

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5996127号
(P5996127)

(45) 発行日 平成28年9月21日(2016.9.21)

(24) 登録日 平成28年9月2日(2016.9.2)

(51) Int.Cl. F I
G05D 3/12 (2006.01) G05D 3/12 Z

請求項の数 11 (全 18 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2015-551413 (P2015-551413) (86) (22) 出願日 平成26年9月17日(2014.9.17) (86) 国際出願番号 PCT/JP2014/074589 (87) 国際公開番号 W02015/083417 (87) 国際公開日 平成27年6月11日(2015.6.11) 審査請求日 平成27年11月16日(2015.11.16) (31) 優先権主張番号 特願2013-253451 (P2013-253451) (32) 優先日 平成25年12月6日(2013.12.6) (33) 優先権主張国 日本国(JP)</p>	<p>(73) 特許権者 000006013 三菱電機株式会社 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 (74) 代理人 100089118 弁理士 酒井 宏明 (72) 発明者 藤田 智哉 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三 菱電機株式会社内 (72) 発明者 長岡 弘太郎 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三 菱電機株式会社内 審査官 川東 孝至</p>
---	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 摩擦同定方法および摩擦同定装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

被駆動体の位置と駆動力の関係を測定するステップと、
 前記被駆動体の位置と駆動力の関係から位置に依存する摩擦モデルのパラメータを同定するステップと、
 前記被駆動体の運動方向反転位置からの変位と駆動力の関係を測定するステップと、
 前記被駆動体の変位と駆動力の関係と前記位置に依存する摩擦モデルとを用いて変位に依存する摩擦モデルのパラメータを同定するステップと、
 前記被駆動体の速度と駆動力の関係を測定するステップと、
 前記被駆動体の速度と駆動力の関係と前記位置に依存する摩擦モデルと前記変位に依存する摩擦モデルと、を用いて速度に依存する摩擦モデルのパラメータを同定するステップと、
 前記被駆動体の加速度と駆動力の関係を測定するステップと、
 前記被駆動体の加速度と駆動力の関係と前記位置に依存する摩擦モデルと前記変位に依存する摩擦モデルと前記速度に依存する摩擦モデルを用いて加速度に依存する摩擦モデルのパラメータを同定するステップと、
 を有する
 ことを特徴とする摩擦同定方法。

【請求項2】

前記被駆動体の位置と駆動力の関係を測定するステップおよび前記被駆動体の運動方向

10

20

反転位置からの変位と駆動力の関係を測定するステップにおいては、

前記被駆動体の駆動範囲内を予め定めた移動幅で前記被駆動体の移動と停止を繰り返し、そのときの前記被駆動体の位置と駆動力を同期して測定することを特徴とする請求項 1 に記載の摩擦同定方法。

【請求項 3】

前記被駆動体の位置と駆動力の関係から位置に依存する摩擦モデルのパラメータを同定するステップにおいては、

前記被駆動体の速度が予め定めた閾値以下となる期間を検出し、前記期間における摩擦力をその位置での位置に依存する摩擦力として出力する

ことを特徴とする請求項 1 に記載の摩擦同定方法。

10

【請求項 4】

前記変位に依存する摩擦モデルのパラメータを同定するステップにおいては、

前記駆動力から前記位置に依存する摩擦モデルを用いて算出したその位置での摩擦力を除いた値をその変位での変位に依存する摩擦力として出力する

ことを特徴とする請求項 3 に記載の摩擦同定方法。

【請求項 5】

前記被駆動体の速度と駆動力の関係を測定するステップと、前記被駆動体の加速度と駆動力の関係を測定するステップと、を同時に実行する

ことを特徴とする請求項 1 に記載の摩擦同定方法。

【請求項 6】

20

前記被駆動体の速度と駆動力の関係を測定するステップおよび前記被駆動体の加速度と駆動力の関係を測定するステップにおいては、

前記被駆動体の駆動範囲内を予め定めた移動幅で、予め定めた速度および予め定めた加速度で前記被駆動体を往復運動させ、前記往復運動を速度または加速度のいずれか、または速度と加速度の両方を変えて繰り返し、そのときの前記被駆動体の位置と駆動力を同期して測定する

ことを特徴とする請求項 1 または 5 に記載の摩擦同定方法。

【請求項 7】

前記被駆動体の速度と駆動力の関係を測定するステップと、前記被駆動体の加速度と駆動力の関係を測定するステップと、を同時に実行する場合において、

前記被駆動体に正弦波状の運動指令を指令する

ことを特徴とする請求項 5 に記載の摩擦同定方法。

30

【請求項 8】

前記速度に依存する摩擦モデルのパラメータを同定するステップにおいては、

前記被駆動体の加速度が予め定めた閾値以下となる期間を検出し、前記期間における摩擦力から、前記位置に依存する摩擦モデルを用いて算出したその位置での摩擦力と前記変位に依存する摩擦モデルを用いて算出したその変位での摩擦力の両方を除いた値を、その速度での速度に依存する摩擦力として出力する

ことを特徴とする請求項 1 または 5 に記載の摩擦同定方法。

【請求項 9】

40

前記加速度に依存する摩擦モデルのパラメータを同定するステップにおいては、

被駆動体の加速度が一定となる期間を検出し、前記期間における摩擦力から、前記位置に依存する摩擦モデルを用いて算出したその位置での摩擦力と前記変位に依存する摩擦モデルを用いて算出したその変位での摩擦力と前記速度に依存する摩擦モデルを用いて算出したその速度での摩擦力を除いた値を、その加速度での加速度に依存する摩擦力として出力する

ことを特徴とする請求項 1 または 5 に記載の摩擦同定方法。

【請求項 10】

前記摩擦モデルのパラメータを出力するステップ

をさらに有する

50

ことを特徴とする請求項 1 に記載の摩擦同定方法。

【請求項 1 1】

被駆動体の位置と駆動力の関係を測定する位置依存摩擦測定部と、
 前記被駆動体の位置と駆動力の関係から位置に依存する摩擦モデルのパラメータを同定する位置依存摩擦同定部と、
 前記被駆動体の運動方向反転位置からの変位と駆動力の関係を測定する変位依存摩擦測定部と、
 前記被駆動体の変位と駆動力の関係と前記位置に依存する摩擦モデルとを用いて変位に依存する摩擦モデルのパラメータを同定する変位依存摩擦同定部と、
 前記被駆動体の速度と駆動力の関係を測定する速度依存摩擦測定部と、
 前記被駆動体の速度と駆動力の関係と前記位置に依存する摩擦モデルと前記変位に依存する摩擦モデルと、を用いて速度に依存する摩擦モデルのパラメータを同定する速度依存摩擦同定部と、
 前記被駆動体の加速度と駆動力の関係を測定する加速度依存摩擦測定部と、
 前記被駆動体の加速度と駆動力の関係と前記位置に依存する摩擦モデルと前記変位に依存する摩擦モデルと前記速度に依存する摩擦モデルを用いて加速度に依存する摩擦モデルのパラメータを同定する加速度依存摩擦同定部と、
 前記位置に依存する摩擦モデル、前記変位に依存する摩擦モデル、前記速度に依存する摩擦モデル、および前記加速度に依存する摩擦モデルのパラメータを出力するモデル送信部と、
 を有することを特徴とする摩擦同定装置。

10

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、ロボットまたは工作機械など高精度に位置および速度を制御する装置におけるモデルを用いて摩擦を補正する機能に関し、特に装置の複数の状態量を入力変数とする摩擦モデルのパラメータを同定する摩擦同定方法および摩擦同定装置に関する。

【背景技術】

【0002】

工作機械には、複数の送り軸が備えられており、これらはリニアモータおよびサーボモータによって駆動される。各送り軸においては、加工対象物を固定したテーブルといった被駆動体の実際の位置が指令位置と一致するように、位置検出器を用いて被駆動体の位置を検出し、検出した被駆動体の位置と指令位置との誤差を補正するフィードバック制御が行われている。フィードバック制御では、未知の外乱が入力されても外乱を打ち消すように駆動力が制御されるが、誤差を検出してから誤差に応じた駆動力が入力されるため、送り軸の応答が遅いという問題がある。

30

【0003】

外乱力の一種である摩擦力が輪郭運動の精度に与える影響については、よく知られている。例えば、XY平面内で直交する2軸を用いて円弧軌跡の運動を行う場合には、二つの軸のそれぞれには、位相が90度ずれた正弦波状の運動指令が与えられる。そして、円弧の象限が切り替わる点においては、いずれかの送り軸の運動方向が反転する。このとき、送り軸の構成要素であるボールねじまたは軸受といった接触部で生じる摩擦トルク及び摩擦力の方向も反転するため、反転軸の制御系が一定時間遅れて応答することになる。そのため、応答軌跡に追従誤差が生じ、実際の軌道は、指令軌跡の少し外側を通ることになる。この現象は象限突起と呼ばれ、運動精度を低下させる要因となっている。

40

【0004】

なお、回転系の摩擦トルクと直動系の摩擦力は、機械系の構成によって決まる定数によって等価的に換算ができるため、本明細書においては、摩擦トルクと摩擦力は区別しないものとし、同様に、直動モータのモータ推力と回転モータのモータトルクも区別しないものとする。

50

【 0 0 0 5 】

摩擦を含む外乱の影響によって運動精度が悪化する問題を解決するために、モデルを用いて外乱を予測し、外乱の影響を打ち消すために必要な補正力をモータの制御系に入力するモデルベースの外乱補正方式が知られている。例えば、特許文献 1 に示した運動方向の反転を検出したときに、予め決定されていた時間と振幅のパルス波状の電流補正指令を出力する方式、または特許文献 2 に示した被駆動体位置を入力とした非線形関数で表現された補正力を出力する方式などがある。特許文献 3 においては、摩擦モデルは、クーロン摩擦と速度に比例する粘性摩擦の 2 つのモデルを併用している。

【 0 0 0 6 】

モデルベースの外乱補正機能を有する装置においては、事前に装置に生じる外乱力を測定し、補正に用いるためのモデルのパラメータを同定しておく必要がある。特許文献 1 では、予め測定しておいた運動誤差量から補正指令のパルス幅とパルス時間を決定している。特許文献 2 においては、運動方向反転時の位置とモータ電流の関係を 1 入力 1 出力の関数として同定している。特許文献 3 においては、同定アルゴリズムを用いて、クーロン摩擦係数と粘性摩擦係数の 2 つの定数を同定している。

【 0 0 0 7 】

以下に示す先行技術文献のように同定すべき外乱モデルの諸元が少ない場合或いは線形なモデルを用いている場合は、比較的簡易な測定で外乱モデルのパラメータ同定を行うことが可能である。

【先行技術文献】

【特許文献】

【 0 0 0 8 】

【特許文献 1】特開昭 6 0 - 1 1 6 0 0 4 号公報

【特許文献 2】特開 2 0 0 8 - 2 1 0 2 7 3 号公報

【特許文献 3】特開 2 0 0 6 - 2 0 4 8 7 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 9 】

しかしながら、上記従来技術によれば同定すべきモデルのパラメータが多い場合、複数の状態量の入力を考慮する場合、或いは非線形特性を考慮する場合には、単純なプロセスでモデルのパラメータを同定することが難しいという問題があった。

【 0 0 1 0 】

実際の摩擦現象は、原点などの予め定めた基準点からの距離（以下単に、位置と表現する）、運動方向反転位置からの移動量（以下単に、変位と表現する）、速度、加速度によって変動し、それぞれ位置、変位、速度、加速度に対して非線形な特性を示すことが知られている。例えば、摩擦の変位依存性に関しては、微小変位領域において変位量と摩擦の関係が示すヒステリシスループ特性を、大変位領域ではクーロン摩擦特性を持つことが知られている。また、摩擦の速度依存性に関しては、速度と摩擦力の関係が示すストライベック曲線が良く知られている。

【 0 0 1 1 】

前述のように、摩擦力は、それぞれの状態量の変化に対して、非線形な挙動を示すが、それぞれ位置、変位、速度、加速度の変化に対して、摩擦力がどのように変化するかといった関係性が明らかにされていないという課題とそれらの摩擦特性に影響する状態量毎に分離して同定する摩擦同定方法が確立されていないという問題がある。例えば、特許文献 1 においては、摩擦モデルをパルス幅とパルス時間のパラメータでしか同定することができていないため、速度或いは変位の変化により摩擦が変化したとしても対応することができない。また、特許文献 2 においては、位置に対して摩擦を非線形関数で同定しているが、同時に存在しているはずの速度の影響によって変化する摩擦力に関しては言及されていない。特許文献 3 においては、変位と速度によって変化するクーロン摩擦或いは粘性摩擦について考慮されているが、どちらの摩擦も非線形特性は考慮されていない。

【 0 0 1 2 】

本発明は、このような問題点に鑑みてなされたものであり、位置、変位、速度、加速度にそれぞれ依存して変動する摩擦特性に対して、それぞれの状態量の変化が摩擦特性に与える影響を分離し、状態量毎に独立した非線形な摩擦モデルのパラメータを同定する摩擦同定方法および摩擦同定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】

【 0 0 1 3 】

上述した課題を解決し、目的を達成するために、本発明は、被駆動体の位置と駆動力の関係を測定するステップと、前記被駆動体の位置と駆動力の関係から位置に依存する摩擦モデルのパラメータを同定するステップと、前記被駆動体の運動方向反転位置からの変位と駆動力の関係を測定するステップと、前記被駆動体の変位と駆動力の関係と前記位置に依存する摩擦モデルとを用いて変位に依存する摩擦モデルのパラメータを同定するステップと、前記被駆動体の速度と駆動力の関係を測定するステップと、前記被駆動体の速度と駆動力の関係と前記位置に依存する摩擦モデルと前記変位に依存する摩擦モデルと、を用いて速度に依存する摩擦モデルのパラメータを同定するステップと、前記被駆動体の加速度と駆動力の関係を測定するステップと、前記被駆動体の加速度と駆動力の関係と前記位置に依存する摩擦モデルと前記変位に依存する摩擦モデルと前記速度に依存する摩擦モデルを用いて加速度に依存する摩擦モデルのパラメータを同定するステップと、を有することを特徴とする。

【発明の効果】

【 0 0 1 4 】

本発明によれば、複数の状態量によって変動する摩擦力を、規定の測定ステップを実行することで、短時間でそれぞれの状態量毎に1入力1出力システムの摩擦モデルのパラメータを同定できるという効果を奏する。さらに、得られたモデルを用いることで状態量の変化に対応することができ、微調整が行いやすい摩擦補正モデルを得ることができるという効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 5 】

【図1】図1は、本発明の実施の形態1～3にかかる摩擦同定装置を適用するサーボ制御装置、モータ及び被駆動体の構成の例を示すブロック図である。

【図2】図2は、実施の形態1～3において本発明を適用するサーボ制御部の構成を示すブロック図である。

【図3】図3は、実施の形態1～3において、本発明を適用する機械モデル部の構成を示すブロック図である。

【図4】図4は、実施の形態1～3において、同定する摩擦モデルの構成を示すブロック図である。

【図5】図5は、実施の形態1および2にかかる摩擦モデルの内容を示すテーブルである。

【図6】図6は、実施の形態1にかかる、摩擦同定装置の構成を示すブロック図である。

【図7】図7は、実施の形態1にかかる、摩擦同定方法を示すフローチャートである。

【図8】図8は、実施の形態1～3にかかる、位置依存摩擦及び変位依存摩擦を測定する際の位置指令の一例を示す図である。

【図9】図9は、実施の形態1にかかる、速度依存摩擦を測定する際の位置指令の一例を示す図である。

【図10】図10は、実施の形態2にかかる、摩擦同定装置の構成を示すブロック図である。

【図11】図11は、実施の形態2にかかる、摩擦同定方法を示すフローチャートである。

【図12】図12は、実施の形態2にかかる速度依存摩擦と加速度依存摩擦の同定に用いる運動パターンの例を示す図である。

【図 1 3】図 1 3 は、実施の形態 3 にかかる、摩擦同定装置の構成を示すブロック図である。

【図 1 4】図 1 4 は、実施の形態 4 にかかる、摩擦同定装置の構成の一部を示すブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【0016】

以下に、本発明にかかる摩擦同定方法および摩擦同定装置の実施の形態を図面に基づいて詳細に説明する。なお、この実施の形態によりこの発明が限定されるものではない。

【0017】

実施の形態 1 .

図 1 は、本発明の実施の形態 1 ~ 3 にかかる摩擦同定装置 6 を適用するサーボ制御装置 1 0、モータ 1 6 及び被駆動体 1 8 の構成の例を示すブロック図である。摩擦同定装置 6 は、摩擦補正を行うために装置に生じる摩擦の測定データから摩擦モデルのパラメータを同定する。

【0018】

図 1 には、サーボ制御装置 1 0、サーボ制御装置 1 0 によって動作を制御されるモータ 1 6、モータ 1 6 に接続された位置検出器 2 0、及びモータ 1 6 によって駆動される被駆動体 1 8 が示されている。サーボ制御装置 1 0 は、指令値入力部 1 2 と、サーボ制御部 1 4 と、機械モデル部 2 2 と、外乱モデル部 2 4 と、摩擦同定装置 6 と、を備える。

【0019】

指令値入力部 1 2 は、入力された被駆動体 1 8 の目標位置に従って、サーボ制御部 1 4 及び機械モデル部 2 2 に位置指令を出力する。

【0020】

サーボ制御部 1 4 は、指令値入力部 1 2 からの位置指令と、位置検出器 2 0 からの検出器信号（検出位置）と、外乱モデル部 2 4 からの外乱補正值と、を用いてフィードバック制御を行い、モータ 1 6 にモータ電流（駆動電流）を出力することで、被駆動体 1 8 の運動を制御する。

【0021】

図 2 は、サーボ制御部 1 4 の構成を示すブロック図である。サーボ制御部 1 4 は、P (Proportional : 比例) 制御器 3 0 a と、PI (Proportional - Integral : 比例積分) 制御器 3 2 a と、微分器 3 4 a と、を備え、P 制御器 3 0 a によって補償される位置ループと、PI 制御器 3 2 a によって補償される速度ループと、を有する。

【0022】

機械モデル部 2 2 は、サーボ制御部 1 4、モータ 1 6 及び被駆動体 1 8 を含む系を模擬し、指令値入力部 1 2 が出力した位置指令に基づいて被駆動体 1 8 の位置、変位、速度および加速度の 4 つの状態量を推定し、外乱モデル部 2 4 に出力する。

【0023】

図 3 は、機械モデル部 2 2 の構成を示すブロック図である。機械モデル部 2 2 は、P 制御器 3 0 b と、PI 制御器 3 2 b と、トルク定数乗算器 3 8 と、送り軸イナーシャ乗算器 4 0 と、積分器 3 6 a と、積分器 3 6 b と、反転後変位推定器 4 2 と、を備える。

【0024】

P 制御器 3 0 b には、指令値入力部 1 2 からの位置指令及び積分器 3 6 b の出力が入力される。PI 制御器 3 2 b には、P 制御器 3 0 b の出力及び積分器 3 6 a の出力が入力される。トルク定数乗算器 3 8 には、PI 制御器 3 2 b の出力が入力され、モータ電流指令値からモータのトルクを計算し出力する。

【0025】

送り軸イナーシャ乗算器 4 0 には、トルク定数乗算器 3 8 の出力が入力される。送り軸イナーシャ乗算器 4 0 の出力は、状態量の一つとして機械モデル部 2 2 から出力される「加速度」である。なお、イナーシャは予め計算しておくものとする。積分器 3 6 a には、

10

20

30

40

50

送り軸イナーシャ乗算器 40 の出力が入力される。

【0026】

積分器 36a の出力は、状態量の一つとして機械モデル部 22 から出力される「速度」である。積分器 36b には、積分器 36a の出力が入力される。積分器 36b の出力は、状態量の一つとして機械モデル部 22 から出力される「位置」である。反転後変位推定器 42 には、積分器 36a、36b の出力、すなわち「速度」と「位置」が入力される。反転後変位推定器 42 の出力は、状態量の一つとして機械モデル部 22 から出力される「変位」である。

【0027】

このように、機械モデル部 22 では、位置指令を入力したときの送り軸運動を模擬することで、送り軸の「位置」、「速度」および「加速度」が算出される。また、反転後変位推定器 42 では、速度と位置を入力とし、速度の符号の反転を検出した位置からの変位量を出力する。

10

【0028】

外乱モデル部 24 は、機械モデル部 22 で推定された 4 つの状態量から外乱力を推定し、推定した外乱力を外乱補正值としてサーボ制御部 14 に出力する。また、摩擦同定装置 6 から外乱モデルのデータを必要に応じて受け取る。

【0029】

図 4 は、外乱モデル部 24 の構成を示すブロック図である。外乱モデル部 24 は、加速度依存外乱モデル 46 と、速度依存外乱モデル 48 と、変位依存外乱モデル 50 と、位置依存外乱モデル 52 と、それらの出力を加算する加算器 54 と、加算器 54 の出力を外乱力として入力して外乱補正值を出力するトルク定数除算器 56 と、を備える。

20

【0030】

図 5 は、外乱モデル部 24 のモデルパラメータの例を示す。このモデルでは、それぞれ位置、変位、速度および加速度の状態量の入力に対して、一意に対応する電流補正值を出力するデータテーブルの形で提供される。これにより、近似計算を一切行わずテーブルデータとしてモデルのパラメータを出力することで、精度の高い摩擦モデルを得ることができる。入力がデータテーブルの中間値をとる場合は、補間した外乱補正值を出力する。例えば、状態量入力 y がデータテーブルで規定された値 Y_i と Y_{i+1} の間だとすると、このモデルでは状態量 Y に関する外乱補正值 $I_Y(y)$ は以下の式 (1) で表される。ここでは、線形補間によって外乱補正值を計算したが、スプライン補間のような他の方式で補間を行ったとしても差し支えない。

30

【0031】

【数 1】

$$I_Y(y) = \frac{I(Y_{i+1}) - I(Y_i)}{Y_{i+1} - Y_i} (y - Y_i) + I(Y_i) \quad \dots (1)$$

【0032】

このように、それぞれの状態量の入力に対して、外乱補正值を算出し、加算器 54 で全電流補正值を計算し、トルク定数除算器 56 でモータの電流指令へ変換する。

40

【0033】

図 6 は、上記した摩擦モデルのパラメータを同定し、外乱モデル部 24 にモデルパラメータを送信する摩擦同定装置 6 の構成を示すブロック図である。摩擦同定装置 6 では、機械モデル部 22 から位置、変位、速度および加速度とサーボ制御部 14 からモータ電流が入力される。位置依存摩擦測定部 61 では、特定の運動パターンでサーボ制御装置 10 が駆動された時の位置と電流の関係を測定する。

【0034】

位置依存摩擦同定部 62 では、測定された、位置と電流の関係から位置依存摩擦を同定し、変位依存摩擦同定部 64 と、速度依存摩擦同定部 66 と、加速度依存摩擦同定部 68 と、モデル送信部 69 に出力する。変位依存摩擦測定部 63 では、特定の運動パターンで

50

サーボ制御装置 10 が駆動された時の変位と電流の関係を測定する。

【0035】

変位依存摩擦同定部 64 では、位置依存摩擦同定部 62 と変位依存摩擦測定部 63 からの入力を受け、変位依存摩擦を同定し、速度依存摩擦同定部 66、加速度依存摩擦同定部 68、モデル送信部 69 に出力する。速度依存摩擦測定部 65 では特定の運動パターンでサーボ制御装置 10 が駆動された時の速度と電流の関係を測定する。

【0036】

速度依存摩擦同定部 66 では、位置依存摩擦同定部 62 と、変位依存摩擦同定部 64 と、速度依存摩擦測定部 65 の入力を受け、速度依存摩擦を同定し、加速度依存摩擦同定部 68 と、モデル送信部 69 に出力する。加速度依存摩擦測定部 67 では、特定の運動パ

10

【0037】

加速度依存摩擦同定部 68 では、位置依存摩擦同定部 62、変位依存摩擦同定部 64 と、速度依存摩擦同定部 66 と、加速度依存摩擦測定部 67 の出力を受け、加速度依存摩擦を同定し、モデル送信部 69 に出力する。モデル送信部 69 では、モデルのパラメータを外乱モデル部 24 に送信する。

【0038】

データテーブルで表現された摩擦モデルのパラメータを同定する方法について以下で述べる。サーボ制御部 14 において外乱モデル部 24 の出力を無効にした状態、すなわち外乱補正值がゼロになるようにした状態で摩擦力の測定と摩擦モデルのパラメータの同定を

20

【0039】

【数 2】

$$F = f - ma \quad \dots(2)$$

【0040】

また、モータの駆動力 f は、モータの電流フィードバック値 I_m とトルク定数 K_t により、次の式 (3) のように計算できる。

【0041】

【数 3】

$$f = K_t I_m \quad \dots(3)$$

【0042】

次に、全摩擦力 F とモータの電流フィードバック値 I_m とそのときのモータ位置 X 、変位 d 、速度 v 、加速度 a の測定結果を用いて段階的にそれぞれの状態量に依存する摩擦モデルのパラメータを同定する。同定のフローチャートを図 7 に示す。この同定プロセスでは、装置に生じる全摩擦力 F を式 (4) に示すように位置 X 、変位 d 、速度 v 、加速度 a の 4 つの状態量で変動すると仮定する。さらに式 (5) に示すように全摩擦力 F を位置 X に依存する摩擦 F_x 、変位 d に依存する摩擦 F_d 、速度 v に依存する摩擦 F_v 、加速度 a に

40

【0043】

【数 4】

$$F = F(X, d, v, a) \quad \dots(4)$$

【数 5】

$$F = F_x(X) + F_d(d) + F_v(v) + F_a(a) \quad \dots(5)$$

【0044】

位置と摩擦力の関係を測定するステップ S1 においては、微小移動と停止を繰り返しな

50

から被駆動体 18 であるテーブルを駆動し、そのときの位置とモータの電流フィードバック値から計算した摩擦力を測定する。図 8 に指令する位置指令の一例を示す。指令するステップ幅と停止時間は、測定対象とする装置の構成によって最適な値が異なるが、一般に位置に依存して変動する摩擦力の発生原因は、案内面或いはボールねじの振れまわりによって生じ、数 mm 程度の周期で変動することが知られているため、0.5 mm ~ 5 mm 程度の予め定めた移動幅を指令することが好ましい。停止時間は、摩擦力が整定するまでに必要な時間であり、制御系の整定時間或いは案内面の潤滑状態によって変化する。経験上、100 ms 以上の停止時間を設定することが好ましい。すなわち、被駆動体 18 の駆動範囲内を予め定めた移動幅で移動と停止を繰り返し、そのときの被駆動体 18 の位置と駆動力を同期して測定する。この運動パターンで測定を実行することにより、位置依存摩擦のみの影響、或いは変位依存摩擦のみの影響を抽出することが可能となる期間を含んだ摩擦力の測定データを得ることができる。

10

【0045】

ステップ S1 で測定した結果を用いて、ステップ S2 では、位置に依存して変動する摩擦力を同定する。ステップ S1 にて、被駆動体 18 であるテーブルが停止中、或いは速度 v がゼロ近傍の予め定めた閾値以下であるときは速度 v 、加速度 a を共にゼロとみなすことができる。従って、テーブルの速度が閾値以下となった期間を検出すれば、その期間においては、速度依存摩擦 F_v と加速度依存摩擦 F_a は共に無視することができる。すると、 i 番目の停止点 X_i における全摩擦力 F に含まれる摩擦成分は、次の式 (6) のようになる。

20

【0046】

【数 6】

$$F = F_x(X_i) + F_c \operatorname{sgn}(x) \quad \dots(6)$$

【0047】

ここで、 sgn は符号関数を表す。一般に運動方向反転位置から数百 μm 以上の変位領域では、変位依存摩擦は一定のクーロン摩擦 F_c とみなすことができる。ここで、復路において変位の絶対値が負となることから次の式 (7) が得られる。

【0048】

【数 7】

$$F = F_x(X_i) + F_c \operatorname{sgn}(-x) = F_x(X_i) - F_c \quad \dots(7)$$

30

【0049】

すなわち、式 (6) と式 (7) から往路と復路の全摩擦力 F の平均値を取ることで、 X_i における位置依存摩擦 $F_x(X_i)$ を同定することができる。すなわち、各測定点で同様の計算を行うことで、位置に 1 対 1 に対応する摩擦力を出力する位置摩擦モデル $F_x(X)$ が得られる。この同定方法により、位置依存摩擦を他の摩擦成分から分離同定することが可能となる。

【0050】

ステップ S3 においては、変位と摩擦力の関係を測定する。このステップでは、ステップ S1 と同様に、図 8 に示した運動パターンで微小な移動幅でテーブルを駆動して測定を行う。ステップ S1 との違いは、指令するステップ幅が微小になることだけである。変位依存摩擦 F_d は、数百 μm 以下の変位の範囲では非線形特性を示す。それ以上の変位領域では、クーロン摩擦領域に入るため、摩擦力は一定値となる。そこで、変位依存摩擦 F_d の非線形特性を同定するためには、数 μm ~ 数十 μm の指令幅を設定することが好ましい。

40

【0051】

ステップ S4 では、変位依存摩擦を同定する。式 (5) より、 i 番目の停止点 d_i において全摩擦力 F は以下の式 (8) のようになる。

【0052】

50

【数 8】

$$F = F_x(X) + F_d(d_i) \quad \dots(8)$$

【0053】

ステップ S 3 で、位置依存摩擦力 F_x は同定されているので、以下の式 (9) に示した方法で、停止位置での摩擦力 $F_x(d_i)$ を計算し、全摩擦力から減算することで変位依存摩擦力 F_d が得られる。すなわち、すべての停止点で同様の計算を行うことで、変位 d に 1 対 1 に対応する摩擦力を出力する変位依存摩擦モデル F_d が得られる。この同定方法により、変位依存摩擦を他の摩擦成分から分離同定することが可能となる。

【0054】

10

【数 9】

$$F_d(d_i) = F - F_x(X) \quad \dots(9)$$

【0055】

ステップ S 5 では、速度と摩擦力の関係を測定する。図 9 に指令する位置指令の一例を示す。ステップ S 5 においては、被駆動体 18 であるテーブルの指令速度を変えながら予め定めた移動幅で、予め定めた速度および予め定めた加速度で往復運動を繰り返す。このときの全摩擦力 F とテーブル位置 X 、速度 v を測定する。一般的に、速度依存摩擦力は、指令速度数百 mm/min 以下では非線形な挙動、数百 mm/min 以上では、線形に近い挙動を示すと言われている。そこで数百 mm/min 以下では、10 mm/min 程度

20

【0056】

図 9 に示した位置指令では、一定速度で移動中の測定時間が等しくなるように移動距離を設定している。ただし、指令速度が大きい場合は、駆動範囲内で測定が終わらない可能性

30

【0057】

ステップ S 6 においては、速度依存摩擦力 F_v を同定する。一定速度で移動中の加速度はゼロであるので、式 (5) を用いて i 番目の指令速度である v_i において、速度依存摩擦力 F_v は以下の式 (10) で求められる。すなわち、全ての指令速度で測定を行うことで、速度 v に 1 対 1 に対応する摩擦力を出力する速度依存摩擦モデル F_v が得られる。

【0058】

【数 10】

$$F_v(v_i) = F - F_x(X) - F_d(d) \quad \dots(10)$$

40

【0059】

ステップ S 7 では、加速度と摩擦力の関係を測定する。このステップにおいては、テーブルの指令加速度を変えながら単純な往復運動を繰り返す、そのときの全摩擦力 F とテーブル位置 X 、速度 v 、加速度 a を測定する。一般的に、加速度依存摩擦力は、2 G 以下程度の加速度において影響が出る場合が多いため、0.1 G 程度の刻み幅で指令加速度を変えて測定を行うことが好ましい。また逆に加速度が小さすぎる場合は、加速度依存摩擦の影響が小さく同定が難しくなる場合があるため、指令加速度の下限は 0.01 G ~ 0.05 G 程度でよい。また、かつ指令速度が速いほど加速に要する時間が長くなり測定の精度が上がるため、指令可能な最高速度で測定を行うことが好ましい。

50

【 0 0 6 0 】

ステップ S 8 では、加速度依存摩擦 F_a を同定する。すなわち、被駆動体 1 8 の加速度が一定となる期間を検出し、その期間における全摩擦力 F に基づいて式 (5) より i 番目の指令加速度における摩擦力は、以下の式 (1 1) のように算出可能である。これにより、測定した摩擦力から加速度依存摩擦を分離同定することが可能となる。

【 0 0 6 1 】

【 数 1 1 】

$$F_a(a_i) = F - F_x(X) - F_d(d) - F_v(v) \quad \dots(11)$$

【 0 0 6 2 】

以上説明したように、被駆動体の位置および速度が目標位置および目標速度に一致するように、摩擦力などの外乱力をモデルを用いて補正する機能を有する装置において、補正に用いる摩擦モデルのパラメータを同定する摩擦同定方法として以上の手順を用いる。

【 0 0 6 3 】

これにより、位置、変位、速度、加速度など複数の状態量によって変動する摩擦力から位置の摩擦力だけを分離可能な測定パターンを用いて位置依存摩擦を同定し、同様に順番に、変位依存摩擦、速度依存摩擦、加速度依存摩擦を測定および分離することができ、効率的にモデルを同定していくことが可能となる。すなわち、段階的に位置、変位、速度、加速度に依存して変化する摩擦力のモデルのパラメータを同定することが効率的に可能となる。

【 0 0 6 4 】

すなわち、本実施の形態にかかる摩擦同定方法を用いることで、複数の状態量の変動が要因となって生じている被駆動体の全摩擦力から位置、変位、速度、加速度の単一の状態量に依存して変動する摩擦力の成分を順次抽出し、モデルのパラメータを同定することが可能となる。これにより、位置依存摩擦、変位依存摩擦、速度依存摩擦、加速度依存摩擦を同定可能な摩擦同定装置を実現することができる。

【 0 0 6 5 】

実施の形態 2 .

本発明の実施の形態 2 にかかる摩擦同定装置 6 a の構成を示すブロック図を図 1 0 に示す。図 1 0 においては、速度・加速度依存摩擦測定部 7 0 が、図 6 の速度依存摩擦測定部 6 5 と加速度依存摩擦測定部 6 7 の機能を備え、速度・加速度依存摩擦同定部 7 1 が、図 6 の速度依存摩擦同定部 6 6 と加速度依存摩擦同定部 6 8 の機能を備えているところが、図 6 とは異なる。

【 0 0 6 6 】

また、摩擦同定方法の具体的なフローチャートを図 1 1 に示す。図 1 1 におけるステップ S 1 ~ S 4 は図 7 のステップ S 1 ~ S 4 と同じである。実施の形態 1 との違いは、図 1 1 のステップ S 9 およびステップ S 1 0 において、速度依存摩擦と加速度依存摩擦の測定及び同定を同時に行う点である。

【 0 0 6 7 】

具体的には、図 1 1 のステップ S 9 において、速度依存摩擦と加速度依存摩擦の同時測定および同定を行うために正弦波状の運動指令を用いる。すなわち、正弦波状の運動指令を与えて、半径を $R 1 \sim R 3 0$ 、指令速度を $1 0 \text{ mm / min}$ から $1 0 0 0 0 \text{ mm / min}$ まで変化させたときの摩擦力を測定する。2 つの制御装置に位相が $9 0$ 度の異なる正弦波指令を与えることで円弧軌跡を描かせることが可能なため、工作機械において正弦波指令は良く用いられる。

【 0 0 6 8 】

正弦波指令を与えたときの、テーブルの位置、速度、加速度の時間波形を図 1 2 に示す。円弧運動軌跡での加速度 a は、円弧の半径 R と円弧の周回速度 v から次の式 (1 2) のように計算される。

【 0 0 6 9 】

10

20

30

40

50

【数 1 2】

$$a = \frac{v^2}{R} \quad \dots(12)$$

【0070】

指令速度と円弧半径を変化させることで、速度 v と加速度 a を独立に変化させて摩擦力を測定することが可能となる。

【0071】

正弦波指令では、位相が 90 度変わるとに速度がゼロになる瞬間と加速度がゼロになる瞬間が交互に存在する。図 12 では、速度、または加速度がゼロになる瞬間を破線で示している。図 11 のステップ S10 においては、測定した摩擦力から速度がゼロになる瞬間、すなわち、速度が予め定めた閾値以下となる期間では、式 (10) に示した方式で速度依存摩擦モデル F_v を同定できる。また加速度がゼロになる瞬間、すなわち、加速度が予め定めた閾値以下となる期間においては、次の式 (13) から加速度依存摩擦モデル F_a が同定できる。

10

【0072】

【数 1 3】

$$F_a(a_i) = F - F_x(X) - F_d(d) \quad \dots(13)$$

【0073】

この運動パターンで測定を実行することにより、正弦波の位相が 90 度変化することにより、速度依存摩擦のみの影響と加速度依存摩擦のみの影響を交互に抽出することが可能となる。すなわち、速度依存摩擦のみの影響と加速度依存摩擦のみの影響を交互に抽出することが可能となる瞬間を含んだ摩擦力の測定データを得ることができる。また、測定した摩擦力から速度依存摩擦を分離同定することが可能となる。

20

【0074】

本実施の形態においては、加速度依存摩擦と速度依存摩擦の測定を同時に行える、すなわち、速度と加速度に依存する摩擦力の影響を一度に測定および同定することが可能となるため、実施の形態 1 よりも短い時間で摩擦モデルのパラメータを同定することが可能になるという効果が得られる。

30

【0075】

実施の形態 3 .

図 13 は、本発明の実施の形態 3 にかかる摩擦同定装置 6 b の構成を示すブロック図である。図 13 には、図 6 に存在した位置依存摩擦測定部 6 1、位置依存摩擦同定部 6 2、加速度依存摩擦測定部 6 7、加速度依存摩擦同定部 6 8 に相当する機能ブロックがない。すなわち、実施の形態 1 との違いは、位置依存摩擦と加速度依存摩擦の測定、同定ステップを省略している点である。

【0076】

精度が良く組み立てられた装置においては、位置依存摩擦の影響をほとんど無視できる場合があり、このような場合は、位置依存摩擦の同定プロセスを省略しても差し支えない。

40

【0077】

装置が転がり案内とボールねじ、あるいは転がり案内とリニアモータで構成されている場合、加速度依存摩擦の影響は小さい。そのため、上記のような構成の装置であれば、加速度依存摩擦の測定および同定を省略することができる。

【0078】

すなわち、精度良く組み立てられた転がり案内とボールねじあるいは、転がり案内とリニアモータで構成されたサーボ制御装置においては、位置依存摩擦と加速度依存摩擦を無視できることがある。このような場合は、変位依存摩擦の測定および同定プロセスと速度依存摩擦の測定および同定プロセスのみを実行すればよく、これにより測定時間および摩

50

摩擦同定時間の短縮が行えるという効果が得られる。

【0079】

実施の形態4.

図14は、本発明の実施の形態4にかかる摩擦同定部の構成の一部を示すブロック図である。実施の形態4においては、摩擦の測定および同定方法は実施の形態1、2、および3と同じである。異なる点としては、位置依存摩擦同定部62、変位依存摩擦同定部64、速度依存摩擦同定部66、加速度依存摩擦同定部68などから出力された位置依存摩擦、変位依存摩擦、速度依存摩擦、および加速度依存摩擦を一旦多項式近似部72に入力し、得られた摩擦力のデータテーブルを多項式近似部72において、多項式で近似した多項式モデルを摩擦モデルとしてモデル送信部69cから出力する点である。

10

【0080】

多項式近似のアルゴリズムとしては、最小二乗法を使った方法など既に多くの方法が公開されているため、多項式近似方法の詳細については省略する。計算時間といった観点から10次程度以下の次数の多項式で近似することが好ましい。

【0081】

この実施の形態により、テーブルデータを使用する場合より少ないパラメータでモデルを得ることができる。従って、データテーブルを送信するよりも、外乱モデル部24に送信するパラメータを少なくできるという効果がある。

【0082】

このように、被駆動体の位置および速度が目標位置および目標速度に一致するように制御する装置のモデルを用いて摩擦力を補正する機能において、補正に用いる摩擦モデルのパラメータを同定する摩擦同定方法および摩擦同定装置として、実施の形態1~4においては位置、変位、速度、加速度など複数の状態量によって変動する摩擦力から順次単一の状態量が摩擦力に与える影響を測定および分離する。これにより、効率的に摩擦モデルのパラメータを同定することが可能となる。

20

【0083】

さらに、本願発明は上記実施の形態に限定されるものではなく、実施段階ではその要旨を逸脱しない範囲で種々に変形することが可能である。また、上記実施の形態には種々の段階の発明が含まれており、開示される複数の構成要件における適宜な組み合わせにより種々の発明が抽出されうる。例えば、上記実施の形態に示される全構成要件からいくつかの構成要件が削除されても、発明が解決しようとする課題の欄で述べた課題が解決でき、発明の効果の欄で述べられている効果が得られる場合には、この構成要件が削除された構成が発明として抽出されうる。更に、異なる実施の形態にわたる構成要素を適宜組み合わせてもよい。

30

【産業上の利用可能性】

【0084】

以上のように、本発明にかかる摩擦同定方法および摩擦同定装置は、数値制御装置などの制御装置によって駆動される工作機械またはロボットなどの制御に用いることができる。特に、装置の負荷能力と加工精度の両立が必要とされる送り系において摩擦のモデルのパラメータを同定する際に適用することができる。

40

【符号の説明】

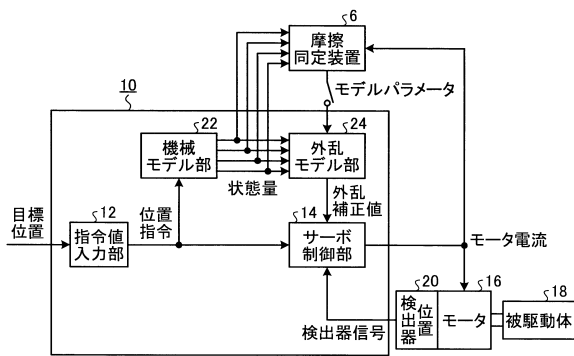
【0085】

10 サーボ制御装置、12 指令値入力部、14 サーボ制御部、16 モータ、18 被駆動体、20 位置検出器、22 機械モデル部、24 外乱モデル部、30a, 30b P制御器、32a, 32b PI制御器、34a 微分器、36a, 36b 積分器、38 トルク定数乗算器、40 送り軸イナーシャ乗算器、42 反転後変位推定器、46 加速度依存外乱モデル、48 速度依存外乱モデル、50 変位依存外乱モデル、52 位置依存外乱モデル、54 加算器、56 トルク定数除算器、6, 6a, 6b 摩擦同定装置、61, 61a 位置依存摩擦測定部、62, 62a 位置依存摩擦同定部、63, 63a, 63b 変位依存摩擦測定部、64, 64a, 64b 変位依存摩

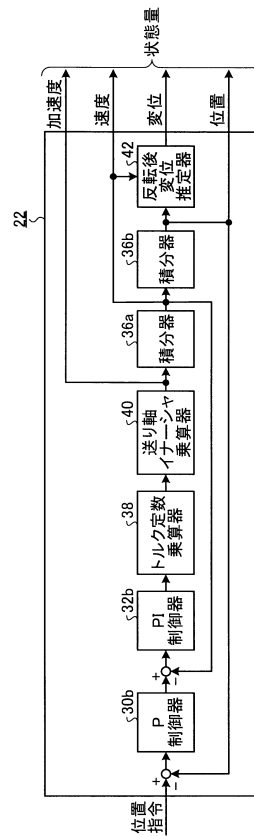
50

擦同定部、65, 65b 速度依存摩擦測定部、66, 66b 速度依存摩擦同定部、67 加速度依存摩擦測定部、68 加速度依存摩擦同定部、69, 69a, 69b, 69c モデル送信部、70 速度・加速度依存摩擦測定部、71 速度・加速度依存摩擦同定部、72 多項式近似部、S1 ~ S10 ステップ。

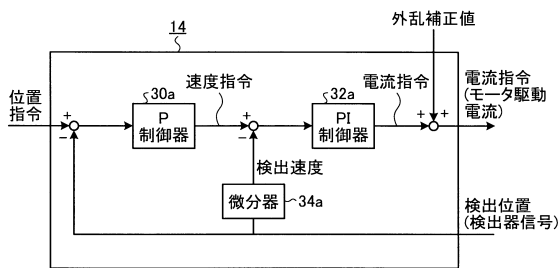
【図1】



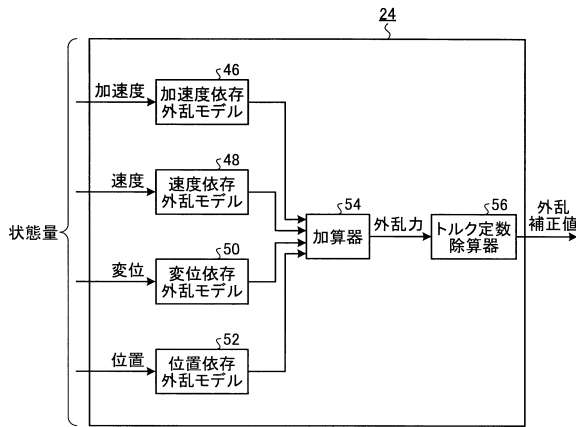
【図3】



【図2】



【図4】



【図5】

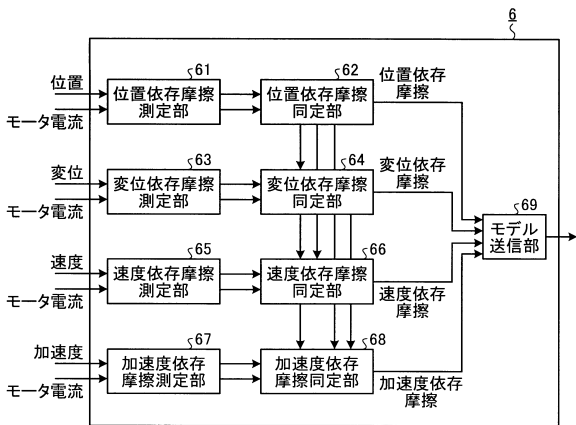
位置[mm]	摩擦補正指令[N]
100	0.5
80	0.4
60	-0.2
40	0.2
20	0.1
0	0
-20	0.1
-40	-0.4
-60	-0.5
-80	0.2
-100	0.1

変位[mm]	摩擦補正指令[N]
100	0.35
80	0.32
60	0.3
40	0.25
20	0.2
0	0
-20	-0.3
-40	-0.32
-60	-0.35
-80	-0.36
-100	-0.36

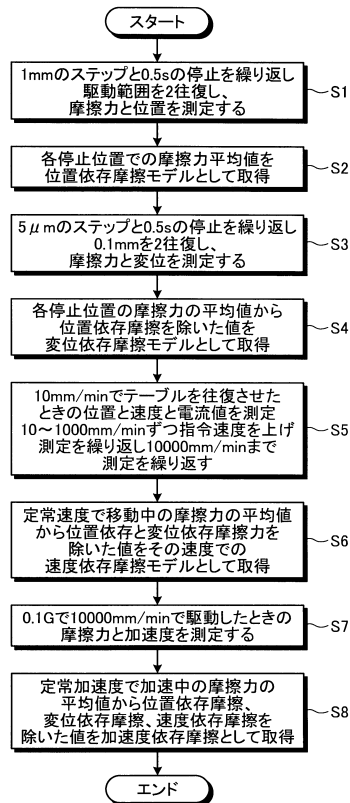
速度[mm/min]	摩擦補正指令[N]
8000	0.3
5000	0.25
1000	0.2
500	0.25
100	0.2
0	0
-100	-0.2
-500	-0.25
-1000	-0.2
-5000	-0.25
-8000	-0.3

加速度[G]	摩擦補正指令[N]
2	0.35
1	0.32
0.5	0.3
0.1	0.25
0.05	0.2
0	0
-0.05	-0.3
-0.1	-0.32
-0.5	-0.35
-1	-0.36
-2	-0.36

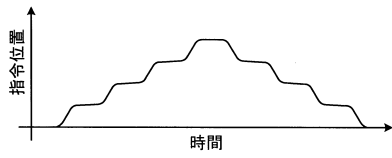
【図6】



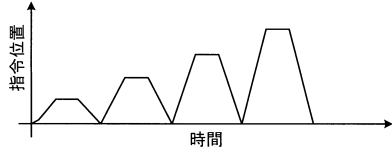
【図7】



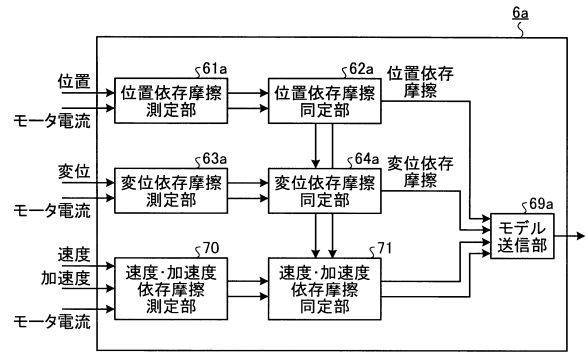
【図8】



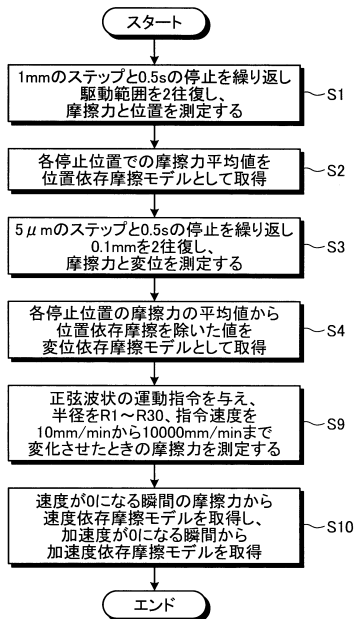
【図9】



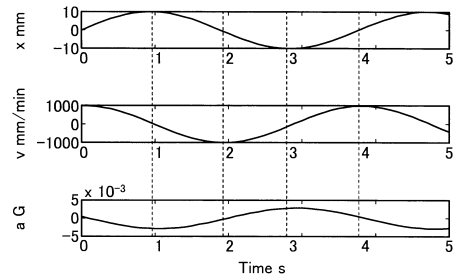
【図10】



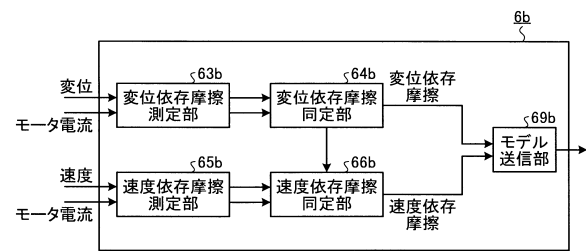
【図11】



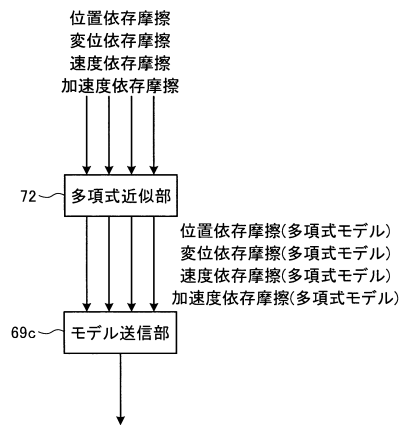
【図12】



【図13】



【 図 1 4 】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2011-175308(JP,A)
特開2007-257515(JP,A)
特開2011-221612(JP,A)
特開2013-225284(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G05D 3/00 - 3/20
G05B 19/404