

(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2015-143969
(P2015-143969A)

(43) 公開日 平成27年8月6日(2015.8.6)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
G05B 19/4063 (2006.01)	G05B 19/4063	L 3C269
G05B 19/416 (2006.01)	G05B 19/416	F
B23Q 15/00 (2006.01)	B23Q 15/00	A
G05B 19/18 (2006.01)	G05B 19/18	W

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 23 頁)

(21) 出願番号 特願2014-181188 (P2014-181188)
 (22) 出願日 平成26年9月5日 (2014.9.5)
 (31) 優先権主張番号 特願2013-271905 (P2013-271905)
 (32) 優先日 平成25年12月27日 (2013.12.27)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

申請有り

(71) 出願人 899000079
 学校法人慶應義塾
 東京都港区三田2丁目15番45号
 (74) 代理人 100106002
 弁理士 正林 真之
 (74) 代理人 100120891
 弁理士 林 一好
 (72) 発明者 柿沼 康弘
 神奈川県横浜市港北区日吉3丁目14番1号 慶應義塾大学工学部内
 (72) 発明者 山田 雄基
 神奈川県横浜市港北区日吉3丁目14番1号 慶應義塾大学工学部内
 Fターム(参考) 3C269 AB01 BB01 BB17 CC11 GG06
 MN04 MN29

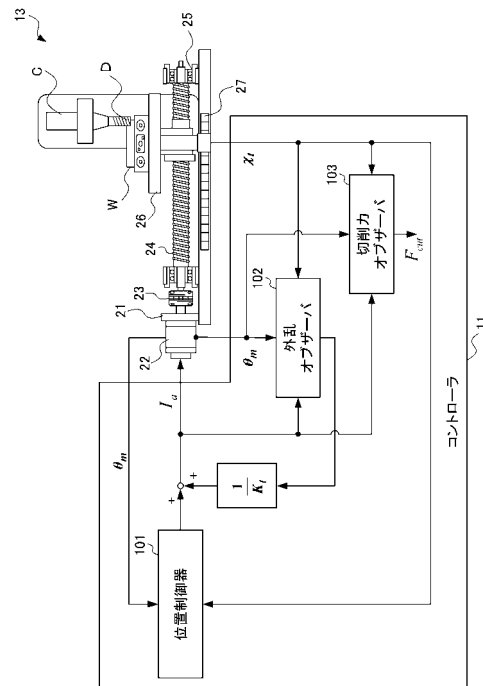
(54) 【発明の名称】 工作機械制御装置、工作機械制御方法、及びプログラム

(57) 【要約】

【課題】 付加的なセンサを用いることなく、かつ、ボールねじ駆動ステージに適用して好適な加工力推定の技術を実現すること。

【解決手段】 ワークWが積載されたステージ26と、モータ21と、ボールねじ24とを含むボールねじ駆動ステージ13に対して、コントローラ11は制御を実行する。即ち、位置制御器101は、出力情報として負荷のx方向の位置xtを取得すると共に、状態情報としてモータ21の回転角mを取得し、出力情報及び状態情報に基づいて、負荷のx方向の位置を制御すべく、入力情報として電流参照値Iarefを変化させる。切削力オブザーバ103は、出力情報と状態情報と入力情報とをパラメータとして用いる、ボールねじ駆動ステージ13の多慣性系モデルに基づいて、切削工具DによるワークWに対する切削力を推定する。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

工作機械の加工具又はそのワークが積載されたステージを負荷として駆動する駆動機構であって、電流に応じたトルクを発生するモータと、前記モータにおける回転運動を所定方向の直線運動に変換して当該所定方向に前記負荷を移動させる直動機構とを含む駆動機構に対して、制御を実行する工作機械制御装置において、

前記駆動機構の出力情報として前記負荷の前記所定方向の位置を取得すると共に、前記駆動機構の内部の状態を示す状態情報として前記モータの回転角を取得し、当該出力情報及び当該状態情報に基づいて、前記駆動機構の入力情報としての前記電流の指令値を変化させることで、前記負荷の前記所定方向の位置を制御する位置制御手段と、

10

前記出力情報と前記状態情報と前記入力情報とをパラメータとして用いる、前記駆動機構の多慣性系モデルに基づいて、前記加工具による前記ワークに対する加工力を推定する加工力推定手段と、

を備える工作機械制御装置。

【請求項 2】

前記加工力推定手段は、さらに、高周波ノイズ抑制用のローパスフィルタを用いて、前記加工力を推定する、

請求項 1 に記載の工作機械制御装置。

【請求項 3】

前記ローパスフィルタは、バターワースフィルタである、

20

請求項 2 に記載の工作機械制御装置。

【請求項 4】

前記加工力推定手段は、さらに、前記多慣性系モデルに含まれる擬似微分による遅れ、及び、前記モータのトルクの電氣的遅れを補償する遅れ補償用フィルタを用いて、前記加工力を推定する、

請求項 1 ~ 3 のうち何れか 1 項に記載の工作機械制御装置。

【請求項 5】

前記加工力推定手段は、さらに、むだ時間要素を用いて、前記加工力を推定する、

請求項 4 に記載の工作機械制御装置。

【請求項 6】

30

前記出力情報と前記状態情報と前記入力情報とに基づいて外乱を推定し、推定した当該外乱に基づいて前記電流の指令値を補償する補償手段、

をさらに備える請求項 1 ~ 5 のうち何れか 1 項に記載の工作機械制御装置。

【請求項 7】

前記加工力推定手段は、前記状態情報として、前記直動機構において直線運動に変換された回転角をさらに用いる請求項 1 ~ 6 のうち何れか 1 項に記載の工作機械制御装置。

【請求項 8】

工作機械の加工具又はそのワークが積載されたステージを負荷として駆動する駆動機構であって、電流に応じたトルクを発生するモータと、前記モータにおける回転運動を所定方向の直線運動に変換して当該所定方向に前記負荷を移動させる直動機構とを含む駆動機構に対して、工作機械制御装置が実行する工作機械制御方法であって、

40

前記駆動機構の出力情報として前記負荷の前記所定方向の位置を取得すると共に、前記駆動機構の内部の状態を示す状態情報として前記モータの回転角を取得し、当該出力情報及び当該状態情報に基づいて、前記駆動機構の入力情報としての前記電流の指令値を変化させることで、前記負荷の前記所定方向の位置を制御する位置制御ステップと、

前記出力情報と前記状態情報と前記入力情報とをパラメータとして用いる、前記駆動機構の多慣性系モデルに基づいて、前記加工具による前記ワークに対する加工力を推定する加工力推定ステップと、

を含む工作機械制御方法。

【請求項 9】

50

工作機械の加工具又はそのワークが積載されたステージを負荷として駆動する駆動機構であって、電流に応じたトルクを発生するモータと、前記モータにおける回転運動を所定方向の直線運動に変換して当該所定方向に前記負荷を移動させる直動機構とを含む駆動機構に対して制御を実行するコンピュータに、

前記駆動機構の出力情報として前記負荷の前記所定方向の位置を取得すると共に、前記駆動機構の内部の状態を示す状態情報として前記モータの回転角を取得し、当該出力情報及び当該状態情報に基づいて、前記駆動機構の入力情報としての前記電流の指令値を変化させることで、前記負荷の前記所定方向の位置を制御する位置制御ステップと、

前記出力情報と前記状態情報と前記入力情報とをパラメータとして用いる、前記駆動機構の多慣性系モデルに基づいて、前記加工具による前記ワークに対する加工力を推定する加工力推定ステップと、

を含む制御処理を実行させるプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、付加的なセンサを用いることなく、かつ、ボールねじ駆動ステージに適用して好適な加工力推定の技術を実現可能な、工作機械制御装置、工作機械制御方法、及びプログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

切削や研削を行う工作機械においては、加工中の振動や工具の状態を判断するために、切削力等の加工力を監視することが有用である。従来、加工力を監視するために、力センサ等の付加的なセンサを用いる技術が一般的に採用されている。

しかしながら、このような一般的な技術では、コストの増加や機械剛性の低下を招く。

このため、本発明者らは、付加的なセンサを不要とする加工力推定の技術を開発済みである（特許文献1参照）。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2010-271880号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、特許文献1に記載の加工力推定の技術は、リニアモータステージに適用して好適であるものの、工作機械の駆動機構として広く採用されているボールねじ駆動ステージに適用して好適であるとまでは言い難かった。

このため、付加的なセンサを用いることなく、かつ、ボールねじ駆動ステージに適用して好適な加工力推定の技術の実現が要望されている。

【0005】

本発明は、このような状況に鑑みてなされたものであり、付加的なセンサを用いることなく、かつ、ボールねじ駆動ステージに適用して好適な加工力推定の技術を実現することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明の一側面の工作機械制御装置は、

工作機械の加工具又はそのワークが積載されたステージを負荷として駆動する駆動機構であって、電流に応じたトルクを発生するモータと、前記モータにおける回転運動を所定方向の直線運動に変換して当該所定方向に前記負荷を移動させる直動機構とを含む駆動機構に対して、制御を実行する工作機械制御装置である。

そして、本発明の一側面の工作機械制御装置は、

10

20

30

40

50

前記駆動機構の出力情報として前記負荷の前記所定方向の位置を取得すると共に、前記駆動機構の内部の状態を示す状態情報を取得し、当該出力情報及び当該状態情報に基づいて、前記駆動機構の入力情報としての前記電流の指令値を変化させることで、前記負荷の前記所定方向の位置を制御する位置制御手段と、

前記出力情報と前記状態情報と前記入力情報とをパラメータとして用いる、前記駆動機構の多慣性系モデルに基づいて、前記加工具による前記ワークに対する加工力を推定する加工力推定手段と、

を備えることを特徴とする。

【0007】

ここで、本発明の一側面の工作機械制御装置においては、
前記加工力推定手段は、さらに、高周波ノイズ抑制用のローパスフィルタを用いて、前記加工力を推定する、
こともできる。

10

【0008】

また、本発明の一側面の工作機械制御装置においては、
前記ローパスフィルタは、バターワースフィルタである、
こともできる。

【0009】

さらに、本発明の一側面の工作機械制御装置においては、
前記加工力推定手段は、さらに、前記多慣性系モデルに含まれる擬似微分による遅れ、
及び、前記モータのトルクの電氣的遅れを補償する遅れ補償用フィルタを用いて、前記加工力を推定する、
ようにすることもできる。

20

【0010】

また、本発明の一側面の工作機械制御装置においては、
前記加工力推定手段は、さらに、むだ時間要素を用いて、前記加工力を推定する、
こともできる。

【0011】

さらにまた、本発明の一側面の工作機械制御装置は、
前記出力情報と前記状態情報と前記入力情報とに基づいて外乱を推定し、推定した当該
外乱に基づいて前記電流の指令値を補償する補償手段、
をさらに備えることもできる。

30

【0012】

また、本発明の一側面の工作機械制御装置においては、
前記加工力推定手段は、前記状態情報として、前記直動機構において直線運動に変換された回転角をさらに用いる、
こともできる。

【0013】

また、本発明の一側面の工作機械制御方法及びプログラムの夫々は、上述の本発明の一側面の工作機械制御装置に対応する方法及びプログラムの夫々である。

40

【発明の効果】

【0014】

本発明によれば、付加的なセンサを用いることなく、かつ、ボールねじ駆動ステージに適用して好適な加工力推定の技術を実現することが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図1】本発明の工作機械制御装置の第1実施形態に係るコントローラを含む、工作機械システムの概要を示す模式図である。

【図2】図1の工作機械システムのうちコントローラのハードウェアの構成を示すブロック図である。

50

【図 3】図 2 のコントローラの機能的構成のうち、位置制御及び切削力推定を実行する場合の機能的構成を示す機能ブロック図である。

【図 4】本発明が適用される切削力推定手法の概要を説明するための図であって、図 1 の工作機械システムで切削を行う際にボールねじ駆動ステージに作用する力を示した図である。

【図 5】図 3 のコントローラのうち、切削力オブザーバの詳細な機能的構成を示す機能ブロック図である。

【図 6】図 1 の工作機械システムのシミュレーションの結果であって、入力周波数に対する切削力の推定値のゲイン特性を示す図である。

【図 7】図 1 の工作機械システムの実機による試験のうち、送り速度が一定であって工具回転速度の指令を低速にした場合の実機による試験の結果を示す図である。

【図 8】図 1 の工作機械システムの実機による試験のうち、送り速度が一定であって工具回転速度の指令を高速にした場合の実機による試験の結果を示す図である。

【図 9】図 1 の工作機械システムの実機による試験として加減速を伴う送り速度の試験をした際に採用した、当該送り速度の時間推移を示す図である。

【図 10】図 1 の工作機械システムの実機による試験のうち、加減速を伴う送り速度であって工具回転速度の指令を低速にした場合の実機による試験の結果を示す図である。

【図 11】図 1 の工作機械システムの実機による試験のうち、加減速を伴う送り速度であって工具回転速度の指令を高速にした場合の実機による試験結果を示す図である。

【図 12】第 2 実施形態に係る切削力オブザーバの詳細な機能的構成を示す機能ブロック図である。

【図 13】第 2 実施形態に係る信号間における伝達関数の理論計算結果を示すボード線図である。

【図 14】第 2 実施形態に係る推定に用いられる信号の計測値の一例を示す図である。

【図 15】第 2 実施形態に係るむだ時間要素を用いた遅れ補償の有無による推定精度の比較結果を示す図である。

【図 16】第 2 実施形態に係るむだ時間要素を用いた遅れ補償を行った場合の 1 慣性系と 2 慣性系との推定精度の比較結果を示す図である。

【図 17】第 3 実施形態に係るボールねじ駆動ステージの構成と共に、コントローラの機能的構成を示すブロック図である。

【図 18】第 3 実施形態に係るボールねじ駆動ステージに作用する力を示した図である。

【図 19】第 3 実施形態に係る切削力オブザーバの詳細な機能的構成を示す機能ブロック図である。

【図 20】第 3 実施形態に係る切削力オブザーバを 1 慣性系、2 慣性系及び 3 慣性系として設計したときの切削力の推定結果を比較して示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0016】

[第 1 実施形態]

以下、本発明の第 1 実施形態について、図面を用いて説明する。

【0017】

図 1 は、本発明の工作機械制御装置の一実施形態に係るコントローラ 11 を含む、工作機械システム 1 の概要を示す模式図である。

【0018】

図 1 に示すように、本実施形態の工作機械システム 1 は、コントローラ 11 と、サーボアンプ 12 と、ボールねじ駆動ステージ 13 とを備えている。

【0019】

コントローラ 11 は、サーボアンプ 12 を介して、ボールねじ駆動ステージ 13 に対して位置制御を実行すると共に、後述の切削力を推定することができる制御装置（サーボコントローラ）である。

【0020】

10

20

30

40

50

サーボアンプ 12 は、ボールねじ駆動ステージ 13 を駆動するためのモータ 21 に対して、コントローラ 11 からの指令値に応じた電流 I_a を流すことで、当該モータ 21 のトルクの大きさを制御するドライブ装置である。なお、以下、モータ 21 のトルクを、摩擦トルクと区別すべく、「モータトルク」と呼ぶ。

【0021】

ボールねじ駆動ステージ 13 は、モータ 21 と、ロータリエンコーダ 22 と、カップリング 23 と、ボールねじ 24 と、ベアリング 25 と、ステージ 26 と、リニアエンコーダ 27 と、を備える。

【0022】

モータ 21 は、サーボアンプ 12 からの電流 I_a に応じたモータトルクを発することで、カップリング 23 を介してボールねじ 24 のねじ軸を回転駆動する。

ロータリエンコーダ 22 は、モータ 21 の回転角 θ を検出し、当該回転角 θ を、ボールねじ駆動ステージ 13 の内部の状態を示す情報（以下、「状態情報」と呼ぶ）として、サーボアンプ 12 を介してコントローラ 11 にフィードバックする。

カップリング 23 は、モータ 21 の回転軸の一端と、ボールねじ 24 のねじ軸の一端を接続する。

ボールねじ 24 は、ねじ軸の両端がベアリング 25 に支軸され、ナットがステージ 26 に取り付けられ、モータ 21 からカップリング 23 を介して伝達された回転運動を直線運動に変換することで、当該ステージ 26 をねじ軸に沿って移動させる。

なお、以下、ボールねじ 24 のねじ軸に平行な方向（図 1 中横方向）を、「x 方向」と呼ぶ。

ベアリング 25 は、ボールねじ 24 のねじ軸を支持する。

ステージ 26 は、後述の図 3 に示すワーク W を積載し、ボールねじ 24 により x 方向に移動する。

リニアエンコーダ 27 は、ステージ 26 の x 方向の位置 x_t を検出して、当該位置 x_t を、ボールねじ駆動ステージ 13 の出力情報として、コントローラ 11 にフィードバックする。

【0023】

図 2 は、図 1 の工作機械システム 1 のうちコントローラ 11 のハードウェアの構成を示すブロック図である。

【0024】

コントローラ 11 は、CPU (Central Processing Unit) 31 と、ROM (Read Only Memory) 32 と、RAM (Random Access Memory) 33 と、バス 34 と、入出力インターフェース 35 と、入力部 36 と、出力部 37 と、記憶部 38 と、通信部 39 と、ドライブ 40 とを備えている。

【0025】

CPU 31 は、ROM 32 に記録されているプログラム、又は、記憶部 38 から RAM 33 にロードされたプログラムに従って各種の処理を実行する。

RAM 33 には、CPU 31 が各種の処理を実行する上において必要なデータ等も適宜記憶される。

【0026】

CPU 31、ROM 32 及び RAM 33 は、バス 34 を介して相互に接続されている。このバス 34 にはまた、入出力インターフェース 35 も接続されている。入出力インターフェース 35 には、入力部 36、出力部 37、記憶部 38、通信部 39、及びドライブ 40 が接続されている。

【0027】

入力部 36 は、キーボードやマウス等で構成され、ユーザの指示操作に応じて各種情報を入力する。

出力部 37 は、ディスプレイやスピーカ等で構成され、画像や音声を出力する。

記憶部 38 は、ハードディスク等で構成され、各種情報のデータを記憶する。

10

20

30

40

50

通信部 39 は、ネットワークを介して他の端末（図示せず）との間で行う通信を制御すると共に、本実施形態では図 1 に示すように、サーボアンプ 12 に対する指令値を出力したり、フィードバック情報をサーボアンプ 12 又はリニアエンコーダ 27 から入力するための通信を制御したりする。

【0028】

ドライブ 40 には、磁気ディスク、光ディスク、光磁気ディスク、或いは半導体メモリ等よりなる、リムーバブルメディア 51 が適宜装着される。ドライブ 40 によってリムーバブルメディア 51 から読み出されたプログラムは、必要に応じて記憶部 38 にインストールされる。また、リムーバブルメディア 51 は、記憶部 38 に記憶されている各種データも、記憶部 38 と同様に記憶することができる。

10

【0029】

図 3 は、図 2 のコントローラ 11 の機能的構成のうち、位置制御及び切削力推定を実行する場合の機能的構成を示す機能ブロック図である。

【0030】

コントローラ 11 により位置制御及び切削力推定が実行される場合には、図 3 に示すように、位置制御器 101 と、外乱オブザーバ 102 と、切削力オブザーバ 103 とを含む機能ブロックが、CPU 31 等（図 2）において機能する。

【0031】

コントローラ 11 による位置制御が実行されると、ワーク W が積載されたステージ 26 は、x 方向に移動し、独立に設置された z 軸ステージ（図示はしないが、x 軸のステージ 26 と同様の構成を取り、z 軸方向の力推定が可能）に取り付けられた工具スピンドル C の位置を調整し、当該ワーク W が切削工具 D により切削される。

20

【0032】

具体的にはこのような位置制御は、コントローラ 11 のうち主に位置制御器（PID コントローラ＋フィードフォワード機能を含む）101 において実行される。

即ち、位置制御器 101 は、モータ 21 の回転角 m を状態情報として、ロータリエンコーダ 22 から（図 3 に図示せぬサーボアンプ 12 を介して）取得すると共に、ステージ 26 の x 方向の位置 x_t を出力情報としてリニアエンコーダ 27 から取得する。位置制御器 101 は、これらの状態情報及び出力情報に基づいて、ステージ 26 の x 方向の位置 x_t を制御すべく、モータ 21 の電流 I_a の指令値を出力する。

30

【0033】

ここで、位置制御器 101 から出力された指令値自体を、ボールねじ駆動ステージ 13 に対する入力情報として採用してもよい。

しかしながら、本実施形態では、位置制御器 101 から出力された指令値に対して、外乱オブザーバ 102 により生成された補償電流が加算された値が、入力情報として採用されている。なお、以下、入力情報となる、モータ 21 の電流 I_a の指令値を、特に「電流参照値 $I_{a\text{ref}}$ 」と呼ぶ。

【0034】

即ち、外乱オブザーバ 102 は、電流参照値 $I_{a\text{ref}}$ （入力情報）、モータ 21 の回転角 m （状態情報）、及びステージ 26 の x 方向の位置 x_t （出力情報）に基づいて外乱を推定し、当該外乱を補償してシステムのロバスト性を高めるための補償トルクを生成する。このようにして外乱オブザーバ 102 により生成された補償トルクは、図 3 に示すように（ $1/K_t$ ）倍されることで補償電流となる。

40

なお、外乱オブザーバ 102 のさらなる詳細については、本出願人により既に出願されて公開された特開 2010-271880 号公報を参照するとよい。

【0035】

このような本実施形態の位置制御が実行されて、ステージ 26 に積載されたワーク W が x 方向に移動して切削工具 D の刃に当切すると、切削工具 D は切削力 F_{cut} を発生して、当該切削力によりワーク W を切削する。

切削力オブザーバ 103 は、この切削力 F_{cut} を推定する。

50

ここで、本実施形態のボールねじ駆動ステージ 13 に対する位置制御としては、モータ 21 の回転角 θ_m (状態情報) がフィードバックされるのみならず、ステージ 26 の x 方向の位置 x_t (出力情報) もリニアエンコーダ 27 により直接検出されてフィードバックされる制御、即ちフルクロード制御が採用されている。

従って、切削力オブザーバ 103 は、ボールねじ駆動ステージ 13 の内部情報、即ち、電流参照値 I_{ref} (入力情報)、ステージ 26 の x 方向の位置 x_t (出力情報)、及びモータ 21 の回転角 θ_m (状態情報) を用いて、切削力 F_{cut} を推定することができる。このように、切削力オブザーバ 103 は、これら 3 つの内部情報を用いることで、従来の入出力情報だけを用いる外乱オブザーバによる切削力推定手法と比較して、推定精度を著しく向上することができる。

10

【0036】

さらに以下、このような切削力オブザーバ 103 に採用された切削力推定手法、即ち、本発明が適用される切削力推定手法について、図 4 を参照して説明する。

図 4 は、本発明が適用される切削力推定手法の概要を説明するための図であって図 3 等の工作機械システム 1 で切削を行う際にボールねじ駆動ステージ 13 に作用する力を示した図である。

【0037】

図 4 においては、ボールねじ駆動ステージ 13 は、回転系のモータ 21 と、その負荷たる直動系のステージ 26 (ワーク W が積載された状態) とを慣性とする、2 慣性系モデルとして表現されている。そして、モータ 21 のモータトルク $K_t \times I_a$ (K_t はトルク定数) による回転移動に対して摩擦トルク T_{fric} が存在し、かつ、ステージ 26 の x 方向への直動に対して摩擦力 F_{fric} が存在することが前提とされている。

20

このような前提の下、モータ 21 の軸の回転運動が、ボールねじ 24 (図 3 等) において、そのねじ軸に平行な x 方向の直線運動に変換されて、質量 M_t の負荷 (ワーク W が積載されたステージ 26) が移動量 x_t だけ移動する。その際、ワーク W に対して切削工具 D が切り込むことにより、切削力 F_{cut} が生ずる。

【0038】

このような図 4 の 2 慣性系モデルについての運動方程式は、次の式 (1) 及び (2) に示されるようになる。

【数 1】

$$J_r \ddot{\theta}_m = K_t I_a^{ref} - T_{fric} - R K_r (R \theta_m - x_t) \quad \dots (1)$$

$$M_t \ddot{x}_t = K_r (R \theta_m - x_t) - F_{fric} - F_{cut} \quad \dots (2)$$

【0039】

式 (1) 及び式 (2) において、 J_r は慣性モーメントを、 K_r はボールねじ 24 のねじ軸の軸方向剛性を、 R は回転系と直動系の変換係数を、夫々示している。また、式 (1) において、 ref が右上添え字として付された I_a は、電流参照値 I_{ref} を示している。

40

【0040】

さらに、式 (1) と式 (2) を連立することで、反力の項を消去することができ、切削力 F_{cut} は、次の式 (3) に示されるようになる。

【数 2】

$$F_{cut} = \frac{1}{R} (K_t I_a^{ref} - J_r \ddot{\theta}_m) - M_t \ddot{x}_t - \frac{1}{R} T_{fric} - F_{fric} \quad \dots (3)$$

【0041】

さらに、予め推定された摩擦トルク T_{fric} 及び摩擦力 F_{fric} を用い、かつ、高周波ノイズ抑制用のローパスフィルタを用いることで、切削力 F_{cut} の推定値は、次の

50

式(4)に示されるようになる。即ち、式(4)に従って切削力Fcutを推定する機能ブロックが、図3の切削力オブザーバ103である。

【数3】

$$\hat{F}_{cut} = \frac{g_{cut}}{s + g_{cut}} \left[\frac{1}{R_n} (K_{tn} I_a^{ref} - J_{rn} \ddot{\theta}_m) - M_{tn} \ddot{x}_t - \frac{1}{R_n} \hat{T}_{fric} - \hat{F}_{fric} \right] \quad \dots (4)$$

式(4)においては、推定値を示すパラメータには、推定であることを示す「ハット」が付されている。gcutは、切削力オブザーバ103の遮断周波数を示しており、各パラメータの右下添え字nは、ノミナル値を示す。

【0042】

上述したように、本実施形態の位置制御はフルクロード制御であるため、コントローラ11は、電流参照値Iaref(入力情報)及びモータ21の回転角m(状態情報)に加えて、リニアエンコーダ27(図3)から供給されるステージ26の位置xt(出力情報)も測定できる。

これにより、コントローラ11の切削力オブザーバ103は、式(4)に従って、力センサ等の付加的なセンサを用いることなく、ボールねじ駆動ステージ13における切削力Fcutを精度よく推定することができる。

さらに、本実施形態では、上述したように外乱オブザーバ102(図3)も設けられている。この外乱オブザーバ102によるキャンセレーションにより、パラメータ変動の影響を低減することができ、その結果、切削力オブザーバ103の推定精度がさらに向上する。

【0043】

図5は、このような切削力オブザーバ103の詳細な機能的構成を示す機能ブロック図である。

【0044】

電流参照値Iaref(入力情報)は、機能ブロック111を経由して機能ブロック112を通過することで、モータトルクTm(=Ktn×Ia)の推定値として、機能ブロック115に供給される。

ここで、機能ブロック111は、モデルに含まれる擬似微分による遅れを補償する機能ブロック131と、モータトルクTmの電氣的遅れ(wccを電流制御系の帯域幅とした一次遅れ)を補償する機能ブロック132とを有している。即ち、機能ブロック111は、モデルに含まれる擬似微分による遅れ、及びモータトルクTmの電氣的遅れを補償する遅れ補償用フィルタとして機能する。このような遅れ補償用フィルタを適用することにより、高周波成分の推定精度がさらに向上する。

【0045】

モータ21の回転角m(状態情報)は、機能ブロック113及び機能ブロック114を通過することで、2階微分されて慣性モーメントJrが乗算される。

【0046】

機能ブロック115において、機能ブロック112の出力から機能ブロック114の出力が減算され、さらに、機能ブロック116において(1/Rn)倍されることで、式(4)の中かっこ内の第1項が演算される。

【0047】

ステージ26のx方向の位置xt(出力情報)は、機能ブロック117及び機能ブロック118を通過することで、2階微分されて質量Mtが乗算される。即ち、式(4)の中かっこ内の第2項が演算される。

【0048】

機能ブロック119において、機能ブロック116の出力である式(4)の中かっこ内の第1項から、機能ブロック118の出力である式(4)の中かっこ内の第2項が減算され、さらに、機能ブロック120において、式(4)の中かっこ内の第3項の値121(予め推定された値121)が減算されることで、式(4)の中かっこが演算される。

10

20

30

40

50

機能ブロック120の出力(式(4)の中かっこの演算値)は、機能ブロック122を通過することで高周波ノイズが抑制され、切削力 F_{cut} の推定値として出力される。即ち、機能ブロック122は、高周波ノイズ抑制用のローパスフィルタとして機能する。

【0049】

以上、図1～図5を参照して、本実施形態の工作機械システム1について説明した。

本発明人は、このような本実施形態の工作機械システム1における切削力オブザーバ103の有効性を検証すべく、シミュレーションと、実機による試験とを行った。

先ず、図6を参照してシミュレーションについて説明し、次に、図7～図11を参照して実機による試験について説明する。

【0050】

図6は、シミュレーションの結果であって、入力周波数に対する切削力 F_{cut} の推定値のゲイン特性を示す図である。

図6において、実線の「Proposed method」が、本実施形態の切削力オブザーバ103の特性を示している。点線の「Previous method」が、従来の切削力オブザーバの特性を示している。ここで、従来の切削力オブザーバとは、ボールねじ駆動ステージ13の運動を1慣性系とみなしてモデル化し、入力情報及び出力情報のみを用いて切削力推定をしたものをいう(状態情報は含まない)。

本実施形態の切削力オブザーバ103及び従来の切削力オブザーバの遮断周波数 g_{cut} は、 3000 rad/s とした。

また、ボールねじ駆動ステージ13のねじ軸の方向(x方向)の共振周波数 s は、 445 Hz である。

共振周波数 s において、従来の切削力オブザーバではゲインが高くなる(ピークを持つ)のに対して、本実施形態の切削力オブザーバ103ではゲインは高くなっていない(ピークを持たない)。

このように、本実施形態の切削力オブザーバ103は、共振の影響を受けることない切削力 F_{cut} の推定、即ちより高帯域な切削力 F_{cut} の推定をすることができる。

【0051】

次に、図7～図11を参照して実機による試験について説明する。

【0052】

先ず、本発明者は、ステージ26の送り速度を一定にして、切削工具Dにエンドミルを用いて、工具スピンドルCの指令を低速の 1000 min^{-1} にした場合と高速の 10000 min^{-1} にした場合との夫々について、実機による溝加工試験をした。

図7は、送り速度が一定であって工具回転の指令を低速の 1000 min^{-1} にした場合の実機による試験結果を示している。

図8は、送り速度が一定であって工具回転の指令を高速の 10000 min^{-1} にした場合の実機による試験結果を示している。

【0053】

図7及び図8において、実線の「本手法」が、本実施形態の切削力オブザーバ103の切削力 F_{cut} の推定値を、点線の「従来法」が、従来の切削力オブザーバの切削力 F_{cut} の推定値を、一点鎖線の「実測値」が、力センサによる切削力 F_{cut} の測定値を、夫々示している。なお、これらの点については、後述する図10及び図11においても同様である。

【0054】

図7に示すように、送り速度が一定の場合であって工具スピンドルCの回転数の指令が低速の 1000 min^{-1} の場合には、本実施形態の切削力オブザーバ103についても、従来の切削力オブザーバについても、切削力 F_{cut} の推定値は実測値に近く、推定精度はさほど変わりはない。

しかしながら、図8に示すように、送り速度が一定の場合であって工具スピンドルCの回転数の指令が高速の 10000 min^{-1} になると、本実施形態の切削力オブザーバ103の方が、従来の切削力オブザーバと比較して、切削力 F_{cut} の推定値が実測値に近

10

20

30

40

50

くなること、即ち推定精度がより高くなることがわかる。

【0055】

次に、本発明者らは、図9に示すようなステージ26に加減速を伴う送り速度で、工具スピンドルCの回転数の指令を低速の1000min⁻¹にした場合と高速の10000min⁻¹にした場合との夫々について、切削工具Dにエンドミルを用いて実機による溝加工試験をした。

【0056】

図9は、ステージ26に与えた送り速度の時間推移を示している。図9に示すように、送り速度の波形としては、平均値が30mm/minであって、変動幅が約20mm/minである、5Hzの正弦波が採用された。このように加減速を伴う送り速度を指令値として採用することは、制御系が慣性力を受けることを意味する。従って、本試験により、慣性力にどれだけ影響されずに切削力Fcutを精度よく推定できるのかについて検証することができる。

【0057】

図10は、加減速を伴う送り速度であって工具スピンドルCの回転数の指令を低速の1000min⁻¹にした場合の実機による試験結果を示している。

図11は、加減速を伴う送り速度であって工具スピンドルCの回転数の指令を高速の10000min⁻¹にした場合の実機による試験結果を示している。

【0058】

図10に示すように、加減速を伴う送り速度であって工具スピンドルCの回転数の指令が低速の1000min⁻¹の場合には、本実施形態の切削力オブザーバ103についても、従来の切削力オブザーバについても、切削力Fcutの推定値は実測値に近く、推定精度はさほど変わりはない。即ち、本実施形態の切削力オブザーバ103についても、従来の切削力オブザーバについても、慣性力の影響を受けずに切削力Fcutを精度よく推定できている。

しかしながら、図11に示すように、加減速を伴う送り速度であって工具スピンドルCの回転数の指令が高速の10000min⁻¹になると、本実施形態の切削力オブザーバ103の方が、従来の切削力オブザーバと比較して、切削力Fcutの推定値が実測値に近くなること、即ち推定精度がより高くなることがわかる。換言すると、本実施形態の切削力オブザーバ103の方が、従来の切削力オブザーバよりも、慣性力がより正確に補償され、その結果として、切削力Fcutを精度よく推定できていることがわかる。

【0059】

[第2実施形態]

以下、本発明の第2実施形態について、図面を用いて説明する。なお、第1実施形態と同様の構成については、同一の符号を付し、説明を省略又は簡略化する。

本実施形態は、第1実施形態と比べて、遅れ補償性能及び高域ノイズ抑圧性能をさらに向上させる構成である。

【0060】

図12は、切削力オブザーバ103aの詳細な機能的構成を示す機能ブロック図である。

本実施形態では、第1実施形態と比べて、さらに、むだ時間要素の機能ブロック123、124及び125が設けられている。

【0061】

これらのむだ時間要素は、制御系内の情報を取得する過程等で生じるむだ時間が大きいために、推定に用いられる信号(Ia、m、xt)間の位相差が大きく、第1実施形態の一次遅れフィルタでは十分に補正できない場合に用いられる。

なお、むだ時間T1、T2、T3は、計測結果により同定して設定される。

【0062】

また、本実施形態では、第1実施形態における一次遅れフィルタとしての機能ブロック122に替えて、6次のバターワースフィルタで構成される機能ブロック126が設けら

10

20

30

40

50

れている。これにより、高域のノイズ抑圧性能がさらに向上する。

【0063】

図13は、推定に用いられる信号 (I_a 、 m 、 x_t) 間における伝達関数の理論計算結果を示すボード線図である。

状態情報 (m) と入力情報 (I_a) との伝達関数、及び出力情報 (x_t) と入力情報 (I_a) との伝達関数を比較すると、100 ~ 200 Hz において、位相差が0に近付いている。

【0064】

図14は、推定に用いられる信号の計測値の一例を示す図である。

この例は、100 Hz の切削力を与えた場合のモータトルク、及びステージ26のx方向への加速度の実験結果を示している。この場合、図13で示したように、理想的な位相差はおよそ0であるが、むだ時間要素による遅れ補償を行わない場合、位相差が大きく生じている (a)。

【0065】

そこで、切削力オブザーバ103aは、位相が相対的に進んでいる方の信号 (モータトルク $K_t \times I_a r e f$) を遅延させて遅れ補償を行うことにより、位相差を0に近づけている (b)。

切削力オブザーバ103aは、モータ回転角度 m についても同様に遅れ補償を行う。

【0066】

図15は、むだ時間要素を用いた遅れ補償の有無による推定精度の比較結果を示す図である。

主軸回転数 4000 min^{-1} (周波数 133 Hz) のときの加工試験結果 (実測値) に対して、切削力オブザーバ103aによる推定値が描かれている。

【0067】

遅れ補償がない場合は、位相のずれが生じると共に、この位相のずれに起因して推定値が増幅された (a)。一方、遅れ補償がある場合は、実測値に対して高精度な切削力推定が実現された (b)。

【0068】

図16は、むだ時間要素を用いた遅れ補償を行った場合の1慣性系と2慣性系との推定精度の比較結果を示す図である。

主軸回転数 6000 min^{-1} (周波数 200 Hz) のときの加工試験結果 (実測値) に対して、切削力オブザーバ103aによる推定値が描かれている。

【0069】

1慣性系の従来法 (a) では、高回転数 (6000 min^{-1}) での推定精度が十分ではなかったが、2慣性系の提案法 (b) では、高回転数においても高精度な切削力推定が実現された。

【0070】

[第3実施形態]

以下、本発明の第3実施形態について、図面を用いて説明する。なお、第1実施形態と同様の構成については、同一の符号を付し、説明を省略又は簡略化する。

【0071】

第1及び第2実施形態では、切削力の推定に用いる状態情報として、モータ21の回転角 m が採用されたが、状態情報の個数は特に1つに限定されない。例えば、ボールねじ24のモータ21とは反対側にロータリエンコーダを追加で設けて、当該ロータリエンコーダにより検出されるボールねじ24のねじ軸の回転角を、モータ21の回転角 m と共に状態情報として入力してもよい。この場合、ボールねじ駆動ステージ13を3慣性系のモデルとして表現することで、切削力の推定精度をさらに高めることができる。換言すると、制御対象は、2慣性系モデルに限定されず、多慣性系モデルとして表現してもよい。

ここでは、一例として3慣性系モデルを適用した場合を説明する。

【0072】

10

20

30

40

50

図17は、ボールねじ駆動ステージ13bの構成と共に、コントローラ11bの機能的構成を示すブロック図である。

【0073】

ボールねじ駆動ステージ13bは、ボールねじ24を両端から、モータ21及びモータ28により回転駆動する構成であり、第1実施形態に対して、さらに、モータ28と、ロータリエンコーダ29とが追加された構成である。

【0074】

位置制御器101bは、状態情報として、モータ21の回転角 m_1 をロータリエンコーダ22から、モータ28の回転角 m_2 をロータリエンコーダ22から取得すると共に、ステージ26のx方向の位置 x_t を出力情報としてリニアエンコーダ27から取得する。位置制御器101bは、これらの状態情報及び出力情報に基づいて、ステージ26のx方向の位置 x_t を制御すべく、モータ21の電流 I_{a1} の指令値及びモータ28の電流 I_{a2} の指令値を出力する。

10

【0075】

切削力オブザーバ103bは、ボールねじ駆動ステージ13bの内部情報、即ち、電流参照値 I_{a1ref} 及び I_{a2ref} (入力情報)、ステージ26のx方向の位置 x_t (出力情報)、並びにモータ21の回転角 m_1 及びモータ28の回転角 m_2 (状態情報)を用いて、切削力 F_{cut} を推定する。このように、切削力オブザーバ103bは、これらの内部情報を用いることで、切削力の推定精度を著しく向上することができる。

【0076】

さらに以下、このような切削力オブザーバ103bに採用された切削力推定手法、即ち、本発明が適用される切削力推定手法について、図18を参照して説明する。

20

図18は、本発明が適用される切削力推定手法の概要を説明するための図であって図17のボールねじ駆動ステージ13bに作用する力を示した図である。

【0077】

図18においては、ボールねじ駆動ステージ13bは、ねじ軸の両端のモータ21及びモータ28によって、ワークWが積載されたステージ26が駆動される方式が想定されている。弾性変形する要素として、ナット部分とねじ軸が挙げられ、ナットでの変形をばね定数(軸方向剛性) K_r で、ねじ軸のねじり変形をねじり剛性 K_g でモデル化している。

このモデルは、モータ21、モータ28、ねじ軸及びステージ26の4つのマスのうち、モータ28及びねじ軸を、これらの間のねじり変形が微小(剛体)であると仮定して、モータBの1つに代表させた3慣性モデルである。

30

【0078】

ここで、モータA(モータ21)の慣性モーメントは J_{m1} 、モータBの慣性モーメントは、ねじ軸及びモータ28夫々の慣性モーメントを合算した $J_b + J_{m2}$ となる。

モータAにおいて、モータトルク $K_{t1} \times I_{a1}$ による回転運動(回転角 m_1)に対してモータ内部での摩擦トルク T_{fric1} が発生する。また、モータBにおいて、モータトルク $K_{t2} \times I_{a2}$ による回転運動(回転角 m_2)に対してモータ内部での摩擦トルク T_{fric2} 及びナット内部での摩擦トルク T_b が発生する。

【0079】

この状況の下、ねじ軸の実回転量に相当するモータBの回転運動(m_2)が、ボールねじ24においてx方向の直線運動($R \cdot m_2$)に変換されて、質量 M_t の負荷(ワークWが積載されたステージ26)が移動量 x_t だけ移動する。その際、ワークWに対して切削工具Dが切り込むことにより、切削力 F_{cut} 及び摩擦力 F_{fric} が生ずる。

40

【0080】

なお、図17及び図18においては、ねじ軸の両端のモータ21及びモータ28によって、ワークWが積載されたステージ26が駆動される構成としたが、工具スピンドルCが駆動される構成であっても、被駆動体の質量を M_t として同様にモデル化できる。

【0081】

このような図18の3慣性系モデルについての運動方程式は、次の式(5)~(7)に

50

示されるようになる。

【数 4】

$$J_{m1}\ddot{\theta}_{m1} = K_{t1}I_{a1}^{ref} - K_g(\theta_{m1} - \theta_{m2}) - T_{fric1} \quad \dots(5)$$

$$(J_b + J_{m2})\ddot{\theta}_{m2} = K_{t2}I_{a2}^{ref} + K_g(\theta_{m1} - \theta_{m2}) - RK_r(R\theta_{m2} - x_t) - T_b - T_{fric2} \quad \dots(6)$$

$$M_t\ddot{x}_t = K_r(R\theta_{m2} - x_t) - F_{fric} - F_{cut} \quad \dots(7)$$

10

【0082】

さらに、式(5)～(7)を連立することで、反力の項を消去することができ、切削力 F_{cut} は、次の式(8)に示されるようになる。

【数 5】

$$F_{cut} = \frac{1}{R} \{ K_{t1}I_{a1}^{ref} + K_{t2}I_{a2}^{ref} - J_{m1}\ddot{\theta}_{m1} - (J_b + J_{m2})\ddot{\theta}_{m2} \} - M_t\ddot{x}_t - \frac{1}{R}(T_b + T_{fric1} + T_{fric2}) - F_{fric} \quad \dots(8)$$

20

【0083】

さらに、予め推定された摩擦トルク T_b 、 T_{fric1} 及び T_{fric2} 、並びに摩擦係数 F_{fric} を用い、かつ、高周波ノイズ抑制用のローパスフィルタを用いることで、切削力 F_{cut} の推定値は、次の式(9)に示されるようになる。即ち、式(9)に従って切削力 F_{cut} を推定する機能ブロックが、図17の切削力オブザーバ103bである。

【数 6】

$$\hat{F}_{cut} = \frac{g_{cut}}{s + g_{cut}} \left[\frac{1}{R_n} \{ K_{t1n}I_{a1}^{ref} + K_{t2n}I_{a2}^{ref} - J_{m1n}\ddot{\theta}_{m1} - (J_{bn} + J_{m2n})\ddot{\theta}_{m2} \} - M_{tn}\ddot{x}_t - \frac{1}{R_n}(\hat{T}_b + \hat{T}_{fric1} + \hat{T}_{fric2}) - \hat{F}_{fric} \right] \quad \dots(9)$$

30

式(9)においては、推定値を示すパラメータには、推定であることを示す「ハット」が付されている。 g_{cut} は、切削力オブザーバ103bの遮断周波数を示しており、各パラメータの右下添え字 n は、ノミナル値を示す。

【0084】

図19は、このような切削力オブザーバ103bの詳細な機能的構成を示す機能ブロック図である。

【0085】

電流参照値 I_{a1ref} 及び I_{a2ref} (入力情報) は、夫々機能ブロック112a及び機能ブロック112bを通過することで、モータトルク T_{m1} ($= K_{t1n} \times I_{a1}$) 及びモータトルク T_{m2} ($= K_{t2n} \times I_{a2}$) の推定値として、機能ブロック115bに供給される。

40

【0086】

モータAの回転角 θ_{m1} (状態情報) は、機能ブロック114aを通過することで、2階微分されて慣性モーメント J_{m1} が乗算される。

同様に、モータBの回転角 θ_{m2} (状態情報) は、機能ブロック114bを通過することで、2階微分されて慣性モーメント ($J_b + J_{m2}$) が乗算される。

【0087】

機能ブロック115bにおいて、機能ブロック112a及び機能ブロック112aの出

50

力の合計から、機能ブロック 1 1 4 a 及び機能ブロック 1 1 4 b の出力が減算され、さらに、機能ブロック 1 1 6 において $(1/Rn)$ 倍されることで、式 (9) の大かっこ内の第 1 項が演算される。

【0088】

ステージ 2 6 の x 方向の位置 x_t (出力情報) は、機能ブロック 1 1 8 b を通過することで、2 階微分されて質量 M_t が乗算される。即ち、式 (9) の大かっこ内の第 2 項が演算される。

【0089】

機能ブロック 1 1 9 において、機能ブロック 1 1 6 の出力である式 (9) の大かっこ内の第 1 項から、機能ブロック 1 1 8 b の出力である式 (9) の大かっこ内の第 2 項が減算され、さらに、機能ブロック 1 2 0 において、式 (9) の大かっこ内の第 3 項及び第 4 項の値 1 2 1 b (予め推定された値 1 2 1 b) が減算されることで、式 (9) の大かっこが演算される。

機能ブロック 1 2 0 の出力 (式 (9) の大かっこの演算値) は、機能ブロック 1 2 2 を通過することで高周波ノイズが抑制され、切削力 F_{cut} の推定値として出力される。即ち、機能ブロック 1 2 2 は、高周波ノイズ抑制用のローパスフィルタとして機能する。

【0090】

図 20 は、切削力オブザーバを 1 慣性系、2 慣性系及び 3 慣性系として設計したときの切削力の推定結果を比較して示す図である。

1 慣性系モデル及び 2 慣性系モデルでは、2 箇所ある共振周波数の近傍で影響を大きく受け、十分な精度で推定できる帯域が限られている。

【0091】

一方 3 慣性系モデルでは、共振周波数の影響を受けることなく、より広い帯域で高精度な推定が可能である。このように、多慣性系における力推定では、運動の自由度に応じた推定手法を用いることで推定帯域が大幅に向上する。

【0092】

本実施形態では、ねじ軸を 2 つのモータ 2 1 及び 2 8 により駆動する構成をモデル化した。この他、例えば、図 3 のボールねじ 2 4 のモータ 2 1 とは反対側にあるベアリング 2 5 の支持部にロータリエンコーダを追加で設けて、当該ロータリエンコーダにより検出されるボールねじ 2 4 のねじ軸の回転角 m_2 を、モータ 2 1 の回転角 m_1 と共に状態情報として入力する構成でもよい。この構成は、本実施形態のボールねじ駆動ステージ 1 3 b における入力情報の 1 つである電流 $I_{a2} = 0$ の場合に相当する。

【0093】

以上、本発明の実施形態について説明したが、本発明は上述の実施形態に限定されるものではない。即ち、本発明の目的を達成できる範囲での変形、改良等は本発明に含まれるものである。

【0094】

例えば、上述のコントローラ 1 1 による一連の処理は、本実施形態では、主に CPU 3 1 (図 2) により実行される処理としたが、特にこれに限定されず、ハードウェアにより実行させることもできるし、ソフトウェアにより実行させることもできる。

換言すると、上述した各部や各手段による一連の処理を全体として実行できる機能が工作機械システム 1 に備えられていれば足り、この機能を実現するためにどのように各機能ブロックを構成するのかについては特に限定されない。即ち、各機能ブロックは、図 3 や図 5 に示す形態に限定されず、図 3 又は図 5 に示す機能ブロックを任意に分割又は組み合わせたり、任意の機能の削除又は付加をしたりできる。また、各機能ブロックは、ハードウェア単体で構成してもよいし、ソフトウェア単体で構成してもよいし、それらの組み合わせで構成してもよい。

【0095】

一連の処理をソフトウェアにより実行させる場合には、そのソフトウェアを構成するプログラムが、コントローラ 1 1 等のコンピュータに対して、ネットワークや記録媒体から

10

20

30

40

50

インストールされる。

コンピュータは、専用のハードウェアに組み込まれているコンピュータであってもよい。また、コンピュータは、各種のプログラムをインストールすることで、各種の機能を実行することが可能なコンピュータ、例えば汎用のパーソナルコンピュータであってもよい。

【0096】

このようなプログラムを含む記録媒体は、ユーザにプログラムを提供するために装置本体とは別に配布されるリムーバブルメディア51(図2)により構成されるだけでなく、装置本体に予め組み込まれた状態でユーザに提供される記録媒体等で構成される。リムーバブルメディア51は、例えば、磁気ディスク(フロッピディスクを含む)、光ディスク、又は光磁気ディスク等により構成される。光ディスクは、例えば、CD-ROM(Compact Disk-Read Only Memory)、DVD(Digital Versatile Disk)等により構成される。光磁気ディスクは、MD(Mini-Disk)等により構成される。また、装置本体に予め組み込まれた状態でユーザに提供される記録媒体は、例えば、プログラムが記録されている図2のROM32や、ハードディスク等の記憶部38で構成される。

10

【0097】

また例えば、上述の実施形態ではワークWを搭載可能なステージ26が採用されたが、特にこれに限定されず、切削工具Dを積載可能なステージを採用してもよい。即ち、ステージは、ワークWと切削工具Dとの相対位置が制御可能なものであれば、任意の構成を取ることができる。

20

【0098】

また例えば、上述の実施形態ではボールねじ24が採用されたが、特にこれに限定されず、モータ21における回転運動をx方向の直線運動に変換して当該x方向にステージ26等の負荷を移動させることができる任意の直動機構を採用することができる。

【0099】

また例えば、切削力の推定に用いる状態情報として、本実施形態ではモータ21の回転角 m が採用されたが、特にこれに限定されず、ボールねじ駆動ステージ13の内部の任意の状態を示す情報を採用してもよい。

【0100】

また例えば、本実施形態では、切削工具DによりワークWが切削されたため、切削力が推定された。しかしながら、工作機械によるワークの加工手法は、切削に特に限定されず、加工工具の加工力を用いる任意の手法、例えば研削・研磨等でもよい。即ち、推定対象は、切削力に特に限定されず、工作機械に適用された加工手法に応じた任意の加工力を採用することができる。

30

【0101】

以上まとめると、本発明が適用される工作機械制御装置は、以下のような構成を有すれば足り、各種各様の実施形態を採用することができる。

即ち、本発明が適用される工作機械制御装置(例えば図3等のコントローラ11)は、工作機械の加工工具(例えば図3等の切削工具D)又はそのワーク(例えば図3等のワークW)が積載されたステージ(例えば図3等のステージ26)を負荷として駆動する駆動機構(例えば図3等のボールねじ駆動ステージ13)に対して、当該負荷の位置を制御する。ここで、当該駆動機構は、電流に応じたトルクを発生するモータ(例えば図3等のモータ21)と、前記モータにおける回転運動を所定方向(例えばx方向)の直線運動に変換して当該所定方向に前記負荷を移動させる直動機構(例えば図3等のボールねじ24)とを含む。

40

このような、本発明が適用される工作機械制御装置は、次のような各手段、即ち、位置制御手段(例えば図3の位置制御器101)と、加工力推定手段(例えば図3の切削力オプザーバ103)とを備える。

位置制御手段は、前記駆動機構の出力情報として前記負荷の前記所定方向の位置(例え

50

ば図3等のステージ26のx方向の位置 $x(t)$ を取得すると共に、前記駆動機構の内部の状態を示す状態情報として前記モータの回転角(例えば図3等のモータ21の回転角 θ)を取得し、当該出力情報及び当該状態情報に基づいて、前記駆動機構の入力情報としての前記電流の指令値(例えば図3等の電流参照値 I_{ref})を変化させることで、前記負荷の前記所定方向の位置を制御する。

加工力推定手段は、前記出力情報と前記状態情報と前記入力情報とをパラメータとして用いる、前記駆動機構の2慣性系モデル(例えば図4参照)に基づいて、前記加工工具による前記ワークに対する加工力を推定する。

【0102】

これにより、本発明が適用される工作機械制御装置は、付加的なセンサを用いることなく、かつ、ボールねじ駆動ステージ13等の駆動機構に適用して好適な加工力推定の技術を実現できる、という効果を奏することができる。

【0103】

以下、かかる効果についてさらに説明する。

ここで、加工力を単に推定するだけであれば、ボールねじ駆動ステージ13等の駆動機構の状態情報と入力情報のうち少なくとも1つを用いることで実現できる。

例えば、入力情報としてサーボモータの電流値を用いて、加工負荷を推定する技術(以下、「第1比較技術」と呼ぶ)も実現できる。しかしながら、この第1比較技術は、準静的な手法を用いており、精度が悪く、高い周波数帯域での推定ができない。

また例えば、入力情報としてサーボモータの電流指令値を用い、状態情報としてサーボモータの回転情報を用いて、外乱オブザーバによる加工力を推定する技術(以下、「第2比較技術」と呼ぶ)も実現できる。この第2比較技術は、第1比較技術と比較すると、精度は高く、周波数帯域も高くなるものの、駆動系を1慣性系としてモデル化するために、実際の加工負荷とずれる箇所が生じる。特に、各モードの共振点付近でのずれが著しくなる。即ち、第2比較技術でも、ボールねじ駆動ステージ13等の駆動機構に適用して好適とは言い難い。

また例えば、状態情報としてエンコーダ情報のみを用いた加工状態を監視する技術(以下、「第3比較技術」と呼ぶ)も実現できる。しかしながら、この第3比較技術は、加工中の位置情報の変動や分散をみることで加工状態を判定し、加工中の振動を読み取ることはできるものの、加工負荷の直流成分を考えることはできない。即ち、第2比較技術でも、ボールねじ駆動ステージ13等の駆動機構に適用して好適とは言い難い。

これに対して、本発明が適用される加工力推定の技術では、ボールねじ駆動ステージ13等の駆動機構に対する位置制御としてフルクローズド制御が採用されている。このため、当該駆動機構の内部情報として、状態情報と入力情報に加えて、さらに、ステージの位置情報(出力情報)を利用することができる。これにより、加工力の推定精度が向上する。

また、入力情報と出力情報とに加えて、内部状態であるモータ21の回転角 θ を示す状態情報を利用して、ボールねじ駆動ステージ13等の駆動機構は2慣性系でモデル化される。これにより、2慣性系の共振点付近での加工力の推定精度が著しく向上する(図6のシミュレーション結果等参照)。

このようにして、付加的なセンサを用いることなく、かつ、ボールねじ駆動ステージ13等の駆動機構に適用して好適な加工力推定の技術が実現される。

【0104】

ここで、本発明が適用される工作機械制御装置は、さらに、高周波ノイズ抑制用のローパスフィルタ(例えば図5の機能ブロック122参照)を用いて、加工力を推定することもできる。これにより、高周波ノイズが抑制され、加工力の推定精度がさらに向上する。

【0105】

また、本発明が適用される工作機械制御装置は、2慣性系モデルに含まれる擬似微分による遅れ、及び、モータのトルクの電氣的遅れを補償する遅れ補償用フィルタ(例えば図5の機能ブロック111参照)を用いて、加工力を推定することもできる。これにより、

加工力の高周波成分の推定精度がさらに向上する。

【0106】

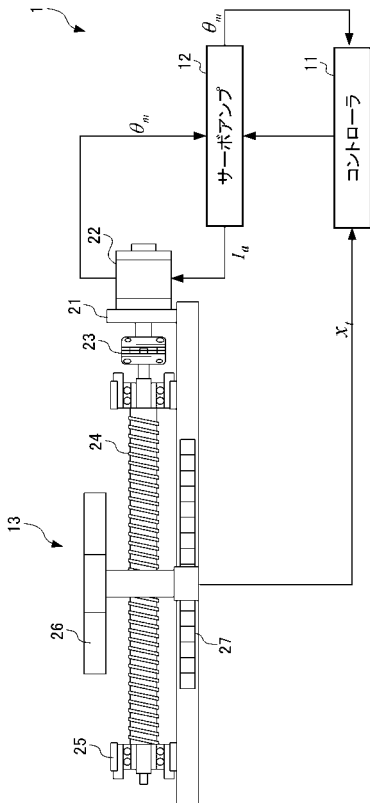
さらにまた、本発明が適用される工作機械制御装置は、出力情報と状態情報と入力情報とに基づいて外乱を推定し、推定した当該外乱に基づいて電流の指令値を補償する補償手段（例えば図3の外乱オブザーバ102）を備えるようにしてもよい。この補償手段のキャンセル効果により、パラメータ変動の影響を低減することができ、その結果、加工力の推定精度がさらに向上する。

【符号の説明】

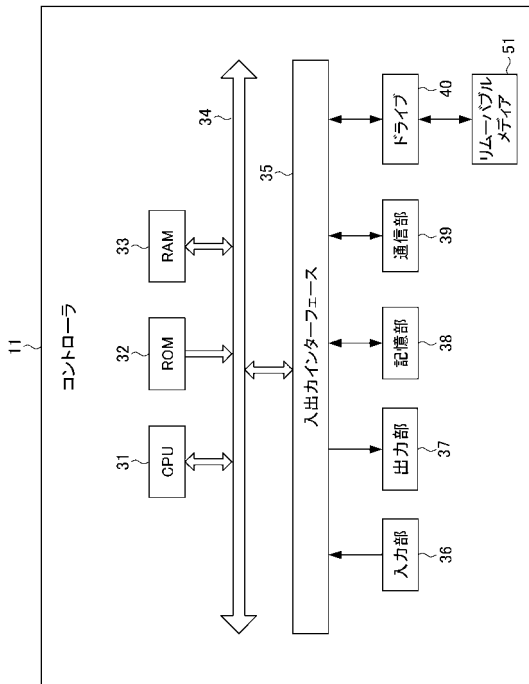
【0107】

1・・・工作機械システム、11・・・コントローラ、12・・・サーボアンプ、13・・・ボールねじ駆動ステージ、21・・・モータ、22・・・ロタリエンコーダ、23・・・カップリング、24・・・ボールねじ、25・・・ベアリング、26・・・ステージ、27・・・リニアエンコーダ、28・・・モータ、29・・・リニアエンコーダ、31・・・CPU、32・・・ROM、33・・・RAM、34・・・バス、35・・・入出インターフェース、36・・・入力部、37・・・出力部、38・・・記憶部、39・・・通信部、40・・・ドライブ、51・・・リムーバブルメディア、101・・・位置制御器、102・・・外乱オブザーバ、103・・・切削力オブザーバ、C・・・スピンドル、D・・・切削工具、W・・・ワーク

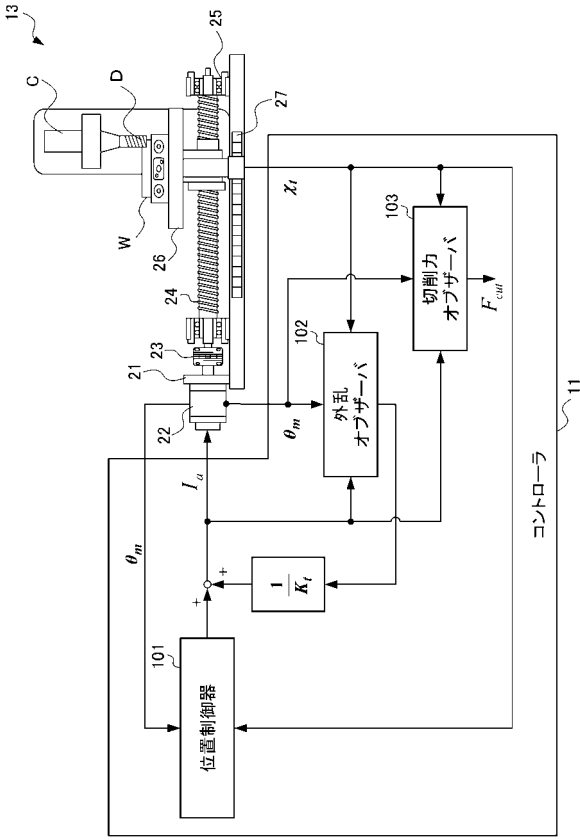
【図1】



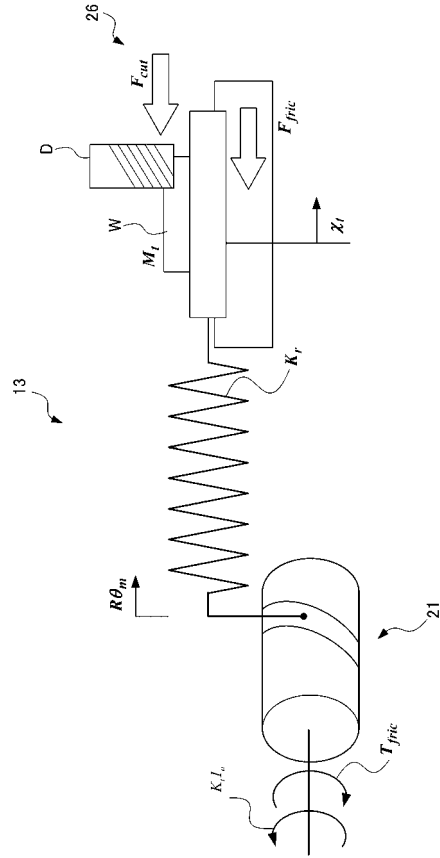
【図2】



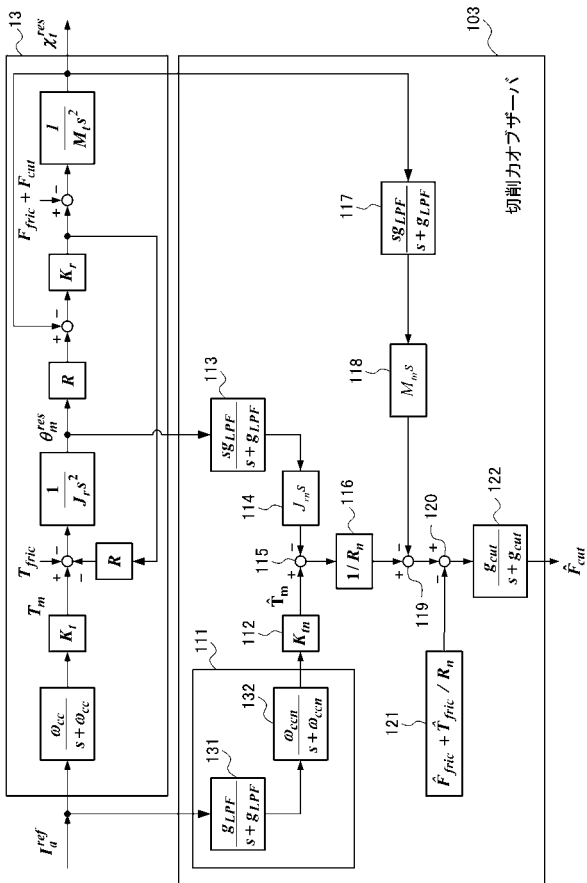
【図 3】



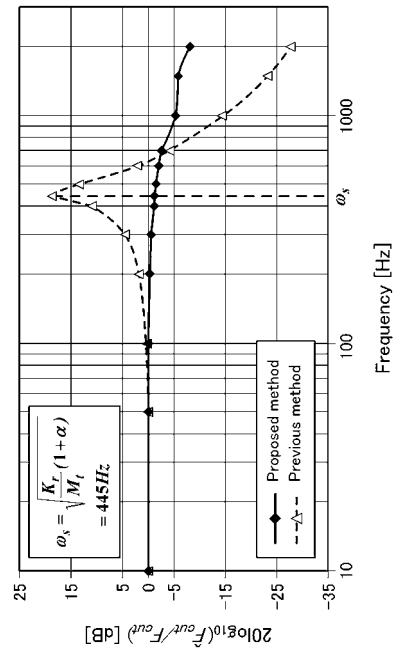
【図 4】



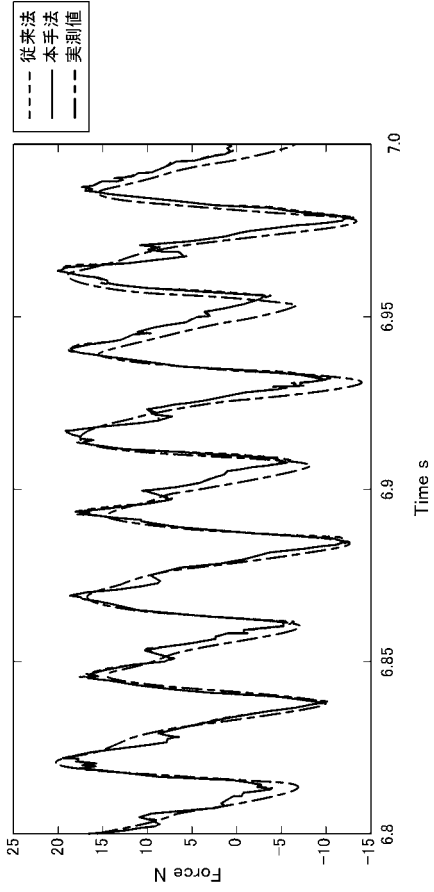
【図 5】



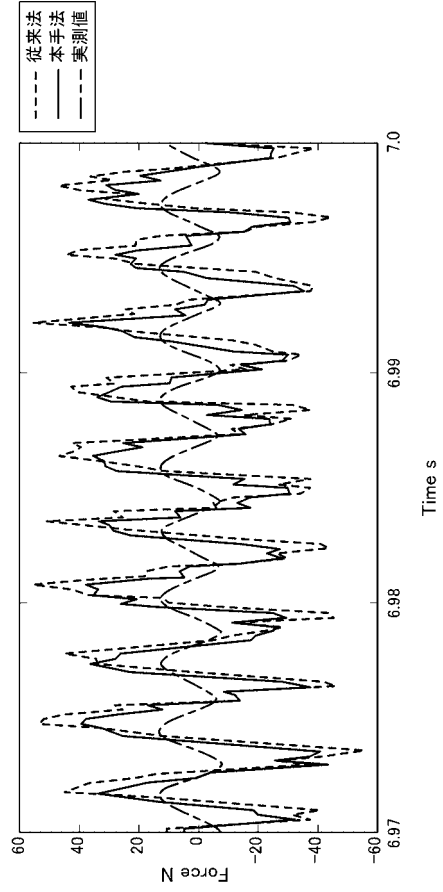
【図 6】



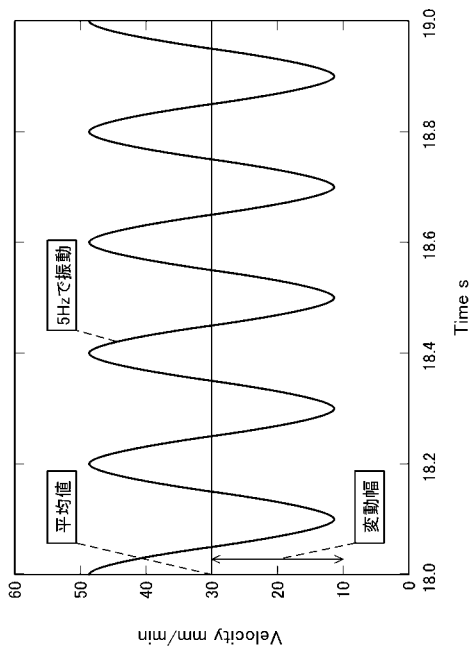
【 図 7 】



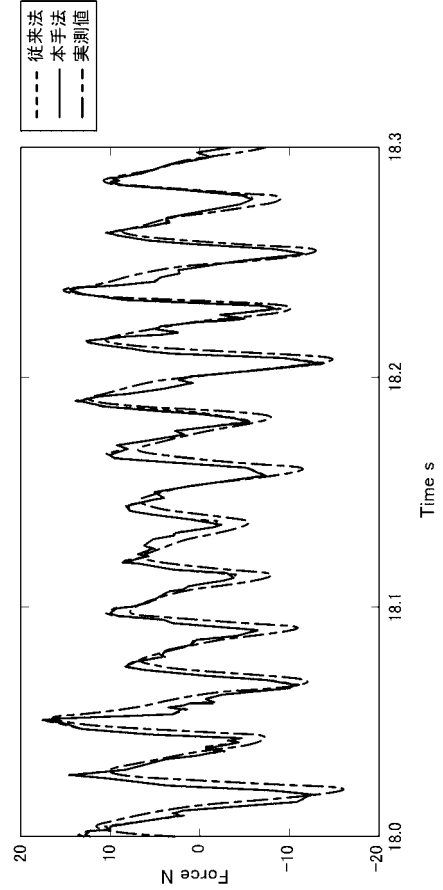
【 図 8 】



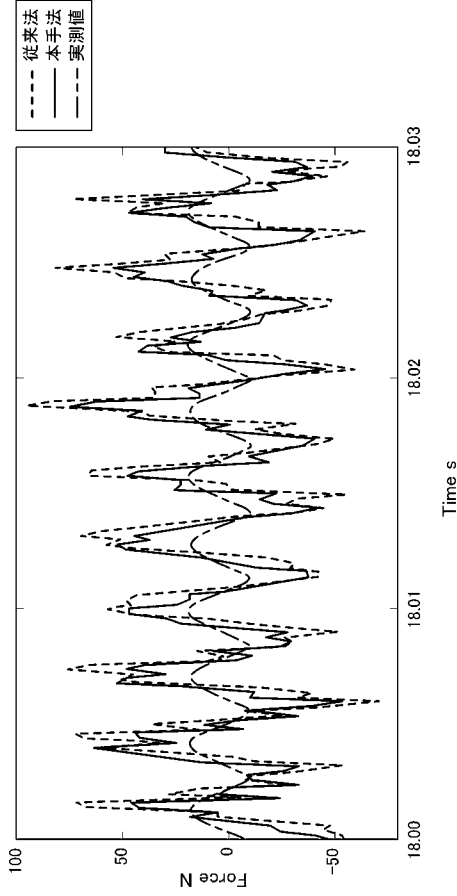
【 図 9 】



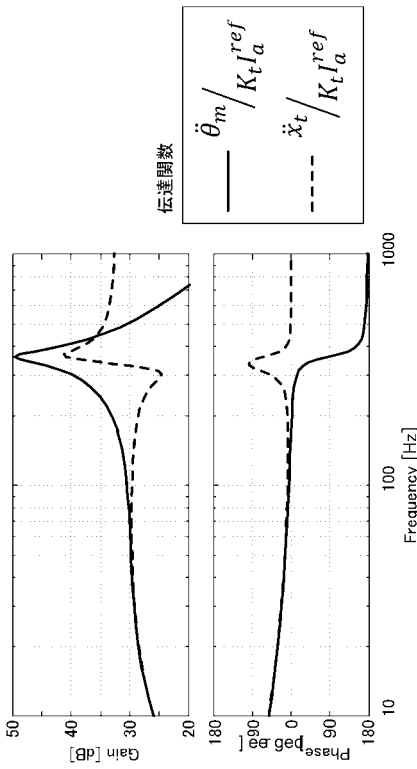
【 図 10 】



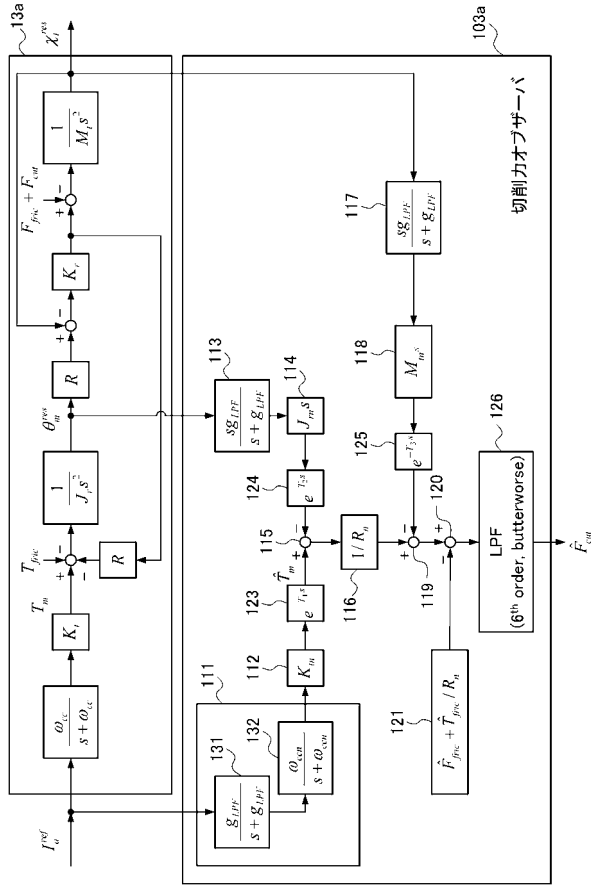
【図 1 1】



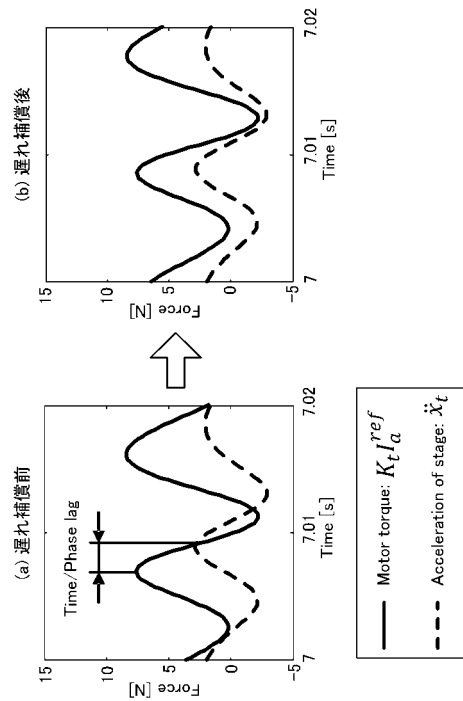
【図 1 3】



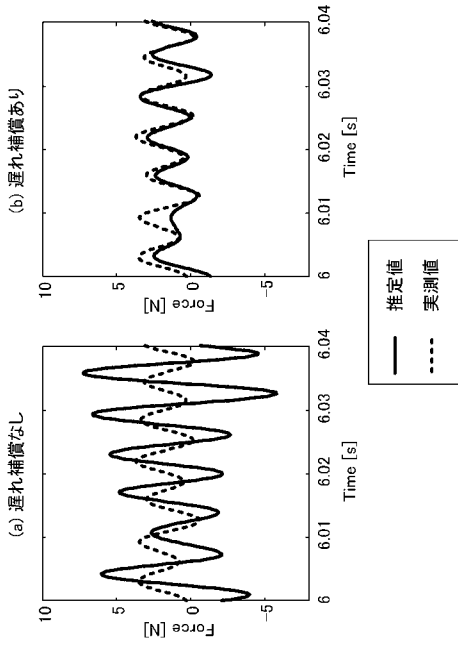
【図 1 2】



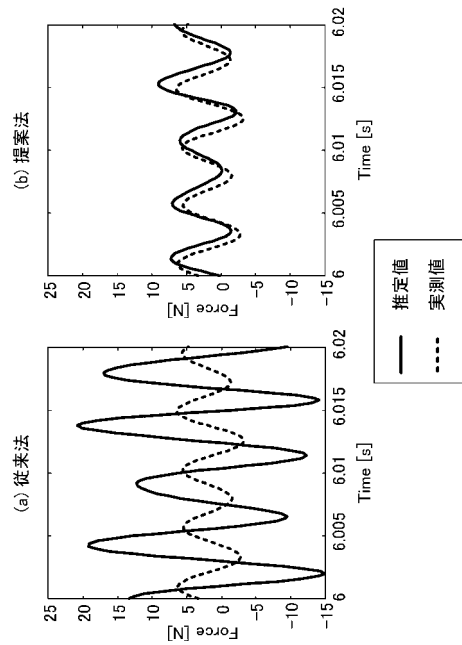
【図 1 4】



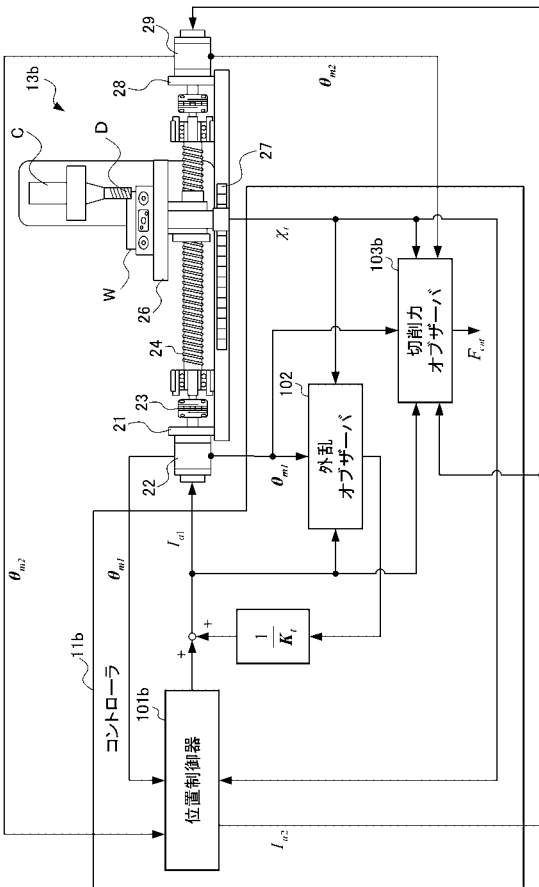
【図 15】



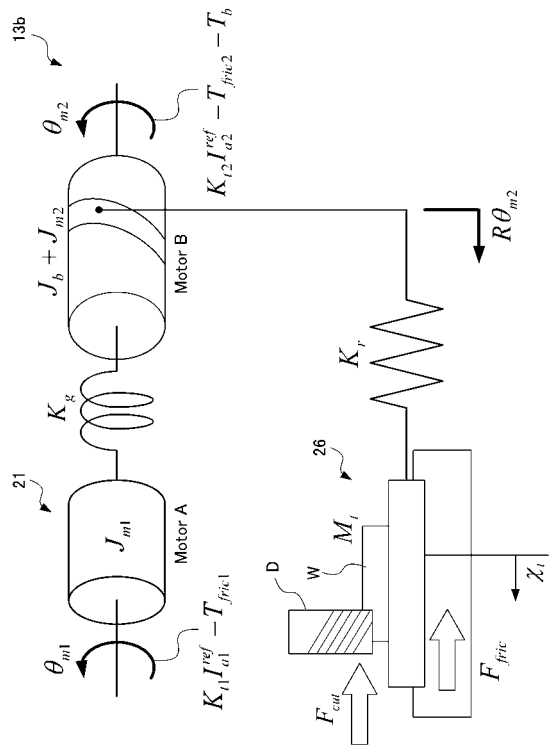
【図 16】



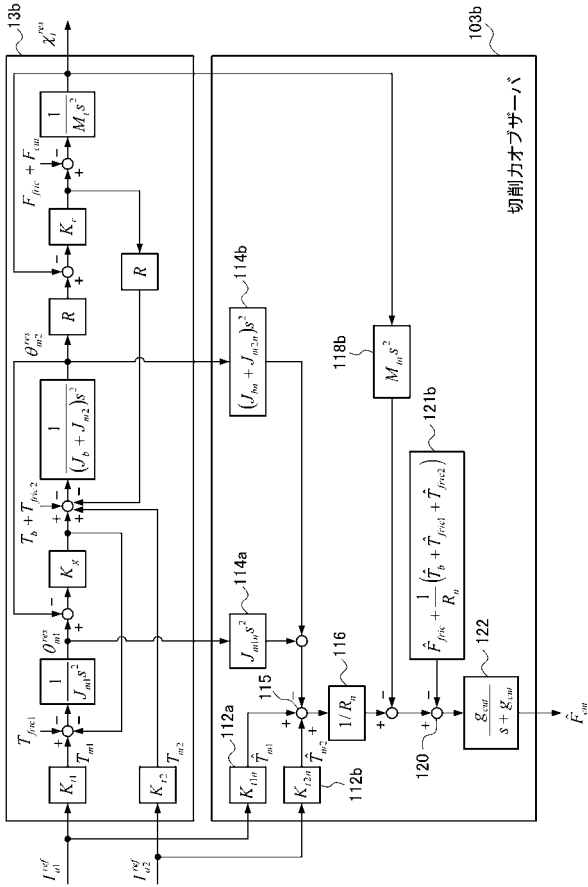
【図 17】



【図 18】



【 図 19 】



【 図 20 】

