

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4487073号  
(P4487073)

(45) 発行日 平成22年6月23日(2010.6.23)

(24) 登録日 平成22年4月9日(2010.4.9)

(51) Int.Cl. F 1  
G 0 5 B 13/02 (2006.01) G 0 5 B 13/02 C

請求項の数 2 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2006-57614 (P2006-57614)	(73) 特許権者	304021288 国立大学法人長岡技術科学大学 新潟県長岡市上富岡町1603-1
(22) 出願日	平成18年3月3日(2006.3.3)	(74) 代理人	100080089 弁理士 牛木 護
(65) 公開番号	特開2007-233917 (P2007-233917A)	(74) 代理人	100119312 弁理士 清水 栄松
(43) 公開日	平成19年9月13日(2007.9.13)	(72) 発明者	大石 潔 新潟県長岡市上富岡町1603-1 国立 大学法人長岡技術科学大学内
審査請求日	平成21年2月20日(2009.2.20)	(72) 発明者	桂 誠一郎 新潟県長岡市上富岡町1603-1 国立 大学法人長岡技術科学大学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 外力推定方法および外力推定装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

アクチュエータの位置を検出して、位置信号を出力するステップと、  
前記アクチュエータの加速度を検出して、加速度信号を出力するステップと、  
前記アクチュエータに入力する指令値と前記位置信号とに基づき、前記アクチュエータに加わる外力を推定する第1推定信号を生成するステップと、  
前記アクチュエータに入力する指令値と前記加速度信号との比較により、前記アクチュエータに加わる外力を推定する第2推定信号を生成するステップと、  
前記第1推定信号と前記第2推定信号とを加算して、最終的な外力推定値を出力するステップと、  
からなることを特徴とする外力推定方法。

【請求項2】

アクチュエータの位置を検出して、位置信号を出力する位置検出手段と、  
前記アクチュエータの加速度を検出して、加速度信号を出力する加速度検出手段と、  
前記アクチュエータに入力する指令値と前記位置検出手段からの位置信号とに基づき、前記アクチュエータに加わる外力を推定する第1推定信号を生成する位置情報型外乱オブザーバと、  
前記アクチュエータに入力する指令値と前記加速度検出手段からの加速度信号との比較により、前記アクチュエータに加わる外力を推定する第2推定信号を生成する加速度情報型外乱オブザーバと、

前記第1推定信号と前記第2推定信号とを加算して、最終的な外力推定値を出力する加算

手段と、を備えたことを特徴とする外力推定装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、アクチュエータに加わる外力を推定し得る外力推定方法および外力推定装置に関する。

【背景技術】

【0002】

一般に、この種の外力推定方法や外力推定装置を実現する外乱オブザーバは、力覚センシングやロバスト制御（外乱抑圧制御など）を必要とする多くの産業機器や民生機器に使用されており、制御対象であるアクチュエータのトルクと位置の各情報から、擬似微分器と加算器などを含む線形フィルタによって加速度外乱を推定するようになっている。

10

【0003】

外乱オブザーバの重要な情報は、アクチュエータに加わる外力すなわち外乱トルクを推定するための加速度情報である。これは例えば特許文献1にも開示されているように、モータの入力電流値  $i$  と位置  $\theta$  から、外乱トルク  $\tau$  の推定値  $\hat{\tau}$ （以下、数式以外では、この推定値をあらわす「 $\hat{\tau}$ 」を、対応する記号の前に併記する。）を算出する位置センサベースの外乱オブザーバ、またはモータの入力電流値  $i$  と加速度  $\ddot{\theta}$ （以下、数式以外では、1階の微分を「 $\dot{\theta}$ 」とし、2階の微分を「 $\ddot{\theta}$ 」として便宜上あらわし、対応する記号の後に併記する。）から、外乱トルク  $\tau$  の推定値  $\hat{\tau}$  を算出する加速度センサベースの外乱オブザーバから得ることができる。

20

【0004】

図15は、従来知られている位置センサベースの外乱オブザーバを概略的に示したものである。同図において、1は外乱トルクを推定する対象として設けられ、エネルギーを動力に変換する可動可能なアクチュエータであり、これは前述の電流値  $i$  をリニアモータなどの駆動源に入力することにより、実際の位置に動作するものである。アクチュエータ1には、前記実際の位置  $\theta$  を電気的な位置信号に変換して検出出力するために、例えばリニアエンコーダなどの位置センサ2が装着される。

【0005】

一方、アクチュエータ1を制御する外乱オブザーバ11は、前記アクチュエータ1への指令値である電流値  $i$  を入力すると共に、前記位置  $\theta$  を擬似微分器12で擬似微分した値（応答速度値  $\dot{\theta}$ ）を入力して、これらの各値から外乱トルクの推定値を出力するもので、実際には擬似微分器12と共に、コンピュータのソフトウェアなどで構成される。擬似微分器12は、前記位置信号を速度信号に変換するもので、位置  $\theta$  に対し擬似微分を施すことで、ノイズに対する感度を抑制した変換出力を得ることができる。外乱オブザーバ11は、前記アクチュエータ1と等価的な逆モデルが組み込まれ、前記電流  $i$  をトルク（力）単位の第1信号に変換し、この第1信号と前記擬似微分器12からの応答速度  $\dot{\theta}$  を微分して得た第2信号とを比較した第3信号を出力する逆モデル部14と、この逆モデル部14での微分の際にカットオフ周波数を設定することにより形成され、前記逆モデル部14から低周波帯域の成分の第3信号を取り出し、これを外乱トルクの推定値  $\hat{\tau}$  として出力するローパスフィルタ15と、により構成される。

30

40

【0006】

そして、上記図15の構成では、アクチュエータ1に外力である外乱トルク  $\tau$  が与えられると、逆モデル部14において、アクチュエータ1に電流  $i$  が与えられた時の公称トルク値である第1信号と、外乱トルク  $\tau$  により変位を生じた位置  $\theta$  に基づく第2信号との間に偏差を生じ、この偏差に見合う第3信号が出力される。これにより、ローパスフィルタ15からは、カットオフ周波数で規定された特定の低周波帯域の推定値  $\hat{\tau}$  が出力される。この外乱トルクの推定値  $\hat{\tau}$  を、図示しないトルク電流変換器により電流値に変換すれば、外乱オブザーバ11を利用して前記アクチュエータ1をフィードバック制御することができる。

50

【特許文献1】特開2002-366203号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

上述した位置センサベースの外乱オブザーバ11では、位置エンコーダによって感知される位置応答を、擬似微分器12と外乱オブザーバ11とにより2階微分することで、加速度応答を得るようにしている。しかし、その処理の過程で微分ノイズの増大を抑制するために、外乱オブザーバ11の帯域が制限されてしまうので、ゼロ周波数（直流成分）付近の低い周波数の加速度検出には適しているが、例えば人が認識できる刺激の周波数（～数百Hz）にまで、外乱オブザーバ11の帯域を上げることはできない。したがって、人が感じ得る力覚・触覚モーションの制御や、広帯域のロバスト加速度制御には、帯域が狭過ぎて適さないという問題があった。

10

【0008】

また、別な加速度センサベースの外乱オブザーバは、近年1g以下の加速度センサが実用化され、こうした加速度センサをアクチュエータに装着させて、リニアモーションを行なうことが容易になってきているが、加速度センサの帯域幅は1Hz～1kHz以上とある程度の広さを有するものの、ゼロ周波数付近に対応する加速度センサは実在しない。そのためこれも、直流成分をカバーするような広帯域の加速度（力）制御を実現できない問題が存在していた。

【0009】

20

本発明は上記の問題点に鑑みなされたもので、その目的は、微分ノイズによる影響を最小限に抑えつつ、直流成分を含む幅広い周波数領域の外力推定値を取得できる外力推定方法および外力推定装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0010】

本発明の外力推定方法は、アクチュエータの位置を検出して、位置信号を出力するステップと、前記アクチュエータの加速度を検出して、加速度信号を出力するステップと、前記アクチュエータに入力する指令値と前記位置信号とに基づき、前記アクチュエータに加わる外力を推定する第1推定信号を生成するステップと、前記アクチュエータに入力する指令値と前記加速度信号との比較により、前記アクチュエータに加わる外力を推定する第2推定信号を生成するステップと、前記第1推定信号と前記第2推定信号とを加算して、最終的な外力推定値を出力するステップと、からなる。

30

【0011】

また、本発明の外力推定装置は、アクチュエータの位置を検出して、位置信号を出力する位置検出手段と、前記アクチュエータの加速度を検出して、加速度信号を出力する加速度検出手段と、前記アクチュエータに入力する指令値と前記位置検出手段からの位置信号とに基づき、前記アクチュエータに加わる外力を推定する第1推定信号を生成する位置情報型外乱オブザーバと、前記アクチュエータに入力する指令値と前記加速度検出手段からの加速度信号との比較により、前記アクチュエータに加わる外力を推定する第2推定信号を生成する加速度情報型外乱オブザーバと、前記第1推定信号と前記第2推定信号とを加算して、最終的な外力推定値を出力する加算手段と、を備えて構成される。

40

【発明の効果】

【0012】

上記方法および上記装置により、アクチュエータに外乱トルクなどの外力が与えられると、基準値である力単位の信号と位置信号に基づき算出された信号との間に偏差を生じたり、基準値である力単位の信号と加速度信号との間に偏差を生じたりして、アクチュエータに加わる外力を推定するような位置情報型の第1推定信号や、加速度情報型の第2推定信号が各々取り出される。したがって、これらの信号成分を加算すれば、低周波帯域から高周波帯域に至る幅広い外力の推定値を最終的に得ることができる。

【0013】

50

つまり、高い周波数成分の外力を加速度情報型外乱オブザーバによって推定し、ゼロを含む低い周波数成分の外力を位置情報型外乱オブザーバによって推定することで、位置情報型外乱オブザーバおよび加速度情報型外乱オブザーバ単独での帯域の狭さを補って、微分ノイズによる影響を最小限に抑えつつ、直流成分を含む従来よりも幅広い周波数領域の外力推定値を取得できる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0014】

以下、添付図面に基づいて、本発明における好適な実施例を詳細に説明する。なお、上記図15で説明したものと同一部分には同一符号を付し、共通する箇所の説明は重複を極力避けるため省略する。

【0015】

図1は、本発明の好ましい実施例を示す外力推定装置の概要をあらわした制御ブロック図である。同図において、ここでは直流成分を含む低い周波数成分に関する外乱トルクの推定を、図15に示すものと同様に、位置センサ2と、電流値*i*および位置センサ2からの位置信号を受ける位置情報型の第1外乱オブザーバ11とにより負担させる一方で、高い周波数成分に関する外乱トルクの推定を、新たに追加した加速度センサ3と、電流値*i*および加速度センサ3からの加速度信号を受ける加速度情報型の第2外乱オブザーバ11とにより負担させる構成が注目される。すなわち、図1では、位置センサ2と加速度センサ3を共に利用して、双方の欠点を補うことで、従来よりも広帯域な外力推定装置を構成するようにしている。なお、ここではリニアモーションのアクチュエータ1に適用するために、位置センサ2としてリニアエンコーダを採用しているが、例えば回転動作するものではロータリーエンコーダを採用してもよく、アクチュエータ1の構成に応じて適切な位置センサ2や加速度センサ3を選択すればよい。また、位置センサ2若しくは加速度センサ3を、アクチュエータ1に複数配設してもよい。こうした位置センサ2や加速度センサ3を併用した装置構成を、以後、マルチセンサ併用型外力推定装置（外乱オブザーバ）と称する。

【0016】

前記第1外乱オブザーバ11は、アクチュエータ1に入力する電流指令値*i*と位置センサ2からの位置信号とに基づき、アクチュエータ1に加わる外力を推定する第1推定信号を生成するもので、この第1推定信号は加算器31に出力される。また、第2外乱オブザーバ21は、アクチュエータ1に入力する電流指令値*i*と加速度センサ3からの加速度信号との比較により、アクチュエータ1に加わる外力を推定する第2推定信号を生成するもので、この第2推定信号も加算器31に出力される。加算器31は、これらの第1推定信号と第2推定信号とを加算して、最終的な外力推定値を出力する。

【0017】

図2は、図1の構成をより具体化したものである。同図において、前記アクチュエータ1には位置センサ2の他に加速度センサ3が装着される。この加速度センサ3は、アクチュエータ1の加速度を電気的な電気信号に変換して、後述する第2外乱オブザーバ21に検出出力するものである。また、位置センサ2は、アクチュエータ1の実位置を電気的な位置信号に変換して擬似微分器12に検出出力するものであり、第1外乱オブザーバ11は前述したように、アクチュエータ1への電流値*i*をトルク（力）単位の第1信号に変換し、この第1信号と前記擬似微分器12からの応答速度 $\dot{x}$ を微分して得た第2信号とを比較した第3信号（第1推定信号）を逆モデル部14から出力すると共に、ローパスフィルタ15によって直流成分を含む低周波帯域の第3信号だけを取り出ように構成される。また、図2に示す擬似微分器12は、図1に示す位置情報型の第1外乱オブザーバ11に含めたものと見ることができる。

【0018】

第2外乱オブザーバ21は、第1外乱オブザーバ11や擬似微分器12と同様に、コンピュータのソフトウェアなどで構成される。当該第2外乱オブザーバ21は、アクチュエータ1と等価的な逆モデルが組み込まれ、前記アクチュエータ1への電流*i*をトルク（力）単位の

10

20

30

40

50

第4信号に変換し、この第4信号と前記加速度センサ3からの加速度  $\ddot{x}$  に対応する信号(加速度信号)とを比較した第5信号を出力する逆モデル部24と、この逆モデル部24から、高周波帯域の成分の第5信号だけを取り出して出力するハイパスフィルタ25と、を備えている。そして、前記ローパスフィルタ15から出力される低周波帯域の成分の第3信号と、ハイパスフィルタ25から出力される高周波帯域の成分の第5信号(第2推定信号)とを、加算器31で加算することで、幅広い周波数領域の信号成分を含む外乱トルクの推定値  $\hat{t}$  を出力するようになっている。

#### 【0019】

なお、第1外乱オブザーバ11から出力される第3信号の周波数帯域は、ローパスフィルタ15の極(カットオフ周波数)によって決定され、第2外乱オブザーバ21から出力される第5信号の周波数帯域は、ハイパスフィルタ25の極(カットオフ周波数)によって決定される。したがって、外乱トルクの推定値  $\hat{t}$  が、直流成分から少なくとも1kHz以上の全周波数帯域にわたって出力できるように、ローパスフィルタ15およびハイパスフィルタ25の極を調整するのが好ましい。

#### 【0020】

次に、上記構成についてその作用を説明すると、アクチュエータ1に外力である外乱トルク  $t$  が与えられると、アクチュエータ1に取付けられた位置センサ2と加速度センサ3は、アクチュエータ1の位置  $x$  と加速度  $\ddot{x}$  の変位を各々検出して、これを位置信号と加速度信号としてそれぞれ出力する。第1外乱オブザーバ11を構成する逆モデル部14では、アクチュエータ1に電流  $i$  が与えられた時の公称トルク値である第1信号と、外乱トルク  $t$  により変位を生じた位置  $x$  に基づく第2信号(応答速度  $\dot{x}$ )との間に偏差を生じ、この偏差に見合う第3信号が出力される。これにより、ローパスフィルタ15からは、カットオフ周波数で規定された直流成分を含む低周波帯域の第3信号が出力される。

#### 【0021】

一方、本実施例では、加速度センサにより検出された加速度信号が、別な第2外乱オブザーバ21に出力されるようになっている。そのため、外乱トルク  $t$  の影響を受けてアクチュエータ1の加速度  $\ddot{x}$  が変化すると、第2外乱オブザーバ21の逆モデル部24において、アクチュエータ1に電流  $i$  が与えられた時の公称トルク値である第4信号と、前記加速度信号との間に偏差を生じ、この偏差に見合う第5信号がハイパスフィルタ25に出力される。これにより、ハイパスフィルタ25からは、前記第3信号よりも高周波帯域の第5信号が出力される。

#### 【0022】

これらの第3信号や第5信号は、各々低周波帯域と高周波帯域における外乱トルクの推定値に相当するものなので、加算器31によりこれらの各信号成分を加算すれば、直流成分から高周波帯域に至る幅広い外乱トルクの推定値  $\hat{t}$  を得ることができる。

#### 【0023】

図3は、従来例と本実施例における周波数特性の比較を示したものである。同図において、上段のボード線図は周波数(角周波数)と振幅との関係を示し、また下段のボード線図は周波数と位相との関係を示している。また各ボード線図において、点線は加速度センサベースの外乱オブザーバによる推定値  $\hat{t}^a$  を示し、また一点鎖線は位置センサベースの外乱オブザーバによる推定値  $\hat{t}^p$  を示し、さらに実線は、本実施例における位置センサ2と加速度センサ3を併用した外乱オブザーバ11, 21による推定値  $\hat{t}^{p+a}$  を示している。

#### 【0024】

図3からも明らかのように、本実施例では推定値  $\hat{t}^{p+a}$  の振幅および位相の各特性が、従来の加速度センサベースや位置センサベースの外乱オブザーバに比べて、低い周波数から比較的高い周波数に至るまでフラットであることがわかる。

#### 【0025】

以上のように本実施例では、アクチュエータ1の位置  $x$  を検出して、その位置信号を出力する位置検出手段としての位置センサ2と、アクチュエータ1の加速度  $\ddot{x}$  を検出し

10

20

30

40

50

て、その加速度信号を出力する加速度検出手段としての加速度センサ3と、アクチュエータ1にする電流指令値*i*と位置センサ2からの位置信号とに基づき、アクチュエータ1に加わる外力を推定する第1推定信号を生成する第1外乱オブザーバ11と、アクチュエータ1にする電流指令値*i*と加速度センサ3からの加速度信号との比較により、アクチュエータ1に加わる外力を推定する第2推定信号を生成する第2外乱オブザーバ21と、第1推定信号と第2推定信号とを加算して、最終的な外力推定値を出力する加算手段としての加算器31とを備えている。

【0026】

より具体的には、図1に示す第1外乱オブザーバ11は、アクチュエータ1にする指令値である電流*i*を力(トルク)単位の第1信号に変換し、この第1信号と位置センサ2からの位置信号を2階微分した加速度(力)単位の第2信号との比較により、アクチュエータ1に加わる外力を推定する第3信号を生成する第1外力推定手段としての擬似微分器12および逆モデル部14と、逆モデル部14から直流成分を含む低周波帯域の第3信号だけを取り出して出力する第1フィルタ手段としてのローパスフィルタ15とにより構成され、また図1に示す第2外乱オブザーバ21は、アクチュエータ1にする電流*i*を力単位の第4信号に変換し、この第4信号と加速度センサ3からの加速度信号との比較により、アクチュエータ1に加わる外力を推定する第5信号を生成する第2外力推定手段としての逆モデル部24と、この逆モデル部24から前記第3信号よりも高周波帯域の第5信号だけを取り出して出力する第2フィルタ手段としてのハイパスフィルタ25とにより構成される。そして加算器31は、前記低周波帯域の第3信号と前記高周波帯域の第5信号とを加算して、最終的な外力推定値である外乱トルクの推定値 $\hat{\tau}$ を出力する加算手段としての機能を備えている。

【0027】

このような構成の外力推定装置は、アクチュエータ1に外力である外乱トルク $\tau$ が与えられると、基準値である第1信号(力単位の信号)と位置信号に基づき算出された第2信号との間に偏差を生じたり、基準値である第4信号(力単位の信号)と加速度信号との間に偏差を生じたりして、アクチュエータ1に加わる外力を推定するような直流成分を含む低周波帯域の第3信号や、この第3信号よりも帯域の高い第5信号が各々取り出される。したがって、これらの信号成分を加算すれば、低周波帯域から高周波帯域に至る幅広い外乱トルクの推定値 $\hat{\tau}$ を最終的に得ることができる。

【0028】

つまり、高い周波数成分の外力を加速度情報型の外乱オブザーバ21によって推定し、ゼロを含む低い周波数成分の外力を位置情報型の外乱オブザーバ11によって推定することで、位置情報型外乱オブザーバおよび加速度情報型外乱オブザーバ単独での帯域の狭さを補って、微分ノイズによる影響を最小限に抑えつつ、直流成分を含む従来よりも幅広い周波数領域の外力推定値を取得できる。

【0029】

そしてこれは、アクチュエータ1の位置 $x$ を検出して、その位置信号を出力すると共に、アクチュエータ1の加速度 $\ddot{x}$ を検出して、その加速度信号を出力し、一方では、アクチュエータ1にする電流指令値*i*と前記位置信号とに基づき、アクチュエータ1に加わる外力を推定する第1推定信号を生成し、他方では、アクチュエータ1にする電流指令値*i*と前記加速度信号とに基づき、アクチュエータ1に加わる外力を推定する第2推定信号を生成し、こうして得られた第1推定信号と第2推定信号とを加算して、最終的な外力推定値を出力する方法を採用しても、同様に実現可能である。

【0030】

また、より具体的には、アクチュエータ1の位置 $x$ を検出して、その位置信号を出力すると共に、アクチュエータ1の加速度 $\ddot{x}$ を検出して、その加速度信号を出力し、一方では、アクチュエータ1にする電流*i*を力単位の第1信号に変換し、この第1信号と前記位置信号を2階微分した加速度単位の第2信号との比較により、アクチュエータ1に加わる外力を推定する第3信号を生成して、そこから直流成分を含む低周波帯域の第3信

10

20

30

40

50

号だけを取り出し、他方では、アクチュエータ1に入力する電流*i*を力単位の第4信号に変換し、この第4信号と前記加速度信号との比較により、アクチュエータ1に加わる外力を推定する別な第5信号を生成して、そこから前記第3信号よりも高周波帯域の第5信号だけを取り出し、こうして得られた低周波帯域の第3信号と高周波帯域の第5信号とを加算して、最終的な外力推定値である外乱トルクの推定値 $\hat{\tau}_{dis}$ を出力する方法を採用しても、同様に実現可能である。

【0031】

次に、図1におけるマルチセンサ併用型外力推定装置に基づいた具体的な変形例を説明する。図4は、図1ひいては図2に示す外力推進装置を利用して、加算器31から出力される外乱トルクの推定値 $\hat{\tau}_{dis}$ を、トルク-電流変換手段33により電流目標値 $I_{ref}$ の単10  
位に推定電流値 $I_{cmp}$ として逆変換し、この推定電流値 $I_{cmp}$ と電流目標値 $I_{ref}$ とを別な加算器34で加算することで、アクチュエータ1に入力する前記電流値(電流指令値)*i*を算出するようにしている。これにより、図3の装置では、外部からアクチュエータ1に加わる外乱トルクを除去することができる。なお、アクチュエータ1は位置信号を出力するものなので、便宜上2段の積分器(1/s)を通して、アクチュエータ1の出力(加速度 $\ddot{\theta}_m$ )を2回積分して実際の位置 $\theta_m$ を出力)としている。

【0032】

ここで、図4における各記号を説明すると、 $J_m$ はモータ慣性であり、 $K_t$ はトルク係数であり、 $F_c$ はクーロン摩擦であり、 $D_m$ は粘性摩擦であり、 $\tau_{ext}$ は外部入力20  
であり、記号の後にある添え字<sub>n</sub>は公称値を意味する。また、外乱トルク $\tau_{dis}$ は、次の

【0033】

【数1】

$$\tau_{dis} = (J_m - J_{mn})\ddot{\theta}_m + (K_{tn} - K_t)I^{ref} + F_c + D_m\dot{\theta}_m + \tau_{ext}$$

【0034】

上記数1において、右辺の第一項はモータの慣性変動による外乱であり、第二項はトルク係数の変動によるトルク脈動を意味する。また、従来の位置センサベースの外乱オブザーバでは、ローパスフィルタ15により取り出された外乱トルクの推定値 $\hat{\tau}_{dis}$ が、次の20  
数2のようにあらわされる。

【0035】

【数2】

$$\hat{\tau}_{dis} = \frac{\frac{J_{mn}}{J_m} g_{dis}}{s + \frac{K_t}{K_{tn}} \frac{J_{mn}}{J_m} g_{dis}} \tau_{dis}$$

【0036】

ここで、 $g_{dis}$ はローパスフィルタ15のカットオフ周波数を意味する。一方、図4における外力推定装置では、直流成分を検出できない加速度センサベースの外乱オブザーバ11における低域部分の周波数特性を、一次のハイパスフィルタ25によって成形し、そこに従来の位置センサベースの外乱オブザーバ11で低域部分を補間している。この場合の周波数特性を図5に示す。この図5も、上段のボード線図は周波数(角周波数)と振幅との関係を示し、下段のボード線図は周波数と位相との関係を示しており。点線は加速度センサベースの外乱オブザーバによる推定値 $\hat{\tau}^a$ を示し、また一点鎖線は位置センサベースの外乱オブザーバによる推定値 $\hat{\tau}^p$ を示し、さらに実線は、本実施例における位置センサ2と加速度センサ3を併用した外乱オブザーバ11, 21による推定値 $\hat{\tau}^{p+a}$ を示している。また、このときの外乱トルクの推定値 $\hat{\tau}_{dis}$ は、次の数3のようにあらわされる。40  
50

【 0 0 3 7 】

【 数 3 】

$$\hat{\tau}_{dis} = \frac{g_{dis}}{s + g_{dis}} \left( K_{tn} I^{ref} - \frac{s^2 g_{pd}}{s + g_{pd}} J_{mn} \theta_m \right) + \frac{s}{s + g_{dis}} (K_{tn} I^{ref} - J_{mn} \ddot{\theta}_m)$$

【 0 0 3 8 】

加速度センサ3の帯域幅が電流制御の帯域幅より広い時、外乱トルクは次の数4のように電流制御の帯域幅で完全に推定される。 10

【 0 0 3 9 】

【 数 4 】

$$\hat{\tau}_{dis} \approx \tau_{dis}$$

【 0 0 4 0 】

このように、ここで提案するマルチセンサ併用型外力推定装置の帯域幅は、従来知られているものよりも広帯域であり、加速度センサ3のもつ帯域に応じて任意に拡張可能である。

【 0 0 4 1 】

図6および図7は、図4におけるマルチセンサ併用型外力推定装置の実用性を確かめるために、当該装置を位置制御と力制御にそれぞれ適用した例を示している。 20

【 0 0 4 2 】

まず、図6に示すように、無限大の制御剛性である位置制御に実装した場合の有効性を、後述するシミュレーションにより確認する。ここでは、図4の構成に加えて、位置目標値  $\theta_m^{cmd}$  と位置  $\theta_m$  との差が減算器41で算出され、この減算器41の算出結果を、位置 - 加速度変換器42で加速度指令値  $\ddot{\theta}_m^{ref}$  に変換し、さらにこの加速度応答  $\ddot{\theta}_m^{ref}$  を、加速度 - 電流変換器43で前記電流目標値  $I_{ref}$  に変換して、加算器34に出力するように構成される。この位置信号のフィードバックループを付加することにより、アクチュエータ1の位置制御が可能になる。 30

【 0 0 4 3 】

また、当該位置制御における各変数は、次の表1のように設定した。

【 0 0 4 4 】

【 表 1 】

$C_p$	位置サーボ	$= K_p + K_v s$
$K_p$	位置制御ゲイン	2500rad/sec
$K_v$	速度制御ゲイン	100.0rad/sec
$g_{pd}$	擬似微分のカットオフ周波数	100Hz
$g_{dis}$	外乱オブザーバのカットオフ周波数	50Hz
$g_a$	加速度センサのカットオフ周波数	1 kHz

【 0 0 4 5 】

前記加速度指令値は、以下の数5のように生成される。

【 0 0 4 6 】

【 数 5 】

$$\ddot{\theta}_m^{ref} = (\theta_m^{cmd} - \theta_m)(K_p + K_v s)$$

【 0 0 4 7 】

50



ここで、 $K_p$  は位置制御ゲインをあらわし、また  $K_v$  は速度制御ゲインをあらわしている。

【0048】

シミュレーションは次の4つのケース、すなわち、ケース1：外乱オブザーバを設けていない場合の位置制御、ケース2：位置センサベースの外乱オブザーバを用いた従来の位置制御、ケース3：加速度センサのみによる外乱オブザーバを用いた位置制御、ケース4：図6に示すマルチセンサ併用型外乱オブザーバを用いた位置制御、の各条件で行なわれた。また、全てのケースにおいて、ステップ状の外乱を0.5秒後に加えている。

【0049】

図8は、当該シミュレーションの結果を時間と位置との関係で示したものである。なお、各グラフのCは要求する位置をあらわし、またRが制御応答による位置をあらわしている。同図において、図8の(1)はケース1のシミュレーション結果であり、ここでの位置サーボはPD(比例微分)制御系で構成され、外乱による位置の定常偏差が観測できる。また、図8の(2)は、ケース2の場合で外乱補償を行なったシミュレーション結果である。ここでは、外乱による位置偏差が補償されている、図8の(3)は、ケース3により位置制御を補償したシミュレーション結果であり、加速度センサ3が直流成分を取得できないので、時間の経過と共に位置偏差が次第に増加している。これに対して、ケース4のシミュレーション結果である図8の(4)では、衝突外乱による位置偏差や定常位置偏差が、広帯域な外乱オブザーバ11, 21によって改善されており、要求を満たす応答特性が得られている。

【0050】

次に、ゼロ剛性制御である力制御に適用した場合の実装した場合の有効性を、同様に確認する。図7は力制御を実現するブロック線図を示したものである。ここここでは図4の構成に加えて、位置センサベースの外乱オブザーバ51と、加速度センサベースの外乱オブザーバ61がさらに設けられる。外乱オブザーバ51は、アクチュエータ1への電流値  $i$  をトルク(力)単位の第6信号に変換し、この第6信号と、クーロン摩擦  $F_c$  および粘性摩擦  $D_m \dot{m}$  を加算した摩擦力の値と、前記擬似微分器12からの応答速度  $\dot{\hat{m}}$  を微分して得た別な第7信号とを比較した第8信号を逆モデル部54から出力すると共に、ローパスフィルタ55によって直流成分を含む低周波帯域の第8信号だけを取り出よう構成される。また、もう一つの外乱オブザーバ61は、アクチュエータ1への電流  $i$  をトルク(力)単位の第9信号に変換し、この第9信号と、クーロン摩擦  $F_c$  および粘性摩擦  $D_m \dot{m}$  を加算した摩擦力の値と、前記加速度センサ3からの加速度  $\ddot{m}$  に対応する信号(加速度信号)とを比較した第10信号を出力する逆モデル部64と、この逆モデル部64から、高周波帯域の成分の第10信号だけを取り出して出力するハイパスフィルタ25と、を備えている。そして、前記ローパスフィルタ55から出力される低周波帯域の成分の第8信号と、ハイパスフィルタ65から出力される高周波帯域の成分の第9信号とを、加算器68で加算することで、幅広い周波数領域の信号成分を含む外力の推定値  $\hat{F}_{ext}$  を出力するように構成される。

【0051】

さらに、この図7の構成では、力目標値  $F^{cmd}$  と外力の推定値  $\hat{F}_{ext}$  との差が減算器71で算出され、この減算器71の算出結果が、力-加速度変換器72で加速度指令値  $\ddot{m}^{ref}$  に変換され、さらにこの加速度応答  $\ddot{m}^{ref}$  が、加速度-電流変換器43で前記電流目標値  $I_{ref}$  に変換され、加算器34に出力するように構成される。この力信号のフィードバックループを付加することにより、広帯域なアクチュエータ1の力制御が可能になる。

【0052】

当該力制御における各変数は、次の表2のように設定した。

【0053】

10

20

30

40

【表 2】

$C_f$	力サーボ	2.0
$Z_e$	環境インピーダンス	$= K_e + D_e s$
$K_e$	環境剛性	50000 N/m
$D_e$	環境制動	10 N/(m/sec)
$g_{pd}$	擬似微分のカットオフ周波数	100Hz
$g_{dis}$	外乱オブザーバのカットオフ周波数	50Hz
$g_a$	加速度センサのカットオフ周波数	1 kHz

10

【 0 0 5 4 】

また、力制御における加速度指令値は、以下の数 6 のように生成される。

【 0 0 5 5 】

【数 6】

$$\ddot{\theta}_m^{ref} = (\tau^{cmd} - \hat{\tau}_{ext}) C_f$$

【 0 0 5 6 】

なお、 $C_f$  は力制御ゲインをあらわしている。

【 0 0 5 7 】

シミュレーションは次の 3 つのケース、すなわち、ケース 1：位置センサベースの外乱オブザーバを用いた力制御、ケース 2：加速度センサのみによる外乱オブザーバを用いた力制御、ケース 3：図 7 に示すマルチセンサ併用型外乱オブザーバを用いた力制御、の各条件で行なわれた。また、ロボットの初期位置は環境が外見上止まった所とする。

20

【 0 0 5 8 】

図 9 は、各ケースにおけるシミュレーションの結果を、時間と力および時間と位置の関係でそれぞれ示したものである。なお、時間 - 力特性を示す左側の各グラフの C は要求する力をあらわし、また R が制御応答による力をあらわしている。同図において、図 9 の (1) はケース 1 のシミュレーション結果であり、従来の外乱オブザーバでは、堅い環境の剛性に対する帯域幅が低いため、時間が経過するに従ってノイズが増加し、接触動作が不安定になっていることがわかる。また、図 9 の (2) は、ケース 2 の場合における力応答のシミュレーション結果を示している。加速度センサのみの制御であるため、直流成分を取得できず、力制御ができていない。これに対して、ケース 3 のシミュレーション結果である図 9 の (3) では、力および位置の双方において安定した応答特性が得られており、従来は不可能であった堅い環境への接触も可能になった。また、広帯域であるため、ハプティクス（触覚学）にとって非常に必要とされる利点となる。

30

【 0 0 5 9 】

図 10 は、図 7 に示す装置構成を実現する実験装置の一例である。同図において、ここでの実験装置は、前記アクチュエータ 1 としてロッドタイプのリニアアクチュエータを使用している。これは、基台 80 に対して可動可能な可動部 81 を備えたりニアモータ 82 として配設される。また、83 は前記位置センサ 2 に相当するリニアエンコーダであり、加速度センサ 3 はリニアモータ 82 の可動部 81 に実装される。さらに、E は棒状の可動部 81 の先端が当接可能な環境である。

40

【 0 0 6 0 】

図 10 の実験装置における各変数は、次の表 3 のように設定した。

【 0 0 6 1 】

【表 3】

可動部の質量	0.18Kg
力定数	3.3 N/A
位置エンコーダの分解能	0.1 $\mu$ /m
加速度センサのバンド幅	1~10kHz
加速度センサの寸法	3.6mm (高さ) × 11.4mm (長さ) × 6.4 mm (幅)
加速度センサの重量	0.5 g

## 【0062】

実験は、従来の位置センサベースの外乱オブザーバと、本実施例で提案したマルチセンサベースの外乱オブザーバとの間で、外乱推定性能を比較することで行なわれた。オブザーバの性能を比較するには、同じ実験環境で外乱を推定する必要があるが、一つのプラントで二つのオブザーバから同時にフィードバックすることはできない。そこで、両者をフィードバックせずに外乱推定のみ行った。これにより、同一条件下でのオブザーバの比較を行なうことができる。推定する外乱は、位置制御で制御対象が静止しているところに堅い金属を衝突させることで入力した。図11は、その実験結果を示す時間 - 外乱応答値のグラフで、図中PDOは従来の位置センサベースによる外乱応答の測定結果であり、MSDOは本実施例で提案したマルチセンサベースによる外乱応答の測定結果である。図11の特に(a)部分に着目すると、提案法の外乱応答MSDOは、従来法の外乱応答PDOよりも素早く、高いピークを示している。また、図11の(b)部分において、従来法の外乱応答PDOは微分ノイズが増幅されているが、提案法の外乱応答MSDOは、提案法MSDOは高周波成分が少ないことが分かる。これらの結果から、本実施例における提案法は従来の方法よりも優れていることが分かる。

## 【0063】

次に、力制御での実験結果を図12および図13に示す。ここでは、同一の帯域幅で、従来の外乱オブザーバと本実施例で提案した方法との比較を行なう。

## 【0064】

図12は、帯域幅を2000rad/secに設定したときの時間 - 位置特性であり、また図13は、帯域幅を6280rad/secに設定したときの時間 - 位置特性である。なお、位置センサ2(リニアエンコーダ83)と加速度センサ3の帯域を結合させた帯域は、200rad/secである。

## 【0065】

図12の実験結果では、(1)の従来法と、(2)の提案法のいずれにおいても、正常な力応答が得られる帯域を選択している。この帯域では、結果的に同じ力応答を示したことにより、本実施例で提案した方法が従来の方法と同様の機能を持つものであることが確かめられた。また図13は、図12よりも帯域幅を広げた場合の実験結果を示しているが、この場合は(1)の従来法において、力応答に微分ノイズが観測されている。それは実用的な外乱オブザーバとしての限界を示している。一方、図13の(2)に示す提案法では、そうしたノイズが観測されず、安定した力応答を示している。その帯域幅は人の感覚よりも広く、パプティクスに最適であるといえる。また、上述の位置制御や力制御だけでなく、双方の制御を統合したハイブリッド制御にも応用が可能である。

## 【0066】

また図14は、前記図1に示した位置情報型の第1外乱オブザーバ11の別な変形例を示したものである。同図において、 $g_1 = g_{dis}^2$ であり、また $g_2 = 2g_{dis}$ である( $g_{dis}$ は極)。また、ここにあるブロック線図では、次の数7と数8が成り立つ。

## 【0067】

10

20

30

40

【数 7】

$$\begin{bmatrix} dz_1/dt \\ dz_2/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & J_n g_1 \\ -\frac{1}{J_n} & -g_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & J_n g_1 g_2 \\ \frac{k_{tn}}{J_n} & g_1 - g_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix}$$

【0068】

【数 8】

$$T_{dis} = Z_1(t) - J_n g_1 \theta(t)$$

【0069】

ここにある第 1 外乱オブザーバ 11 は、前記図 2 に示すような擬似微分器 12 や、逆モデル部 14 や、ローパスフィルタ 15 が独立して構成されている訳ではなく、各機能が一体的に集約されている。従って、ここでの第 1 外乱オブザーバ 11 は、電流指令値  $I_q$  と位置信号を入力して、ゼロを含む低い周波数成分の外乱トルクの推定値  $\hat{F}_{dis}$  を、トルク - 電流変換手段 33 に出力する機能を有する。なお、ここには図示していないが、図 4 に示すような加速度情報型の第 2 外乱オブザーバ 21 を組み合わせることで、低周波帯域から高周波帯域に至る幅広い外乱トルクの推定値  $\hat{F}_{dis}$  を得ることができる。このように、第 1 外乱オブザーバ 11 の内部構成は、適宜変更が可能である。

10

【0070】

以上、本実施例で提案する装置や方法の有効性を確認したが、加速度制御の性能を決定するために特に重要な外乱オブザーバの帯域幅が、本実施例のような装置や方法で、直流成分から広帯域まで広げることが可能になることから、モーションコントロールにおいて多くの分野で適用可能となり、今後のヒューマンインタラクションにおける基盤技術になり得るものと期待される。

20

【0071】

本発明は上記実施例に限定されるものではなく、本発明の要旨の範囲において種々の変形実施が可能である。例えば、アクチュエータ 1 は実施例で説明したりニアモーション以外に、回転など任意のモーションを行なえるものにも適用でき、それに対応して位置センサ 2 や加速度センサ 3 は、 $n$  次元の検出機能を有するものを採用してよい。さらに、前記第 1 信号と第 4 信号は実質的に同じものであるので、共通の信号生成手段からこれらの第 1 信号や第 4 信号を出力する構成としてもよい。

30

【産業上の利用可能性】

【0072】

本実施例で提案する新規なマルチセンサ併用型外力推定装置は、従来の外乱オブザーバでは困難とされた  $1 \text{ kHz}$  以上の広帯域のロバスト加速度制御や、力覚・触覚センシングが可能になる。こうした力覚・触覚センシングは、特に人間が感じ得る周波数帯域の全領域をカバーできる可能性がある。また、得られた外乱トルクの推定値  $\hat{F}_{dis}$  を、アクチュエータ 1 の入力にフィードバックすれば、 $1 \text{ kHz}$  以上の帯域を有する加速度制御系を、アクチュエータ 1 で実現できる可能性がある。このような展開例は、現時点では実現し得ない領域へ踏み込む基盤技術にもなるので、産業上の有用性は非常に高い。

40

【0073】

例えば、ものの堅さや柔らかさの情報を、迅速且つリアルタイムに人間にフィードバックできる技術にも展開できる。これは、従来知られている力覚センサを利用しつつ、周波数特性の良好な力覚センシングが得られるものと期待され、さらにはアクチュエータ 1 そのものが力の発生源であり、力覚検出器となり得る技術になる。

【図面の簡単な説明】

【0074】

【図 1】本発明の好ましい実施例を示すマルチセンサベースの外乱オブザーバを含む外力推定装置の基本制御ブロック図である。

【図 2】同上、図 1 のより具体的な構成を示す外力推定装置の制御ブロック図である。

50

- 【図3】従来例と図2に示す外力推定装置の周波数特性を示すボード線図である。
- 【図4】図2における外力推定装置に基づいた具体的な変形例を示すブロック線図である。
- 【図5】従来例と図4に示す外力推定装置の周波数特性を示すボード線図である。
- 【図6】図4におけるマルチセンサ併用型外力推定装置を位置制御に適用した例を示すブロック線図である。
- 【図7】図4におけるマルチセンサ併用型外力推定装置を力制御に適用した例を示すブロック線図である。
- 【図8】位置制御の結果を示すグラフである。
- 【図9】位置制御の結果を示すグラフである。
- 【図10】実験装置の一例を示す斜視図である。
- 【図11】実験により得られた外乱推定性能の比較結果を示すグラフである。
- 【図12】実験により得られた力制御の比較結果を示すグラフである。
- 【図13】実験により得られた力制御の比較結果を示すグラフである。
- 【図14】図4とは別な位置センサベースの外乱オブザーバを示したブロック線図である。

10

【図15】従来例の位置センサベースの外乱オブザーバを示す概略の制御ブロック図である。

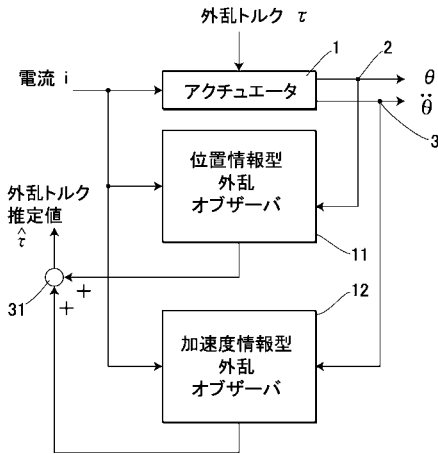
【符号の説明】

【0075】

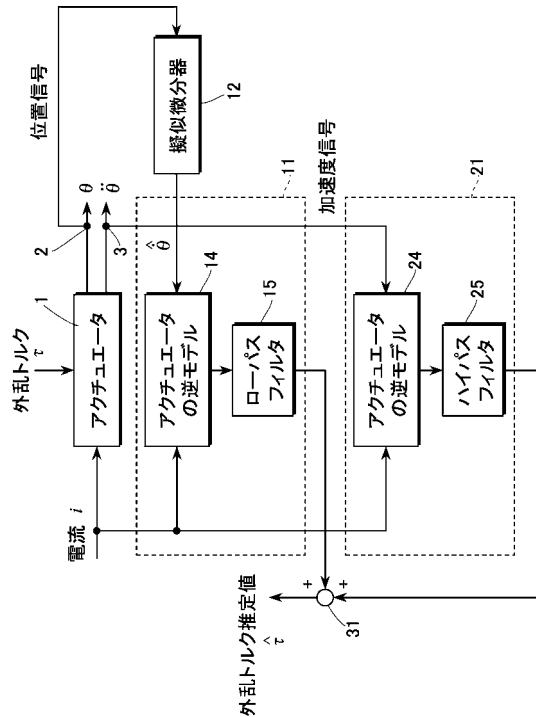
- 1 アクチュエータ
- 2 位置センサ（位置検出手段）
- 3 加速度センサ（加速度検出手段）
- 11 第1外乱オブザーバ（位置情報型外乱オブザーバ）
- 21 第2外乱オブザーバ（加速度情報型外乱オブザーバ）
- 31 加算器（加算手段）

20

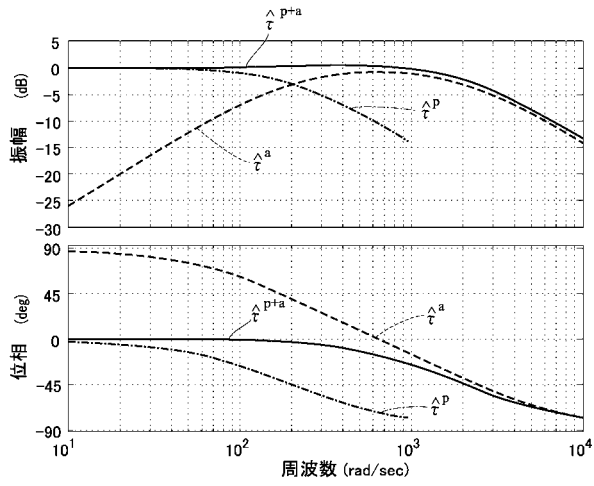
【図1】



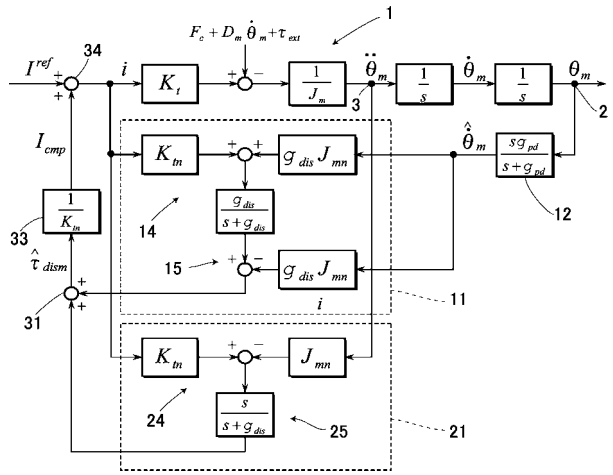
【図2】



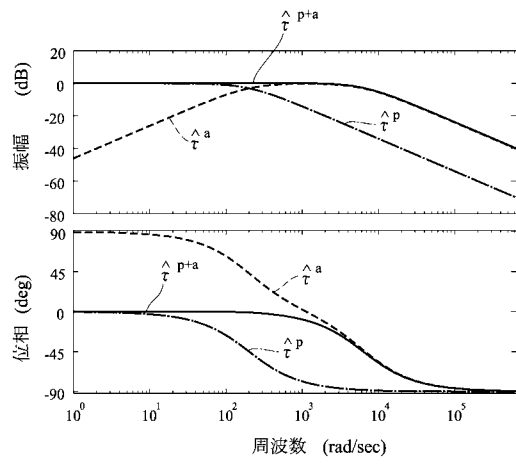
【 図 3 】



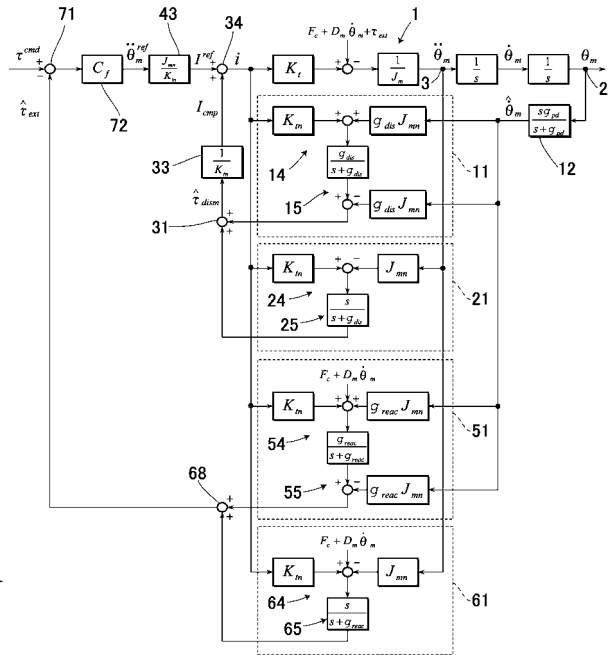
【 図 4 】



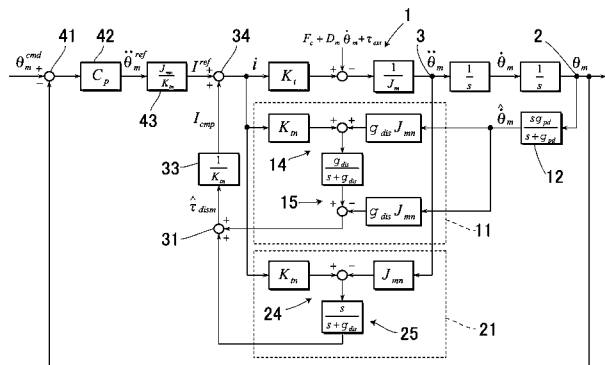
【 図 5 】



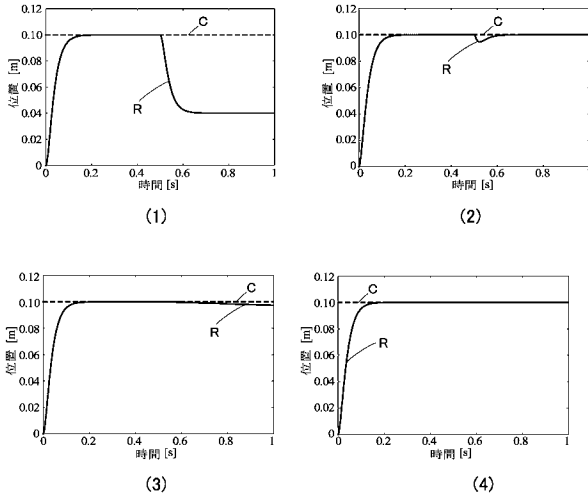
【 図 7 】



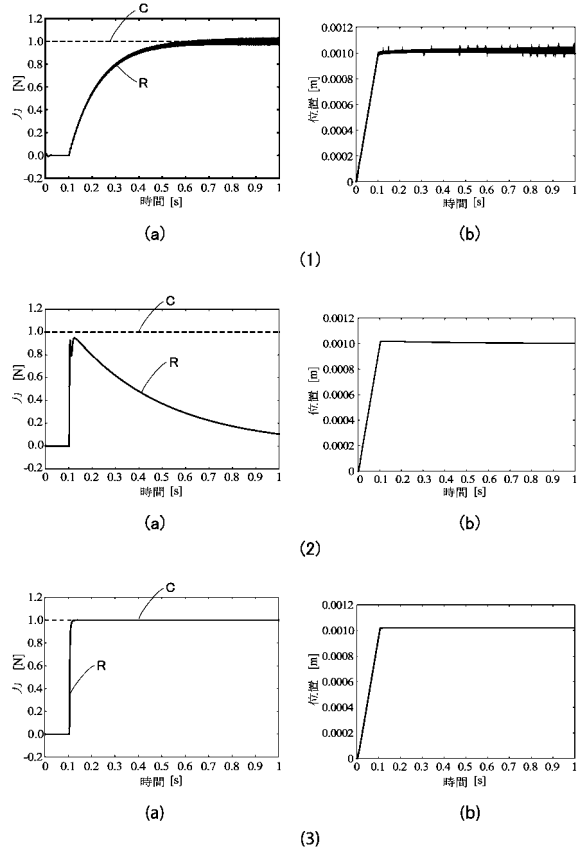
【 図 6 】



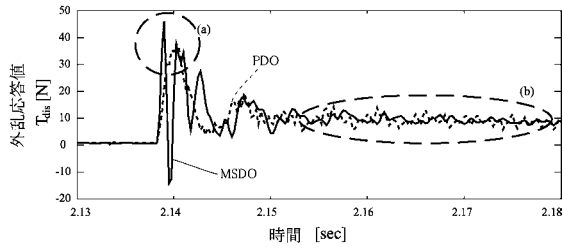
【図 8】



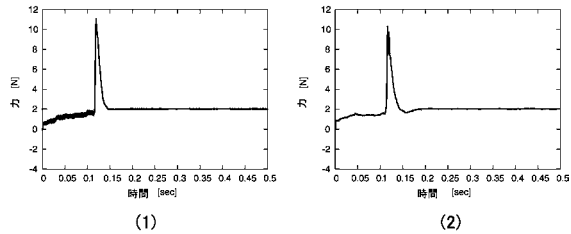
【図 9】



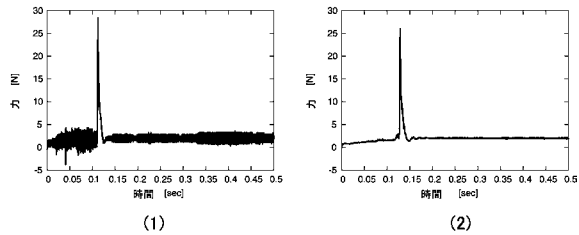
【図 11】



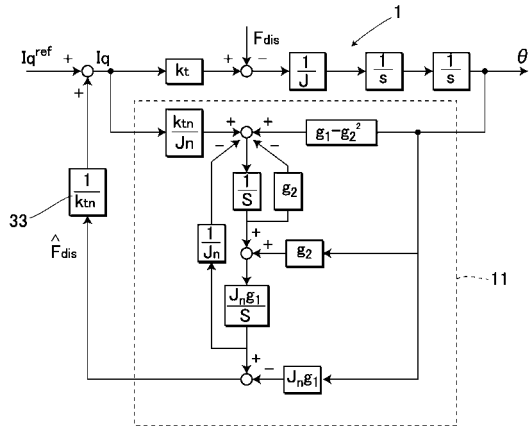
【図 12】



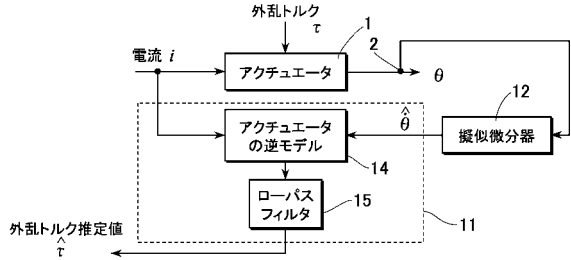
【図 13】



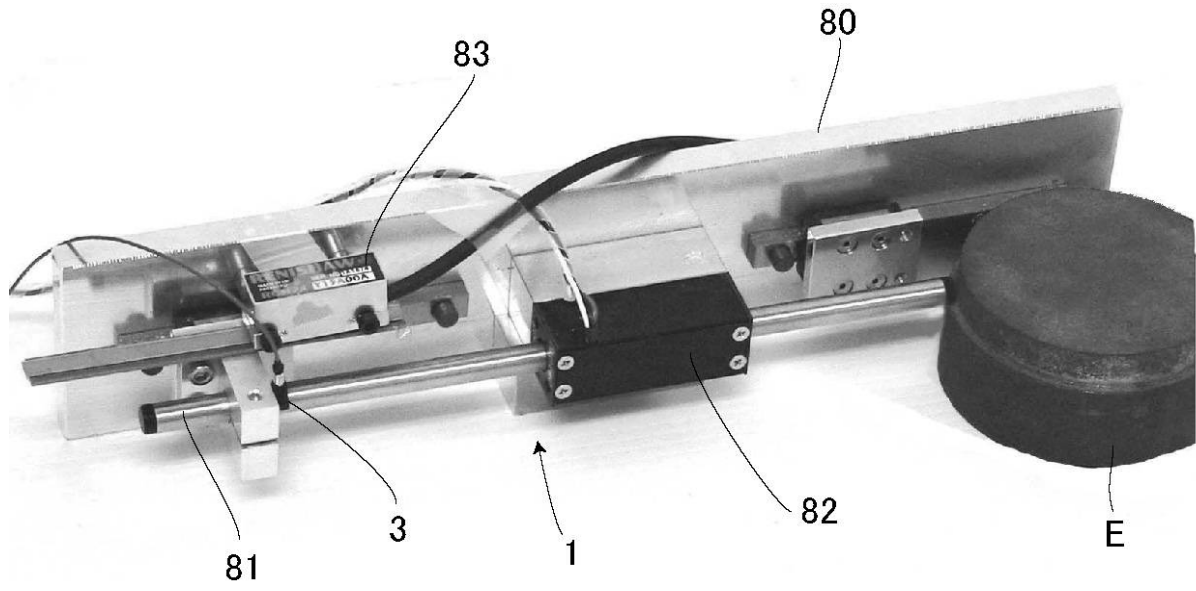
【図 14】



【図 15】



【図10】





---

フロントページの続き

(72)発明者 入江 航平

新潟県長岡市上富岡町1603-1 国立大学法人長岡技術科学大学内

審査官 柿崎 拓

(56)参考文献 特開平6-19504(JP,A)  
特開平7-84608(JP,A)  
特開平9-39524(JP,A)  
特開平10-283034(JP,A)  
特開2002-6903(JP,A)  
特開2004-110636(JP,A)  
特開2005-100145(JP,A)  
特開平11-282539(JP,A)  
特開平4-12689(JP,A)  
特開2002-52485(JP,A)  
特開2003-345402(JP,A)  
特開平8-317679(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G05B 13/02

G05D 3/12