

平成 21 年 5 月 30 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2007～2008
課題番号：19560398
研究課題名 (和文) 磁気記録次世代信号処理

研究課題名 (英文) SIGNAL PROCESSING FOR NEXT MAGNETIC RECORDING CHANNEL

研究代表者

三田 誠一 (SEIICHI MITA)
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：

磁気ディスクにデータを高密度に記録すればするほど、隣どうしに記録された磁化パターンが干渉する傾向が強くなる。この結果、記録された1あるいは0の符号の区別が困難になり、符号の読み誤りが増加し、データの信頼性を著しく損ねる。この問題を解決するために、このような状況下でも、1と0の信号の境界を精度よく設定することができる手法の開発が必要になる。このため、サポートベクタマシンと呼ばれる手法を導入し、問題の解決を図った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	900,000	270,000	1,170,000
20年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

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：情報理論，信号処理

1. 研究開始当初の背景

磁気ディスク装置は、情報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として位置づけられ、その関連技術は近年急速な進歩をとげてきた。特に、磁気ディスク装置において、従来の面内記録方式と総称される記録再生方式から、東北大学において発明された垂直磁気記録方式が2005年度に限定的で

あるが、初めて実用化され、この方式が、今後の主流になることが期待されている。より高速、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

スクの最悪符号誤り率とその主要因の推移を図1に示す。

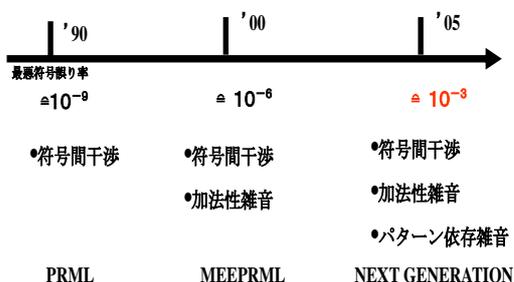


図1 磁気ディスクにおける最悪符号誤り率の推移と主要因

高密度化の進展により、(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が記録するパターンに依存する問題(パターン依存性雑音)が発生し、符号誤りの主要因になってきた。これらの非線形性による波形劣化のため、たとえ、垂直磁気記録方式が用いられても、2007年以降、従来の信号処理方式のままでは、訂正前の符号誤り率が最悪 10^{-3} 以上になることが予想される。

2. 研究の目的

研究の具体的目的は、Kernel Machine (Support Vector Machine : SVM) の適用によるパターン依存性雑音および非線形符号間干渉を低減できる適応的非線形信号検出方式の確立とその信号処理回路への組み込を可能とすることである。Kernel machine は、パターン認識のためのクラス分類の手法であり、Computer Science 分野の中心的研究課題である。これを通信系の2値データの弁別に適用することが中心となるideaである。複数ビット(Nビットとする)にまたがる非線形の符号間干渉およびパターン依存性雑音を考慮して2値

データの弁別を行うことを考える。この場合、 2^N のパターンの組み合わせが発生し、各組み合わせ毎に、データ弁別のための最適閾値を決定することが必要になる。すなわち、 2^N クラスの非線形分類問題に帰着する。このためには、 $2^N - 1$ 次元の最適閾値曲面を生成することが必要になる。Kernel (積分核) を用いることで、このような、最適閾値曲面を $2^N + 1$ 次元以上の高次元空間に写像することなく、元の 2^N 次元で計算および表現できることになる。

明確にする最大の目標は、このような手法が磁気ディスクの信号検出(弁別)に適用できるものかどうか実データを用いたシミュレーションにより確認することである。

3. 研究の方法

アルゴリズムの考案と実データを用いたアルゴリズムの検証を中心に進める。

磁気ディスクの記録再生特性変動に online で追従可能な適応的 kernel machine アルゴリズムなどの基本項目の開発を行う。特に、kernel の重み更新の最適化を如何に図るかを検討する必要がある。kernel machine 内部では、波形等化器から得られた信号をベクトル化し、最適閾値曲面を作成し、これからの距離に応じた尤度を外部情報として、事後確率最大復号器に与える機能を実現する必要がある。陰関数で与えられる最適閾値曲面から如何に簡単に尤度を生成するかが研究課題となる。

4. 研究成果

(1) 実験システムの構成

垂直磁気記録された信号を図2に示す構成により、AD変換し、以下にそのインパルス応

答を示す2種のパーシャルレスポンス

PR1: $(1+D)$ および PR3: $(3+7D+2D^2-2D^3)$ のターゲット特性となるように、波形等化を行った後、BCJR アルゴリズムを用いて尤度比へと変換する。なお、この垂直磁気記録の再生信号は、線記録密度を調整し、等化後の符号誤り率が、 10^{-3} 台となるように設定している。

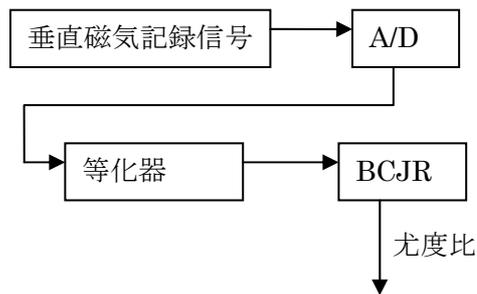


図2：垂直磁気記録された信号を尤度比へ変換する回路構成

(2) BCJR アルゴリズムによる尤度比変換

PR1 $(1+D)$ 、PR3 $(3+7D+2D^2-2D^3)$ に対する尤度比を用いて、尤度比が正なら0、負なら1とすることにより、信号の復号を行う。元の記録した信号と比較することにより、符号誤りの個数を数える。以下はPR1, PR3における復号後の誤り数を表1に示す。この表のデータは5500ビットのデータを24回記録再生して得られたデータ中に含まれる誤り率と誤りの合計値を示す。データ1は誤り率が約 4×10^{-3} のもの、データ2は誤り率が約 1×10^{-3} のものである。これより、PR3の方がPR1よりやや誤り率において有利であることが分かる。

表1：各データにおける誤り率(誤り数)

データ	PR1	PR3
データ1	4.6×10^{-3}	3.7×10^{-3}
データ2	1.4×10^{-3}	1.2×10^{-3}

(3) 尤度比を三次元面上に表示

4.2より算出した尤度比を三つ区切りに分け、このパターンを(x, y, z)とし三次元面上に表示する。図3はPR1に対するデータ1の一部のパターンを示したもので、元の信号において(000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111)となるパターンに分別して示している。表2に各パターンの標準偏差を示す。図4に特に分布の偏りが大きいものを示す。

これらから各パターンの分布は同一ではなく、パターンごとに異なった分布をしていることが分かる。

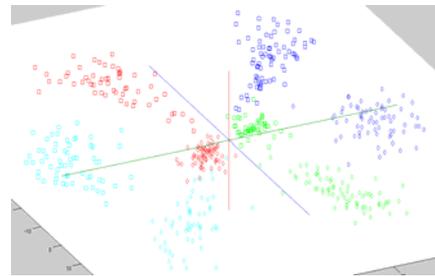


図3：PR1における各パターンの分布

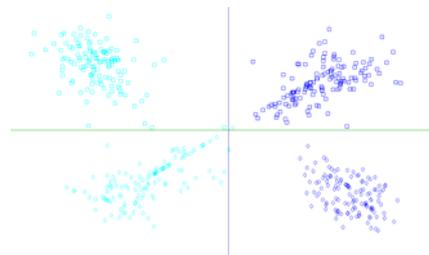


図4：PR3での(000, 011, 100, 111)の上面図

表2：各パターンにおける標準偏差

パターン	PR1		PR3	
	データ1	データ2	データ1	データ2
0 0 0	8.24	8.10	10.08	9.27
0 0 1	8.80	8.79	10.92	10.38
0 1 0	7.56	7.53	8.91	8.46
0 1 1	9.39	9.39	12.22	10.97
1 0 0	9.25	9.16	10.99	10.71
1 0 1	7.68	7.68	9.01	8.61
1 1 0	9.75	9.71	12.28	11.26
1 1 1	9.87	9.77	10.77	11.47

(4) パターンの超平面による分離

パターンを弁別する最適曲面を RBF カーネルにより SVM を用いて生成する。特に視覚化を容易にするため三次元面上に表示する。さらにその曲面を用いて誤りの訂正，抽出を行う。カーネルを使うことにより，線形分離と同様にして，最適マージン曲面を生成できる。今回用いるのは次の RBF カーネルである。

$$K(x, z) = \exp\left(\frac{-\|x - z\|^2}{2\sigma^2}\right)$$

(5) パターンを弁別する最適曲面の生成

誤りが発生するパターンを弁別する最適曲面を RBF カーネルにより SVM を用いて生成する。弁別するパターンとして 010 と 000, 001, 100, 101 を, 101 と 011, 110, 111 を, 100 と 110 を, 001 と 011 を用いた。なお，トレーニングデータとして 5500 ビットの記録再生されたデータからランダムに 400 点ほど用いた。ただし，このデータは誤り率が約 4×10^{-3} のデータ 1 の一部である。例として PR1 における 010 と 000 を弁別する超平面を三次元面上に表したものを図 5 として示す。また PR3 におけるものを図 6 として示す。

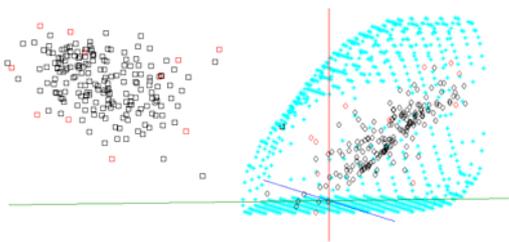


図 5 : PR1 における 010 と 000 を弁別する超平面

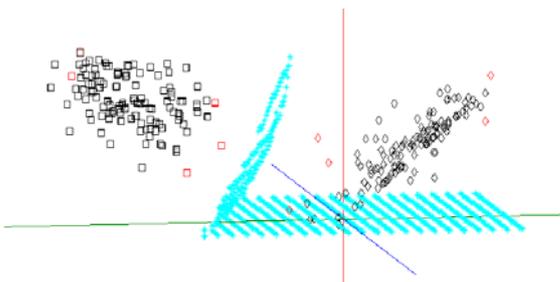


図 6 : PR3 における 010 と 000 を弁別する超平面

(6) 超平面作成用トレーニングデータ生成

特徴空間において SVM を用いて生成された超平面から ± 1 の距離の間に存在するパターンを誤りらしいと考え抽出を行う。

そのため超平面を生成する際に用いるトレーニングデータを以下の基準の下で取得する。

1. 用いるパターンは各パターンの平均からの距離が標準偏差の 1.2 倍より大きいものの。
2. また x, y, z の値が 0 より大きいまたは小さいもの。パターンが 000 なら x, y, z ともに 0 より大きいものを, 010 なら x, z は 0 より大きいもの, y は 0 より小さいものを用いる。
3. トレーニングデータを取得した 5500 ビットのデータにおいて超平面から ± 1 の距離に誤りが全て含まれていないなら比較したパターンに対して上記 2 の条件で 0 を基準としたものを (平均/ x) とする。 x は誤りが ± 1 の間に入るように調整する。

条件 1 は外側にある正しいパターンの超平面からの距離が 1 より大きくなるように，条件 2 は誤りをトレーニングデータとして含まないように，条件 3 は大きすぎる誤りを ± 1 の距離に入れるようにするために定めた。

(7) 超平面からの距離でのデータの分離

上記超平面からの距離を用いてデータのパターンまでの距離を再分類した。図 7 に従来の尤度比分布を図 8 に超平面の距離からの尤度比分布を示す。ここで，横軸の値が 0 に近いものが多いほど 2 値化に対してあいまい度が大きいことになる。超平面からの距離を用いるものの方があいまい度が少ないすなわちデータ弁別に対して有利となることが見てとれる。

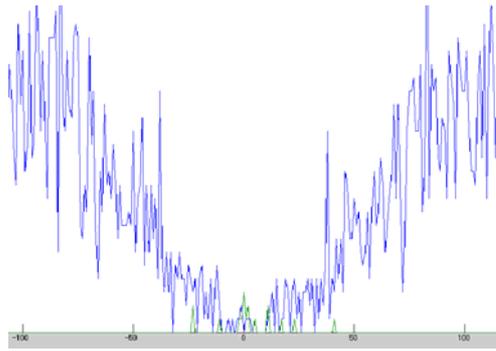


図7 従来の尤度比の分布

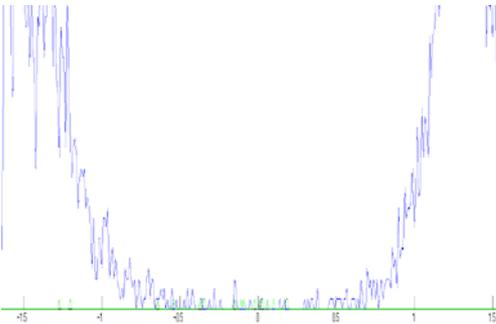


図8 超平面からの距離による尤度比分布

(8) 反復復号組み込みによる性能確認

本研究では、有限幾何 LDPC 符号を用いたシミュレーションによる復号性能評価を行い、超平面による再スケーリングした尤度比を使用することの優位性を示す。使用した有限幾何 LDPC 符号の緒元を以下に示す。

・ $GF(2^2)$ 上の Type-2 4次元 PG-LDPC 符号のパラメータ

- 符号長 : 5797 ビット
- 情報長 : 5501 ビット
- パリティビット : 296 ビット
- 符号化率 : 0.949
- 検査行列 : 341 行 5797 列
- 列重み : 5 ビット
- 行重み : 85 ビット

およびこれを短縮化した符号化率 0.931 の両方を評価した。データは、前述した実際の垂直磁気記録された信号である。結果を図9お

よび図10に示す。これらの図においてHP1, HP2 と記述されているものが超平面を使用した場合の符号誤り率である。一方、従来のものはPR3で示している。これらの図の横軸は、LDPC符号の反復復号回数であり、超平面を使用することにより、これらの指標が大幅に低減されていることが分かる。

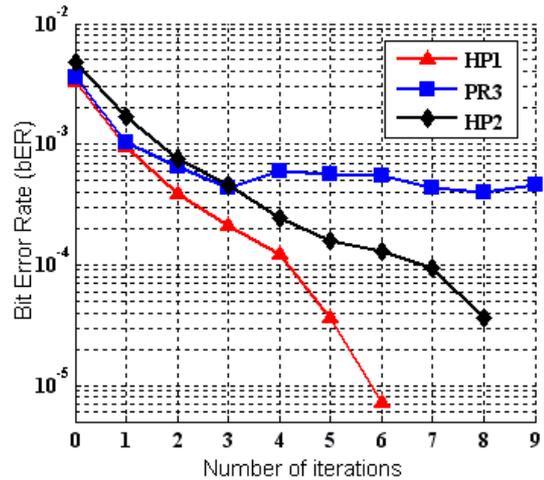


図9 有限幾何符号のコードレート=0.949

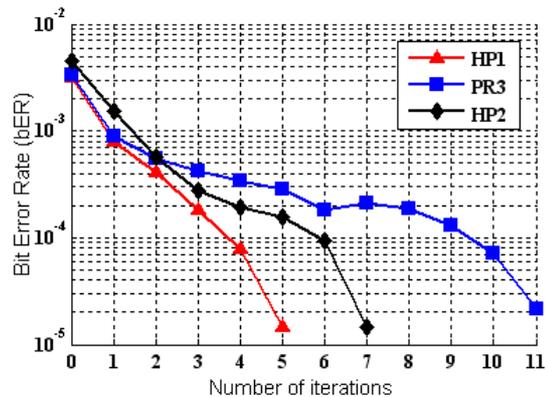


図10 有限幾何符号のコードレート=0.931

(9) 結論

信号をパターンごとに尤度比を軸とする三次元面上で、SVMで生成された分離超平面を作成した。この結果、超平面を挟むマージン空間を用いると、誤りと正しいデータの分離が従来の尤度比を用いる方法より良い結果を示すことが明確になった。特に、高密度化が進むと、反復回数の増加が懸念され、この

点を大幅に改善できることになる.

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 1 件)

① S. Mita and Vo Tam Van, A generalized data detection Scheme using hyper-plane for magnetic recording channels with pattern-dependent noise, IEEE trans. Magn. to be published in October, 2009. 査読あり

[学会発表] (計 4 件)

① S. Mita and Vo Tam Van, A generalized data detection Scheme using hyper-plane for magnetic recording channels with pattern-dependent noise, International Magnetic Conference, May 2009, Sacramento, 査読あり

② 三田誠一, 芳賀史也, 垂直磁気記録再生信号の分布分析とその超平面による分離, 電子情報通信学会 磁気記録情報ストレージ研究会, 2008 年 12 月 査読なし

③ S. Mita, Performance comparison of various error correction strategies using perpendicular magnetic recording data series, IEEE International Magnetic Conference, May 2008, Madrid, 査読あり

④ 三田誠一、松井一. 磁気記録チャンネル用信号処理方式の研究経過と今後の展望, 電子情報通信学会 磁気記録情報ストレージ研究会, 2007 年 12 月 13 日, 査読なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし