

21世紀へ向けたストレージシステムのための符号と信号処理技術の展望

田崎三郎

愛媛大学 工学部

〒790 松山市文京町3

Phone & Fax : 089-927-9775

E-mail : tazaki@ee.ehime-u.ac.jp

あらまし

記録符号と信号処理は、ストレージシステムのための根幹的なソフトウェア技術の一つであり、21世紀、特に近未来、において20Gb/inch²達成に欠かせない技術である。本稿では、これら符号と信号処理におけるブレイクスルー技術について述べる。まず、符号と信号処理の歴史的な流れを辿ることで、従来技術が直面する限界を明らかにする。ついで、記録符号のブレイクスルー手法として注目を集めている多値符号、トレリス符号、ならびに多次元符号のメリット、デメリットを論ずる。最後に、再生側信号処理ではPRMLが既にポピュラーとなっているが、とくにMLに対するブレイクスルー技術として、従来検出法に比べて高速でメモリ容量も大幅に削減できる簡易なマージ探索法を紹介する。

Outlook of Recording Code and Signal Processing Technology for Storage System toward 21st Century

Saburo Tazaki

Ehime University, Faculty of Engineering
Department of Electrical & Electronic Engineering,

Matsuyama, 790-77, JAPAN

Phone & Fax : 089-927-9775

E-mail : tazaki@ee.ehime-u.ac.jp

Abstract

This paper presents break-through technologies on recording code and signal processing which are regarded as a fundamental software technology for storage system, on which we have aimed the achievement of 20Gb/inch² at the near future of 21st Century. Firstly, we find limitations with conventional technologies through investigating the historical trends of them. We also discuss several new recording codes such as multi-level code, trellis code and multi-dimensional code which have drawn the attention of related researchers as the break-through methods of recording code. Finally, a simple algorithm for Viterbi decoding method is presented as a break-through technologies of famous PRML technology.

1 まえがき

高度情報化社会は、止まるところを知らぬかのように日々その速度を増して進展を続

けている。いうまでもなく、この社会を技術的に支える情報関係の核は、コンピュータと通信、そしてストレージである。コ

ンピュータと通信に比べると、ストレージ技術は一般にあまりポピュラーではないだけに、関心は決して高いとはいえない。しかしながら、最近10年間における推移を見てみると、コンピュータの高速化や通信速度の伸びはほぼ100倍程度であったのに対して、面記録密度の伸びは約1,000倍にも達し、驚くべき進展がそこにある¹⁾。

ストレージシステムの中核はHDD(ハードディスク)であり、磁気ヘッド、記録媒体、HDI(ヘッド・ディスク・インタフェース)などハードウェア関連技術の進歩が高密度化を支えて来た。しかしなお高度情報化社会から高密度化への要請は強く、'95年SRC(我が国の情報ストレージ研究推進機構)は2001年に20Gb/inch²の実現を目標に掲げた。そして、この達成は記録符号や信号処理、サーボ制御などソフトウェア関連技術の発展なくしては極めて困難というのが関係者の常識となりつつある。本稿では、このような現状に鑑み、発展の経緯を振り返ると共に21世紀、それも近未来におけるストレージシステムにおいて期待される符号と信号処理技術に関する研究動向を展望する。

2 歴史的な流れ

図1にHDDの誕生(IBM305 RAMAC)以来、デジタル記録において用いられて来た記録符号ならびに信号処理方式の歴史的変遷を示す。

実はPE符号以前に、通常は{0, 1}の2元記号で表わされる源データ情報をそのまま記録波形に変換するNRZL符号(Non-Return-to-Zero Level; 次に述べるNRZI符号が用いられるまでは唯一のNRZ型であったので、NRZとも広く称せられている)がまず用いられている。次いで、NRZI符号(NRZ-Inversion)が使われた。これは源データ“1”が出現した時のみ記録波形極性を反転する方式で、NRZL符号に比べて信号処理対象が記号“1”だけに限定されるという点が素朴な意味で優れている(符号化則間の互いの変換や他の特徴については文献2)、3)を参照頂きたい)。以後、各2値記録符号の符号化則は殆どNRZI型でもって開発され

て来ている。

高密度化が進むにつれて再生波形自体から同期確立のためのクロック情報を抽出することが要求されるようになった。この段階でNRZL符号やNRZI符号の問題点がクローズアップされて来た。それは源データ“0”のランが長くなると(NRZLの場合は“1”のランについても)、その間極性反転が起こらないため再生波形からのクロック情報抽出は極めて難しくなる。また、磁気記録システムで長手記録(あるいは水平記録)を行った場合、その記録再生系は微分特性を有しているので、記録波形がもしDC成分を持っているならばこの成分は記録再生系を通過し得ない。このことでDC変動が生じ、結果として再生波形に歪が生じたり、再生波形のアイダイアグラムでのマージンが減少する。これを解決したのがPE符号であり、FM符号であった。PE符号ならびにFM符号の符号化則は真に簡単で、回路構成が容易であった。特に、FM符号は低記録密度の段階では代表的な符号とされていた。しかしながら、これら符号にも高密度化を阻害する性質があった。それは、源データのビット幅 T_b に対して極性反転の最小間隔 T_{min} が $T_{min} = T_b/2$ となることであった。図2⁴⁾に見るように、符号化効率 $\eta(= T_s/T_b$;ここに T_s は記録波形のクロック間隔)が1のNRZI符号であっても、規格化線密度 $K(= T_{50}/T_b$;ここに T_{50} は再生波形の半値幅)が1を越えると波形干渉を起こし始める。まして $\eta < 1$ のPE符号やFM符号では $K < 1$ の条件下にあっても、波形干渉が始まってしまう。この観点から、図1にみるように $T_{min} \geq T_b$ の特性を有する符号が次々と開発された。

再生波形の検出窓幅 T_w は $T_w = T_s$ と定義付けられる。勿論、 T_w は大きければ大きい程よい。NRZL符号やNRZI符号では、 $F.O.M. = T_s \cdot T_w/T_b^2 = 1$ である。一方、PE符号やFM符号ではF.O.M.(Figure of Merit)は1/4となってしまう。この点からもPE符号やFM符号を用いた高密度化には限界がある。なおいえば、従来のいずれの記録符号も、 $F.O.M. > 1$ なる特性を満たすものは皆無であった。

再生側の信号処理における王座はピーク検出であり、この手法が長い期間用いられていた。また、波形等化にも積分等化を用いることが通例であった。しかしながら、図2の例示で明らかのように、 $K > 1$ における再生波形状況ではピーク検出は最早その機能を果たし得ないことは明らかである。

3 記録符号のブレークスルー手法

表1に多値符号、トレリス符号、及び2次元符号のメリット、デメリットを整理して示した。ここで、

- 1) $\eta > 1$ と出来るのは多値符号と2次元符号
- 2) F.O.M. > 1 と出来るのは多値符号と2次元符号である。

但し、現存の記録媒体で長手記録を行う場合、多値記録を適用することは難しい。これは“1”と“-1”の間のレベルを安定させて生成することが困難なためである。一方、垂直記録を行うならばその適用は可能であり、しかも極めて導入効果は大きい。現に光磁気記録では盛んに検討されている(例えば文献5)を参照頂きたい)。このことから、磁気記録でも垂直記録が実用化されれば、大いに期待が持てるといえる。

従来のすべての記録符号は1次元であった。これに対し、2次元(あるいは多次元)空間において同時に異なるトラックに記録することで、1次元符号が抱えていた問題の大半が解決できる。勿論、システム構成は格段に複雑とはなるが、このトレードオフに対しては昨今ではLSIの開発技術向上もあって、機能改善の方に重きが置かれている。

トレリス符号は、多値符号や2次元符号のように、 η についてもF.O.M.についても改善は期待できない。しかしながら、このトレリス機能を用いると従来の符号と異なり、Euclid距離の概念を用いることが可能となり、このことで誤り訂正能力を向上させ、結果的に符号利得が改善出来る。こ

の意味合いでもって、今後大いに検討する価値がある記録符号といえる。さらに、田崎らは従来よりもより有機的に、記録符号と信号処理手法(Viterbi検出も含めて)との整合を考慮し、両者のモデル表現を有限オートマトンとして統一的に取り扱うためトレリス機能を用いることで、ビット誤り率に大きな改善が期待できる事を示している⁶⁾。

この整合を考慮したトレリス表現手法の導入によって、FMファミリー符号⁷⁾のいくつかは、再生側において $T_s = T_b$ と等価な形で信号処理が可能となることが明かとなり、再び注目を集めている。

4 再生側信号処理でのブレークスルー技術

PRML技術は既に膾炙されている。特にPR方式は一般に、

$$PR(c_0, c_1, \dots, c_L)$$

と表される。ここに、 $c_i (i = 0, 1, \dots, L)$ はPR回路の重み係数で、通常 $c_i \in \{-1, 0, 1\}$ である。よく知られているPR4はPR(1,0,-1), EPR4(Extended PR4)はPR(1,1,-1,-1), E²PR4(Extended EPR4)はPR(1,2,0,-2,-1)である。これらに対して、さらにLを多くしたり、 c_i の組合せを変えることで再生信号識別点での雑音電力を軽減しようとする提案がなされている。例えば、(1,7)符号とME²PR4(Modified E² PR4; PR(1,1,0,-1,-1)方式)とを組み合わせることで所要SN比の改善が行われている⁹⁾。

このように、PR方式については、多くの改善が得られている。これに対して、ML(特にViterbiアルゴリズム)についてはパス形マトリクスを用いた代数的探索法が理論的表現をそのまま回路設計に用いられ得る¹⁰⁾利点はあるものの、ACS操作についてはあまり改善はなされていない。しかも、上述のようにPR方式が複雑になってくると状態数が指数関数的に複雑になる問題が残されていた。文献11)に述べられている、Viterbi検出に対するロザリオ型マージ探索法を用

いと、探索時間も所要パスメモリ量もパス形マトリクス法よりも約1桁程度の改善が可能となる。このためのアルゴリズムを図3に示しておく。

5 むすび

記録符号と信号処理技術の歴史的変遷を辿ることで、本質的に従来法では解決できない問題点が存在することをまず示した。最近になって、これら限界に対するブレークスルー技術が次々と報告されるようになったが、記録符号に関してそのメリット、デメリットを簡単に紹介した。また再生側信号処理の中で、高速に、しかも少ない所要パスメモリ量でもってViterbi検出が行える、ロザリオ型探索法について述べた。

本稿では、2次元符号とトレリス符号及び多値符号はそれぞれ互いに独立して示されているが、実を言えばトレリス機能や多値表現を2次元符号に適用することについては本質論として何ら問題はない。従って、今後はこのような形で研究展開の進むことが大いに期待されることを指摘しておきたい。

(謝辞)

本研究は科学研究費(基盤研究(B)(2)08455180)の補助、ならびにSRCからの援助を受けて行った。

参考文献

1. 田崎三郎: “映像情報メディア記録システムに期待するもの”, テレビ誌,50,11,pp.1643-1648(1996.11)
2. 田崎,大沢: “DCフリー2値ブロック符号の分類とその特徴”, テレビ学技報,IT45-5(昭55.11)
3. 田崎,浜田,山田: “符号化則のNRZL法とNRZI法の表現の違いに関する一考察”, 昭63信学春全大,C-55(昭和63.03)
4. 田崎三郎: “波形伝送技術”, テレビ誌,48.6, pp.683-690(1994.6)
5. 芳野,田崎,都築,山田: “3B2T および4B3T符号の光磁気記録への適用”, SITA'94,pp.771-774(1994.12)
6. 田崎,柳原,都築,山田: “記録符号と信号処理方式の整合に関する一考察”, 信学技報,MR96-78(1996.12)
7. S.Tazaki,S.Tsuzuki,and Y.Yamada: “FM Family Code”, IEEE Globecom '95,pp.1394-1401(1995.11)
8. 大沢,安井,岡本: “デジタル磁気記録におけるパーシャルレスポンス方式の等化特性改善”, 信学論,J76-C-(監),11,pp.763-766(Nov.1993)
9. 大沢,岡田,若宮,岡本: “(1,7)PLL符号に対するPRML方式のSN比改善”, 愛媛大学紀要,XV,4,pp.57-66(1996.02)
10. 田崎,高島,山田,都築: “3B-2T符号と4B-3T符号のビット誤り率特性”, 信学技報,MR92-53(1992.11)
11. 芳野,田崎,都築,山田: “ビタビ検出におけるロザリオ型マージ探索法”, 1995信学総全大,C-478(1995.3)

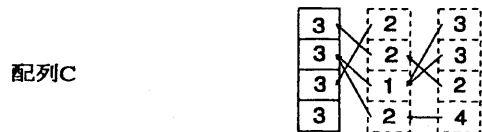
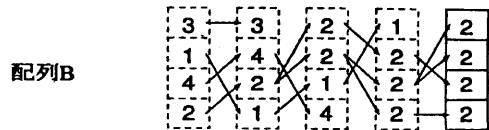
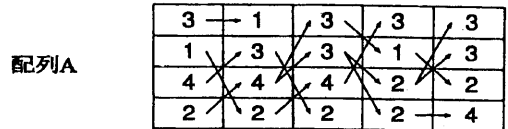
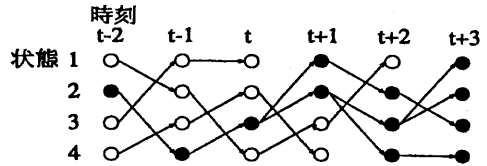


図3 ロザリオ型パス探索法において使用する配列

図1 記録符号及び信号処理の歴史的変換変遷

		(試作及び実用化)	(論文)
1956	IBM305 RAMAC(HDD)	peak 検出	
	Williams		PE
1959	Gavor		FM
1963	Miller		MFM
1966	IBM2314(HDD)	FM	CRC
1969	Kobayashi & Tang		PR
1971	IBM(MT)	PE	
	IBM3330-1(HDD)	MFM	
	Kobayashi		ML
1972	Franaszek		(2,7)F
1973	Kobayashi		DFE
	IBM3420(MT)	GCR[(3,3;4,5)]	CIRC
	Kameyama et al.		8/9
1974	Patel		ZM
1976	IBA(DVTR)	8/9	
	Horiguchi & Morita		(1,7)
1977	ISS-Univac(HDD)	3PM[(2,11;3,6)]	
	IBA(DVTR)	8/10	
1978	Eggenberger & Hodges		(2,7)EH
1979	IBM3370(HDD)	(2,7)F	
	Ampex(DVTR)	M ²	
	NHK(DVTR)	I-NRZI	PR4
	Osawa & Tazaki		FM,MFM-ML
1981	ProDegi(SDAT)	(1,7)	
	Osawa et al.		PRnML
1982	Sony/Philips(CD)	EFM	
	Osawa et al.		3 値-ML
	Tazaki et al.		(2,8;3,5)
1984	Ampex(DCR)		PRML
1986	Wolf & Ungerboeck		Trellis
	Tazaki et al.		(3,k;4,9)
1987	NHK(DVTR)	8/8	
1989	IBM(HDD)		PR4ML
1991	Karabed & Siegel		MSN
1992	Marcellin & Weber		2 次元符号
1993	D-5(DVTR)	8/14	
	DVC(HomeDVTR)	24/25	
1994	D-6(DVTR)	8/12	
	Mitsubishi(DVD)	4/9	

Merit

Demerit

○多値符号

- 1) 通信路容量の拡大
- 2) T_w 余裕拡大
- 3) DC フリー特性付与容易

- 1) 振幅マージンの減少
- 2) 新型媒体開発要

○Trellis 符号

- 1) 最小 Euclid 距離の拡大
- 2) 記録符号と信号処理との整合容易

- 1) 符号化率の低下
- 2) 線図が複雑化

○2次元符号

- 1) $k < d$ の実現
(同期確保容易, ISI 減少)
- 2) 多様な符号構成が可能
- 3) 強力な Viterbi 検出機能
(誤り訂正)
- 4) シンボルレート/ビットレート < 1 の実現

- 1) サーボ系の複雑化
- 2) マルチヘッドの開発要

表 1 今後期待される各種記録符号の Merit, Demerit

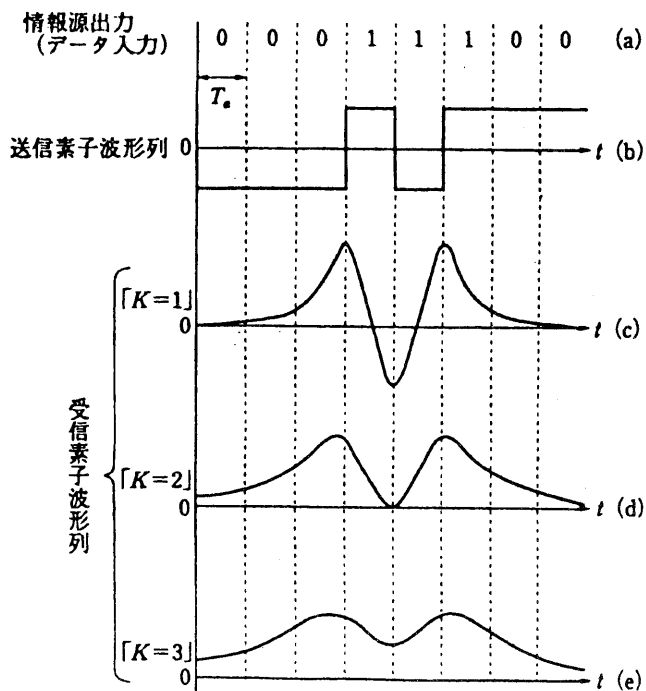


図 2 データ入力, 送信送信素子波形列受信素子波形列との相互関係