

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2007-188322

(P2007-188322A)

(43) 公開日 平成19年7月26日(2007.7.26)

(51) Int. Cl.	F I			テーマコード (参考)
G05B 11/36 (2006.01)	G05B 11/36		D	5H004
G05D 3/12 (2006.01)	G05D 3/12	305V		5H303

審査請求 未請求 請求項の数 12 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2006-6309 (P2006-6309)	(71) 出願人	503360115 独立行政法人科学技術振興機構 埼玉県川口市本町4丁目1番8号
(22) 出願日	平成18年1月13日 (2006.1.13)	(74) 代理人	100058479 弁理士 鈴江 武彦
		(74) 代理人	100113099 弁理士 和田 祐造
		(74) 代理人	100117547 弁理士 須田 浩史
		(72) 発明者	長縄 明大 秋田県秋田市川元松丘町3-6
		(72) 発明者	平元 和彦 秋田県秋田市手形田中14-5 手形田中 住宅1-504

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 P I D制御装置及びそのP I D制御系の制御要素を設定する方法

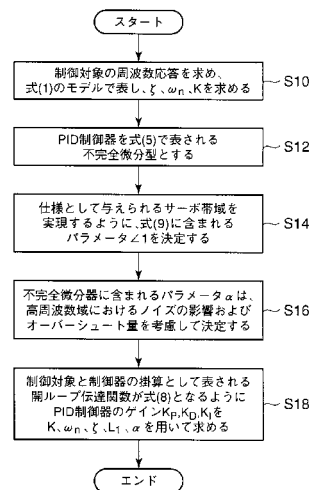
(57) 【要約】

【課題】 P I D制御装置において目標サーボ帯域に亘って高速高精度での位置決めを実現する制御要素の決定方法を提供することにある。

【解決手段】 P I D制御系の制御要素を設定する方法においては、制御対象の周波数応答特性が測定されてこの周波数応答特性に近似させたフィードバック制御系の2次遅れ系の伝達関数が特定される。制御対象を制御する制御器の伝達関数が比例、積分及び微分ゲイン係数を含む不完全微分型に設定され、制御器の伝達関数と前記制御対象との伝達関数の積で表される開ループ伝達関数が定められ、制御対象が有する共振特性を打ち消すように制御器の比例、積分及び微分ゲイン係数が求められ、制御器に設定される。

【選択図】 図 1 0

図 10



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

制御対象の周波数応答特性を測定してこの周波数応答特性に近似させた制御対象の 2 次遅れ系の伝達関数を特定し、

前記制御対象を制御する制御器の伝達関数を比例、積分及び微分ゲイン係数 (K_P , K_I , K_D) を含む不完全微分型に設定し、

前記制御対象が有する共振特性を打ち消すように前記制御器の伝達関数と前記制御対象の伝達関数との積で表される開ループ伝達関数を下記式 (8) に定め、この式 (8) の関係となるように前記制御器の比例、積分及び微分ゲイン係数 (K_P , K_I , K_D) を前記不完全微分器に含まれるパラメータ、前記 2 次遅れ系の伝達関数に含まれるゲイン定数 K 、減衰率 ζ 及び固有角周波数 ω_n 並びに前記開ループ伝達関数のパラメータ L_1 を含む関係式で定め、

10

【数 1】

$$\text{開ループ} : L(s) = \frac{L_1}{s(s + \alpha)} \quad \dots(8)$$

仕様として与えるべきサーボ帯域を実現するように前記パラメータ L_1 を決定し、

前記不完全微分器に含まれるパラメータ α を決定し、

前記パラメータ L_1 及び α 並びにゲイン定数 K 、減衰率 ζ 及び固有角周波数 ω_n で特定される前記比例、積分及び微分ゲイン係数 (K_P , K_I , K_D) を制御要素として前記制

20

【請求項 2】

前記 2 次遅れ系の伝達関数は、下記式 (1)

【数 2】

$$\text{制御対象} : P(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad \dots(1)$$

(ここで、 ζ は、減衰率、 ω_n は、固有角周波数であり、 K は、ゲイン定数である。) で表されることを特徴とする請求項 1 の P I D 制御系の制御要素を設定する方法。

【請求項 3】

30

前記制御器の伝達関数が下記 (6) 式で表される伝達特性 $K_1(s)$ を有し、比例、積分及び微分ゲイン係数 (K_P , K_I , K_D) を含む不完全微分型に設定することを特徴とする請求項 1 の P I D 制御系の制御要素を設定する方法。

【数 3】

$$\text{PID制御器} : K_1(s) = \frac{(K_P + K_D)s^2 + (\alpha K_P + K_I)s + \alpha K_I}{s(s + \alpha)} \quad \dots(6)$$

【請求項 4】

前記パラメータ L_1 は、 $L(s)$ の周波数応答の角周波数 ω_d におけるゲインが 1 となるように定めることを特徴とする請求項 1 の P I D 制御系の制御要素を設定する方法。

40

【請求項 5】

前記パラメータは、下記式 (11) で定められることを特徴とする請求項 1 の P I D 制御系の制御要素を設定する方法。

【数 4】

$$L_1 = \omega_d \sqrt{\omega_d^2 + \alpha^2} \quad \dots(11)$$

【請求項 6】

前記比例ゲイン K_P は、マイナスに定められるように減衰率、パラメータ α が $2 < \alpha < \omega_n$ に関係に定められることを特徴とする請求項 1 の P I D 制御系の制御要素を設定する方法。

50

【請求項 7】

フィードバック制御系におけるあるモデルの 2 次遅れ系の伝達関数で近似されている周波数応答特性を有する制御対象と、

比例、積分及び微分ゲイン係数 (K_P , K_I , K_D) を含む伝達関数が不完全微分型に設定されている前記制御対象を制御する制御器であって、前記制御対象が有する共振特性を打ち消すように前記制御器の伝達関数と前記制御対象の伝達関数との積で表される開ループ伝達関数が下記式 (8) で定められ、この式 (8) の関係となるように前記制御器の比例、積分及び微分ゲイン係数 (K_P , K_I , K_D) が前記不完全微分器に含まれるパラメータ、前記 2 次遅れ系の伝達関数に含まれるゲイン定数 K 、減衰率 α 及び固有角周波数 ω_n 並びに前記開ループ伝達関数のパラメータ L_1 を含む関係式で定められ、

10

【数 5】

$$\text{開ループ} : L(s) = \frac{L_1}{s(s + \alpha)} \quad \dots(8)$$

前記パラメータ L_1 がサーボ帯域を実現するように決定され、前記パラメータ L_1 及び並びにゲイン定数 K 、減衰率 α 及び固有角周波数 ω_n で特定される前記比例、積分及び微分ゲイン係数 (K_P , K_I , K_D) を制御要素として与えられている制御器と、

から構成されることを特徴とする PID 制御装置。

【請求項 8】

前記 2 次遅れ系の伝達関数は、下記式 (1)

20

【数 6】

$$\text{制御対象} : P(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad \dots(1)$$

(ここで、 ζ は、減衰率、 ω_n は、固有角周波数であり、 K は、ゲイン定数である。) で表されることを特徴とする請求項 7 の PID 制御装置。

【請求項 9】

前記制御器の伝達関数が下記 (6) 式で表される伝達特性 $K_1(s)$ を有し、比例、積分及び微分ゲイン係数 (K_P , K_I , K_D) を含む不完全微分型に設定することを特徴とする請求項 7 の PID 制御装置。

30

【数 7】

$$\text{PID制御器} : K_1(s) = \frac{(K_P + K_D)s^2 + (\alpha K_P + K_I)s + \alpha K_I}{s(s + \alpha)} \quad \dots(6)$$

【請求項 10】

前記パラメータ L_1 は、 $L(s)$ の周波数応答の角周波数 ω_d におけるゲインが 1 となるように定めることを特徴とする請求項 7 の PID 制御装置。

【請求項 11】

前記パラメータは、下記式 (11) で定められることを特徴とする請求項 7 の PID 制御装置。

40

【数 8】

$$L_1 = \omega_d \sqrt{\omega_d^2 + \alpha^2} \quad \dots(11)$$

【請求項 12】

前記比例ゲイン K_P は、マイナスに定められるように減衰率、パラメータ α が $2 < \alpha < \omega_n$ に関係に定められることを特徴とする請求項 7 の PID 制御装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、目標サーボ帯域を実現する PID 制御装置及びその PID 制御系の制御

50

要素を設定する方法に係り、特に、圧電素子及び並行バネ機構からなるアクチュエータを高速高精度に位置決めするための制御装置及び制御系の制御要素を設定する方法に関する。

【背景技術】

【0002】

ハードディスクの開発が進み、その記録容量は、急速に増加して200 Gbit/in²の記録密度が達成されようとしている。この高密度化の背景には、線記録密度の向上と共にトラック密度の向上が著しく、近い将来に1 Tbit/in²の記録密度が達成された場合、トラックピッチは、50 nm以下になるものと予想される。磁気ヘッドが記録トラック上で許容される追従誤差は、トラックピッチの10%程度とされ、磁気ヘッド並びにメディアの開発に用いられる磁気記録評価装置(スピンスター)では、トラックプロファイル或いはオフトラックマージン等を計測するために更に1/10以下、即ち、サブナノメートルの位置決め技術が要求されている。

10

【0003】

このようにスピンスター上で高速高精度なトラッキングを実現する為に微動アクチュエータ(Nano-motion Actuator: NMA)及びその制御系の開発が要請されている。

【0004】

このような背景から、発明者等は、既に特許文献1において高速高精度なトラッキングを実現する為の微動アクチュエータを提案しているが、更に、この微動アクチュエータを高速高精度に位置決め制御する為の制御系の改良が要請されている。制御系としてPID制御装置が適用されるが、PID制御装置は、比例要素(P)、微分要素(D)及び積分要素(I)の3つの要素を組み合わせて構成され、一般的には、これら3つの要素のゲインが仕様として与えられるサーボ帯域を実現するように試行錯誤して決定される。このように制御要素を決定するには、サーボ帯域を制限する機構の共振特性を打ち消すように、PID制御装置に反共振特性を与えて広帯域化を実現している。また、位置決めにおけるオーバーシュート量を抑制するようにゲインを決定している。サーボ帯域を制限する機構の共振特性を打ち消すように、PID制御装置に反共振特性を与える為にノッチフィルタを利用する制御系があるが、高速での応答実現の妨げになる場合がある。

20

【特許文献1】特開2004-261167

【発明の開示】

30

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

PID制御装置は、最も広く用いられているが、3つのゲインの決定法は、無限通りの組み合わせの中から経験的に決定しているのが現状である。このため、従来技術では、(1)望ましいサーボ帯域を実現するようにゲインを決定することが困難である、(2)決定したゲインにより位置決めにおけるオーバーシュートが大きくなる、(3)機構の共振特性によりサーボ帯域が制限されるため高速な位置決めが実現できない問題点がある。

【0006】

一方、一般的なPID(比例、積分、微分)制御器では、狭帯域のノッチフィルタで反共振特性を与えて相殺する手法が一般的である。しかし、ノッチフィルタは位相反転も同時に発生させるため、抜本的に制御性能を上げることはできない問題点がある。即ち、ノッチフィルタを附加した制御器では、応答性が悪化する問題がある。

40

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明は、上記問題点を解決するためになされたものであり、その目的は、目標サーボ帯域に亘って高速高精度での位置決めを実現するPID制御装置及びその制御系の比例要素(P)、微分要素(D)及び積分要素(I)の決定方法を提供することにある。

【0008】

また、この発明の目的は、積層型圧電素子及び変位拡大機構を用いた微動アクチュエータを目標サーボ帯域に亘って高速高精度での位置決めを実現するPID制御装置及びその

50

P I D制御系の制御要素を設定する方法を提供することにある。

【 0 0 0 9 】

この発明によれば、

制御対象の周波数応答特性を測定してこの周波数応答特性に近似させた制御対象の2次遅れ系の伝達関数を特定し、

前記制御対象を制御する制御器の伝達関数を比例、積分及び微分ゲイン係数 (K_P , K_I , K_D) を含む不完全微分型に設定し、

前記制御対象が有する共振特性を打ち消すように前記制御器の伝達関数と前記制御対象との伝達関数の積で表される開ループ伝達関数を下記式(8)に定め、この式(8)の関係となるように前記制御器の比例、積分及び微分ゲイン係数 (K_P , K_I , K_D) を前記不完全微分器に含まれるパラメータ、前記2次遅れ系の伝達関数に含まれるゲイン定数 K 、減衰率 α 及び固有角周波数 ω_n 並びに前記開ループ伝達関数のパラメータ L_1 を含む関係式で定め、

10

【 数 9 】

$$\text{開ループ} : L(s) = \frac{L_1}{s(s + \alpha)} \quad \dots(8)$$

【 0 0 1 0 】

仕様として与えるべきサーボ帯域を実現するように前記パラメータ L_1 を決定し、

前記不完全微分器に含まれるパラメータ α を決定し、

20

前記パラメータ L_1 及び α 並びにゲイン定数 K 及び減衰率 α で特定される前記比例、積分及び微分ゲイン係数 (K_P , K_I , K_D) を制御要素として前記制御器に与える P I D 制御系の制御要素を設定する方法が提供される。

【 0 0 1 1 】

また、この発明によれば、

フィードバック制御系におけるあるモデルの2次遅れ系の伝達関数で近似されている周波数応答特性を有する制御対象と、

比例、積分及び微分ゲイン係数 (K_P , K_I , K_D) を含む伝達関数が不完全微分型に設定されている前記制御対象を制御する制御器であって、前記制御対象が有する共振特性を打ち消すように前記制御器の伝達関数と前記制御対象の伝達関数との積で表される開ループ伝達関数が下記式(8)で定められ、この式(8)の関係となるように前記制御器の比例、積分及び微分ゲイン係数 (K_P , K_I , K_D) が前記不完全微分器に含まれるパラメータ、前記2次遅れ系の伝達関数に含まれるゲイン定数 K 、減衰率 α 及び固有角周波数 ω_n 並びに及び前記開ループ伝達関数のパラメータ L_1 を含む関係式で定められ、

30

【 数 1 0 】

$$\text{開ループ} : L(s) = \frac{L_1}{s(s + \alpha)} \quad \dots(8)$$

【 0 0 1 2 】

前記パラメータ L_1 がサーボ帯域を実現するように決定され、前記パラメータ L_1 及び α 並びにゲイン定数 K 及び減衰率 α で特定される前記比例、積分及び微分ゲイン係数 (K_P , K_I , K_D) を制御要素として与えられている制御器と、

40

から構成されることを特徴とする P I D 制御装置が提供される。

【 発明の効果 】

【 0 0 1 3 】

この発明の目標サーボ帯域を実現する P I D 制御装置によれば、微動アクチュエータ及びコントローラからなる開ループ伝達関数の望ましい形を設定し、これを実現するための P I D 制御装置を試行錯誤することなく決定することにより、望ましいサーボ帯域を実現することができる。

【 0 0 1 4 】

50

また、この発明のPID制御装置によれば、広く用いられているPID制御系にノッチフィルタを適用した制御装置に代えて、PID制御装置のみでサーボ帯域を指定し、共振周波数を打ち消し、位置決めにおけるオーバーシュートを抑制することができ、制御装置の次数を低く抑えることにより制御演算数を抑制することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0015】

以下、必要に応じて図面を参照しながら、この発明の一実施の形態に係る微動アクチュエータを高速高精度に位置決めの為に目標サーボ帯域を実現するPID制御装置及びPID制御装置の伝達関数の設定方法について説明する。

【0016】

始めに、スピンドル上で高速高精度なトラッキングを実現する為に開発された制御対象としての微動アクチュエータの構造について図1から図3を参照して説明する。

【0017】

圧電素子として、高速な応答性に優れ、大きな力が発生できるPZT(PbZrO₃-PbTiO₃)に代表される圧電材料を多層に積層した積層型圧電素子は、高精度な位置決めに変位が概ね積層高さの1/1000と非常に小さく、また、圧電素子そのものに大きな剪断荷重が加わると、圧電材料の接着面で破断し易いという問題がある。従って、圧電素子の固定及び支持方法や駆動する部品との取り付けなどを考慮する必要がある。圧電素子単体をアクチュエータとして使用しようとした場合、非常に使い難い側面を持っている。そこで、圧電素子が発生する小さな変位を幾何学的に拡大し、同時に固定部や駆動する部品への取り付けを容易にする変位拡大機構に、積層型圧電素子を組み合わせたアクチュエータが提案(特許文献1)されている。

【0018】

図1～図3に示すように、アクチュエータ10は、積層型の圧電素子12と、圧電素子12の変位を拡大する変位拡大機構14とを備えている。変位拡大機構14は、角柱形状の支持部16、この支持部16と隙間を置いてほぼ平行に対向した角柱形状の可動子18及び支持部16と可動子18との間を延びた互いに平行な一対のリンク部20a、20bを有し、全体としてほぼ矩形枠状に形成されている。各リンク部20a、20bの両端は、それぞれ弾性ヒンジ22を介して支持部16及び可動子18に連結されている。各リンク部20a、20bは、弾性ヒンジ22の弾性変形により、この弾性ヒンジ22を支点とする等価的な回動運動等が可能となっている。

【0019】

支持部16には、この支持部を所望の部位へねじ止め構成するためのねじ孔11が形成されている。支持部16には可動子18側に突出した台座部24が一体形成され、この台座部24に圧電素子12の一端が固定されている。圧電素子12の他端は、梘子機構26を介して、一方のリンク部20aに接続されている。圧電素子12が変位すると、この変位は梘子機構26により増大されて一方のリンク部20aに伝達される。すると、リンク部20aは支持部16に対して矢印A方向に移動する。これに伴い、可動子18及び他方のリンク部20bが矢印A方向に移動する。その結果、ほぼ矩形枠状の変位拡大機構14は、平行四辺形の枠状に変位する。このようにして、圧電素子12の変位は、変位拡大機構14により拡大され、可動子18の変位として出力される。

【0020】

変位拡大機構14の支持部16、可動子18、リンク部20a、20b、弾性ヒンジ22、及び梘子機構26は、例えば、ジュラルミン(高力アルミニウム)、ステンレス鋼等の金属或いはセラミックス等の剛性の高い材料により一体的に成形されている。そして、可動子18、リンク部20a、20b、弾性ヒンジ22、及び梘子機構26は、変位拡大機構14の可動部として機能している。

【0021】

変位拡大機構14の可動部には、弾性体あるいは粘弾性体を介して拘束部材30が固定

10

20

30

40

50

されている。拘束部材 30 は、アルミニウム、ステンレス鋼等により矩形の平板に形成され、一方の表面全体に弾性体あるいは粘弾性体 32 が塗布され、弾粘性体層を形成している。例えば、拘束部材 30 の板厚は 0.2 ~ 1.0 mm 程度に形成され、粘弾性体 32 の層厚は 0.04 ~ 0.2 mm 程度に形成されている。そして、拘束部材 30 は、粘弾性体 32 側が変位拡大機構 14 の表面に面接触した状態で、変位拡大機構に固定されている。ここでは、拘束部材 30 は、一对のリンク部 20a、20b の可動子 18 側端部に固定され、一对のリンク部に架橋して配置されている。変位拡大機構 14 に対する拘束部材 30 の固定には、接着剤あるいは粘弾性体 32 自体の粘性を用いることができる。

【0022】

上記構成のアクチュエータ 10 によれば、平行なリンク部 20a、20b 間に拘束部材 30 を架橋してリンク部間の動作を意図的に拘束することにより、変位拡大機構 14 の振動に応じて粘弾性体 32 が効率良く歪まされる。同時に、拘束部材 30 により粘弾性体 32 の拘束部材側表面の変形を拘束することにより、粘弾性体 32 の歪みを増大させることができる。そして、粘弾性体 32 は、歪むことにより振動エネルギーを熱エネルギーに変換し、振動を減衰する。これにより、変位拡大機構 14 及び積層型の圧電素子 12 で構成されるアクチュエータ 10 が内在する大きな共振ピークを効果的に減衰させながらも共振周波数を上げることができる。

【0023】

また、拘束部材 30 及び粘弾性体をリンク部 20a、20b の上面、つまり、可動部の移動方向と平行な平面内に設けることにより、アクチュエータ 10 を移動平面内に拘束し、移動方向以外の変位拡大機構 14 に生じる不要なねじれ等の変形を効果的に抑制することができる。

【0024】

尚、拘束部材 30 及び粘弾性体 32 は、アクチュエータ 10 の上面側だけではなく、裏面側にも設けてもよい。即ち、拘束部材 30 と同様の拘束部材 34 は、アクチュエータ 10 の裏面側において、一对のリンク部 20a、20b に跨って固定され、拘束部材 30 と対向している。拘束部材 34 は粘弾性体 36 を介して変位拡大機構 14 に固定され、その固定には、接着剤あるいは粘弾性体 32 自体の粘性を用いることができる。

【0025】

アクチュエータ 10 の上面側及び裏面側の両方に粘弾性体あるいは弾性体を介して拘束部材を設けることにより、片面側だけに設けた場合に比較して、アクチュエータの共振ピークを更に約 1/2 に減衰することができる。

【0026】

図 1 ~ 図 3 に示されるアクチュエータ 10 においては、圧電素子 12 (PZT) に電圧が印加されて矢印で示すように伸縮されると、弾性ヒンジ 22 上の中心が支点、台座部 24 に固定された圧電素子 12 の他端に設けられている梘子機構 26 の中心が力点、可動子 18 上の点を作用点とするテコの原理により、圧電素子 12 の微小な変位が拡大される機構に構成されている。

【0027】

尚、可動子 18 には、磁気ヘッド (図示せず) が先端に設けられたアームが固定され、この可動子 18 の微動に伴いアームが回転される磁気ディスクのラジアル方向に微動され、磁気ヘッドが磁気ディスク上の目標トラックを追尾することとなる。

【0028】

この梘子機構 (アクチュエータ) は、圧電素子 12 (PZT) への入力から可動子 18 上の点の変位までの伝達特性を 1 組のパネ・マス・ダンパによる 2 次遅れ要素で表現することができる。このアクチュエータ 10 は、1 つの主共振ピークが 5 kHz 以上の高周波数の帯域にあるため、数ミリセック以下の高速な位置決め制御に適することとなる。

【0029】

図 4 は、アクチュエータ 10 を制御するための制御システムを示している。図 4 に示される制御システムにおいては、アクチュエータ 10 の圧電素子 12 (PZT) を駆動する

10

20

30

40

50

為の圧電素子用駆動アンプ 112 が圧電素子 12 (PZT) の電極に接続されている。アクチュエータ 10 の可動子 18 の変位を光学的に測定する為に光ファイバセンサ 118 がアクチュエータ 10 の側方に設けられ、非接触で可動子の変位が測定される。光ファイバセンサ 118 は、可動子 18 の側面にレーザビームを照射してその側面から反射された光ビームを検出して可動子 18 の矢印 A で示されるような変位を検出している。光ファイバセンサ 118 からの測定信号は、オペアンプ 120 に出力され、オペアンプ 120 で増幅されて A/D コンバータ 122 に入力されている。

【0030】

A/D コンバータ 122 においては、入力されたアナログ測定信号は、デジタル測定信号に変換されてデジタル信号処理器 124 (DSP: digital signal processor) に入力される。デジタル信号処理器 124 には、A/D コンバータ 130 を介して目標変位入力部 132 から目標変位が入力される。この目標変位は、磁気ヘッドが磁気ディスク上で現在追尾している現トラックから次に追尾すべき目標トラックにシフトするに必要な変位量に相当している。従って、磁気ディスク上にトラックアドレスが付されている際には、磁気ヘッドで読み取られたトラックアドレスがこの目標変位入力部 132 に入力され、このトラックアドレスを基に目標変位が定められても良い。デジタル信号処理器 124 には、PC (パーソナルコンピュータ) 126 に接続され、PC 126 からの設定でデジタル信号処理器 124 における各比例 (P)、積分 (I) 及び微分 (D) のゲインが設定され、設定されたゲインでデジタル測定信号が処理され、PID 制御信号がデジタル信号処理器 124 から出力される。

10

20

【0031】

デジタル信号処理器 124 からの制御出力は、D/A 変換器 134 でアナログ制御信号に変換され、オペアンプ 136 で増幅されて圧電素子用駆動アンプ 112 に入力される。従って、アクチュエータ 10 の圧電素子 12 (PZT) は、目標変位に応じて動作されて磁気ヘッドが目標トラックにシフトされる。

【0032】

図 4 に示される制御システムでは DSP 124 上に C 言語などのプログラムによって PID 制御器 140 が実装される。即ち、図 4 に示される制御システムは、等価的に図 5 に示されるような PID 制御系のブロック線図で表すことができる。即ち、目標変位から実際の変位量 (センサ出力) が減算されて PID 制御器 140 に入力され、この減算値を基にフィードバック量が計算されてアクチュエータ 10 が制御される。この図 5 においては、圧電素子用の駆動アンプ 112 或いは光センサ 118 等の周波数特性は、省略されている。図 5 におけるアクチュエータ 10 は、制御対象 P (s) であるので、アクチュエータ 10 を制御対象 P (s) に置き換えれば、図 6 に示すようなフィードバック制御系をブロック線図で表すことができる。

30

【0033】

この図 6 を参照して発明者が検討した一般的な制御要素の決定に関する考察について説明し、この考察を基にしたこの発明の実施の形態に係る PID 制御装置及びその PID 制御系の制御要素を設定する方法に関して以下に説明する。

【0034】

図 6 に示す制御系において、制御対象は、よく知られる

40

【数 11】

$$\text{制御対象: } P(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad \dots(1)$$

【0035】

のように、2 次遅れ系の伝達特性として表される。

【0036】

ここで、 ζ は、減衰率、 ω_n は、固有角周波数であり、K は、ゲイン定数である。

【0037】

50

制御対象 $P(s)$ と制御器 $K(s)$ の掛け合わせた伝達関数 $L(s) = P(s) \cdot K(s)$ は、開ループ伝達関数（或いは一巡伝達関数）と称せられる。

【0038】

アクチュエータを高速高精度に位置決めする際、応答の速応性の目安となるのが、開ループ伝達関数 $L(s)$ における周波数応答のゲイン交差周波数である。このゲイン交差周波数が高周波数帯域にあればある程、位置決め応答の立ち上がりが速くなり、また、開ループ伝達関数のゲインが大きくなるため低感度となり、システムに混入する外乱の影響或いは特性変動の影響を抑制することができる。

【0039】

アクチュエータを制御するための制御器 140 は、次式で与えられる PID 制御器を用いるのが一般的であり、通常、最も広く用いられている。 10

【数12】

$$\text{PID制御器} : K(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad \dots(2)$$

【0040】

ここで、 K_P は、比例要素、 K_I / s は、積分要素、 $K_D s$ は、微分要素を表す。

【0041】

しかし、背景技術で述べるように、一般に、 K_P 、 K_I 、 K_D の3つのゲインは、開ループ伝達関数 $L(s)$ の周波数応答や位置決めに関する応答などを望ましくなるように、 20
試行錯誤により調整されている。

【0042】

背景技術で説明されているように、PID 制御器のゲインの組み合わせは、無数にあるため、高速高精度性を実現するためのゲインの設定には、試行錯誤の設計では、必要以上の時間を要する。また、試行錯誤による設計では、サーボ帯域を高周波数の帯域に設定する際、システムが不安定にならないように設計することも困難となる。

【0043】

アクチュエータは、その個体差がある場合或いは取り付けられる HGA (Head Gimbals Assembly) 及び固定治具が取り付けられても、2次遅れ要素としてモデル近似することは可能であるが、これらの影響により共振周波数がずれるため、特性に合わせた PID 制御器 140 のゲインが調整されなければならない。このため、PID 制御器のゲインは、 30
試行錯誤することなく決定されることが必要とされる。

【0044】

アクチュエータ 10 の周波数応答の一例が図 7 (a) 及び (b) に示されている。このアクチュエータ 10 では、周波数 5 kHz に共振ピーク特性を持つことがわかる。このような制御対象の場合、一般的には、PID 制御器 140 にノッチフィルタを組み合わせて用いられる場合が多いことが知られている。ノッチフィルタの伝達関数は、次の通りである。

【数13】

$$\text{ノッチフィルタ} : W(s) = \frac{K_W(s^2 + 2\zeta_2\omega_{n2}s + \omega_{n2}^2)}{s^2 + 2\zeta_1\omega_{n1}s + \omega_{n1}^2} \quad \dots(3) \quad 40$$

【0045】

ここで、 $\omega_{n2} = \omega_{n1}$ 、 $\zeta_2 = \zeta_1$ となるようにノッチフィルタの係数 ω_{n2} 、 ζ_2 が選定されることにより反共振特性を作り出すことができるため、アクチュエータ 10 の持つ共振ピークを打ち消すことができ、サーボ帯域の高周波数の広帯域化が期待できる。しかし、PID 制御器 140 にノッチフィルタを組み合わせた場合、制御器 140 の伝達関数は、

【数 1 4】

$$K(s)W(s) = \left(K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \right) \frac{K_W(s^2 + 2\zeta_2\omega_{n2}s + \omega_{n2}^2)}{s^2 + 2\zeta_1\omega_{n1}s + \omega_{n1}^2} \quad \dots(4)$$

【0 0 4 6】

となるため、次数が高くなり、DSPに実装する際の制御演算の回数が多くなる問題がある。

【0 0 4 7】

制御器の伝達関数の次数が高くなると、図6のブロック線図において、目標変位から変位までの伝達関数も次数が高くなるため、目標値応答特性にオーバーシュートが現れる場合がある。 10

【0 0 4 8】

そこで、発明者らは、PID制御器140の微分要素を次式で与えられる不完全微分器とする着想に至っている。

【数 1 5】

$$\text{変更したPID制御器} : K_1(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{s + \alpha} \quad \dots(5)$$

【0 0 4 9】

この書き換えは、一般的に行われており、微分要素が持つ高周波域でのゲインの増大を防ぎ、システムに混入する高周波ノイズの影響を抑えることができる。ここで、 α は、任意に定めることができるパラメータである。 20

【0 0 5 0】

PID制御器140の微分器を書き換えることにより、伝達特性はつぎのようになる。

【数 1 6】

$$\text{PID制御器} : K_1(s) = \frac{(K_P + K_D)s^2 + (\alpha K_P + K_I)s + \alpha K_I}{s(s + \alpha)} \quad \dots(6)$$

【0 0 5 1】

この式より、分子多項式が2次式となることがわかり、この2次多項式を利用して制御対象の持つ共振特性を打ち消すための反共振特性を作り出すことができる。即ち、不完全微分器を用いたPID制御器140の分子多項式をアクチュエータの分母多項式と等しくすることによって制御対象の持つ共振特性を打ち消すことができる。このため、前項の微分要素の書き換えが必要となり、本発明のひとつのキーポイントとなる。この相殺作業は、ノッチフィルタを使用する必要が無いことを意味しており、これにより開ループ伝達関数の次数の増加も抑えることができる。 30

【0 0 5 2】

不完全微分器を用いた場合の開ループ伝達関数は、次式となる。

【数 1 7】

$$\text{開ループ} : P(s)K_1(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{(K_P + K_D)s^2 + (\alpha K_P + K_I)s + \alpha K_I}{s(s + \alpha)} \quad \dots(7)$$

【0 0 5 3】

制御対象P(s)の分母多項式とPID制御器の分子多項式がキャンセルされた後の開ループ伝達関数を次式のようにおく。

【数 1 8】

$$\text{開ループ} : L(s) = \frac{L_1}{s(s + \alpha)} \quad \dots(8)$$

【 0 0 5 4 】

ここで、 L_1 は、仕様として与えられるサーボ帯域を実現するために調整可能なパラメータである。式(5)及び(6)を等価とみなし、PID制御器140のゲインを求めると、次式のようになる。

【 数 1 9 】

$$K_P = \frac{L_1(2\zeta\alpha - \omega_n)}{\alpha^2 K \omega_n}$$

$$K_I = \frac{L_1}{\alpha K}$$

$$K_D = \frac{L_1(\alpha^2 - 2\zeta\omega_n\alpha + \omega_n^2)}{\alpha^2 K \omega_n^2} \quad \dots(9)$$

10

【 0 0 5 5 】

パラメータ L_1 の決定法について述べる。仕様として与えられるサーボ帯域を ω_d と設定すると、 ω_d は、開ループ伝達関数のゲイン線図が0dBと交差する周波数である。このため、 $L(s)$ の ω_d におけるゲインが1となるように L_1 を決定する。

【 数 2 0 】

$$|L(j\omega_d)| = \left| \frac{L_1}{j\omega_d(j\omega_d + \alpha)} \right| = \frac{L_1}{\sqrt{\omega_d^4 + \alpha^2\omega_d^2}} = 1 \quad \dots(10)$$

20

【 0 0 5 6 】

即ち、 L_1 は、次式のように求めることができ、この L_1 を選ぶことにより任意のサーボ帯域を実現することができる。

【 数 2 1 】

$$L_1 = \omega_d \sqrt{\omega_d^2 + \alpha^2} \quad \dots(11)$$

30

【 0 0 5 7 】

図8は、開ループ伝達関数のゲイン特性を示している。本発明の実施の形態に係る制御系における実験結果によれば、開ループ伝達関数のゲイン特性は、サーボ帯域が ω_d 、ゲイン特性の低域の近似直線が-20dB/dec、高域が-40dB/decとなり、不完全微分器の導入により2つの近似曲線の交点が周波数 ω_d となる。

【 0 0 5 8 】

目標変位から変位までの伝達関数 $F(s)$ は、次式となる。

【 数 2 2 】

$$F(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)} = \frac{L_1}{s^2 + \alpha s + L_1} \quad \dots(12)$$

40

このため、 $\alpha / (2\sqrt{L_1}) < 1$ の場合には、目標値応答特性はオーバーシュートする

ものの、 α の選び方により $\alpha / (2\sqrt{L_1}) > 1$ とすることができ、オーバーシュート

を抑えることができる。

【 0 0 5 9 】

式(9)のPIDゲイン決定するに用いる公式は、一般に広く用いられているPID制御器にノッチフィルタを附加した制御系では実現することができないものとなっている。

50

【0060】

この発明の実施の形態に係る決定法にあつては、比例ゲイン K_p が $2 < n$ の場合にマイナスとなる。PIDゲインは、通常、プラスの値で決定するため、試行錯誤による決定では、本決定法のようなゲインを実現することはできない。一例として、図9に示す結果では、比例ゲインはマイナスとなっている。

【0061】

上述した考察を基にしたPID制御系の制御要素を設定する方法においては、図10のステップS10に示されるように、始めに制御対象の周波数応答が求められ、式(1)のモデルで表わされる。即ち、PID制御系において、図1に示される制御対象 $P(s)$ であるアクチュエータ10の図7(a)及び(b)に示されるような周波数応答特性が実験的に求められる。この周波数応答特性は、図7(a)及び(b)において実線で示される。この実線で示される曲線に近似される式(1)で示される数学的モデルのパラメータ K 、及び n が決定される。この数学的モデルの周波数応答特性は、図7(a)及び(b)において破線で示されている。

【0062】

次に、図10のステップS12に示すようにPID制御器140の微分要素が式(5)で示される不完全微分器とされる。次に、ステップS14に示すように、仕様として与えられるサーボ帯域を実現するように、式(9)に含まれる開ループ伝達関数 $(L(s))$ のパラメータ L_1 が決定される。その後、ステップS16に示すように式(5)で示される不完全微分器に含まれるパラメータ α は、高周波数域におけるノイズの影響及びオーバーシュート量を考慮して決定される。最後に、ステップS18に示されるように、制御対象10と制御器140との掛算として表される開ループ伝達関数が式(8)となるようにPID制御器のゲイン K_p 、 K_I 、 K_D が K 、 n 、 L_1 及び α を用いて決定される。ここで、比例ゲイン K_p は、好ましくは $2 < n$ を前提としてマイナスとなる値に定められる。

【0063】

この決定法の特徴は、式(7)のゲインに含まれるパラメータがアクチュエータのパラメータと1対1になっており、共振周波数がずれても適用可能である。

【0064】

上述したパラメータ L_1 、 α 、 n 及びゲイン K_p 、 K_I 、 K_D を備える制御器140を構成するように図4に示すDSP124がPC126によって設定制御される。

【0065】

上述したように、図7に示す周波数特性を持つアクチュエータ10に対して、サーボ帯域 $2kHz$ を指定し、PID制御器の設計を行った。求めたPID制御器をDSP上に実装し、開ループ伝達関数の周波数応答を求めたところ、図9(a)及び(b)に示す実験結果が得られた。図9(a)及び(b)より、実験結果とシミュレーション結果は良く一致しており、いずれもサーボ帯域 $2kHz$ を実現しているのが判明している。

【0066】

尚、上述したPID制御系の制御要素を設定する方法は、図1に示すようなアクチュエータに限らず種々の制御対象に適用が可能であり、特に、高速高精度に制御が要求される制御対象に適用可能である。

【0067】

以上のように、この発明によれば、微動アクチュエータを高速高精度に位置決めするため、要求仕様として与えられるサーボ帯域を実現するPID制御装置が提供される。このPID制御装置は、サーボ帯域の広帯域化を実現するため、微動アクチュエータの共振特性を打ち消すような反共振特性を有することとなる。

【0068】

また、この発明によれば、好ましくは、DSPに実装されるコントローラの次数が低くなるように、微動アクチュエータの極とコントローラのゼロ点を相殺するPID制御装置が提供される。更に、この発明によれば、より好ましくは、目標値応答がオーバーシュー

10

20

30

40

50

トしないように、フィードバック制御系の伝達関数の次数を低く抑えるPID制御装置が提供される。

【産業上の利用可能性】

【0069】

ハードディスク装置の著しい高記録密度化に伴い、磁気ディスクの記録再生信号を評価する磁気記録評価装置において、磁気ヘッドを高速・高精度に位置決めする技術が要求されている。本発明は、磁気ヘッドを位置決めする微動アクチュエータのPID制御装置に関するものであり、従来から行われている試行錯誤することなく制御装置を設計できるため、磁気記録評価装置の性能向上に大きく貢献できる。

【図面の簡単な説明】

【0070】

【図1】この発明のPID制御装置における制御対象の一例としてのアクチュエータの構造を概略的に示す斜視図である。

【図2】図1に示すアクチュエータの平面図である。

【図3】図1に示すアクチュエータの側面図である。

【図4】図1に示すアクチュエータを制御する制御系を示すブロック図である。

【図5】図4に示される制御系を簡略化したブロック図である。

【図6】図5に示される制御系のブロック線図である。

【図7】(a)及び(b)は、図1に示すアクチュエータ10の周波数応答特性の一例を示すグラフである。

【図8】図6に示される制御系における開ループ伝達関数のゲイン特性を示すグラフである。

【図9】(a)及び(b)は、この発明の一実施の形態に係るPID制御装置の伝達関数の設定方法に従ってゲインが設定されたPID制御装置における実験結果及びシミュレーションで得られた周波数特性を示すグラフである。

【図10】この発明の実施例に係るPID制御系の制御要素を設定方法を示すフローチャートである。

【符号の説明】

【0071】

10 . . . アクチュエータ、12 . . . 圧電素子、14 . . . 変位拡大機構、16 . . . 支持部、18 . . . 可動子、20 a、20 b . . . リンク、22 . . . ヒンジ、112 . . . 圧電素子用駆動アンプ、120 . . . オペアンプ、118 . . . 光ファイバセンサ、122、130 . . . A/Dコンバータ、124 . . . デジタル信号処理器、126 . . . PC、132 . . . 目標変位入力部、136 . . . オペアンプ

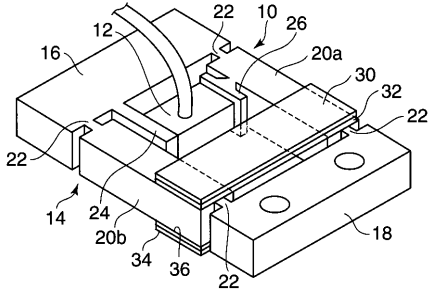
10

20

30

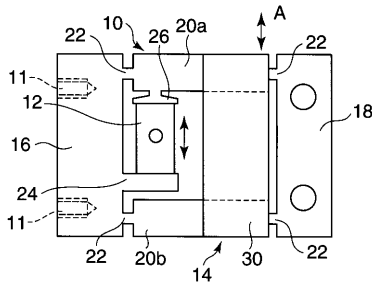
【 図 1 】

図 1



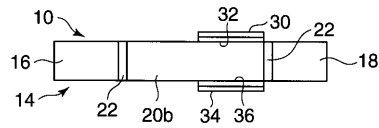
【 図 2 】

図 2



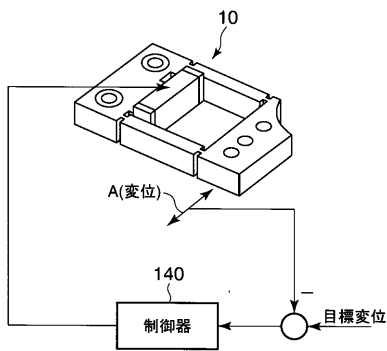
【 図 3 】

図 3



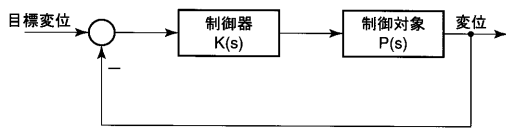
【 図 5 】

図 5



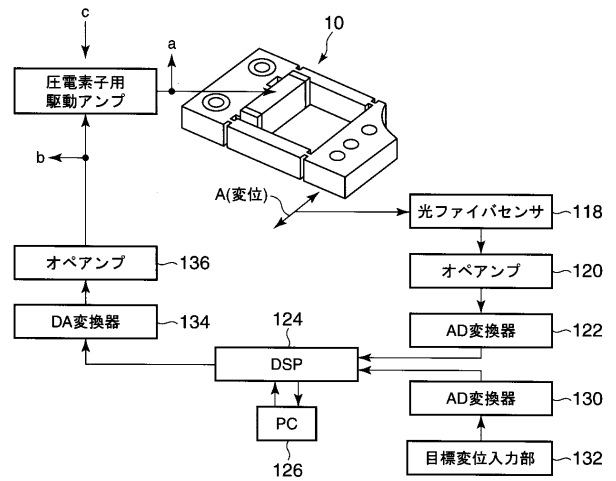
【 図 6 】

図 6



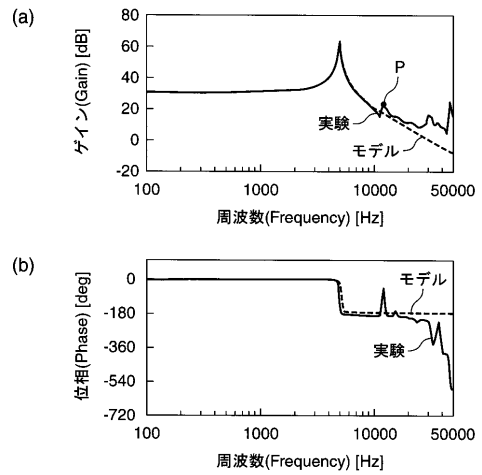
【 図 4 】

図 4



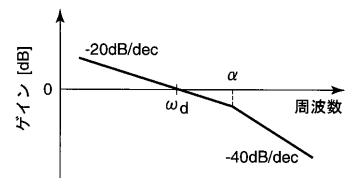
【 図 7 】

図 7



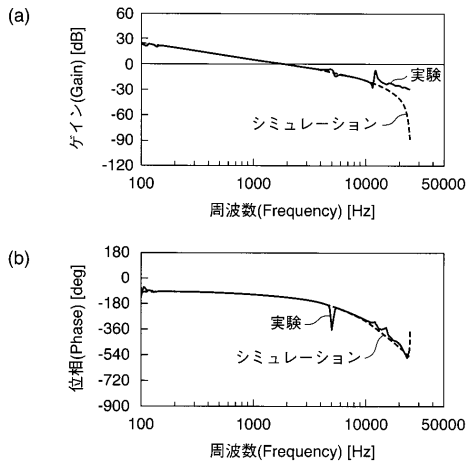
【 図 8 】

図 8



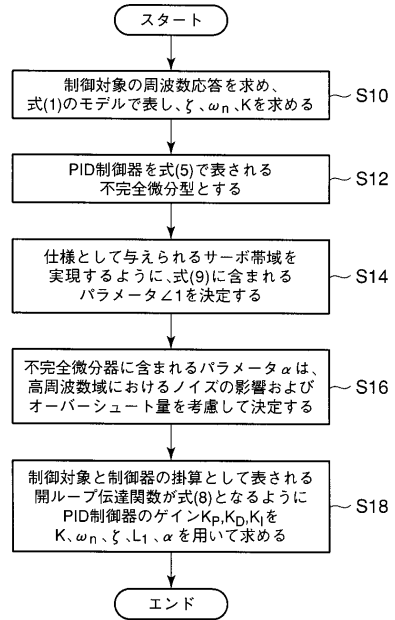
【 図 9 】

図 9



【 図 10 】

図 10



フロントページの続き

(72)発明者 森 英季

秋田県秋田市御所野元町7 - 1 9 - 1 8

(72)発明者 渋谷 嗣

秋田県秋田市御所野元町7 - 1 6 - 1 1

Fターム(参考) 5H004 GA02 GB15 HA07 HB07 HB08 JA03 JB01 KB02 KB04 KB06
KB22 LA02 LA11 MA15
5H303 AA22 BB01 BB06 CC02 DD01 FF03 HH04 KK02 KK03 KK04