

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6986373号
(P6986373)

(45) 発行日 令和3年12月22日(2021.12.22)

(24) 登録日 令和3年12月1日(2021.12.1)

(51) Int.Cl. F 1
B 2 5 J 13/08 (2006.01) B 2 5 J 13/08 Z

請求項の数 7 (全 17 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2017-121331 (P2017-121331) (22) 出願日 平成29年6月21日 (2017. 6. 21) (65) 公開番号 特開2019-5821 (P2019-5821A) (43) 公開日 平成31年1月17日 (2019. 1. 17) 審査請求日 令和2年5月26日 (2020. 5. 26)</p>	<p>(73) 特許権者 000000974 川崎重工業株式会社 兵庫県神戸市中央区東川崎町3丁目1番1号 (74) 代理人 110000556 特許業務法人 有古特許事務所 (72) 発明者 坪井 信高 兵庫県明石市川崎町1番1号 川崎重工業株式会社 明石工場内 審査官 岩▲崎▼ 優</p>
---	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ロボットシステム及びロボットシステムの制御方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1関節及び第2関節を含む複数の関節を含むロボットアームと、
出力軸が前記第1関節に接続され、前記第1関節を回動させる第1モータを有する第1関節駆動部と、

前記第1モータの前記出力軸の実動作の情報を取得する第1検知部と、

上位装置から入力された前記第1モータに対する第1動作目標及び前記第1モータの前記出力軸の前記実動作との偏差に基づき前記第1モータに供給する第1電流値を算出し、且つ該第1電流値に基づき前記第1モータに電流を供給し前記第1モータの前記出力軸の動作を制御する第1関節制御部と、

出力軸が前記第2関節に接続され、前記第2関節を回動させる第2モータを有する第2関節駆動部と、

前記第2モータの前記出力軸の実動作の情報を取得する第2検知部と、

前記上位装置から入力された前記第2モータに対する第2動作目標及び前記第2モータの前記出力軸の前記実動作との偏差に基づき前記第2モータに供給する第2電流値を算出し、且つ該第2電流値に基づき前記第2モータに電流を供給し前記第2モータの前記出力軸の動作を制御する第2関節制御部と、

前記第2電流値及び前記第2モータの前記出力軸の実動作に基づかず、前記第1電流値及び前記第1モータの前記出力軸の前記実動作に基づいて前記ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因する前記第2関節の動作の誤差を推定する誤差推定部と、を備え、

前記第 2 関節制御部は、前記ロボットアームの撓み及び / 又は捩れに起因する前記第 2 関節の動作の誤差を補償して前記第 2 モータの前記出力軸の動作を制御するように前記第 2 電流値を算出する、ロボットシステム。

【請求項 2】

前記第 1 検知部が取得する前記実動作の情報は、前記第 1 モータの前記出力軸の角度位置、角速度、角加速度の少なくとも何れかであり、

前記第 1 動作目標は、前記第 1 モータに対する位置指令、速度指令、加速度指令の少なくとも何れかであり、

前記第 1 動作目標及び前記第 1 モータの前記出力軸の前記実動作との前記偏差は、位置偏差、速度偏差、加速度偏差の少なくとも何れかであり、

10

前記第 2 検知部が取得する前記実動作の情報は、前記第 2 モータの前記出力軸の角度位置、角速度、角加速度の少なくとも何れかであり、

前記第 2 動作目標は、前記第 2 モータに対する位置指令、速度指令、加速度指令の少なくとも何れかであり、

前記第 2 動作目標及び前記第 2 モータの前記出力軸の前記実動作との前記偏差は、位置偏差、速度偏差、加速度偏差の少なくとも何れかであり、

前記ロボットアームの撓み及び / 又は捩れに起因する前記第 2 関節の動作の誤差は、角度誤差、角度速度誤差、角加速度誤差の少なくとも何れかである、請求項 1 に記載のロボットシステム。

【請求項 3】

20

前記誤差推定部は、前記ロボットアームの撓み及び / 又は捩れに起因する前記第 1 関節及び前記第 2 関節を含む系の連成振動の複数の固有振動数のうち固有振動数が小さい 1 の固有振動数に基づいて前記ロボットアームの撓み及び / 又は捩れに起因する前記第 2 関節の動作の誤差を推定する、請求項 1 又は 2 に記載のロボットシステム。

【請求項 4】

前記第 2 関節駆動部は、入力軸が前記第 2 モータの前記出力軸に接続され且つ出力軸が前記第 2 関節に接続された減速機を更に含み、前記第 2 モータが該減速機を介して前記第 2 関節を回動させ、

前記第 2 モータの前記出力軸の回転角と前記減速機の前記出力軸の回転角との間の角度伝達誤差を推定する角度伝達誤差推定部を更に備え、

30

前記第 2 関節制御部は、前記角度伝達誤差と前記ロボットアームの撓み及び / 又は捩れに起因する前記第 2 関節の動作の誤差とを補償して前記第 2 モータの前記出力軸の動作を制御するように前記第 2 電流値を算出する、請求項 1 乃至 3 の何れか 1 に記載のロボットシステム。

【請求項 5】

前記誤差推定部は、前記第 1 電流値及び前記第 1 モータの前記出力軸の前記実動作に基づいて前記ロボットアームの撓み及び / 又は捩れに起因する前記第 2 関節の動作の誤差を推定する第 1 誤差推定部と、前記第 2 電流値及び前記第 2 モータの前記出力軸の前記実動作に基づいて前記ロボットアームの撓み及び / 又は捩れに起因する前記第 2 関節の動作の誤差を推定する第 2 誤差推定部とを有し、

40

前記第 2 関節制御部は、前記角度伝達誤差と前記第 1 誤差推定部が推定した前記ロボットアームの撓み及び / 又は捩れに起因する前記第 2 関節の動作の誤差とを補償して前記第 2 モータの前記出力軸の動作を制御するように前記第 2 電流値を算出する第 1 モードと、前記第 2 誤差推定部が推定した前記ロボットアームの撓み及び / 又は捩れに起因する前記第 2 関節の動作の誤差を補償して前記第 2 モータの前記出力軸の動作を制御するように前記第 2 電流値を算出する第 2 モードとを有し、

前記第 2 関節制御部に指示して前記第 1 モードと前記第 2 モードとを切り替える動作モード切替部を更に有する、請求項 4 に記載のロボットシステム。

【請求項 6】

前記動作モード切替部は、前記ロボットアームの作業端の動作速度が所定の速度以下に

50

なると前記第 1 モードに切り替える、請求項 5 に記載のロボットシステム。

【請求項 7】

第 1 関節及び第 2 関節を含む複数の関節を含むロボットアームと、
出力軸が前記第 1 関節に接続され、前記第 1 関節を回動させる第 1 モータを有する第 1 関節駆動部と、

前記第 1 モータの前記出力軸の実動作の情報を取得する第 1 検知部と、

前記第 1 モータの前記出力軸の動作を制御する第 1 関節制御部と、

出力軸が前記第 2 関節に接続され、前記第 2 関節を回動させる第 2 モータを有する第 2 関節駆動部と、

前記第 2 モータの前記出力軸の実回転角を検出するための事象を検知する第 2 検知部と

10

、
前記第 2 モータの前記出力軸の動作を制御する第 2 関節制御部と、を備えるロボットシステムの制御方法であって、

上位装置から入力された前記第 1 モータに対する第 1 動作目標と前記第 1 モータの前記出力軸の前記実動作との偏差に基づき前記第 1 モータに供給する第 1 電流値を算出するステップと、

前記第 2 モータに供給される第 2 電流値及び前記第 2 検知部が検知した前記第 2 モータの前記出力軸の実回転角を検出するための事象に基づかず、前記第 1 電流値及び前記第 1 モータの前記出力軸の前記実動作に基づいて前記ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因する前記第 2 関節の動作の誤差を推定するステップと、

20

前記上位装置から入力された前記第 2 モータに対する第 2 動作目標及び前記第 2 モータの前記出力軸の前記実動作との偏差に基づき前記第 2 モータに供給する前記第 2 電流値を算出し、且つ前記第 2 関節の動作の誤差を補償して前記第 2 モータの前記出力軸の回転角を制御するように前記第 2 電流値を算出するステップと、

前記第 2 電流値に基づき前記第 2 モータに電流を供給するステップと、を有する、ロボットシステムの制御方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、ロボットシステム及びロボットシステムの制御方法に関する。

30

【背景技術】

【0002】

従来からロボットアーム先端の振動抑制効果を高めることができるロボット制御装置が知られている（例えば特許文献 1 参照）。

【0003】

このロボット制御装置は、弾性機構を有するロボットアームを制御対象とし、モータの角速度を比例積分制御してモータへ電流指令値を出力する角速度制御系を有し、ロボットアームの非線形動力学モデルを有し、モータの角速度と電流指令値を入力とし、軸ねじり角速度、リンクの角加速度を推定するオブザーバと、オブザーバによって推定されたリンクの角速度とモータの角速度との差から軸ねじり角速度を算出し、角速度制御系にフィードバックする状態フィードバック部を有する。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】特開 2015 - 30076 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかし、特許文献 1 に記載のロボット制御装置は、推定対象関節に含まれるモータの角速度とモータに対する電流指令値に基づいて、推定対象関節の軸ねじり角速度を推定し

50

ているため、モータに対する電流指令値に他の補償要素が含まれているときは、軸ねじり角速度を推定できない場合があった。

【課題を解決するための手段】

【0006】

上記課題を解決するため、本発明のある態様に係るロボットシステムは、第1関節及び第2関節を含む複数の関節を含むロボットアームと、出力軸が前記第1関節に接続され、前記第1関節を回動させる第1モータを有する第1関節駆動部と、前記第1モータの前記出力軸の実動作の情報を取得する第1検知部と、上位装置から入力された前記第1モータに対する第1動作目標及び前記第1モータの前記出力軸の前記実動作との偏差に基づき前記第1モータに供給する第1電流値を算出し、且つ該第1電流値に基づき前記第1モータに電流を供給し前記第1モータの前記出力軸の動作を制御する第1関節制御部と、出力軸が前記第2関節に接続され、前記第2関節を回動させる第2モータを有する第2関節駆動部と、前記第2モータの前記出力軸の実動作の情報を取得する第2検知部と、前記上位装置から入力された前記第2モータに対する第2動作目標及び前記第2モータの前記出力軸の前記実動作との偏差に基づき前記第2モータに供給する第2電流値を算出し、且つ該第2電流値に基づき前記第2モータに電流を供給し前記第2モータの前記出力軸の動作を制御する第2関節制御部と、前記第1電流値及び前記第1モータの前記出力軸の前記実動作に基づいて前記ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因する前記第2関節の動作の誤差を推定する誤差推定部と、を備え、前記第2関節制御部は、前記ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因する前記第2関節の動作の誤差を補償して前記第2モータの前記出力軸の動作を制御するように前記第2電流値を算出する。

【0007】

この構成によれば、ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因する第2関節の動作の誤差の補償を行う制御が、他の制御と干渉することを防ぐことができる。これによって、ロボットアームの振動を効果的に抑制することができ、ロボットアームの作業端の軌跡精度を向上させることができる。

【0008】

前記第1検知部が取得する前記実動作の情報は、前記第1モータの前記出力軸の角度位置、角速度、角加速度の少なくとも何れかであり、前記第1動作目標は、前記第1モータに対する位置指令、速度指令、加速度指令の少なくとも何れかであり、前記第1動作目標及び前記第1モータの前記出力軸の前記実動作との前記偏差は、位置偏差、速度偏差、加速度偏差の少なくとも何れかであり、前記第2検知部が取得する前記実動作の情報は、前記第2モータの前記出力軸の角度位置、角速度、角加速度の少なくとも何れかであり、前記第2動作目標は、前記第2モータに対する位置指令、速度指令、加速度指令の少なくとも何れかであり、前記第2動作目標及び前記第2モータの前記出力軸の前記実動作との前記偏差は、位置偏差、速度偏差、加速度偏差の少なくとも何れかであり、前記ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因する前記第2関節の動作の誤差は、角度誤差、角度速度誤差、角加速度誤差の少なくとも何れかであってもよい。

【0009】

この構成によれば、ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因する第2関節の動作の誤差を適切に補償することができる。

【0010】

前記誤差推定部は、前記ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因する前記第1関節及び前記第2関節を含む系の連成振動の複数の固有振動数のうち固有振動数が小さい1の固有振動数に基づいて前記ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因する前記第2関節の動作の誤差を推定してもよい。

【0011】

この構成によれば、ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因するロボットアームの振動を適切に抑制することができる。

【0012】

10

20

30

40

50

前記第2関節駆動部は、入力軸が前記第2モータの前記出力軸に接続され且つ出力軸が前記第2関節に接続された減速機を更に含み、前記第2モータが該減速機を介して前記第2関節を回動させ、前記第2モータの前記出力軸の回転角と前記減速機の前記出力軸の回転角との間の角度伝達誤差を推定する角度伝達誤差推定部を更に備え、前記第2関節制御部は、前記角度伝達誤差と前記ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因する前記第2関節の動作の誤差とを補償して前記第2モータの前記出力軸の動作を制御するように前記第2電流値を算出してもよい。

【0013】

この構成によれば、角度伝達誤差補償と、ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因する動作の誤差の補償との干渉を防止することができる。これによって、両補償を併用することができ、ロボットアームの振動を効果的に抑制することができる。

10

【0014】

前記誤差推定部は、前記第1電流値及び前記第1モータの前記出力軸の前記実動作に基づいて前記ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因する前記第2関節の動作の誤差を推定する第1誤差推定部と、前記第2電流値及び前記第2モータの前記出力軸の前記実動作に基づいて前記ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因する前記第2関節の動作の誤差を推定する第2誤差推定部とを有し、前記第2関節制御部は前記角度伝達誤差と前記第1誤差推定部が推定した前記ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因する前記第2関節の動作の誤差とを補償して前記第2モータの前記出力軸の動作を制御するように前記第2電流値を算出する第1モードと、前記第2誤差推定部が推定した前記ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因する前記第2関節の動作の誤差を補償して前記第2モータの前記出力軸の動作を制御するように前記第2電流値を算出する第2モードとを有し、前記第2関節制御部に指示して前記第1モードと前記第2モードとを切り替える動作モード切替部を更に有していてもよい。

20

【0015】

この構成によれば、条件に応じて適切にモードを切り替えることにより、ロボットアームの振動を適切に抑制することができる。

【0016】

前記動作モード切替部は、前記ロボットアームの作業端の動作速度が所定の速度以下になると前記第1モードに切り替えてもよい。

30

【0017】

この構成によれば、精度の要求される作業を実行するとき角度伝達誤差の影響を低減することができる。

【0018】

上記課題を解決するため、本発明のある態様に係るロボットシステムの制御方法は、第1関節及び第2関節を含む複数の関節を含むロボットアームと、出力軸が前記第1関節に接続され、前記第1関節を回動させる第1モータを有する第1関節駆動部と、前記第1モータの前記出力軸の実動作の情報を取得する第1検知部と、前記第1モータの前記出力軸の動作を制御する第1関節制御部と、出力軸が前記第2関節に接続され、前記第2関節を回動させる第2モータを有する第2関節駆動部と、前記第2モータの前記出力軸の実回転角を検出するための事象を検知する第2検知部と、前記第2モータの前記出力軸の動作を制御する第2関節制御部と、を備えるロボットシステムの制御方法であって、上位装置から入力された前記第1モータに対する第1動作目標と前記第1モータの前記出力軸の前記実動作との偏差に基づき前記第1モータに供給する第1電流値を算出するステップと、前記第1電流値及び前記第1モータの前記出力軸の前記実動作に基づいて前記ロボットアームの撓み及び/又は捩れに起因する前記第2関節の動作の誤差を推定するステップと、前記上位装置から入力された前記第2モータに対する第2動作目標及び前記第2モータの前記出力軸の前記実動作との偏差に基づき前記第2モータに供給する第2電流値を算出し、且つ前記第2関節の動作の誤差を補償して前記第2モータの前記出力軸の回転角を制御するように前記第2電流値を算出するステップと、前記第2電流値に基づき前記第2モータ

40

50

に電流を供給するステップと、を有する。

【0019】

この構成によれば、ロボットアームの撓み及び/又は擦れに起因する第2関節の動作の誤差の補償を行う制御が、他の制御と干渉することを防ぐことができる。これによって、ロボットアームの振動を効果的に抑制することができ、ロボットアームの作業端の軌跡精度を向上させることができる。

【発明の効果】

【0020】

本発明は、ロボットアームの作業端の軌跡精度を向上させることという効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

10

【0021】

【図1】本発明の実施の形態1に係るロボットシステムの構成例を概略的に示す図である。

【図2】図1のロボットシステムの制御システムの構成例を概略的に示すブロック図である。

【図3】角度伝達誤差の説明図である。

【図4】本発明の実施の形態2に係るロボットシステムの制御システムの構成例を概略的に示すブロック図である。

【図5】図4のロボットシステムの動作モード切替部の動作例を示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

20

【0022】

以下、本発明の実施の形態について、図面を参照しながら説明する。なお、以下の実施の形態によって本発明が限定されるものではない。また、以下では、全ての図を通じて、同一又は相当する要素には同一の参照符号を付して、その重複する説明を省略する。

【0023】

(実施の形態1)

図1は、本発明の実施の形態1に係るロボットシステム100の構成例を概略的に示す図である。

【0024】

図1に示すように、ロボットシステム100は、ロボット1と、制御部2と、指令部3とを備える。

30

【0025】

[ロボットの構成例]

ロボット1は、多関節型ロボットの産業用ロボット(多関節ロボット)である。

【0026】

ロボット1は、基部30と、ロボットアーム4と、ハンド5とを含む。基部30は、例えば床面に固定されて載置され、ロボットアーム4及びハンド5を支持している。

【0027】

ロボットアーム4は、複数の関節を有し、基端部が基部30に対して回動可能に連結されている。ロボットアーム4の関節は、複数の関節が基端部から先端部に向かって一列に連なっている。ロボットアーム4の複数の関節のうち、1の関節が第1関節7(例えば第2軸)を構成し、第1関節7と異なる別の1の関節(例えば第3軸)が第2関節8を構成する。第1関節7と第2関節8とは、互いに干渉する姿勢に位置させることができるように構成されている。第1関節7と第2関節8とが互いに干渉する姿勢とは、式(1)に係る動力学方程式の慣性行列の相互慣性係数が大きい姿勢をいう。

40

【0028】

【数 1】

$$\mathbf{T} = \mathbf{I}\ddot{\boldsymbol{\phi}} + \mathbf{H} + \mathbf{G} \quad \cdots (1)$$

但し、

\mathbf{T} は、基端側関節及び先端側関節にかかるトルクのベクトル $\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$

\mathbf{I} は、慣性行列 $\begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} \\ I_{21} & I_{22} \end{bmatrix}$ であり、 I_{12} 及び I_{21} が相互慣性係数

$\ddot{\boldsymbol{\phi}}$ は、基端側関節及び先端側関節の加速度のベクトル $\begin{bmatrix} \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{\phi}_2 \end{bmatrix}$

\mathbf{H} は、コリオリ効果と遠心力

\mathbf{G} は、重力ベクトル

【0029】

図2は、図1のロボットシステム100の制御システムの構成例を概略的に示すブロック図である。なお、図2においては、第1関節7及び第2関節8以外の関節の図示を省略している。

【0030】

図2に示すように、ロボットアーム4の各関節は、関節を駆動する駆動部を有する。各駆動部は、出力軸が対応する関節（回動軸）に接続された減速機と、出力軸が減速機の入力軸に接続され、減速機を介して対応する関節を回動させる駆動源であるサーボモータと、サーボモータの出力軸の回転角を検知するエンコーダとを有する。このように、サーボモータの出力軸は、減速機を介して対応する関節に接続されている。また、エンコーダは、サーボモータの出力軸の実動作の情報を取得する。本実施の形態においては、エンコーダはサーボモータの出力軸の角度位置を検知し、これに基づいて、サーボモータの出力軸の実回転角を検出する。本実施の形態において、第2関節8の減速機、すなわち第2減速機18は、例えば波動歯車装置（ハーモニックドライブ（登録商標））である。また、第1関節7の減速機は、例えば波動歯車装置に比べて角度伝達誤差が少ない減速機である。

【0031】

以下、説明の便宜上、第1関節7を駆動するサーボモータ、減速機、及びエンコーダをそれぞれ第1モータ11、第1減速機13、及び第1エンコーダ（第1検知部）12といい、これらが第1関節駆動部9を構成する。また、第2関節8を駆動するサーボモータ、減速機、及びエンコーダをそれぞれ第2モータ16、第2減速機18、及び第2エンコーダ（第2検知部）17といい、これらが第2関節駆動部10を構成する。なお、本実施の形態において回転角とは、角度位置を意味するがこれに限定されない。角度位置の時間微分値、すなわち角速度や、角加速度であってもよい。

【0032】

第2減速機18に係る波動歯車装置は、サーキュラスプラインと、フレクスプラインと、ウェーブジェネレータとを備える。サーキュラスプラインは、剛性の内歯歯車であり、例えば筐体と一体的に設けられる。フレクスプラインは、可撓性を有する外歯歯車であり、サーキュラスプラインと歯合する。フレクスプラインは、サーキュラスプラインよりも歯数が少なく、出力軸18bと接続される。ウェーブジェネレータは、フレクスプラインの内側に接触する楕円状のカムであり、入力軸18aと接続されている。そして、入力軸

10

20

30

40

50

を回転させることによって、ウェーブジェネレータがフレクスプラインとサーキュラスプラインとの噛み合い位置を移動させ、サーキュラスプラインとフレクスプラインの歯数差に応じてフレクスプラインが回転軸周りに回転し、出力軸が回転する。波動歯車装置は、小型・軽量、高減速比、高トルク容量、ノンバックラッシュ等の特徴からロボットの駆動機構の減速機に適した特性を有する。

【 0 0 3 3 】

ところで、図 3 に示すように、波動歯車装置などの減速機には、加工誤差等により、減速機に入力される入力回転角に減速比を乗じた理論上の出力回転角と、実際の出力回転角との差である角度伝達誤差が生じる。この角度伝達誤差は、入力軸の回転に伴って周期的な変化として表れる。このような減速機出力軸の角度伝達誤差 ATE は、以下の式 (2) に係る関数を用いたモデルによって近似的に表現することが可能である。

10

【 0 0 3 4 】

【 数 2 】

$$ATE = A \sin(f\theta + \phi) \quad \dots (2)$$

但し、

A は、角度伝達誤差モデル関数の振幅

20

f は、角度伝達誤差モデル関数の周波数

(モータの出力軸 1 回転あたりの角度伝達誤差の波の数)

θ は、サーボモータの出力軸 (減速機の入力軸) の回転角

ϕ は、角度伝達誤差モデル関数の位相

【 0 0 3 5 】

図 1 に示すように、ハンド 5 は、物品の保持等の所定の動作を行うことができるように構成され、ロボットアーム 4 の先端部に取り付けられている。

30

【 0 0 3 6 】

[制御部の構成例]

図 2 に示すように、制御部 2 は、各関節を制御し、例えばマイクロコントローラ、CPU、ASIC、FPGA 等のプログラマブルロジックデバイス (PLD) などの演算器を含む。演算器は、集中制御する単独の演算器で構成されていてもよく、互いに協働して分散制御する複数の演算器で構成されてもよい。制御部 2 は、第 1 関節制御部 2 1 と、第 2 関節制御部 2 6 と、誤差推定部 2 2 と、角度伝達誤差推定部 2 8 とを含む。第 1 関節制御部 2 1、第 2 関節制御部 2 6、誤差推定部 2 2、及び角度伝達誤差推定部 2 8 は、所定の制御プログラムを図示しない演算部が実行することにより実現される機能ブロックである。なお、制御部 2 は、指令部 3 と別体の演算器で構成されているが、一体であってもよい。

40

【 0 0 3 7 】

第 1 関節制御部 2 1 は、PI 制御器 (比例積分制御器) であり、指令部 3 (上位装置) から入力された第 1 モータ 1 1 に対する第 1 目標回転角 (第 1 動作目標) t_1 と、第 1 エンコーダ 1 2 が検出した第 1 モータ 1 1 の出力軸 1 1 a の実回転角 θ_1 との偏差に基づき、第 1 モータ 1 1 に供給する第 1 電流値を算出する。そして、第 1 電流値に基づき第 1 モータ 1 1 に電流を供給し第 1 モータ 1 1 の出力軸 1 1 a の回転角を制御する。すなわち、第 1 関節制御部 2 1 は、第 1 目標回転角 t_1 と実回転角 θ_1 との偏差を 0 に近づけ、第 1 モータ 1 1 の出力軸 1 1 a の回転角を第 1 目標回転角 t_1 に近づける制御を基本とする第 1 モータ 1 1 のフィードバック制御を行う。

50

【 0 0 3 8 】

また、第1関節制御部21は、第1電流値を算出する過程において、誤差推定部22が推定したロボットアーム4の撓み及び/又は捩れに起因する第1関節7の角度誤差を補償して第1モータ11の出力軸11aの回転角を制御するように第1電流値を算出する(詳細は後述)。

【 0 0 3 9 】

第2関節制御部26は、PI制御器であり、指令部3から入力された第2モータ16に対する第2目標回転角(第2動作目標) t_2 と、第2エンコーダ17が検出した第2モータ16の出力軸16aの実回転角 θ_2 との偏差に基づき、第2モータ16に供給する第2電流値を算出する。そして、第2電流値に基づき第2モータ16に電流を供給し第2モータ16の出力軸16aの回転角を制御する。すなわち、第2関節制御部26は、第2目標回転角 t_2 と実回転角 θ_2 との偏差を0に近づけ、第2モータ16の出力軸16aの回転角を第2目標回転角 t_2 に近づける制御を基本とする第2モータ16のフィードバック制御を行う。

10

【 0 0 4 0 】

また、第2関節制御部26は、第2電流値を算出する過程において、誤差推定部22が推定したロボットアーム4の撓み及び/又は捩れに起因する第2関節8の角度誤差を補償して第2モータ16の出力軸16aの回転角を制御するように第2電流値を算出する(詳細は後述)。

【 0 0 4 1 】

更に、第2関節制御部26は、第2電流値を算出する過程において、角度伝達誤差推定部28が推定した第2モータ16の出力軸16aの回転角と第2減速機18の出力軸18bの回転角との間の角度伝達誤差を補償して第2モータ16の出力軸16aの回転角を制御するように第2電流値を算出する(詳細は後述)。

20

【 0 0 4 2 】

誤差推定部22は、第1モータ11に供給する第1電流値及び第1モータ11の出力軸11aの実回転角 θ_1 に基づいて、ロボットアーム4の撓み及び/又は捩れに起因する第1関節7及び第2関節8の角度誤差(動作の誤差)を推定する。そして、推定した第1関節7の角度誤差に基づいて第1電流値を補正するための第1補正量を算出する。更に、推定した第2関節8の角度誤差に基づいて第2電流値を補正するための第2補正量を算出する。

30

【 0 0 4 3 】

すなわち、誤差推定部22は、第1電流値と、第1モータ11の出力軸11aの実回転角 θ_1 を入力として、ロボットアーム4の撓み及び/又は捩れに起因する第1関節7及び第2関節8の角度誤差を出力するモデルを用いて、ロボットアーム4の撓み及び/又は捩れに起因する第1関節7及び第2関節8の角度誤差を算出する。

【 0 0 4 4 】

ところで、ロボットアーム4の動作によって、ロボットアーム4は撓んだり、捩れたりして振動すると、ロボットアーム4の撓み及び/又は捩れに起因して、第1モータ11に第1電流値に基づいて電流を供給したときの出力軸11aのトルクから求められる第1モータ11の出力軸11aの理論上の回転角と、第1モータ11の出力軸11aの実回転角 θ_1 との間に偏差が生じる。したがって、第1電流値、及び第1モータ11の出力軸11aの実回転角 θ_1 に基づいてロボットアーム4の撓み及び/又は捩れを推定することが可能であり、更にはロボットアーム4の撓み及び/又は捩れに起因する各関節の角度誤差の推定が可能である。

40

【 0 0 4 5 】

本実施の形態において、第1電流値、及び第1モータ11の出力軸11aの実回転角 θ_1 を入力として、ロボットアーム4の撓み及び/又は捩れに起因する第1関節7及び第2関節8の角度誤差を出力するモデルを予め規定し、誤差推定部22は、当該モデルを用いて、第1電流値、及び第1モータ11の出力軸11aの実回転角 θ_1 に基づいて、ロボッ

50

トアーム 4 の撓み及び / 又は捩れに起因する第 1 関節 7 及び第 2 関節 8 の角度誤差を算出する。

【 0 0 4 6 】

当該モデルは、たとえば、第 1 電流値と、第 1 モータ 1 1 の出力軸 1 1 a の実回転角 1 と、第 1 関節 7 及び第 2 関節 8 の角度誤差との関係を予め計測し、この計測値から第 1 電流値と、第 1 モータ 1 1 の出力軸 1 1 a の実回転角 1 とを入力として、第 1 関節 7 の角度誤差及び第 2 関節 8 の角度誤差を推定するモデルを構築してもよい。また、第 1 電流値に対応する電流を第 1 モータ 1 1 に供給したときの出力軸 1 1 a のトルクと、第 1 モータ 1 1 の出力軸 1 1 a の実回転角 1 との関係から、第 1 関節 7 の角度誤差及び第 2 関節 8 の角度誤差を推定する動力学モデルを用いて解析的に第 1 関節 7 及び第 2 関節 8 の角度誤差を算出してもよい。

10

【 0 0 4 7 】

更に、誤差推定部 2 2 は、推定した第 1 関節 7 の角度誤差を補償するための第 1 補正量、及び第 2 関節 8 の角度誤差を補償するための第 2 補正量を算出する。第 1 補正量及び第 2 補正量は、それぞれ第 1 関節制御部 2 1 及び第 2 関節制御部 2 6 に入力される。

【 0 0 4 8 】

そして、第 1 関節制御部 2 1 は、第 1 目標回転角 t_1 と第 1 モータ 1 1 の出力軸 1 1 a の実回転角 1 との偏差に基づき第 1 電流値を算出する過程において、第 1 補正量を加算することによって、誤差推定部 2 2 が推定した第 1 関節 7 の角度誤差を補償した第 1 電流値を算出する。

20

【 0 0 4 9 】

また、第 2 関節制御部 2 6 は、第 2 目標回転角 t_2 と第 2 モータ 1 6 の出力軸 1 6 a の実回転角 2 との偏差に基づき第 2 電流値を算出する過程において、第 2 補正量を加算することによって、誤差推定部 2 2 が推定した第 2 関節 8 の角度誤差を補償した第 2 電流値を算出する。

【 0 0 5 0 】

更に、誤差推定部 2 2 は、ロボットアーム 4 の撓み及び / 又は捩れに起因する第 1 関節 7 及び第 2 関節 8 を含む系の連成振動の複数の固有振動数のうち固有振動数が小さい 1 の固有振動数に対応する固有値に基づいて第 2 関節 8 の角度誤差を推定する。第 1 関節 7 及び第 2 関節 8 からなる系の場合は 2 つの固有振動数のうち、小さい一方の固有振動数に対応する固有値に基づいて第 2 関節 8 の角度誤差を推定する。

30

【 0 0 5 1 】

すなわち、第 1 関節 7 及び第 2 関節 8 の振動は、2 自由度の連成振動として表され、2 つの固有振動モードの重ね合わせとして表される。2 つの固有振動モードの固有振動数のうち、固有振動数が小さい 1 の固有振動数に対応するモードは、第 1 関節 7 及び第 2 関節 8 が互いに同じ回転方向に揺れる第 1 モードであり、他方のモードは、第 1 関節 7 及び第 2 関節 8 が互いに反対の回転方向に揺れる第 2 モードである。本実施の形態においては、推定対象関節とは異なる関節（第 1 関節 7）から取得した情報のみから推定対象関節（第 2 関節 8）の振動を推定するため、両方の振動モードについて推定することはできない。そこで、ロボットアーム 4 の作業端（ハンド 5）の軌跡精度の低下に与える影響がより大きい第 1 モードに対応する固有振動数、すなわち第 1 関節 7 及び第 2 関節 8 を含む系の連成振動の複数の固有振動数のうち固有振動数が小さい 1 の固有振動数に基づいて第 2 関節 8 の角度誤差を推定することにより、ロボットアーム 4 の作業端（ハンド 5）の軌跡精度を効果的に向上させることができる。

40

【 0 0 5 2 】

角度伝達誤差推定部 2 8 は、第 2 モータ 1 6 の出力軸 1 6 a の回転角と第 2 減速機 1 8 の出力軸 1 8 b の回転角との間の角度伝達誤差を推定する。

【 0 0 5 3 】

すなわち、角度伝達誤差推定部 2 8 は、上記式（2）に係る角度伝達誤差の周期的な変動をモデル化した周期関数に基づいて、第 2 減速機 1 8 に対する入力回転角である第 2 モ

50

ータ16の出力軸16aの回転角と第2減速機18の出力回転角である第2減速機18の出力軸18bの回転角との間の角度伝達誤差を推定する。そして、角度伝達誤差推定部28は、角度伝達誤差を補償するため（角度伝達誤差をキャンセルするため）に第2モータ16の出力軸16aに加えるべき補正量を算出する。

【0054】

例えば、波動歯車装置の角度伝達誤差に特に大きな影響をあたえるのは周波数 f が2に係る成分であることが判っている。従って、波動歯車装置で構成した第2減速機18の周波数 f を2と規定し、当該周波数 f に対応する別途同定した振幅 A 、位相を用いて上記式(1)に基づいて補正量を算出してもよい。このように、角度伝達誤差推定部28は、第2目標回転角 t_2 に基づき角度伝達誤差を推定し、第2関節8の角度伝達誤差を補償するための補正量を算出する。

10

【0055】

そして、第2関節制御部26は、第2目標回転角 t_2 と第2モータ16の出力軸16aの実回転角 t_2 との偏差に基づき第2電流値を算出する過程において、角度伝達誤差推定部28が推定した第2関節8の角度伝達誤差を補償するための補正量を加算することによって、誤差推定部22が推定した第2関節8の角度誤差、及び角度伝達誤差推定部28が推定した第2関節8の角度伝達誤差を補償した第2電流値を算出する。このように、第2関節制御部26は、フィードフォワード制御によって、角度伝達誤差の補償を行う。

【0056】

ところで、角度伝達誤差推定部28が第2関節8の角度伝達誤差を補償するための補正量を加算することにより、第2電流値の変化は、角度伝達誤差の補償を行ったことによる変化と、ロボットアーム4の撓み及び/又は捩れに起因する変化とが合成されたものとなる。この第2電流値に基づきロボットアーム4の撓み及び/又は捩れに起因する第2関節8の角度誤差を推定しようとしても、第2電流値に含まれる角度伝達誤差の補償成分と、ロボットアーム4の撓み及び/又は捩れに起因する第2電流値の変化に係る成分とを判別することができず、第2関節8の角度誤差の推定に誤りが生じる場合があった。しかし、本実施の形態において、誤差推定部22は、第2関節8とは異なる関節であって、角度伝達誤差の補償成分を含まない第1関節7の第1電流値に基づき第2関節の角度誤差を推定するよう構成されているので、ロボットアーム4の撓み及び/又は捩れに起因する第2関節8の角度誤差の推定に第2関節8に対する角度伝達誤差の補償が干渉し、第2関節8の角度誤差の推定に誤りが生じ、ロボットアーム4の振動の抑制に失敗することを防止することができる。これによって、第2関節8の角度伝達誤差の補償と、ロボットアーム4の撓み及び/又は捩れに起因する角度誤差の補償とを併用することができ、ロボットアーム4の軌跡精度をより向上させることができる。

20

30

【0057】

このように、第2関節8の角度伝達誤差の補償は、フィードフォワード制御により行われ、ロボットアーム4の撓み及び/又は捩れに起因する第2関節8の角度誤差の補償は、フィードバック制御により行われるように構成されている。

【0058】

指令部3は、動作プログラムに基づき、各関節に対する位置指令、すなわち各関節の目標回転角を生成し、出力する。各関節の目標回転角には、第1モータ11に対する第1目標回転角 t_1 、及び第2モータ16に対する第2目標回転角 t_2 が含まれる。出力された目標回転角は、第1関節制御部21及び第2関節制御部26を含む関節制御部に入力される。

40

【0059】

以上に説明したように、本発明のロボットシステム100は、誤差推定部22がロボットアーム4の撓み及び/又は捩れに起因する関節の角度誤差を推定し、第1関節制御部21及び第2関節制御部26が角度誤差を補償した電流値を算出するので、ロボットアーム4の作業端の軌跡精度を向上させることができる。

50

【 0 0 6 0 】

また、本発明のロボットシステム 1 0 0 は、誤差推定部 2 2 が第 1 関節 7 に含まれる第 1 モータ 1 1 への第 1 電流値、及び第 1 モータ 1 1 の出力軸 1 1 a の実回転角 θ_1 から、第 2 関節 8 の角度誤差を算出するので、ロボットアーム 4 の撓み及び / 又は捩れに起因する第 2 関節 8 の角度誤差の推定に第 2 関節 8 に対する角度伝達誤差の補償が干渉することを防止することができ、第 2 関節 8 の角度伝達誤差の補償と、ロボットアーム 4 の撓み及び / 又は捩れに起因する角度誤差の補償とを併用することができ、ロボットアーム 4 の軌跡精度をより向上させることができる。

【 0 0 6 1 】

(実施の形態 2)

以下では実施の形態 2 の構成、動作について、実施の形態 1 との相違点を中心に述べる。

【 0 0 6 2 】

図 4 は、実施の形態 2 に係るロボットシステム 2 0 0 の制御系統の構成例を概略的に示すブロック図である。

【 0 0 6 3 】

上記実施の形態 1 において、ロボットシステム 1 0 0 の制御部 2 は、第 1 関節制御部 2 1、第 2 関節制御部 2 6、及び誤差推定部 2 2 を含む。これに対し、本実施の形態において、ロボットシステム 2 0 0 は、第 1 関節制御部 2 2 1、第 2 関節制御部 2 2 6、第 1 誤差推定部 2 2 2、第 2 誤差推定部 2 2 9、及び動作モード切替部 2 3 0 を含む。第 1 誤差推定部 2 2 2 は、上記実施の形態 1 にかかる誤差推定部 2 2 と同様に構成されるので、その詳細な説明を省略する。

【 0 0 6 4 】

第 2 誤差推定部 2 2 9 は、第 1 モータ 1 1 に供給する第 1 電流値及び第 1 モータ 1 1 の出力軸 1 1 a の実回転角 θ_1 に基づいて、ロボットアーム 4 の撓み及び / 又は捩れに起因する第 1 関節 7 の角度誤差を推定する。そして、推定した第 1 関節 7 の角度誤差に基づいて第 1 電流値を補正するための第 3 補正量を算出する。また、第 2 誤差推定部 2 2 9 は、第 2 モータ 1 6 に供給する第 2 電流値及び第 2 モータ 1 6 の実回転角 θ_2 に基づいて、ロボットアーム 4 の撓み及び / 又は捩れに起因する第 2 関節 8 の角度誤差を推定する。そして、推定した第 2 関節 8 の角度誤差に基づいて第 2 電流値を補正するための第 4 補正量を算出する。第 3 補正量及び第 4 補正量は、それぞれ第 1 関節制御部 2 2 1 及び第 2 関節制御部 2 2 6 に入力される。

【 0 0 6 5 】

動作モード切替部 2 3 0 は、後述する第 1 モードと第 2 モードとの切替指令を生成し、生成された切替指令は、第 1 関節制御部 2 2 1 及び第 2 関節制御部 2 2 6 に入力される。

【 0 0 6 6 】

そして、第 1 関節制御部 2 2 1 は、第 1 モードと第 2 モードとを有する。第 1 関節制御部 2 2 1 は、第 1 モードにおいて、第 1 誤差推定部 2 2 2 が推定した第 1 関節 7 の角度誤差を補償して第 1 モータ 1 1 の出力軸 1 1 a の回転角を制御するように第 1 電流値を算出する。すなわち、第 1 関節制御部 2 2 1 は、第 1 モードにおいて、第 1 目標回転角 θ_{t1} と第 1 モータ 1 1 の出力軸 1 1 a の実回転角 θ_1 との偏差に基づき第 1 電流値を算出する過程において、第 1 補正量を加算することによって、第 1 誤差推定部 2 2 2 が推定した第 1 関節 7 の角度誤差を補償した第 1 電流値を算出する。また、第 1 関節制御部 2 2 1 は、第 2 モードにおいて、第 2 誤差推定部 2 2 9 が推定した第 1 関節 7 の角度誤差を補償して第 1 モータ 1 1 の出力軸 1 1 a の回転角を制御するように第 1 電流値を算出する。すなわち、第 1 関節制御部 2 2 1 は、第 2 モードにおいて、第 1 目標回転角 θ_{t1} と第 1 モータ 1 1 の出力軸 1 1 a の実回転角 θ_1 との偏差に基づき第 1 電流値を算出する過程において、第 3 補正量を加算することによって、第 2 誤差推定部 2 2 9 が推定した第 1 関節 7 の角度誤差を補償した第 1 電流値を算出する。

【 0 0 6 7 】

10

20

30

40

50

また、第2関節制御部226は、第1モードと第2モードとの二つの動作モードを有する。第2関節制御部226は、第1モードにおいて、角度伝達誤差と第1誤差推定部222が推定した第2関節8の角度誤差とを補償して第2モータ16の出力軸16aの回転角を制御するように第2電流値を算出する。すなわち、第2関節制御部226は、第1モードにおいて、第2目標回転角 t_2 と第2モータ16の出力軸16aの実回転角 θ_2 との偏差に基づき第2電流値を算出する過程において、角度伝達誤差の補正量及び第2補正量を加算することによって、角度伝達誤差と第1誤差推定部222が推定した第2関節8の角度誤差とを補償した第2電流値を算出する。また、第2関節制御部226は、第2モードにおいて、第2誤差推定部229が推定した第2関節8の角度誤差を補償して第2モータ16の出力軸16aの回転角を制御するように第2電流値を算出する。すなわち、第2関節制御部226は、第2モードにおいて、第2目標回転角 t_2 と第2モータ16の出力軸16aの実回転角 θ_2 との偏差に基づき第2電流値を算出する過程において、第4補正量を加算することによって、第2誤差推定部229が推定した第2関節8の角度誤差を補償した第2電流値を算出する。

10

【0068】

すなわち、第2関節8について、第1モードは、上記実施の形態1における誤差推定部22の動作処理と同様の処理を行うモードであり、角度伝達誤差の補償と、第1誤差推定部222が算出した第2関節8の角度誤差の補償とを行って、第2モータ16の出力軸16aの回転角を制御するように第2電流値を算出し、第2モータ16の動作を制御するモードである。これに対し、第2モードは、角度伝達誤差の補償を行わずに、第2誤差推定部229が算出した第2関節8の角度誤差の補償を行って、第2モータ16の出力軸16aの回転角を制御するように第2電流値を算出し、第2モータ16の動作を制御するモードである。

20

【0069】

図5は、動作モード切替部230の動作例を示すフローチャートである。

【0070】

そして、動作モード切替部230は、第1関節制御部221及び第2関節制御部226に指示して第1モードと第2モードとを切り替える。そして、動作モード切替部230は、ロボットアーム4の作業端(ハンド5)の動作速度が所定の速度以下になると第1モードに切り替えるように構成されている。本実施の形態において、動作モード切替部230は、図5に示すように、ロボットアーム4の作業端の動作速度が所定の速度よりも遅く、且つ動作モードとして第2モードが選択されている状態であるか否かを判定する(ステップS11)。そして、動作モード切替部230が、ロボットアーム4の作業端の動作速度が所定の速度よりも遅く、且つ動作モードとして第2モードが選択されている状態であると判定すると(ステップS11においてYes)、動作モードを第1モードに切り替える切替指令を生成する(ステップS12)。そして、動作モード切替部230は処理を終了させる。これによって、アーク溶接等の精度の要求される作業を実行するとき、ロボットアーム4の撓み及び/又は振れに起因する角度誤差の補償のみならず、角度伝達誤差の補償も併用することができ、軌跡精度を向上させることができる。

30

【0071】

一方、動作モード切替部230がロボットアーム4の作業端の動作速度が所定の速度よりも速い、又は動作モードとして第1モードが選択されている状態であると判定すると(ステップS11においてNo)、次に、動作モード切替部230は、ロボットアーム4の作業端の動作速度が所定の速度よりも速く、且つ動作モードとして第1モードが選択されている状態であるか否かを判定する(ステップS13)。そして、動作モード切替部230が、ロボットアーム4の作業端の動作速度が所定の速度よりも速く、且つ動作モードとして第1モードが選択されている状態であると判定すると(ステップS13においてYes)、動作モードを第2モードに切り替える切替指令を生成する(ステップS13)。そして、動作モード切替部230は処理を終了させる。これによって、角度伝達誤差による軌跡精度の低下が問題とならないような素早い作業を行う際において、ロバスト性を高め

40

50

ることができる。

【0072】

一方、動作モード切替部230がロボットアーム4の作業端の動作速度が所定の速度よりも遅い、又は動作モードとして第2モードが選択されている状態であると判定すると(ステップS13においてNo)、処理を終了させる。そして、動作モード切替部230は、上記処理を所定のサイクルタイムで繰り返し実行する。その他の構成は、上記実施の形態1と同様であるので、その詳細な説明を省略する。

【0073】

上記説明から、当業者にとっては、本発明の多くの改良や他の実施形態が明らかである。従って、上記説明は、例示としてのみ解釈されるべきであり、本発明を実行する最良の態様を当業者に教示する目的で提供されたものである。本発明の精神を逸脱することなく、その構造及び/又は機能の詳細を実質的に変更できる。

10

【符号の説明】

【0074】

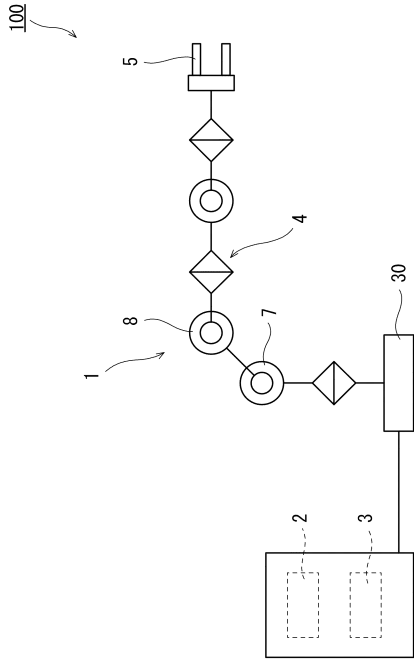
- 1 ロボット
- 2 制御部
- 3 指令部
- 4 ロボットアーム
- 7 第1関節
- 8 第2関節
- 9 第1関節駆動部
- 10 第2関節駆動部
- 11 第1モータ
- 11a (第1モータの)出力軸
- 12 第1エンコーダ
- 13 第1減速機
- 13a (第1減速機の)入力軸
- 13b (第1減速機の)出力軸
- 16 第2モータ
- 16a (第2モータの)出力軸
- 17 第2エンコーダ
- 18 第2減速機
- 18a (第2減速機の)入力軸
- 18b (第2減速機の)出力軸
- 21 第1関節制御部
- 22 第1角度誤差推定部
- 26 第2関節制御部
- 27 第2角度誤差推定部
- 28 角度伝達誤差推定部
- 100 ロボットシステム

20

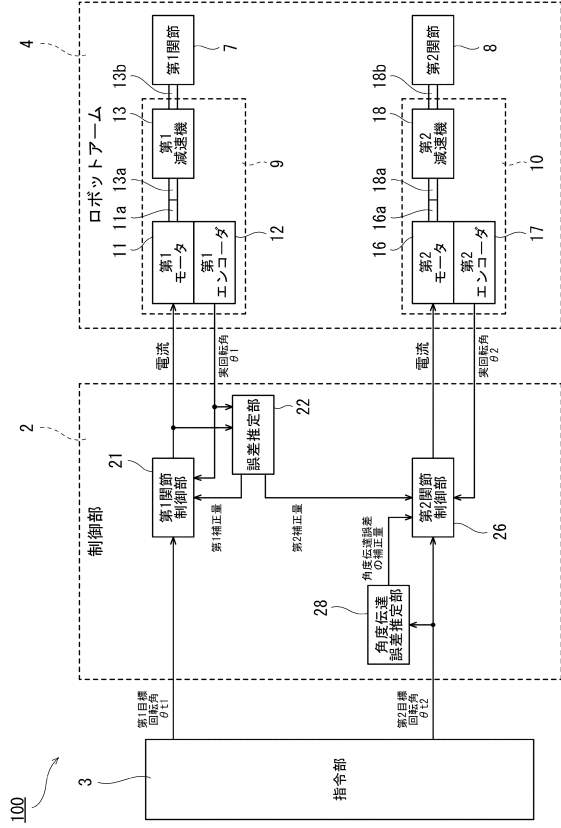
30

40

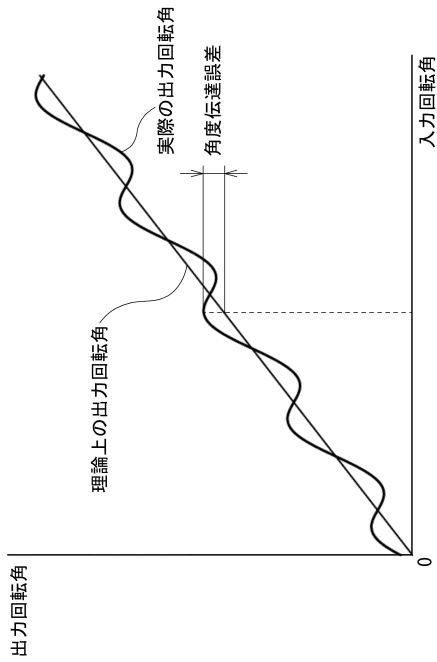
【図 1】



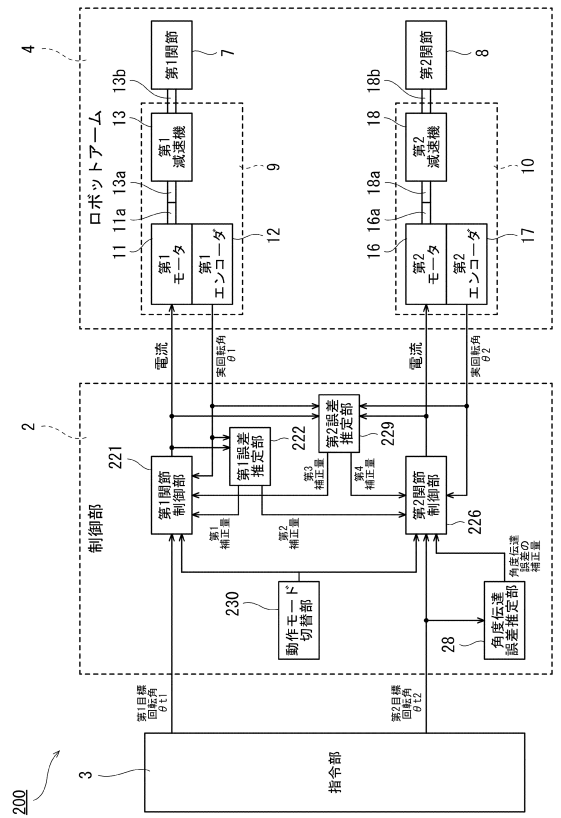
【図 2】



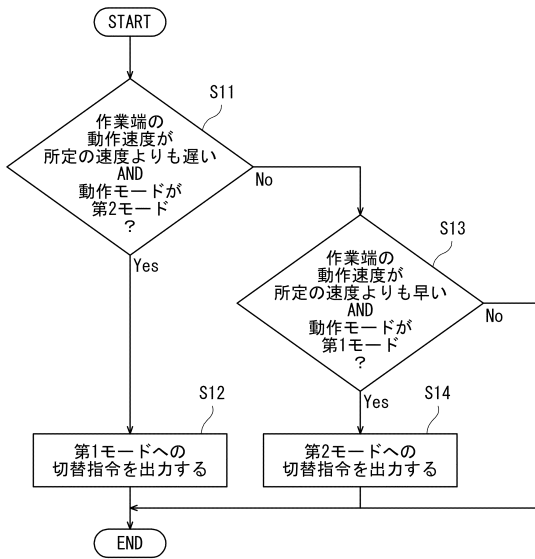
【図 3】



【図 4】



【図5】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開平09 - 222910 (JP, A)

特開2014 - 136260 (JP, A)

特開2015 - 231663 (JP, A)

特開平09 - 174466 (JP, A)

特開昭61 - 255415 (JP, A)

特開2011 - 136395 (JP, A)

特開2005 - 1013 (JP, A)

IWASAKI et al., "Modeling and compensation for angular transmission error of harmonic drive gearings in high precision positioning", 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2009年07月14日, pages 662-667

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B25J 1/00 - 21/02