

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2012 年 4 月 26 日(26.04.2012)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2012/053352 A1

- (51) 国際特許分類:
G05B 19/404 (2006.01) G05B 13/04 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2011/072917
- (22) 国際出願日: 2011 年 10 月 5 日(05.10.2011)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2010-233249 2010 年 10 月 18 日(18.10.2010) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 三菱重工業株式会社(MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.) [JP/JP]; 〒1088215 東京都港区港南二丁目 1 6 番 5 号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 倉本 博久 (KURAMOTO Hirohisa) [JP/JP]; 〒1088215 東京都港区港南二丁目 1 6 番 5 号 三菱重工業株式会社内 Tokyo (JP). 山田 泰成 (YAMADA Yasunari) [JP/JP]; 〒1088215 東京都港区港南二丁目 1 6 番 5 号 三菱重工業株式会社内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 光石 俊郎, 外(MITSUSHI Toshiro et al.); 〒1070052 東京都港区赤坂一丁目 9 番 1 5 号 光石法律特許事務所 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[続葉有]

(54) Title: LOAD INERTIA ESTIMATION METHOD AND CONTROL PARAMETER ADJUSTMENT METHOD

(54) 発明の名称: 負荷イナーシャ推定方法及び制御パラメータ調整方法

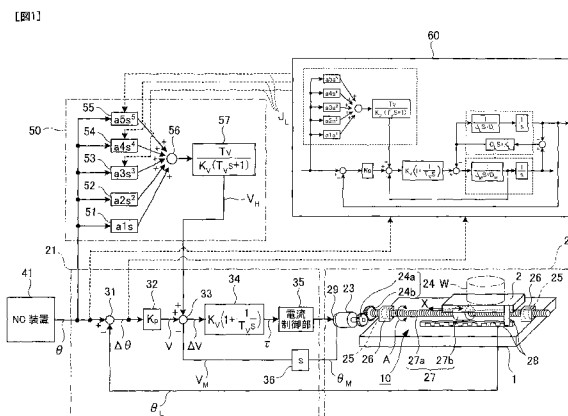


FIG. 1:
35 Current control unit
41 NC device

(57) Abstract: The purpose of the present invention is to provide a method for estimating load inertia and a method for adjusting control parameters. To achieve this aim, a load position control test is performed in a load position control system, based on a feedback control system (21) and a first position deviation ($\Delta\theta$) generated at a prescribed load position (θ_L) is estimated. Then, in a load inertia estimation model (60) which is a model of a load position control system, a load position control simulation of a feed system model is performed based on a feedback control system model, a load inertia (J_L) included in the feed system model is adjusted, and the load position control simulation repeated until a second position deviation ($\Delta\theta$) that generated at this time at the prescribed load position equals the first position deviation. As a result, the load inertia for the feed system model at that time is estimated to be the load inertia for a feed system in an actual machine if the second position deviation equals the first position deviation. In addition, coefficients (a_3 - a_5) for an inverse characteristic model (50) are set using this estimated load inertia.

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2012/053352 A1



添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

本発明は負荷イナーシャ推定方法及び制御パラメータ調整方法を提供することを目的とする。そのため、負荷位置制御システムにおいて、フィードバック制御系(21)による負荷位置制御試験を実施して、特定の負荷位置(θ_L)で生じる第 1 の位置偏差($\Delta\theta$)を測定し、負荷位置制御システムのモデルである負荷イナーシャ推定モデル(60)において、フィードバック制御系モデルによる送り系モデルの負荷位置制御シミュレーションを実施し、このときに特定の負荷位置で生じる第 2 の位置偏差($\Delta\theta$)が、第 1 の位置偏差に等しくなるまで、送り系モデルに含まれている負荷イナーシャ(J_L)を調整して前記負荷位置制御シミュレーションを繰り返し、その結果、第 2 の位置偏差が第 1 の位置偏差に等しくなれば、このときの送り系モデルの負荷イナーシャが実機の送り系の負荷イナーシャであると推定する。また、この推定した負荷イナーシャで逆特性モデル(50)の係数($a_3 \sim a_5$)を設定する。

明 細 書

発明の名称：

負荷イナーシャ推定方法及び制御パラメータ調整方法

技術分野

[0001] 本発明は工作機械などの産業機械に適用する負荷イナーシャ推定方法及び制御パラメータ調整方法に関する。

背景技術

[0002] 工作機械などの産業機械における送り系の負荷位置制御には、古典制御理論であるフィードバック制御が一般的に使用されている。

[0003] 図4には工作機械の一例を示す。図示例の工作機械は門形マシニングセンタであり、ベッド1と、テーブル2と、門形のコラム3と、クロスレール4と、サドル5と、ラム6と、主軸7とを有している。

[0004] ベッド1上にテーブル2が設置され、テーブル2を跨ぐようにしてコラム3が設置されている。テーブル2は加工時にワークWが載置され、送り系（図4では図示省略：図5参照）により、ベッド1上のガイドレール1aに沿ってX軸方向に直線移動する。クロスレール4は送り系（図示省略）により、コラム前面3aのガイドレール3bに沿ってZ軸方向に直線移動する。サドル5は送り系（図示省略）により、クロスレール前面4aのガイドレール4bに沿ってY軸方向に直線移動する。ラム6はサドル5に設けられ、送り系（図示省略）により、Z軸方向に直線移動する。主軸7はラム6内で回転可能に支持され、先端にアタッチメント8を介して工具9が装着される。

[0005] 従って、ワークWを工具9で加工する際、工具9は主軸7によって回転駆動され、主軸7及び工具9はクロスレール4又はラム6とともにZ軸方向に直線移動し、サドル5とともにY軸方向に直線移動し、テーブル2及びワークWはX方向に直線移動する。そして、このときにワークWを高精度に加工するため、主軸7（工具9）やテーブル2（ワークW）の移動位置は、フィードバック制御によって高精度に制御することが要求される。

- [0006] 図5にはフィードバック制御系及び送り系の一般的な構成例を示す。詳細な説明は省略するが、図5に示すテーブル2の送り系11は、サーボモータ12、減速ギヤ装置13、ブラケット14、ボールスクリュウ15（ネジ部15c、ナット部15b）などから構成されており、テーブル2及びワークWをX軸方向へ直線移動させる。この送り系11に対してフィードバック制御系16では、位置検出器6で検出されたテーブル2（ワークW）の位置である負荷位置 θ_L が、数値制御（NC）装置17から与えられる位置指令 θ に追従するようにサーボモータ12の回転を制御する。
- [0007] しかし、図示例のようなフィードバック制御系16では十分な追従性を得ることは難しく、位置指令 θ に対する負荷位置 θ_L の追従遅れ（即ち負荷位置の遅れ）が生じてしまう。従って、この追従遅れ（負荷位置の遅れ）に対処するため、図示は省略するが、位置指令 θ を微分して位置遅れ補償を行うフィードフォワード制御機能を、フィードバック制御系16に付加することも一般的に行われている。
- [0008] しかし、このようなフィードフォワード制御機能をフィードバック制御系に付加したとしても、制御対象の機械要素に発生する撓みや振じれなどの動的な変形によって生じる位置遅れや振動を補償することはできない。例えば図5の送り系11では、ボールスクリュウ15のネジ部15cの剛性は有限であり、テーブル2の移動時には負荷イナーシャ（ワーク重量）や負荷位置 θ_L に応じたネジ部15cの振じれや撓みなどが発生するが、これによって生じる負荷位置 θ_L の追従遅れを前記フィードフォワード制御機能で補償することはできない。
- [0009] そこで、下記の特許文献1には、送り系の特性を近似した特性モデル（伝達関数）を求め、この特性モデルの逆特性モデル（逆伝達関数）を求めて、この逆特性モデルをフィードバック制御系に付加することにより、送り系のボールスクリュウの振じれや撓みなどによって生じる負荷位置の遅れや速度の遅れを補償する技術が開示されている（図1，図2参照：詳細後述）。なお、制御対象の逆特性モデルを制御系に付加する技術としては、下記の特許

文献 2, 3 に開示されているものなどもある。

先行技術文献

特許文献

[0010] 特許文献1：特開 2 0 0 9 - 2 0 1 1 6 9 号公報

特許文献2：特許第 3 3 5 1 9 9 0 号公報

特許文献3：特許第 3 7 3 9 7 4 6 号公報

特許文献4：特許第 4 1 3 7 6 7 3 号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0011] しかしながら、図 5 において、テーブル 2 の重量は一定であるが、ワーク W の重量は加工製品の種類などによって異なるため、テーブル 2 の重量とワーク W の重量によって決まる負荷イナーシャも、ワーク W の重量が変化するのでともなって変化する。

[0012] 従って、送り系の逆特性モデル（逆伝達関数）に含まれている負荷イナーシャを常に一定値にすると、前記一定値とは異なる重量のワーク W をテーブル 2 に載置して加工をする際には、送り系の逆特性モデルに含まれている負荷イナーシャと、送り系の実際の負荷イナーシャとが異なってしまう。このため、前記送り系の逆特性モデルがフィードバック制御系に付加されていても、前記一定値とは異なる重量のワーク W を加工する際には、ボールスクリー 1 5 の振じれや撓みなどによって発生する負荷位置 θ_L の追従遅れを逆特性モデルによって十分に補償することができず、位置指令 θ と負荷位置 θ_L との位置偏差が大きくなってしまうため、当該ワーク W を高精度に加工することができない。

[0013] このため、送り系の逆特性モデルを付加したフィードバック制御系において、どのような重量のワーク W に対しても高精度な加工を行うことができるようにするためには、ワーク W の重量に対応する負荷イナーシャを推定し、この推定した負荷イナーシャにより、送り系の逆特性モデルに含まれている

負荷イナーシャを調整する必要がある。

[0014] 従って本発明は上記の事情に鑑み、ワーク重量に対応する負荷イナーシャを推定する負荷イナーシャ推定方法、及び、この推定した負荷イナーシャにより、送り系の逆特性モデルに含まれている負荷イナーシャを調整する制御パラメータ調整方法を提供することを課題とする。

なお、上記の特許文献4には無負荷時と負荷時のモータのトルク差から負荷重量を算出する方法が記載されているが、本発明の方法は位置偏差などに基づいて負荷イナーシャを推定するものである。

課題を解決するための手段

[0015] 上記課題を解決する第1発明の負荷イナーシャ推定方法は、送り系の逆特性モデルを付加したフィードバック制御系により、前記逆特性モデルから出力される前記送り系の動的な誤差要因を補償するための補償量に基づいて、前記送り系の負荷位置を制御する負荷位置制御システムに対し、前記送り系の負荷イナーシャを推定する方法であって、

前記負荷位置制御システムにおいて、前記フィードバック制御系に位置指令を与えることにより、前記フィードバック制御系による負荷位置制御試験を実施し、このときに特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置との位置偏差を測定し、

前記負荷位置制御システムのモデルである負荷イナーシャ推定モデルにおいて、前記フィードバック制御系のモデルに前記位置指令を与えることにより、前記フィードバック制御系のモデルによる前記送り系のモデルの負荷位置制御シミュレーションを実施し、且つ、前記負荷位置制御シミュレーションにおいて前記特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置の位置偏差が、前記負荷位置制御試験で測定した前記位置偏差に等しくなるまで、前記送り系のモデルに含まれている負荷イナーシャを調整して前記負荷位置制御シミュレーションを繰り返し、その結果、前記負荷位置制御シミュレーションにおいて前記特定の負荷位置で生じる前記位置偏差が、前記負荷位置制御試験で測定した前記位置偏差に等しくなれば、このときの前記送り系のモデ

ルに含まれている負荷イナーシャが、前記送り系の負荷イナーシャであると推定すること、
を特徴とする。

[0016] また、第2発明の負荷イナーシャ推定方法は、送り系の逆特性モデルを付加したフィードバック制御系により、前記逆特性モデルから出力される前記送り系の動的な誤差要因を補償するための補償量に基づいて、前記送り系の負荷位置を制御する負荷位置制御システムに対し、前記送り系の負荷イナーシャを推定する方法であって、

前記負荷位置制御システムにおいて、前記フィードバック制御系に位置指令を与えることにより、前記フィードバック制御系による負荷位置制御試験を実施し、このときに特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置との位置偏差を測定し、

又は、前記負荷位置制御システムのモデルにおいて、前記フィードバック制御系のモデルに前記位置指令を与えることにより、前記フィードバック制御系のモデルによる前記送り系のモデルの負荷位置制御シミュレーションを実施し、このときに特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置の位置偏差を測定し、

予め測定された無負荷時に前記特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置の位置偏差と、負荷時に前記特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置の位置偏差とに基づいて予め設定されている、負荷イナーシャの増加に比例して位置偏差がリニアに増加する位置偏差特性データに基づいて、前記負荷位置制御試験又は前記負荷位置制御シミュレーションにより測定した前記位置偏差に対応する負荷イナーシャを求め、この負荷イナーシャが前記送り系の負荷イナーシャであると推定すること、
を特徴とする。

[0017] また、第3発明の制御パラメータ調整方法は、送り系の逆特性モデルを付加したフィードバック制御系により、前記逆特性モデルから出力される前記送り系の動的な誤差要因を補償するための補償量に基づいて、前記送り系の

負荷位置を制御する負荷位置制御システムに対し、前記逆特性モデルに含まれている負荷イナーシャを調整する制御パラメータ調整方法であって、

第1又は第2発明の負荷イナーシャ推定方法で推定された負荷イナーシャに基づいて、前記逆特性モデルに含まれている負荷イナーシャを調整することを特徴とする。

発明の効果

[0018] 第1発明の負荷イナーシャ推定方法によれば、送り系の逆特性モデルを付加したフィードバック制御系により、前記逆特性モデルから出力される前記送り系の動的な誤差要因を補償するための補償量に基づいて、前記送り系の負荷位置を制御する負荷位置制御システムに対し、前記送り系の負荷イナーシャを推定する方法であって、前記負荷位置制御システムにおいて、前記フィードバック制御系に位置指令を与えることにより、前記フィードバック制御系による負荷位置制御試験を実施し、このときに特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置との位置偏差を測定し、前記負荷位置制御システムのモデルである負荷イナーシャ推定モデルにおいて、前記フィードバック制御系のモデルに前記位置指令を与えることにより、前記フィードバック制御系のモデルによる前記送り系のモデルの負荷位置制御シミュレーションを実施し、且つ、前記負荷位置制御シミュレーションにおいて前記特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置の位置偏差が、前記負荷位置制御試験で測定した前記位置偏差に等しくなるまで、前記送り系のモデルに含まれている負荷イナーシャを調整して前記負荷位置制御シミュレーションを繰り返し、その結果、前記負荷位置制御シミュレーションにおいて前記特定の負荷位置で生じる前記位置偏差が、前記負荷位置制御試験で測定した前記位置偏差に等しくなれば、このときの前記送り系のモデルに含まれている負荷イナーシャが、前記送り系の負荷イナーシャであると推定することを特徴としているため、送り系の負荷重量（例えば工作機械のテーブルに載置されるワークの重量）が変化しても、当該負荷重量に応じた負荷イナーシャを容易に推定することができる。

[0019] 第2発明の負荷イナーシャ推定方法によれば、送り系の逆特性モデルを付加したフィードバック制御系により、前記逆特性モデルから出力される前記送り系の動的な誤差要因を補償するための補償量に基づいて、前記送り系の負荷位置を制御する負荷位置制御システムに対し、前記送り系の負荷イナーシャを推定する方法であって、前記負荷位置制御システムにおいて、前記フィードバック制御系に位置指令を与えることにより、前記フィードバック制御系による負荷位置制御試験を実施し、このときに特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置との位置偏差を測定し、又は、前記負荷位置制御システムのモデルにおいて、前記フィードバック制御系のモデルに前記位置指令を与えることにより、前記フィードバック制御系のモデルによる前記送り系のモデルの負荷位置制御シミュレーションを実施し、このときに特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置の位置偏差を測定し、予め測定された無負荷時に前記特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置の位置偏差と、負荷時に前記特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置の位置偏差とに基づいて予め設定されている、負荷イナーシャの増加に比例して位置偏差がリニアに増加する位置偏差特性データに基づいて、前記負荷位置制御試験又は前記負荷位置制御シミュレーションにより測定した前記位置偏差に対応する負荷イナーシャを求め、この負荷イナーシャが前記送り系の負荷イナーシャであると推定することを特徴としているため、送り系の負荷重量（例えば工作機械のテーブルに載置されるワークの重量）が変化しても、当該負荷重量に応じた負荷イナーシャを容易に推定することができる。

[0020] 第3発明の制御パラメータ調整方法によれば、送り系の逆特性モデルを付加したフィードバック制御系により、前記逆特性モデルから出力される前記送り系の動的な誤差要因を補償するための補償量に基づいて、前記送り系の負荷位置を制御する負荷位置制御システムに対し、前記逆特性モデルに含まれている負荷イナーシャを調整する制御パラメータ調整方法であって、第1又は第2発明の負荷イナーシャ推定方法で推定された負荷イナーシャに基づいて、前記逆特性モデルに含まれている負荷イナーシャを調整することを特

徴としているため、送り系の負荷重量（例えば工作機械のテーブルに載置されるワークの重量）が変化しても、送り系のパラメータと逆特性モデルのパラメータ（例えば負荷イナーシャの項を含んでいる３次微分項以上の係数（詳細後述）など）を一致させることができる。このため、高精度に負荷位置を制御して位置指令に追従させることができ、例えば工作機械では高精度な加工を行うことができる。

図面の簡単な説明

[0021] [図1]本発明の実施の形態例１に係る負荷イナーシャ推定方法及び制御パラメータ調整方法を実施する負荷位置制御システムの構成を示す図である。

[図2]負荷イナーシャ推定モデルの構成を示す図である。

[図3]本発明の実施の形態例２に係る負荷イナーシャ推定方法及び制御パラメータ調整方法を実施する負荷位置制御システムの構成を示す図である。

[図4]従来の工作機械の構成を示す図である。

[図5]従来の負荷位置制御システム（フィードバック制御系及びテーブル送り系）の構成を示す図である。

発明を実施するための形態

[0022] 以下、本発明の実施の形態例を図面に基づいて詳細に説明する。

[0023] <実施の形態例１>

（フィードバック制御系及び送り系の説明）

図１に基づいて、まず、本発明の実施の形態例に係る負荷イナーシャ推定方法及び制御パラメータ調整方法を実施する工作機械（図４参照）の負荷位置制御システム（フィードバック制御系２１及び送り系２２）の構成について説明する。

[0024] 図１に示すように、テーブル送り系２２は駆動源であるサーボモータ２３と、モータ側ギヤ２４ａと負荷側ギヤ２４ｂとを有する減速ギヤ装置２４と、ベアリング２５を内蔵したブラケット２６と、ネジ部２７ａとナット部２７ｂとを有するボールスクリュウ２７と、位置検出器２８と、パルスエンコーダ２９とを備えている。

[0025] 両側のブラケット 26 はベッド 1 に固定され、ベアリング 25 を介してボールスクリュウ 27 のネジ部 27 a を回転可能に支持している。ボールスクリュウ 27 のナット部 27 b はテーブル 2 に取り付けられ、ネジ部 27 a に螺合している。サーボモータ 23 は減速ギヤ装置 24 を介してボールスクリュウ 27 のネジ部 27 a に連結されている。テーブル 2 にはワーク W が設置される。また、テーブル 2 には位置検出器（図示例ではインダクトシン方式のリニアスケール）28 が取り付けられ、サーボモータ 23 にはパルスエンコーダ 29 が取り付けられている。

[0026] 従って、サーボモータ 23 の回転力が減速ギヤ装置 24 を介してボールスクリュウ 27 のネジ部 27 a へ伝達されてネジ部 27 a が矢印 A の如く回転すると、ボールスクリュウ 27 のナット部 27 b とともにテーブル 2 が X 軸方向に直線移動する。このとき、位置検出器 28 はテーブル 2（ワーク W）の移動位置である負荷位置 θ_L を検出し、この負荷位置 θ_L の検出信号をフィードバック制御系 21 へ送る（位置フィードバック）。パルスエンコーダ 29 はサーボモータ 23 の回転位置であるモータ位置 θ_M を検出する。このモータ位置 θ_M の検出信号はフィードバック制御系 21 へ送られ、微分演算部 36 で時間微分されることにより、サーボモータ 23 の回転速度であるモータ速度 V_M となる（速度フィードバック）。

[0027] フィードバック制御系 21 は例えばパーソナルコンピュータで実行されるソフトウェアによって構成されるものであり、位置偏差演算部 31 と、乗算部 32 と、速度偏差演算部 33 と、比例積分演算部 34 と、電流制御部 35 と、微分演算部 36 とを有している。

[0028] また、フィードバック制御系 21 には、テーブル 2 の送り系 22 の逆特性モデル 50 が付加されている。詳細は後述するが、逆特性モデル 50 は、送り系 22 の特性を近似した特性モデル（伝達関数）の逆特性モデル（逆伝達関数）であり、送り系 22 のボールスクリュウ 27（ネジ部 27 a）の振じれや撓みなどによって生じる負荷位置 θ_L の遅れや速度の遅れを補償するためのものである（図 2 参照：詳細後述）。なお、図 1 中の s はラプラス演算子

であり、 s は 1 次微分、 s^2 は 2 次微分、 s^3 は 3 次微分、 s^4 は 4 次微分、 s^5 は 5 次微分、 $1/s$ は積分を表している（このことは図 2 及び図 3 においても同様である）。

[0029] フィードバック制御 21 の位置偏差演算部 31 では、負荷位置 θ_L を制御するために数値制御（NC）装置 41 から与えられる位置指令 θ と、負荷位置 θ_L との偏差（ $\theta - \theta_L$ ）を演算して、位置偏差 $\Delta\theta$ を求める。乗算部 32 では、位置偏差 $\Delta\theta$ に位置ループゲイン K_p を乗算することにより、サーボモータ 23 の回転速度を制御するためのモータ速度指令 V を求める。そして、速度偏差演算部 33 では、逆特性モデル 5 から出力される速度の補償量 V_H をモータ速度指令 V に加算（ $V + V_H$ ）した値と、モータ速度 V_M との偏差（ $V + V_H - V_M$ ）を演算して、速度偏差 ΔV を求める。

[0030] 比例積分演算部 34 では、速度ループゲイン K_v と積分時定数 T_v を用いて、 $\tau = \Delta V \times (K_v (1 + 1 / (T_v s)))$ の比例積分演算を行うことにより、サーボモータ 23 に対するモータトルク指令 τ を求める。電流制御部 35 では、サーボモータ 23 で発生するトルクがモータトルク指令 τ に追従するようにサーボモータ 23 へ供給する電流を制御する。なお、図示は省略するが、電流制御部 35 ではモータ 23 への供給電流がモータトルク指令 τ に応じた電流となるように電流のフィードバック制御を行っている。

[0031] このようにフィードバック制御系 21 では位置ループをメインループとし、速度ループ及び電流ループをマイナーループとした 3 重のループによってフィードバック制御を行うことにより、負荷位置 θ_L が位置指令 θ に追従するように制御している。

[0032] （負荷イナーシャ推定モデルの説明）

そして更に本実施の形態例 1 では、ワーク W の重量に応じた負荷イナーシャ J_L を推定するためのモデル 60 が、フィードバック制御系 21 に付加されている。図 2 に基づき、この負荷イナーシャ推定モデル 60 について説明する。なお、図 2 において図 1 と同様の部分には同一の符号を付し、重複する詳細な説明は省略する。

- [0033] 図2に示す例では、送り系22の特性を近似した特性モデル（伝達関数）を、サーボモータ23と、その負荷であるテーブル2及びワークWを質点とした2質点系の機械系モデルとして特定している。そして、負荷イナーシャ推定モデル60は、この送り系22の特性モデル（伝達関数）と、この特性モデルの逆特性モデル（逆伝達関数）50と、フィードバック制御系21のモデル（伝達関数）とを有して成るものである。
- [0034] 図2に示すように、サーボモータ23の特性モデルを伝達関数で示すと、ブロック62の伝達関数 $(1 / (J_M s + D_M))$ と、ブロック63の伝達関数 $(1 / s)$ とで示される。 J_M はモータイナーシャ、 D_M はモータ粘性である。ブロック62からはモータ速度 V_M が出力され、ブロック63からはモータ位置 θ_M が出力される。
- [0035] ボールスクリュー27を含めたテーブル2の特性モデルを伝達関数で示すと、ブロック64の伝達関数 $(C_L s + K_L)$ と、ブロック65の伝達関数 $(1 / (J_L s + D_L))$ と、ブロック66の伝達関数 $(1 / s)$ とで示される。 J_L は負荷イナーシャであり、テーブル2の重量（一定値）と、テーブル2に載置されたワークWの重量とによって決まるイナーシャである。従って、テーブル2に載置するワークWの重量が変化すると、これに応じて負荷イナーシャ J_L も変化する。 D_L は負荷（テーブル）の粘性、 C_L はボールスクリュー27部分（ネジ部27a、ナット部27b、ブラケット26）の軸方向に沿うバネ粘性、 K_L はボールスクリュー27部分（ネジ部27a、ナット部27b、ブラケット26）の軸方向に沿うバネ剛性である。
- [0036] 位置偏差演算部67では、モータ位置 θ_M と負荷位置 θ_L との偏差 $(\theta_M - \theta_L)$ を演算して、位置偏差 $\Delta \theta_{ML}$ を求める。ブロック64では、位置偏差 $\Delta \theta_{ML}$ が入力されると、 $\tau_L = \Delta \theta_{ML} \times (C_L s + K_L)$ の演算を行うことにより、反力トルク τ_L を求めて出力する。反力トルク τ_L がブロック65に入力されると、ブロック65及びブロック66で $\theta_L = \tau_L \times (1 / (J_L s + D_L)) \times (1 / s)$ の演算を行うことにより、負荷位置 θ_L を求めて、ブロック66から出力する。

- [0037] トルク偏差演算部 6 1 では、トルク指令 τ と反力トルク τ_L との偏差 ($\tau - \tau_L$) を演算して、トルク偏差 $\Delta \tau$ を求める。ブロック 6 2 では $V_M = \Delta \tau \times (1 / (J_M s + D_M))$ の演算を行うことにより、モータ速度 V_M を求め、このモータ速度 V_M がブロック 6 3 へ出力され、且つ、フィードバック制御系 2 1 の速度偏差演算部 3 3 へフィードバックされる。ブロック 6 3 では $\theta_M = V_M \times (1 / s)$ の演算を行うことにより、モータ位置 θ_M を求め、このモータ位置 θ_M が位置偏差演算部 6 7 へ出力される。負荷位置 θ_L はフィードバック制御系 2 1 の位置偏差演算部 3 1 へフィードバックされる。
- [0038] 逆特性モデル 5 0 は、1 次微分項演算部 5 1 と、2 次微分項演算部 5 2 と、3 次微分項演算部 5 3 と、4 次微分項演算部 5 4 と、5 次微分項演算部 5 5 と、加算部 5 6 と、比例積分逆伝達関数部 5 7 とを有している。
- [0039] 各微分項演算部 5 1 ～ 5 5 と加算部 5 6 には、送り系 2 2 のサーボモータ 2 3、ボールスクリュウ 2 7 及びテーブル 2 での動的な誤差要因を補償して、負荷位置 θ_L が位置指令 θ に一致（追従）するように補償制御をするための補償制御用伝達関数が設定されている。この補償制御用伝達関数は、前述の送り系 2 2（サーボモータ 2 3、ボールスクリュウ 2 7 及びテーブル 2 からなる機械系）の伝達関数の逆伝達関数である。なお、この逆伝達関数は、演算要素を一部省略した関数にしている。
- [0040] 具体的には、逆特性モデル 5 0 の各微分項演算部 5 1 ～ 5 5 では、各演算項 $a_1 s$, $a_2 s^2$, $a_3 s^3$, $a_4 s^4$, $a_5 s^5$ をそれぞれ有しており、位置指令 θ に各演算項 $a_1 s \sim a_5 s^5$ をそれぞれ乗算し、この乗算値を加算部 5 6 でそれぞれ出力する。加算部 5 6 では、各微分項演算部 5 1 ～ 5 5 から出力された各乗算値を加算する。
- [0041] 各演算項 $a_1 s \sim a_5 s^5$ における各係数 a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 は下記のように設定している。前述のとおり、各係数 $a_1 \sim a_5$ の式に含まれている K_v は速度ループゲイン、 K_L はボールスクリュウ 2 7 の軸方向に沿うバネ剛性、 T_v は積分時定数、 D_M はサーボモータ 2 3 の粘性、 D_L は負荷粘性、 J_M はサーボモータ 2 3 のイナーシャ、 J_L は負荷イナーシャである。

なお、各係数 $a_1 \sim a_5$ を下記のように設定（演算）する演算手法については、後述する。

[数1]

$$a_1 = \frac{K_v}{T_v}$$

$$a_2 = D_M + D_L + K_v + \frac{K_v D_L}{T_v K_L}$$

$$a_3 = J_M + J_L + \frac{D_M D_L + K_v D_L}{K_L} + \frac{K_v J_L}{T_v K_L}$$

$$a_4 = \frac{J_M D_L + J_L D_M + K_v J_L}{K_L}$$

$$a_5 = \frac{J_M J_L}{K_L}$$

[0042] 比例積分逆伝達関数部 57 には、比例積分演算部 34 の伝達関数 $K_v (1 + 1 / (T_v s))$ の逆伝達関数 $(T_v / K_v (T_v s + 1)) \times s$ のうちの $(T_v / K_v (T_v s + 1)) \times s$ のうちの微分演算子 s は、各微分項演算部 51～55 の各演算項 $a_1 s \sim a_5 s^5$ にそれぞれ割り振られている。

[0043] そして、このような係数 $a_1 \sim a_5$ が設定された逆特性モデル 50 から出力される速度補償量 V_H をフィードバック制御系 21 に適用して、送り系 22 の負荷位置制御を実施することにより、送り系 22 のサーボモータ 23、ボールスクリー 27、テーブル 2 などに生じる歪み、撓み、粘性などの誤差要因を補償することができるため、高精度に負荷位置 θ_L を制御して位置指令 θ に追従させることができる。その結果、高精度な加工を行うことができる。

[0044] （負荷イナーシャ推定方法及び制御パラメータ調整方法の説明）

[0045] しかしながら、テーブル 2 に載置されるワーク W の重量が変化すると（重量の異なるワーク W がテーブル 2 に載置されると）、当該ワーク W の重量の変化に応じて負荷イナーシャ J_L も変化するため、送り系 22 のパラメータと逆特性モデル 50 のパラメータが一致しなくなる。具体的には、逆特性モデ

ル50において、負荷イナーシャ J_L の項を含んでいる3次微分項以上（即ち $a_1 s^3 \sim a_5 s^5$ の項）の係数 $a_3 \sim a_5$ が、送り系22のパラメータと不一致となる。従って、このままでは位置偏差 $\Delta \theta$ が増加して、位置指令 θ に対する負荷位置 θ_L の追従遅が生じてしまう。

[0046] そこで、ワークWの加工を行う前に次のような方法により、ワークWの重量に応じた負荷イナーシャ J_L を推定する。

[0047] まず、図1に示す実機の負荷位置制御システム（フィードバック制御系21及び送り系22）において、テーブル2にワークWを載置した状態で、NC装置41からフィードバック制御系21へ位置指令 θ （X軸方向への移動指令）を与えることにより、このフィードバック制御系21による送り系22の負荷位置制御試験を実施する。そして、このときに生じる位置偏差 $\Delta \theta$ を測定する。但し、バネ剛性 K_L が負荷位置 θ_L によって変化するため、テーブル2が特定（予め定めておいた）の負荷位置 θ_L に達した時点（即ち特定のバネ剛性 K_L となる負荷位置 θ_L に達した時点）において生じる位置偏差 $\Delta \theta$ を測定する。

[0048] 次に、図1及び図2に示す前記負荷位置制御システムのモデルである負荷イナーシャ推定モデル60において、テーブル2に前記ワークWを載置した状態で、NC装置41からフィードバック制御系21のモデルへ前記位置指令 θ （X軸方向への移動指令）を与えることにより、このフィードバック制御系21のモデルによる送り系22のモデルの負荷位置制御シミュレーションを実施する。

[0049] その際、前記負荷位置制御シミュレーションにおいて生じる位置偏差 $\Delta \theta$ が、前記実機による負荷位置制御試験で測定した位置偏差 $\Delta \theta$ に等しくなるまで、送り系22のモデルに含まれているテーブル2及びワークWの負荷イナーシャ J_L を調整して、前記負荷位置制御シミュレーションを繰り返す。

[0050] 但し、前述のとおり、バネ剛性 K_L が負荷位置 θ_L によって変化するため、テーブル2が前記特定の負荷位置 θ_L に達した時点（即ち前記特定のバネ剛性 K_L となる負荷位置 θ_L に達した時点）において生じる位置偏差 $\Delta \theta$ と、前記実機

による負荷位置制御試験で測定した位置偏差 $\Delta\theta$ とを比較して、両者が等しくなったか否かを推定する。また、前記実機による負荷位置制御試験を行うときの逆特性モデル50における負荷イナーシャ J_L と、前記負荷位置制御シミュレーションを行うときの逆特性モデル50における負荷イナーシャ J_L は同じ値に設定する。例えば、これらはテーブル2にワークWを載置しない無負荷時の負荷イナーシャ J_{L0} とする。

[0051] そして、送り系22のモデルに含まれている負荷イナーシャ J_L を調整して、前記負荷位置制御シミュレーションを繰り返した結果、前記負荷位置制御シミュレーションにおいて生じる位置偏差 $\Delta\theta$ が、前記実機による負荷位置制御試験で測定した位置偏差 $\Delta\theta$ に等しくなれば、このときの送り系22のモデルに含まれている負荷イナーシャ J_L が、実際のテーブル2に載置したワークWの重量に対応した負荷イナーシャ J_L であると推定する。

[0052] 次に、この推定した負荷イナーシャ J_L を、図1に示すように負荷イナーシャ推定モデル60から、実機の逆特性モデル50へ出力する。実機の逆特性モデル50では、負荷イナーシャ推定モデル60から出力された負荷イナーシャ J_L に基づいて、負荷イナーシャ J_L の項を含んでいる3次微分項以上の係数 $a_3 \sim a_5$ を調整（設定）する。かくして、送り系22のパラメータと逆特性モデル50のパラメータ（負荷イナーシャ J_L の項を含んでいる3次微分項以上の係数 $a_3 \sim a_5$ ）が一致する。このため、当該ワークWの加工を行う際には、高精度に負荷位置 θ_L を制御して位置指令 θ に追従させることができ、高精度な加工を行うことができる。

[0053] （作用効果）

以上のように、本実施の形態例1の負荷イナーシャ推定方法によれば、送り系22の逆特性モデル50を付加したフィードバック制御系21により、逆特性モデル50から出力される送り系22の動的な誤差要因を補償するための補償量 V_H に基づいて、送り系22の負荷位置 θ_L を制御する負荷位置制御システムに対し、送り系22の負荷イナーシャ J_L を推定する方法であって、前記負荷位置制御システムにおいて、フィードバック制御系21に位置指令

θ を与えることにより、フィードバック制御系 21 による負荷位置制御試験を実施し、このときに特定の負荷位置 θ_L で生じる位置偏差 $\Delta\theta$ を測定し、前記負荷位置制御システムのモデルである負荷イナーシャ推定モデル 60 において、フィードバック制御系 21 のモデルに前記位置指令 θ を与えることにより、フィードバック制御系 21 のモデルによる送り系 22 のモデルの負荷位置制御シミュレーションを実施し、且つ、前記負荷位置制御シミュレーションにおいて前記特定の負荷位置 θ_L で生じる位置偏差 $\Delta\theta$ が、前記負荷位置制御試験で測定した位置偏差 $\Delta\theta$ に等しくなるまで、送り系 22 のモデルに含まれている負荷イナーシャ J_L を調整して前記負荷位置制御シミュレーションを繰り返し、その結果、前記負荷位置制御シミュレーションにおいて前記特定の負荷位置 θ_L で生じる位置偏差 $\Delta\theta$ が、前記負荷位置制御試験で測定した位置偏差 $\Delta\theta$ に等しくなれば、このときの送り系 22 のモデルに含まれている負荷イナーシャ J_L が、実機の送り系 22 の負荷イナーシャ J_L であると推定することを特徴としているため、送り系 22 の負荷重量（テーブル 2 に載置されるワーク W の重量）が変化しても、当該負荷重量に応じた負荷イナーシャ J_L を容易に推定することができる。

[0054] そして、本実施の形態例 1 の制御パラメータ調整方法によれば、前記負荷イナーシャ推定方法で推定された負荷イナーシャ J_L に基づいて、実機の逆特性モデル 50 に含まれている負荷イナーシャ J_L を調整することを特徴としているため、送り系 22 の負荷重量（テーブル 2 に載置されるワーク W の重量）が変化しても、送り系 22 のパラメータと逆特性モデル 50 のパラメータ（負荷イナーシャ J_L の項を含んでいる 3 次微分項以上の係数 $a_3 \sim a_5$ ）を一致させることができる。このため、高精度に負荷位置 θ_L を制御して位置指令 θ に追従させることができ、高精度な加工を行うことができる。

[0055] <実施の形態例 2>

（負荷イナーシャ推定方法及び制御パラメータ調整方法の説明）

図 3 に基づき、本発明の実施の形態例 2 に係る負荷イナーシャ推定方法及び制御パラメータ調整方法について説明する。なお、図 3 において、上記実

施の形態例 1 と同様の部分には同一の符号を付し、重複する詳細な説明は省略する。

[0056] 図 3 に示すように、本実施の形態例 2 では、ワーク W の重量に応じた負荷イナーシャ J_L を推定するための位置偏差特性データ部 70 が、フィードバック制御系 21 に付加されている。

[0057] 位置偏差 $\Delta\theta$ （即ちボールスクリュウ 27 の撓みなど）とワーク W の重量との間には、 $F = m a = K_L \Delta\theta$ （ F ：力、 m ：ワーク重量、 K_L ：ボールスクリュウのバネ剛性、 $\Delta\theta$ ：位置偏差）の関係式が成り立ち、力 F とバネ剛性 K_L を一定にすれば、位置偏差 $\Delta\theta$ はワーク W の重量の増加に比例してリニアに増加すると考えられる。

また、逆特性モデル 50 における 3 次微分以上の項（ $a_3 s^3 \sim a_5 s^5$ ）については、負荷イナーシャ J_L に比例して補償量が決定されており、テーブル 2 に載置するワーク W の重量の増加に比例して位置偏差 $\Delta\theta$ がリニアに増加すると考えることができる。

従って、テーブル 2 にワーク W を載置しない無負荷時の負荷イナーシャ J_{L0} における位置偏差 $\Delta\theta$ と、想定される最大重量のワーク W をテーブル 2 に載置した最大負荷時の負荷イナーシャ J_L における位置偏差 $\Delta\theta$ のデータがあれば、このデータから、未知の重量のワーク W をテーブル 2 に載置したときの負荷イナーシャ J_L を推定することができる。

[0058] そこで、図 3 に示す実機の負荷位置制御システム（フィードバック制御系 21 及び送り系 22）において、前記無負荷時の場合と前記最大負荷時実施の場合に対し、NC 装置 41 からフィードバック制御系 21 へ位置指令 θ （X 軸方向への移動指令）を与えることにより、このフィードバック制御系 21 による送り系 22 の負荷位置制御試験を実施する。そして、前記無負荷時において生じる位置偏差 $\Delta\theta_{L0}$ と、最大負荷時において生じる位置偏差 $\Delta\theta_{LM}$ とを測定する。

[0059] 或いは、図 2 に示すような負荷位置制御システムのモデルを用いて、前記無負荷時の場合と前記最大負荷時実施の場合に対し、フィードバック制御系

21のモデルへ前記位置指令 θ （X軸方向への移動指令）を与えることにより、このフィードバック制御系21のモデルによる送り系22のモデルの負荷位置制御シミュレーションを実施する。そして、前記無負荷時において生じる位置偏差 $\Delta\theta_{L0}$ と、前記最大負荷時において生じる位置偏差 $\Delta\theta_{LM}$ とを測定する。

[0060] なお、前述のとおり、バネ剛性 K_L が負荷位置 θ_L によって変化するため、テーブル2が特定（予め定めておいた）の負荷位置 θ_L に達した時点（即ち特定のバネ剛性 K_L となる負荷位置 θ_L に達した時点）において生じる位置偏差 $\Delta\theta_{L0}$ 、 $\Delta\theta_{LM}$ を測定する。

また、前記無負荷時の位置偏差 $\Delta\theta_{L0}$ を基準とすため、逆特性モデル50における負荷イナーシャ J_L は、前記無負荷時の負荷イナーシャ J_{L0} とする。従って、前記無負荷時の位置偏差 $\Delta\theta_{L0}$ は、ほぼ0となる。

[0061] 位置偏差特性データ部70には、この予め測定された前記無負荷時の位置偏差 $\Delta\theta_{L0}$ と、前記最大負荷時の位置偏差 $\Delta\theta_{LM}$ とに基づいて、負荷イナーシャ J_L の増加に比例してリニアに増加する位置偏差特性データ ΔV_D を設定する。

[0062] そして、ワークWの加工を行う前に次のような方法により、ワークWの重量に応じた負荷イナーシャ J_L を推定する。

[0063] まず、図3に示す実機の負荷位置制御システム（フィードバック制御系21及び送り系22）において、テーブル2にワークWを載置した状態で、NC装置41からフィードバック制御系21へ位置指令 θ （X軸方向への移動指令）を与えることにより、このフィードバック制御系21による送り系22の負荷位置制御試験を実施する。

[0064] そして、位置偏差特性データ部70では、このときに生じる位置偏差 $\Delta\theta$ （図示例では $\Delta\theta_1$ ）を測定（入力）する。但し、前述のとおり、バネ剛性 K_L が負荷位置 θ_L によって変化するため、位置偏差特性データ部70では、テーブル2が特定（予め定めておいた）の負荷位置 θ_L に達した時点（即ち特定のバネ剛性 K_L となる負荷位置 θ_L に達した時点）において生じた位置偏差 $\Delta\theta$ （

図示例では $\Delta \theta_1$) を測定 (入力) する。

[0065] 次に、位置偏差特性データ部 70 では、予め設定されている位置偏差特性データ ΔV_D に基づいて、前記実機の負荷位置制御試験又は前記負荷位置制御シミュレーションにより測定 (入力) した位置偏差 $\Delta \theta$ (図示例では $\Delta \theta_1$) に対応する負荷イナーシャ J_L (図示例では J_{L1}) を求め、この負荷イナーシャ J_L (図示例では J_{L1}) が、実際にテーブル 2 に載置したワーク W の重量に対応する負荷イナーシャ J_L であると推定する。この推定された負荷イナーシャ J_L は位置偏差特性データ部 70 から、実機の逆特性モデル 50 へ出力される。

[0066] 実機の逆特性モデル 50 では、負荷イナーシャ推定モデル 60 から出力された負荷イナーシャ J_L (図示例では J_{L1}) に基づいて、負荷イナーシャ J_L の項を含んでいる 3 次微分項以上の係数 $a_3 \sim a_5$ を調整 (設定) する。かくして、送り系 22 のパラメータと逆特性モデル 50 のパラメータ (負荷イナーシャ J_L の項を含んでいる 3 次微分項以上の係数 $a_3 \sim a_5$) が一致する。このため、当該ワーク W の加工を行う際には、高精度に負荷位置 θ_L を制御して位置指令 θ に追従させることができ、高精度な加工を行うことができる。

[0067] なお、上記では最大負荷時の位置偏差 $\Delta \theta_{LM}$ を用いて位置偏差特性データ ΔV_D を設定しているが、これに限定するものではなく、最大負荷以外の負荷時の位置偏差 $\Delta \theta_L$ を用いて位置偏差特性データ ΔV_D を設定してもよい。即ち、最大重量以外の重量のワーク W をテーブル 2 に載置した状態 (即ち最大負荷以外の負荷状態) において、上記と同様の実機による負荷位置制御試験又は負荷位置制御シミュレーションを実施することにより、当該負荷時の位置偏差 $\Delta \theta$ を測定し、この測定した当該負荷時の位置偏差 $\Delta \theta$ と無負荷時の位置偏差 $\Delta \theta_0$ とに基づいて、負荷イナーシャ J_L の増加に比例してリニアに増加する位置偏差特性データ ΔV_D を設定してもよい。

[0068] (作用効果)

以上のように、本実施の形態例 2 の負荷イナーシャ推定方法によれば、送り系 22 の逆特性モデル 50 を付加したフィードバック制御系 21 により、逆特性モデル 50 から出力される送り系 22 の動的な誤差要因を補償するた

めの補償量 V_H に基づいて、送り系 22 の負荷位置 θ_L を制御する負荷位置制御システムに対し、送り系 22 の負荷イナーシャ J_L を推定する方法であって、前記負荷位置制御システムにおいて、フィードバック制御系 21 に位置指令 θ を与えることにより、フィードバック制御系 21 による負荷位置制御試験を実施し、このときに特定の負荷位置 θ_L で生じる位置偏差 $\Delta\theta$ ($\Delta\theta_1$) を測定し、又は、前記負荷位置制御システムのモデルにおいて、フィードバック制御系 21 のモデルに前記位置指令 θ を与えることにより、フィードバック制御系 21 のモデルによる送り系 22 のモデルの負荷位置制御シミュレーションを実施し、このときに特定の負荷位置 θ_L で生じる位置偏差 $\Delta\theta$ ($\Delta\theta_1$) を測定し、予め測定された無負荷時に前記特定の負荷位置 θ_L で生じる位置偏差 $\Delta\theta$ ($\Delta\theta_0$) と、負荷時に前記特定の負荷位置 θ_L で生じる位置偏差 $\Delta\theta$ ($\Delta\theta_M$) とに基づいて予め設定されている、負荷イナーシャ J_L の増加に比例して位置偏差 $\Delta\theta$ がリニアに増加する位置偏差特性データ ΔV_D に基づいて、前記負荷位置制御試験又は前記負荷位置制御シミュレーションにより測定した位置偏差 $\Delta\theta$ ($\Delta\theta_1$) に対応する負荷イナーシャ J_L (J_{L1}) を求め、この負荷イナーシャ J_L (J_{L1}) が実機の送り系 22 の負荷イナーシャ J_L であると推定することを特徴としているため、送り系 22 の負荷重量（テーブル 2 に載置されるワーク W の重量）が変化しても、当該負荷重量に応じた負荷イナーシャ J_L を容易に推定することができる。

[0069] そして、本実施の形態例 2 の制御パラメータ調整方法によれば、前記負荷イナーシャ推定方法で推定された負荷イナーシャ J_L に基づいて、実機の逆特性モデル 50 に含まれている負荷イナーシャ J_L を調整することを特徴としているため、送り系 22 の負荷重量（テーブル 2 に載置されるワーク W の重量）が変化しても、送り系 22 のパラメータと逆特性モデル 50 のパラメータ（負荷イナーシャ J_L の項を含んでいる 3 次微分項以上の係数 $a_3 \sim a_5$ ）を一致させることができる。このため、高精度に負荷位置 θ_L を制御して位置指令 θ に追従させることができ、高精度な加工を行うことができる。

[0070] なお、上記実施の形態例 1, 2 では推定した負荷イナーシャ J_L によって逆

特性モデル50の負荷イナーシャ J_L を調整しているが、これだけに限らず、加工条件に関する制御パラメータなどのような逆特性モデル50の負荷イナーシャ J_L 以外の制御パラメータも、推定した負荷イナーシャ J_L によって調整するようにしてもよい。例えば、推定した負荷イナーシャ J_L を位置偏差特性データ部70や負荷イナーシャ推定モデル60からNC装置41へも出力するようにし、この推定した負荷イナーシャ J_L によって、NC装置41で設定する加減速時間やコーナ速度加速度などの制御パラメータの調整を行うようにしてもよい。

[0071] また、上記実施の形態例1, 2では本発明をテーブル2の送り系22に適用する場合について説明したが、これに限定するものではなく、本発明はテーブル2以外の送り系（例えばサドルやラムなどの送り系）に適用することもできる。例えば、図4において、アタッチメント8や工具9の重量が変化する場合には、本発明をサドル5やラム6の送り系に適用することも有効である。

[0072] また、上記実施の形態例1, 2では本発明をサーボモータ23やボールスクリュウ27などから成る送り系22に適用する場合について説明したが、これに限定するものではなく、本発明は、その他の構成の送り系（例えば油圧ポンプ、油圧モータ、油圧シリンダなどを用いた送り系など）にも適用することができる。

[0073] また、上記実施の形態例1, 2では工作機械の送り系に適用した場合について説明したが、必ずしもこれに限定するものではなく、本発明は工作機械以外の産業機械の送り系にも適用することができる。

[0074] <逆特性モデルの係数の演算手法の説明>

ここで逆特性モデル50における各係数 $a_1 \sim a_5$ を設定（演算）した演算手法について説明する。

[0075] 図2に示す機械系モデルにおいて、トルク及び速度の逆特性モデルの伝達関数は、次のようにして計算できる。まず、運動方程式から、下記の（1）式及び（2）式が求められる。なお、（1）式は、サーボモータ23の特性

をモデル化したモータ伝達関数に関して入出力の関係を示す運動方程式であり、(2)式は、負荷であるテーブル2及びワークWの特性をモデル化した負荷伝達関数に関して入出力の関係を示す運動方程式である。

[数2]

$$\tau - (\theta_M - \theta_L) \cdot (C_L s + K_L) = (J_M s^2 + D_M s) \cdot \theta_M \quad \dots (1)$$

$$(\theta_M - \theta_L) \cdot (C_L s + K_L) = (J_L s^2 + D_L s) \cdot \theta_L \quad \dots (2)$$

[0076] 上記の(1)式及び(2)式より、下記の(3)式及び(4)式が得られる。

[数3]

$$\tau = \left\{ \frac{J_M J_L s^4 + (J_M D_L + J_L D_M) s^3 + D_M D_L s^2}{C_L s + K_L} + (J_M + J_L) s^2 + (D_M + D_L) s \right\} \cdot \theta_L \quad \dots (3)$$

$$\theta_M s = \left(\frac{J_L s^3 + D_L s^2}{C_L s + K_L} + s \right) \cdot \theta_L \quad \dots (4)$$

[0077] 誤差0で負荷(テーブル2及びワークW)を移動させるためには、負荷位置 θ_L が位置指令 θ と一致するように補償制御をすればよい。即ち、 $\theta = \theta_L$ となるように補償制御をすればよい。このように $\theta = \theta_L$ とするためには、トルク指令 τ を(3)式の右辺の{ }内の式(第1の伝達関数式)でフィードフォワード補償制御をし、速度指令 V を(4)式の右辺の()内の式(第2の伝達関数式)でフィードフォワード補償制御をすればよい。なお(4)式において、 $\theta_M s$ はモータ速度 V_M と等価である。

[0078] (3)式において、 θ_L を θ に置換してから、指令速度 V_τ に置き換えると、(3)式は下記の(5)式となる。(5)式は(3)式に比例積分演算器34に設定した比例積分演算式の逆演算式を掛けたものである。換言すると、(3)式を比例積分演算器34に設定した比例積分演算式で除算したものが(5)式となる。(5)式の右辺において θ を除く部分が第3の伝達関数式となる。また、(4)式において θ_L を θ に置換してから、(4)式を変形すると、下記の(6)式となる。負荷位置 θ_L が位置指令 θ と一致するように補償制御をするには、 θ と θ_L の誤差を0とするための補償速度 V_H を、(5)

式と（６）式を加えたものにすればよく、これは下記の（７）式で示される。
（７）式の右辺のうちの θ を除く部分が第４の伝達関数式である。

[数4]

$$V_T = \left\{ \frac{J_M J_L s^4 + (J_M D_L + J_L D_M) s^3 + D_M D_L s^2}{C_L s + K_L} + (J_M + J_L) s^2 + (D_M + D_L) s \right\} \cdot \left(\frac{T_V s}{K_V T_V s + K_V} \right) \cdot \theta \quad \dots (5)$$

$$\theta_M s = \left(\frac{J_L s^3 + D_L s^2}{C_L s + K_L} + s \right) \cdot \left(\frac{K_V T_V s + K_V}{T_V} \right) \cdot \left(\frac{T_V}{K_V T_V s + K_V} \right) \cdot \theta \quad \dots (6)$$

$$V_H = \left\{ \frac{J_M J_L s^5 + (J_M D_L + J_L D_M + K_V J_L) s^4 + \left(D_M D_L + K_V D_L + \frac{K_V J_L}{T_V} \right) s^3 + \frac{K_V D_L}{T_V} s^2}{C_L s + K_L} + (J_M + J_L) s^3 + (D_M + D_L + K_V) s^2 + \frac{K_V}{T_V} s \right\} \cdot \left(\frac{T_V}{K_V T_V s + K_V} \right) \cdot \theta \quad \dots (7)$$

[0079] （７）式のままでは、微分次数で式をまとめることはできないが、精度にあまり影響しない C_L 項を（７）式から削除すると、下記の（８）式が得られる。（８）式の右辺のうちの θ を除く部分が、補償制御用伝達関数である。（８）式を係数 $a_1 \sim a_5$ に置き換えると、下記の（９）式が得られる。従って、（８）式及び（９）式から、各係数 $a_1 \sim a_5$ が得られる。

[数5]

$$V_H = \left\{ \frac{J_M J_L s^5}{K_L} + \frac{(J_M D_L + J_L D_M + K_V J_L) s^4}{K_L} + \left(J_M + J_L + \frac{D_M D_L + K_V D_L}{K_L} + \frac{K_V J_L}{T_V K_L} \right) s^3 + \left(D_M + D_L + K_V + \frac{K_V D_L}{T_V K_L} \right) s^2 + \frac{K_V}{T_V} s \right\} \cdot \left(\frac{T_V}{K_V T_V s + K_V} \right) \cdot \theta \quad \dots (8)$$

$$V_H = (a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3 + a_4 s^4 + a_5 s^5) \cdot \left(\frac{T_V}{K_V T_V s + K_V} \right) \cdot \theta \quad \dots (9)$$

産業上の利用可能性

[0080] 本発明は負荷イナーシャ推定方法及び制御パラメータ調整方法に関するものであり、工作機械などのフィードバック制御系に付加した送り系の逆特性モデルに含まれている負荷イナーシャを調整する場合に適用して有用なものである。

符号の説明

[0081] 1 ベッド、 2 テーブル、 21 フィードバック制御系、 22 送り系、 23 サーボモータ、 24 減速ギヤ装置、 24a モータ側ギヤ、 24b 負荷側ギヤ、 25 ベアリング、 26 ブラケット、 27 ボールスクリュー、 27a ネジ部、 27b ナット部、 28 位置検出器、 29 パルスエンコーダ、 31 位置偏差演算部、 32 乗算部、 33 速度偏差演算部、 34 比例積分演算部、 35 電流制御部、 36 微分演算部、 41 NC装置、 50 逆特性モデル、 51 1次微分項演算部、 52 2次微分項演算部、 53 3次微分項演算部、 54 4次微分項演算部、 55 5次微分項演算部、 56 加算部、 57 比例積分逆伝達関数部、 60 負荷イナーシャ推定モデル、 61 トルク偏差演算部、 62, 63 サーボモータに関する伝達関数のブロック、 64, 65, 66 テーブル及びボールスクリューに関する伝達関数のブロック、 67 位置偏差演算部、 70 位置偏差特性データ部

請求の範囲

[請求項1]

送り系の逆特性モデルを付加したフィードバック制御系により、前記逆特性モデルから出力される前記送り系の動的な誤差要因を補償するための補償量に基づいて、前記送り系の負荷位置を制御する負荷位置制御システムに対し、前記送り系の負荷イナーシャを推定する方法であって、

前記負荷位置制御システムにおいて、前記フィードバック制御系に位置指令を与えることにより、前記フィードバック制御系による負荷位置制御試験を実施し、このときに特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置との位置偏差を測定し、

前記負荷位置制御システムのモデルである負荷イナーシャ推定モデルにおいて、前記フィードバック制御系のモデルに前記位置指令を与えることにより、前記フィードバック制御系のモデルによる前記送り系のモデルの負荷位置制御シミュレーションを実施し、且つ、前記負荷位置制御シミュレーションにおいて前記特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置の位置偏差が、前記負荷位置制御試験で測定した前記位置偏差に等しくなるまで、前記送り系のモデルに含まれている負荷イナーシャを調整して前記負荷位置制御シミュレーションを繰り返し、その結果、前記負荷位置制御シミュレーションにおいて前記特定の負荷位置で生じる前記位置偏差が、前記負荷位置制御試験で測定した前記位置偏差に等しくなれば、このときの前記送り系のモデルに含まれている負荷イナーシャが、前記送り系の負荷イナーシャであると推定すること、

を特徴とする負荷イナーシャ推定方法。

[請求項2]

送り系の逆特性モデルを付加したフィードバック制御系により、前記逆特性モデルから出力される前記送り系の動的な誤差要因を補償するための補償量に基づいて、前記送り系の負荷位置を制御する負荷位置制御システムに対し、前記送り系の負荷イナーシャを推定する方法

であって、

前記負荷位置制御システムにおいて、前記フィードバック制御系に位置指令を与えることにより、前記フィードバック制御系による負荷位置制御試験を実施し、このときに特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置との位置偏差を測定し、

又は、前記負荷位置制御システムのモデルにおいて、前記フィードバック制御系のモデルに前記位置指令を与えることにより、前記フィードバック制御系のモデルによる前記送り系のモデルの負荷位置制御シミュレーションを実施し、このときに特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置の位置偏差を測定し、

予め測定された無負荷時に前記特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置の位置偏差と、負荷時に前記特定の負荷位置で生じる前記位置指令と負荷位置の位置偏差とに基づいて予め設定されている、負荷イナーシャの増加に比例して位置偏差がリニアに増加する位置偏差特性データに基づいて、前記負荷位置制御試験又は前記負荷位置制御シミュレーションにより測定した前記位置偏差に対応する負荷イナーシャを求め、この負荷イナーシャが前記送り系の負荷イナーシャであると推定すること、

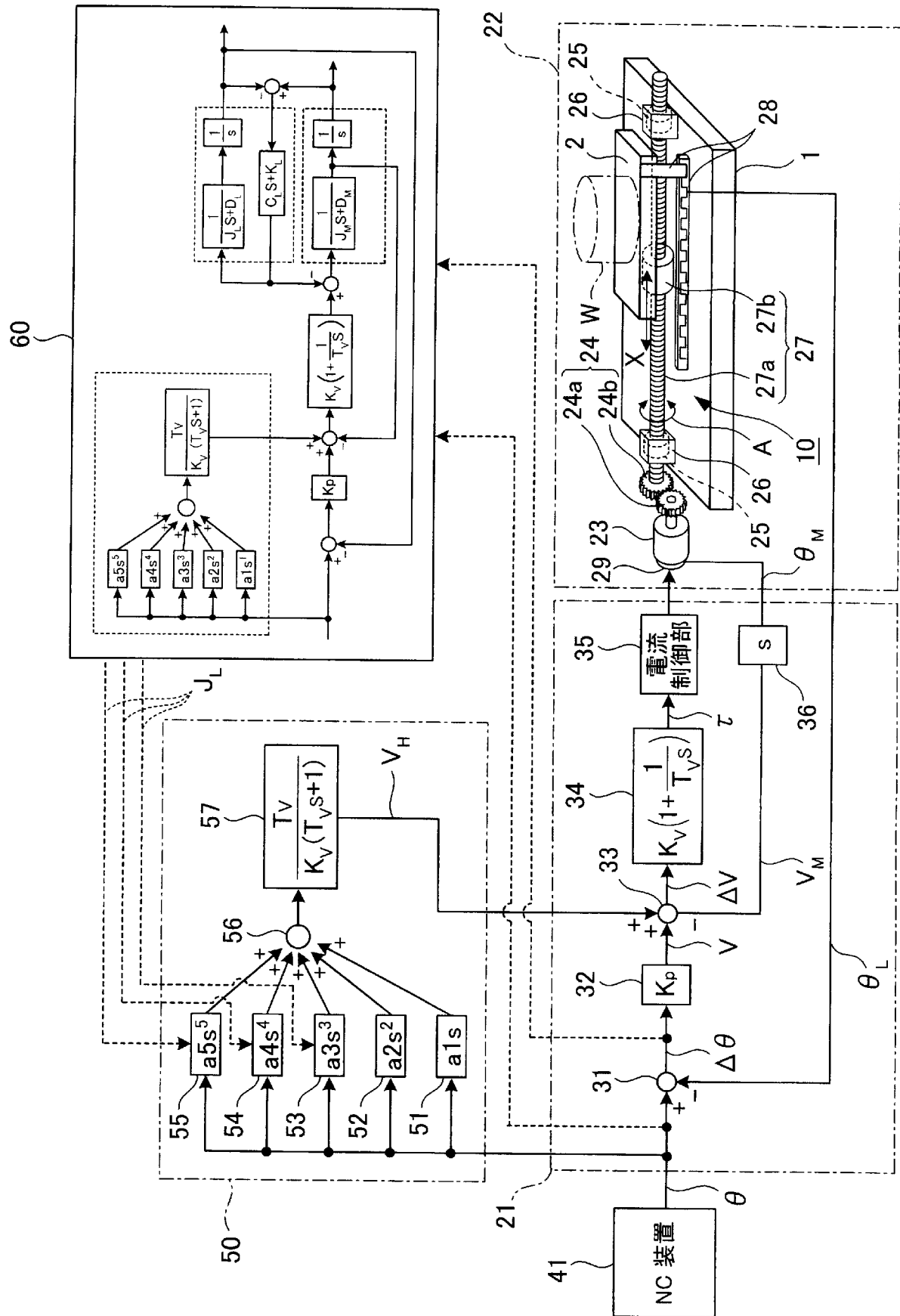
を特徴とする負荷イナーシャ推定方法。

[請求項3]

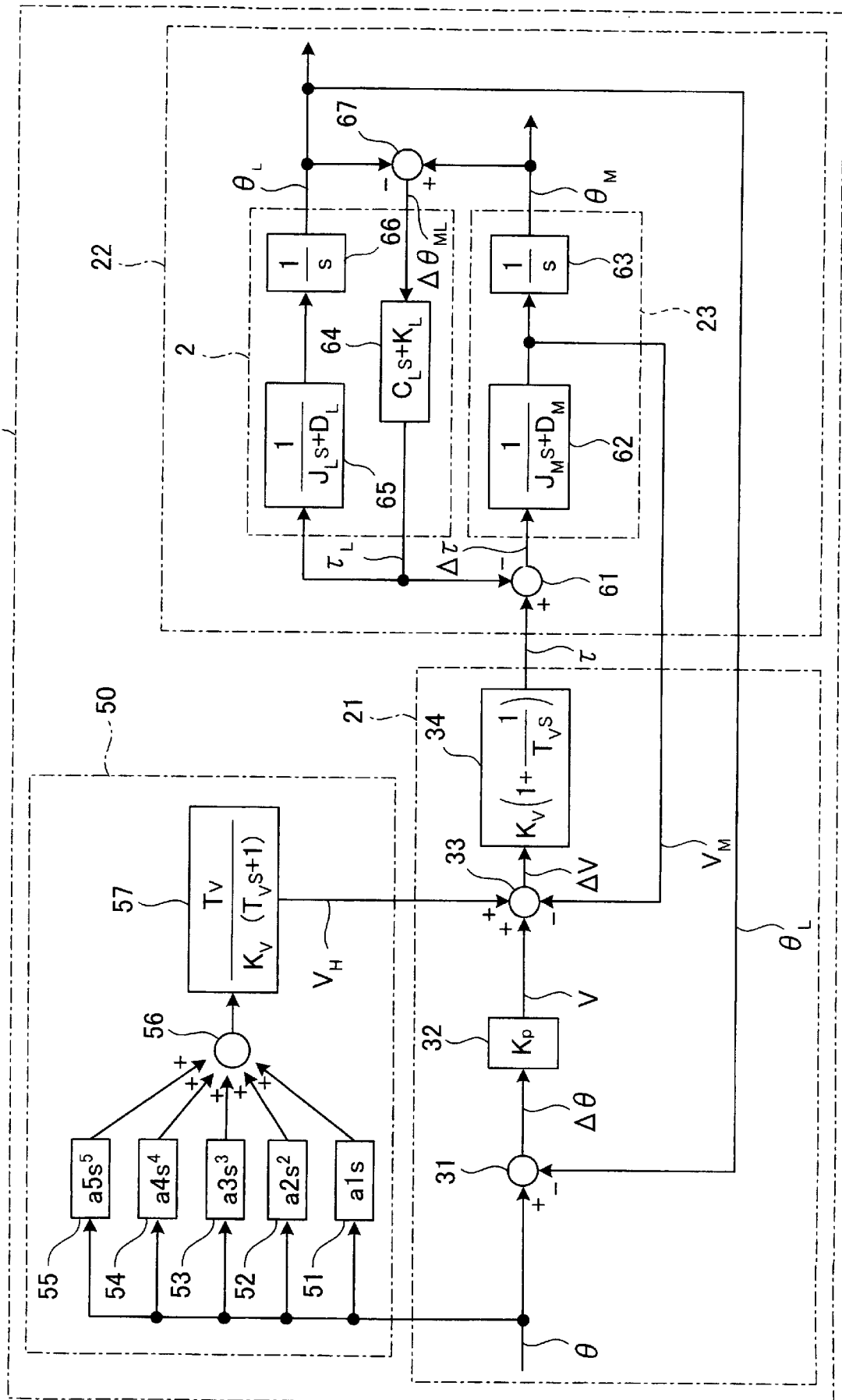
送り系の逆特性モデルを付加したフィードバック制御系により、前記逆特性モデルから出力される前記送り系の動的な誤差要因を補償するための補償量に基づいて、前記送り系の負荷位置を制御する負荷位置制御システムに対し、前記逆特性モデルに含まれている負荷イナーシャを調整する制御パラメータ調整方法であって、

請求項1又は2の負荷イナーシャ推定方法で推定された負荷イナーシャに基づいて、前記逆特性モデルに含まれている負荷イナーシャを調整することを特徴とする制御パラメータ調整方法。

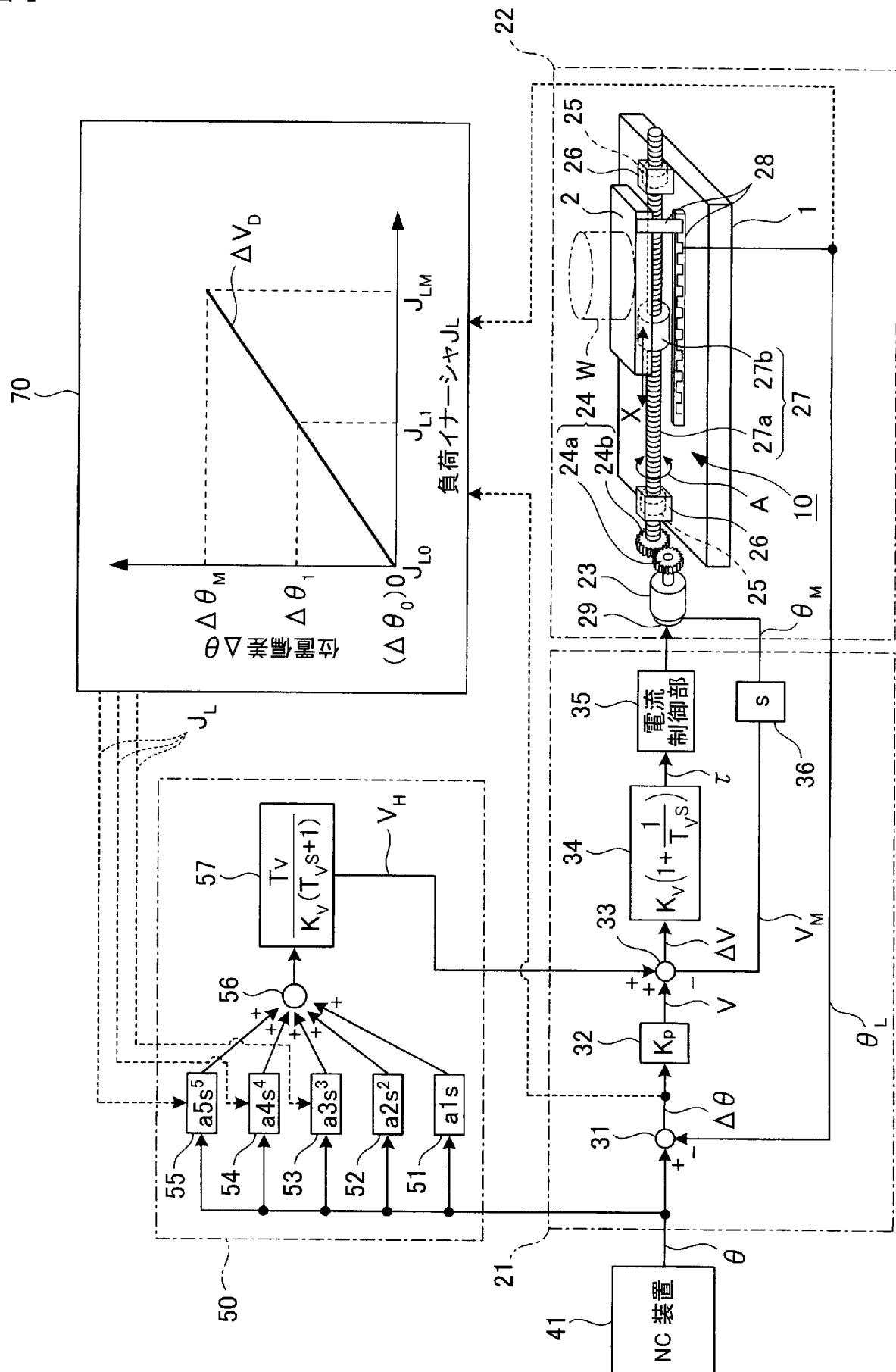
[図1]



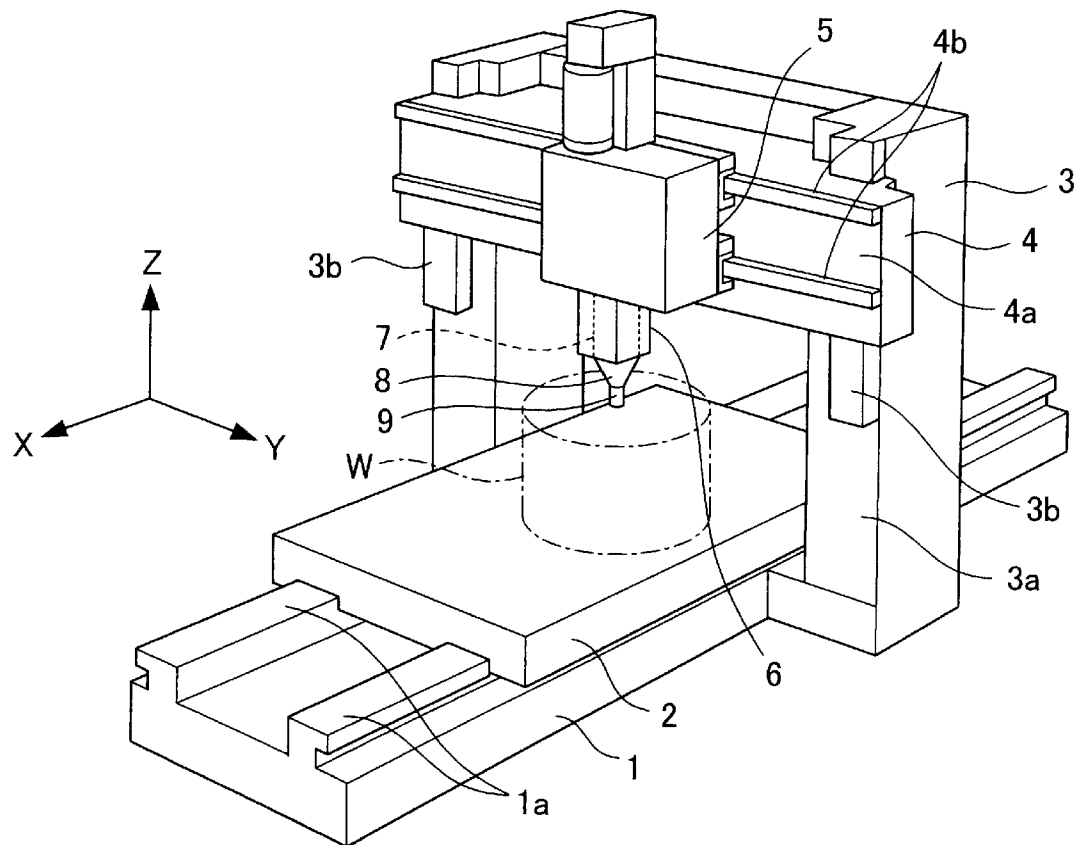
[図2]



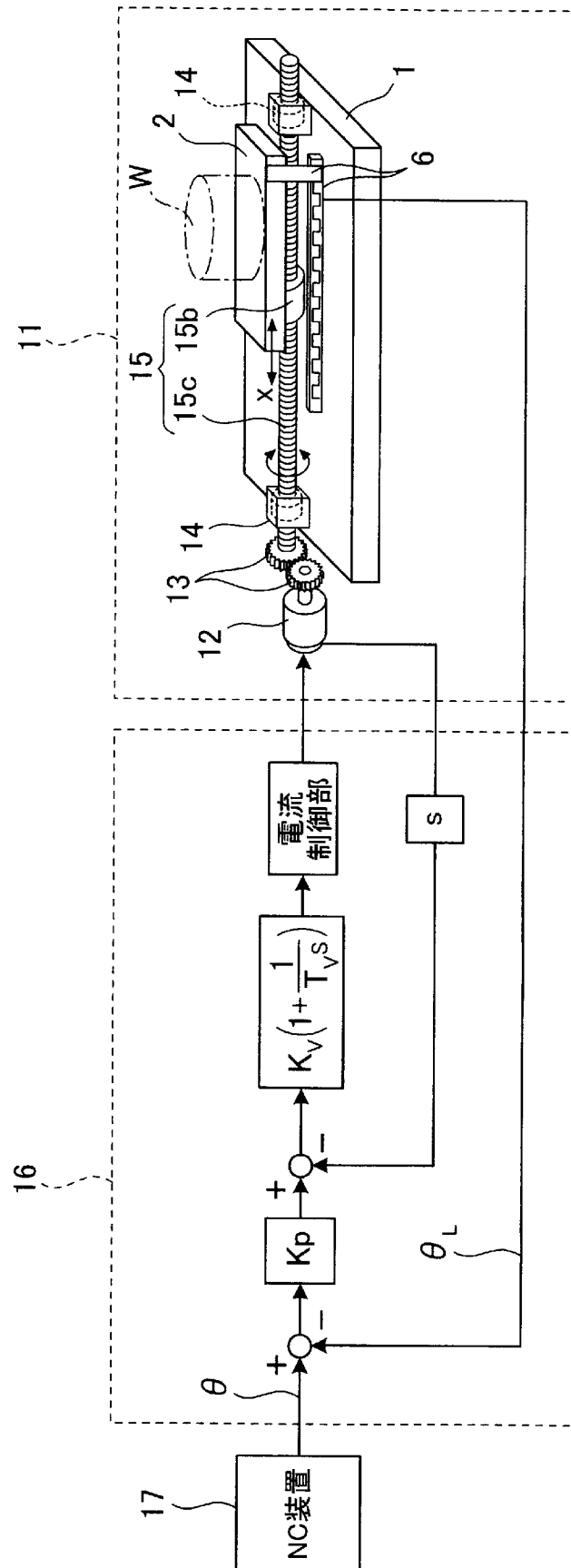
[図3]



[図4]



[図5]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/072917

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G05B19/404(2006.01)i, G05B13/04(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G05B19/404, G05B13/04

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2011

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2011 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2011

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 5-46234 A (Yaskawa Electric Corp.), 26 February 1993 (26.02.1993), entire text; all drawings (Family: none)	1-3
A	JP 2009-83074 A (Fanuc Ltd.), 23 April 2009 (23.04.2009), entire text; all drawings (Family: none)	1-3
A	JP 10-285969 A (Yaskawa Electric Corp.), 23 October 1998 (23.10.1998), entire text; all drawings (Family: none)	1-3



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T"

later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X"

document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y"

document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&"

document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

13 December, 2011 (13.12.11)

Date of mailing of the international search report

27 December, 2011 (27.12.11)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/072917

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 4137673 B1 (Mitsubishi Electric Corp.), 13 June 2008 (13.06.2008), entire text; all drawings (Family: none)	1-3
A	JP 2009-201169 A (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.), 03 September 2009 (03.09.2009), entire text; all drawings (Family: none)	1-3
A	JP 7-319506 A (Nippondenso Co., Ltd.), 08 December 1995 (08.12.1995), entire text; all drawings (Family: none)	1-3

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））
Int.Cl. G05B19/404(2006.01)i, G05B13/04(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G05B19/404, G05B13/04

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 1 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 1 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 1 年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 5-46234 A（株式会社安川電機）1993.02.26, 全文、全図 (ファミリーなし)	1 - 3
A	JP 2009-83074 A（ファナック株式会社）2009.04.23, 全文、全図 (ファミリーなし)	1 - 3

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー	の日の後に公表された文献
「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの	「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの	「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）	「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献	「&」同一パテントファミリー文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願	

国際調査を完了した日
1 3 . 1 2 . 2 0 1 1

国際調査報告の発送日
2 7 . 1 2 . 2 0 1 1

国際調査機関の名称及びあて先
日本国特許庁（I S A / J P）
郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）	3 U	9 5 3 5
金丸 治之		
電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 3 2 4		

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 10-285969 A (株式会社安川電機) 1998. 10. 23, 全文、全図 (ファミリーなし)	1 - 3
A	JP 4137673 B1 (三菱電機株式会社) 2008. 06. 13, 全文、全図 (ファミリーなし)	1 - 3
A	JP 2009-201169 A (三菱重工業株式会社) 2009. 09. 03, 全文、全図 (ファミリーなし)	1 - 3
A	JP 7-319506 A (日本電装株式会社) 1995. 12. 08, 全文、全図 (ファミリーなし)	1 - 3