Superlattice Structures: Co/Ru, Co/Cr and Fe/Cr", Physical Review Letters, **64**, 19, pp. 2304-2307 (1990)

- 21) T. Shinjo and H. Yamamoto: "Large Magnetoresistance of Field-Induced Giant Ferrimagnetic Multilayers", J. Phys. Soc. of Japan, **59**, 9, pp. 3061-3064 (1990)
- 22) B. Dieny, V. S. Speriosu, S. Martin, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, P. Baumgart, and D. R. Wilhoit: "Magnetotransport Properties of Magnetically Soft Spin-Valve Structures", J. Appl. Phys., **69**, 8, pp. 4774-4779 (1991)
- 23) 上口, 岩崎, 橋本, 澤邊, 佐橋: "Co-Fe/Cu スピンバルブ膜の

構造と巨大 MR 効果", 応用磁気誌, **17**, S 2, pp. 91-96 (1993)

ぬまざわ じゆんじ
沼澤 潤二 昭和 46 年, 北海道大学大学院電子工学科修士課程修了。同年, NHK に入局。現在, NHK 放送技術研究所に勤務し, 磁性薄膜, 垂直磁気記録技術の研究開発に従事。平成 4 年より, 記録・機構研究部副部長。正会員。

2-2 高密度トラッキング技術

石 岡 秀 昭[†], 正会員 武 田 立[†]

1. ま え が き

磁気記録の歴史において「トラッキング位置決め技術」は, それを抜きにして論じられないほど高密度記録の実現に重要な位置を占めてきた。

テープ系では, 6.35 mm 幅にオーディオ 2 チャンネルを録音した 1950 年代から, 10 μ m 幅にビデオ/クロマを多重記録している現代まで, 40 年間で実に 300 倍以上の高トラック密度化を達成している。ディスク系では, 1957 年に実用化された IBM 社の磁気メモリーではトラック幅が 1.3 mm 程度だったのが, 後に紹介する PERM ディスクでは同 4.8 μ m を実現し, これも約 270 倍である。これらの開発の歴史は他著に譲り, 本稿では, 磁気記録用トラッキング位置決め技術の最先端をテープ系, ディスク系それぞれについて紹介する。

2. 磁気テープ装置のトラッキング位置決め技術

2.1 回転ヘッド型テープ装置におけるサーボ方式

回転ヘッド型テープ装置のサーボ方式は, CTL ヘッド信号を用いたタイミング制御のみを行い, トラックずれのリアルタイム補正を行わないオープンループ方式からスタートし, CTL ヘッド信号を用いたタイミング制御に加えて再生 RF 信号から常時ずれ量を推定してトラックずれ微調整を行うセミクローズドループ方式へ, さらに, タイミング制御・トラックずれ微

調整ともトラック上に記録した専用のサーボ信号を用いる完全クローズドループ方式へと進化してきた。

表 1 は, この流れに沿って回転ヘッド型テープ装置のサーボ方式の概要をまとめたものである。

このうち, 1/2 インチ VTR, 8 mm VTR, 業務用アナログ VTR, DAT については, 本誌 90 年 9 月号の「記録関連機器のサーボ技術」小特集中の各記事^{1)~4)}に詳しいのでそちらに譲り, 以下では, 最新技術であるデジタルベータカム VTR のトラッキング方式について紹介する。

2.2 デジタルベータカムのトラッキング方式

デジタルベータカム VTR⁵⁾は, 放送業務用として広く使われているアナログコンポーネント VTR 「ベータカム」との上位再生互換を実現した, 多用途デジタルコンポーネント VTR である。

デジタルベータカムでは, ナロートラックにおけるインサート編集互換を保証するため, ヘリカルトラック上にトラッキング専用の位置信号を記録する, 新しいトラッキング技術を導入している。

デジタルベータカムにおいては, 1 フィールドは 6 トラックで構成され, 各トラックでは 4 つのオーディオセクタをセンターに配置している。その両側に, 上述したトラッキング専用信号のエリア, さらにその前後に 2 つのビデオセクタを配置している。

図 1 は, センター付近のトラック配置を示したものであり, オーディオセクタを挟むようにしてその前後に以下の 2 種類の信号が記録される。

- (i) TTS (Tracking Timing Signal) オーディオセクタの前に記録される 4 MHz の信号 (A ch のみ)
- (ii) TPS (Tracking Pilot Signal) オーディオ

[†] ソニー株式会社 コンポーネントカンパニー

"Tracking Control Techniques for Higher Track Density in Tape and Disk Magnetic Recording Equipment" by Hideaki Ishioka and Toru Takeda (Data Storage Division, Component Company, Sony Corporation, Tokyo)

表 1 回転ヘッド型テープ装置のサーボ方式

サーボ方式	オープンループヘリカル	自動オフセット補正式オープンループヘリカル	セミクローズドループヘリカル	完全クローズドループヘリカル	
位置センサ	長手走行用コントロール(CTL)ヘッド	同左	録再用揺動型回転ヘッド(CTLヘッド併用)	録再用固定型回転ヘッド	
アクチュエータ	キャプスタン	同左	同左	同左	
プリフォーマット	不要	同左	同左	同左	
サーボ系 f 特の制限要因	キャプスタン・テープ間のメカ振動	同左	同左	同左	
トラックずれと補正方式とその概要	手動補正： 人間がコントロールつまみを回して調整。	オートトラッキング： カセット入れ替え時等に、自動的に再生RFレベルが最大になる最適位置を探す。最適位置を決定した後は、トラッキングを固定。	ダイナミックトラッキング： ヘッドを数百Hzで微小振動させ、その周波数のRFエンベロープ振動が0になるように制御する方式（ウォーリング方式；1インチType C/Uマチック）。ヘッド位置を一定量ずつ変化させて再生RF振幅が最大になる位置に収束させる方式（ベータカム）がある。	ATF (Automatic Track Finding)： 4周波のパイロット信号を記録し、トラック左右からのクロストークが等しくなるようにサーボをかける。パイロット信号の記録は、8mm VTRはビデオ信号への周波数多重記録、DATは専用のエリアを使用する。	TTSサーボ+TPSサーボ： TTS, TPSという2種類のトラッキング専用信号を用いる。まず、TTS信号情報からタイミングずれを検出してジャストトラックに近づけ、その後TPS信号の再生レベルが最大になるようにサーボをかける。オーバーライト時にも常にサーボが有効な点の特徴。
適用例	1/2インチVTR（ベータマックス、VHS）	最近の1/2インチVTR	1インチType C / Uマチック/アナログベータカム	8mmVTR/DAT	デジタルベータカム

図 1 トラック配置（センター付近）⁵⁾

図 2 TTS制御⁵⁾

オセクタの後に記録される4MHzの信号（A chおよびC ch）

(1) 編集時のサーボ動作

インサート編集時には、まずプリロール区間で主として速度サーボであるCTLサーボをかけるが、その時にTTS信号の情報からトラックずれ量とその方向を検出してジャストトラックに近づけ、その後、

TPS信号の再生レベルが常に最大になるように位置ループサーボをかける。このTPS信号を使ったサーボはインサート中常に働き続けるため、たとえIN点からOUT点の途中でトラックピッチ方向の変化があったとしても常に追従できる。

(2) TTS制御

TTS制御の考え方を図2に示す。400kHzの信号

はテープ上いつも正確な位置に描かれ、通常その再生タイミングはドラム PG に対し一定時刻となる。しかし、トラックずれがあると、ヘリカルトラックの傾きは長手方向に対し約5°であるので、ずれ量が約10倍に変換されて観測される。すなわち、テープ長手送り位相が進む方向のトラックずれの時は再生タイミングが遅れ、逆にテープ送り位相が遅れる方向のトラックずれの時は再生タイミングが早くなる。この原理でずれ量とその方向を検知している。

(3) TPS 制御

TPS 制御の考え方を図3に示す。再生 RF のレベルが常に最大になるよう山登り制御をキャプスタンに対し行っている。この再生は、インサート記録動作中でも働くので、下地のトラックパターンに対して正確に編集作業を行うことができるという特長を持つ。

3. 磁気ディスク装置のトラック位置決め技術

3.1 磁気ディスクにおけるサーボ方式

磁気ディスクにおけるサーボ方式の歴史は、テープ

図 3 TPS 制御⁵⁾

装置の場合と同様に、最初はステッピングモータ等を使ったオープンループ方式からスタートし、専用のサーボ面や光スケール等の記録再生面以外からの位置情報を用いたセミクローズドループ方式、さらにセクタサーボ方式に代表される記録再生面からの位置情報を用いる完全クローズドループ方式へと進化してきている。日立 2 Gb/in² 技術⁶⁾やソニー PERM 方式⁸⁾は、この記録再生面に書込む位置情報の高精度化を図ったものである。

表2に、磁気ディスク装置における最新のサーボ方式をまとめた。紙面の都合上、以下ではこのうち我がが開発した PERM (Pre-Embossed Rigid Magnetic) 方式に絞って、より詳しく紹介する。

写真 1 実験用ディスクのサーボマーク付近 (拡大写真)

表 2 磁気ディスクにおける最新のサーボ方式

サーボ方式	セクタサーボ	プリフォーマット 磁気信号サーボ	プリフォーマット 光信号サーボ
フォーマット方式	サーボライタを用いた機械的位置決めにより、自身の磁気ヘッドを順次トラック方向に送りながらサーボマークを書込む。	レーザカッティングによりマスクを作製し、スタンピングによりサーボマークを一括形成。形成したサーボマークを磁気ヘッドで着磁。	レーザカッティングによりマスクを作製し、フォトリソグラフィにより、サーボビットを一括形成。(光検出用として使用)
位置信号検出方法	データ再生用磁気ヘッドで位置信号も検出	同左	半導体レーザとフォトディテクタを用いて、光により位置信号を検出
アクチュエータ	1 段 (VCM)	同左	2 段 (VCM+圧電アクチュエータ)
サーボ系 f 特 の制限要因	アーム、サスペンションのメカ振動	同左	同左
サーボ方式の 得失	サーボマークの位置精度が、ドライブ自身とサーボライタの機械的精度に依存する。 偏心がない。	光ディスク技術を応用してサーボマークを一括形成する方式を採用したことにより、サーボマークの位置精度を高精度化できる。	位置信号検出を光により行うので、位置信号 S/N の点で有利。小型のディスク装置に適用する上では、位置信号検出を光学的に行うことは難しい。
代表例	IBM 次期 2.5 インチモデル (トラックピッチ 4.8 μm [予告値])	ソニー PERM (トラックピッチ 4.8 μm)	日立 2 Gb/in ² 研究発表 (トラックピッチ 1.5 μm)

(1) PERM ディスク

形成したサーボマークは、凸部と凹部を互いに逆極性に着磁することにより、従来通り磁気ヘッドのみで位置情報を正確に読取ることができる⁹⁾。

PERM 方式におけるトラック位置決め制御を考える上で問題となるのは、プリフォーマットしたディスクをドライブに組み込むので、取り付け時の公差によりトラック中心と回転中心が数十 μm ずれる（数トラック相当の偏心を生ずる）ことである。

そこで、PERM 位置決め制御系では、通常の閉ループ制御系に加えて、偏心抑圧のためのフィードフォワード制御方式を導入した。

周期的な外乱を受けるフィードバック制御系に対して、フィードフォワード制御を併用すると、閉ループゲインを上げなくても外乱周波数に対する見かけの外

Figure 10 consists of three subplots labeled (a), (b), and (c), each showing a comparison between a reference signal (top trace) and a tracking signal (bottom trace) over one full rotation of 16.7 ms. The vertical axis for all plots represents a distance of 5.2 μm .

- (a) **ヘッド半径固定** (Head radius fixed): The tracking signal shows significant deviation from the reference signal, with large periodic errors.
- (b) **フィードフォワード制御のみ** (Feedforward control only): The tracking signal is much closer to the reference signal than in (a), but still shows noticeable periodic errors.
- (c) **フィードフォワード制御とヘッド半径適応** (Feedforward control and head radius adaptation): The tracking signal closely follows the reference signal, with a much smaller tracking error indicated by a scale of $\pm 0.27 \mu\text{m}$.

A horizontal double-headed arrow at the bottom of the figure indicates the duration of one rotation: 1 回転 (16.7ms).

(c) フィードフォワード制御・フィードバック制御併用

写真 2 位置決め実験における信号波形の例

図 4 位置決め制御系の構成

なお、フィードフォワードのための偏心量の計測方法については時間領域で計測する新たな方式を採用しているが、詳細は文献¹²⁾を参照されたい。

図4にPERM位置決め制御系のブロック図を示す。実現は、16ビット固定小数点DSPを用いて行った。

(3) 位置決め実験例

本制御系を用い、スピンドル上で位置決め実験を行ったときの信号波形の例を写真2に示す。写真2(a)では、 $\pm 30\mu\text{m}$ 程度の偏心のため、ヘッド半径固定時に11本トラックを横切っている。フィードフォワード制御を行うことにより1/2トラック程度まで抑圧され(写真2(b))、さらに制御帯域700Hzの閉ループ(PID)制御と併用することでほとんど偏心成分がなくなり、 $\pm 0.27\mu\text{m}$ の位置決め精度を得ているのがわかる(写真2(c))。

3.3 HDDにおけるその他の注目技術

紹介したもの以外で今後期待される制御技術として、振動外乱や制御対象の高次共振の影響なども考慮した制御設計が行える H_∞ 制御などのロバスト制御の手法があり、HDDにも適用が試みられている¹³⁾¹⁴⁾。

4. む す び

磁気記録用トラック位置決め技術を、テープ系・ディスク系それぞれについて代表例を中心に紹介した。

特に、磁気ディスクの高密度化技術の代表例として紹介したPERM方式は、今後トラック方向の高密度化をさらに進めていく上で有望であり、数年後にトラックピッチを光ディスクと同等まで詰めることが可能と考えている。

本稿執筆にあたり、デジタルベータカムVTRのサーボ方式については当社放送機器事業本部次長の坂本斉氏の了解を得て文献⁹⁾から引用した。記して謝意を表します。

(1993年12月27日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 伊藤：“1/2インチVTR”，テレビ誌，44，9，pp.1166-1170 (Sep. 1990)
- 2) 菊地：“8mm VTR”，テレビ誌，44，9，pp.1170-1173 (Sep. 1990)
- 3) 吉弘，永井：“業務用VTR”，テレビ誌，44，9，pp.1162-1166 (Sep. 1990)
- 4) 荒井：“DAT”，テレビ誌，44，9，pp.1174-1175 (Sep. 1990)
- 5) 坂本，須田，喜多：“デジタルベータカムVTRの開発”，テレビ学画像情報記録研究，17，59，VIR 93-58，pp.27-32 (Oct. 1993)
- 6) 二本，釘屋：“2Gb/in²高密度磁気ディスク技術”，信学論C-II，J75-C-II，11，pp.567-575 (Nov. 1992)
- 7) 大槻，森，宗本，赤城：“磁気ディスク装置2ステージアクセスサーボ系のトラック追従制御”，信学論C-II，J75-C-II，11，pp.653-662 (Nov. 1992)
- 8) 石田，渡辺：“ハード・ディスク装置の容量を光ディスク並に上げる技術を開発”，日経エレクトロニクス，No.586，pp.169-182 (July 19, 1993)
- 9) 大貫ほか：“縦型MRヘッドを用いたエンボス位置決めマークの再生信号品質の評価”，信学技報，MR 93-2，pp.7-14 (1993)
- 10) 松本：“離陸する大容量3.5FDD精密メカと制御技術がかなめ”，日経メカニカル，1989.8.7日号，pp.44-54 (Aug. 7, 1989)
- 11) 吉浦，吉田，若林：“高密度FDDのトラッキングサーボ”，信学技報，MR 90-18，pp.9-15 (1990)
- 12) 富崎，世古，武田：“ディスク偏心量の時間軸計測とPLL高精度化への応用”，信学技報，MR 93-1，pp.1-6 (1993)
- 13) 平田，劉，美多，山口：“ H_∞ 制御理論を用いたハードディスクのヘッド位置決め制御”，計測自動制御学会論文集，29，1，pp.71-77 (Jan. 1993)
- 14) 高倉，山田：“小型磁気ディスク装置の高精度ヘッド位置決め”，信学技報，MR 93-11，pp.13-18 (1993)

いしおか ひであき

石岡 秀昭 平成元年，東京工業大学大学院制御工学専攻修士課程修了。同年，ソニー(株)に入社。磁気ディスクサーボ系の研究開発に従事し，現在に至る。

たけだ とおる

武田 立 昭和49年，北海道大学工学部電気工学科修士課程修了。同年，NTT武蔵野電気通信研究所に入社。光ディスクの開発・ISO標準化に従事。平成4年より，ソニー(株)にて，PERMディスクの開発に従事し，現在に至る。正会員。