

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6325504号
(P6325504)

(45) 発行日 平成30年5月16日(2018.5.16)

(24) 登録日 平成30年4月20日(2018.4.20)

(51) Int.Cl.

G05D 3/00 (2006.01)
G05B 19/18 (2006.01)

F 1

G05D 3/00
G05B 19/18J
W

請求項の数 1 (全 9 頁)

(21) 出願番号 特願2015-211940 (P2015-211940)
 (22) 出願日 平成27年10月28日 (2015.10.28)
 (65) 公開番号 特開2017-84104 (P2017-84104A)
 (43) 公開日 平成29年5月18日 (2017.5.18)
 審査請求日 平成28年12月14日 (2016.12.14)

早期審査対象出願

(73) 特許権者 390008235
 ファナック株式会社
 山梨県南都留郡忍野村忍草字古馬場 358
 ○番地
 (74) 代理人 100099759
 弁理士 青木 篤
 (74) 代理人 100092624
 弁理士 鶴田 準一
 (74) 代理人 100114018
 弁理士 南山 知広
 (74) 代理人 100151459
 弁理士 中村 健一
 (72) 発明者 飯島 一憲
 山梨県南都留郡忍野村忍草字古馬場 358
 ○番地 ファナック株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】学習制御器の自動調整を行う機能を有するサーボ制御装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

サーボモータで駆動される送り軸を有する工作機械のサーボ制御装置において、
 送り軸を所定の同一動作パターンで駆動するための位置指令を作成する位置指令作成部と、

送り軸の位置を検出する位置検出部と、

前記位置指令作成部が作成した位置指令値及び前記位置検出部が検出した位置検出値を取得し、位置指令値と位置検出値との差分である位置偏差を算出する位置偏差取得部と、

前記位置指令作成部、前記位置検出部、及び前記位置偏差取得部を含む位置制御ループと、

前記位置偏差取得部から出力された位置偏差の高周波成分を減衰させる帯域制限フィルタと、

前記帯域制限フィルタから出力された位置偏差に対して位相進めを実施する動特性補償要素と、

前記帯域制限フィルタ及び前記動特性補償要素を含む学習制御器と、

前記位置制御ループへの正弦波掃引を行う正弦波掃引入力部と、

正弦波を前記位置制御ループへ入力したときの前記位置制御ループの出力から、位置制御ループ入出力信号の利得と位相を推定するための周波数特性算出部と、

前記周波数特性算出部が算出した実測の周波数特性、及び前記学習制御器の周波数特性に基づいて、学習制御器付きの位置制御特性を示す評価関数を計算する学習制御特性評価

10

20

関数算出部と、を具備し、

前記学習制御特性評価関数算出部は、評価関数の値に基づいて前記学習制御器を構成する前記帯域制限フィルタ及び前記動特性補償フィルタの少なくとも一方の構成を変更し、

前記学習制御特性評価関数算出部は、評価関数の値が極小となるように前記学習制御器を構成する前記帯域制限フィルタ及び前記動特性補償フィルタの少なくとも一方の調整を行_い、

前記評価関数は、前記学習制御器における過渡偏差の収束性を表す指標の周波数特性におけるピーク高さ及び半値幅を用いて、以下の式により算出される、

$$\text{評価関数} = \text{ピーク高さ} / \text{半値幅}$$

ことを特徴とするサーボ制御装置。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、サーボ制御装置に関し、特に、学習制御器の自動調整を行う機能を有するサーボ制御装置に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、工作機械では学習制御に関する技術の実用化が進んでいる。学習制御について簡単に説明すると、学習制御はフィードフォワード信号のある同じ動作に対して最適化する制御である。繰り返し同じ動作を行う事により、フィードフォワード信号が更新されて行き、最終的にはある形に落ち着く。その時点で、学習を終了して、学習制御によって得られたフィードフォワード信号を更新せずにそのまま使用する。

20

【0003】

学習制御を用いた繰り返し動作の高精度化の原理が報告されている（例えば、非特許文献1）。非特許文献1においては、評価関数自体の導出も行われている。しかしながら、非特許文献1においてはサーボ系の周波数応答を実測する技術や実験モード解析は行われておらず、ノミナルな特性以上の計算は行われていなかった。学習制御器の構成方法の原則については言及しているものの、具体的な調整則については触れていない。

【0004】

また、学習制御の特性や安定性についても報告されている（例えば、非特許文献2）。しかしながら、非特許文献2には、学習制御器の調整則については言及されていない。

30

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】井上惠ら：プレイバックサーボ系の高精度制御，電気学会論文誌C，101巻，4号，p. 89 - 96 (1981)

【非特許文献2】片山剛ら：適応型繰り返し制御を用いた光ディスクのトラッキング制御システム，テレビジョン学会誌，Vol. 48，No. 8，p. 1018 - 1026 (1994)

【発明の概要】

40

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

本発明は、実測の基本制御系特性によって得られる、学習制御を含めたサーボ特性を自動調整することが可能なサーボ制御装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の一実施例に係るサーボ制御装置は、サーボモータで駆動される送り軸を有する工作機械のサーボ制御装置において、送り軸を所定の同一動作パターンで駆動するための位置指令を作成する位置指令作成部と、送り軸の位置を検出する位置検出部と、位置指令作成部が作成した位置指令値及び位置検出部が検出した位置検出値を取得し、位置指令値

50

と位置検出値との差分である位置偏差を算出する位置偏差取得部と、位置指令作成部、位置検出部、及び位置偏差取得部を含む位置制御ループと、位置偏差取得部から出力された位置偏差の高周波成分を減衰させる帯域制限フィルタと、帯域制限フィルタから出力された位置偏差に対して位相進めを実施する動特性補償要素と、帯域制限フィルタ及び動特性補償要素を含む学習制御器と、位置制御ループへの正弦波掃引を行う正弦波掃引入力部と、正弦波を位置制御ループへ入力したときの位置制御ループの出力から、位置制御ループ出入力信号の利得と位相を推定するための周波数特性算出部と、周波数特性算出部が算出した実測の周波数特性、及び学習制御器の周波数特性に基づいて、学習制御器付きの位置制御特性を示す評価関数を計算する学習制御特性評価関数算出部と、を具備し、学習制御特性評価関数算出部は、評価関数の値に基づいて学習制御器を構成する帯域制限フィルタ及び動特性補償要素の少なくとも一方の構成を変更することを特徴とする。

【発明の効果】

【0008】

本発明の一実施例に係るサーボ制御装置によれば、機械特性を含めて計測した学習制御器つきサーボ制御特性の最適化を行うことにより、オンライン計算での定量的な安定性評価と最適化が可能であるため、学習制御の調整における試行錯誤が不要となるという効果が得られる。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】本発明の実施例に係るサーボ制御装置の構成図である。

20

【図2】本発明の実施例に係るサーボ制御装置の学習制御器の構成図である。

【図3】本発明の実施例に係るサーボ制御装置の通常サーボ及び帯域制限フィルタの周波数特性を示すグラフである。

【図4】本発明の実施例に係るサーボ制御装置の学習制御器における過渡偏差の収束性を表す指標 A_T の周波数特性の例である。

【図5】本発明の実施例に係るサーボ制御装置の学習制御器における過渡偏差の収束性を表す指標 A_T の周波数特性の他の例である。

【図6】本発明の実施例に係るサーボ制御装置の動作手順を説明するためのフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0010】

以下、図面を参照して、本発明に係るサーボ制御装置について説明する。図1は、本発明の実施例に係るサーボ制御装置100の構成図である。本発明の実施例に係るサーボ制御装置100は、サーボモータで駆動される送り軸を有する工作機械のサーボ制御装置において、位置指令作成部1と、位置検出部2と、位置偏差取得部3と、位置制御ループ4と、帯域制限フィルタ5と、動特性補償要素6と、学習制御器7と、正弦波掃引入力部8と、周波数特性算出部9と、学習制御特性評価関数算出部10と、を有する。

【0011】

位置指令作成部1は、伝達機構30を介してサーボモータ20が工作機械の送り軸を所定の同一動作パターンで駆動するための位置指令を作成する。位置指令作成部1が作成した位置指令は位置偏差取得部3に出力される。

40

【0012】

位置検出部2は、工作機械の送り軸の位置を検出する。位置検出部2として、エンコーダやレゾルバを用いることができるが、これらには限られない。位置検出部2が検出した送り軸の位置の検出値は位置偏差取得部3に出力される。

【0013】

位置偏差取得部3は、位置指令作成部1が作成した位置指令値及び位置検出部2が検出した位置検出値を取得し、位置指令値と位置検出値との差分である位置偏差を算出する。上記の位置指令作成部1、位置検出部2、及び位置偏差取得部3を含んで位置制御ループ4が構成される。

50

【0014】

帯域制限フィルタ5は、位置偏差取得部3から出力された位置偏差の高周波成分を減衰させる。帯域制限フィルタ5は、ある周波数領域における高周波領域の信号をカットするためのローパスフィルタであり、制御系を安定させる効果がある。

【0015】

動特性補償要素6は、帯域制限フィルタ5から出力された位置偏差に対して位相進めを実施する。動特性補償要素6は、ある周波数領域における高周波領域の信号の位相を進ませ、さらにゲインを上げるフィルタであり、制御系の遅れやゲイン低下を補償する効果がある。上記の帯域制限フィルタ5及び動特性補償要素6を含んで学習制御器7が構成される。

10

【0016】

正弦波掃引入力部8は、位置制御ループ4への正弦波掃引を行う。例えば、正弦波掃引入力部8は、位置制御ループ4を構成する位置偏差取得部3に対して正弦波からなる外乱を入力するようにしてもよい。ただし、このような例には限られない。

【0017】

周波数特性算出部9は、正弦波を位置制御ループ4へ入力したときの位置制御ループ4の出力から、位置制御ループ入出力信号の利得と位相を推定する。

【0018】

ここで、周波数特性算出部9は、位置制御ループ4の周波数特性を1つの剛体モード及び少なくとも1つの共振モードによって記述するようにしてもよい。

20

【0019】

学習制御特性評価関数算出部10は、周波数特性算出部9が算出した実測の周波数特性、及び学習制御器7の周波数特性に基づいて、学習制御器付きの位置制御特性を示す評価関数を計算する。学習制御特性評価関数算出部10は、評価関数の値に基づいて学習制御器7を構成する帯域制限フィルタ5及び動特性補償要素6の少なくとも一方の構成を変更する。評価関数の計算等については後述する。

【0020】

次に、学習制御器7の構成について図2を用いて説明する。位置指令rが減算器11に入力され、減算器11によって位置指令rと位置検出部が検出した実位置yとの差である位置偏差eが算出される。学習制御器7の加算器14は、位置偏差eと、帯域制限フィルタ5に設けられた遅延メモリ(図示せず)に記憶された1パターン周期前の補正量とを加算する。帯域制限フィルタ5は、加算器14の出力をフィルタ処理して補正量を求める。帯域制限フィルタ5は、学習周期Lを用いて $F(s)e^{-sL}$ と表すことができる。動特性補償要素($G_x(s)$)6は、制御対象の位相遅れやゲイン低下を補償し、学習制御器7は補正量を加算器12に出力する。加算器12は、位置偏差eにこの補正量を加算し、速度指令作成部15において、通常サーボ(位置・速度制御系)のポジションゲイン $G_0(s)$ を乗じて速度指令を作成する。なお、図2に示した例では、加算器13において速度指令に外乱dが加算される例を示している。

30

【0021】

次に、学習制御特性評価関数算出部10が、周波数特性算出部9が算出した実測の周波数特性、及び学習制御器7の周波数特性に基づいて、学習制御器付きの位置制御特性を示す評価関数を計算する方法について説明する。

40

【0022】

まず、学習制御器の付加によって、同期的入力のもとで十分に長い時間が経過した後の最終偏差の各角周波数成分が、基本サーボ系の制御偏差に対して最終偏差を非常に小さくすることができることがわかる。また、 $|F(j)| = 1$ となるフィルタの遮断領域では、最終偏差特性は基本サーボ系の応答によって決定される(非特許文献1)。なお、同期的入力とは、学習周期Lに対して $r + d$ が一定値、またはLかLの整数分の一の周期を持つことをいう。

【0023】

50

ここで、 $G(j\omega)$ は以下の式(1)で表される。

【0024】

【数1】

$$G(j\omega) = \frac{G_x(j\omega)G_0(j\omega)}{1+G_0(j\omega)} \quad (1)$$

10

【0025】

過渡偏差の収束性を表す指標 A_T ()は下記の式(2)で表すことができる。

【0026】

【数2】

$$A_T(\omega) = |F(j\omega)[1 - G(j\omega)]| \quad (2)$$

20

【0027】

ここで、帯域制限フィルタ $F(j\omega)$ 及び通常サーボのゲイン $G_0(j\omega)$ の周波数特性を図3に示す。 $G_0(j\omega)$ は、二慣性系相当の特性であり、実測で得られる。

【0028】

式(2)より、 A_T ()の値が小さいほど、 $j\omega$ 付近の根による過渡応答成分の収束が速い。また、 $A_T = 1$ は応答成分の振幅が一定で収束しないことを示す。

【0029】

ここで、 G_0 は実測可能であり、 G_x , F は数式で定義可能である。従って、 A_T は実測ベースで計算可能である。従って、本発明の実施例に係るサーボ制御装置によれば、学習制御器込みでのサーボ制御特性を、機械特性を含めて計測することができる。

30

【0030】

ここで、図4に、本発明の実施例に係るサーボ制御装置の学習制御器における過渡偏差の収束性を表す指標 A_T の周波数特性の一例を示す。図4において、実線は指標 A_T を表し、破線は近似曲線(ローレンツ関数)を表す。この近似曲線から評価値を算出する。

【0031】

評価値(評価関数)は、下記の式(3)により算出することができる。

$$\text{評価関数} = \text{ピーク高さ} / \text{半値幅} \quad (3)$$

図4において、縦方向の矢印がピーク高さを表し、横方向の矢印が半値幅を示す。評価値が算出されたら、評価値(評価関数)が極小となるように逐次計算で調整を行う。

【0032】

40

ここで、学習制御特性評価関数算出部10は、式(3)の評価値が極小となるように、学習制御器7を構成する帯域制限フィルタ5及び動特性補償要素6の少なくとも一方の構成を変更する。図5は、本発明の実施例に係るサーボ制御装置の学習制御器における過渡偏差の収束性を表す指標 A_T の周波数特性の他の例であって、帯域制限フィルタ5及び動特性補償要素6の構成を変更した後の特性である。図5の近似曲線においては、図4の近似曲線に比べて、ピーク高さが減少し、半値幅が増大しているので、評価関数の値が小さくなっている。このようにして、評価値が極小となるように帯域制限フィルタ5及び動特性補償要素6の構成を変更する。

【0033】

次に、本発明の実施例に係るサーボ制御装置の動作手順について、図6に示したフロー

50

チャートを用いて説明する。まず、ステップ S 101において、正弦波掃引入力部 8 が位置制御ループ 4 へ正弦波外乱を入力する。例えば、正弦波掃引入力部 8 は、位置制御ループ 4 を構成する位置偏差取得部 3 に対して正弦波からなる外乱を入力する。

【0034】

次に、ステップ S 102において、位置検出部 2 が工作機械の送り軸の位置を検出する。位置検出部 2 が検出した送り軸の位置の検出値は位置偏差取得部 3 に出力される。

【0035】

次に、ステップ S 103において、周波数特性算出部 9 が、位置制御ループ 4 の周波数特性を算出する。即ち、周波数特性算出部 9 が、正弦波を位置制御ループへ入力したときの位置制御ループの出力から、位置制御ループ入出力信号の利得と位相を推定する。

10

【0036】

次に、ステップ S 104において、周波数特性算出部 9 が、帯域制限フィルタ 5 及び動特性補償要素 6 の周波数特性を算出する。

【0037】

次に、ステップ S 105において、学習制御特性評価関数算出部 10 が、位置制御系の評価関数の値を算出する。即ち、学習制御特性評価関数算出部 10 は、周波数特性算出部 9 が算出した実測の周波数特性、及び学習制御器 7 の周波数特性に基づいて、学習制御器付きの位置制御特性を示す評価関数を計算する。評価関数は上述の通り式(3)で表される。

【0038】

20

次に、ステップ S 106において、学習制御特性評価関数算出部 10 は、評価関数値の極小値を取得したか否かを判断する。極小値を取得していない場合は、ステップ S 104 に戻って、学習制御特性評価関数算出部 10 は、式(3)の評価値が極小となるように、学習制御器 7 を構成する帯域制限フィルタ 5 及び動特性補償要素 6 の少なくとも一方の構成を変更し、評価関数の計算を継続する。一方、極小値を取得した場合は、処理を終了する。

【0039】

以上説明したように、本発明の一実施例に係るサーボ制御装置によれば、機械特性を含めて計測した学習制御器つきサーボ制御特性の最適化を行うことにより、オフライン計算での定量的な安定性評価と最適化が可能であるため、学習制御の調整における試行錯誤が不要となるという効果が得られる。

30

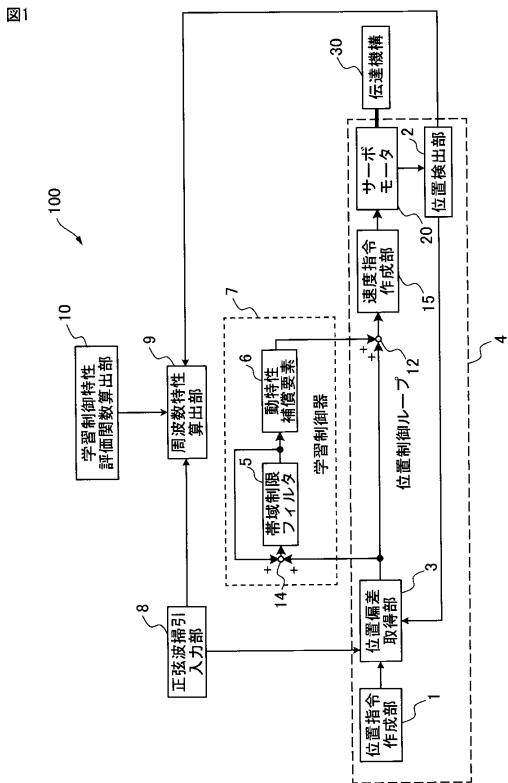
【符号の説明】

【0040】

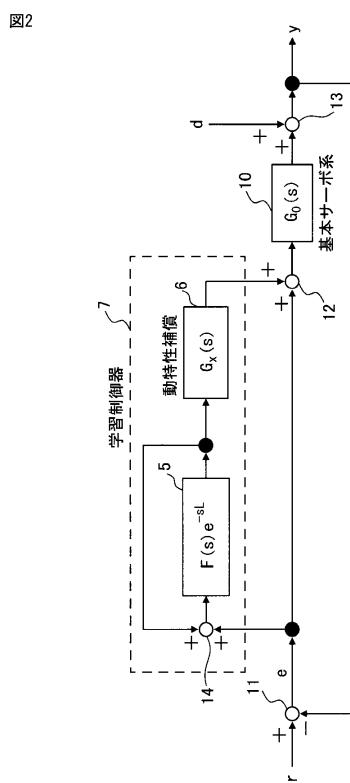
- 1 位置指令作成部
- 2 位置検出部
- 3 位置偏差取得部
- 4 位置制御ループ
- 5 帯域制限フィルタ
- 6 動特性補償要素
- 7 学習制御器
- 8 正弦波掃引入力部
- 9 周波数特性算出部
- 10 学習制御特性評価関数算出部

40

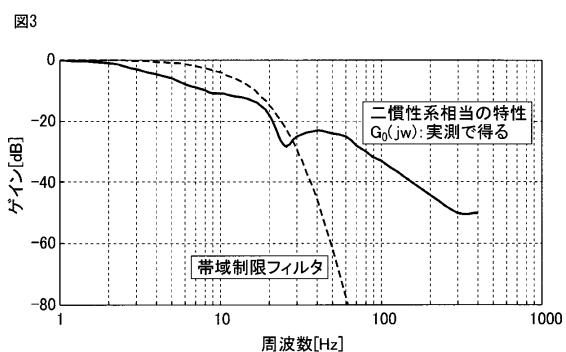
【図1】



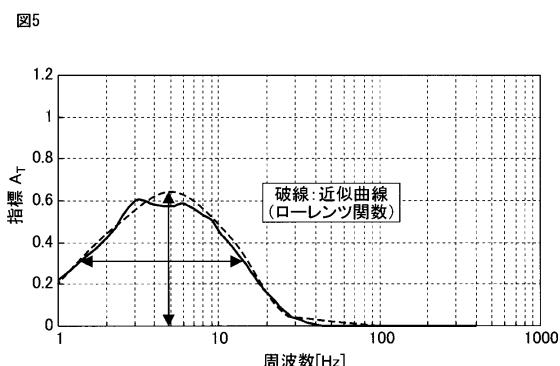
【図2】



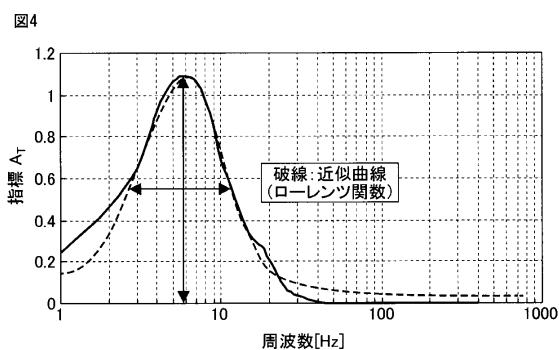
【図3】



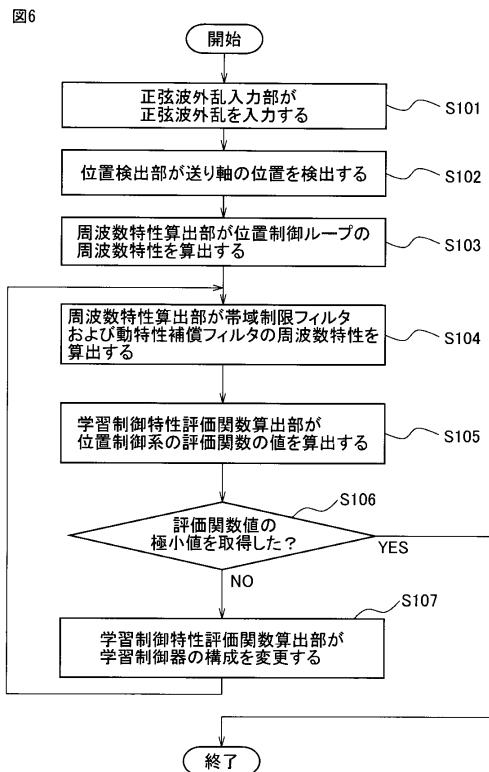
【図5】



【図4】



【図6】



フロントページの続き

審査官 山村 秀政

(56)参考文献 特開2006-215740(JP,A)

特開2013-203029(JP,A)

特開平05-035899(JP,A)

特開昭64-053210(JP,A)

特開2003-123294(JP,A)

特開平03-282717(JP,A)

特開2013-216030(JP,A)

再公表特許第2009/019953(JP,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 05 D 3 / 00

G 05 B 19 / 18