

(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2020-5385

(P2020-5385A)

(43) 公開日 令和2年1月9日(2020.1.9)

(51) Int.Cl.	F 1	テーマコード (参考)
H02P 5/46 (2006.01)	H02P 5/46 A	5H303
G05D 3/12 (2006.01)	G05D 3/12 305Z	5H572

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 38 頁)

(21) 出願番号	特願2018-122039 (P2018-122039)	(71) 出願人	000002945
(22) 出願日	平成30年6月27日 (2018.6.27)		
		(74) 代理人	100155712
			弁理士 村上 尚
		(72) 発明者	浪江 正樹
			京都府京都市下京区塩小路通堀川東入南不 動堂町801番地 オムロン株式会社内
		(72) 発明者	川又 功征
			京都府京都市下京区塩小路通堀川東入南不 動堂町801番地 オムロン株式会社内
		Fターム(参考)	5H303 AA01 BB07 BB11 DD01 DD25 HH02 KK01 KK11 KK18 5H572 BB10 DD01 EE01 GG01 JJ03 JJ04 JJ17 JJ24 LL32 MM09

(54) 【発明の名称】 制御装置、制御装置の制御方法、情報処理プログラム、および記録媒体

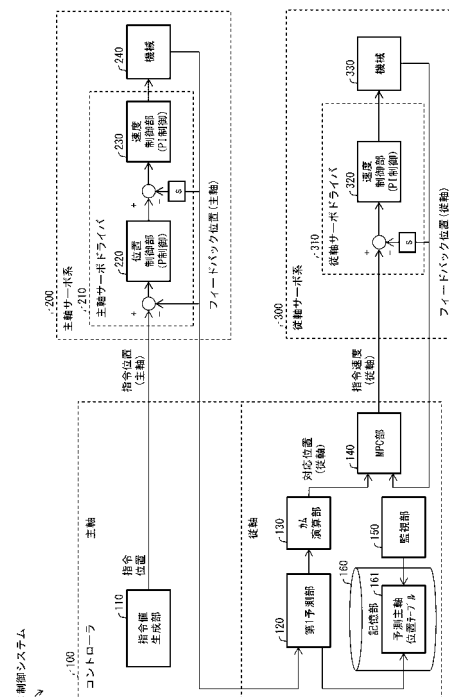
(57) 【要約】

【課題】主軸位置に対する従軸制御の追従性を向上する。

【解決手段】コントローラ(100)は、現在の主軸のフィードバック位置から算出する現在のフィードバック加速度が、所定期間にわたって一定で継続すると仮定して、未来の主軸のフィードバック位置を予測する。

【選択図】図1

図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

主軸の位置に対して従軸の位置を追従させる制御装置であって、

(A) 前記主軸の位置をフィードバック制御する第 1 サーボ制御系の、前記主軸のフィードバック位置である主軸フィードバック位置の現在における加速度が、所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、または、(B) 前記主軸の目標軌道から生成される指令位置である主軸指令位置と前記主軸フィードバック位置との偏差である位置偏差の、現在における時間変化率が、所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、未来における前記主軸フィードバック位置を予測する予測部と、

前記予測部により予測された未来における前記主軸フィードバック位置に対応する、前記従軸の位置である対応従属位置を演算する演算部と、

前記従軸の位置をフィードバック制御する第 2 サーボ制御系の動特性モデルを用いて予測する、未来における前記従軸の予測位置が、前記演算部により演算された前記対応従属位置に一致するように、前記第 2 サーボ制御系に対する現在における指令値である従軸指令値を生成する従軸指令部と、
を備えることを特徴とする制御装置。

10

【請求項 2】

前記制御装置は、前記主軸の位置に対して前記従軸の位置を追従させ、

前記予測部は、各周期における前記主軸フィードバック位置の加速度が、複数の周期にわたって一定であると仮定して、現在および過去の各周期における前記主軸フィードバック位置を用いて、未来の周期における前記主軸フィードバック位置を予測することを特徴とする請求項 1 に記載の制御装置。

20

【請求項 3】

前記制御装置は、前記主軸の位置に対して前記従軸の位置を追従させ、

前記予測部は、各周期における前記主軸指令位置と前記主軸フィードバック位置との偏差である前記位置偏差の、時間に対する変化率が、複数の周期にわたって一定であると仮定して、(C) 現在および過去の各周期における前記主軸フィードバック位置と、(D) 過去、現在、および、未来の各周期における前記主軸指令位置と、を用いて、未来の周期における前記主軸フィードバック位置を予測することを特徴とする請求項 1 に記載の制御装置。

30

【請求項 4】

前記第 1 サーボ制御系の動特性モデルを用いて予測する未来における前記主軸の予測位置が、未来における前記主軸指令位置に一致するように、前記第 1 サーボ制御系に対する現在における指令値である指令主軸値を生成する主軸指令部をさらに備えることを特徴とする請求項 1 から 3 のいずれか 1 項に記載の制御装置。

【請求項 5】

前記予測部により予測された未来における前記主軸フィードバック位置を監視する監視部をさらに備えることを特徴とする請求項 1 から 4 のいずれか 1 項に記載の制御装置。

40

【請求項 6】

前記主軸は電子カムの主軸であり、前記従軸は前記電子カムの従軸であり、

前記演算部は、前記予測部により予測された未来における前記電子カムの主軸の位相に対応する、前記電子カムの従軸の位置を演算するカム演算部であることを特徴とする請求項 1 から 5 のいずれか 1 項に記載の制御装置。

【請求項 7】

主軸の位置に対して従軸の位置を追従させる制御装置の制御方法であって、

(A) 前記主軸の位置をフィードバック制御する第 1 サーボ制御系の、前記主軸のフィードバック位置である主軸フィードバック位置の現在における加速度が、所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、または、(B) 前記主軸の目標軌道から生成される指令位置である主軸指令位置と前記主軸フィードバック位置との偏差である位置偏差の、

50

現在における時間変化率が、所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、未来における前記主軸フィードバック位置を予測する予測ステップと、

前記予測ステップにて予測された未来における前記主軸フィードバック位置に対応する、前記従軸の位置である対応従属位置を演算する演算ステップと、

前記従軸の位置をフィードバック制御する第２サーボ制御系の動特性モデルを用いて予測する、未来における前記従軸の予測位置が、前記演算ステップにて演算された前記対応従属位置に一致するように、前記第２サーボ制御系に対する現在における指令値である従軸指令値を生成する従軸指令ステップと、
を含むことを特徴とする制御方法。

【請求項 ８】

請求項 １ から ６ のいずれか一項に記載の制御装置としてコンピュータを機能させるための情報処理プログラムであって、前記各部としてコンピュータを機能させるための情報処理プログラム。

【請求項 ９】

請求項 ８ に記載の情報処理プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

本発明は、主軸の位置に対して従軸の位置を追従させる制御装置等に関する。

【背景技術】

【０００２】

主軸位置に対して従軸位置を追従させる制御において、従軸の制御の追従性を向上させるためには、従軸の未来の指令値を予測するのが有効である。そこで従来、従軸の未来の指令値を予測するために主軸の未来のフィードバック値を予測する試みが知られている。

【０００３】

例えば、下掲の特許文献 １ には、主軸モータに同期して従属軸モータを駆動する同期制御装置であって、主軸装置の動特性モデルを利用して、未来の主軸位置増分値の予測値を求める構成が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００４】

【特許文献 １】特開平 ９ - ２ ８ ９ ７ ８ ８ (１ ９ ９ ７ 年 １ １ 月 ４ 日公開)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００５】

しかしながら、上述のような従来技術には、「主軸の未来のフィードバック値」の予測が必要になるのは、「主軸装置の動特性モデル」を用いて行う予測の精度が低い状況であるとの問題がある。すなわち、「主軸装置の動特性モデル」の利用には、外乱がなく、かつ、「主軸装置の動特性モデル」の特性変動がないとの前提が必要とされる。このような前提があり、かつ、動特性モデルによる予測の精度が高いのであれば、その動特性モデルを主軸の制御に用いることで、主軸のフィードバック値を主軸の指令値に高精度に追従させることができるはずである。そして、主軸のフィードバック値を主軸の指令値に高精度に追従させることができるのであれば、そもそも「主軸の未来のフィードバック値」を予測する必要はなく、「主軸の未来の指令値」から「従軸の未来の指令値」を計算すればよいと考えられる。

【０００６】

本発明の一態様は、主軸位置に対する従軸制御の追従性を向上することであり、例えば、従軸制御に適用するモデル予測制御の性能を十分に発揮させるため、主軸の未来のフィードバック値を予測して、対応する従軸の未来の指令値を予測することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

上記の課題を解決するために、本発明の一態様に係る制御装置は、主軸の位置に対して従軸の位置を追従させる制御装置であって、（Ａ）前記主軸の位置をフィードバック制御する第１サーボ制御系の、前記主軸のフィードバック位置である主軸フィードバック位置の現在における加速度が、所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、または、（Ｂ）前記主軸の目標軌道から生成される指令位置である主軸指令位置と前記主軸フィードバック位置との偏差である位置偏差の、現在における時間変化率が、所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、未来における前記主軸フィードバック位置を予測する予測部と、前記予測部により予測された未来における前記主軸フィードバック位置に対応する、前記従軸の位置である対応従属位置を演算する演算部と、前記従軸の位置をフィードバック制御する第２サーボ制御系の動特性モデルを用いて予測する、未来における前記従軸の予測位置が、前記演算部により演算された前記対応従属位置に一致するように、前記第２サーボ制御系に対する現在における指令値である従軸指令値を生成する従軸指令部と、を備えることを特徴としている。

10

【0008】

前記の構成によれば、前記制御装置は、未来における前記主軸フィードバック位置を、（１）前記主軸フィードバック位置の現在における加速度が所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、または、（２）前記位置偏差の、現在における時間変化率が、所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、予測する。

20

【0009】

特に、前記制御装置は、前記第１サーボ制御系の動特性モデルを用いずに予測した前記主軸の未来のフィードバック位置から、前記主軸の未来のフィードバック位置に対応する、前記従軸の未来の位置である対応従属位置を演算する。そして、前記制御装置は、演算した前記対応従属位置を前記従軸の未来の指令値（指令位置）とする、前記第２サーボ制御系の動特性モデルを用いたモデル予測制御を、前記従軸の制御に適用する。つまり、前記制御装置は、未来における前記主軸フィードバック位置を予測し、予測した「未来における前記主軸フィードバック位置」に対応する「前記従軸の未来の指令値」を用いたモデル予測制御を、前記従軸の制御に適用する。

30

【0010】

したがって、前記制御装置は、前記従軸の位置制御について追従性を向上させ、前記従軸の位置制御を高速化・高精度化することができるとの効果を奏する。例えば、前記制御装置は、前記制御装置によって制御する機械等の動作をより高速化させて、これらの機械を用いた生産現場の生産性の向上に寄与するとの効果を奏する。

【0011】

本発明の一態様に係る制御装置は、前記主軸の位置に対して前記従軸の位置を追従させ、前記予測部は、各周期における前記主軸フィードバック位置の加速度が、複数の周期にわたって一定であると仮定して、現在および過去の各周期における前記主軸フィードバック位置を用いて、未来の周期における前記主軸フィードバック位置を予測してもよい。

【0012】

40

前記の構成によれば、前記制御装置は、現在および過去の各周期における前記主軸フィードバック位置を用いて、未来の周期における前記主軸フィードバック位置を予測する。

【0013】

例えば、前記制御装置は、現在の周期における前記主軸フィードバック位置と、現在から１周期前の周期における前記主軸フィードバック位置との差を、前記周期の時間間隔である周期時間で除して、現在の周期における前記第１サーボ制御系のフィードバック速度を算出する。

【0014】

また、前記制御装置は、現在から１周期前の周期における前記主軸フィードバック位置と、現在から２周期前の周期における前記主軸フィードバック位置との差を、前記周期時

50

間で除して、現在から 1 周期前の周期における前記第 1 サーボ制御系のフィードバック速度を算出する。

【 0 0 1 5 】

そして、前記制御装置は、前記第 1 サーボ制御系の現在の周期におけるフィードバック速度と、現在から 1 周期前の周期におけるフィードバック速度との差を、前記周期時間で除して、現在の周期における前記第 1 サーボ制御系のフィードバック加速度を算出する。

【 0 0 1 6 】

前記制御装置は、算出した「現在の周期における前記第 1 サーボ制御系のフィードバック加速度」が未来の周期においても一定で継続すると仮定して、前記周期時間、「前記第 1 サーボ制御系の現在の周期におけるフィードバック加速度」、「前記第 1 サーボ制御系の現在の周期におけるフィードバック速度」、および、「前記第 1 サーボ制御系の現在の周期における前記主軸フィードバック位置」から、未来の周期における前記主軸フィードバック位置を予測する。

10

【 0 0 1 7 】

そして、前記制御装置は、予測した「未来の周期における前記主軸フィードバック位置」に対応する、前記従軸の未来の位置である対応従属位置を演算する。前記制御装置は、演算した前記対応従属位置を前記従軸の未来の指令値（指令位置）とする、前記第 2 サーボ制御系の動特性モデルを用いたモデル予測制御を、前記従軸の制御に適用する。つまり、前記制御装置は、前記従軸の制御に適用する前記モデル予測制御に、現在および過去の前記主軸フィードバック位置を用いて予測した「未来の前記主軸フィードバック位置」に対応する、前記従軸の未来の指令値（前記対応従属位置）を用いる。

20

【 0 0 1 8 】

したがって、前記制御装置は、主軸の位置に対して従軸の位置を追従させる制御装置において、前記従軸の位置制御について追従性を向上させ、前記従軸の位置制御を高速化・高精度化することができるとの効果を奏する。

【 0 0 1 9 】

本発明の一態様に係る制御装置は、前記主軸の位置に対して前記従軸の位置を追従させ、前記予測部は、各周期における前記主軸指令位置と前記主軸フィードバック位置との偏差である前記位置偏差の、時間に対する変化率が、複数の周期にわたって一定であると仮定して、（ C ）現在および過去の各周期における前記主軸フィードバック位置と、（ D ）過去、現在、および、未来の各周期における前記主軸指令位置と、を用いて、未来の周期における前記主軸フィードバック位置を予測してもよい。

30

【 0 0 2 0 】

前記の構成によれば、前記制御装置は、（ C ）現在および過去の各周期における前記主軸フィードバック位置と、（ D ）過去、現在、および、未来の各周期における前記主軸指令位置と、を用いて、未来の周期における前記主軸フィードバック位置を予測する。

【 0 0 2 1 】

例えば、前記制御装置は、現在の周期における前記主軸指令位置と前記主軸フィードバック位置との差から、現在の周期における前記位置偏差を算出する。また、前記制御装置は、現在から 1 周期前の周期における前記主軸指令位置と前記主軸フィードバック位置との差から、現在から 1 周期前の周期における前記位置偏差を算出する。

40

【 0 0 2 2 】

そして、前記制御装置は、現在の周期における前記位置偏差と、現在から 1 周期前の周期における位置偏差との差を、前記周期の時間間隔である周期時間で除して、「現在の周期における、前記位置偏差の時間に対する変化（率）」を示す、「現在の周期における位置偏差変化率」を算出する。

【 0 0 2 3 】

前記制御装置は、算出した「現在の周期における位置偏差変化率」が未来の周期においても一定で継続すると仮定して、前記周期時間、「現在の周期における位置偏差変化率」、および、「現在の周期における位置偏差」から、「未来の周期における前記位置偏差」

50

を算出する。

【 0 0 2 4 】

そして、前記制御装置は、「未来の周期における主軸指令位置」と、算出した「未来の周期における前記位置偏差」との差から、「未来の周期における前記主軸フィードバック位置」を予測する。

【 0 0 2 5 】

前記制御装置は、予測した「未来の周期における前記主軸フィードバック位置」に対応する、前記従軸の未来の位置である対応従属位置を演算する。前記制御装置は、演算した前記対応従属位置を前記従軸の未来の指令値（指令位置）とする、前記第 2 サーボ制御系の動特性モデルを用いたモデル予測制御を、前記従軸の制御に適用する。つまり、前記制

10

【 0 0 2 6 】

したがって、前記制御装置は、主軸の位置に対して従軸の位置を追従させる制御装置において、前記従軸の位置制御について追従性を向上させ、前記従軸の位置制御を高速化・高精度化することができるとの効果を奏する。

【 0 0 2 7 】

本発明の一態様に係る制御装置は、前記第 1 サーボ制御系の動特性モデルを用いて予測する未来における前記主軸の予測位置が、未来における前記主軸指令位置に一致するように、前記第 1 サーボ制御系に対する現在における指令値である指令主軸値を生成する主軸指令部をさらに備えてもよい。

20

【 0 0 2 8 】

前記の構成によれば、前記制御装置は、前記第 1 サーボ制御系の動特性モデルを用いて予測する未来における前記主軸の予測位置が、未来における前記主軸指令位置に一致するように、前記第 1 サーボ制御系に対する現在における指令主軸値を生成する。

【 0 0 2 9 】

したがって、前記制御装置は、前記第 1 サーボ制御系の動特性モデルを用いたモデル予測制御を前記主軸の位置の制御に適用することによって、前記主軸の位置制御について、追従性を向上させることができるとの効果を奏する。

30

【 0 0 3 0 】

特に、未来における前記主軸指令位置を用いて未来における前記主軸フィードバック位置を予測する場合、前記主軸の位置の制御には、高い追従性が求められる。そこで、前記制御装置は、前記第 1 サーボ制御系の動特性モデルを用いたモデル予測制御を前記主軸の位置の制御に適用することによって、前記主軸の位置制御について、追従性を向上させる。

【 0 0 3 1 】

したがって、前記制御装置は、モデル予測制御によって前記主軸の位置制御の追従性を向上させ、かつ、未来における前記主軸指令位置を用いて予測した未来における前記主軸フィードバック位置を用いて前記従軸の位置制御の追従性を向上させることができるとの効果を奏する。

40

【 0 0 3 2 】

本発明の一態様に係る制御装置は、前記予測部により予測された未来における前記主軸フィードバック位置を監視する監視部をさらに備えてもよい。

【 0 0 3 3 】

前記の構成によれば、前記制御装置は、予測した「未来における前記主軸フィードバック位置」を監視し、例えば、予測した「未来における前記主軸フィードバック位置」の変動を検知する。

【 0 0 3 4 】

50

したがって、前記制御装置は、予測した「未来における前記主軸フィードバック位置」を監視し、例えばその変動を検知することによって、変動にみられる傾向性および急激な変動の発生等を把握することができるとの効果を奏する。

【0035】

本発明の一態様に係る制御装置において、前記主軸は電子カムの主軸であり、前記従軸は前記電子カムの従軸であり、前記演算部は、前記予測部により予測された未来における前記電子カムの主軸の位相に対応する、前記電子カムの従軸の位置を演算するカム演算部であってもよい。

【0036】

前記の構成によれば、前記制御装置は、予測した未来における前記電子カムの主軸の位相に対応する、前記電子カムの従軸の位置を演算する。

10

【0037】

ここで、前記制御装置は、未来における前記電子カムの主軸のフィードバック位置（フィードバック位相）を、（１）前記電子カムの主軸をフィードバック制御する前記第１サーボ制御系の、前記主軸のフィードバック位置である主軸フィードバック位置の現在における加速度が、所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、または、（２）前記主軸の目標軌道から生成される指令位置である主軸指令位置と前記主軸フィードバック位置との偏差である位置偏差の、現在における時間変化率が、所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、予測する。

【0038】

20

つまり、前記制御装置は、前記電子カムの未来の主軸の位置を前記第１サーボ制御系の動特性モデルを用いずに予測し、予測した前記電子カムの未来の主軸の位置に対応する、前記電子カムの未来の従軸の位置（対応従属位置）を演算する。そして、前記制御装置は、演算した対応従属位置を用いて、前記電子カムの従軸の位置を制御する。具体的には、前記制御装置は、未来における前記主軸フィードバック位置を予測し、予測した「未来における前記主軸フィードバック位置」に対応する「前記従軸の未来の指令値」を用いたモデル予測制御を、前記従軸の制御に適用する。

【0039】

したがって、前記制御装置は、前記電子カムの主軸の位置（位相）に対して前記電子カムの従軸の位置を追従させる制御装置において、前記従軸の位置制御について追従性を向上させ、前記従軸の位置制御を高速化・高精度化することができるとの効果を奏する。

30

【0040】

特に、前記制御装置は、前記第１サーボ制御系の動特性モデルを用いずに予測した前記電子カムの主軸の未来のフィードバック位置から、対応する「前記電子カムの従軸の未来の位置である、対応従属位置」を演算する。そして、前記制御装置は、演算した対応従属位置（前記未来における前記従軸の位置）を前記従軸の未来の指令値（指令位置）とする、前記第２サーボ制御系の動特性モデルを用いたモデル予測制御を、前記従軸の制御に適用する。したがって、前記制御装置は、前記電子カムの従軸の位置制御について、追従性を向上させ、前記従軸の位置制御を高速化・高精度化することができるとの効果を奏する。

40

【0041】

上記の課題を解決するために、本発明の一態様に係る制御方法は、主軸の位置に対して従軸の位置を追従させる制御装置の制御方法であって、（Ａ）前記主軸の位置をフィードバック制御する第１サーボ制御系の、前記主軸のフィードバック位置である主軸フィードバック位置の現在における加速度が、所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、または、（Ｂ）前記主軸の目標軌道から生成される指令位置である主軸指令位置と前記主軸フィードバック位置との偏差である位置偏差の、現在における時間変化率が、所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、未来における前記主軸フィードバック位置を予測する予測ステップと、前記予測ステップにて予測された未来における前記主軸フィードバック位置に対応する、前記従軸の位置である対応従属位置を演算する演算ステップ

50

と、前記従軸の位置をフィードバック制御する第２サーボ制御系の動特性モデルを用いて予測する、未来における前記従軸の予測位置が、前記演算ステップにて演算された前記対応従属位置に一致するように、前記第２サーボ制御系に対する現在における指令値である従軸指令値を生成する従軸指令ステップと、を含むことを特徴としている。

【００４２】

前記の方法によれば、前記制御方法は、未来における前記主軸フィードバック位置を、（１）前記主軸フィードバック位置の現在における加速度が所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、または、（２）前記位置偏差の、現在における時間変化率が、所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、予測する。

【００４３】

特に、前記制御方法は、前記第１サーボ制御系の動特性モデルを用いずに予測した前記主軸の未来のフィードバック位置から、前記主軸の未来のフィードバック位置に対応する、前記従軸の未来の位置である対応従属位置を演算する。そして、前記制御方法は、演算した前記対応従属位置を前記従軸の未来の指令値（指令位置）とする、前記第２サーボ制御系の動特性モデルを用いたモデル予測制御を、前記従軸の制御に適用する。つまり、前記制御方法は、未来における前記主軸フィードバック位置を予測し、予測した「未来における前記主軸フィードバック位置」に対応する「前記従軸の未来の指令値」を用いたモデル予測制御を、前記従軸の制御に適用する。

【００４４】

したがって、前記制御方法は、前記従軸の位置制御について追従性を向上させ、前記従軸の位置制御を高速化・高精度化することができるとの効果を奏する。例えば、前記制御方法は、前記制御方法によって制御する機械等の動作をより高速化させて、これらの機械を用いた生産現場の生産性の向上に寄与するとの効果を奏する。

【発明の効果】

【００４５】

本発明の一態様によれば、主軸位置に対して従軸位置を追従させる制御装置等において、前記主軸位置に対する前記従軸の位置制御の追従性を向上させることができるという効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【００４６】

【図１】本発明の実施形態１に係るコントローラ等の要部構成を示すブロック図である。

【図２】図１のコントローラが実行する処理の概要を示すフロー図である。

【図３】本発明の実施形態２に係るコントローラ等の要部構成を示すブロック図である。

【図４】図３のコントローラが実行する処理の概要を示すフロー図である。

【図５】本発明の実施形態３に係るコントローラ等の要部構成を示すブロック図である。

【図６】シミュレーション１において主軸の制御に印加する外乱を示す図である。

【図７】図６の外乱を印加した場合に、従来のコントローラおよび各実施形態に係るコントローラが実現する従軸制御について説明する図である。

【図８】シミュレーション２において主軸の制御に印加する外乱を示す図である。

【図９】図８の外乱を印加した場合に、従来のコントローラおよび各実施形態に係るコントローラが実現する従軸制御について説明する図である。

【発明を実施するための形態】

【００４７】

以下、本発明の一側面に係る実施の形態（以下、「本実施形態」とも表記する）を、図面に基づいて説明する。なお、図中同一または相当部分には同一符号を付してその説明は繰返さない。以下の各実施形態においては、機械および設備等の制御対象を制御するコントローラ１００、５００、および９００の各々を、制御装置の典型例として説明を行う。コントローラ１００、５００、および９００は各々、例えばＰＬＣ（プログラマブル・ロジック・コントローラ、Programmable Logic Controller）である。以下では、コントローラ１００、５００、および９００について、各々の構成および各々の装置が実行する処

10

20

30

40

50

理について、実施形態 1、2、および 3 において説明し、その後、各々の装置が奏する効果について、図 6 から図 9 を用いて後述する。

【0048】

〔実施形態 1〕

先ず、コントローラ 100 の構成、および、コントローラ 100 が実行する処理について、以下、図 1 および図 2 を参照しながら説明していく。

【0049】

§ 1 . 適用例

コントローラ 100 は、主軸の位置に対して、従軸の位置を追従させる制御を実行する制御装置である。コントローラ 100 は、従軸の制御について、モデル予測制御 (Model Predictive Control、以下では「MPC」と略記する) を適用し、従軸の制御の追従性を向上させている。

【0050】

ここで、従軸の制御に MPC を適用する場合、従軸の未来の指令値を予め取得できなければ、MPC を適用することによる十分な効果を期待できない。そこで、コントローラ 100 は、主軸の未来のフィードバック (Feed Back、以下「FB」と略記する) 値を予測し、予測した主軸の未来の FB 値に対応する、従軸の未来の指令値を演算し、つまり、予測した主軸の未来の FB 値から従軸の未来の指令値を予測する。そして、コントローラ 100 は、予測した「従軸の未来の指令値」を用いる MPC を従軸の制御に適用することによって、従軸の制御の追従性を十分に向上させる。コントローラ 100 は、主軸に対する従軸の追従性を向上させることによって、コントローラ 100 によって制御する機械の動作をより高速化することができ、これらの機械を用いた生産現場の生産性の向上に寄与することができる。なお、以下の説明においては、コントローラ 100 を電子カム制御に適用する例を説明する。ただし、コントローラ 100 の適用例は、電子カム制御に限られるものではなく、「主軸の位置に対して、従軸の位置を追従させる制御」であればよい。以下、図 1 および図 2 を用いて、コントローラ 100 の詳細について説明していく。

【0051】

§ 2 . 構成例

図 1 は、コントローラ 100 等の要部構成を示すブロック図である。以下、コントローラ 100 についての理解を容易にするため、先ず、コントローラ 100 を含む制御システム 1 の概要について説明する。

【0052】

(制御システムの概要)

図 1 に例示する制御システム 1 は、上位コントローラであるコントローラ 100 と、コントローラ 100 により制御される主軸サーボ系 200 および従軸サーボ系 300 と、を含む。

【0053】

主軸サーボ系 200 は、主軸サーボドライバ 210 と、主軸サーボドライバ 210 によって駆動を制御される機械 240 (例えば、モータおよびメカ) と、を含むフィードバック制御系である。同様に、従軸サーボ系 300 は、従軸サーボドライバ 310 と、従軸サーボドライバ 310 によって駆動を制御される機械 330 (例えば、モータおよびメカ) と、を含むフィードバック制御系である。コントローラ 100 と、主軸サーボドライバ 210 および従軸サーボドライバ 310 の各々とは通信可能に接続されており、その接続方式は、任意の有線接続方式または無線接続方式である。

【0054】

主軸サーボ系 200 において、主軸サーボドライバ 210 は、コントローラ 100 から所定の制御周期 (主軸側制御周期) ごとに受け付ける「主軸についての指令値」に従って、機械 240 の出力 (つまり、主軸の位置) を制御するフィードバック制御装置である。機械 240 の出力は、主軸位置の FB 値 (以下、「FB 位置 (主軸)」とも称する) として、主軸サーボドライバ 210 およびコントローラ 100 の各々へ入力される。

【 0 0 5 5 】

主軸サーボドライバ 2 1 0 は、コントローラ 1 0 0 からの「主軸についての指令値（例、指令位置（主軸）」）を目標値とし、実測値（例、F B 位置（主軸）」をフィードバック値として、機械 2 4 0 にフィードバック制御を行う。すなわち、主軸サーボドライバ 2 1 0 は、実測値が目標値に近づくように、機械 2 4 0（特に、機械 2 4 0 が含むサーボモータ）を駆動するための電流を調整する。なお、主軸サーボドライバ 2 1 0 は、サーボモータアンプと称されることもある。

【 0 0 5 6 】

図 1 の主軸サーボドライバ 2 1 0 は、比例制御（P 制御）を行う位置制御部 2 2 0 と、比例積分制御（P I 制御）を行なう速度制御部 2 3 0 とを備え、コントローラ 1 0 0 から「主軸についての指令位置（以下、「指令位置（主軸）」とも称する）」を受信する。位置制御部 2 2 0 は、コントローラ 1 0 0 から受け付けた指令位置（主軸）と、エンコーダ等によって取得する F B 位置（主軸）との偏差である位置偏差から、指令速度を出力する。速度制御部 2 3 0 は、位置制御部 2 2 0 が出力する指令速度と、F B 位置（主軸）を微分して算出した F B 速度（主軸）との偏差である速度偏差（主軸）から、指令トルク（主軸）を生成する。主軸サーボドライバ 2 1 0 は、生成した指令トルク（主軸）に基づいて、機械 2 4 0 を制御する。

【 0 0 5 7 】

従軸サーボ系 3 0 0 において、従軸サーボドライバ 3 1 0 は、コントローラ 1 0 0 から所定の制御周期（従軸側制御周期）ごとに受け付ける「従軸についての指令値」に従って、機械 3 3 0 の出力（つまり、従軸の位置）を制御するフィードバック制御装置である。機械 3 3 0 の出力は、従軸位置の F B 値（以下、「F B 位置（従軸）」とも称する）として、従軸サーボドライバ 3 1 0 およびコントローラ 1 0 0 の各々へ入力される。

【 0 0 5 8 】

従軸サーボドライバ 3 1 0 は、コントローラ 1 0 0 からの「従軸についての指令値（例、指令速度（従軸）」）を目標値とし、実測値（例、F B 位置（従軸）を時間微分した F B 速度（従軸）」をフィードバック値として、機械 3 3 0 にフィードバック制御を行う。すなわち、従軸サーボドライバ 3 1 0 は、実測値が目標値に近づくように、機械 3 3 0（特に、機械 3 3 0 が含むサーボモータ）を駆動するための電流を調整する。なお、従軸サーボドライバ 3 1 0 は、サーボモータアンプと称されることもある。

【 0 0 5 9 】

図 1 の従軸サーボドライバ 3 1 0 は、比例積分制御（P I 制御）を行なう速度制御部 3 2 0 を備え、コントローラ 1 0 0 から「従軸についての指令速度（以下、「指令速度（従軸）」とも称する）」を受信する。速度制御部 3 2 0 は、コントローラ 1 0 0 から受け付けた指令速度（従軸）と、エンコーダ等によって取得する F B 位置（従軸）を微分して算出した F B 速度（従軸）との偏差である速度偏差（従軸）から、指令トルク（従軸）を生成する。従軸サーボドライバ 3 1 0 は、生成した指令トルク（従軸）に基づいて、機械 3 3 0 を制御する。

【 0 0 6 0 】

コントローラ 1 0 0（制御装置）は、主軸サーボ系 2 0 0 および従軸サーボ系 3 0 0 を含む制御システム 1 の全体を制御し、例えば、プログラマブルコントローラ（P L C、Programmable Logic Controller）である。

【 0 0 6 1 】

コントローラ 1 0 0 は、主軸サーボ系 2 0 0 および従軸サーボ系 3 0 0 に各々に指令値を出力して、主軸サーボ系 2 0 0 および従軸サーボ系 3 0 0 の各々を制御する。コントローラ 1 0 0 は、例えば、主軸側制御周期ごとに、主軸についての指令位置である「指令位置（主軸）」を主軸サーボ系 2 0 0 に出力して、主軸サーボ系 2 0 0 を制御する。

【 0 0 6 2 】

また、コントローラ 1 0 0 は、例えば、従軸側制御周期ごとに、従軸についての指令速度である「指令速度（従軸）」を従軸サーボ系 3 0 0 に出力して、従軸サーボ系 3 0 0 を

制御する。コントローラ 100 は、従軸サーボ系 300 の動特性モデルを用いる MPC を、従軸サーボ系 300 の制御に適用する。

【0063】

コントローラ 100 の主軸サーボ系 200 に対する制御周期（主軸側制御周期）と、コントローラ 100 の従軸サーボ系 300 に対する制御周期（従軸側制御周期）とは、同じであってもよいし、同じ時間でなくともよい。例えば、従軸側制御周期は主軸側制御周期よりも短くてもよく、つまり、従軸側制御周期は主軸側制御周期よりも速くてもよい。なお、主軸側制御周期の長さ（時間間隔）は、従軸側制御周期の長さ（時間間隔）の整数倍であるのが望ましい。なお、以下の説明においては、主軸側制御周期と従軸側制御周期とが同じ時間間隔である例について説明する。

10

【0064】

コントローラ 100 は、主軸サーボ系 200 および従軸サーボ系 300 から FB 値を取得して、主軸サーボ系 200 および従軸サーボ系 300 の制御に利用する。コントローラ 100 は、例えば、機械 240 の出力（つまり、主軸の位置）である FB 位置（主軸）を主軸サーボ系 200 から取得し、主軸サーボ系 200 および従軸サーボ系 300 の制御に利用する。また、コントローラ 100 は、例えば、機械 330 の出力（つまり、従軸の位置）である FB 位置（従軸）を従軸サーボ系 300 から取得し、従軸サーボ系 300 の制御に利用する。

【0065】

ここで、コントローラ 100 は、従軸サーボ系 300 の制御に、従軸サーボ系 300 の動特性モデルを用いる MPC を適用する。具体的には、コントローラ 100 は、従軸サーボ系 300 の動特性モデルを用いて予測する未来の FB 位置（従軸）が、「従軸の未来の指令値」に一致するよう、現在の指令速度（従軸）を生成する。特に、コントローラ 100 は、現在の制御周期および過去の制御周期の各々における FB 位置（主軸）から、未来の制御周期における FB 位置（主軸）を予測する。そして、コントローラ 100 は、予測した「未来の制御周期における FB 位置（主軸）」に対応する「従軸の未来の指令値（＝未来の制御周期における従軸の指令位置）」を用いて、従軸（＝従軸サーボ系 300）に対する MPC を実行する。

20

【0066】

（コントローラの概要）

30

これまで、制御システム 1 の概要を説明してきた。次に、コントローラ 100 についての理解を容易にするため、コントローラ 100 の概要を以下のように整理しておく。

【0067】

すなわち、コントローラ 100 は、主軸の過去と現在の FB 値のみを用いて、主軸の未来の FB 値を予測する。すなわち、コントローラ 100 は、主軸の現在および過去の周期における FB 位置（主軸）を用いて、現在の周期の FB 位置（主軸）の加速度が一定で継続すると仮定して、未来の周期における FB 位置（主軸）を予測する。そして、コントローラ 100 は、予測した主軸の未来の FB 値（つまり、未来の周期における FB 位置（主軸））に対応する、従軸の未来の指令値（つまり、未来の周期における指令位置（従軸）。「対応従属位置」とも称する）を演算する。コントローラ 100 は、演算した対応従属位置（＝未来の周期における指令位置（従軸））を入力として、従軸サーボ系 300 の動特性モデルを用いた MPC を従軸の制御に適用し、つまり、従軸サーボ系 300 について MPC を実行する。

40

【0068】

具体的には、コントローラ 100 は、主軸の位置に対して従軸の位置を追従させる制御装置であって、第 1 予測部 120（予測部）と、カム演算部 130（演算部）と、MPC 部 140（従軸指令部）と、を備えている。第 1 予測部 120 は、「主軸の位置をフィードバック制御する主軸サーボ系 200（第 1 サーボ制御系）の、主軸のフィードバック位置である FB 位置（主軸）の現在における加速度が、所定期間にわたって一定のまま継続する」と仮定して、未来における FB 位置（主軸）を予測する。カム演算部 130 は、第

50

1 予測部 120 により予測された「未来における F B 位置（主軸）」に対応する「従軸の位置」である対応従属位置を演算する。M P C 部 140 は、従軸の位置をフィードバック制御する従軸サーボ系 300（第 2 サーボ制御系）の動特性モデルを用いて予測する「未来における従軸の予測位置」が、カム演算部 130 により演算された「未来における対応従属位置」に一致するように、従軸サーボ系 300 に対する現在における指令値である従軸指令値を生成する。

【0069】

前記の構成によれば、コントローラ 100 は、「F B 位置（主軸）の現在における加速度が、所定期間にわたって一定のまま継続する」と仮定して、未来における F B 位置（主軸）を予測する。例えば、コントローラ 100 は、「現在の F B 位置（主軸）」から算出する「現在の F B 加速度（主軸）」が、所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、未来における F B 位置（主軸）を予測する。

10

【0070】

特に、コントローラ 100 は、主軸サーボ系 200 の動特性モデルを用いずに予測した未来の F B 位置（主軸）から、未来の F B 位置（主軸）に対応する、従軸の未来の位置である対応従属位置を演算する。そして、コントローラ 100 は、演算した対応従属位置（未来の従軸の位置）を従軸の未来の指令値（指令位置）とする、従軸サーボ系 300 の動特性モデルを用いた M P C を、従軸の制御に適用する。つまり、コントローラ 100 は、未来における F B 位置（主軸）を予測し、予測した「未来における F B 位置（主軸）」に対応する「対応従属位置（従軸の未来の指令値、未来の周期における指令位置（従軸）」を用いた M P C を、従軸の制御に適用する。

20

【0071】

したがって、コントローラ 100 は、従軸の位置制御について追従性を向上させ、従軸の位置制御を高速化・高精度化することができるとの効果を奏する。例えば、コントローラ 100 は、コントローラ 100 によって制御する機械等の動作をより高速化させて、これらの機械を用いた生産現場の生産性の向上に寄与するとの効果を奏する。

【0072】

コントローラ 100 は、例えば、主軸の位置に対して従軸の位置を追従させる。コントローラ 100 において、第 1 予測部 120 は、「各周期（各主軸側制御周期）における F B 位置（主軸）の加速度が、複数の周期（主軸側制御周期）にわたって一定である」と仮定して、現在および過去の各周期（各主軸側制御周期）における F B 位置（主軸）を用いて、未来の周期（主軸側制御周期）における F B 位置（主軸）を予測する。

30

【0073】

前記の構成によれば、コントローラ 100 は、現在および過去の各周期（各主軸側制御周期）における F B 位置（主軸）を用いて、未来の周期（主軸側制御周期）における F B 位置（主軸）を予測する。

【0074】

例えば、コントローラ 100 は、現在の周期（主軸側制御周期）における F B 位置（主軸）と、現在から 1 周期前の周期（主軸側制御周期）における F B 位置（主軸）との差を、周期（主軸側制御周期）の時間間隔である周期時間で除して、現在の周期（主軸側制御周期）における主軸サーボ系 200 のフィードバック速度（F B 速度（主軸））を算出する。同様に、コントローラ 100 は、現在から 1 周期前の周期における F B 位置（主軸）と、現在から 2 周期前の周期における F B 位置（主軸）との差を、前記周期時間で除して、現在から 1 周期前の周期における F B 速度（主軸）を算出する。

40

【0075】

そして、コントローラ 100 は、現在の周期における F B 速度（主軸）と、現在から 1 周期前の周期における F B 速度（主軸）との差を、前記周期時間で除して、現在の周期における主軸サーボ系 200 のフィードバック加速度（F B 加速度（主軸））を算出する。

【0076】

コントローラ 100 は、算出した「現在の周期における F B 加速度（主軸）」が未来の

50

周期においても一定で継続すると仮定して、前記周期時間、「現在の周期における F B 加速度（主軸）」、「現在の周期における F B 速度（主軸）」、および、「現在の周期における F B 位置（主軸）」から、未来の周期における F B 位置（主軸）を予測する。

【 0 0 7 7 】

そして、コントローラ 1 0 0 は、予測した「未来の周期における F B 位置（主軸）」に対応する、未来の周期における従軸の位置（つまり、指令位置（従軸））である対応従属位置を演算する。コントローラ 1 0 0 は、演算した対応従属位置を「未来の従軸の指令値（指令位置（従軸））」とする、従軸サーボ系 3 0 0 の動特性モデルを用いた M P C を、従軸の制御に適用する。つまり、コントローラ 1 0 0 は、従軸の制御に適用する M P C に、現在および過去の F B 位置（主軸）を用いて予測した「未来の F B 位置（主軸）」に対応する「未来の指令位置（従軸）（つまり、対応従属位置）」を用いる。

10

【 0 0 7 8 】

したがって、コントローラ 1 0 0 は、主軸の位置に対して従軸の位置を追従させる制御装置において、従軸の位置制御について追従性を向上させ、従軸の位置制御を高速化・高精度化することができるとの効果を奏する。

【 0 0 7 9 】

コントローラ 1 0 0 は、第 1 予測部 1 2 0 により予測された未来における F B 位置（主軸）を監視する監視部 1 5 0 を備えている。前記の構成によれば、コントローラ 1 0 0 は、予測した未来における F B 位置（主軸）を監視し、例えば、予測した未来における前記 F B 位置（主軸）の変動を検知する。したがって、コントローラ 1 0 0 は、予測した未来における F B 位置（主軸）を監視し、例えばその変動を検知することによって、変動にみられる傾向性および急激な変動の発生等を把握することができるとの効果を奏する。

20

【 0 0 8 0 】

制御システム 1（コントローラ 1 0 0）において、例えば、主軸は電子カムの主軸であり、従軸は電子カムの従軸である。カム演算部 1 3 0 は、例えば、第 1 予測部 1 2 0 により予測された「未来における電子カムの主軸の位相」に対応する、「未来における電子カムの従軸の位置」を演算する。

【 0 0 8 1 】

前記の構成によれば、コントローラ 1 0 0 は、予測した未来における電子カムの主軸の位相に対応する、未来における電子カムの従軸の位置を演算する。

30

【 0 0 8 2 】

ここで、コントローラ 1 0 0 は、「電子カムの主軸の F B 位相である F B 位置（主軸）の加速度が、所定期間にわたって一定のまま継続する」と仮定して、未来における電子カムの主軸の F B 位置（F B 位相）を予測する。つまり、コントローラ 1 0 0 は、電子カムの未来の主軸の位置を主軸サーボ系 2 0 0 の動特性モデルを用いずに予測する。そして、コントローラ 1 0 0 は、予測した「電子カムの未来の主軸の位置」に対応する、「電子カムの未来の従軸の位置（対応従属位置）」を演算する。コントローラ 1 0 0 は、演算した対応従属位置を用いて、電子カムの従軸の位置を制御する（具体的には、電子カムの従軸の位置制御に、M P C を適用する）。コントローラ 1 0 0 は、未来における F B 位置（主軸）を予測し、予測した「未来における F B 位置（主軸）」に対応する「電子カムの従軸の未来の指令値」を用いた M P C を、従軸の制御に適用する。

40

【 0 0 8 3 】

したがって、コントローラ 1 0 0 は、電子カムの主軸の位置（位相）に対して電子カムの従軸の位置を追従させる制御装置において、従軸の位置制御について追従性を向上させ、従軸の位置制御を高速化・高精度化することができるとの効果を奏する。

【 0 0 8 4 】

特に、コントローラ 1 0 0 は、主軸サーボ系 2 0 0 の動特性モデルを用いずに予測した電子カムの主軸の未来のフィードバック位置から、対応する「電子カムの従軸の未来の位置である、対応従属位置」を演算する。そして、コントローラ 1 0 0 は、演算した対応従属位置（未来における従軸の位置）を「従軸の未来の指令値（指令位置）」とする、従軸

50

サーボ系 300 の動特性モデルを用いた MPC を、従軸の制御に適用する。したがって、コントローラ 100 は、電子カムの従軸の位置制御について、追従性を向上させ、従軸の位置制御を高速化・高精度化することができるとの効果を奏する。

【0085】

これまでに概要を整理してきたコントローラ 100 について、次に、その構成等の詳細について、図 1 を用いて説明していく。

【0086】

(コントローラの詳細)

図 1 に示すように、コントローラ 100 は、機能ブロックとして、指令値生成部 110、第 1 予測部 120、カム演算部 130、MPC 部 140、および、監視部 150 を備えている。なお、記載の簡潔性を担保するため、本実施の形態に直接関係のない構成は、説明およびブロック図から省略している。ただし、実施の実情に則して、コントローラ 100 は、当該省略された構成を備えてもよい。図 1 に例示した各機能ブロックは、例えば、CPU (central processing unit) などが、ROM (read only memory)、NVRAM (non-Volatile random access memory) 等で実現された記憶装置 (記憶部 160) に記憶されているプログラムを不図示の RAM (random access memory) 等に読み出して実行することで実現できる。以下、コントローラ 100 における各機能ブロックについて説明する。

10

【0087】

(記憶部以外の機能ブロックの詳細)

20

指令値生成部 110 は、外部 (例えば、ユーザ) から、主軸の目標軌道データ (目標軌道) を受け付け (軌道生成)、受け付けた目標軌道データから制御周期 (主軸側制御周期) ごとに指令値 (具体的には、指令位置 (主軸)) を生成する。そして、指令値生成部 110 は、生成した指令位置 (主軸) を、主軸側制御周期ごとに、主軸サーボ系 200 (具体的には、主軸サーボドライバ 210) へと出力する。

【0088】

第 1 予測部 120 は、主軸サーボ系 200 から、「主軸サーボ系 200 (特に、機械 240) の出力である主軸の位置 (= FB 位置 (主軸))」を、FB 情報として、主軸側制御周期ごとに取得する。そして、第 1 予測部 120 は、主軸側制御周期ごとに取得した FB 位置 (主軸) から、「未来の主軸側制御周期における FB 位置 (主軸)」を主軸側制御周期ごとに予測する。

30

【0089】

ここで、第 1 予測部 120 は、主軸の過去および現在の FB 値のみを用いて、主軸の現周期の FB 位置の加速度が一定で継続すると仮定して、主軸の未来の FB 値を予測する。例えば、

【0090】

【数 1】

H: 予測ホライズン (H 周期先までの未来の指令値が必要)

Ts: 制御周期

PV_n: 現周期の FB 位置

PV_{n-1}: 1 周期前の FB 位置

PV_{n-2}: 2 周期前の FB 位置

PVv: FB 速度

PVa: FB 加速度

PVpr(i): i 周期後の予測 FB 位置、i=1 to H

40

【0091】

として、第 1 予測部 120 は、

【0092】

【数 2】

$$PV = PV_n$$

$$PV_v = (PV_n - PV_{n-1}) / Ts$$

$$PV_a = (PV_n - 2*PV_{n-1} + PV_{n-2}) / Ts^2$$

for i = 1 to H

$$PV_v = PV_v + PV_a * Ts$$

$$PV = PV + PV_v * Ts$$

$$PV_{pr}(i) = PV$$

end

10

【0093】

を実行する。

【0094】

すなわち、第1予測部120は、現在の主軸側制御周期におけるFB位置（主軸）（上述の式における PV_n ）と、現在から1周期前の主軸側制御周期におけるFB位置（主軸）（上述の式における PV_{n-1} ）との差を、主軸側制御周期の時間間隔である周期時間 Ts で除して、現在の主軸側制御周期における主軸サーボ系200のフィードバック速度（ PV_v ）を算出する。

【0095】

20

また、第1予測部120は、現在から1周期前の主軸側制御周期におけるFB位置（主軸）（上述の式における PV_{n-1} ）と、現在から2周期前の主軸側制御周期におけるFB位置（主軸）（上述の式における PV_{n-2} ）との差を、周期時間 Ts で除して、現在から1周期前の主軸側制御周期における主軸サーボ系200のフィードバック速度（ PV_v ）を算出する。

【0096】

そして、第1予測部120は、主軸サーボ系200の、現在の主軸側制御周期におけるフィードバック速度 PV_v と、現在から1周期前の主軸側制御周期におけるフィードバック速度 PV_v との差を、周期時間 Ts で除して、現在の主軸側制御周期における主軸サーボ系200のフィードバック加速度（上述の式における PV_a ）を算出する。すなわち、「 $PV_a = (PV_v - PV_v) / Ts = (PV_n - 2 * PV_{n-1} + PV_{n-2}) / Ts^2$ 」を算出する。

30

【0097】

第1予測部120は、算出した「現在の周期における主軸サーボ系200のフィードバック加速度 PV_a 」が未来の主軸側制御周期においても一定で継続すると仮定して、未来の周期におけるFB位置（主軸）を予測する。

【0098】

すなわち、「未来の周期におけるFB位置（主軸）」は、具体的には、「i周期後の予測FB位置（主軸）（「i = 1 to H」とする）」であるとして、第1予測部120は、「i周期後の予測FB位置（主軸） $PV_{pr}(i)$ 」を、上述の式の通り、予測する。すなわち、第1予測部120は、周期時間 Ts 、「主軸サーボ系200の現在の周期におけるフィードバック加速度 PV_a 」、「主軸サーボ系200の現在の周期におけるフィードバック速度 PV_v （上述の式における PV_v ）」、および、「主軸サーボ系200の現在の周期におけるFB位置（主軸） PV_n 」から、「未来の周期におけるFB位置（主軸） $PV_{pr}(i)$ 」を予測する。

40

【0099】

第1予測部120は、予測した主軸側制御周期ごとの「未来の主軸側制御周期におけるFB位置（主軸）」を、カム演算部130に通知し、また、記憶部160の予測主軸位置テーブル161に格納する。

【0100】

50

カム演算部 130 は、第 1 予測部 120 から通知された「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」に対応する、「未来の従軸制御周期における指令位置（従軸）」を演算する。なお、以下では、カム演算部 130 が「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」から演算する「未来の従軸制御周期における指令位置（従軸）」を、「対応従属位置」とも称する。

【0101】

カム演算部 130 は、例えば、「主軸の位置に対して、従軸の位置を対応付けた配列」である主従関係情報（例えば、いわゆる「カムテーブル」）を用いて、対応従属位置を演算する。カム演算部 130 は、「主軸の位置に対して、従軸の位置を対応付けた演算式（例えば、いわゆる「カム演算式」）」を用いて、対応従属位置を演算してもよい。カム演算部 130 は、周知の技術を用いて、対応従属位置を演算できればよく、対応従属位置を演算する方法は、特に限定されない。

10

【0102】

カム演算部 130 は、「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」から演算した、「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」に対応する「未来の従軸制御周期における指令位置（従軸）」を、つまり、「対応従属位置」を、MPC 部 140 に通知する。

【0103】

MPC 部 140 は、従軸サーボ系 300 の動特性モデルを用いて、従軸サーボ系 300 について MPC（モデル予測制御）を行なう。具体的には、MPC 部 140 は、カム演算部 130 により演算された対応従属位置と、従軸サーボ系 300 から取得する F B 位置（従軸）とを用いて、従軸サーボ系 300 の動特性モデルを用いた MPC によって、指令速度（従軸）を生成する。

20

【0104】

まず、MPC 部 140 は、従軸サーボドライバ 310 および機械 330 のモデル（つまり、従軸サーボ系 300 の動特性モデル）を内部モデルとして有し、この内部モデルを用いて、「未来の周期（従軸側制御周期）における F B 位置（従軸）」を予測する。例えば、MPC 部 140 は、従軸サーボ系 300 の動特性モデルによって、「これまでに取得している F B 位置（従軸）」および「これまでに従軸サーボドライバ 310 へ出力している指令値（従軸）」を用いて、「未来の周期（従軸側制御周期）における F B 位置（従軸）」を予測する。

30

【0105】

そして、MPC 部 140 は、予測した「未来の周期における F B 位置（従軸）」が、カム演算部 130 により演算された対応従属位置に一致するように、従軸サーボ系 300 に対する現在の周期における指令値（例えば、指令速度（従軸））を生成する。MPC 部 140 は、予測した「未来の周期における F B 位置（従軸）」が、「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」に対応する「未来の従軸制御周期における指令位置（従軸）」に一致するよう、現在の従軸制御周期における指令速度（従軸）を生成する。MPC 部 140 は、生成した「現在の従軸制御周期における指令速度（従軸）」を、現在の従軸制御周期において、従軸サーボ系 300（具体的には、従軸サーボドライバ 310）に出力する。

40

【0106】

監視部 150 は、第 1 予測部 120 により予測された「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」を監視し、例えば、「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」に異常等が発生すると、コントローラ 100 の外部等に通知する。例えば、監視部 150 は、記憶部 160 の予測主軸位置テーブル 161 に格納されている複数周期分の「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」を監視し、「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」の経時変化を監視する。監視部 150 は、「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」の経時変化を監視することによって、「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」の変動を検知し、例えば、変動にみられる傾向性および

50

急激な変動の発生等を把握することができる。そして、監視部 150 は、把握した「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」の変動の傾向性、および「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」の急激な変動の発生などについて、コントローラ 100 の内部の他のプログラム（機能ブロック）、または外部の装置に通知する。

【0107】

（記憶部の詳細）

記憶部 160 は、コントローラ 100 が使用する各種データを格納する記憶装置である。なお、記憶部 160 は、コントローラ 100 が実行する（1）制御プログラム、（2）OS プログラム、（3）コントローラ 100 が有する各種機能を実行するためのアプリケーションプログラム、および、（4）該アプリケーションプログラムを実行するときに読み出す各種データを非一時的に記憶してもよい。上記の（1）～（4）のデータは、例えば、ROM（read only memory）、フラッシュメモリ、EPROM（Erasable Programmable ROM）、EEPROM（登録商標）（Electrically EPROM）、HDD（Hard Disc Drive）等の不揮発性記憶装置に記憶される。また、例えば、カム演算部 130 が「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」から「未来の従軸制御周期における指令位置（従軸）」を演算するのに用いる主従関係情報（例えば、カムテーブルまたはカム演算式）は記憶部 160 に格納されていてもよい。

10

【0108】

コントローラ 100 は、図示しない一時記憶部を備えていてもよい。一時記憶部は、コントローラ 100 が実行する各種処理の過程で、演算に使用するデータおよび演算結果等を一時的に記憶するいわゆるワーキングメモリであり、RAM（Random Access Memory）などの揮発性記憶装置で構成される。

20

【0109】

どのデータをどの記憶装置に記憶するのかについては、コントローラ 100 の使用目的、利便性、コスト、または、物理的な制約などから適宜決定される。記憶部 160 はさらに予測主軸位置テーブル 161 を格納している。

【0110】

予測主軸位置テーブル 161 には、第 1 予測部 120 によって、第 1 予測部 120 が各主軸側制御周期において予測した、主軸側制御周期ごとの「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」が格納される。

30

【0111】

§ 3 . 動作例

図 2 は、コントローラ 100 が実行する処理の全体概要を示すフロー図である。コントローラ 100 は先ず初期処理を実行し（S410）、例えば、起動後、通常動作（主軸サーボ系 200 および従軸サーボ系 300 の各々への制御処理）を開始する前の初期イニシャライズ（初期処理、例えば、通常動作に必要な各種の設定処理等）を実行する。

【0112】

コントローラ 100 は、主軸サーボ系 200 および従軸サーボ系 300 の各々から、主軸および従軸の各々の F B 値（つまり、F B 位置（主軸）および F B 位置（従軸））を入力として受け付ける（S420）。そして、指令値生成部 110 は、主軸の目標軌道データから、主軸側制御周期ごとの主軸サーボドライバ 210 への指令値（例、指令位置（主軸））を計算する（S430）。

40

【0113】

第 1 予測部 120 は、S420 で受け付けた F B 位置（主軸）から、主軸の未来 F B 値を、つまり、「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」を、予測する（S440）。そして、第 1 予測部 120 は、予測した「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」を、カム演算部 130 に通知する。

【0114】

カム演算部 130 は、第 1 予測部 120 から通知された「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」に対応する、従軸の未来対応値（対応従属位置）を、つまり、「未

50

来の従軸制御周期における指令位置（従軸）」を、計算する（S 4 5 0）。カム演算部 1 3 0 は、「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」から計算した対応従属位置を、M P C 部 1 4 0 に通知する。

【 0 1 1 5 】

M P C 部 1 4 0 は、従軸サーボ系 3 0 0 の動特性モデルを用いて、従軸サーボドライバ 3 1 0 への指令値を計算し（S 4 6 0）、つまり、従軸サーボ系 3 0 0 の動特性モデルを用いた M P C を従軸サーボ系 3 0 0 の制御に適用する。具体的には、M P C 部 1 4 0 は、従軸サーボ系 3 0 0 の動特性モデルを用いて予測した「未来の周期（未来の従軸側制御周期）における F B 位置（従軸）」が、S 4 5 0 で計算した対応従属位置に一致するように、指令速度（従軸）を生成する。

10

【 0 1 1 6 】

コントローラ 1 0 0（具体的には、指令値生成部 1 1 0 および M P C 部 1 4 0 の各々）は、主軸側および従軸側のサーボドライバ（つまり、主軸サーボドライバ 2 1 0 および従軸サーボドライバ 3 1 0）へ、指令値を出力する（S 4 7 0）。すなわち、指令値生成部 1 1 0 は主軸サーボドライバ 2 1 0 に指令位置（主軸）を出力し、M P C 部 1 4 0 は従軸サーボドライバ 3 1 0 に指令速度（従軸）を出力する。そして、コントローラ 1 0 0 は、制御が終了する（S 4 8 0 で Y e s）まで、S 4 2 0 から S 4 7 0 までの処理を、制御周期ごとに繰り返す。

【 0 1 1 7 】

これまでに図 2 を用いて説明してきた、コントローラ 1 0 0 の実行する制御方法は、以下のように整理することができる。すなわち、コントローラ 1 0 0 の実行する制御方法は、主軸の位置に対して従軸の位置を追従させる制御装置の制御方法であって、「主軸の位置をフィードバック制御する主軸サーボ系 2 0 0 の、主軸のフィードバック位置である F B 位置（主軸）の現在における加速度が、所定期間にわたって一定のまま継続する」と仮定して、未来における F B 位置（主軸）を予測する予測ステップ（S 4 4 0）と、予測ステップにて予測された「未来における F B 位置（主軸）」に対応する、「未来における従軸の位置」である対応従属位置を演算する演算ステップ（S 4 5 0）と、従軸の位置をフィードバック制御する従軸サーボ系 3 0 0 の動特性モデルを用いて予測する「未来における従軸の予測位置」が、演算ステップにて演算された「未来における対応従属位置」に一致するように、従軸サーボ系 3 0 0 に対する現在における指令値である従軸指令値を生成する従軸指令ステップ（S 4 6 0）と、を含んでいる。

20

30

【 0 1 1 8 】

前記の方法によれば、前記制御方法は、「F B 位置（主軸）の現在における加速度が、所定期間にわたって一定のまま継続する」と仮定して、未来における主軸のフィードバック位置である F B 位置（主軸）を予測する。

【 0 1 1 9 】

特に、前記制御方法は、主軸サーボ系 2 0 0 の動特性モデルを用いずに予測した未来の F B 位置（主軸）から、未来の F B 位置（主軸）に対応する、従軸の未来の位置である対応従属位置を演算する。そして、前記制御方法は、演算した対応従属位置（未来における従軸の位置）を従軸の未来の指令値（指令位置）とする、従軸サーボ系 3 0 0 の動特性モデルを用いた M P C を、従軸の制御に適用する。つまり、前記制御方法は、未来における F B 位置（主軸）を予測し、予測した「未来における F B 位置（主軸）」に対応する「対応従属位置（従軸の未来の指令値、未来の周期における指令位置（従軸）」を用いた M P C を、従軸の制御に適用する。

40

【 0 1 2 0 】

したがって、前記制御方法は、従軸の位置制御について追従性を向上させ、従軸の位置制御を高速化・高精度化することができるとの効果を奏する。例えば、前記制御方法は、前記制御方法によって制御する機械等の動作をより高速化させて、これらの機械を用いた生産現場の生産性の向上に寄与するとの効果を奏する。

【 0 1 2 1 】

50

〔実施形態２〕

本発明の実施形態２について、図３および図４に基づいて説明すれば、以下のとおりである。なお、説明の便宜上、前記実施形態にて説明した部材と同じ機能を有する部材については、同じ符号を付記し、その説明を省略する。先ず、実施形態２に係るコントローラ５００に係る理解を容易にするため、コントローラ５００について、実施形態１で説明したコントローラ１００との違いを説明する。

【０１２２】

（実施形態１との違い）

コントローラ１００は、主軸の未来のＦＢ値の予測に「主軸の現在および過去のＦＢ値」を利用していた。これに対して、本実施形態に係るコントローラ５００は、「主軸の現在および過去のＦＢ値」に加えてさらに、「主軸の未来の指令値」を用いて、主軸の未来のＦＢ値を予測する。

10

【０１２３】

ここで、「主軸の未来の指令値」を用いて主軸の未来のＦＢ値を予測するコントローラ５００には、主軸の制御について、高い指令追従性が求められる。つまり、「主軸の未来の指令値」を用いた「主軸の未来のＦＢ値」の予測は、主軸制御における指令値への高い追従性を前提としている。具体的には、主軸制御において指令値への追従性が低い場合、主軸の制御偏差の変化が指令値の変化に対して非常に緩慢になり、制御偏差の変化と指令値の変化とを組み合わせても、主軸の未来のＦＢ値の予測精度が低くなってしまう。そのため、「主軸の未来の指令値」を用いて「主軸の未来のＦＢ値」を予測する場合、主軸制御の指令値への追従性は、相当程度高いことが求められる。

20

【０１２４】

そこで、コントローラ５００は、主軸の制御にＭＰＣを適用することにより、主軸制御における指令値への高追従性を実現し、また、「主軸の未来の指令値」を用いた、高精度の「主軸の未来のＦＢ値」の予測を実現している。

【０１２５】

コントローラ５００は、コントローラ１００と同じように、主軸に対する従軸の追従性を向上させることによって、コントローラ５００によって制御する機械の動作をより高速化することができ、これらの機械を用いた生産現場の生産性の向上に寄与する。なお、以下の説明においては、実施形態１のコントローラ１００と同様に、コントローラ５００を電子カム制御に適用する例を説明する。ただし、コントローラ５００の適用例は、電子カム制御に限られるものではなく、「主軸の位置に対して、従軸の位置を追従させる制御」であればよい。以下、図３および図４を用いて、コントローラ５００の詳細について説明していく。

30

【０１２６】

（制御システムの概要）

図３は、コントローラ５００等の要部構成を示すブロック図である。以下、コントローラ５００についての理解を容易にするため、先ず、コントローラ５００を含む制御システム２の概要について説明する。

【０１２７】

図３に例示する制御システム２は、上位コントローラであるコントローラ５００と、コントローラ５００により制御される主軸サーボ系６００および従軸サーボ系７００と、を含む。主軸サーボ系６００は、主軸サーボドライバ６１０と、主軸サーボドライバ６１０によって駆動を制御される機械６３０（例えば、モータおよびメカ）と、を含むフィードバック制御系である。同様に、従軸サーボ系７００は、従軸サーボドライバ７１０と、従軸サーボドライバ７１０によって駆動を制御される機械７３０（例えば、モータおよびメカ）と、を含むフィードバック制御系である。コントローラ５００と、主軸サーボドライバ６１０および従軸サーボドライバ７１０の各々とは通信可能に接続されており、その接続方式は、任意の有線接続方式または無線接続方式である。

40

【０１２８】

50

主軸サーボ系 6 0 0 において、主軸サーボドライバ 6 1 0 は、コントローラ 5 0 0 から所定の制御周期（主軸側制御周期）ごとに受け付ける「主軸についての指令値」に従って、機械 6 3 0 の出力（つまり、主軸の位置）を制御するフィードバック制御装置である。機械 6 3 0 の出力は、主軸位置の F B 値（以下、「F B 位置（主軸）」とも称する）として、主軸サーボドライバ 6 1 0 およびコントローラ 5 0 0 の各々へ入力される。

【 0 1 2 9 】

主軸サーボドライバ 6 1 0 は、コントローラ 5 0 0 からの「主軸についての指令値（指令主軸値。例えば、指令速度（主軸）」を目標値とし、実測値（例、F B 位置（主軸）を時間微分した F B 速度（主軸）をフィードバック値として、機械 6 3 0 にフィードバック制御を行う。すなわち、主軸サーボドライバ 6 1 0 は、実測値が目標値に近づくように、機械 6 3 0（特に、機械 6 3 0 が含むサーボモータ）を駆動するための電流を調整する。なお、主軸サーボドライバ 6 1 0 は、サーボモータアンプと称されることもある。

10

【 0 1 3 0 】

図 3 の主軸サーボドライバ 6 1 0 は、比例積分制御（P I 制御）を行なう速度制御部 6 2 0 を備え、コントローラ 5 0 0 から「主軸についての指令速度（以下、「指令速度（主軸）」とも称する）」を受信する。速度制御部 6 2 0 は、コントローラ 5 0 0 から受け付けた指令速度（主軸）と、F B 位置（主軸）を微分して算出した F B 速度（主軸）との偏差である速度偏差（主軸）から、指令トルク（主軸）を生成する。主軸サーボドライバ 6 1 0 は、生成した指令トルク（主軸）に基づいて、機械 6 3 0 を制御する。

【 0 1 3 1 】

従軸サーボ系 7 0 0 において、従軸サーボドライバ 7 1 0 は、コントローラ 5 0 0 から所定の制御周期（従軸側制御周期）ごとに受け付ける「従軸についての指令値」に従って、機械 7 3 0 の出力（つまり、従軸の位置）を制御するフィードバック制御装置である。機械 7 3 0 の出力は、従軸位置の F B 値（以下、「F B 位置（従軸）」とも称する）として、従軸サーボドライバ 7 1 0 およびコントローラ 5 0 0 の各々へ入力される。

20

【 0 1 3 2 】

従軸サーボドライバ 7 1 0 は、コントローラ 5 0 0 からの「従軸についての指令値（例、指令速度（従軸）」を目標値とし、実測値（例、F B 位置（従軸）を時間微分した F B 速度（従軸）をフィードバック値として、機械 7 3 0 にフィードバック制御を行う。すなわち、従軸サーボドライバ 7 1 0 は、実測値が目標値に近づくように、機械 7 3 0（特に、機械 7 3 0 が含むサーボモータ）を駆動するための電流を調整する。なお、従軸サーボドライバ 7 1 0 は、サーボモータアンプと称されることもある。

30

【 0 1 3 3 】

図 3 の従軸サーボドライバ 7 1 0 は、比例積分制御（P I 制御）を行なう速度制御部 7 2 0 を備え、コントローラ 5 0 0 から「従軸についての指令速度（以下、「指令速度（従軸）」とも称する）」を受信する。速度制御部 7 2 0 は、コントローラ 5 0 0 から受け付けた指令速度（従軸）と、エンコーダ等によって取得する F B 位置（従軸）を微分して算出した F B 速度（従軸）との偏差である速度偏差（従軸）から、指令トルク（従軸）を生成する。従軸サーボドライバ 7 1 0 は、生成した指令トルク（従軸）に基づいて、機械 7 3 0 を制御する。

40

【 0 1 3 4 】

コントローラ 5 0 0（制御装置）は、主軸サーボ系 6 0 0 および従軸サーボ系 7 0 0 を含む制御システム 2 の全体を制御し、例えば、プログラマブルコントローラ（P L C、Programmable Logic Controller）である。

【 0 1 3 5 】

コントローラ 5 0 0 は、主軸サーボ系 6 0 0 および従軸サーボ系 7 0 0 に各々に指令値を出力して、主軸サーボ系 6 0 0 および従軸サーボ系 7 0 0 の各々を制御する。コントローラ 5 0 0 は、例えば、主軸側制御周期ごとに、主軸についての指令速度である「指令速度（主軸）」を主軸サーボ系 6 0 0 に出力して、主軸サーボ系 6 0 0 を制御する。コントローラ 5 0 0 は、主軸サーボ系 6 0 0 の動特性モデルを用いる M P C を、主軸サーボ系 6

50

00の制御に適用する。

【0136】

また、コントローラ500は、例えば、従軸側制御周期ごとに、従軸についての指令速度である「指令速度（従軸）」を従軸サーボ系700に出力して、従軸サーボ系700を制御する。コントローラ500は、従軸サーボ系700の動特性モデルを用いるMPCを、従軸サーボ系700の制御に適用する。

【0137】

コントローラ500の主軸サーボ系600に対する制御周期（主軸側制御周期）と、コントローラ500の従軸サーボ系700に対する制御周期（従軸側制御周期）とは、同じであってもよいし、同じ時間でなくともよい。例えば、従軸側制御周期は主軸側制御周期よりも短くてもよく、つまり、従軸側制御周期は主軸側制御周期よりも速くてもよい。

10

【0138】

コントローラ500は、主軸サーボ系600および従軸サーボ系700からFB値を取得して、主軸サーボ系600および従軸サーボ系700の制御に利用する。コントローラ500は、例えば、機械630の出力（つまり、主軸の位置）であるFB位置（主軸）を主軸サーボ系600から取得し、主軸サーボ系600および従軸サーボ系700の制御に利用する。また、コントローラ500は、例えば、機械730の出力（つまり、従軸の位置）であるFB位置（従軸）を従軸サーボ系700から取得し、従軸サーボ系700の制御に利用する。

【0139】

20

（コントローラの概要）

これまで、制御システム2の概要を説明してきた。次に、コントローラ500についての理解を容易にするため、コントローラ500の概要を以下のように整理しておく。

【0140】

すなわち、コントローラ500は、主軸の過去および現在の各々の主軸側制御周期における「FB値および指令値」、さらに、未来の主軸側制御周期における指令値を用いて、未来の主軸側制御周期におけるFB値を予測する。つまり、コントローラ500は、主軸の過去および現在の各々の主軸側制御周期における「FB位置（主軸）および指令位置（主軸）」と、未来の主軸側制御周期における指令位置（主軸）とを用いて、未来の主軸側制御周期におけるFB位置（主軸）を予測する。

30

【0141】

ここで、コントローラ500は、「主軸の現在の主軸側制御周期における位置偏差（FB位置（主軸）と指令位置（主軸）との偏差）の、時間に対する変化率が一定で継続する」と仮定して、「主軸の未来の主軸側制御周期における位置偏差」を算出する。

【0142】

具体的には、コントローラ500は、「現在の主軸側制御周期における位置偏差の、時間に対する変化率が、未来においても一定で継続する」と仮定して、以下の処理を実行する。すなわち、コントローラ500は、現在および過去の各々の主軸側制御周期における位置偏差を、現在および過去の各々の主軸側制御周期における「FB位置（主軸）および指令位置（主軸）」を用いて算出する。そして、コントローラ500は、算出した「現在および過去の各々の主軸側制御周期における位置偏差」から、現在の主軸側制御周期における位置偏差変化率を演算する。

40

【0143】

コントローラ500は、「現在の主軸側制御周期における位置偏差変化率」が一定で継続すると仮定して、「未来の主軸側制御周期における位置偏差」を算出する。すなわち、コントローラ500は、前記仮定の下で、主軸側制御周期に対応する時間間隔（周期時間）と、「現在の主軸側制御周期における、位置偏差および位置偏差変化率」とから、「未来の主軸側制御周期における位置偏差」を算出する。

【0144】

そして、コントローラ500は、算出した「未来の主軸側制御周期における位置偏差」

50

と、「未来の主軸側制御周期における指令位置（主軸）」とから、「未来の主軸側制御周期におけるF B位置（主軸）」を、つまり、主軸の未来のF B値を、予測する。

【0145】

コントローラ500は、予測した主軸の未来のF B値（つまり、未来の周期におけるF B位置（主軸））に対応する、従軸の未来の指令値（つまり、未来の周期における指令位置（従軸））。つまり、対応従属位置）を演算する。コントローラ500は、演算した対応従属位置（＝未来の周期における指令位置（従軸））を入力として、従軸サーボ系700の動特性モデルを用いたMPCを従軸の制御に適用し、つまり、従軸サーボ系700についてMPCを実行する。また、コントローラ500は、主軸サーボ系600の動特性モデルを用いたMPCを、主軸の制御に適用し、つまり、主軸サーボ系600についてMPC

10

【0146】

具体的には、コントローラ500は、主軸の位置に対して従軸の位置を追従させる制御装置であって、第2予測部530（予測部）と、カム演算部540（演算部）と、第2MPC部550（従軸指令部）と、を備えている。第2予測部530は、「主軸の目標軌道から生成される指令位置である指令位置（主軸）（つまり、主軸指令位置）と、F B位置（主軸）（つまり、主軸フィードバック位置）との偏差である位置偏差（「位置偏差（主軸）」とも称する）」の、現在における時間変化率が、所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、未来におけるF B位置（主軸）を予測する。カム演算部540は、第2予測部530により予測された「未来におけるF B位置（主軸）」に対応する、「未来における従軸の位置」である対応従属位置を演算する。第2MPC部550は、従軸の位置をフィードバック制御する従軸サーボ系700の動特性モデルを用いて予測する「未来における従軸の予測位置」が、カム演算部540により演算された「未来における対応従属位置」に一致するように、従軸サーボ系700に対する現在における指令値である従軸指令値を生成する。

20

【0147】

前記の構成によれば、コントローラ500は、「位置偏差（主軸）」の、現在における時間変化率が、所定期間にわたって一定のまま継続する」と仮定して、未来におけるF B位置（主軸）を予測する。

【0148】

特に、コントローラ500は、主軸サーボ系600の動特性モデルを用いずに予測した「未来のF B位置（主軸）」から、「未来のF B位置（主軸）」に対応する、「従軸の未来の位置」である対応従属位置を演算する。そして、コントローラ500は、演算した「対応従属位置（未来における従軸の位置）」を「従軸の未来の指令値（指令位置）」とする、従軸サーボ系700の動特性モデルを用いたMPCを、従軸の制御に適用する。つまり、コントローラ500は、未来におけるF B位置（主軸）を予測し、予測した「未来におけるF B位置（主軸）」に対応する「対応従属位置（従軸の未来の指令値、未来の周期における指令位置（従軸））」を用いたMPCを、従軸の制御に適用する。

30

【0149】

したがって、コントローラ500は、従軸の位置制御について追従性を向上させ、従軸の位置制御を高速化・高精度化することができるとの効果を奏する。例えば、コントローラ500は、コントローラ500によって制御する機械等の動作をより高速化させて、これらの機械を用いた生産現場の生産性の向上に寄与するとの効果を奏する。

40

【0150】

コントローラ500は、例えば、主軸の位置に対して従軸の位置を追従させる。コントローラ500において、第2予測部530は、「各周期（各主軸側制御周期）における指令位置（主軸）とF B位置（主軸）との偏差である位置偏差（つまり、位置偏差（主軸））の、時間に対する変化率が、複数の周期にわたって一定である」と仮定して、「現在および過去の各周期（各主軸側制御周期）におけるF B位置（主軸）」と、「過去、現在、および、未来の各周期（各主軸側制御周期）における指令位置（主軸）」と、を用いて、

50

未来の周期（主軸側制御周期）における F B 位置（主軸）を予測する。

【 0 1 5 1 】

前記の構成によれば、コントローラ 5 0 0 は、「現在および過去の各周期（各主軸側制御周期）における F B 位置（主軸）」と、「過去、現在、および、未来の各周期（各主軸側制御周期）における指令位置（主軸）」と、を用いて、未来の周期（主軸側制御周期）における F B 位置（主軸）を予測する。

【 0 1 5 2 】

例えば、コントローラ 5 0 0 は、現在の周期（主軸側制御周期）における指令位置（主軸）と F B 位置（主軸）との差から、現在の周期（主軸側制御周期）における位置偏差（主軸）を算出する。また、コントローラ 5 0 0 は、現在から 1 周期前の周期（主軸側制御周期）における指令位置（主軸）と F B 位置（主軸）との差から、現在から 1 周期前の周期（主軸側制御周期）における位置偏差（主軸）を算出する。

10

【 0 1 5 3 】

そして、コントローラ 5 0 0 は、現在の周期（主軸側制御周期）における位置偏差（主軸）と、現在から 1 周期前の周期（主軸側制御周期）における位置偏差（主軸）との差を、前記周期（主軸側制御周期）の時間間隔である周期時間で除して、「現在の周期（主軸側制御周期）における位置偏差（主軸）の、時間に対する変化（率）」を示す、「現在の周期（主軸側制御周期）における位置偏差変化率」を算出する。

【 0 1 5 4 】

コントローラ 5 0 0 は、算出した「現在の周期（主軸側制御周期）における位置偏差変化率」が未来の周期（主軸側制御周期）においても一定で継続すると仮定して、前記周期時間、「現在の周期（主軸側制御周期）における位置偏差変化率」、および、「現在の周期（主軸側制御周期）における位置偏差（主軸）」から、「未来の周期（主軸側制御周期）における位置偏差（主軸）」を算出する。

20

【 0 1 5 5 】

そして、コントローラ 5 0 0 は、「未来の周期（主軸側制御周期）における指令位置（主軸）」と、算出した「未来の周期（主軸側制御周期）における位置偏差（主軸）」との差から、「未来の周期（主軸側制御周期）における F B 位置（主軸）」を予測する。

【 0 1 5 6 】

コントローラ 5 0 0 は、予測した「未来の周期における F B 位置（主軸）」に対応する、未来の周期における従軸の位置（つまり、指令位置（従軸））である対応従属位置を演算する。コントローラ 5 0 0 は、演算した対応従属位置を「未来の従軸の指令値（指令位置（従軸））」とする、従軸サーボ系 7 0 0 の動特性モデルを用いた M P C を、従軸の制御に適用する。つまり、コントローラ 5 0 0 は、従軸の制御に適用する M P C に、「現在および過去の F B 位置（主軸）」と、「過去、現在、および、未来の指令位置（主軸）」とを用いて予測した「未来の F B 位置（主軸）」に対応する「未来の指令位置（従軸）（つまり、対応従属位置）」を用いる。

30

【 0 1 5 7 】

したがって、コントローラ 5 0 0 は、主軸の位置に対して従軸の位置を追従させる制御装置において、従軸の位置制御について追従性を向上させ、従軸の位置制御を高速化・高精度化することができるとの効果を奏する。

40

【 0 1 5 8 】

コントローラ 5 0 0 は、主軸サーボ系 6 0 0 の動特性モデルを用いて予測する「未来における主軸の予測位置」が、未来における指令位置（主軸）に一致するように、主軸サーボ系 6 0 0 に対する現在における指令値（指令主軸値。「指令速度（主軸）」とも称する）を生成する第 1 M P C 部 5 2 0（主軸指令部）を備えている。

【 0 1 5 9 】

前記の構成によれば、コントローラ 5 0 0 は、主軸サーボ系 6 0 0 の動特性モデルを用いて予測する「未来における主軸の予測位置」が、未来における指令位置（主軸）に一致するように、主軸サーボ系 6 0 0 に対する現在における指令値（指令速度（主軸））を生

50

成する。

【0160】

したがって、コントローラ500は、主軸サーボ系600の動特性モデルを用いたMPCを主軸の位置の制御に適用することによって、主軸の位置制御について、追従性を向上させることができるとの効果を奏する。

【0161】

特に、「未来における指令位置（主軸）」を用いて「未来におけるFB位置（主軸）」を予測する場合、主軸の位置の制御には、高い追従性が求められる。そこで、コントローラ500は、主軸サーボ系600の動特性モデルを用いたMPCを主軸の位置の制御に適用することによって、主軸の位置制御について、追従性を向上させている。

10

【0162】

したがって、コントローラ500は、MPCによって主軸の位置制御の追従性を向上させ、かつ、未来における指令位置（主軸）」を用いて予測した未来におけるFB位置（主軸）」を用いて、従軸の位置制御の追従性を向上させることができるとの効果を奏する。

【0163】

制御システム2（コントローラ500）において、例えば、主軸は電子カムの主軸であり、従軸は前記電子カムの従軸である。カム演算部540は、例えば、第2予測部530により予測された「未来における電子カムの主軸の位相（位置）」に対応する、「未来における電子カムの従軸の位置」を演算する。

【0164】

前記の構成によれば、コントローラ500は、予測した「未来における電子カムの主軸の位相」に対応する、「未来における電子カムの従軸の位置」を演算する。

20

【0165】

ここで、コントローラ500は、「電子カムの主軸の目標軌道から生成される指令位置である指令位置（主軸）」とFB位置（主軸）」との偏差である位置偏差（主軸）」の、現在における時間変化率が、所定期間にわたって一定のまま継続する」と仮定して、未来における電子カムの主軸のフィードバック位置（フィードバック位相）」を予測する。

【0166】

つまり、コントローラ500は、電子カムの未来の主軸の位置を主軸サーボ系600の動特性モデルを用いずに予測する。そして、コントローラ500は、予測した「電子カムの未来の主軸の位置」に対応する、「電子カムの未来の従軸の位置（対応従属位置）」を演算する。コントローラ500は、演算した対応従属位置を用いて、電子カムの従軸の位置を制御する（具体的には、電子カムの従軸の位置制御に、MPCを適用する）。コントローラ500は、未来におけるFB位置（主軸）」を予測し、予測した「未来におけるFB位置（主軸）」に対応する「電子カムの従軸の未来の指令値」を用いたMPCを、従軸の制御に適用する。

30

【0167】

したがって、コントローラ500は、電子カムの主軸の位置（位相）」に対して電子カムの従軸の位置を追従させる制御装置において、従軸の位置制御について追従性を向上させ、従軸の位置制御を高速化・高精度化することができるとの効果を奏する。

40

【0168】

特に、コントローラ500は、主軸サーボ系600の動特性モデルを用いずに予測した「電子カムの主軸の未来のフィードバック位置」から、対応する「電子カムの従軸の未来の位置である、対応従属位置」を演算する。そして、コントローラ500は、演算した「対応従属位置（未来における従軸の位置）」を「従軸の未来の指令値（指令位置）」とする、従軸サーボ系700の動特性モデルを用いたMPCを、従軸の制御に適用する。したがって、コントローラ500は、電子カムの従軸の位置制御について、追従性を向上させ、従軸の位置制御を高速化・高精度化することができるとの効果を奏する。

【0169】

これまでに概要を整理してきたコントローラ500について、次に、その構成等の詳細

50

について、図 3 を用いて説明していく。

【 0 1 7 0 】

(コントローラの詳細)

図 3 に示すように、コントローラ 5 0 0 は、機能ブロックとして、指令値生成部 5 1 0、第 1 M P C 部 5 2 0、第 2 予測部 5 3 0、カム演算部 5 4 0、第 2 M P C 部 5 5 0、および、監視部 5 6 0 を備えている。なお、記載の簡潔性を担保するため、本実施の形態に直接関係のない構成は、説明およびブロック図から省略している。ただし、実施の実情に則して、コントローラ 5 0 0 は、当該省略された構成を備えてもよい。図 3 に例示した各機能ブロックは、例えば、C P U (central processing unit) などが、R O M (read only memory)、N V R A M (non-Volatile random access memory) 等で実現された記憶装置 (記憶部 5 7 0) に記憶されているプログラムを不図示の R A M (random access memory) 等に読み出して実行することで実現できる。以下、コントローラ 5 0 0 における各機能ブロックについて説明する。

10

【 0 1 7 1 】

(記憶部以外の機能ブロックの詳細)

指令値生成部 5 1 0 は、指令値生成部 1 1 0 と同様であり、外部から、主軸の目標軌道データを受け付け、受け付けた目標軌道データから主軸側制御周期ごとに指令値 (具体的には、指令位置 (主軸)) を生成する。そして、指令値生成部 5 1 0 は、生成した指令位置 (主軸) を、第 1 M P C 部 5 2 0 および第 2 予測部 5 3 0 へと出力する。

20

【 0 1 7 2 】

第 1 M P C 部 5 2 0 は、主軸サーボ系 6 0 0 の制御に、主軸サーボ系 6 0 0 の動特性モデルを用いる M P C を適用する。具体的には、第 1 M P C 部 5 2 0 は、主軸サーボ系 6 0 0 の動特性モデル (主軸サーボドライバ 6 1 0 および機械 6 3 0 の動特性モデル) を用いて、主軸サーボ系 6 0 0 について M P C (モデル予測制御) を行なう。具体的には、第 1 M P C 部 5 2 0 は、指令値生成部 5 1 0 により生成された指令位置 (主軸) と、主軸サーボ系 6 0 0 から取得する F B 位置 (主軸) とを用いて、主軸サーボ系 6 0 0 の動特性モデルを用いた M P C によって、指令速度 (主軸) を生成する。

【 0 1 7 3 】

まず、第 1 M P C 部 5 2 0 は、主軸サーボドライバ 6 1 0 および機械 6 3 0 のモデル (つまり、主軸サーボ系 6 0 0 の動特性モデル) を内部モデルとして有し、この内部モデルを用いて、「未来の周期 (主軸側制御周期) における F B 位置 (主軸) 」を予測する。例えば、第 1 M P C 部 5 2 0 は、主軸サーボ系 6 0 0 の動特性モデルによって、これまでに取得している F B 位置 (主軸) を用いて、「未来の主軸側制御周期における F B 位置 (主軸) 」を予測する。

30

【 0 1 7 4 】

そして、第 1 M P C 部 5 2 0 は、予測した「未来の周期における F B 位置 (主軸) 」が、指令値生成部 5 1 0 により生成された指令位置 (主軸) に一致するように、主軸サーボ系 6 0 0 に対する現在の周期における指令値 (例えば、指令速度 (主軸)) を生成する。第 1 M P C 部 5 2 0 は、予測した「未来の周期における F B 位置 (主軸) 」が、主軸の目標軌道データから生成された指令位置 (主軸) に一致するよう、現在の主軸制御周期における指令速度 (主軸) を生成する。第 1 M P C 部 5 2 0 は、生成した「現在の主軸制御周期における指令速度 (主軸) 」を、現在の主軸制御周期において、主軸サーボ系 6 0 0 (具体的には、主軸サーボドライバ 6 1 0) に出力する。

40

【 0 1 7 5 】

なお、主軸サーボ系 6 0 0 の動特性モデルを用いた M P C を主軸サーボ系 6 0 0 の制御に適用する第 1 M P C 部 5 2 0 は、主軸サーボ系 6 0 0 の制御について動摩擦補償も適用するものとする。これまでに説明した M P C 部 1 4 0、および以下に説明する第 2 M P C 部 5 5 0 についても、各々、従軸サーボ系 3 0 0 および従軸サーボ系 7 0 0 の各々に対する制御について動摩擦補償を適用してもよい。

【 0 1 7 6 】

50

例えば、第 1 M P C 部 5 2 0 は、主軸サーボ系 6 0 0 の制御について、指令速度（主軸）を主軸サーボドライバ 6 1 0 に出力することにより、主軸サーボドライバ 6 1 0 の高速な（つまり、主軸側制御周期よりも高速な）演算ループによる摩擦補償を利用する。これに対して、実施形態 1 のコントローラ 1 0 0 における指令値生成部 1 1 0 は、主軸サーボ系 2 0 0 の制御に M P C も動摩擦補償も適用していない。なお、動摩擦補償は上述のようにサーボドライバ側で実行するだけでなく、コントローラ側で、つまり、コントローラ 1 0 0 およびコントローラ 5 0 0 側で実行してもよい。

【 0 1 7 7 】

第 2 予測部 5 3 0 は、主軸サーボ系 6 0 0 から、「主軸サーボ系 6 0 0（特に、機械 6 3 0）の出力である主軸の位置（＝ F B 位置（主軸））」を、F B 情報として、主軸側制御周期ごとに取得する。また、第 2 予測部 5 3 0 は、指令値生成部 5 1 0 から、指令値生成部 5 1 0 が目標軌道データから主軸側制御周期ごとに生成する指令値（具体的には、指令位置（主軸））を、特に、過去、現在、および、未来の主軸側制御周期の各々における指令値を取得する。

10

【 0 1 7 8 】

ここで、第 2 予測部 5 3 0 は、主軸（＝主軸サーボ系 6 0 0）への未来の指令値と、主軸の過去および現在の各々における制御偏差（例えば、指令位置（主軸）と F B 位置（主軸）との位置偏差）を用いて、主軸の未来の F B 値を予測する。具体的には、第 2 予測部 5 3 0 は、主軸の過去および現在の F B 値と、過去、現在、および、未来の主軸（＝主軸サーボ系 6 0 0）への指令値を用いて、位置偏差変化率が複数の主軸側制御周期にわたって一定で継続すると仮定して、主軸の未来の F B 値を予測する。例えば、

20

【 0 1 7 9 】

【数 3】

H：予測ホライズン（H周期先までの未来の指令値が必要）

Ts：制御周期

ER：位置偏差

ERd：位置偏差変化率

PV_n：現周期のFB位置

PV_{n-1}：1周期前のFB位置

SP_n：現周期の指令位置

SP_{n-1}：1周期前の指令位置

SP(i)：i周期後の指令位置、i=1 to H

PVpr(i)：i周期後の予測FB位置、i=1 to H

30

【 0 1 8 0 】

として、第 2 予測部 5 3 0 は、

【 0 1 8 1 】

【数 4】

$$ER = SP_n - PV_n$$

$$ERd = \{(SP_n - PV_n) - (SP_{n-1} - PV_{n-1})\} / Ts$$

40

for i = 1 to H

$$ER = ER + ERd * Ts$$

$$PVpr(i) = SP(i) - ER$$

end

【 0 1 8 2 】

を実行する。

【 0 1 8 3 】

すなわち、第 2 予測部 5 3 0 は、「現在的主軸側制御周期における主軸指令位置（上述

50

の式における SP_n)」と「現在の主軸側制御周期における FB 位置 (主軸) (上述の式における PV_n)」との差から、「現在の主軸側制御周期における位置偏差 (ER_n)」を算出する。

【0184】

また、第2予測部530は、「現在から1周期前の主軸側制御周期における主軸指令位置 (上述の式における SP_{n-1})」と「現在から1周期前の主軸側制御周期における FB 位置 (主軸) (上述の式における PV_{n-1})」との差から、「現在から1周期前の主軸側制御周期における位置偏差 (ER_{n-1})」を算出する。

【0185】

そして、第2予測部530は、「現在の主軸側制御周期における位置偏差 (ER_n)」と、「現在から1周期前の主軸側制御周期における位置偏差 (ER_{n-1})」との差を、主軸側制御周期の時間間隔である周期時間 T_s で除して、「現在の主軸側制御周期における、位置偏差の時間に対する変化 (率)」を示す、「現在の主軸側制御周期における位置偏差変化率 (上述の式における ER_d)」を算出する。

【0186】

第2予測部530は、算出した「現在の主軸側制御周期における位置偏差変化率 ER_d 」が、未来の主軸側制御周期においても一定で継続すると仮定して、「未来の主軸側制御周期における位置偏差 (ER_i)」を算出する。

具体的には、「未来の主軸側制御周期における位置偏差 (ER_i)」が、「 i 周期後の位置偏差 (「 $i = 1$ to H 」とする)」であるとして、第2予測部530は、「 i 周期後の位置偏差 (ER_i)」を、上述の式の通り予測する。すなわち、第2予測部530は、周期時間 T_s 、「現在の主軸側制御周期における位置偏差変化率 (ER_d)」、および、「現在の主軸側制御周期における位置偏差 (ER_n)」から、「 $ER_i = ER_n + ER_d * T_s * i$ 」を演算する。

【0187】

そして、第2予測部530は、「 i 周期後の主軸側制御周期における主軸指令位置 (上述の式における SP_i)」と、演算した「 i 周期後の位置偏差 (ER_i)」との差から、「 i 周期後の主軸側制御周期における FB 位置 (主軸) (上述の式における $PV_{pr}(i)$)」を予測する。

【0188】

第2予測部530は、予測した主軸側制御周期ごとの「未来の主軸側制御周期における FB 位置 (主軸)」を、カム演算部540に通知し、また、記憶部570の予測主軸位置テーブル571に格納する。

【0189】

カム演算部540は、第2予測部530から通知された「未来の主軸側制御周期における FB 位置 (主軸)」に対応する、「未来の従軸制御周期における指令位置 (従軸)」を演算する。なお、以下では、カム演算部540が「未来の主軸側制御周期における FB 位置 (主軸)」から演算する「未来の従軸制御周期における指令位置 (従軸)」を、「対応従属位置」とも称する。

【0190】

カム演算部540は、例えば、「主軸の位置に対して、従軸の位置を対応付けた配列」である主従関係情報 (例えば、いわゆる「カムテーブル」) を用いて、対応従属位置を演算する。カム演算部540は、「主軸の位置に対して、従軸の位置を対応付けた演算式 (例えば、いわゆる「カム演算式」) 」を用いて、対応従属位置を演算してもよい。カム演算部540は、周知の技術を用いて、対応従属位置を演算できればよく、対応従属位置を演算する方法は、特に限定されない。

【0191】

カム演算部540は、「未来の主軸側制御周期における FB 位置 (主軸)」から演算した、「未来の主軸側制御周期における FB 位置 (主軸)」に対応する「未来の従軸制御周期における指令位置 (従軸)」を、第2MPC部550に通知する。

【 0 1 9 2 】

第 2 M P C 部 5 5 0 は、従軸サーボ系 7 0 0 の動特性モデルを用いて、従軸サーボ系 7 0 0 について M P C (モデル予測制御)を行なう。具体的には、第 2 M P C 部 5 5 0 は、カム演算部 5 4 0 により演算された対応従属位置と、従軸サーボ系 7 0 0 から取得する F B 位置 (従軸) とを用いて、従軸サーボ系 7 0 0 の動特性モデルを用いた M P C によって、指令速度 (従軸) を生成する。

【 0 1 9 3 】

先ず、第 2 M P C 部 5 5 0 は、従軸サーボドライバ 7 1 0 および機械 7 3 0 のモデル (つまり、従軸サーボ系 7 0 0 の動特性モデル) を内部モデルとして有し、この内部モデルを用いて、「未来の周期 (従軸側制御周期) における F B 位置 (従軸)」を予測する。例えば、第 2 M P C 部 5 5 0 は、従軸サーボ系 7 0 0 の動特性モデルによって、「これまでに取得している F B 位置 (従軸)」および「これまでに従軸サーボドライバ 7 1 0 へ出力している指令値 (従軸)」を用いて、「未来の従軸側制御周期における F B 位置 (従軸)」を予測する。

【 0 1 9 4 】

そして、第 2 M P C 部 5 5 0 は、予測した「未来の周期における F B 位置 (従軸)」が、カム演算部 5 4 0 により演算された対応従属位置に一致するように、従軸サーボ系 7 0 0 に対する現在の周期における指令値 (例えば、指令速度 (従軸)) を生成する。第 2 M P C 部 5 5 0 は、予測した「未来の周期における F B 位置 (従軸)」が、「未来の主軸側制御周期における F B 位置 (主軸)」に対応する「未来の従軸制御周期における指令位置 (従軸)」に一致するよう、現在の従軸制御周期における指令速度 (従軸) を生成する。第 2 M P C 部 5 5 0 は、生成した「現在の従軸制御周期における指令速度 (従軸)」を、現在の従軸制御周期において、従軸サーボ系 7 0 0 (具体的には、従軸サーボドライバ 7 1 0) に出力する。

【 0 1 9 5 】

監視部 5 6 0 は、監視部 1 5 0 と同様であるため、詳細は略記する。また、記憶部 5 7 0、および、記憶部 5 7 0 に格納されている予測主軸位置テーブル 5 7 1 は、各々、記憶部 1 6 0、および記憶部 1 6 0 に格納されている予測主軸位置テーブル 1 6 1 と同様であるため、詳細は略記する。すなわち、予測主軸位置テーブル 5 7 1 には、第 2 予測部 5 3 0 によって、第 2 予測部 5 3 0 が各主軸側制御周期において予測した、主軸側制御周期ごとの「未来の主軸側制御周期における F B 位置 (主軸)」が格納される。また、監視部 5 6 0 は、第 2 予測部 5 3 0 により予測された「未来の主軸側制御周期における F B 位置 (主軸)」を監視し、例えば、予測主軸位置テーブル 5 7 1 に格納されている複数周期分の「未来の主軸側制御周期における F B 位置 (主軸)」を監視する。監視部 5 6 0 は、「未来の主軸側制御周期における F B 位置 (主軸)」の経時変化を監視することによって、「未来の主軸側制御周期における F B 位置 (主軸)」の変動を検知し、例えば、変動にみられる傾向性および急激な変動の発生等を把握する。

【 0 1 9 6 】

(コントローラが実行する処理について)

図 4 は、コントローラ 5 0 0 が実行する処理の全体概要を示すフロー図である。コントローラ 5 0 0 は先ず初期処理を実行し (S 8 1 0)、例えば、起動後、通常動作 (主軸サーボ系 6 0 0 および従軸サーボ系 7 0 0 の各々への制御処理) を開始する前の初期イニシャライズ (初期処理、例えば、通常動作に必要な各種の設定処理等) を実行する。

【 0 1 9 7 】

コントローラ 5 0 0 は、主軸サーボ系 6 0 0 および従軸サーボ系 7 0 0 の各々から、主軸および従軸の各々の F B 値 (つまり、F B 位置 (主軸) および F B 位置 (従軸)) を入力として受け付ける (S 8 2 0)。そして、指令値生成部 5 1 0 は、主軸の目標軌道データから、主軸側制御周期ごとの主軸サーボドライバ 6 1 0 への指令値 (例、指令位置 (主軸)) を計算する (S 8 3 0)。指令値生成部 5 1 0 は、生成した指令位置 (主軸) を、第 1 M P C 部 5 2 0 および第 2 予測部 5 3 0 へと出力する。指令値生成部 5 1 0 から指令

位置（主軸）を通知された第1MPC部520は、主軸サーボ系600の動特性モデルを用いるMPCによって、主軸サーボドライバ610に対する指令値（例、指令速度（主軸））を計算する（S840）。

【0198】

第2予測部530は、S820で受け付けたFB位置（主軸）と、指令値生成部510から取得する「過去、現在、および、未来の主軸側制御周期の各々における指令位置（主軸）」とから、主軸の未来のFB値を予測する（S850）。すなわち、第2予測部530は、過去および現在的主軸側制御周期の各々における位置偏差（＝指令位置とFB位置との偏差）と、未来の主軸側制御周期における指令位置（主軸）とを用いて、未来の主軸側制御周期におけるFB位置（主軸）を、予測する。第2予測部530は、予測した「未来の主軸側制御周期におけるFB位置（主軸）」を、カム演算部540に通知する。

10

【0199】

カム演算部540は、第2予測部530から通知された「未来の主軸側制御周期におけるFB位置（主軸）」に対応する、従軸の未来対応値（対応従属位置）を、つまり、「未来の従軸制御周期における指令位置（従軸）」を、計算する（S860）。カム演算部540は、「未来の主軸側制御周期におけるFB位置（主軸）」から計算した対応従属位置を、第2MPC部550に通知する。

【0200】

第2MPC部550は、従軸サーボ系700の動特性モデルを用いて、従軸サーボドライバ710への指令値を計算し（S870）、つまり、従軸サーボ系700の動特性モデルを用いたMPCを従軸サーボ系700の制御に適用する。具体的には、第2MPC部550は、従軸サーボ系700の動特性モデルを用いて予測した「未来の周期（従軸側制御周期）におけるFB位置（従軸）」が、S860で計算した対応従属位置に一致するように、指令速度（従軸）を生成する。

20

【0201】

コントローラ500（具体的には、第1MPC部520および第2MPC部550の各々）は、主軸側および従軸側のサーボドライバ（つまり、主軸サーボドライバ610および従軸サーボドライバ710）へ、指令値を出力する（S880）。すなわち、第1MPC部520は主軸サーボドライバ610に指令速度（主軸）を出力し、第2MPC部550は従軸サーボドライバ710に指令速度（従軸）を出力する。そして、コントローラ500は、制御が終了する（S890でYes）まで、S820からS880までの処理を、制御周期ごとに繰り返す。

30

【0202】

これまでに図4を用いて説明してきた、コントローラ500の実行する制御方法は、以下のように整理することができる。すなわち、コントローラ500の実行する制御方法は、主軸の位置に対して従軸の位置を追従させる制御装置の制御方法であって、「主軸の目標軌道から生成される指令位置である指令位置（主軸）（つまり、主軸指令位置）と、FB位置（主軸）との偏差である位置偏差（つまり、位置偏差（主軸））」の、現在における時間変化率が、所定期間にわたって一定のまま継続すると仮定して、未来におけるFB位置（主軸）を予測する予測ステップ（S850）と、予測ステップにて予測された「未来におけるFB位置（主軸）」に対応する、「未来における従軸の位置」である対応従属位置を演算する演算ステップ（S860）と、従軸の位置をフィードバック制御する従軸サーボ系700の動特性モデルを用いて予測する「未来における従軸の予測位置」が、演算ステップにて演算された「未来における対応従属位置」に一致するように、従軸サーボ系700に対する現在における指令値である従軸指令値を生成する従軸指令ステップ（S870）と、を含んでいる。

40

【0203】

前記の方法によれば、前記制御方法は、「位置偏差（主軸）の、現在における時間変化率が、所定期間にわたって一定のまま継続する」と仮定して、未来におけるFB位置（主軸）を予測する。

50

【0204】

特に、前記制御方法は、主軸サーボ系600の動特性モデルを用いずに予測した「未来のFB位置（主軸）」から、「未来のFB位置（主軸）」に対応する、「従軸の未来の位置」である対応従属位置を演算する。そして、前記制御方法は、演算した「対応従属位置（未来における従軸の位置）」を「従軸の未来の指令値（指令位置）」とする、従軸サーボ系700の動特性モデルを用いたMPCを、従軸の制御に適用する。つまり、前記制御方法は、未来におけるFB位置（主軸）を予測し、予測した「未来におけるFB位置（主軸）」に対応する「対応従属位置（従軸の未来の指令値、未来の周期における指令位置（従軸））」を用いたMPCを、従軸の制御に適用する。

【0205】

10

したがって、前記制御方法は、従軸の位置制御について追従性を向上させ、従軸の位置制御を高速化・高精度化することができるとの効果を奏する。例えば、前記制御方法は、前記制御方法によって制御する機械等の動作をより高速化させて、これらの機械を用いた生産現場の生産性の向上に寄与するとの効果を奏する。

【0206】

〔実施形態3〕

本発明の実施形態3について、図5に基づいて、以下に説明する。なお、説明の便宜上、前記実施形態にて説明した部材と同じ機能を有する部材については、同じ符号を付記し、その説明を省略する。

【0207】

20

図5は、実施形態3に係るコントローラ900等の要部構成を示すブロック図である。図5に示すように、コントローラ900は、実施形態2に係るコントローラ500と以下の1点において異なり、他の点においてはコントローラ500と同様である。すなわち、コントローラ900は、コントローラ500の第2予測部530に代えて、コントローラ100の第1予測部120を備え、その他の構成はコントローラ500と同様である。

【0208】

ここで、コントローラ100の第1予測部120およびコントローラ500の各構成については既に説明しているから、詳細は略記する。すなわち、コントローラ900の第1予測部120は、主軸サーボ系600から、「主軸サーボ系600（特に、機械630）の出力である主軸の位置（＝FB位置（主軸））」を、FB情報として、主軸側制御周期ごとに取得する。そして、第1予測部120は、主軸側制御周期ごとに取得したFB位置（主軸）から、「未来の主軸側制御周期におけるFB位置（主軸）」を主軸側制御周期ごとに予測する。第1予測部120は、予測した主軸側制御周期ごとの「未来の主軸側制御周期におけるFB位置（主軸）」を、カム演算部540に通知し、また、記憶部570の予測主軸位置テーブル571に格納する。カム演算部540は、第1予測部120から通知された「未来の主軸側制御周期におけるFB位置（主軸）」に対応する、「未来の従軸制御周期における指令位置（従軸）」を演算する。

30

【0209】

「第2予測部530に代えて、第1予測部120を備えている」点を除いて、コントローラ900がコントローラ500と同様であるのに対応して、コントローラ900が実行する処理も、コントローラ500の実行する処理とほぼ同様である。

40

【0210】

具体的には、図4のS850において、第2予測部530は、S820で受け付けたFB位置（主軸）と、指令値生成部510から取得する「過去、現在、および、未来の主軸側制御周期の各々における指令位置（主軸）」とから、主軸の未来のFB値を予測した。これに対して、コントローラ900は、図4のS810からS840までの処理を実行した後、以下の処理を実行する。

【0211】

すなわち、コントローラ900の第1予測部120は、S820で受け付けたFB位置（主軸）から、主軸の未来FB値を、つまり、「未来の主軸側制御周期におけるFB位置

50

（主軸）」を、予測する（S 8 5 0'）。そして、第 1 予測部 1 2 0 は、予測した「未来の主軸側制御周期における F B 位置（主軸）」を、カム演算部 5 4 0 に通知する。その後、コントローラ 9 0 0 は、図 4 の S 8 6 0 から S 8 9 0 までの処理を実行する。

【 0 2 1 2 】

〔各実施形態のコントローラが奏する効果〕

これまでに説明してきたコントローラ 1 0 0、5 0 0、および 9 0 0 の各々が奏する効果について、以下に図 6 から図 9 を用いて説明していく。具体的には、主軸制御に外乱を印加するシミュレーション 1 およびシミュレーション 2 の各々において、従来のコントローラおよび各実施形態に係るコントローラが実現する従軸制御について、以下に詳細を説明していく。

10

【 0 2 1 3 】

（シミュレーション例 1）

図 6 は、シミュレーション 1 において、主軸の制御（例えば、制御システム 1 における主軸サーボ系 2 0 0、制御システム 2 における主軸サーボ系 6 0 0、および、制御システム 3 における主軸サーボ系 6 0 0）に印加する正弦波状のトルク外乱を示す図である。図 6 に例示するように、以下に説明するシミュレーション 1 において、主軸の制御に印加する外乱は、振幅 5 0 %、周波数 1 0 H z の正弦波状のトルク外乱とする。

【 0 2 1 4 】

図 7 は、図 6 の外乱を印加した場合に、従来のコントローラおよび各実施形態に係るコントローラ（つまり、コントローラ 1 0 0、5 0 0、および 9 0 0）が実現する従軸制御について説明する図である。シミュレーション 1 において、従来のコントローラおよび各実施形態に係るコントローラは、主軸と従軸とに同一の動作をさせようとするものとし、図 6 に示す外乱を主軸の制御に印加したときの、各コントローラの従軸制御の結果を示すのが、図 7 である。

20

【 0 2 1 5 】

図 7 において（A）は、従来のコントローラ（つまり、「主軸の未来のフィードバック値」の予測を行なわないコントローラ）について、主軸の制御に図 6 の外乱を印加した場合の「指令位置」、「位置偏差」、および、「トルク」を順に示している。なお、従来のコントローラは、従軸の制御において、現在の指令値が予測区間継続するとみなして従軸の制御を行なうものとする。

30

【 0 2 1 6 】

同様に、図 7 において（B）は、コントローラ 1 0 0 について、主軸サーボ系 2 0 0 に図 6 の外乱を印加した場合の「指令位置」、「位置偏差」、および、「トルク」を順に示している。図 7 において（C）は、コントローラ 9 0 0 について、主軸サーボ系 6 0 0 に図 6 の外乱を印加した場合の「指令位置」、「位置偏差」、および、「トルク」を順に示している。図 7 において（D）は、コントローラ 5 0 0 について、主軸サーボ系 2 0 0 に図 6 の外乱を印加した場合の「指令位置」、「位置偏差」、および、「トルク」を順に示している。

【 0 2 1 7 】

ここで、図 7 の（A）から（D）の各々における「指令位置」は、従軸側への指令位置を示しており、具体的には主軸の F B 位置（つまり、F B 位置（主軸））を示している。また、図 7 の（A）から（D）の各々における「位置偏差」は、主軸の F B 位置（つまり、F B 位置（主軸））。言い換えれば、前述の従軸側への「指令位置」と従軸の F B 位置（つまり、F B 位置（従軸））との偏差を示している。さらに、図 7 の（A）から（D）の各々における「トルク」は、従軸を制御するフィードバック制御系（例えば、従軸サーボ系 3 0 0 または従軸サーボ系 7 0 0）の出力するトルクを示している。

40

【 0 2 1 8 】

なお、前述の通り、主軸サーボ系 6 0 0 の動特性モデルを用いた M P C を主軸サーボ系 6 0 0 の制御に適用するコントローラ 5 0 0 および 9 0 0 は、主軸サーボ系 6 0 0 の制御について動摩擦補償も適用するものとする。これに対して、コントローラ 1 0 0 は、主軸

50

サーボ系 200 の制御に MPC も動摩擦補償も適用していない。

【0219】

図 7 に示すように、従来のコントローラ（図 7 の（A）に対応）と比較して、コントローラ 100、500、および 900（各々、図 7 の（B）、（D）、および（C）に対応）はいずれも、追従性が大幅に向上している。具体的には、図 7 の（A）の「位置偏差」に比べて、図 7 の（B）、（D）、および（C）の各々における「位置偏差」は大幅に低減している。これは、未来の FB 位置（主軸）の予測が、つまり、従軸側への未来の「指令位置」の予測が、従軸の制御に対して大きな効果を果たすことを示している。

【0220】

ここで、時刻 0 s の「動作開始時」、および、動作開始から 0.25 s 後、0.5 s 後、0.75 s 後における「動作方向反転時」は、摩擦の影響によって「位置偏差」が大きくなりやすい。図 7 の（A）においては「位置偏差」が全体的に大きく、グラフのレンジが大きいために確認できないが、図 7 の（B）、（D）、および（C）の各々において、「動作開始時」および「動作方向反転時」に、「位置偏差」が大きくなっていることが分かる。これは、「動作反転時（および動作開始時）」は、摩擦によって加速度が不連続に変化するため、予測値（つまり、「未来の FB 位置（主軸）」）。本シミュレーションでは、従軸側への未来の「指令位置」と一致）と実測値との誤差が大きくなることが原因である。

【0221】

例えば、図 7 の（B）（コントローラ 100 に対応）と比べて、図 7 の（C）（コントローラ 900 に対応）において、「動作反転時（および動作開始時）」の「位置偏差」は抑制されている。これは、コントローラ 900 が主軸制御に動摩擦補償を適用しているために、主軸の FB 値（具体的には、FB 位置（主軸））の加速度変化が低減されているためである。

【0222】

また、図 7 の（C）（コントローラ 900 に対応）と比べて、図 7 の（D）（コントローラ 500 に対応）において、「動作反転時（および動作開始時）」の「位置偏差」はさらに抑制されている。これは、予測値（つまり、「未来の FB 位置（主軸）」）。本シミュレーションでは、従軸側への未来の「指令位置」と一致）の予測方法におけるコントローラ 900 とコントローラ 500 との違いが影響しているものと考えられる。

【0223】

つまり、未来の FB 位置（主軸）（＝従軸側への未来の「指令位置」）の予測に、FB 位置（主軸）の加速度情報を用いるか、または、主軸の位置偏差（つまり、FB 位置（主軸）と指令位置（主軸）との偏差）の変化率を用いるかの違いが主因と考えられる。

【0224】

前述の通り、コントローラ 900 は、未来の FB 位置（主軸）（＝従軸側への未来の「指令位置」）の予測に、主軸の FB 位置の加速度情報を用い、主軸の位置偏差の変化率を用いていない。コントローラ 900 は、コントローラ 500 の第 2 予測部 530 に代えて、コントローラ 100 の第 1 予測部 120 を備える。そして、コントローラ 900 の第 1 予測部 120 は、未来の主軸側制御周期における FB 位置（主軸）の予測に、「現在および過去の各々の主軸側制御周期における FB 位置（主軸）」を利用し、「主軸の位置偏差の変化率」を利用しない。

【0225】

これに対して、コントローラ 500 の第 2 予測部 530 は、主軸の各主軸側制御周期における位置偏差の、時間に対する変化率が、複数の周期にわたって一定であると仮定して、未来の主軸側制御周期における FB 位置（主軸）を予測する。

【0226】

つまり、コントローラ 900 が未来の FB 位置（主軸）の予測に「主軸の位置偏差の変化率」を用いないのに対し、コントローラ 500 は「主軸の位置偏差の変化率」を用いて未来の FB 位置（主軸）を予測する。未来の FB 位置（主軸）の予測方法についての、コ

10

20

30

40

50

ントローラ 500 とコントローラ 900 との違いから、「動作反転時（および動作開始時）」の「位置偏差」は、図 7 の（C）に比べて図 7 の（D）において、より抑制されているものと考えられる。

【0227】

さらに、図 7 の（D）（コントローラ 500 に対応）の「トルク」は、図 7 の（B）および図 7 の（C）の各々における「トルク」に比べて、ピーク値が抑制されていることが分かる。

【0228】

（シミュレーション例 2）

図 8 は、シミュレーション 2 において、主軸の制御（例えば、制御システム 1 における主軸サーボ系 200、制御システム 2 における主軸サーボ系 600、および、制御システム 3 における主軸サーボ系 600）に印加するパルス状のトルク外乱を示す図である。図 8 に例示するように、以下に説明するシミュレーション 2 においては、時刻 0.3 s に、大きさ 200%、時間幅 50 ms のパルス状のトルク外乱を主軸の制御に印加するものとする。

【0229】

図 9 は、図 8 の外乱を印加した場合に、従来のコントローラおよび各実施形態に係るコントローラ（つまり、コントローラ 100、500、および 900）が実現する従軸制御について説明する図である。シミュレーション 2 において、従来のコントローラおよび各実施形態に係るコントローラは、シミュレーション 1 と同様に、主軸と従軸とに同一の動作をさせようとするものとする。シミュレーション 2 において、図 8 に示す外乱を主軸の制御に印加したときの、各コントローラの従軸制御の結果を示すのが、図 9 である。

【0230】

図 9 において（A）は、従来のコントローラ（つまり、「主軸の未来のフィードバック値」の予測を行なわないコントローラ）について、主軸の制御に図 8 の外乱を印加した場合の「指令位置」、「位置偏差」、および、「トルク」を順に示している。なお、従来のコントローラは、従軸の制御において、現在の指令値が予測区間継続するとみなして従軸の制御を行なうものとする。

【0231】

同様に、図 9 において（B）は、コントローラ 100 について、主軸サーボ系 200 に図 8 の外乱を印加した場合の「指令位置」、「位置偏差」、および、「トルク」を順に示している。図 9 において（C）は、コントローラ 900 について、主軸サーボ系 600 に図 8 の外乱を印加した場合の「指令位置」、「位置偏差」、および、「トルク」を順に示している。図 9 において（D）は、コントローラ 500 について、主軸サーボ系 200 に図 8 の外乱を印加した場合の「指令位置」、「位置偏差」、および、「トルク」を順に示している。

【0232】

ここで、図 9 の（A）から（D）の各々における「指令位置」は、従軸側への指令位置を示しており、具体的には主軸の F B 位置（つまり、F B 位置（主軸））を示している。また、図 9 の（A）から（D）の各々における「位置偏差」は、主軸の F B 位置（つまり、F B 位置（主軸））。言い換えれば、前述の従軸側への「指令位置」と従軸の F B 位置（つまり、F B 位置（従軸））との偏差を示している。さらに、図 9 の（A）から（D）の各々における「トルク」は、従軸を制御するフィードバック制御系（例えば、従軸サーボ系 300 または従軸サーボ系 700）の出力するトルクを示している。

【0233】

なお、前述の通り、主軸サーボ系 600 の動特性モデルを用いた MPC を主軸サーボ系 600 の制御に適用するコントローラ 500 および 900 は、主軸サーボ系 600 の制御について動摩擦補償も適用するものとする。これに対して、コントローラ 100 は、主軸サーボ系 200 の制御に MPC も動摩擦補償も適用していない。

【0234】

10

20

30

40

50

図 9 に示すように、従来のコントローラ（図 9 の（A）に対応）と比較して、コントローラ 100、500、および 900（各々、図 9 の（B）、（D）、および（C）に対応）はいずれも、追従性が大幅に向上している。具体的には、図 9 の（A）の「位置偏差」に比べて、図 9 の（B）、（D）、および（C）の各々における「位置偏差」は大幅に低減している。これは、未来の F B 位置（主軸）の予測が、つまり、従軸側への未来の「指令位置」の予測が、従軸の制御に対して大きな効果を果たすことを示している。

【0235】

ここで、時刻 0.3 s の「外乱印加開始時」と、時刻 0.35 s の「外乱印加終了時」とにおいて、図 9 の（B）、（D）、および（C）の各々における「位置偏差」は大きくなっている。なお実際には、図 9 の（A）においても、「外乱印加開始時」と「外乱印加終了時」とにおいて「位置偏差」は大きくなっているが、図 9 の（A）においては「位置偏差」が全体的に大きいために、目立たないだけである。

10

【0236】

図 9 の（B）、（D）、および（C）の各々における「位置偏差」は、ほぼ等しい大きさである。ただし、図 9 の（D）（コントローラ 500 に対応）の「トルク」は、図 9 の（B）（コントローラ 100 に対応）および図 9 の（C）（コントローラ 900 に対応）の各々における「トルク」に比べて、ピーク値が抑制されている。この違いは、コントローラ 500 と、コントローラ 100 および 900 との、未来の F B 位置（主軸）（＝従軸側への未来の「指令位置」）の予測方法の違いに起因するものと考えられる。

【0237】

20

すなわち、コントローラ 500 は、主軸の位置偏差の変化率（つまり、主軸の F B 位置の速度情報）を用いて、未来の F B 位置（主軸）（＝従軸側への未来の「指令位置」）を予測している。これに対して、コントローラ 100 および 900 は、未来の F B 位置（主軸）の予測に、F B 位置（主軸）の加速度を用いて、主軸の位置偏差の変化率を用いない。

【0238】

§ 4 . 変形例

これまで、コントローラ 100、500、および 900 の各々が、従軸サーボドライバ 310 および従軸サーボドライバ 710 の各々に、指令速度（従軸）を送信する例を説明した。しかしながら、コントローラ 100、500、および 900 の各々は、従軸サーボドライバ 310 および従軸サーボドライバ 710 の各々に、「従軸についての指令位置（つまり、指令位置（従軸））」を送信してもよい。この場合、従軸サーボドライバ 310 および従軸サーボドライバ 710 の各々について、速度制御部 320 および速度制御部 720 の各々が実行する速度制御ループの前に、位置制御ループが追加されることになる。

30

【0239】

同様に、コントローラ 500 は、主軸サーボドライバ 610 に、「主軸についての指令位置（つまり、指令位置（主軸））」を送信してもよい。この場合、主軸サーボドライバ 610 について、速度制御部 620 が実行する速度制御ループの前に、位置制御ループが追加されることになる。

【0240】

40

また、これまで、コントローラ 100、500、および 900 の各々が、電子カム制御に適用される例を説明してきたが、コントローラ 100、500、および 900 の各々の適用範囲は、電子カム制御に限られるものではない。コントローラ 100、500、および 900 の各々の適用範囲は、主軸の位置に対して従軸の位置を追従させる制御であれば、特に限定されない。

【0241】

〔ソフトウェアによる実現例〕

コントローラ 100、500、および 900 の制御ブロック（特に、指令値生成部 110、第 1 予測部 120、カム演算部 130、MPC 部 140、監視部 150、指令値生成部 510、第 1 MPC 部 520、第 2 予測部 530、カム演算部 540、第 2 MPC 部 5

50

５０、および、監視部５６０）は、集積回路（ＩＣチップ）等に形成された論理回路（ハードウェア）によって実現してもよいし、ソフトウェアによって実現してもよい。

【０２４２】

後者の場合、コントローラ１００、５００、および９００は、各機能を実現するソフトウェアであるプログラムの命令を実行するコンピュータを備えている。このコンピュータは、例えば１つ以上のプロセッサを備えていると共に、上記プログラムを記憶したコンピュータ読み取り可能な記録媒体を備えている。そして、上記コンピュータにおいて、上記プロセッサが上記プログラムを上記記録媒体から読み取って実行することにより、本発明の目的が達成される。上記プロセッサとしては、例えばＣＰＵ（Central Processing Unit）を用いることができる。上記記録媒体としては、「一時的でない有形の媒体」、例えば、ＲＯＭ（Read Only Memory）等の他、テープ、ディスク、カード、半導体メモリ、プログラマブルな論理回路などを用いることができる。また、上記プログラムを展開するＲＡＭ（Random Access Memory）などをさらに備えていてもよい。また、上記プログラムは、該プログラムを伝送可能な任意の伝送媒体（通信ネットワークや放送波等）を介して上記コンピュータに供給されてもよい。なお、本発明の一態様は、上記プログラムが電子的な伝送によって具現化された、搬送波に埋め込まれたデータ信号の形態でも実現され得る。

10

【０２４３】

本発明は上述した各実施形態に限定されるものではなく、請求項に示した範囲で種々の変更が可能であり、異なる実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を適宜組み合わせて得られる実施形態についても本発明の技術的範囲に含まれる。

20

【符号の説明】

【０２４４】

１００ コントローラ（制御装置）
 １２０ 第１予測部（予測部）
 １３０ カム演算部（演算部）
 １４０ ＭＰＣ部（従軸指令部）
 １５０ 監視部
 ５００ コントローラ（制御装置）
 ５２０ 第１ＭＰＣ部（主軸指令部）
 ５３０ 第２予測部（予測部）
 ５４０ カム演算部（演算部）
 ５５０ 第２ＭＰＣ部（従軸指令部）
 ５６０ 監視部
 ９００ コントローラ（制御装置）
 Ｓ４４０ 予測ステップ
 Ｓ４５０ 演算ステップ
 Ｓ４６０ 従軸指令ステップ
 Ｓ８５０ 予測ステップ
 Ｓ８６０ 演算ステップ
 Ｓ８７０ 従軸指令ステップ

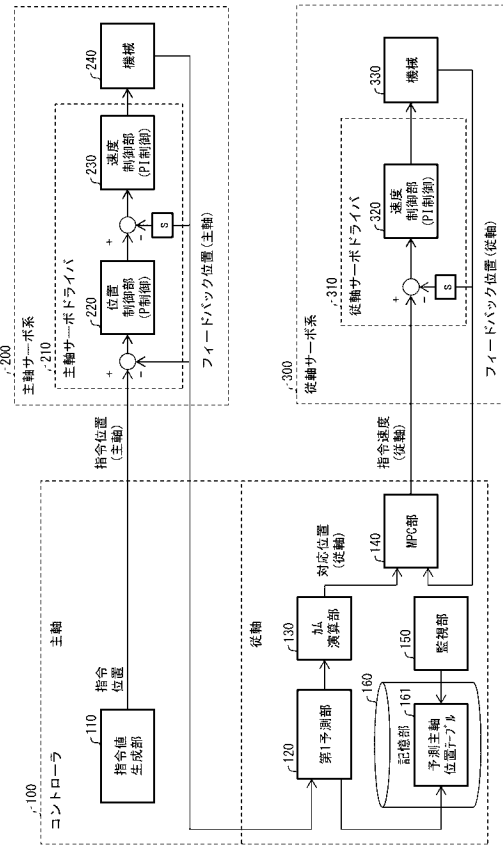
30

40

【図 1】

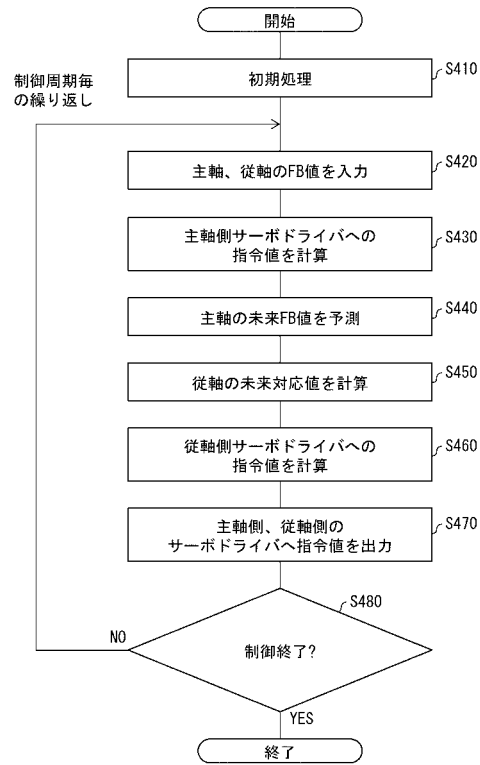
図 1

1:制御システム



【図 2】

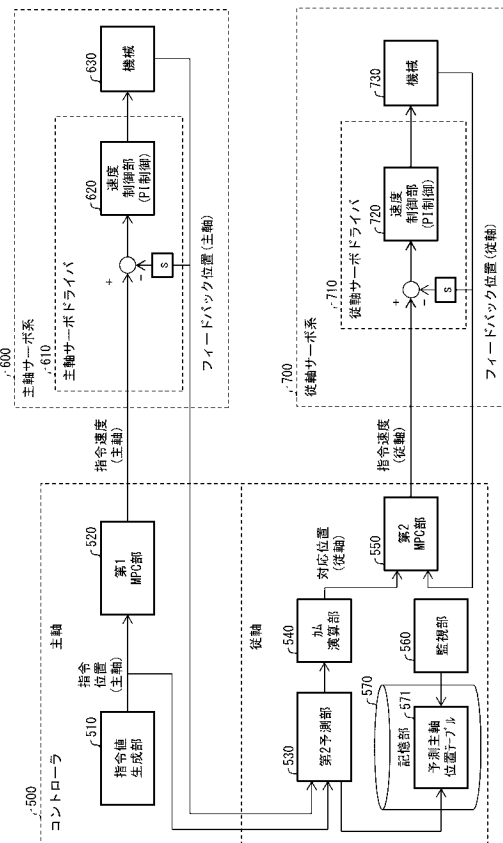
図 2



【図 3】

図 3

2:制御システム



【図 4】

図 4



【図 9】

