

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4759391号
(P4759391)

(45) 発行日 平成23年8月31日(2011.8.31)

(24) 登録日 平成23年6月10日(2011.6.10)

(51) Int.Cl. F I
G05B 11/36 (2006.01) G O 5 B 11/36 5 O 1 C
G05D 3/12 (2006.01) G O 5 D 3/12 3 O 5 V

請求項の数 10 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2006-6309 (P2006-6309)	(73) 特許権者	503360115
(22) 出願日	平成18年1月13日 (2006.1.13)		独立行政法人科学技術振興機構
(65) 公開番号	特開2007-188322 (P2007-188322A)		埼玉県川口市本町四丁目1番8号
(43) 公開日	平成19年7月26日 (2007.7.26)	(74) 代理人	100108855
審査請求日	平成21年1月9日 (2009.1.9)		弁理士 蔵田 昌俊
		(74) 代理人	100103034
			弁理士 野河 信久
		(74) 代理人	100124394
			弁理士 佐藤 立志
		(74) 代理人	100113099
			弁理士 和田 祐造
		(74) 代理人	100117547
			弁理士 須田 浩史

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) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

フィードバック制御系における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 $L(s)$ に定め、この式 $L(s)$ 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 並びにパラメータ L_1 を含む関係式で定め、

【数1】

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

仕様として与えられるサーボ帯域を角周波数 ω_d で実現するように、上記式 $L(s)$ における前記パラメータ L_1 を下記式に定め、

【数 2】

$$L_1 = \omega_d \sqrt{\omega_d^2 + \alpha^2}$$

前記不完全微分器に含まれる前記パラメータ α を当該フィードバック制御系に混入する高周波数域におけるノイズの影響及び目標応答特性におけるオーバーシュート量を考慮して決定し、

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御器に与える PID 制御系の制御要素を設定する方法。 10

【請求項 2】

前記 2 次遅れ系の伝達関数は、下記制御対象の式 $P(s)$

【数 3】

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

(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。) 20
で表されることを特徴とする請求項 1 の PID 制御系の制御要素を設定する方法。

【請求項 3】

前記制御器の伝達関数が下記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 PID 制御系の制御要素を設定する方法。

【数 4】

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

30

【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 PID 制御系の制御要素を設定する方法。

【請求項 5】

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 PID 制御系の制御要素を設定する方法。

【請求項 6】

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、

40

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 $L(s)$ に定められ、この式 $L(s)$ 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 α 、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 並びにパラメータ L_1 を含む関係式で定められ、

【数5】

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

ここで、前記開ループ伝達関数 $L(s)$ のパラメータ L_1 が仕様として与えられるサーボ帯域を角周波数 ω_d で実現するように、下記式で定められ、

【数6】

$$L_1 = \omega_d \sqrt{\omega_d^2 + \alpha^2} \quad 10$$

また、前記不完全微分器に含まれる前記パラメータ α が当該フィードバック制御系に混入する高周波数域におけるノイズの影響及び目標応答特性におけるオーバーシュート量を考慮して決定され、

前記パラメータ L_1 及び α 並びにゲイン定数 K 、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7】

前記2次遅れ系の伝達関数は、下記制御対象の式 $P(s)$ 20

【数7】

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

(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6のPID制御装置。

【請求項8】

前記制御器の伝達関数が下記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8】

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

【請求項9】

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。 40

【請求項10】

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200Gbit/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1Tbit/in²の記録密度が達成された場合、トラックピッチは、50nm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る構成され、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2005-261167

【発明の開示】

【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。

30

【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。

【課題を解決するための手段】

40

【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PID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。

【0009】

この発明によれば、

50

フィードバック制御系における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 $L(s)$ に定め、この式 $L(s)$ 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 、減衰率及び固有角周波数 ω_n 並びにパラメータ L_1 を含む関係式で定め、

【数7】

10

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

【0010】

仕様として与えられるサーボ帯域を角周波数 ω_d で実現するように、上記式 $L(s)$ における前記パラメータ L_1 を下記式に定め、

【数8】

$$L_1 = \omega_d \sqrt{\omega_d^2 + \alpha^2}$$

20

前記不完全微分器に含まれる前記パラメータを当該フィードバック制御系に混入する高周波数域におけるノイズの影響及び目標応答特性におけるオーバーシュート量を考慮して決定し、

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御器に与えるPID制御系の制御要素を設定する方法が提供される。

【0011】

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、

30

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 $L(s)$ に定められ、この式 $L(s)$ 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 、減衰率及び固有角周波数 ω_n 並びにパラメータ L_1 を含む関係式で定められ、

【数9】

40

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

【0012】

ここで、前記開ループ伝達関数 $L(s)$ のパラメータ L_1 が仕様として与えられるサーボ帯域を角周波数 ω_d で実現するように、下記式で定められ、

【数10】

$$L_1 = \omega_d \sqrt{\omega_d^2 + \alpha^2}$$

50

また、前記不完全微分器に含まれる前記パラメータが当該フィードバック制御系に混入する高周波数域におけるノイズの影響及び目標応答特性におけるオーバーシュート量を考慮して決定され、

前記パラメータ L 及び τ 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 P I D 制御装置が提供される。

【発明の効果】

【0013】

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。

10

【0014】

また、この発明の P I D 制御装置によれば、広く用いられている P I D 制御系にノッチフィルタを適用した制御装置に代えて、P I D 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】

20

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 P I D 制御装置及び P I D 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 P Z T (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増大効果のある駆動素子である。しかし、この圧電素子は、駆動できる変位量が概ね積層高さの 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り、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。

30

【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 20 a、20 b を有し、全体としてほぼ矩形棒状に形成されている。各リンク部 20 a、20 b 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 20 a、20 b 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。

40

【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、梃子機構 26

50

を介して、一方のリンク部 20 a 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 20 a に伝達される。すると、リンク部 20 a 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 20 b が矢印 A 方向に移動する。その結果、ほぼ矩形棒状の変位拡大機構 14 は、平行四辺形の棒状に変位する。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 20 a、20 b、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 20 a、20 b、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。

10

【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 20 a、20 b 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。

20

【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 20 a、20 b 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。

30

【0023】

また、拘束部材 30 及び粘弾性体をリンク部 20 a、20 b 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 20 a、20 b 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。

40

【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

50

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】

この挺子機構(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5kHz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、PC126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。

【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DSP124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。

【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

【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】

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。

【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、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、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5kHz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る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

10

20

30

40

50

る。

【数 1 3】

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

【 0 0 4 5】

ここで、 $\omega_{n1} = \omega_{n2}$ 、 $\zeta_1 = \zeta_2$ 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

10

【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増える問題がある。

【 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。

20

【 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、微分要素を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。

30

【 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。

40

【 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 17】

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

【0053】

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 18】

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

10

【0054】

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 19】

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

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

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

20

【0055】

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 0 dB 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 20】

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

30

【0056】

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 21】

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

【0057】

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 -20 dB/dec、高域が -40 dB/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。

40

【0058】

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】

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

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。

10

【0059】

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。

【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 、 ω_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。

20

【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 、 ω_n 、 ω_c 、 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。

30

【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。

40

【0064】

上述したパラメータ L_1 、 ω_c 、 ω_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。

50

【 0 0 6 6 】

尚、上述した P I D 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。

【 0 0 6 7 】

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 P I D 制御装置が提供される。この P I D 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しすることとなる。

【 0 0 6 8 】

また、この発明によれば、好ましくは、D S P 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 P I D 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 P I D 制御装置が提供される。

【産業上の利用可能性】

【 0 0 6 9 】

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 P I D 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】

【 0 0 7 0 】

【図 1】この発明の P I D 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 1 0 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 P I D 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 P I D 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 1 0】この発明の実施例に係る P I D 制御径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】

【 0 0 7 1 】

1 0 . . . アクチュエータ、1 2 . . . 圧電素子、1 4 . . . 変位拡大機構、1 6 . . . 支持部、1 8 . . . 可動子、2 0 a、2 0 b . . . リンク、2 2 . . . ヒンジ、1 1 2 . . . 圧電素子用駆動アンプ、1 2 0 . . . オペアンプ、1 1 8 . . . 光ファイバセンサ、1 2 2、1 3 0 . . . A / D コンバータ、1 2 4 . . . デジタル信号処理器、1 2 6 . . . P C、1 3 2 . . . 目標変位入力部、1 3 6 . . . オペアンプ

10

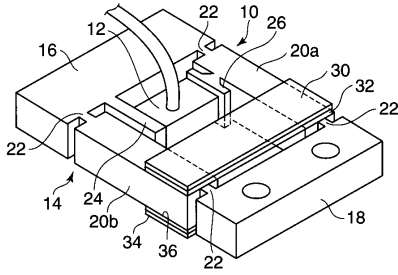
20

30

40

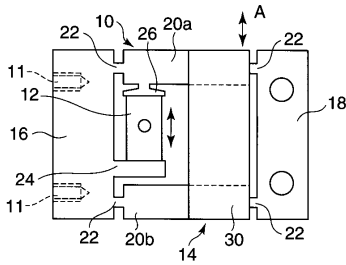
【図1】

図1



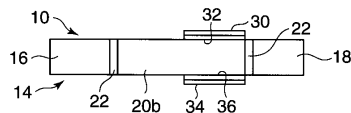
【図2】

図2



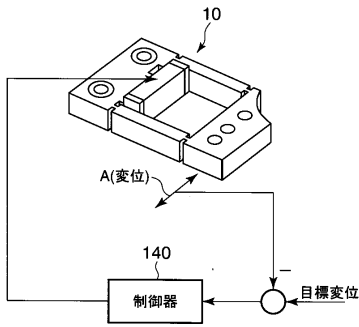
【図3】

図3



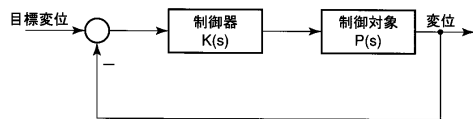
【図5】

図5



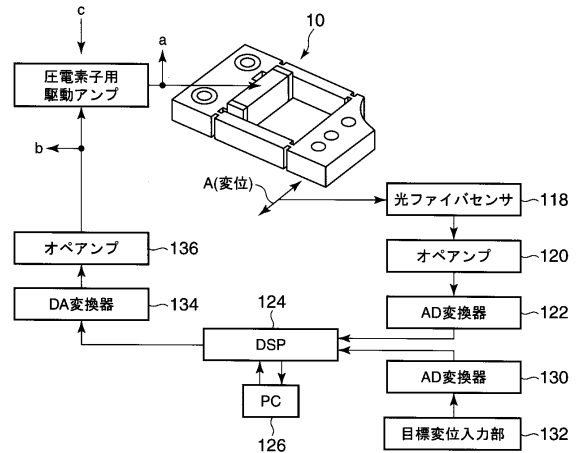
【図6】

図6



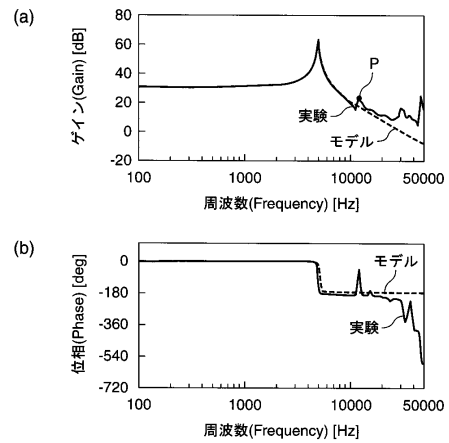
【図4】

図4



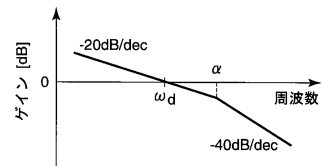
【図7】

図7



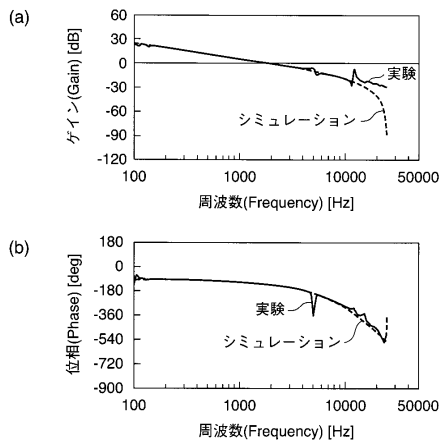
【図8】

図8



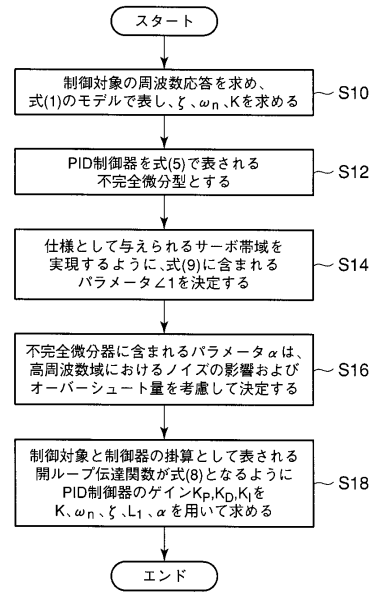
【 図 9 】

図 9



【 図 10 】

図 10



フロントページの続き

- (73)特許権者 504409543
国立大学法人秋田大学
秋田県秋田市手形学園町1番1号
- (74)代理人 100108855
弁理士 蔵田 昌俊
- (74)代理人 100091351
弁理士 河野 哲
- (74)代理人 100088683
弁理士 中村 誠
- (74)代理人 100109830
弁理士 福原 淑弘
- (74)代理人 100075672
弁理士 峰 隆司
- (74)代理人 100095441
弁理士 白根 俊郎
- (74)代理人 100084618
弁理士 村松 貞男
- (74)代理人 100103034
弁理士 野河 信久
- (74)代理人 100119976
弁理士 幸長 保次郎
- (74)代理人 100153051
弁理士 河野 直樹
- (74)代理人 100140176
弁理士 砂川 克
- (74)代理人 100101812
弁理士 勝村 紘
- (74)代理人 100100952
弁理士 風間 鉄也
- (74)代理人 100070437
弁理士 河井 将次
- (74)代理人 100124394
弁理士 佐藤 立志
- (74)代理人 100112807
弁理士 岡田 貴志
- (74)代理人 100111073
弁理士 堀内 美保子
- (74)代理人 100134290
弁理士 竹内 将訓
- (74)代理人 100127144
弁理士 市原 卓三
- (74)代理人 100141933
弁理士 山下 元
- (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1-4-5 手形田中住宅1-504
- (72)発明者 森 英季

秋田県秋田市御所野元町7 - 19 - 18
(72)発明者 渋谷 嗣
秋田県秋田市御所野元町7 - 16 - 11

審査官 星名 真幸

(56)参考文献 特開平05 - 046249 (JP, A)
特開2003 - 263227 (JP, A)
特開昭59 - 153202 (JP, A)
特開2005 - 261167 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G05B 11/36
G05B 13/02
G05D 3/12