

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6875329号
(P6875329)

(45) 発行日 令和3年5月19日(2021.5.19)

(24) 登録日 令和3年4月26日(2021.4.26)

(51) Int.Cl. F 1
B 2 5 J 13/00 (2006.01) B 2 5 J 13/00 Z

請求項の数 8 (全 23 頁)

(21) 出願番号	特願2018-120684 (P2018-120684)	(73) 特許権者	390008235
(22) 出願日	平成30年6月26日(2018.6.26)		ファナック株式会社
(65) 公開番号	特開2020-1107 (P2020-1107A)		山梨県南都留郡忍野村忍草字古馬場358
(43) 公開日	令和2年1月9日(2020.1.9)		〇番地
審査請求日	令和1年11月12日(2019.11.12)	(74) 代理人	100099759
早期審査対象出願			弁理士 青木 篤
		(74) 代理人	100123582
			弁理士 三橋 真二
		(74) 代理人	100112357
			弁理士 廣瀬 繁樹
		(72) 発明者	稲垣 聡
			山梨県南都留郡忍野村忍草字古馬場358
			〇番地 ファナック株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 学習制御を行うロボットシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

制御対象部位の振動データを取得するセンサを有するロボット機構部と、作業プログラムに従って前記ロボット機構部の動作を制御するロボット制御装置と、を備える、ロボットシステムであって、

前記作業プログラムに従った前記ロボット機構部の動作中に前記センサによって検出される前記制御対象部位の位置を目標位置に近づけるための学習補正量を算出する学習を行う学習制御部と、

前記学習制御部により算出された学習補正量を用いて前記制御対象部位の目標位置に関する動作指令を補正し、前記作業プログラムに従って前記ロボット機構部の動作を制御するロボット制御部と、
を備え、

前記学習制御部は、

前記学習制御部による学習回ごとに、前記センサによって検出された振動データをフーリエ変換してパワースペクトルを算出するパワースペクトル算出部と、

前記パワースペクトル算出部により算出された今回学習時のパワースペクトルと直前回学習時のパワースペクトルとを周波数成分ごとに比較する比較部と、

前記比較部による比較の結果、前記今回学習時のパワースペクトルに前記直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在する場合、前記今回学習時のパワースペクトルが前記直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなるように今回学習時の動

10

20

作指令の補正に用いられた学習補正量の位相及びゲインのうちの少なくとも1つを調整し、次回学習時の動作指令の補正に用いられる新たな学習補正量として設定する学習補正量更新部と、

を有する、ロボットシステム。

【請求項2】

前記学習補正量更新部は、

前記直前回学習時のパワースペクトルよりも大きいパワースペクトルを有する前記今回学習時の周波数成分に対応する今回学習時に用いられた学習補正量の周波数成分に対して、所定の刻み量にて順次増加する位相進み量にて位相を進めていき、当該周波数成分のパワースペクトルが前記直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなったときにおける位相進み量を算出する位相進み量算出部を有し、

10

前記位相進み量算出部により算出された位相進み量にて当該周波数成分の位相が進められた学習補正量を、前記新たな学習補正量として設定する、請求項1に記載のロボットシステム。

【請求項3】

前記学習補正量更新部は、

前記学習補正量の特定の周波数成分に対して位相を進めるフィルタを有し、

前記位相進み量算出部により算出された位相進み量にて前記フィルタにより当該周波数成分の位相が進められた学習補正量を、前記新たな学習補正量として設定する、請求項2に記載のロボットシステム。

20

【請求項4】

前記学習補正量更新部は、

前記今回学習時に用いられた学習補正量をフーリエ変換するフーリエ変換部と、

前記フーリエ変換部によるフーリエ変換後の今回学習時に用いられた学習補正量の、前記直前回学習時のパワースペクトルよりも大きいパワースペクトルを有する今回学習時の周波数成分のみについて、前記位相進み量算出部により算出された位相進み量だけ位相を進める位相調整部と、

前記位相調整部により当該周波数成分の位相が進められた学習補正量を逆フーリエ変換する逆フーリエ変換部と、

を有し、

30

前記逆フーリエ変換部による逆フーリエ変換後の学習補正量を、前記新たな学習補正量として設定する、請求項2に記載のロボットシステム。

【請求項5】

前記学習補正量更新部は、今回学習時に用いられた学習補正量を用いて前記動作指令を補正するタイミングを所定の刻み量にて早めていき、前記今回学習時のパワースペクトルが前記直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなったときにおけるタイミング早め量を算出するタイミング早め量算出部を有し、

前記ロボット制御部は、前記今回学習時に用いられた前記学習補正量を用いて前記動作指令を補正したタイミングより前記タイミング早め量算出部により算出されたタイミング早め量だけ早めたタイミングにて、次回学習時に前記新たな学習補正量を用いて前記動作指令を補正し、前記ロボット機構部の動作を制御する、請求項1に記載のロボットシステム。

40

【請求項6】

前記学習補正量更新部は、

前記直前回学習時のパワースペクトルよりも大きいパワースペクトルを有する前記今回学習時の周波数成分に対応する今回学習時に用いられた学習補正量の周波数成分に対して、前記位相進み量算出部により所定の刻み量にて順次増加する位相進み量にて位相を進めていったときにおいて、当該周波数成分のパワースペクトルが前記直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなる前に前記位相進み量が所定の上限値に達したか否かを判定する位相進み量判定部と、

50

前記位相進み量判定部により前記位相進み量が所定の上限値に達したと判定された場合、前記位相進み量をゼロに戻したうえで、今回学習時に用いられた学習補正量に対して適用されるフィルタのゲインを所定の刻み量にて減少させていき、当該周波数成分のパワースペクトルが前記直前学習時のパワースペクトルよりも小さくなったときにおけるフィルタのゲインを算出するゲイン算出部と、
を有し、

前記ゲイン算出部により算出されたゲインを有するフィルタを前記今回学習時に用いられた学習補正量に適用し、これを前記新たな学習補正量として設定する、請求項 2 ～ 4 のいずれか一項に記載のロボットシステム。

【請求項 7】

10

前記センサは、加速度センサ、ジャイロセンサ、慣性センサ、力センサ、レーザトラッカ、カメラ、またはモーションキャプチャを含む、請求項 1 ～ 6 のいずれか一項に記載のロボットシステム。

【請求項 8】

前記学習制御部は、前記ロボット制御装置に設けられるか、または、有線もしくは無線を介して前記ロボット制御装置に接続するコンピュータに設けられる、請求項 1 ～ 7 のいずれか一項に記載のロボットシステム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

20

本発明は、学習制御を行うロボットシステムに関する。

【背景技術】

【0002】

産業用のロボットシステムにおいて、ロボットの動作を高速化してタクトタイムを短縮すれば、ロボットシステムにおける生産効率が向上する。しかしながら、ロボットの動作をある程度以上高速化すると、減速機やロボットアームの剛性不足等の要因によって、ロボットの先端に位置するサーボガン等のエンドエフェクタに振動が発生してしまう。特に近年では、さらなる生産性の向上のためエンドエフェクタも軽量化が行われており、エンドエフェクタの剛性不足による振動も無視できないものになってきている。このため、振動の除去が求められる制御対象部位（例えばエンドエフェクタ）に加速度センサを取り付け、ロボット動作中の制御対象部位の振動をセンサによって計測し、学習制御を行うことで振動を低減するロボットシステムが提案されている。

30

【0003】

例えば、位置制御の対象とする部位にセンサを備えたロボット機構部と、前記ロボット機構部の動作を制御する制御装置とを含むロボットであって、前記制御装置は、前記ロボット機構部の動作を制御する通常制御部と、作業プログラムにより前記ロボット機構部を動作させて、前記センサによって検出した前記ロボット機構部の制御対象位置を前記通常制御部に与えられた目標軌跡もしくは位置に近づけるために学習補正量を算出する学習を行う学習制御部と、を有し、前記学習制御部は、前記学習稼動状態で設定可能な最大速度オーバーライドを算出し、前記最大速度オーバーライドに至るまで複数回に渡って速度オーバーライドを増加させながら学習補正量を算出する学習を行うことを特徴とするロボットが知られている（例えば、特許文献 1 参照。）。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】特開 2011 - 167817 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

学習制御を行うことで振動を低減するロボットシステムにおいて、例えば周波数応答デ

50

ータから学習制御器を設計する場合、周波数応答の測定には時間と手間がかかる。また、ロボットシステムが設けられた現場で実際に周波数応答データを取得することは難しいことから、実際には、代表的なエンドエフェクタに対する周波数応答データに基づき予め設計された学習制御器を、他のエンドエフェクタに対しても使用しているのが実情である。この場合、実際に使用されているエンドエフェクタの共振周波数が、学習制御器の制御帯域よりも高い場合は、当該学習制御器にて振動を低減することができる。しかしながら、実際に使用されているエンドエフェクタの剛性が低くその共振周波数が学習制御器の制御帯域内に含まれてしまう場合は、学習制御器における位相の遅れやゲインの増大により、振動が発散してしまう問題がある。したがって、制御対象部位の振動を学習制御により精度良くかつ容易に除去することができる技術が望まれている。

10

【課題を解決するための手段】

【0006】

本開示の一態様によれば、制御対象部位の振動データを取得するセンサを有するロボット機構部と、作業プログラムに従ってロボット機構部の動作を制御するロボット制御装置と、を備える、ロボットシステムは、ロボット機構部の動作中にセンサによって検出される制御対象部位の位置を目標位置に近づけるための学習補正量を算出する学習を行う学習制御部と、学習制御部により算出された学習補正量を用いて制御対象部位の目標位置に関する動作指令を補正し、ロボット機構部の動作を制御するロボット制御部と、を備え、学習制御部は、学習制御部による学習回ごとに、センサによって検出された振動データをフーリエ変換してパワースペクトルを算出するパワースペクトル算出部と、パワースペクトル算出部により算出された今回学習時のパワースペクトルと直前回学習時のパワースペクトルとを周波数成分ごとに比較する比較部と、比較部による比較の結果、今回学習時のパワースペクトルに直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在する場合、今回学習時のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなるように今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量の位相及びゲインのうちの少なくとも1つを調整し、次回学習時の動作指令の補正に用いられる新たな学習補正量として設定する学習補正量更新部と、を有する。

20

【発明の効果】

【0007】

本開示の一態様によれば、制御対象部位の振動を学習制御により精度良くかつ容易に除去することができるロボットシステムを実現することができる。

30

【図面の簡単な説明】

【0008】

【図1】本開示の一実施形態におけるロボットシステムの概略図である。

【図2】本開示の一実施形態におけるロボット機構部の構成図である。

【図3】本開示の一実施形態におけるロボットシステムを示すブロック図である。

【図4】本開示の他の実施形態におけるロボットシステムを示すブロック図である。

【図5】制御対象部位の共振周波数が学習制御部の制御帯域よりも高い場合における制御対象部位の周波数特性を例示するボード線図である。

【図6】図5に示す周波数特性を有する制御対象部位の振動を例示す図である。

40

【図7】制御対象部位の共振周波数が学習制御部の制御帯域内に含まれる場合における制御対象部位の周波数特性を例示するボード線図である。

【図8】図7に示す周波数特性を有する制御対象部位の振動を例示す図である。

【図9】制御対象部位の共振周波数が学習制御部の制御帯域内に含まれる場合における制御対象部位の振動のパワースペクトルを例示する図である。

【図10】図9に示す振動のパワースペクトルを有する制御対象部位の振動を例示す図である。

【図11】本開示の一実施形態におけるロボットシステムにおける学習補正量更新処理を説明するフローチャートである。

【図12】第1の形態による学習補正量更新部を有する学習制御部を示すブロック図であ

50

る。

【図１３】第１の形態による学習補正量更新部におけるフィルタの周波数特性を例示するボード線図である。

【図１４】第２の形態による学習補正量更新部を有する学習制御部を示すブロック図である。

【図１５】第３の形態による学習補正量更新部を有する学習制御部を示すブロック図である。

【図１６】学習補正量の位相及びゲインの両方を調整する実施形態による学習補正量更新部を有する学習制御部を示すブロック図である。

【図１７】学習補正量のゲインを調整するフィルタの周波数特性を例示するボード線図である。

10

【図１８】学習補正量の位相及びゲインの両方を調整する実施形態による学習補正量更新処理を説明するフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【０００９】

以下図面を参照して、学習制御を行うロボットシステムについて説明する。理解を容易にするために、これらの図面は縮尺を適宜変更している。図面に示される形態は実施するための一つの例であり、図示された実施形態に限定されるものではない。

【００１０】

図１は、本開示の一実施形態におけるロボットシステムの概略図である。ロボットシステム１は、位置制御の対象であるエンドエフェクタなどの制御対象部位１０１の振動データを取得するセンサ１０２を有するロボット機構部１０３と、作業プログラムに従ってロボット機構部１０３の動作を制御するロボット制御装置１０４と、を備えており、制御対象部位１０１の振動を学習制御するように構成されている。またさらに、ロボットシステム１は、ここでは図示しないが、種々の情報を表示する表示装置を備える。

20

【００１１】

センサ１０２は、ロボット機構部１０３の手首先端部に位置する制御対象部位１０１に取り付けられる。センサ１０２は、制御対象部位１０１の位置を推定するために計算処理を必要とする情報（例えば、加速度、角速度、ひずみ（電気抵抗値）等）を検出するセンサであり、例えば、加速度センサ、ジャイロセンサ、慣性センサ、力センサ、レーザトラッカ、カメラ、モーションキャプチャなどを含む。

30

【００１２】

センサ１０２、ロボット機構部１０３、ロボット制御装置１０４、及び表示装置（図示せず）は、有線又は無線を介して相互に通信可能に接続されている。

【００１３】

図２は、本開示の一実施形態におけるロボット機構部の構成図である。ロボット機構部１０３は、サーボモータ、減速機等を有する６つの関節軸Ｊ１～Ｊ６を備えている。ロボット機構部１０３は、空間上に固定されるワールド座標系Ｃ１と、関節軸Ｊ６のフランジ位置にあるメカニカルインタフェース座標系Ｃ２とを定義したロボットマニピュレータである。

40

【００１４】

図３は、本開示の一実施形態におけるロボットシステムを示すブロック図である。

【００１５】

本開示の実施形態におけるロボットシステム１は、学習制御部１１とロボット制御部１２とを備える。学習制御部１１及びロボット制御部１２は公知のＣＰＵ、ＡＳＩＣ、ＦＰＧＡ等を備えている。

【００１６】

学習制御部１１は、作業プログラムに従ったロボット機構部１０３の動作中にセンサ１０２によって検出される制御対象部位１０１の位置を目標位置に近づけるための学習補正量を算出する学習を行う。また、学習制御部１１における学習は、オンラインで実行され

50

てもよく、オフラインで実行されてもよい。

【0017】

学習制御部11は、代表的な制御対象部位（エンドエフェクタ）に対する周波数応答データに基づき、学習回毎に振動が単調に減少するように設計されている。すなわち、学習制御部11は、ロボット機構部103による実際の制御対象部位101に対する周波数応答データに基づき設定されたものではない。よって、ロボット機構部103による実際の制御対象部位101が、代表的な制御対象部位（エンドエフェクタ）に対する周波数応答データに基づき設計された学習制御部11の制御帯域内に含まれるか否かによって、学習制御部11による学習制御により制御対象部位101の振動を除去できるか否かが変わってくる。これについて図5～図8を参照して後述する。

10

【0018】

ロボット制御部12は、作業プログラムに従って、学習制御部11により算出された学習補正量を用いて制御対象部位101の目標位置に関する動作指令を補正し、ロボット機構部103の動作を制御する。

【0019】

図3に示す一実施形態によるロボットシステム1では、学習制御部11及びロボット制御部12はロボット制御装置104内に設けられる。他の実施形態において、学習制御部11は、ロボット制御装置104とは別体のコンピュータ内に設けられていてもよい。図4は、本開示の他の実施形態におけるロボットシステムを示すブロック図である。すなわち、図4に示す一実施形態によるロボットシステム1では、ロボット制御装置104とコンピュータ105とが有線又は無線を介して通信可能に接続され、学習制御部11及びロボット制御部12はコンピュータ105内に設けられる。

20

【0020】

ロボット制御部12による制御により制御対象部位101の目標位置に関する動作指令に基づきロボット機構部103を動作させたときにおいて、センサ102によってロボット機構部103の振動を検出し、学習制御部11により学習制御を行うことでこの振動を低減させる。すなわち、学習制御部11において、学習制御の対象となる作業プログラムを実行し、その際のロボット機構部103の動作中の加速度データやロボットの指令位置を記録する。学習制御の対象となる作業プログラムを1回実行し終えたら、当該作業プログラムを実行した際の各制御周期における振動量とこの振動量を打ち消すための学習補正量とを算出し、学習制御部11内のメモリに記録する。メモリに記録された学習補正量は、次に同じ作業プログラムが実行される際に、ロボット制御部12において動作指令の補正に利用される。この一連の処理を繰り返し実行することで、ロボット機構部103の振動が低減されていく。

30

【0021】

続いて、制御対象部位（エンドエフェクタ）の共振周波数と学習制御部の制御帯域との関係について図5～図8を参照して説明する。

【0022】

図5は、制御対象部位の共振周波数が学習制御部の制御帯域よりも高い場合における制御対象部位の周波数特性を例示するボード線図である。図6は、図5に示す周波数特性を有する制御対象部位の振動を例示する図である。図6において、横軸は時間軸であり、縦軸は振動の振幅を示す。また、図6において、点線は制御対象部位の指令軌跡を示し、一点鎖線は学習制御前の制御対象部位の軌跡を示し、実線は学習制御後の制御対象部位の軌跡を示す。図5に示すように共振周波数が例えば30Hzである制御対象部位に制御帯域が15Hzである学習制御部を適用した場合、図6の実線に示すように学習回毎に振動が単調に減少していく。

40

【0023】

図7は、制御対象部位の共振周波数が学習制御部の制御帯域内に含まれる場合における制御対象部位の周波数特性を例示するボード線図である。図8は、図7に示す周波数特性を有する制御対象部位の振動を例示する図である。図8において、横軸は時間軸であり、縦

50

軸は振動の振幅を示す。また、図 8 において、点線は制御対象部位の指令軌跡を示し、一点鎖線は学習制御前の制御対象部位の軌跡を示し、実線は学習制御後の制御対象部位の軌跡を示す。図 7 に示すように共振周波数が例えば 14 Hz である制御対象部位に制御帯域が 15 Hz である学習制御部を適用した場合、図 8 の実線に示すように振動が発散してしまう。

【0024】

制御対象部位の共振周波数が学習制御部の制御帯域内に含まれる場合において図 8 に示すように振動が減少せずに発散してしまうのは、制御対象部位の共振周波数近傍の位相の遅れやゲインの増大によるものと考えられる。そこで、本実施形態では、学習制御部 11 による学習回毎に、制御対象部位 101 の振動のパワースペクトルを監視し、制御対象部位 101 の振動のパワースペクトルが直前回学習時よりも今回学習時の方が増加した場合には、制御対象部位 101 の共振周波数が学習制御部 11 の制御帯域内に含まれると考え、学習制御部 11 において学習補正量の位相及びゲインの少なくとも 1 つを調整し、調整後の学習補正量を、次回学習時の動作指令の補正に用いられる新たな学習補正量として設定する。

【0025】

続いて、学習制御部 11 の構成についてより詳細に説明する。

【0026】

図 3 及び図 4 に示すように、学習制御部 11 は、パワースペクトル算出部 21 と、比較部 22 と、学習補正量更新部 23 とを備える。

【0027】

また、学習制御部 11 は、第 1 のメモリ 24 と第 2 のメモリ 25 と第 3 のメモリ 26 とを備える。第 1 のメモリ 24 は、センサ 102 から取得したセンサ情報を記憶する。第 2 のメモリ 25 は、パワースペクトル算出部 21 により算出（取得）されたパワースペクトルを記憶する。第 3 のメモリ 26 は、学習を繰返して収束した学習補正量を記憶する。第 1 のメモリ 24 及び第 2 のメモリ 25 は高速な学習を行うために揮発性メモリであることが好ましいが不揮発性メモリであってもよい。第 1 のメモリ 24 及び第 2 のメモリ 25 は、1 つのメモリの領域を分割して割り当てられたものであってもよく、あるいはそれぞれ別個のメモリとして実現されてもよい。また、第 3 のメモリ 26 は電源切断後であっても学習補正量を記憶する不揮発性メモリであることが好ましい。電源投入後、収束した学習補正量が第 3 のメモリ 26 から読み出されてロボット制御部 12 において利用される。

【0028】

パワースペクトル算出部 21 は、学習制御部 11 による学習回ごとに、センサ 102 によって検出された振動データをフーリエ変換してパワースペクトルを算出（取得）する。パワースペクトル算出部 21 により算出されたパワースペクトルは、比較部 22 に送られるとともに、第 2 のメモリ 25 に記憶される。

【0029】

比較部 22 は、パワースペクトル算出部 21 により算出された今回学習時のパワースペクトルと直前回学習時のパワースペクトルとの大小関係を周波数成分ごとに比較する。今回学習時のパワースペクトルは、当該学習回においてパワースペクトル算出部 21 から送られてきたものであり、直前回学習時のパワースペクトルは、第 2 のメモリ 25 から読み出されたものである。比較部 22 による比較結果である周波数成分ごとのパワースペクトルの大小関係に関する情報は、学習補正量更新部 23 に送られる。

【0030】

学習補正量更新部 23 は、比較部 22 による比較の結果、今回学習時のパワースペクトルに直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在する場合、今回学習時のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなるように今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量の位相及びゲインのうちの少なくとも 1 つを調整し、これを次回学習時の動作指令の補正に用いられる新たな学習補正量として設定する。つまり、学習補正量更新部 23 は、直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい

10

20

30

40

50

パワースペクトルを有していると比較部 2 2 により判定された今回学習時の周波数成分に対応する学習補正量の周波数成分に対して位相を調整することで、当該大きい周波数成分についての今回学習時のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトル以下になるようにし、調整後の学習補正量を、次回学習時の動作指令の補正に用いられる新たな学習補正量として設定する。新たに設定された学習補正量は、第 3 のメモリ 2 6 に記憶される。ロボット制御部 1 2 は、作業プログラムに従って、学習制御部 1 1 内の第 3 のメモリ 2 6 から読み出された学習補正量を用いて制御対象部位 1 0 1 の目標位置に関する動作指令を補正し、ロボット機構部 1 0 3 の動作を制御する。

【 0 0 3 1 】

続いて、学習補正量の位相を調整する実施形態について図 9 及び図 1 0 を参照してより詳細に説明する。学習補正量の位相及びゲインの両方を調整する実施形態については後述する。

【 0 0 3 2 】

図 9 は、制御対象部位の共振周波数が学習制御部の制御帯域内に含まれる場合における制御対象部位の振動のパワースペクトルを例示する図である。図 9 において、横軸は周波数を示し、縦軸はパワースペクトルを示す。また、図 9 において、実線は学習制御部 1 1 の N 回目 (N は整数) における制御対象部位 1 0 1 の振動のパワースペクトルを示し、点線は学習制御部 1 1 の N + 1 回目 (N は整数) における制御対象部位 1 0 1 の振動のパワースペクトルを示す。図 1 0 は、図 9 に示す振動のパワースペクトルを有する制御対象部位の振動を例示する図である。図 1 0 において、横軸は時間軸であり、縦軸は振動の振幅を示す。また、図 1 0 において、点線は制御対象部位の指令軌跡を示し、一点鎖線は学習制御前の制御対象部位の軌跡を示し、二点鎖線は、位相調整なしの学習制御後の制御対象部位の軌跡を示し、実線は位相調整ありの学習制御後の制御対象部位の軌跡を示す。図 9 及び図 1 0 に示す例では、一例として学習制御部 1 1 の制御帯域を 1 5 H z としている。制御対象部位 1 0 1 の共振周波数が、学習制御部 1 1 の制御帯域である 1 5 H z 内に含まれると、学習制御部 1 1 による学習制御の結果、今回学習時 (N + 1 回目) のパワースペクトルは、直前回学習時 (N 回目) のパワースペクトルに比べて増大する。すなわち、図 9 に示すように、8 H z より大きい周波数成分については、今回学習時 (N + 1 回目) のパワースペクトルの方が直前回学習時のパワースペクトルよりも大きくなる。この結果、図 1 0 に示すように、学習制御前は振動がなかったが (実線) 、学習制御部 1 1 による学習制御により振動が発散してしまう (二点鎖線) 。ここで、今回学習時の 8 H z より大きい周波数成分のパワースペクトルが直前回学習時の 8 H z より大きい周波数成分のパワースペクトルよりも小さくなるように、8 H z より大きい周波数成分の学習補正量に対して位相を進める調整を行うと、図 1 0 の実線に示すように学習回毎に振動が単調に減少していく。本実施形態では、学習制御部 1 1 による学習回毎に、制御対象部位 1 0 1 の振動のパワースペクトルを監視し、制御対象部位 1 0 1 の振動のパワースペクトルが直前回学習時よりも今回学習時の方が増加した場合には、学習補正量更新部 2 3 は、今回学習時パワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなるように学習補正量の位相を調整し、調整後の学習補正量を、新たな学習補正量として設定する。新たな学習補正量は、第 3 のメモリ 2 6 に記憶される。ロボット制御部 1 2 は、作業プログラムに従って、学習制御部 1 1 内の第 3 のメモリ 2 6 から読み出された新たな学習補正量を用いて制御対象部位 1 0 1 の目標位置に関する動作指令を補正し、ロボット機構部 1 0 3 の動作を制御する。新たな学習補正量は、今回学習時パワースペクトルを直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくするものであるため、ロボット制御部 1 2 において新たな学習補正量にて動作指令を補正してロボット機構部 1 0 3 の動作を制御すると、学習回毎に振動が単調に減少することになる。

【 0 0 3 3 】

図 1 1 は、本開示の一実施形態におけるロボットシステムにおける学習補正量更新処理を説明するフローチャートである。

【 0 0 3 4 】

ロボット制御部 12 が、学習制御部 11 により算出された学習補正量を用いて動作指令を補正してロボット機構部 103 の動作を制御する場合を考える。ステップ S 101 において、パワースペクトル算出部 21 は、センサ 102 によって検出された振動データをフーリエ変換してパワースペクトルを算出する。パワースペクトル算出部 21 により算出されたパワースペクトルは、比較部 22 に送られるとともに、第 2 のメモリ 25 に記憶される。

【0035】

ステップ S 102 において、比較部 22 は、パワースペクトル算出部 21 により算出された今回学習時のパワースペクトルと直前回学習時のパワースペクトルとの大小関係を周波数成分ごとに比較する。ステップ S 102 における比較部 22 による比較の結果、今回学習時のパワースペクトルに直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在すると判定された場合は、ステップ S 103 へ進む。一方、ステップ S 102 における比較部 22 による比較の結果、今回学習時のパワースペクトルに直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在しないと判定された場合は、学習補正量は更新せずに学習補正量更新処理を終了する。学習補正量更新処理の終了後、次回学習時に再度、学習補正量更新処理を実行してもよい。

【0036】

ステップ S 103 において、学習補正量更新部 23 は、直前回学習時のパワースペクトルよりも大きいパワースペクトルを有する今回学習時の周波数成分に対応する今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量の周波数成分に対して、所定の刻み量だけ位相を進める。位相進み量処理の詳細については後述する。

【0037】

ステップ S 104 において、比較部 22 は、パワースペクトル算出部 21 により算出された今回学習時のパワースペクトルと直前回学習時のパワースペクトルとの大小関係を周波数成分ごとに比較する。ステップ S 104 における比較部 22 による比較の結果、今回学習時のパワースペクトルに直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在すると判定された場合は、ステップ S 103 へ戻る。一方、ステップ S 104 における比較部 22 による比較の結果、今回学習時のパワースペクトルの全ての周波数成分について直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなったと判定された場合は、ステップ S 105 へ進む。

【0038】

ステップ S 105 において、学習補正量更新部 23 は、位相調整後の学習補正量を、次回学習時の動作指令の補正に利用される新たな学習補正量として設定し、その後、学習補正量更新処理を終了する。学習補正量更新処理の終了後、次回学習時に再度、学習補正量更新処理を実行してもよい。

【0039】

このように、ステップ S 103 ~ S 105 における学習補正量更新部 23 の一連の処理により、直前回学習時のパワースペクトルよりも大きいパワースペクトルを有する今回学習時の周波数成分に対応する今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量の周波数成分に対して、所定の刻み量にて順次増加する位相進み量にて位相を進めていき、当該周波数成分のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなったときにおける位相進み量が算出される。学習補正量更新部 23 は、算出された位相進み量にて当該周波数成分の位相が進められた学習補正量を、次回学習時の動作指令の補正に用いられる新たな学習補正量として設定する。

【0040】

ステップ S 105 において設定される次回学習時の動作指令の補正に利用される新たな学習補正量は、全ての当該周波数成分のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトル以下になるように今回学習時の学習補正量の位相を進める調整を行うことで得られる学習補正量である。このように位相調整された新たな学習補正量を次回学習時の動作指令の補正に利用すれば、制御対象部位 101 の共振周波数付近の位相遅れを補償することが

できるので、代表的なエンドエフェクタに対する周波数応答データに基づき予め設計された学習制御部 11 により、制御対象部位 101 の振動を除去することができる。

【0041】

一方、ステップ S102 において、比較部 22 により今回学習時のパワースペクトルに直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在しないと判定された場合は、制御対象部位 101 の共振周波数が学習制御部 11 の制御帯域よりも大きいので、代表的なエンドエフェクタに対する周波数応答データに基づき予め設計された学習制御部 11 の今回学習時の学習補正量をそのまま次回学習時の動作指令の補正に利用しても、制御対象部位 101 の振動を除去することができるので、学習補正量は更新せずに、学習補正量更新処理を終了する。

10

【0042】

続いて、学習補正量更新部 23 の形態について列記する。

【0043】

図 12 は、第 1 の形態による学習補正量更新部を有する学習制御部を示すブロック図である。第 1 の形態による学習補正量更新部 23 は、位相進み量算出部 31 と、学習補正量の特定の周波数成分に対して位相を進めるフィルタ 32 とを有する。

【0044】

比較部 22 による比較の結果、今回学習時のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在する場合、位相進み量算出部 31 は、直前回学習時のパワースペクトルよりも大きいパワースペクトルを有する今回学習時の周波数成分に対応する今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量の周波数成分に対して、所定の刻み量にて順次増加する位相進み量にて位相を進めていき、当該周波数成分のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトルより小さくなったときにおける位相進み量を算出する。位相進み量算出部 31 により算出された位相進み量に関する情報は、フィルタ 32 に送られる。

20

【0045】

フィルタ 32 は、直前回学習時のパワースペクトルよりも大きいパワースペクトルを有する今回学習時の周波数成分に対応する今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量の周波数成分に対して、位相進み量算出部 31 により算出された位相進み量にて、位相を進める。位相進み量算出部 31 により算出された位相進み量にてフィルタ 32 により当該周波数成分の位相が進められた学習補正量が、新たな学習補正量として設定され、第 3 のメモリ 26 に記憶される。

30

【0046】

上述の第 1 の形態による学習補正量更新部 23 による学習制御を数式にて表すと下記式 1 のように模式化できる。式 1 において、 u_i を学習 i 回目 (i は整数) の学習補正量、 e_i を学習 i 回目の制御対象部位 101 の振動とし、位相進み量にて位相を進めるフィルタが適用されることを関数 F_p 、学習制御部 11 の制御帯域を規定するローパスフィルタが適用されることを関数 Q 、学習制御が適用されることを関数 L でそれぞれ表す。

【0047】

【数 1】

40

$$u_{i+1} = Q(F_p u_i + L F_p e_i) \quad \cdots (1)$$

【0048】

図 13 は、第 1 の形態による学習補正量更新部におけるフィルタの周波数特性を例示するボード線図である。例えばある今回学習 (i 回目) において、直前回学習 ($i - 1$ 回目) と比べて 8 Hz 以上の周波数成分について振動のパワースペクトルが増大したとする。その時の学習補正量 u_i を例えば図 13 に示すような周波数特性を持つフィルタ 32 を使用して特定の周波数成分の学習補正量の位相を進める。特定の周波数成分の学習補正量に

50

対して位相進み量を何パターンか変えながら(例えば20degから5deg刻みで増加させながら)位相を進めてロボット制御部12によりロボット機構部103を動作させる。8Hz以上の周波数成分についての振動のパワースペクトルが直前回(i-1回目)よりも減少するまで所定の刻み量にて位相進みを増加させていく。8Hz以上の周波数成分を含む全ての周波数成分についての振動のパワースペクトルが直前回(i-1回目)よりも減少したときにおける位相進み量を、式1におけるフィルタ32の F_p に適用し、学習i回目の学習補正量 u_i を $F_p u_i$ で置き換えて、学習制御を再開する。

【0049】

図14は、第2の形態による学習補正量更新部を有する学習制御部を示すブロック図である。第2の形態による学習補正量更新部23は、位相進み量算出部31と、フーリエ変換部33と、位相調整部34と、逆フーリエ変換部35とを有する。

10

【0050】

比較部22による比較の結果、今回学習時のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在する場合、位相進み量算出部31は、直前回学習時のパワースペクトルよりも大きいパワースペクトルを有する今回学習時の周波数成分に対応する今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量の周波数成分に対して、所定の刻み量にて順次増加する位相進み量にて位相を進めていき、当該周波数成分のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなったときにおける位相進み量を算出する。位相進み量算出部31により算出された位相進み量に関する情報は、位相調整部34に送られる。

20

【0051】

フーリエ変換部33は、第3のメモリ26から読み出された今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量を、フーリエ変換する。フーリエ変換後の今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量は、位相調整部34に送られる。

【0052】

位相調整部34は、フーリエ変換部33によるフーリエ変換後の今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量の、直前回学習時のパワースペクトルよりも大きいパワースペクトルを有する今回学習時の周波数成分のみについて、位相進み量算出部31により算出された位相進み量だけ位相を進める。上述のように位相進み量算出部31により算出された位相進み量は、直前回学習時のパワースペクトルよりも大きいパワースペクトルを有する今回学習時の学習補正量の周波数成分が、直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなるようにするためのものである。学習補正量の周波数成分のうち特定の周波数成分について位相進み量算出部31により算出された位相進み量だけ位相を進めることにより、全ての周波数成分のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなる。位相調整部34による位相調整後の学習補正量は、逆フーリエ変換部35へ送られる。

30

【0053】

逆フーリエ変換部35は、位相調整部34により全ての周波数成分のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなるように位相が進められた学習補正量を、逆フーリエ変換する。逆フーリエ変換部35による逆フーリエ変換後の学習補正量が、新たな学習補正量として設定されて第3のメモリ26に記憶される。

40

【0054】

上述の第2の形態による学習補正量更新部23による学習補正量更新処理は、下記式2のように表される。式2において、 $W(\omega)$ は、周波数領域上において特定の周波数成分の位相を進めるための重み付け関数を表す。位相進み量算出部31により算出された位相進み量を θ としたとき、位相を進めるべき周波数成分には $e^{i\theta}$ がかけられ、位相を進める必要のない周波数成分には1がかけられる。

【0055】

【数 2】

$$f(t) \xrightarrow{\text{フーリエ変換}} F(\omega) \xrightarrow{\text{位相調整}} F(\omega)W(\omega) \xrightarrow{\text{逆フーリエ変換}} f'(t) \quad \dots(2)$$

$$W(\omega) = \begin{cases} 1 & (\omega \notin \Omega) \\ e^{i\theta} & (\omega \in \Omega) \end{cases}$$

【0056】

10

式 2 において、時間領域上の今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量 $f(t)$ は、フーリエ変換部 33 によりフーリエ変換される。フーリエ変換後の今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量（すなわち周波数領域上の今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量）を $F(\omega)$ で表す。位相調整部 34 により、フーリエ変換後の今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量 $F(\omega)$ の各周波数成分のうち、直前回学習時のパワースペクトルよりも大きいパワースペクトルを有する今回学習時の周波数成分については $e^{i\theta}$ がかけられ、位相を進める必要のない周波数成分には 1 がかけられる。位相調整された学習補正量 $F(\omega)W(\omega)$ は、逆フーリエ変換部 35 により逆フーリエ変換される。逆フーリエ変換部 35 による逆フーリエ変換後の学習補正量（すなわち時間領域上の位相調整済の学習補正量）を $f'(t)$ で表す。逆フーリエ変換部 35 による逆フーリエ変換後の学習補正量 $f'(t)$ は、全ての周波数成分のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなる。よって、ロボット制御部 12 において新たな学習補正量にて動作指令を補正してロボット機構部 103 の動作を制御すると、学習回毎に振動が単調に減少することになる。

20

【0057】

図 15 は、第 3 の形態による学習補正量更新部を有する学習制御部を示すブロック図である。

【0058】

第 1 の形態及び第 2 の形態では、学習補正量の各周波数成分のうち特定の周波数成分（すなわち直前回学習時のパワースペクトルよりも大きいパワースペクトルを有している今回学習時の周波数成分に対応する学習補正量の周波数成分）についてのみ位相を進めることで、今回学習時のパワースペクトルの全ての周波数成分について直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなるようにした。これに対し、第 3 の形態では、学習補正量の各周波数成分のうち特定の周波数成分ではなく、学習補正量全体（すなわち全ての周波数成分）を時間的に進めることで、今回学習時のパワースペクトルの全ての周波数成分について直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなるようにする。したがって、第 3 の形態では、直前回学習時のパワースペクトルよりも小さいパワースペクトルを有する今回学習時の周波数成分に対応する今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量の周波数成分についても位相に進められることになるが、直前回学習時のパワースペクトルよりも小さいパワースペクトルを有する今回学習時の周波数成分は、当該周波数成分の学習補正量の位相を進めてもパワースペクトルがさらに小さくなるだけであるので、特に問題は生じない。

30

40

【0059】

第 3 の形態による学習補正量更新部 23 は、タイミング早め量算出部 36 を有する。タイミング早め量算出部 36 は、今回学習時の学習補正量を用いて動作指令を補正するタイミングを所定の刻み量にて早めていき、今回学習時のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなったときにおけるタイミング早め量を算出する。タイミング早め量算出部 36 により算出されたタイミング早め量に関する情報は、第 3 のメモリ 26 に記憶される。ロボット制御部 12 は、第 3 のメモリ 26 に記憶されたタイミング早め量を読み出し、今回学習時の学習補正量を用いて動作指令を補正したタイミングよりタ

50

イミング早め量だけ早めたタイミングにて、次回学習時に新たな学習補正量を用いて動作指令を補正し、ロボット機構部 103 の動作を制御する。このように、次回学習時に新たな学習補正量を用いて動作指令を補正するタイミングを、第 3 の形態による学習補正量更新部 23 内のタイミング早め量算出部 36 により算出されたタイミング早め量だけ、今回学習時の学習補正量を用いて動作指令を補正したタイミングよりも早める。

【0060】

続いて、学習補正量の位相及びゲインの両方を調整する実施形態について説明する。

【0061】

制御対象部位 101 (エンドエフェクタ) の共振周波数が学習制御部 11 の制御帯域内に含まれる場合において、この共振周波数近傍の学習制御部 11 のフィルタのゲインが大きいと、学習補正量の位相の進める調整のみでは、今回学習時のパワースペクトルを直前学習時のパワースペクトルよりも小さくしきれず、振動を低減することができないことがある。この場合は、学習補正量に適用されるフィルタのゲインを小さくする調整を行う。

10

【0062】

図 16 は、学習補正量の位相及びゲインの両方を調整する実施形態による学習補正量更新部を有する学習制御部を示すブロック図である。

【0063】

図 16 に示すように、学習補正量更新部 23 は、位相進み量算出部 31 と、学習補正量の特定の周波数成分に対して位相及びゲインを調整するフィルタ 32 と、位相進み量判定部 37 と、ゲイン算出部 38 とを有する。

20

【0064】

比較部 22 による比較の結果、今回学習時のパワースペクトルが直前学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在する場合、位相進み量算出部 31 は、直前学習時のパワースペクトルよりも大きいパワースペクトルを有する今回学習時の周波数成分に対応する今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量の周波数成分に対して、所定の刻み量にて順次増加する位相進み量にて位相を進める。

【0065】

位相進み量判定部 37 は、直前学習時のパワースペクトルよりも大きいパワースペクトルを有する今回学習時の周波数成分に対応する今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量の周波数成分に対して、位相進み量算出部 31 により所定の刻み量にて順次増加する位相進み量にて位相を進めていったときにおいて、当該周波数成分のパワースペクトルが直前学習時のパワースペクトルよりも小さくなる前に位相進み量が所定の上限値に達したか否かを判定する。位相進み量が所定の上限値に達したと位相進み量判定部 37 が判定する前に、当該周波数成分のパワースペクトルが直前学習時のパワースペクトルよりも小さくなったときにおける位相進み量を算出できた場合は、位相進み量算出部 31 により算出された位相進み量に関する情報は、フィルタ 32 に送られる。一方、位相進み量が所定の上限値に達したと位相進み量判定部 37 が判定した場合は、その判定結果をゲイン算出部 38 に通知する。位相進み量算出部 31 の判定処理に用いられる上限値の設定例については後述する。

30

40

【0066】

位相進み量判定部 37 により位相進み量が所定の上限値に達したとの判定結果を受けて、ゲイン算出部 38 は、位相進み量算出部 31 により算出していた位相進み量をゼロに戻したうえで、今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量に対して適用されるフィルタ 32 のゲインを所定の刻み量にて減少させていき、当該周波数成分のパワースペクトルが直前学習時のパワースペクトルよりも小さくなったときにおけるフィルタ 32 のゲインを算出する。ゲイン算出部 38 により算出されたゲインに関する情報は、フィルタ 32 に送られる。

【0067】

位相進み量が所定の上限値に達したと位相進み量判定部 37 が判定する前に、当該周波

50

数成分のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなったときにおける位相進み量を算出できた場合は、フィルタ 3 2 は、直前回学習時のパワースペクトルよりも大きいパワースペクトルを有する今回学習時の周波数成分に対応する今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量の周波数成分に対して、位相進み量算出部 3 1 により算出された位相進み量にて、位相を進める。この場合、位相進み量算出部 3 1 により算出された位相進み量にてフィルタ 3 2 により当該周波数成分の位相が進められた学習補正量が、新たな学習補正量として設定され、第 3 のメモリ 2 6 に記憶される。

【 0 0 6 8 】

一方、位相進み量が所定の上限値に達したと位相進み量判定部 3 7 が判定した場合は、フィルタ 3 2 は、ゲイン算出部 3 8 により算出されたゲインを有するフィルタ 3 2 が適用された学習補正量（すなわち当該周波数成分のピークが小さくされた学習補正量）が、新たな学習補正量として設定され、第 3 のメモリ 2 6 に記憶される。

【 0 0 6 9 】

上述の学習補正量の位相及びゲインの両方を調整する実施形態による学習補正量更新部 2 3 による学習制御を数式にて表すと下記式 3 のように模式化できる。式 3 において、 u_i を学習 i 回目（ i は整数）の学習補正量、 e_i を学習 i 回目の制御対象部位 1 0 1 の振動とし、位相進み量にて位相を進めるフィルタが適用されることを関数 F_p 、位相進み量にてゲインを減少させるフィルタが適用されることを関数 F_g 、学習制御部 1 1 の制御帯域を規定するローパスフィルタが適用されることを関数 Q 、学習制御が適用されることを関数 L でそれぞれ表す。

【 0 0 7 0 】

【 数 3 】

$$u_{i+1} = Q(F_p F_g u_i + L F_p F_g e_i) \quad \dots (3)$$

【 0 0 7 1 】

図 1 7 は、学習補正量のゲインを調整するフィルタの周波数特性を例示するボード線図である。ある特定の周波数成分について振動のパワースペクトルのピークが大きい場合は、その時の学習補正量 u_i を例えば図 1 7 に示すような周波数特性を持つフィルタ 3 2 を使用して特定の周波数成分の学習補正量の位相を進める。図 1 7 の例では、一例として 9 Hz の周波数成分のピークを減少させるためのフィルタ 3 2 の周波数特性を示している。特定の周波数成分の学習補正量に対して適用されるフィルタ 3 2 のゲインを何パターンか変えながら位相を進めてロボット制御部 1 2 によりロボット機構部 1 0 3 を動作させる。全ての周波数成分についての振動のパワースペクトルが直前回（ $i - 1$ 回目）よりも減少するまで所定の刻み量にてフィルタ 3 2 のゲインを減少させていく。全ての周波数成分についての振動のパワースペクトルが直前回（ $i - 1$ 回目）よりも減少したときにおけるゲインを、式 3 におけるフィルタ $F_p F_g$ に適用し、学習 i 回目の学習補正量 u_i を $F_p F_g u_i$ で置き換えて、学習制御を再開する。

【 0 0 7 2 】

位相進み量算出部 3 1 の判定処理に用いられる上限値は、例えば次のような値に設定すればよい。すなわち、学習 i 回目の振動 e_i と学習 $i - 1$ 回目の振動 e_{i-1} との差分に学習制御を適用した「 $L(e_i - e_{i-1})$ 」をフーリエ変換して得られる第 1 の値と、学習 i 回目の学習補正量 u_i と学習 $i - 1$ 回目の学習補正量 u_{i-1} との差分「 $u_i - u_{i-1}$ 」をフーリエ変換して得られる第 2 の値と、の位相差を、位相進み量算出部 3 1 の判定処理に用いられる上限値に設定する。学習制御部 1 1 は、ロボット機構部 1 0 3 の実際の制御対象部位 1 0 1 に対する周波数応答データではなく、代表的な制御対象部位に対する周波数応答データに基づき設計されたものである。ロボット機構部 1 0 3 の実際の制御対象部位 1 0 1 の共振周波数が学習制御部 1 1 の制御帯域内に含まれる場合（今回学習時のパワースペクトルに直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在する場合）におい

10

20

30

40

50

て、学習補正量の特性の周波数成分の位相を進めてもなお制御対象部位 1 0 1 の振動が除去できない（すなわち振動が発散する）ことがある。これは、位相をいくら進めてもなお第 1 の値（周波数領域上の学習制御適用後の振動差分）が第 2 の値（周波数領域上の学習補正量の差分）を上回るからである。このような場合は、学習補正量の位相の進みによる調整ではなく、学習補正量に適用されるフィルタのゲインを減少させる調整に切り替える必要があり、調整方法の切替の目安として、学習 i 回目の振動 e_i と学習 $i - 1$ 回目の振動 e_{i-1} との差分に学習制御を適用した「 $L(e_i - e_{i-1})$ 」をフーリエ変換して得られる第 1 の値と、学習 i 回目の学習補正量 u_i と学習 $i - 1$ 回目の学習補正量 u_{i-1} との差分「 $u_i - u_{i-1}$ 」をフーリエ変換して得られる第 2 の値と、の位相差を、上限値に設定する。

10

【0073】

図 18 は、学習補正量の位相及びゲインの両方を調整する実施形態による学習補正量更新処理を説明するフローチャートである。

【0074】

ロボット制御部 12 が、学習制御部 11 により算出された学習補正量を用いて動作指令を補正してロボット機構部 103 の動作を制御する場合を考える。ステップ S 101 において、パワースペクトル算出部 21 は、センサ 102 によって検出された振動データをフーリエ変換してパワースペクトルを算出する。パワースペクトル算出部 21 により算出されたパワースペクトルは、比較部 22 に送られるとともに、第 2 のメモリ 25 に記憶される。

20

【0075】

ステップ S 102 において、比較部 22 は、パワースペクトル算出部 21 により算出された今回学習時のパワースペクトルと直前回学習時のパワースペクトルとを周波数成分ごとに比較する。ステップ S 102 において、比較部 22 により今回学習時のパワースペクトルに直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在すると判定された場合は、ステップ S 103 へ進む。一方、ステップ S 102 において、比較部 22 により今回学習時のパワースペクトルに直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在しないと判定された場合は、学習補正量は更新せずに学習補正量更新処理を終了する。学習補正量更新処理の終了後、次回学習時に再度、学習補正量更新処理を実行してもよい。

30

【0076】

ステップ S 103 において、学習補正量更新部 23 は、直前回学習時のパワースペクトルよりも大きいパワースペクトルを有する今回学習時の周波数成分に対応する今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量の周波数成分に対して、所定の刻み量だけ位相を進める。

【0077】

ステップ S 104 において、比較部 22 は、パワースペクトル算出部 21 により算出された今回学習時のパワースペクトルと直前回学習時のパワースペクトルとを周波数成分ごとに比較する。ステップ S 104 において、比較部 22 により今回学習時のパワースペクトルに直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在すると判定された場合は、ステップ S 106 へ進む。一方、ステップ S 104 において、比較部 22 により今回学習時のパワースペクトルの全ての周波数成分について直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなったと判定された場合は、ステップ S 105 へ進む。

40

【0078】

ステップ S 105 において、学習補正量更新部 23 は、位相調整後または位相及びゲイン調整後の学習補正量を、次回学習時の動作指令の補正に利用される新たな学習補正量として設定し、その後、学習補正量更新処理を終了する。学習補正量更新処理の終了後、次回学習時に再度、学習補正量更新処理を実行してもよい。

【0079】

ステップ S 106 において、位相進み量判定部 37 は、直前回学習時のパワースペクト

50

ルよりも大きいパワースペクトルを有する今回学習時の周波数成分に対応する今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量の周波数成分に対して、当該周波数成分のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなる前に位相進み量が所定の上限值に達したか否かを判定する。ステップS106において、位相進み量判定部37により位相進み量が所定の上限值に達したと判定された場合はステップS107へ進む。一方、ステップS106において、位相進み量判定部37により位相進み量が所定の上限值に達していないと判定された場合はステップS103へ戻る。ステップS106における判定処理は、ステップS103で位相進み量算出部31により所定の刻み量にて順次増加する位相進み量にて位相を進めていったときにおいて、ステップS104において比較部22により今回学習時のパワースペクトルに直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在すると判定される限り、繰り返し実行される。

10

【0080】

ステップS107において、ゲイン算出部38は、位相進み量算出部31により算出していた位相進み量をゼロに戻す。

【0081】

ステップS108において、ゲイン算出部38は、今回学習時の動作指令の補正に用いられた学習補正量に対して適用されるフィルタ32のゲインを所定の刻み量にて減少させる。

【0082】

ステップS109において、比較部22は、パワースペクトル算出部21により算出された今回学習時のパワースペクトルと直前回学習時のパワースペクトルとを周波数成分ごとに比較する。

20

【0083】

ステップS109において、比較部22により今回学習時のパワースペクトルに直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在すると判定された場合は、ステップS108へ戻る。

【0084】

一方、ステップS109において、比較部22により今回学習時のパワースペクトルの全ての周波数成分について直前回学習時のパワースペクトルよりも小さくなったと判定された場合は、その時点でゲイン算出部38において算出されたゲインを保持し、ステップS103へ戻る。ステップS103では、新たに保持されたゲインでフィルタ32を動作させ、ステップS103の処理（学習補正量の位相を進める処理）を再度実行する。

30

【0085】

ステップS101～S106の処理を経てステップS105において設定される次回学習時の動作指令の補正に利用される新たな学習補正量は、全ての当該周波数成分のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトル以下になるように今回学習時の学習補正量の位相を進める調整を行うことで得られる学習補正量である。このように位相調整された新たな学習補正量を次回学習時の動作指令の補正に利用すれば、制御対象部位101の共振周波数付近の位相遅れを補償することができるので、代表的なエンドエフェクタに対する周波数応答データに基づき予め設計された学習制御部11により、制御対象部位101の振動を除去することができる。

40

【0086】

また、ステップS101～S109の処理を経てステップS105において設定される次回学習時の動作指令の補正に利用される新たな学習補正量は、全ての当該周波数成分のパワースペクトルが直前回学習時のパワースペクトル以下になるように今回学習時の学習補正量の位相を進めるとともにゲインを小さくする調整が行われることで得られる学習補正量である。このように位相調整及びゲイン調整された新たな学習補正量を次回学習時の動作指令の補正に利用すれば、制御対象部位101の共振周波数付近の位相遅れ及びゲイン増大の影響を補償することができるので、代表的なエンドエフェクタに対する周波数応答データに基づき予め設計された学習制御部11により、制御対象部位101の振動を除

50

去することができる。

【 0 0 8 7 】

一方、ステップ S 1 0 2 において、比較部 2 2 により今回学習時のパワースペクトルに直前回学習時のパワースペクトルよりも大きい周波数成分が存在しないと判定された場合は、制御対象部位 1 0 1 の共振周波数が学習制御部 1 1 の制御帯域よりも大きいので、代表的なエンドエフェクタに対する周波数応答データに基づき予め設計された学習制御部 1 1 の今回学習時の学習補正量をそのまま次回学習時の動作指令の補正に利用しても、制御対象部位 1 0 1 の振動を除去することができるので、学習補正量は更新せずに、学習補正量更新処理を終了する。

【 0 0 8 8 】

10

このように、本開示の実施形態によれば、制御対象部位（エンドエフェクタ）の剛性が低くその共振周波数が学習制御部の制御帯域内に含まれてしまう場合であっても、代表的な制御対象部位に対する周波数応答データに基づき予め設計された学習制御部を用いて制御対象部位の振動を精度良く除去することができる。したがって、制御対象部位の剛性が低い場合でも現場で実際の制御対象部位で周波数応答データを取得して学習制御部を設計し直す必要はなく、代表的な制御対象部位に対する周波数応答データを流用できるので、制御対象部位の振動の除去を容易に実現することができ、低コストである。

【 0 0 8 9 】

上述したパワースペクトル算出部 2 1、比較部 2 2、学習補正量更新部 2 3 及びロボット制御部 1 2 は、例えばソフトウェアプログラム形式で構築されてもよく、あるいは各種電子回路とソフトウェアプログラムとの組み合わせで構築されてもよい。この場合、例えば A S I C や D S P などの演算処理装置にこのソフトウェアプログラムを動作させて各部の機能を実現することができる。あるいは、パワースペクトル算出部 2 1、比較部 2 2、学習補正量更新部 2 3 及びロボット制御部 1 2 の機能を実現するソフトウェアプログラムを書き込んだ半導体集積回路として実現してもよい。

20

【 符号の説明 】

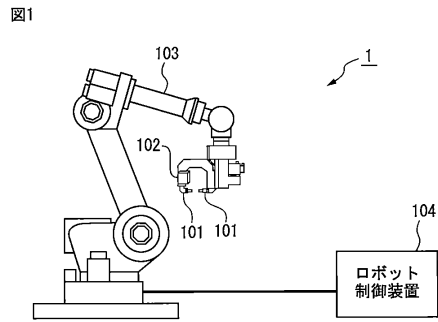
【 0 0 9 0 】

- 1 ロボットシステム
- 1 1 学習制御部
- 1 2 ロボット制御部
- 2 1 パワースペクトル算出部
- 2 2 比較部
- 2 3 学習補正量更新部
- 2 4 第 1 のメモリ
- 2 5 第 2 のメモリ
- 2 6 第 3 のメモリ
- 3 1 位相進み量算出部
- 3 2 フィルタ
- 3 3 フーリエ変換部
- 3 4 位相調整部
- 3 5 逆フーリエ変換部
- 3 6 タイミング早め量算出部
- 3 7 位相進み量判定部
- 3 8 ゲイン算出部
- 1 0 1 制御対象部位
- 1 0 2 センサ
- 1 0 3 ロボット機構部
- 1 0 4 ロボット制御装置
- 1 0 5 コンピュータ

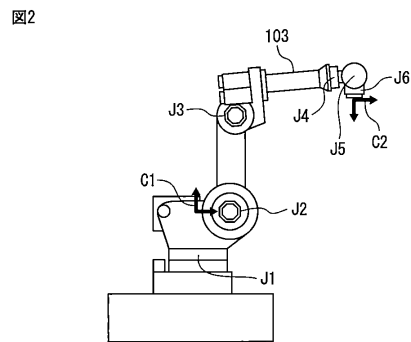
30

40

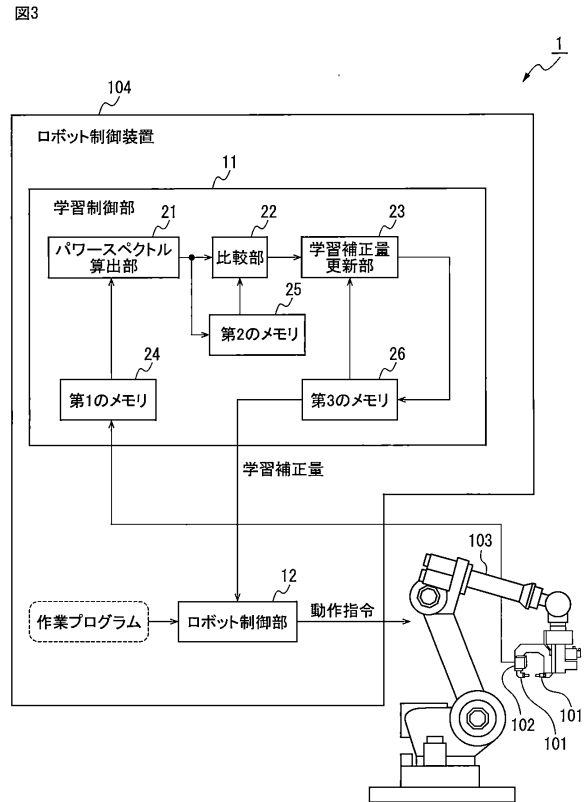
【図 1】



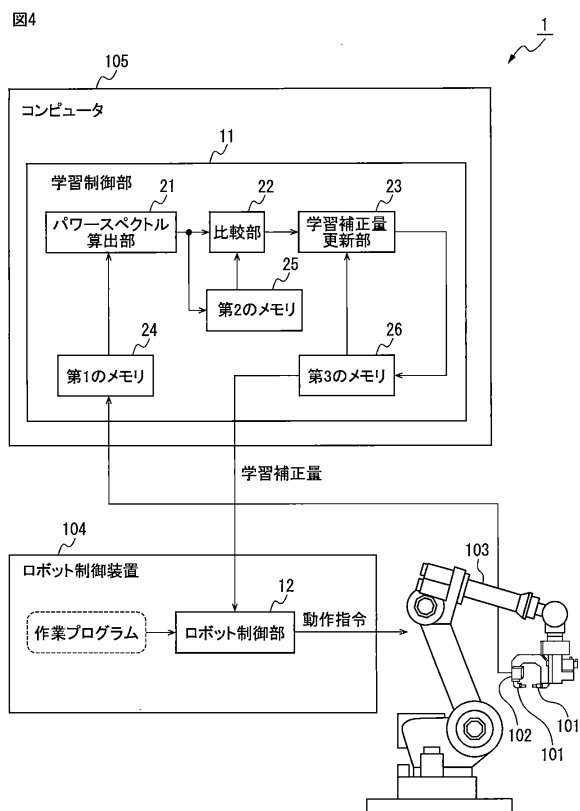
【図 2】



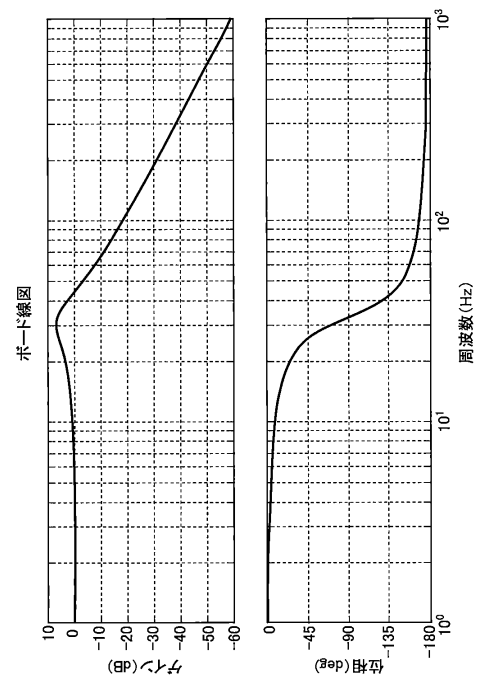
【図 3】



【図 4】



【図 5】



【図 6】

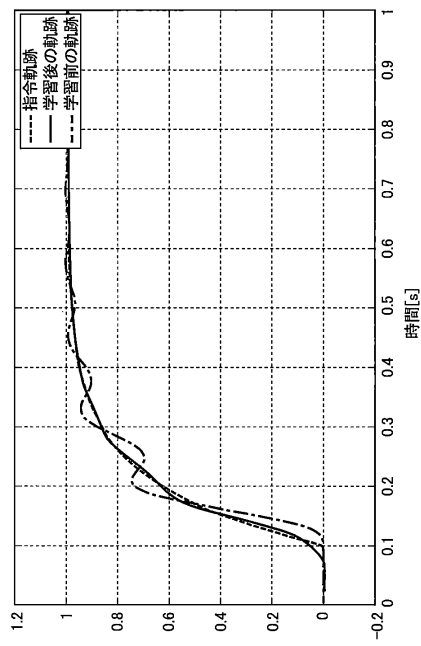


図6

【図 7】

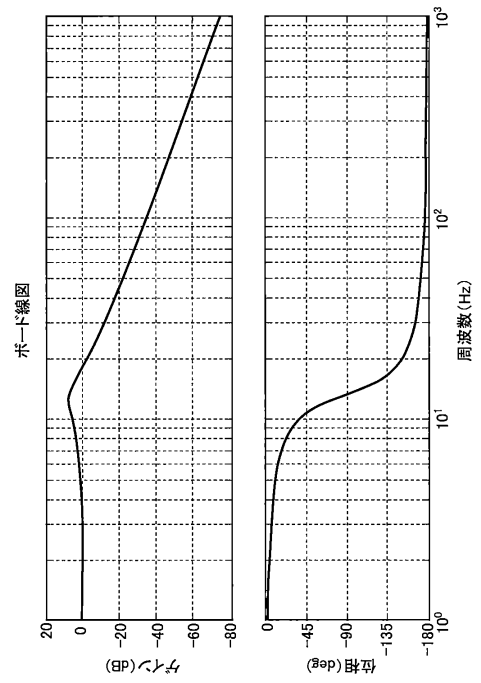


図7

【図 8】

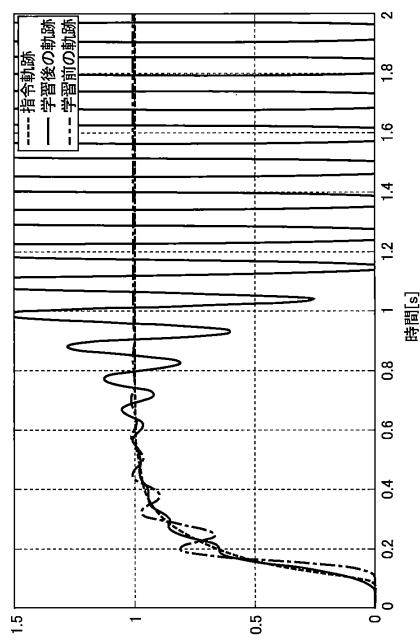


図8

【図 9】

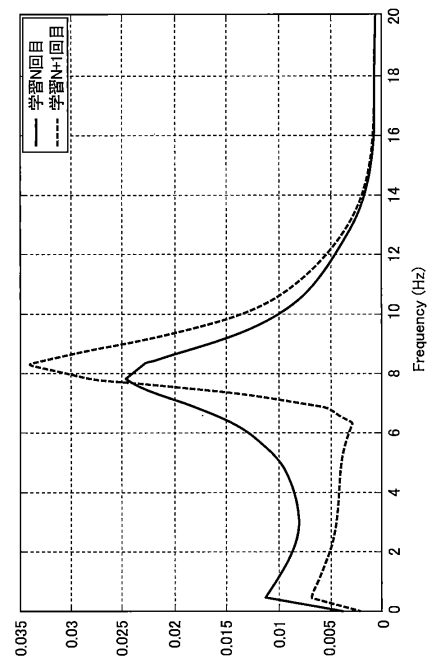


図9

【図 10】

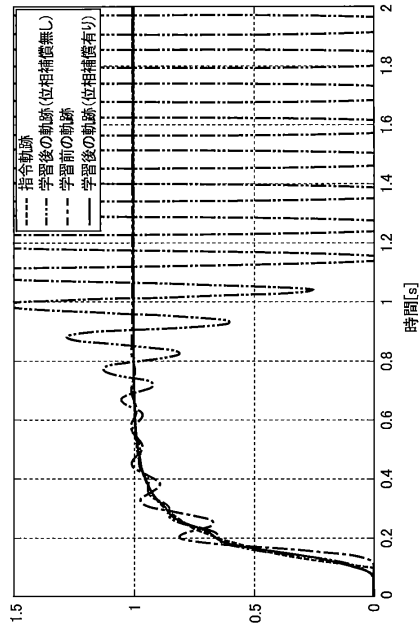
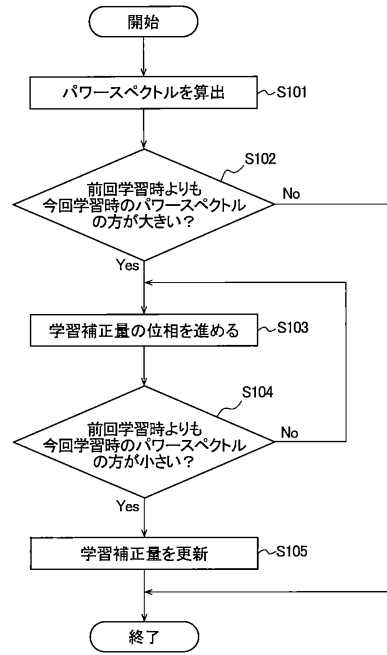


図10

【図 11】

図11



【図 12】

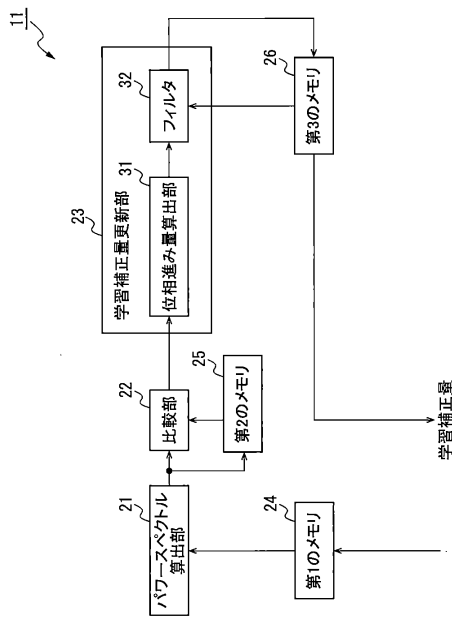
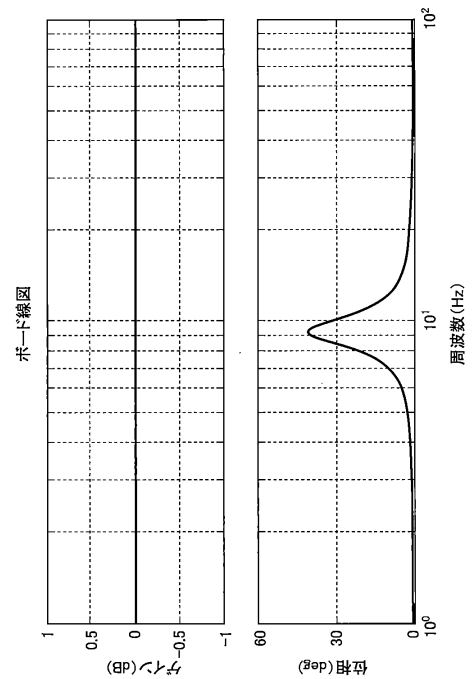


図12

【図 13】

図13



【図 14】

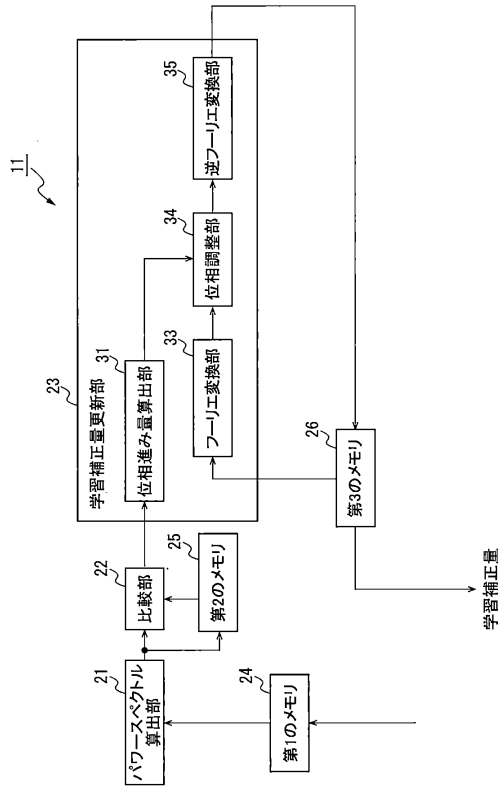


図14

【図 15】

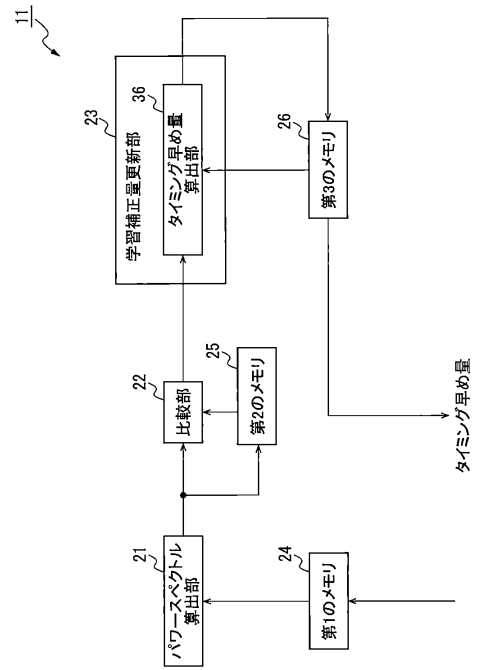


図15

【図 16】

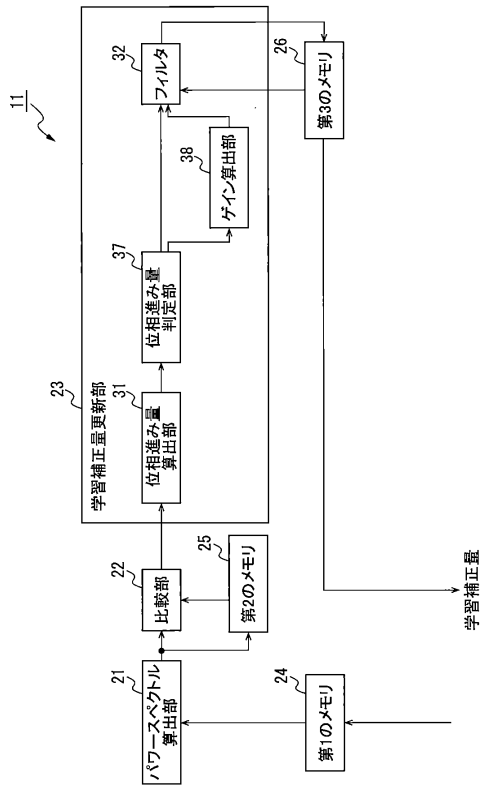


図16

【図 17】

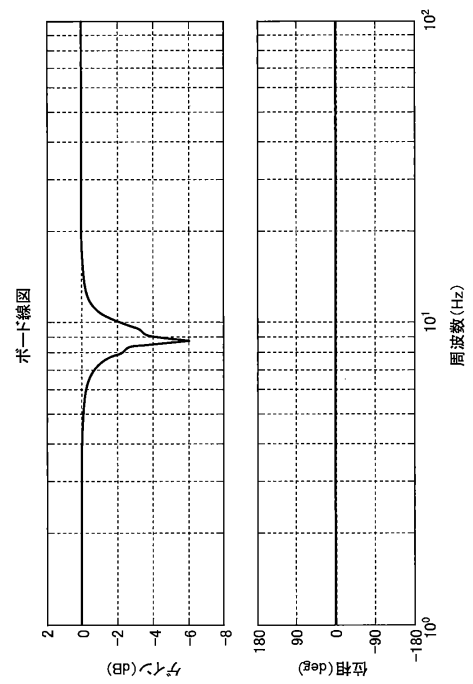
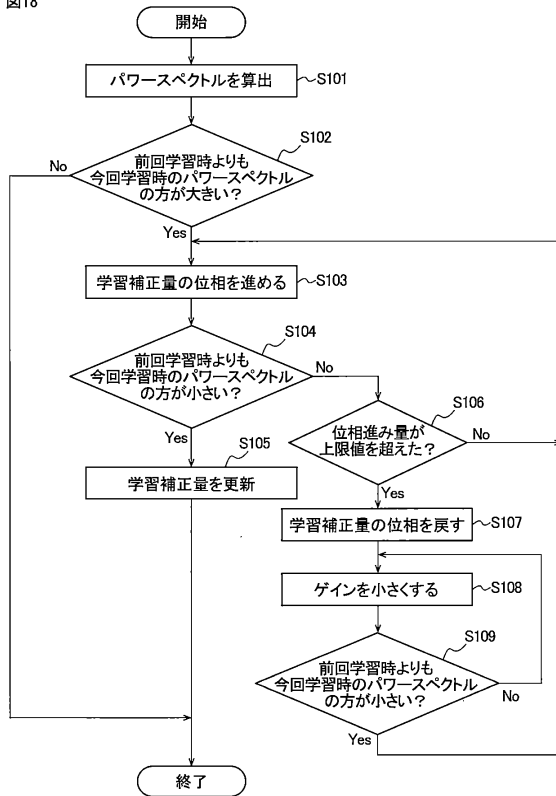


図17

【図 18】

図18



フロントページの続き

(72)発明者 鈴木 元

山梨県南都留郡忍野村忍草字古馬場3580番地 ファナック株式会社内

審査官 貞光 大樹

(56)参考文献 特開2011-167817(JP,A)

特開2011-224662(JP,A)

特開2017-127964(JP,A)

特開2013-121625(JP,A)

特開2014-30857(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B25J 1/00 - 21/02