

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4504830号  
(P4504830)

(45) 発行日 平成22年7月14日(2010.7.14)

(24) 登録日 平成22年4月30日(2010.4.30)

(51) Int. Cl. F I  
G 1 1 B 21/10 (2006.01) G 1 1 B 21/10 L

請求項の数 6 (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2005-31547 (P2005-31547)	(73) 特許権者	503116280
(22) 出願日	平成17年2月8日(2005.2.8)		ヒタチグローバルストレージテクノロジー
(65) 公開番号	特開2006-221682 (P2006-221682A)		ズネザーランドビービー
(43) 公開日	平成18年8月24日(2006.8.24)		オランダ国 アムステルダム 1076
審査請求日	平成20年2月4日(2008.2.4)		エイズィ パルナスストーレン ロカテリ
			ケード 1
		(74) 代理人	110000350
			ポレール特許業務法人
		(74) 代理人	100068504
			弁理士 小川 勝男
		(74) 代理人	100095876
			弁理士 木崎 邦彦
		(72) 発明者	熱海 武憲
			東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地
			株式会社日立製作所研究開発本部内
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 磁気ディスク装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

情報を記録する磁気ディスクと、  
前記磁気ディスクに情報を記録しまたは前記磁気ディスクの情報を再生する磁気ヘッドと、

前記磁気ヘッドを駆動するアクチュエータと、

与えられた目標位置信号と前記磁気ヘッドにより再生された位置信号とに基づいて、前記磁気ヘッドが目標位置となるように制御するための制御信号を生成して、前記磁気ヘッド及び前記アクチュエータを含む制御対象を制御する制御部と、を備え、

前記制御部は、与えられた目標位置信号と前記磁気ヘッドにより再生された位置信号とに基づき誤差信号を入力とし、前記制御対象に存在する機構振動モードを安定化するように位相補償を行なう制御信号を生成する補償器と、前記補償器で生成された制御信号を入力とし、与えられた位置決め精度向上対象周波数もしくはその近傍にその共振特性を有する共振フィルタと、前記共振フィルタに対して位相特性を操作するモード位相フィルタと、を備え、

前記制御部と前記制御対象とを接続したときの開ループ伝達特性に制御対象の機構共振周波数以外の周波数に共振特性が存在し、かつ前記開ループ伝達特性のゲイン特性が 0 dB となる周波数よりも前記共振特性の周波数の方が高い周波数であり、かつ前記共振特性の周波数で前記開ループ伝達特性のベクトル軌跡の座標を (Rop, Iop) としたときに、前記共振特性の周波数で前記開ループ伝達特性の位相がアークタンジェント (Iop

10

20

$/(Rop + 1)$  )となるように前記制御部を構成したことを特徴とする磁気ディスク装置。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の磁気ディスク装置において、前記制御部と前記制御対象とを接続したときの開ループ伝達特性をナイキスト線図上で表したベクトル軌跡が、位置決め精度向上対象周波数の近傍で周波数の増大と共にナイキスト線図上の不安定点の座標  $(-1, 0)$  から遠ざかる方向の右回りの円軌跡を生成する特性を有することを特徴とする磁気ディスク装置。

【請求項 3】

請求項 1 に記載の磁気ディスク装置において、前記制御部は、前記与えられた目標位置信号と前記磁気ヘッドにより再生された位置信号との差を誤差信号として取り出しこの誤差信号を前記補償器に出力する誤差検出部と、前記モード位相フィルタで生成された制御信号と前記補償器で生成された制御信号とを加算し前記制御対象に制御信号として出力する加算部と、を備えることを特徴とする磁気ディスク装置。

10

【請求項 4】

請求項 1 に記載の磁気ディスク装置において、前記制御部は、前記モード位相フィルタで生成された制御信号と前記磁気ヘッドにより再生された位置信号とを加算する加算部と、前記与えられた目標位置信号と前記加算部で生成された位置信号との差を誤差信号として取り出しこの誤差信号を前記補償器に出力する誤差検出部と、を備えることを特徴とする磁気ディスク装置。

20

【請求項 5】

請求項 3 または 4 に記載の磁気ディスク装置において、前記制御部と前記制御対象とを接続したときの開ループ伝達特性をナイキスト線図上で表したベクトル軌跡が、位置決め精度向上対象周波数の近傍で周波数の増大と共にナイキスト線図上の不安定点の座標  $(-1, 0)$  から遠ざかる方向の右回りの円軌跡を生成する特性を有することを特徴とする磁気ディスク装置。

【請求項 6】

請求項 3 または 4 の何れかに記載の磁気ディスク装置において、前記制御部は複数の共振フィルタと複数のモード位相フィルタとを備えることを特徴とする磁気ディスク装置。

【発明の詳細な説明】

30

【技術分野】

【0001】

本発明は、磁気ディスク装置に係り、特に磁気ヘッドを含む制御対象の位置決め制御を行なう制御部を備えた磁気ディスク装置に好適なものである。

【背景技術】

【0002】

磁気ディスク装置では、磁気ヘッドが回転している磁気ディスク面上の目的とするトラックに追従してデータの記録（書き込み）、再生（読み出し）を行っている。このような磁気ディスク装置では、スピンドルモータの回転軸に記録媒体である磁気ディスクが固定されており、磁気ディスクはスピンドルモータに駆動されて定められた回転数で回転する。また、スピンドルモータの回転軸に保持された磁気ディスクの半径方向の外側に、ピボット軸受がスピンドルモータ軸に平行になるように設けられ、磁気ヘッドを先端に固定したキャリッジがピボット軸受に揺動可能に固定されている。キャリッジは、ボイスコイルモータ（VCM）により駆動されて、ピボット軸受を中心に揺動する。つまり、磁気ヘッドは、キャリッジの揺動により、磁気ディスクの面上を半径方向に移動して目的のトラックに到達し、そのトラックに追従してデータの記録、再生を行なう。

40

【0003】

磁気ヘッドはVCMにより移動される。磁気ヘッドは磁気ディスク上のサーボセクターに記録されている位置信号を検出して現在位置を知る。磁気ヘッドにより検出された位置信号はヘッド信号増幅器により増幅され、サーボ信号復調器により復調されてサーボ信号

50

となる。サーボ信号はA/D変換器を経てデジタル位置信号となり、バスを介して制御部であるMPUに取り込まれる。

【0004】

このバスには、A/D変換器、D/A変換器、MPU、ROM、RAM、インターフェースコントローラが接続されており、ROMにはMPUで実行する各種の制御プログラムが格納され、また各種の制御に必要なパラメータも格納されている。

【0005】

MPUに取り込まれた位置信号はMPUで処理され、以下の方法でVCM制御信号が生成される。まず、インターフェースコントローラが、ホスト側コントローラのコマンドを受けて、MPUに対して記録、再生のアクセス要求を出す。データの記録、再生を要求するコマンドが発行されると、MPUはROMに記録されている位置決めの方法を実行して、取り込んだ位置信号で示される現在のヘッド位置から目標位置までの距離に応じて最適なVCM制御信号を生成する。生成されたVCM制御信号はバスに出力され、D/A変換器を経てパワーアンプ制御信号となり、パワーアンプに入力される。入力されたパワーアンプ制御信号はパワーアンプで電流に変換され、VCMへ印加される。VCMは印加された電流に応じてアクチュエータの駆動力を発生し、磁気ヘッドを目標とする位置に位置決めする。

10

【0006】

コンピュータの外部記憶装置である磁気ディスク装置では、記憶容量を増加させるためにトラック幅が年々微小になっており、磁気ヘッドをトラック幅に対して高精度に位置決めするためには、年々微小になるトラック幅に追従して位置決め精度を向上させることが必要であり、それを高速動作で達成することが必要である。位置決め精度を悪化させる要因であるディスクの回転に同期した振動や装置内部に発生する風の影響による振動などは、ある特定周波数において位置決め精度を悪化させることとなる。例えば、磁気ディスクの回転中心とトラックの中心が偏心していると、同じトラックを磁気ヘッドが追従するときでも、磁気ヘッドは半径方向に位置を変えてトラックを追従しなければならない。トラックが真円でなくて歪んでいても同じである。この場合の磁気ヘッドの動きは、磁気ディスクの回転に同期した周波数の振動となり、この周波数での追従の精度が悪化する。また、磁気ディスクの回転に伴って磁気ディスク表面付近で風が生じ、この風によって磁気ヘッドの振動が生じ、位置決め精度を悪化させる。この振動は、磁気ヘッドやキャリッジの構造や磁気ディスクの回転数に影響される、ある特定の周波数で生じる。

20

30

【0007】

上述したように、位置決め精度を悪化させる要因として、ディスクの回転に同期した位置信号の振動や機構系の振動があり、これらは位置信号の振動となって現れ、このような振動を十分に抑圧する制御が必要である。このための従来技術としては、例えば特開平5-298842号公報(特許文献1)があり、位置情報に含まれる偏心成分に追従して磁気ヘッドを位置決めする手法が開示されている。この特許文献1の磁気ディスク装置では、ディスク回転や外乱等に起因する振動周波数に共振点を持つ数学モデルと帯域を制限するローパスフィルタとを用いてその振動を抑制するための制御信号を生成し、この制御信号を磁気ヘッドの位置決めのためのサーボ制御信号として加えるという方法が示されている。

40

【0008】

また、他の従来技術としては、特開2002-352534号公報(特許文献2)及び特開2003-331543号公報(特許文献3)に記載されたものがあり、位置決め精度を改善する周波数付近に共振点を持つ機構共振モードを実現する共振フィルタを設計する方法が示されている。特許文献2の磁気ディスク装置では、安定な位相条件を持つ共振フィルタを制御対象に対して直列に結合する方法が示されており、特許文献3の磁気ディスク装置では、安定な位相条件を持つ共振フィルタを制御対象に対して並列に結合する方法が示されている。

【0009】

50

【特許文献1】特開平5 - 298842号公報

【特許文献2】特開2002 - 352534号公報

【特許文献3】特開2003 - 331543号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

特許文献1に示されるような、帯域を制限するローパスフィルタを用いた手法では、生成する共振制御信号の周波数が制御系の開ループ伝達特性におけるゲイン0dBクロスオーバー周波数（入出力の振幅比が1となる周波数）や制御帯域を制限している機構系の一次共振（主共振）の周波数を超える場合に、その安定性を保証することが出来ず、制御系が発散することが起こり得る。

10

【0011】

また、特許文献2及び特許文献3に示す方法では、位相条件の安定な共振モードが存在する周波数領域においては外乱による位置決め誤差を低減できるが、位相条件によらず共振モードが不安定となる周波数（開ループ位相特性が $-180^\circ$ 付近となる周波数）領域においてはその安定性を保証することが困難であるということが分かった。特に、外乱振動が増幅される（感度関数のゲインが1より大きい）領域は、開ループ位相特性が $-180^\circ$ 付近となる周波数であるため、その周波数での適用に制限があることは重大な制約である。

【0012】

20

本発明の目的は、制御帯域や主共振を超えた周波数及び開ループ位相特性が不安定となる周波数においても、制御系の安定性を損なうことなく位置決め精度を向上させることができる磁気ディスク装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0013】

前述の目的を達成するために、本発明は、情報を記録する磁気ディスクと、前記磁気ディスクに情報を記録しまたは前記磁気ディスクの情報を再生する磁気ヘッドと、前記磁気ヘッドを駆動するアクチュエータと、与えられた目標位置信号と前記磁気ヘッドにより再生された位置信号とに基づいて、前記磁気ヘッドが目標位置となるように制御するための制御信号を生成して、前記磁気ヘッド及び前記アクチュエータを含む制御対象を制御する制御部と、を備え、前記制御部は、与えられた目標位置信号と前記磁気ヘッドにより再生された位置信号とに基づく誤差信号を入力とし、前記制御対象に存在する機構振動モードを安定化するように位相補償を行なう制御信号を生成する補償器と、前記補償器で生成された制御信号を入力とし、与えられた位置決め精度向上対象周波数もしくはその近傍にその共振特性を有する共振フィルタと、前記共振フィルタに対して位相特性を操作するモード位相フィルタと、を備え、前記制御部と前記制御対象とを接続したときの開ループ伝達特性に制御対象の機構共振周波数以外の周波数に共振特性が存在し、かつ前記開ループ伝達特性のゲイン特性が0dBとなる周波数よりも前記共振特性の周波数の方が高い周波数であり、かつ前記共振特性の周波数で前記開ループ伝達特性のベクトル軌跡の座標を $(R_{op}, I_{op})$ としたときに、前記共振特性の周波数で前記開ループ伝達特性の位相がアークタンジェント $(I_{op} / (R_{op} + 1))$ となるように前記制御部を構成したものである。

30

40

【0014】

係る本発明におけるより好ましい具体的構成例は次の通りである。

(1) 前記制御部と前記制御対象とを接続したときの開ループ伝達特性をナイキスト線図上で表したベクトル軌跡が、位置決め精度向上対象周波数の近傍で周波数の増大と共にナイキスト線図上の不安定点の座標 $(-1, 0)$ から遠ざかる方向の右回りの円軌跡を生成する特性を有すること。

【0016】

(2) 前記制御部は、前記与えられた目標位置信号と前記磁気ヘッドにより再生された位

50

置信号との差を誤差信号として取り出しこの誤差信号を前記補償器に出力する誤差検出部と、前記モード位相フィルタで生成された制御信号と前記補償器で生成された制御信号とを加算し前記制御対象に制御信号として出力する加算部と、を備えること。

(3) 前記制御部は、前記モード位相フィルタで生成された制御信号と前記磁気ヘッドにより再生された位置信号とを加算する加算部と、前記与えられた目標位置信号と前記加算部で生成された位置信号との差を誤差信号として取り出しこの誤差信号を前記補償器に出力する誤差検出部と、を備えること。

(4) 前記(2)または(3)において、前記制御部と前記制御対象とを接続したときの開ループ伝達特性をナイキスト線図上で表したベクトル軌跡が、位置決め精度向上対象周波数の近傍で周波数の増大と共にナイキスト線図上の不安定点の座標(-1, 0)から遠ざかる方向の右回りの円軌跡を生成する特性を有すること。

(5) 前記(2)または(3)において、前記制御部は複数の共振フィルタと複数のモード位相フィルタとを備えること。

【発明の効果】

【0017】

本発明の磁気ディスク装置によれば、制御帯域や主共振を超えた周波数及び開ループ位相特性が不安定となる周波数においても、制御系の安定性を損なうことなく位置決め精度を向上させることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0018】

以下、本発明の複数の実施例について図を用いて説明する。各実施例の図における同一符号は同一物または相当物を示す。

【0019】

本発明の第1実施例の磁気ディスク装置を図1から図10を用いて説明する。

【0020】

まず、本実施例の磁気ディスク装置100の全体構成に関して図1を参照しながら説明する。図1は本実施例の磁気ディスク装置の構成図である。磁気ディスク装置100は、磁気ディスク5と、スピンドルモータ6と、ピボット軸受3と、キャリッジ4と、ボイスコイルモータ2と、磁気ヘッド1と、位置決め制御装置90と、を含んで構成されている。

【0021】

磁気ディスク5は、情報を記録する円盤状の記録媒体であり、各トラックの所定位置に予め位置情報等を含むサーボ情報を記録したサーボセクター7を有している。スピンドルモータ6は、この磁気ディスク5の中心部に配置され、磁気ディスク5を定められた回転数で回転させるものである。ピボット軸受3は、磁気ディスク5の半径方向の外側に配置され、ピボット軸受3の軸線がスピンドルモータ軸に平行になるように設けられている。キャリッジ4は、このピボット軸受3に固定され、このピボット軸受3と共に揺動可能になっている。ボイスコイルモータ(VCM)2は、このキャリッジ4を駆動するものであり、ピボット軸受3を中心にキャリッジ4を揺動させる。磁気ヘッド1は、このキャリッジ4の先端に固定され、キャリッジ4の揺動により磁気ディスク5の面上を半径方向に移動されて目的のトラックに到達し、そのトラックに追従してデータの記録、再生を行なう。このように、磁気ヘッド1を移動させるための動力はボイスコイルモータ2により発生する。また、キャリッジ4とVCM2とは磁気ヘッド1に対するアクチュエータ80を構成する。

【0022】

位置決め制御装置90は、磁気ヘッド1とVCM2とに接続され、磁気ヘッド1から位置信号等を含むサーボ信号を受取り、VCM2にVCM制御信号を与えるものである。この位置決め制御装置90は、磁気ヘッド1に信号線で接続されたヘッド信号増幅器8と、ヘッド信号増幅器8に接続されたサーボ信号復調器9と、サーボ信号復調器9に接続されたAD変換器10と、AD変換器10に接続されたバス13と、バス13に接続されたR

10

20

30

40

50

RAM 14、ROM 15、MPU 16及びインターフェースコントローラ 17と、入力側をバス 13に接続され出力側をパワーアンプ 12に接続されたDA変換器 11と、入力側をDA変換器 11に接続され出力側をVCM 2に接続されたパワーアンプ 12と、を含んで構成されている。

#### 【0023】

磁気ディスク 5上のサーボセクター 7に記録されている位置情報を含むサーボ情報は、磁気ヘッド 1により検出され、ヘッド信号増幅器 8により増幅され、サーボ信号復調器 9により復調される。復調されたサーボ信号 19はAD変換器 10によりデジタル化される。このデジタル化されたサーボ信号には位置信号 20も含まれている。こうして得られた位置信号 20はバス 13を介して制御部であるMPU 16に取り込まれる。

10

#### 【0024】

MPU 16に対してはバス 13を介してROM 15、RAM 14が接続されている。ROM 15にはMPU 16で実行する各種の制御プログラムが格納され、また各種の制御に必要なパラメータも格納されている。また、MPU 16に対してはバス 13を介してインターフェースコントローラ 17が接続されており、ホスト側コントローラ 18からのコマンドを受けて、MPU 16に対して記録、再生のアクセス要求を出す。データの記録、再生を要求するコマンドが発行されると、MPU 16はROM 15に格納されている位置決め制御用のプログラムを実行して、入力された位置信号 20から目標位置までの距離を求め、この移動距離に応じて最適なVCM制御信号 21を生成する。生成されたVCM制御信号 21は、DA変換器 11を介してパワーアンプ制御信号 22となり、パワーアンプ 12を介して電流 23に変換され、VCM 2へ操作信号として印加される。これによって磁気ヘッド 1は磁気ディスク 5の目標とする位置に位置決めされる。

20

#### 【0025】

本実施例の位置決め制御装置 90は、位置信号 20を入力してVCM制御装置信号 21を生成するためのMPU 16による処理方法に大きな特徴がある。

#### 【0026】

次に、位置決め制御装置 90に関して図 2及び図 3を参照しながら説明する。図 2は、本実施例の磁気ディスク装置の制御系のブロック線図であり、共振フィルタ 30を制御対象 27に対して直列に結合する方式の構成例を示すものである。図 3はこのときの制御対象 27の伝達特性  $P(z)$  を示し、図 3(A)がそのゲイン特性 41を示し、図 3(B)がその位相特性 42を示す。

30

#### 【0027】

図 2における制御系は、制御対象 27及びフォロイング制御部 28から構成されている。制御対象 27は、磁気ヘッド 1及びアクチュエータ 80を含んで構成されるものであり、具体的には、MPU 16で算出されたVCM制御信号 21を入力とし、デジタル化された位置信号 20を出力するところの、DA変換器 11からAD変換器 10に至るまでの部分で構成されるものである。この制御対象 27の入出力特性を表したものが伝達特性  $P(z)$  である。

#### 【0028】

フォロイング制御部 28は、誤差検出部 32と、共振フィルタ 30(伝達特性を  $C_r(z)$  とする)とモード位相フィルタ 31(伝達特性を  $C_p(z)$  とする)と、フォロイング補償器 29(伝達特性を  $C_f(z)$  とする)と、加算部 33と、を備えて構成されている。共振フィルタ 30は、安定な位相条件を有する共振特性を実現するためのものであり、フォロイング補償器 29は望ましい制御性能を実現するためのものである。

40

#### 【0029】

このフォロイング制御部 28において、ホスト側コントローラ 18から目標位置信号 24を含むコマンドが発行されると、この与えられた目標位置信号 24と磁気ヘッド 1より再生された位置信号 20との差分信号である誤差信号 P E S (position error signal) 25を誤差検出部 32により生成する。この誤差信号 P E S 25をフォロイング補償器 29に入力することにより、フォロイング補償器 29で制御対象 27に存在する機構振動モ

50

ードを安定化するように位相補償を行なうための制御信号  $U_{p26}$  を生成して出力する。この制御信号  $U_{p26}$  を共振フィルタ 30 へ入力する。共振フィルタ 30 は、与えられた位置決め精度向上対象周波数もしくはその近傍にその共振特性を有しており、制御信号  $U_{p26}$  をフィルタリングして出力する。共振フィルタ 30 からの出力をモード位相フィルタ 31 へ入力する。モード位相フィルタ 31 は、共振フィルタ 30 に対して位相特性を操作するものであり、共振フィルタ 30 からの出力をフィルタリングして出力する。モード位相フィルタ 31 から出力された制御信号とフォロイング補償器 29 から出力された制御信号  $U_{p26}$  とを加算部 33 により加算して VCM 制御信号 21 を生成し、この VCM 制御信号 21 を制御対象 27 に出力する。

【0030】

制御対象 27 及びフォロイング制御部 28 の具体例をさらに詳細に説明する。まず、制御対象 27 は、剛体モードと 1 つの機構共振モードとからなる式 (数 1) の機構系モデル  $P_s(s)$  を、デジタル制御系であることを想定して零次ホールド付で離散化したものとする。その際のサンプリング時間を  $T_s$  とする。なお、式 (数 1) において、剛体モードが  $1/s^2$  であり、機構共振モードが  $r/s^2 + 2 \cdot r \cdot s + r^2$  である。

【0031】

【数 1】

$$P_s(s) = \frac{1}{s^2} + \frac{\alpha r}{s^2 + 2 \cdot \zeta_r \cdot \omega_r \cdot s + \omega_r^2} \quad (\text{数1})$$

【0032】

例えば、式 (数 1) において、モード影響定数  $r = -1$ 、粘性係数  $r = 0.03$ 、共振周波数  $r = 6000 \times 2$  [rad/s] とし、サンプリング時間  $T_s$  を  $50 \mu s$  とする。この場合における制御対象 27 の伝達特性  $P(z)$  のゲイン特性 41 を図 3 (A) に示し、その位相特性 42 を図 3 (B) に示す。図 3 の制御対象 27 においては、機構共振モードのモード影響定数  $r$  は負であり、剛体モードのモード影響定数 1 とは正負が反対 (逆相) である。なお、ここでいう共振周波数  $r$  は、例えばキャリッジ 4 等の固有振動周波数である。

【0033】

次に、フォロイング補償器 29 に関して図 4 から図 7 を参照しながら説明する。図 4 は上述の場合におけるフォロイング補償器 29 の伝達特性  $C_f(z)$  を示し、図 4 (A) がそのゲイン特性 43 を示し、図 4 (B) がその位相特性 44 を示す。図 5 は図 3 の特性を持つ制御対象 27 と図 4 の特性を持つフォロイング補償器 29 を直列に結合した場合の開ループ伝達特性  $C_f(z) \cdot P(z)$  を示し、図 5 (A) がそのゲイン特性 45 を示し、図 5 (B) がその位相特性 46 を示す。図 6 は図 5 の開ループ伝達特性  $C_f(z) \cdot P(z)$  のナイキスト線図上のベクトル軌跡 47 を示し、図 7 は図 5 及び図 6 に示す開ループ伝達特性  $C_f(z) \cdot P(z)$  に対応する感度関数のゲイン特性 48 を示す。

【0034】

フォロイング補償器 29 は、例えば次のような特性を持つように設定される。外力が制御系に作用する場合にも定常偏差を生じないように、低周波数域において 1 次の積分特性が与えられる。また、剛体モードを安定化するために、1 kHz ~ 2 kHz での位相進みが大きくなるような位相進み特性が与えられる。また、機構共振モードの位相を安定化するために、5 kHz 以降の位相を遅らせる位相遅れ特性が与えられる。また、フォロイング補償器 29 の比例ゲインは、制御系の開ループ伝達特性におけるゲイン 0 dB クロスオーバー周波数 (入出力の振幅比が 1 となる周波数) が 1700 Hz となるように、そのゲイン特性が与えられる。このときのフォロイング補償器 29 の伝達特性  $C_f(z)$  は、図 4 (A) のゲイン特性 43、図 4 (B) の位相特性 44 で表される。

【0035】

制御系が安定である場合、ある任意の周波数における感度関数の大きさは、ナイキスト線図上における開ループ伝達特性のベクトル軌跡 47 と不安定点の座標 (-1, 0) との

10

20

30

40

50

距離の逆数となる。そのため、対象周波数の近傍で周波数の増大と共に不安定点の座標（ $-1, 0$ ）から遠ざかる方向の右回りの円軌跡を有する場合、対象周波数での感度関数のゲインは小さくなる。図5の開ループ伝達特性  $C_f(z) \cdot P(z)$  及び図6のベクトル軌跡47から、制御対象27の有する機構共振モードの周波数にて、制御系のベクトル軌跡47が不安定点（ $-1, 0$ ）から遠ざかる円軌跡となっていることが確認できる。これは、フォロイング補償器29により制御対象27の有する機構共振モードが安定化されていることを意味する。

【0036】

次に、本発明の特徴とする位相条件の安定な共振モードを共振フィルタ30及びモード位相フィルタ31により実現する設計方法を示す。共振モード  $F_r(s)$  の伝達特性を式（数2）に定義する。

【0037】

【数2】

$$\frac{\alpha_v}{s^2 + 2 \cdot \zeta_v \cdot \omega_{nv} \cdot s + \omega_{nv}^2} \quad (\text{数2})$$

【0038】

ここで、 $\alpha_v$  はモード影響定数、 $\zeta_v$  は粘性係数、 $\omega_{nv}$  は共振周波数を示す。機構系モデル  $P_s(s)$  に共振モード  $F_r(s)$  を付加した伝達特性は式（数3）のように示すことが出来る。

【0039】

【数3】

$$P_s(s) + F_r(s) = P_s(s) \cdot \left( 1 + \frac{F_r(s)}{P_s(s)} \right) \quad (\text{数3})$$

【0040】

式（数3）は、機構系モデル  $P_s(s)$  に共振モード  $F_r(s)$  を付加するには  $(1 + F_r(s)/P_s(s))$  を制御対象27に対して直列結合すれば良いことを示している。よって、共振フィルタ30の伝達特性  $C_r(z)$  は  $(F_r(s)/P_s(s))$  を双一次変換や整合Z変換等により離散化した伝達特性と定義する。

【0041】

モード位相フィルタ31の伝達特性  $C_p(z)$  は、共振フィルタにより付加される共振モード  $F_r(s)$  の共振周波数  $\omega_{nv}$  付近にて、開ループ伝達特性のベクトル軌跡が不安定点（ $-1, 0$ ）から遠ざかる軌跡となるように位相を調整する。共振周波数  $\omega_{nv}$  では、開ループ伝達特性のベクトル軌跡の座標を座標  $(R_{op}, I_{op})$  とすると、不安定点の座標（ $-1, 0$ ）から遠ざかる方向の位相  $D_{rm} [rad]$  は式（数4）で表される。なお、式（数3）における「arctan」はアークタンジェントの略号である。

【0042】

【数4】

$$D_{rm} = \arctan \left( \frac{I_{op}}{R_{op} + 1} \right) \quad (\text{数4})$$

【0043】

ここで、共振周波数  $\omega_{nv}$  での共振フィルタ  $C_r(z)$  の位相を  $D_{cr} [rad]$ 、共振周波数  $\omega_{nv}$  での開ループ伝達特性の位相を  $D_{op} [rad]$  とするとき、共振周波数  $\omega_{nv}$  でのモード位相フィルタ31の位相  $D_{cp} [rad]$  が  $D_{rm} - D_{cr} - D_{op}$  となれば、共振モードの共振周波数にて、制御系のベクトル軌跡が不安定点（ $-1, 0$ ）から遠ざかる軌跡とすることができる。

【0044】

以下では、モード位相フィルタ31の伝達特性 $C_p(z)$ を式(数5)で表すように双一次変換にて離散化したフィルタとした場合について説明する。

【0045】

【数5】

$$\frac{\beta_1 \cdot s + \beta_2}{\alpha_{cp} \cdot s + 1} \quad (\text{数5})$$

【0046】

ここで、モード位相フィルタ31の最大ゲインを1とする。周波数 $\omega_{nv}$ でのモード位相フィルタの位相 $D_{cp}$ が $-\pi$ 以上で $-\pi/2$ 以下である場合、式(数5)のパラメータは式(数6)のようになる。

【0047】

【数6】

$$\alpha_{cp} = \frac{1}{\tan(D_{cp}) \cdot \omega_{nv}}, \beta_1 = -(\omega_{nv}^{-2} + \alpha_{cp}^2)^{0.5}, \beta_2 = 0 \quad (\text{数6})$$

【0048】

周波数 $\omega_{nv}$ でのモード位相フィルタの位相 $D_{cp}$ が $-\pi/2$ 以上で0以下である場合、式(数5)のパラメータは式(数7)のようになる。

【0049】

【数7】

$$\alpha_{cp} = \frac{-\tan(D_{cp})}{\omega_{nv}}, \beta_1 = 0, \beta_2 = (1 + \omega_{nv}^2 \alpha_{cp}^2)^{0.5} \quad (\text{数7})$$

【0050】

周波数 $\omega_{nv}$ でのモード位相フィルタの位相 $D_{cp}$ が0以上で $\pi/2$ 以下である場合、式(数5)のパラメータは式(数8)のようになる。

【0051】

【数8】

$$\alpha_{cp} = \frac{1}{\tan(D_{cp}) \cdot \omega_{nv}}, \beta_1 = (\omega_{nv}^{-2} + \alpha_{cp}^2)^{0.5}, \beta_2 = 0 \quad (\text{数8})$$

【0052】

周波数 $\omega_{nv}$ でのモード位相フィルタの位相 $D_{cp}$ が $\pi/2$ 以上で $\pi$ 以下である場合、式(数5)のパラメータは式(数9)のようになる。

【0053】

【数9】

$$\alpha_{cp} = \frac{-\tan(D_{cp})}{\omega_{nv}}, \beta_1 = 0, \beta_2 = -(1 + \omega_{nv}^2 \alpha_{cp}^2)^{0.5} \quad (\text{数9})$$

【0054】

$D_{cp}$ が $-\pi/2$ から $-\pi$ もしくは $\pi/2$ から $\pi$ の間の値の場合は、モード影響定数 $\alpha_v$ の正負を反転し、再度、計算を行なう。

【0055】

次に、具体的な数値例を挙げながら制御系を説明する。本実施例を適用する前の開ループ伝達特性は図6に示すものとする。例えば、抑制する外乱の周波数を、開ループ伝達特

10

20

30

40

50

性の位相が  $-180^\circ$  に近い  $3300\text{ Hz}$  とする。共振モード  $F_r(s)$  の共振周波数  $\omega_{nv}$  を  $3300 \times 2$  [rad/s] に設定する。また、モード影響定数  $\gamma$  を  $0.01$ 、粘性係数  $\zeta$  を  $0.001$  とする。 $3300\text{ Hz}$  における開ループ伝達特性のベクトル軌跡の座標は  $(-0.601, -0.456)$  である。この結果、共振周波数  $\omega_{nv}$  でのモード位相フィルタ  $31$  の位相  $D_{cp}$  は  $0.44 \times$  [rad] となれば良い。従って、式(数5)のパラメータを、 $c_p = 9.25 \times 10^{-6}$ 、 $\tau_1 = 4.91 \times 10^{-5}$ 、 $\tau_2 = 0$ 、と選定した。

#### 【0056】

図8に図2に示す本実施例の制御系を適用した場合の開ループ伝達特性のゲイン特性49及び位相特性50を示す。この図8より、目標周波数である  $3300\text{ Hz}$  にて、共振特性が実現されていることを確認できる。図9に図8で示した開ループ伝達特性のベクトル軌跡51を示す。図10に、図8及び図9に示す開ループ伝達特性に対応する感度関数ゲイン特性52を示す。これらの図より、本実施例による共振フィルタ30とモード位相フィルタ31とを適用することにより、開ループ伝達特性の位相が  $-180^\circ$  付近である感度関数ゲインが増大している周波数においても、制御系の安定性を損なうことなく外乱の存在する局所的な周波数での感度関数を大きく改善することが確認できる。

10

#### 【0057】

以上の説明から明らかなように、本実施例によれば、制御帯域や主共振を超えた周波数及び開ループ位相特性が不安定となる周波数においても、制御系の安定性を損なうことなく位置決め精度を向上させることができる磁気ディスク装置100を実現できる。

20

#### 【0058】

次に、本発明の第2実施例の磁気ディスク装置100について図11から図13を用いて説明する。図11は第2実施例である磁気ディスク装置100の制御系のブロック線図であり、共振フィルタ30を制御対象27に対して並列に結合する方式の構成例を示すものである。図12は第2実施例における制御系の開ループ伝達特性のベクトル軌跡53を示す。図13は第2実施例における制御系の開ループ伝達特性の感度関数ゲイン特性54を示す。この第2実施例は、次に述べる点で第1実施例と相違するものであり、その他の点については第1実施例と基本的には同一である。

#### 【0059】

図11に示す制御系の構成では、誤差信号  $PES25$  をフォロイング補償器29に入力することにより、フォロイング補償器29で制御信号  $Up26$  を生成する。この制御信号  $Up26$  は  $VCM$  制御信号21となり制御対象27及び共振フィルタ30への入力となる。そして、共振フィルタ30からの出力をモード位相フィルタ31へ入力し、モード位相フィルタ31の出力信号を次サンプル時において位置信号20に加算する。

30

#### 【0060】

この第2実施例での共振フィルタ30及びモード位相フィルタ31の設計方法を説明する。第2実施例では、共振フィルタ30を共振モード  $F_r(s)$  を離散化したデジタルフィルタとする。ここで、共振周波数  $\omega_{nv}$  での共振フィルタ30の伝達特性  $C_r(z)$  の位相を  $D_{cr}$  [rad]、共振周波数  $\omega_{nv}$  でのフォロイング補償器の伝達特性  $C_f(z)$  の位相を  $D_f$  [rad] とする。このとき、周波数  $\omega_{nv}$  でのモード位相フィルタ31の位相  $D_{cp}$  [rad] が  $D_{rm} - D_{cr} - D_f$  となれば、共振モードの周波数にて、制御系のベクトル軌跡が不安定点の座標  $(-1, 0)$  から遠ざかる軌跡とすることができる。

40

#### 【0061】

以下、第2実施例について具体的な数値例を挙げながら説明する。第2実施例を適用する前の開ループ伝達特性は図6に示すものとする。例えば、抑制する外乱の周波数を、開ループ伝達特性の位相が  $-180^\circ$  に近い  $3300\text{ Hz}$  とする。共振モード  $F_r(s)$  の共振周波数  $\omega_{nv}$  を  $3300 \times 2$  [rad/s] に設定する。また、モード影響定数  $\gamma$  を  $0.01$ 、粘性係数  $\zeta$  を  $0.001$  とする。 $3300\text{ Hz}$  における開ループ伝達特性のベクトル軌跡の座標は座標  $(-0.601, -0.456)$  である。この結果、周波

50

数  $n_v$  でのモード位相フィルタ 31 の位相  $D_{cp}$  は  $0.27 \times [\text{rad}]$  となれば良い。従って、式 (数 5) のパラメータを、 $c_p = 4.25 \times 10^{-5}$ 、 $\gamma_1 = 6.43 \times 10^{-5}$ 、 $\gamma_2 = 0$ 、と選定した。

【0062】

図 12 及び図 13 図より、第 2 実施例による共振フィルタ 30 とモード位相フィルタ 31 を適用することにより、開ループ伝達特性の位相が  $-180^\circ$  付近である感度関数ゲインが増大している周波数において、制御系の安定性を損なうことなく外乱の存在する局所的な周波数での感度関数を改善することが確認できる。

【0063】

以上、本発明の実施の形態のいくつかを詳細に説明したが、そこで用いる共振フィルタとモード位相フィルタは一つであった。しかし、これを複数にすることも可能である。 $n$  個目の共振フィルタを  $C_{rn}(z)$ 、 $C_{rn}(z)$  に対応するモード位相フィルタを  $C_{pn}(z)$  とする。第 1 実施例に対して、 $n$  個の共振フィルタとモード位相フィルタを適用した場合の本発明の第 3 実施例における制御系のブロック線図は図 14 のようになる。図 14 において、 $n$  個の共振フィルタとモード位相フィルタからなる共振・モード位相フィルタ 39 の伝達特性は式 (数 10) で表される。また、第 2 実施例に対して  $n$  個の共振フィルタとモード位相フィルタを適用した場合の本発明の第 4 実施例における制御系のブロック線図は図 15 のようになる。図 15 において、 $n$  個の共振フィルタとモード位相フィルタからなる共振・モード位相フィルタ 39 の伝達特性は式 (数 10) で表される。第 3 実施例及び第 4 実施例によれば、外乱の存在する局所的な周波数での感度関数をさらに改善することができる。

10

20

【0064】

【数 10】

$$\sum_{i=1}^n C_n(Z) \cdot C_{pi}(Z) \tag{数10}$$

【0065】

また、上述した第 1 実施例では、共振フィルタ 30 の設計に制御対象 27 の機構系モデル  $P_s(s)$  を用いた。しかしながら、制御対象 27 の機構系特性が複雑な特性を有している場合には、共振フィルタ 30 の次数が増大するという懸念がある。また、制御対象 27 の機構系特性が不安定零点を有しているときには、共振フィルタ 30 が不安定になるという問題がある。このような問題は、共振フィルタの設計に用いる機構系モデル  $P_s(s)$  を低次元化することで回避可能である。共振フィルタ 30 の設計に用いる機構系モデル  $P_s(s)$  は、共振モード  $F_r(s)$  の共振周波数付近のみで、不安定零点を用いずに制御対象 27 の機構系特性を再現可能であれば十分である。その際、 $F_r(s) / P_s(s)$  が適切な伝達特性でなければならない。例えば、共振モード  $F_r(s)$  の共振周波数付近で制御対象 27 の機構系特性の位相が  $-180^\circ \times n$  ( $n$  は整数) である場合、共振フィルタ 30 の設計に用いる機構系モデル  $P_s$  は、定数  $K_p$  もしくは式 (数 11) とし、共振モード  $F_r(s)$  の共振周波数付近にて機構系モデル  $P_s$  と制御対象 27 の機構系特性のゲインが一致するように定数  $K_p$  を選定すれば良い。

30

40

【0066】

【数 11】

$$\frac{K_p}{s^2} \tag{数11}$$

【0068】

また、第 2 実施例では、モード位相フィルタ 31 の出力は図 11 のように位置信号 20 に加えるとしているが、共振フィルタ 31 の出力を誤差信号 P E S 25 から差引くようにしてもよい。

【図面の簡単な説明】

50

## 【 0 0 6 9 】

【図 1】本発明の第 1 実施例の磁気ディスク装置の構成図である。

【図 2】図 1 の磁気ディスク装置の位置決め制御系のブロック線図である。

【図 3】図 2 の制御対象の伝達特性を示し、( A ) がそのゲイン特性、( B ) が位相特性例である。

【図 4】図 3 におけるフォロイング補償器の伝達特性を示し、( A ) がそのゲイン特性、( B ) が位相特性例である。

【図 5】図 3 の特性を持つ制御対象と図 4 の特性を持つフォロイング補償器から構成される開ループ伝達特性を示し、( A ) がそのゲイン特性、( B ) が位相特性例である。

【図 6】図 5 の開ループ伝達特性のベクトル軌跡である。

10

【図 7】図 5 の開ループ伝達特性に対応する感度関数のゲイン特性である。

【図 8】本発明の第 1 の実施例を適用した場合における開ループ伝達特性を示し、( A ) がそのゲイン特性、( B ) が位相特性例である。

【図 9】図 8 の特性のベクトル軌跡である。

【図 10】図 8 の特性に対応する感度関数のゲイン特性である。

【図 11】本発明の第 2 実施例の磁気ディスク装置の位置決め制御系のブロック線図である。

【図 12】第 2 実施例における位置決め制御系の開ループ伝達特性のベクトル軌跡を示す図である。

【図 13】第 2 実施例における位置決め制御系の開ループ伝達特性の感度関数ゲイン特性を示す図である。

20

【図 14】本発明の第 3 実施例の磁気ディスク装置の位置決め制御系のブロック線図である。

【図 15】本発明の第 4 実施例の磁気ディスク装置の位置決め制御系のブロック線図である。

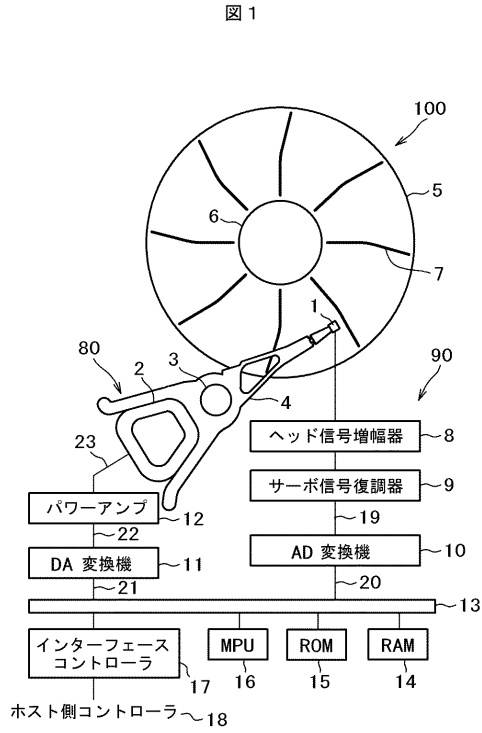
## 【符号の説明】

## 【 0 0 7 0 】

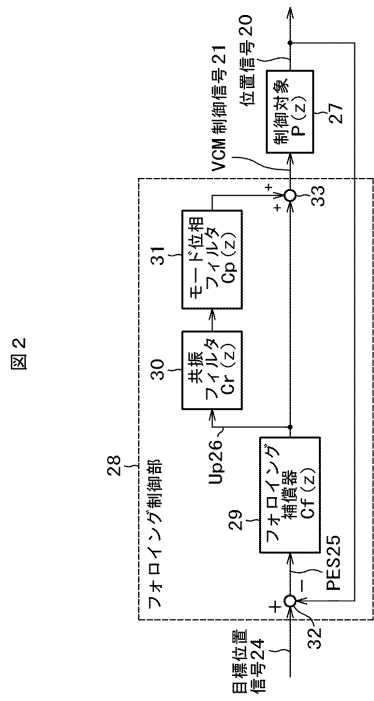
1 ... 磁気ヘッド、2 ... ボイスコイルモータ ( V C M )、4 ... キャリッジ、5 ... 磁気ディスク、6 ... スピンドルモータ、10 ... A D 変換器、11 ... D A 変換器、20 ... 位置信号、21 ... V C M 制御信号、24 ... 目標位置、25 ... P E S、27 ... 制御対象、28 ... フォロイング制御部、29 ... フォロイング補償器、30 ... 共振フィルタ、31 ... モード位相フィルタ、32 ... 誤差検出部、33 ... 加算部、39 ... 共振・モード位相フィルタ、80 ... アクチュエータ、90 ... 位置決め制御装置、100 ... 磁気ディスク装置。

30

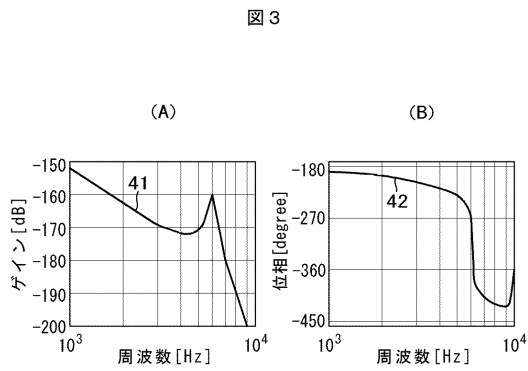
【 図 1 】



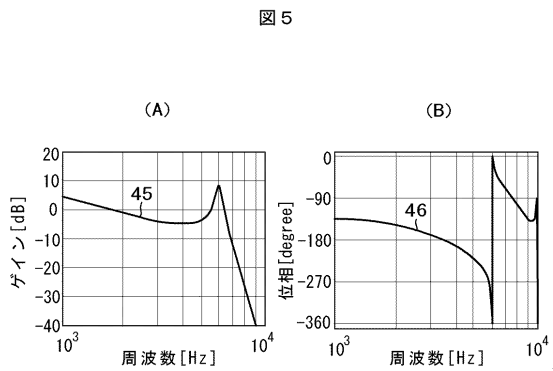
【 図 2 】



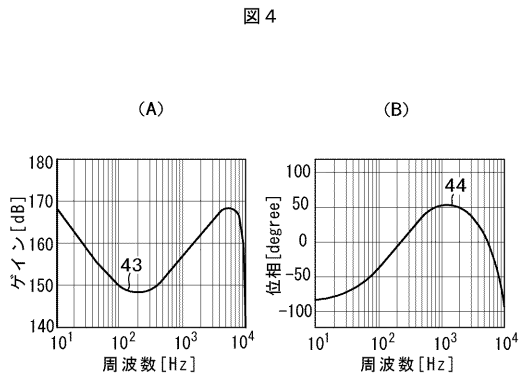
【 図 3 】



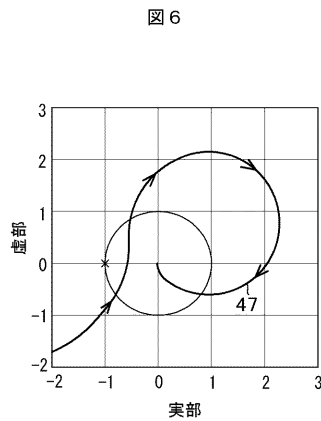
【 図 5 】



【 図 4 】

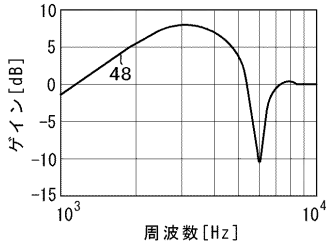


【 図 6 】



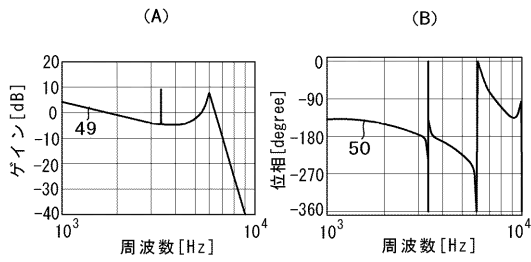
【 図 7 】

図 7



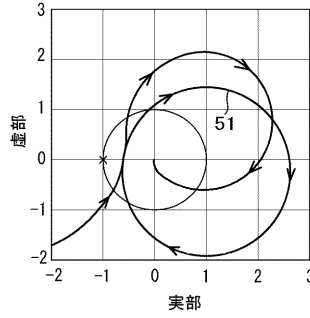
【 図 8 】

図 8



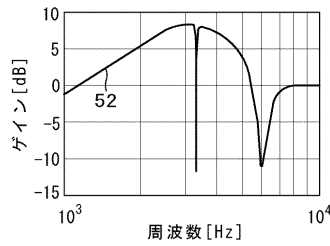
【 図 9 】

図 9



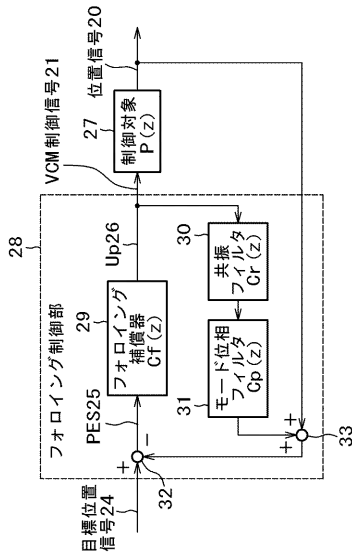
【 図 10 】

図 10



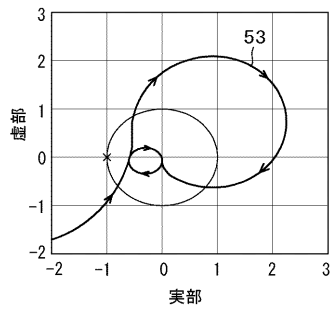
【 図 11 】

図 11



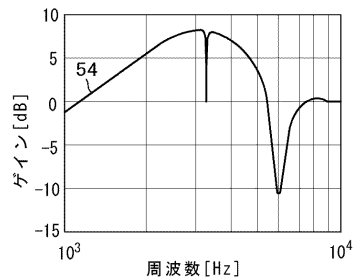
【 図 12 】

図 12



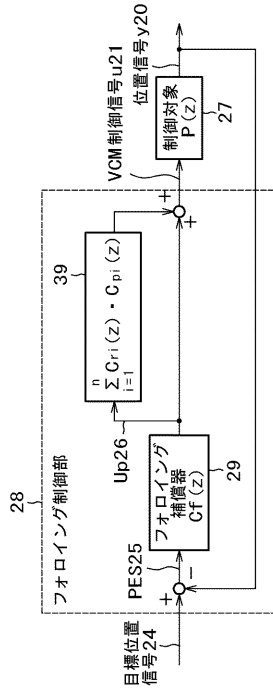
【 図 13 】

図 13



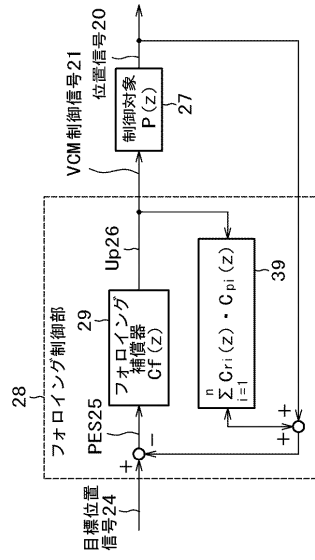
【 図 1 4 】

図 1 4



【 図 1 5 】

図 1 5



---

フロントページの続き

(72)発明者 奥山 淳

東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地 株式会社日立製作所研究開発本部内

審査官 鈴木 重幸

(56)参考文献 特開2003-331543(JP,A)

特開昭62-287482(JP,A)

特開昭62-287483(JP,A)

特開2002-063774(JP,A)

原武生, 周期時変システムの周波数応答行列に基く磁気ディスク装置のマルチレートノッチフィルタ設計, 第47回自動制御連合講演会論文集, 日本, システム制御情報学会, 2004年11月25日, 47th, NO.80, 2005-01-11

Takenori Atsumi, Atsushi Okuyama and Masahito Kobayashi, Track-following Control Using Resonant Filter in Hard Disk Drives, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, 米国, IEEE, 2007年 8月, VOL. 12, NO. 4, , 472-479

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G11B 21/10