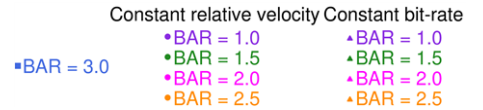
(a) 次元等化



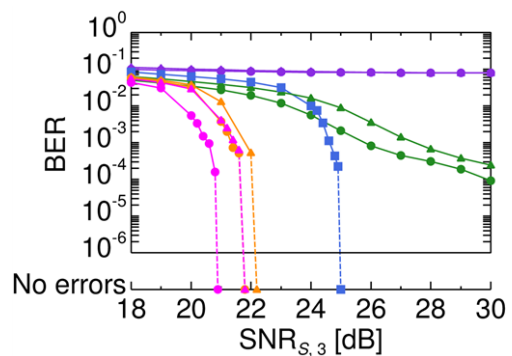
(b) 次元等化

図9 隣接トラックの情報で分類した LLR

次に、隣接トラックの情報図2の中央ビットに与える影響をチャンネル復号器である APP 復号器出力である対数尤度比分布 (LLR: log likelihood ratio) により評価する。ただし、中央の情報を“1”とし、抽出する記録パターンを図8としている。図9に隣接トラックの情報によって分類した LLR 分布を示す。図の(a)、(b)は図7の場合と同一である。(a)より、#1~4に示す隣接トラックの記録パターンによって次元等化の場合の LLR はトラック# l の情報が“010”の場合を除いて違いがみられ両トラックに中央のビットと異なる情報が記録されている場合にマイナス側により謝りやすくなることわかる。しかし、“010”では中央ビットの両側に磁化反転があるため、隣接ビットの情報の影響よりも両側の磁化反転の影響が大きいことが予想される。また、(a)と(b)を比較すると、次元等化を適用することで、図7と同様に隣接トラックの影響を低減でき、LLR 分布が隣接パターン#1~4に示す隣接トラックの記録パターンによらないことがわ



(a) 次元等化



(b) 次元等化

図10 BAR に対する誤り率特性の比較

かる。また、“010”の両側に反転を持つパターンでは他のパターンに比べてマイナス側に寄っており誤り易い状態であることがわかる。そのため、誤りなく復号するためには、SP 復号器内の繰返し回数とターボ等化としての繰返し回数を調整する必要がある。

(3) 4テラビット/平方インチの面記録密度における BAR についての検討結果を図10に示す。図の(a)、(b)は図9と同様である。また、両図において●、▲印はそれぞれ、ヘッド・媒体の相対速度を一定とした場合、ビットレートを一定とした場合を示している。BAR については、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0の場合を想定している。ここで、SN比は再生ヘッド、再生アンプなどで発生する機器雑音に対するSN比である。まず、図の(a)より次元等化では、BAR=3.0が最も良好な特性を示すものの、どのBARに対しても誤りなしで再生できないことがわかる。ところが、(b)のように次元等化器を適用することによって、誤りなしで復号できるBARが存在することがわかる。中でもトラックピッチを狭くしてビット長を緩和したBAR=2.0が良好な特性を示している。これは、次元等化によって狭トラックにおいてもITIによるクロストーク雑音の影響を低減し、ビット長緩和により磁化遷移点変動によるジッタ性媒体雑音の影響を低減できたためと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

- ① T. Kondoh, Y. Nakamura, M. Nishikawa, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Kanai, H. Muraoka, A study on optimal BAR in array head reading, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, 2017
DOI: 10.1109/TMAG.2017.2701355
- ② Y. Nakamura, R. Suzuto, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Kanai, H. Muraoka, Suppression of ITI by array head reading and 2D-equalization, AIP Advances, 査読有, 2017, 56509
DOI: 10.1063/1.4977548
- ③ R. Suzuto, Y. Nakamura, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Kanai, H. Muraoka, Effect of reader sensitivity rotation in TDMR with head skew, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, Vol.52, 2016, 3001604
DOI: 10.1109/TMAG.2016.2531088
- ④ 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/INTMAG.2015.7157692
- ⑤ 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, Applied physics, 査読有, Vol.117, 2015, 17D112-1 – 17D112-3
DOI: 10.1063/1.4908145
- ⑥ 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, 17A901-1 – 17A901-3
DOI: 10.1063/1.4906965
- ⑦ Y. Nakamura, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Kanai, 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.2014.2318335
- ⑧ 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 – 17B729-3

DOI: 10.1063/1.4866393

〔学会発表〕(計 25 件)

- ① 近藤幸吉, 仲村泰明, 西川まどか, 大沢 寿, 岡本好弘, 金井 靖, 村岡裕明, アレイヘッド再生の下でのSMRにおけるBARの一検討, 2017年電子情報通信学会総合大会, 2017年3月22日, 名城大学 天白キャンパス (愛知県・名古屋市)
- ② 鈴藤稜太, 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好弘, 金井 靖, 村岡裕明, SMRにおける復号信頼度の記録状態依存性の一検討, 電子情報通信学会 磁気記録・情報ストレージ研究会, 2016年12月8日, 愛媛大学 総合情報メディアセンター (愛媛県・松山市)
- ③ 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好弘, 金井 靖, 村岡裕明, エクステンディッド・ライト・ギャップヘッドによるSMRチャネルの性能評価, 2016年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2016年9月21日, 北海道大学 札幌キャンパス (北海道・札幌市)
- ④ 鈴藤稜太, 仲村泰明, 大沢 寿, 岡本好弘, 金井 靖, 村岡裕明, TDMRのための二次元FIRフィルタの効果, 電子情報通信学会 磁気記録・情報ストレージ研究会, 2016年6月10日, 東北大学 電気通信研究所 (宮城県・仙台市)
- ⑤ T. Kondoh, Y. Nakamura, M. Nishikawa, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Kanai, H. Muraoka, A study on optimal BAR in array head reading, INTERMAG Europe 2017, Apr. 2017, Dublin, Ireland
- ⑥ R. Suzuto, Y. Nakamura, M. Nishikawa, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Kanai, H. Muraoka, A study on relationship between recording pattern and decoding reliability in SMR, INTERMAG Europe 2017, Apr. 2017, Dublin, Ireland
- ⑦ Y. Nakamura, R. Suzuto, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Kanai, H. Muraoka, Suppression of ITI by array head reading and 2D-equalization, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Nov. 2016, New Orleans, USA
- ⑧ 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日, 九州大学 伊都キャンパス (福岡県・福岡市)
- ⑨ 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日, 愛媛大学 総合情報メディアセンター (愛媛県・松山市)
- ⑩ 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10日, 名古屋大学 東山キャンパス (愛知県・名古屋市)
- ⑪ 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日, 東北大学 川内北キャンパス (宮城県・仙台市)
- ⑫ 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. 2015, Minneapolis, USA
- ⑬ 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5日, 東北大学 電気通信研究所 (宮城県・仙台市)
- ⑭ 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 Magnetism Conference, May 2015, Beijing, China
- ⑮ 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12日, 立命館大学 びわこ・くさつキャンパス (滋賀県・草津市)
- ⑯ 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12日, 立命館大学 びわこ・くさつキャンパス (滋賀県・草津市)
- ⑰ 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日, 愛媛大学 総合情報メディアセンター (愛媛県・松山市)
- ⑱ 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日, 愛媛大学 総合情報メディアセンター (愛媛県・松山市)
- ⑲ 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. 2014, Honolulu, USA
- ⑳ 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. 2014, Honolulu, USA
- 21 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, 第38回日本磁気学会学術講演会, 2014年9月4日, 慶應義塾大学 日吉キャンパス (神奈川県・横浜市)
- 22 B. Vasic, M. Khatami, Y. Nakamura, Y. Okamoto, Y. Kanai, J. R. Barry, S. W. Mclaughlin, E. B. Sadeghian, study of TDMR signal-processing opportunities based on quasi-micromagnetic simulations, Aug. 2014, Berkeley, USA
- 23 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日, 東北大学 電気通信研究所 (宮城県・仙台市)
- 24 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 Magnetism Conference, May 2014, Dresden, Germany
- 25 Y. Nakamura, N. Fujimoto, Y. Okamoto, H. Osawa, H. Muraoka, Evaluation of multiple reader location for TDMR R/W channel, IEEE International Magnetism Conference, May 2014, Dresden, Germany
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
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
- (2) 研究分担者
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