

(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2020-52958
(P2020-52958A)

(43) 公開日 令和2年4月2日(2020.4.2)

(51) Int.Cl.
G05B 11/36 (2006.01)

F I
G05B 11/36 503A

テーマコード(参考)
5H004

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 18 頁)

(21) 出願番号 特願2018-184561 (P2018-184561)
(22) 出願日 平成30年9月28日 (2018.9.28)

(71) 出願人 000006208
三菱重工工業株式会社
東京都千代田区丸の内三丁目2番3号
(74) 代理人 100112737
弁理士 藤田 考晴
(74) 代理人 100140914
弁理士 三苫 貴織
(74) 代理人 100136168
弁理士 川上 美紀
(72) 発明者 安達 丈泰
東京都港区港南二丁目16番5号 三菱重
工業株式会社内
(72) 発明者 粟屋 伊智郎
東京都港区港南二丁目16番5号 三菱重
工業株式会社内

最終頁に続く

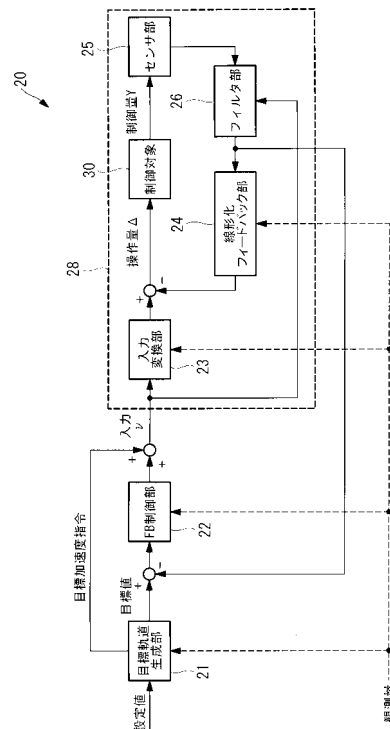
(54) 【発明の名称】 制御装置、及びその制御方法並びに制御プログラム、構造体

(57) 【要約】

【課題】制御精度を向上させると共にエネルギー消費を抑制することできる制御装置、及びその制御方法並びに制御プログラム、構造体を提供することを目的とする。

【解決手段】非線形要素を備える制御対象30を線形化システム28に線形化して制御する制御装置20であって、制御対象30の状態を示す制御量を量子化した値を検出するセンサ部25と、制御対象30の状態が目標状態に近づくように線形化システム28に入力される値と、線形化システム28の数値モデルとに基づいて制御量の推定値を連続量として算出し、制御量の推定値を量子化した値とセンサ部25の出力との偏差に基づいて制御量の推定値を再帰的に補正するフィルタ部26と、フィルタ部26から出力される制御量の推定値に基づいて、線形化システムに入力される値又はその変換値の補正を行う線形化フィードバック部24と、を備える。

【選択図】図2



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

非線形要素を備える制御対象を線形化システムに線形化して制御する制御装置であって、

前記制御対象の状態を示す制御量を量子化した値を検出するセンサ部と、
前記制御対象の状態が目標状態に近づくように前記線形化システムに入力される値と、
前記線形化システムの数理モデルとに基づいて前記制御量の推定値を連続量として算出し、
前記制御量の推定値を量子化した値と前記センサ部の出力との偏差に基づいて前記制御量の推定値を再帰的に補正するフィルタ部と、
前記フィルタ部から出力される前記制御量の推定値に基づいて、前記線形化システムに入力される値又はその変換値の補正を行う線形化フィードバック部と、
を備える制御装置。

10

【請求項 2】

前記フィルタ部の開ループ伝達関数は、前記フィルタ部の制御帯域付近において 1 次の積分特性とされる請求項 1 に記載の制御装置。

【請求項 3】

前記フィルタ部は、開ループ上に前記数理モデルの積分要素の次数から 1 を引いた次数の微分要素を持つ伝達関数を有する請求項 1 または 2 に記載の制御装置。

【請求項 4】

前記微分要素は、帯域制限付きの微分器である請求項 3 に記載の制御装置。

20

【請求項 5】

前記フィルタ部は、前記偏差に対して所定の定数を乗算した値を用いて前記入力される値を補正する請求項 1 から 4 のいずれか 1 項に記載の制御装置。

【請求項 6】

請求項 1 から 5 のいずれか 1 項に記載の制御装置を備えた構造体。

【請求項 7】

非線形要素を備える制御対象を線形化システムに線形化して制御する制御方法であって、

前記制御対象の状態を示す制御量を量子化した値を検出する検出工程と、
前記制御対象の状態が目標状態に近づくように前記線形化システムに入力される値と、
前記線形化システムの数理モデルとに基づいて前記制御量の推定値を連続量として算出し、
前記制御量の推定値を量子化した値と前記検出工程の出力との偏差に基づいて前記制御量の推定値を再帰的に補正するフィルタ工程と、
前記フィルタ工程にて出力される前記制御量の推定値に基づいて、前記線形化システムに入力される値又はその変換値の補正を行う線形化フィードバック工程と、
を有する制御方法。

30

【請求項 8】

非線形要素を備える制御対象を線形化システムに線形化して制御する制御プログラムであって、

前記制御対象の状態を示す制御量を量子化した値を検出する検出処理と、
前記制御対象の状態が目標状態に近づくように前記線形化システムに入力される値と、
前記線形化システムの数理モデルとに基づいて前記制御量の推定値を連続量として算出し、
前記制御量の推定値を量子化した値と前記検出処理の出力との偏差に基づいて前記制御量の推定値を再帰的に補正するフィルタ処理と、
前記フィルタ処理にて出力される前記制御量の推定値に基づいて、前記線形化システムに入力される値又はその変換値の補正を行う線形化フィードバック処理と、
をコンピュータに実行させるための制御プログラム。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、制御装置、及びその制御方法並びに制御プログラム、構造体に関するものである。

【背景技術】

【0002】

水中航走体等の構造体では、深度やピッチ角等の各制御軸に対して制御が行われている。例えば特許文献1には、センサにおける量子化誤差を低減して制御を行うことが開示されている。

10

【0003】

また、水中航走体等の構造体の運動特性は一般的に非線形である。このため、制御精度を向上させるために非線形特性を線形化する必要がある。線形化手法としては、例えば複数の動作点まわりでそれぞれ線形近似を行い、それらを線形補完してつなぎ合わせるゲインスケジューリングが用いられる。しかしながら、ゲインスケジューリングでは、各動作点の近傍以外では線形化精度が劣化するため制御精度や安定性が十分ではない。

【0004】

そこで、制御対象の非線形特性を近似することなく全領域で線形化する方法として厳密な線形化手法が提案されている（例えば、非特許文献1-4）。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特許第6282481号公報

【非特許文献】

【0006】

【非特許文献1】石島辰太郎、島公脩、石動喜久、山下裕、三平満司、渡辺敦著 「非線形システム論」、計測自動制御学会、1993年

【非特許文献2】三平満司著 「厳密な線形化とそのけん引車両の軌道制御への応用」、計測と制御、Vol.31、No.8、1992年

【非特許文献3】山田秀光著 「厳密な線形化手法のオートパイロットへの適用」、関西造船協会論文集、No.235、2001年

30

【非特許文献4】齊藤健一著 「航空機の非線形方程式の厳密な線形化とその制御」、日本航空宇宙学会誌、Vol.46、No.531、1998年

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかしながら、非線形特性を有する制御対象に対して厳密な線形化を適用した場合、制御精度が向上する一方で、厳密な線形化システムの入力感度が高くなり、例えば、入力されるセンサ値の量子化誤差（量子化振動）に対して敏感に修正動作が働いてエネルギー消費が増加する可能性がある。すなわち、制御対象に対して線形化を適用した上で、量子化誤差の影響を抑制することが課題となっている。

40

【0008】

本発明は、このような事情に鑑みてなされたものであって、制御精度を向上させると共にエネルギー消費を抑制することができる制御装置、及びその制御方法並びに制御プログラム、構造体を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明の第1態様は、非線形要素を備える制御対象を線形化システムに線形化して制御する制御装置であって、前記制御対象の状態を示す制御量を量子化した値を検出するセンサ部と、前記制御対象の状態が目標状態に近づくように前記線形化システムに入力される

50

値と、前記線形化システムの数理モデルとに基づいて前記制御量の推定値を連続量として算出し、前記制御量の推定値を量子化した値と前記センサ部の出力との偏差に基づいて前記制御量の推定値を再帰的に補正するフィルタ部と、前記フィルタ部から出力される前記制御量の推定値に基づいて、前記線形化システムに入力される値又はその変換値の補正を行う線形化フィードバック部と、を備える制御装置である。

【0010】

上記のような構成によれば、制御対象の非線形要素を線形化するため、制御精度を向上させることが可能となる。なお、線形化とは、例えば、厳密な線形化であり、厳密な線形化とは、制御対象の非線形特性を近似することなく全領域で線形化する手法である。

【0011】

また、制御対象を線形化した場合には、線形化システムにおける線形化フィードバック部の入力の感度が高くなり、例えば入力されるセンサ値の量子化誤差（量子化に伴う最小分解能の遷移。量子化振動）に対して敏感に修正動作が働いてエネルギー消費が増加する可能性がある。そこで、制御対象の制御量を検出するセンサ部と線形化を行う線形化フィードバック部との間に、フィルタ部を設けることとした。フィルタ部において、線形化システムの数理モデルを用いてセンサ部で量子化した制御量の推定連続値を出力することとしたため、線形化フィードバック部に入力される値を連続値とすることができ、量子化振動によるエネルギー消費の増加を抑制することが可能となる。

【0012】

すなわち、フィルタ部においてセンサ部の量子化された値を連続値に変換することによって量子化振動等に基づくエネルギー消費を抑制することが可能となる。

【0013】

上記制御装置において、前記フィルタ部の開ループ伝達関数は、前記フィルタ部の制御帯域付近において1次の積分特性とすることとしてもよい。

【0014】

上記のような構成によれば、フィルタ部の開ループ特性が積分特性となるため、フィルタ部における振動発生を防止することができる。

【0015】

上記制御装置において、前記フィルタ部は、開ループ上に前記数理モデルの積分要素の次数から1を引いた次数の微分要素を持つ伝達関数を有することとしてもよい。

【0016】

上記のような構成によれば、数理モデルの積分要素の次数から1を引いた次数の微分要素を持つ伝達関数によってフィルタ部の開ループ特性が積分特性となるため、フィルタ部における振動発生を防止することができる。

【0017】

上記制御装置において、前記微分要素は、帯域制限付きの微分器であることとしてもよい。

【0018】

上記のような構成によれば、帯域制限付きの微分器を用いることで応答帯域を適切に設定することができる。

【0019】

上記制御装置において、前記フィルタ部は、前記偏差に対して所定の定数を乗算した値を用いて前記入力される値を補正することとしてもよい。

【0020】

上記のような構成によれば、センサ部の出力と数理モデルにおける制御量を量子化した値との偏差に対して所定の定数を乗算し、乗算した値を用いて数理モデルに入力される値を補正するため、定数によって応答性を調整することが可能となる。

【0021】

本発明の第2態様は、上記の制御装置を備えた構造体である。

【0022】

10

20

30

40

50

本発明の第3態様は、非線形要素を備える制御対象を線形化システムに線形化して制御する制御方法であって、前記制御対象の状態を示す制御量を量子化した値を検出する検出工程と、前記制御対象の状態が目標状態に近づくように前記線形化システムに入力される値と、前記線形化システムの数理モデルとに基づいて前記制御量の推定値を連続量として算出し、前記制御量の推定値を量子化した値と前記検出工程の出力との偏差に基づいて前記制御量の推定値を再帰的に補正するフィルタ工程と、前記フィルタ工程にて出力される前記制御量の推定値に基づいて、前記線形化システムに入力される値又はその変換値の補正を行う線形化フィードバック工程と、を有する制御方法である。

【0023】

本発明の第4態様は、非線形要素を備える制御対象を線形化システムに線形化して制御する制御プログラムであって、前記制御対象の状態を示す制御量を量子化した値を検出する検出処理と、前記制御対象の状態が目標状態に近づくように前記線形化システムに入力される値と、前記線形化システムの数理モデルとに基づいて前記制御量の推定値を連続量として算出し、前記制御量の推定値を量子化した値と前記検出処理の出力との偏差に基づいて前記制御量の推定値を再帰的に補正するフィルタ処理と、前記フィルタ処理にて出力される前記制御量の推定値に基づいて、前記線形化システムに入力される値又はその変換値の補正を行う線形化フィードバック処理と、をコンピュータに実行させるための制御プログラムである。

【発明の効果】

【0024】

本発明によれば、制御精度を向上させると共にエネルギー消費を抑制することができるという効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【0025】

【図1】本発明の一実施形態に係る制御装置を備えた水中航走体を例示した図である。

【図2】本発明の一実施形態に係る制御装置が備える機能を示した機能ブロック図である。

【図3】本発明の一実施形態に係る制御装置におけるフィルタ部が備える機能を示した機能ブロック図である。

【図4】厳密な線形化手法を適用したシステムの例を示す図である。

【図5】厳密な線形化手法を適用したシステムの伝達関数の例を示す図である。

【図6】厳密な線形化手法を適用したシステムの例を示す図である。

【図7】本発明の一実施形態に係る制御装置と参考例とで深度の追従特性を比較した図である。

【図8】本発明の一実施形態に係る制御装置と参考例とで深度に係る舵の動作を比較した図である。

【図9】本発明の一実施形態に係る制御装置と参考例とでピッチ角の追従特性を比較した図である。

【図10】本発明の一実施形態に係る制御装置と参考例とでピッチ角に係る舵の動作を比較した図である。

【図11】本発明の一実施形態に係る制御装置と参考例とでアクチュエータの消費油量を比較した図である。

【図12】本発明の一実施形態に係る制御装置におけるフィルタ部が備える機能ブロックの例を示した図である。

【発明を実施するための形態】

【0026】

以下に、本発明に係る制御装置、及びその制御方法並びに制御プログラム、構造体の一実施形態について、図面を参照して説明する。制御装置は、非線形な運動特性を有する構造体であれば、幅広く適用できるものであって、以下に説明するような水中航走体のみ限定されるものではない。例えば、制御装置は、航空機やロケット、ドローン等の構造体

10

20

30

40

50

に適用可能であり、有人及び無人に関わらず適用可能である。

【0027】

図1は、本発明の一実施形態に係る制御装置20を備えた水中航走体1を例示した図である。図1に示すように、水中航走体1は、船尾軸線（以下、「x軸」という。）、左右軸線（以下、「y軸」という。）、上下軸線（以下、「z軸」という。）からなる互いに直交する3つの直線軸と、これら各直線軸に対する3つの回転軸とからなる船体座標系の6軸（6自由度）が定義される。そして、x軸方向の速度をu、y軸方向の速度をv、z軸方向の速度をwとする。また、x軸周りの回転角速度pをロール角速度、y軸周りの回転角速度qをピッチ角速度、z軸周りの回転角速度rを方位角速度とする。更に、絶対座標系（地球座標系）におけるx軸周りの回転角度をロール角、y軸周りの回転角度をピッチ角、z軸周りの回転角度をヨー角と定義する。

10

【0028】

制御装置20は、水中航走体1を制御対象30として水中航走体1の絶対座標系の各制御軸（深度、ピッチ角、方位角、ロール角）に対して制御を行う。具体的には、制御装置20は、水中航走体1に設けられた深度用アクチュエータ、ピッチ角用アクチュエータ、方位角用アクチュエータ、ロール角用アクチュエータに対して操作量（制御指令値）を与えることによって各軸方向の制御量を制御する。なお、各アクチュエータは船体に設けられた可動部（例えば、船尾の舵等）を駆動して各制御軸方向に水中航走体1を移動させる駆動装置である。

【0029】

制御装置20は、例えば、図示しないCPU（中央演算装置）、RAM（Random Access Memory）等のメモリ、及びコンピュータ読み取り可能な記録媒体等から構成されている。後述の各種機能を実現するための一連の処理の過程は、プログラムの形式で記録媒体等に記録されており、このプログラムをCPUがRAM等に読み出して、情報の加工・演算処理を実行することにより、後述の各種機能が実現される。なお、プログラムは、ROMやその他の記憶媒体に予めインストールしておく形態や、コンピュータ読み取り可能な記憶媒体に記憶された状態で提供される形態、有線又は無線による通信手段を介して配信される形態等が適用されてもよい。コンピュータ読み取り可能な記憶媒体とは、磁気ディスク、光磁気ディスク、CD-ROM、DVD-ROM、半導体メモリ等である。

20

30

【0030】

図2は、制御装置20が備える機能を示した機能ブロック図である。なお、図2に示す制御対象30は水中航走体1であり、制御装置20には含まれない（制御装置20による制御対象である）。図2に示されるように、制御装置20は、目標軌道生成部21と、フィードバック制御部22と、入力変換部23と、線形化フィードバック部24と、センサ部25と、フィルタ部26とを備えている。なお、図2において、厳密に線形化されたシステムを線形化システム28として示している。

【0031】

目標軌道生成部21は、水中航走体1における上位制御装置等から出力される設定値に基づいて、目標値を算出する。設定値とは、各制御軸方向の目標指令（例えば、深度の目標指令）であり、例えば運転員等によって設定される。具体的には、目標軌道生成部21は、入力された設定値を用いて目標軌道を生成し出力する。目標軌道とは、現状の水中航走体1の状態から、入力された設定値まで状態を変化させるための軌道であり、現状の水中航走体1の状態から設定値まで所定の時間をかけて到達するように設定される。例えば、ピッチ角を例にとると、現状のピッチ角が所定の時間をかけて入力された設定値（ピッチ角）まで達するように目標値（軌道）が設定される。なお、設定値までの到達に要する時間については、例えば、アクチュエータの許容可能な可動速度等によって決定される。このように目標軌道を生成することによって、舵等の急な変化を抑制して、制御の安定性を確保することができる。

40

【0032】

50

目標軌道生成部 2 1 には、設定値と、水中航走体 1 の船尾軸方向の速度 u の観測値とが入力される。そして、速度 u に応じて必要な応答になるように時定数を決定した 2 次フィルタによって、目標軌道を算出する。また、目標軌道生成部 2 1 は、上記 2 次フィルタの内部変数として計算される加速度成分を目標加速度指令として出力し、フィードフォワード制御信号として利用することができる。

【0033】

フィードバック制御部 2 2 は、目標駆動生成部から出力された目標値と、制御対象 3 0 から検出された制御量との差分に基づいて、後述する線形化システム 2 8 (厳密に線形化されたシステム) の入力を演算する。具体的には、フィードバック制御部 2 2 には、目標値と、後述するフィルタ部 2 6 により出力された制御対象 3 0 の現在の制御量との差分が入力される。そして、フィードバック制御部 2 2 は、差分が低減されるような入力を算出し、出力する。なお、速度 u により応答性が異なるため、フィードバック制御部 2 2 には、速度 u の観測値が入力され、速度 u に応じてゲインを可変制御するゲインスケジューリング制御が行われている。フィードバック制御部 2 2 から出力される入力は、後述するように、制御対象 3 0 を厳密に線形化した線形システムに適合した入力である。なお、フィードバック制御部 2 2 には、例えば PID 制御手法等を適宜適用可能である。

10

【0034】

フィードバック制御部 2 2 の出力は、目標軌道生成部 2 1 から出力された目標加速度指令と直接加算され、線形化システム 2 8 へ入力される。目標加速度信号を利用することで、容易にフィードフォワード制御系を構成することができ、応答性を向上することができる。なお、フィードバック制御部 2 2 の出力は、目標加速度指令と加算されずに線形化システム 2 8 へ入力されることとしてもよい。

20

【0035】

なお、線形化システム 2 8 とは、非線形要素を備える制御対象 3 0 に厳密な線形化手法を適用して、後述する入力変換部 2 3 や線形化フィードバック部 2 4 等を付加して線形化したシステム (厳密に線形化されたシステム) である。すなわち、制御対象 3 0 自体は非線形特性を有していても、線形化システム 2 8 全体として見ると線形特性となる。

【0036】

入力変換部 2 3 は、制御対象 3 0 の入力側において、制御対象 3 0 の非線形特性を厳密に線形化するために、入力変換を行う。換言すると、入力変換部 2 3 は、厳密な線形化が適用された線形化システム 2 8 に入力される入力 と線形化システム 2 8 の制御対象 3 0 に入力される操作量との間の入力変換を行う。なお、入力変換部 2 3 の詳細については、後述する。

30

【0037】

線形化フィードバック部 2 4 は、フィルタ部 2 6 から出力される制御量の推定値に基づいて、線形化システム 2 8 に入力される値又はその変換値の補正を行う。すなわち、線形化フィードバック部 2 4 は、制御対象 3 0 の非線形特性を厳密に線形化するために、検出された制御対象 3 0 の制御量に基づいて、制御対象 3 0 の入力側へフィードバックを行う。換言すると、線形化フィードバック部 2 4 は、制御対象 3 0 の制御量 (フィルタ部 2 6 の出力) に基づいてフィードバックを行うことで、線形化システム 2 8 の制御対象 3 0 に入力される操作量を補正する。なお、線形化フィードバック部 2 4 の詳細については、後述する。

40

【0038】

センサ部 2 5 は、制御対象 3 0 の状態を示す制御量を量子化した値を検出する。具体的には、センサ部 2 5 は、制御対象 3 0 の現在の状態を示す情報として、予め設定した制御対象 3 0 パラメータの現状値 (制御量) を検出する。本実施形態では、水中航走体 1 を制御対象 3 0 としているため、制御対象 3 0 パラメータを水中航走体 1 の各制御軸 (深度、ピッチ角、方位角、ロール角) とし、各制御パラメータの現在の状態を示す値を制御量として検出する。そして、センサ部 2 5 では、検出したアナログ値を、制御装置 2 0 においてデジタル処理可能なように、センサの最小分解能単位で離散的な値 (デジタル値) に変

50

換する。なお、以下の説明では、センサ部 25 から出力された値を制御量実測値（量子化された離散的な値）として説明する。

【0039】

フィルタ部 26 は、制御対象の状態が目標状態に近づくように線形化システム 28 へ入力される値と、線形化システム 28 の数理モデルとに基づいて制御量の推定値を連続量として算出し、制御量の推定値を量子化した値とセンサ部 25 の出力との偏差に基づいて制御量の推定値を再帰的に補正する。すなわち、フィルタ部 26 は、センサ部 25 の出力と、数理モデルにおける制御量をセンサと同等の分解能で量子化した値との偏差を算出し、偏差を用いて線形化システム 28 へ入力される値を補正し、補正した値を数理モデルへ入力して制御量の推定連続値（制御量真値）を出力する。なお、数理モデルとは、入力変換部 23 と線形化フィードバック部 24 を用いて非線形要素を備える制御対象 30 を厳密に線形化した線形化システム 28 に対応したモデルである。すなわち、数理モデルには、線形化システム 28 の理論的特性（理想状態の伝達関数）が反映されている。センサ部 25 から出力された制御量実測値が所定の最小分解能単位で離散的に表されるため、フィルタ部 26 は、最小分解能間の誤差を補正して、離散的な値ではなく、連続的な制御量の値（以下、「制御量真値」という。）を算出する。すなわち、センサ部 25 からは制御量実測値が出力され、フィルタ部 26 からは制御量真値が出力され、制御量真値は、センサ部 25 によって量子化される前の、制御量の値（アナログ値）に近い値を示すものである。そして、フィルタ部 26 から出力された制御量真値は、線形化フィードバック部 24 とフィードバック制御部 22 へ入力される。

10

20

【0040】

図 3 は、フィルタ部 26 の具体的な構成を示す図である。図 3 に示すように、フィルタ部 26 は、調整部 31 と、第 1 デイレイ 32 と、演算部 33 と、第 2 デイレイ 34 と、量子化部 35 とを備えている。なお、フィルタ部 26 の構成は一例であり、制御量の真値（連続値）が算出できれば、上記に限らず適用可能である。

【0041】

調整部 31 は、センサ部 25 から出力された制御量実測値と数理モデルにおける制御量を量子化した値（制御量真値を量子化した値）との偏差が入力され、該偏差を調整することによって応答性等を制御している。なお、以下の説明では、調整部 31 から出力された値を補正值として説明する。調整部 31 の伝達関数 G は、以下で示される。

30

【0042】

【数 1】

$$G = \frac{K_{obs} s}{T_d s + 1} \quad (1)$$

【0043】

(1) 式において、K o b は、フィルタ部 26 の応答性を決定するゲインである。また、s / (T d · s + 1) は帯域制限付きの微分フィルタである。なお、T d は、高周波ノイズ成分を微分しないように適切な値に設定される。フィルタ部 26 の帯域は、制御装置 20 の制御帯域よりも高くなるように設定される。

40

【0044】

調整部 31 の伝達関数である (1) 式の 1 次微分フィルタは、フィルタ部 26 の開ループ伝達関数を制御帯域付近で 1 次の積分特性に整形するために設定されている。これは、開ループ伝達関数を 1 次の積分特性とすることでフィルタ部 26 の閉ループ応答特性をオーバーシュートのない理想的な応答に設計するためである。

【0045】

微分フィルタの次数は、厳密に線形化された線形化システム 28 の伝達関数における積分要素の次数に基づいて決定される。すなわち、調整部 31 における微分器は、開ループ上に数理モデルの積分要素の次数（厳密に線形化された線形化システム 28 の伝達関数における積分要素の次数）から 1 を引いた次数の微分要素に設定される。本実施形態では、

50

厳密に線形化された線形化システム 28 の伝達関数における積分要素の次数が 2 の場合を例としているため、微分フィルタの次数は 1 となる。

【0046】

第 1 デレイ 32 は、制御対象 30 へ入力される操作量の遅れを模擬して挿入されている。具体的には、制御対象 30 へ入力される操作量は、コントローラからデジタル出力されて実際のアクチュエータを動作させるため、最悪ケースを想定するとデジタルサンプリングの 1 周期分遅れる可能性がある。このため、フィルタ部 26 においても、入力を演算部 33 へ入力する場合に、サンプリング遅れを模擬して第 1 デレイ 32 を設けている。すなわち、第 1 デレイ 32 は、同一の入力の入力タイミングに対して、線形化システム 28 において制御対象 30 へ操作量が入力されるタイミングと、フィルタ部 26 の演算部 33 へ入力が入力されるタイミングとが乖離しないように調整している。

10

【0047】

第 1 デレイ 32 には、調整部 31 の出力である補正值と線形化システム 28 へ入力される入力とが加算された値が入力され、サンプリング遅れを反映して出力する。

【0048】

演算部 33 は、厳密に線形化された線形化システム 28 の数理モデルを用いて、連続的な制御量の値（制御量真値）を演算する。すなわち、演算部 33 は、数理モデルを用いて、センサ部 25 から出力された量子化された制御量実測値の真値を推定している。なお、真値とは、離散的な値ではなく連続的な値を示す。

【0049】

第 2 デレイ 34 は、センサの検出時のサンプリング遅れを模擬している。実際のセンサでは、制御量をセンシングしてコントローラへ入力するまでには通信等のサンプリング遅れが存在する。従って、第 2 デレイ 34 は、制御量がセンサ部 25 によって検出されるタイミング（制御量実測値のタイミング）と、演算部 33 において制御量を推定するタイミング（制御量推定値のタイミング）とが乖離しないように調整している。

20

【0050】

量子化部 35 は、制御量真値を量子化している。具体的には、量子化部 35 は、センサ部 25 と同等の検出分解能を有しており、演算部 33 から出力された制御量真値（推定連続値）を量子化する。そして、量子化部 35 の出力は、制御量推定値としてフィードバックされる。

30

【0051】

演算部 33 は、線形化システム 28 の数理モデルを有しているため、線形化システム 28 へ入力される入力をを用いることで、数理モデルから理想的な制御量の状態を推定することが可能である。しかしながら、制御対象 30 を含む線形化システム 28 は外乱等の影響を受けるため、数理モデルの特性と誤差が生じる場合がある。このため、演算部 33 の前段では、センサ部 25 の出力（制御量実測値）と数理モデルの出力（制御量推定値）との偏差に基づいて入力が補正され、補正された値が演算部 33 へ入力される。

【0052】

例えば、制御量推定値が、制御量実測値よりも小さい場合（制御量推定値 < 制御量実測値）には、制御量実測値に対して制御量推定値を減算した値が正となり、調整部 31 において定数倍され、正の補正值が算出される。そして、入力と正の補正值とが加算されることによって、演算部 33 への入力値が入力よりも大きい値となり、数理モデルで推定される制御量真値が増加する方向に修正される。制御量推定値が、制御量実測値よりも大きい場合（制御量推定値 > 制御量実測値）には、制御量実測値に対して制御量推定値を減算した値が負となり、調整部 31 において定数倍され、負の補正值が算出される。そして、入力と負の補正值とが加算されることによって、演算部 33 への入力値が入力よりも小さい値となり、数理モデルで推定される制御量真値が減少する方向に修正される。なお、制御量推定値が、制御量実測値と等しい場合（制御量推定値 = 制御量実測値）には、制御量実測値に対して制御量推定値を減算した値が零となり、補正值が零となる。すなわち、入力がそのまま演算部 33 へ入力される。

40

50

【 0 0 5 3 】

なお、本実施形態では、線形化システム 28 の理想的な伝達関数が、2 次の積分要素を対角成分に持つ対角行列となるため、演算部 33 が有する数理モデルも 2 次の積分要素を対角成分に持つ対角行列として表現される。すなわち、数理モデルは、線形化システム 28 の理想的な伝達関数と等しい伝達関数を有する。

【 0 0 5 4 】

次に、厳密な線形化手法について説明する。

厳密な線形化手法は、制御対象の非線形特性を示した非線形モデルを用いて、近似を行うことなく、特性の全領域において線形化する手法である。すなわち、非線形な制御対象をそれと同等の精度を有する非線形モデル（非線形性を表現した数式）を用いて入出力間が線形となるように数学的な変換を行うものである。なお、線形化システム 28 では、厳密な線形化手法に限定されず様々な線形化手法を適用することが可能である。

10

【 0 0 5 5 】

制御対象への操作量を入力、制御対象の制御量を出力 Y とすると、水中航走体 1 において、操作量及び制御量は、以下となる。

【 0 0 5 6 】

【 数 2 】

$$\Delta = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

20

$$Y = \begin{bmatrix} z \\ \theta \\ \psi \\ \phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

30

【 0 0 5 7 】

なお、(2) 式において、1 は深度用アクチュエータに対する操作量（操作指令）であり、2 はピッチ角用アクチュエータに対する操作量（操作指令）であり、3 は方位角用アクチュエータに対する操作量（操作指令）であり、4 はロール角用アクチュエータに対する操作量（操作指令）である。また、(3) 式において、z は深度の制御量、 θ はピッチ角の制御量、 ψ は方位角の制御量、 ϕ はロール角の制御量である。すなわち、制御対象に対して操作量を与えると、各アクチュエータが駆動され、各制御軸方向の現在の値が制御量としてセンサ等によって出力される。

【 0 0 5 8 】

40

出力 Y に関する制御対象の運動方程式に着目し、運動方程式の右辺に入力が現れるまで時間微分を行うと、水中航走体の場合は、2 階微分時に入力が表れる。このときの非線形運動方程式は以下ようになる。

【 0 0 5 9 】

【数 3】

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2}{dt^2} \begin{bmatrix} z \\ \theta \\ \psi \\ \phi \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} f_z(u, v, w, p, q, r, \phi, \theta) \\ f_\theta(u, v, w, p, q, r, \phi, \theta) \\ f_\psi(u, v, w, p, q, r, \phi, \theta) \\ f_\phi(u, v, w, p, q, r, \phi, \theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_{z1}(u, \phi, \theta) & g_{z2}(u, \phi, \theta) & g_{z3}(u, \phi, \theta) & g_{z4}(u, \phi, \theta) \\ g_{\theta1}(u, \phi, \theta) & g_{\theta2}(u, \phi, \theta) & g_{\theta3}(u, \phi, \theta) & g_{\theta4}(u, \phi, \theta) \\ g_{\psi1}(u, \phi, \theta) & g_{\psi2}(u, \phi, \theta) & g_{\psi3}(u, \phi, \theta) & g_{\psi4}(u, \phi, \theta) \\ g_{\phi1}(u, \phi, \theta) & g_{\phi2}(u, \phi, \theta) & g_{\phi3}(u, \phi, \theta) & g_{\phi4}(u, \phi, \theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

(4)

【 0 0 6 0 】

10

20

30

40

50

なお、(4)式において、 u 、 v 、 w は、それぞれ船体座標系における船尾軸線方向の速度、左右軸線方向の速度、上下軸線方向の速度である。また、 p 、 q 、 r は、それぞれ船体座標系における船尾軸線周りの角速度、左右軸線周りの角速度、上下軸線周りの角速度である。そして、 f_z 、 f_y 、 f_x 、 f_r は、それぞれ深度軸に係る非線形関数、ピッチ軸に係る非線形関数、方位軸に係る非線形関数、ロール軸に係る非線形関数であり、入力 v に関係しない項である。また、 g_z1 から g_z4 は深度軸に係る非線形関数、 g_y1 から g_y4 はピッチ軸に係る非線形関数、 g_x1 から g_x4 は方位軸に係る非線形関数、 g_r1 から g_r4 はロール軸に係る非線形関数であり、入力 v に関する行列の各要素である。

【0061】

一般的に、非線形特性を持つ制御対象の出力は、1階または複数階微分することによって、(4)式に示されるように入力が表れる。(4)式では2階微分の例を示しているが、制御対象によって微分の階数は異なり、2階微分以外であっても同様に適用可能である。

【0062】

ここで、(4)式の左辺である出力の2階微分を新しい入力 v とし、入力 v にかからない非線形項を F とし、入力 v にかかる非線形項を G とすると、(4)式は以下のように整理される。

【0063】

【数4】

$$v = F + G\Delta \quad (5)$$

【0064】

(5)式は、入力 v に対して変形することにより、以下の式となる。

【0065】

【数5】

$$\Delta = -G^{-1}F + G^{-1}v = -\alpha(\cdot) + \beta(\cdot)v \quad (6)$$

【0066】

なお、(6)式では、 F を F/G とし、 G を $1/G$ としている。(6)式の関係より、 v を新たな入力とし、 F/G をフィードバック変換とし、 $1/G$ を入力変換とすることによって、図4に示すような入出力関係に変換することができる。なお、 F/G のフィードバック変換が図2における線形化フィードバック部24に対応し、 $1/G$ の入力変換が図2の入力変換部23に対応している。図4の厳密に線形化されたシステムに対する入力 v と出力 Y の関係は、以下となる。

【0067】

【数6】

$$\frac{d^2Y}{dt^2} = v \quad (7)$$

【0068】

(7)式の関係を変達関数で示すと図5のような入出力関係となる。すなわち、制御対象の非線形特性は、厳密な線形化手法を適用することによって、2次の積分要素を対角成分に持つ対角行列に変換することができる。なお、対角行列の積分要素の次数は、出力 Y の微分の階数と対応して変化する。このように、フィードバック変換と入力変換を制御対象に付加して線形化システムを構成することによって、入出力間を厳密に線形化することができる。

【0069】

このように、厳密な線形化とは、制御対象30の出力を1階または複数階微分したもの

10

20

30

40

50

が入力となると仮定した場合に、制御対象 30 を含む線形システムの入力から制御対象 30 に対する操作量を算出可能なように入力変換部 23 及び線形化フィードバック部 24 を付加することである。入力変換部 23 及び線形化フィードバック部 24 が付加された制御対象 30 は、線形化システム 28 全体として見た場合に、出力を 1 階または複数階微分したものが入力となる関係となっているため、線形化システム 28 全体として線形化されたこととなる。この場合、線形化フィードバック部 24 は、フィルタ部 26 から出力される制御量の推定値に基づいて、線形化システム 28 に入力される値の変換値（入力変換部 23 の出力値）の補正を行う。

【0070】

なお、線形化フィードバック部 24 の構成、及び入力変換部 23 の構成は、上記に限らず適用できる。例えば、上記の例では、 F/G をフィードバック変換とし、 $1/G$ を入力変換としたが、(6) 式を $= (-F + \quad) / G$ と変形して、図 6 に示すように、 F をフィードバック変換とし、 $1/G$ を入力変換とすることとしてもよい。この場合、線形化フィードバック部 24 は、フィルタ部 26 から出力される制御量の推定値に基づいて、線形化システム 28 に入力される値（ \quad ）の補正を行う。また、上記の例では、入出力間の厳密な線形化について説明したが、入力 状態間の厳密な線形化についても同様に適用可能である。

10

【0071】

次に、制御装置 20 の効果について図 7 - 11 を参照して説明する。なお、図 7 - 11 では、深度の目標値を一定として、時刻 T_0 においてピッチ角の目標値を変更した場合の特性を例として説明する。なお、図 7 - 11 において、フィルタ部 26 を用いず、センサ部 25 から出力された制御量実測値が直接線形化フィードバック部 24 に入力される場合を参考例としている。

20

【0072】

図 7 は、本実施形態と参考例とで深度の追従特性を比較した図である。図 8 は、本実施形態と参考例とで深度に係る舵の動作を比較した図である。図 9 は、本実施形態と参考例とでピッチ角の追従特性を比較した図である。図 10 は、本実施形態と参考例とでピッチ角に係る舵の動作を比較した図である。図 11 は、本実施形態と参考例とでアクチュエータの消費油量を比較した図である。図 7 - 11 において、目標値を一点鎖線 L_1 で示しており、参考例の特性を点線 L_2 で示しており、本実施形態の特性を線 L_3 （連続線）で示している。

30

【0073】

なお、図 7 における追従特性では、本実施形態と参考例とでセンサ部 25 の出力値を比較しており、図 8 及び 10 では、本実施形態と参考例とで舵の角度を比較している。また、図 11 の消費油量は、各アクチュエータで消費された合計消費油量を示している。

【0074】

図 9 に示すように、時刻 T_0 でピッチ角の目標値が変更されると、ピッチ角は目標値に追従して変化する。なお、図 9 では、変更されたピッチ角の設定値に基づいて目標軌道生成部 21 で生成した目標軌道が目標値として示されている。

【0075】

時刻 T_0 においてピッチ角の目標値が変更されると、ピッチ角と深度は互いに干渉しているため、図 7 に示すようにピッチ角の制御に伴って深度が変化する。深度の目標値は一定としているため、図 8 に示すように深度に係る舵が制御され、深度が目標値を保持するように制御される。

40

【0076】

ここで、図 7 に示すように、参考例（点線 L_2 ）における深度は、特に目標値近傍において細かく変動している。これは、センサ部 25 における量子化誤差、すなわち量子化を行う際に最小分解能単位で出力値が変動する現象（量子化振動）であり、厳密に線形化された線形化システム 28 が量子化誤差に対して敏感に反応し、図 8 や図 10 に示すように操作量が変動することにより制御量（深度）が変動している。

50

【0077】

これに対して、図7に示すように、フィルタ部26を用いた本願発明(線L3)における深度は、目標値近傍においても変動が抑制されている。すなわち、センサ部25の出力には量子化誤差が含まれているものの、フィルタ部26において制御量の真値を推定し、線形化フィードバック部24へ入力しているため、量子化誤差の影響を低減して、操作量の変動を抑制している。このため、図8に示すように、深度に係る舵の変動が抑制される。なお、なお、図10に示すように、ピッチ角に係る舵についても同様に変動が抑制される。

【0078】

このように、舵の頻繁な変動が抑制されることで、図11に示すように、参考例(点線L2)に対して、本実施形態(線L3)ではアクチュエータの消費油量を抑制することができる。すなわち、アクチュエータ等の消費エネルギーを抑制することができる。

10

【0079】

以上説明したように、本実施形態に係る制御装置20、及びその制御方法並びに制御プログラム、構造体によれば、制御対象30の非線形要素を厳密な線形化手法を用いて線形化(厳密な線形化)を行うため、制御精度を向上させることが可能となる。また、厳密な線形化手法を適用した場合には、制御対象30を厳密に線形化した線形化システム28における入力変換部23や線形化フィードバック部24の入力の感度が高くなり、例えば入力されるセンサ値の量子化誤差(量子化に伴う最小分解能の遷移。量子化振動)に対して敏感に修正動作が働いてエネルギー消費が増加する可能性がある。そこで、制御対象30の制御量を量子化するセンサ部25と厳密な線形化を行う線形化フィードバック部24との間にフィルタ部26を設けることとした。フィルタ部26において、厳密な線形化システム28の数理モデルを用いてセンサ部25で量子化した制御量の推定連続値を出力することとしたため、線形化フィードバック部24に入力される値とフィードバック制御部22へ入力される値を連続値とすることができるため、量子化振動によるエネルギー消費の増加を抑制することが可能となる。

20

【0080】

すなわち、厳密な線形化手法を適用することによって制御精度を向上させることができ、そして、フィルタ部26においてセンサ部25の量子化された値を連続値に変換することによって量子化振動等に基づくエネルギー消費を抑制することが可能となる。

30

【0081】

本発明は、実施形態のみに限定されるものではなく、発明の要旨を逸脱しない範囲において、種々変形実施が可能である。

【0082】

例えば、上記実施形態では、厳密な線形化が適用された線形化システム28の伝達関数が2次の積分特性である場合を例として説明した。すなわち、線形化システム28の伝達関数が2次の積分特性である場合には、フィルタ部26において開ループ伝達関数が1次の積分特性となるように、調整部31において1次の微分フィルタを付加した。

【0083】

これを一般化すると、線形化システム28の伝達関数がn次の積分特性である場合(厳密な線形化後の対角行列の各対角成分がn次の積分特性である場合)には、フィルタ部26を図12のように構成することが可能である。すなわち、線形化システム28の伝達関数がn次の積分特性である場合には、数理モデルの伝達関数もn次の積分特性となるため、フィルタ部26において開ループ伝達関数が1次の積分特性となるように、調整部31の微分器をn-1次の微分要素とし、また、調整部31のローパスフィルタの特性についても、n-1次のローパス特性とする。すなわち、調整部31の伝達関数Gは、以下で示される。

40

【0084】

【数 7】

$$G = K_{ob} \left(\frac{s}{T_d s + 1} \right)^{n-1} \quad (8)$$

【0085】

(8)式に示すように、線形化システム28の伝達関数における積分要素の次数nに合わせて調整部31の伝達関数を設計することで、フィルタ部26を安定化させることができる。

【符号の説明】

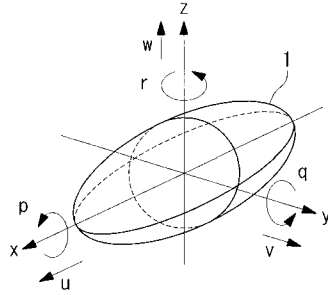
10

【0086】

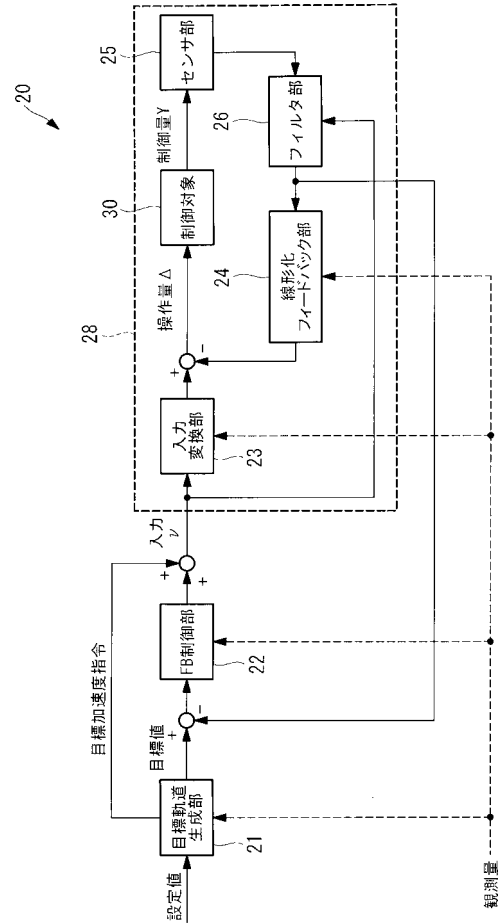
- 1 : 水中航走体
- 20 : 制御装置
- 21 : 目標軌道生成部
- 22 : フィードバック制御部
- 23 : 入力変換部
- 24 : 線形化フィードバック部
- 25 : センサ部
- 26 : フィルタ部
- 28 : 線形化システム
- 30 : 制御対象
- 31 : 調整部
- 32 : 第1ディレイ
- 33 : 演算部
- 34 : 第2ディレイ
- 35 : 量子化部

20

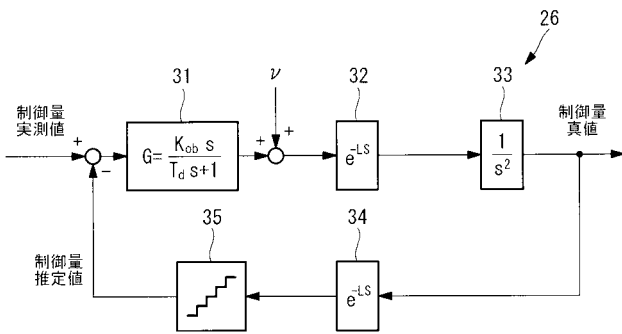
【図1】



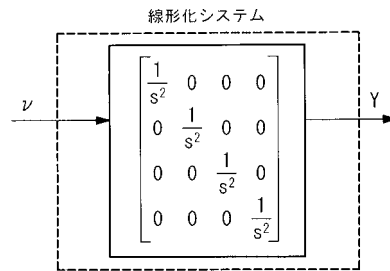
【図2】



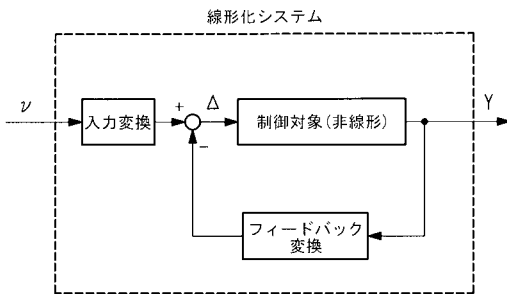
【図3】



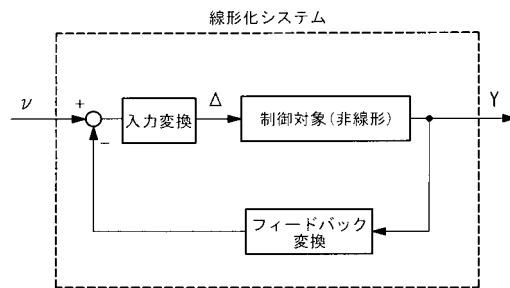
【図5】



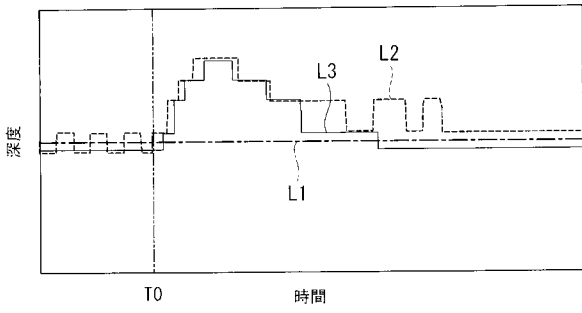
【図4】



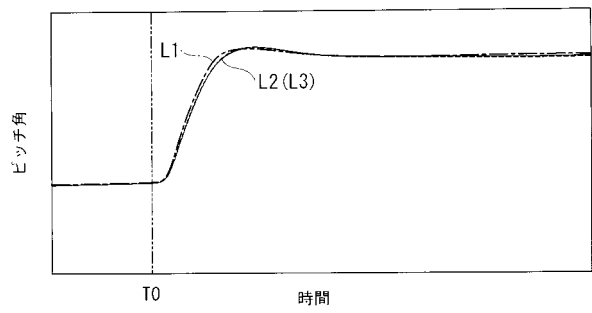
【図6】



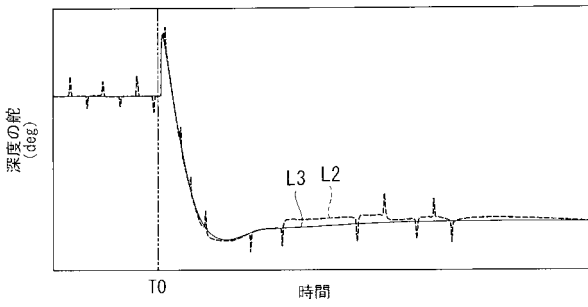
【 図 7 】



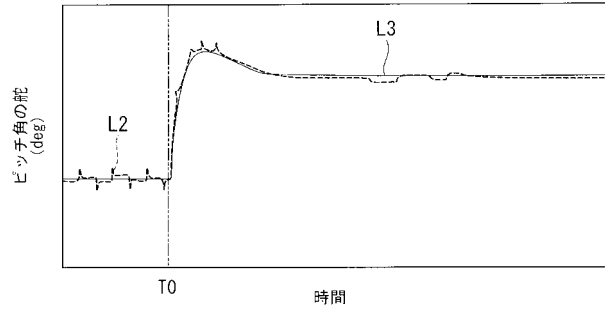
【 図 9 】



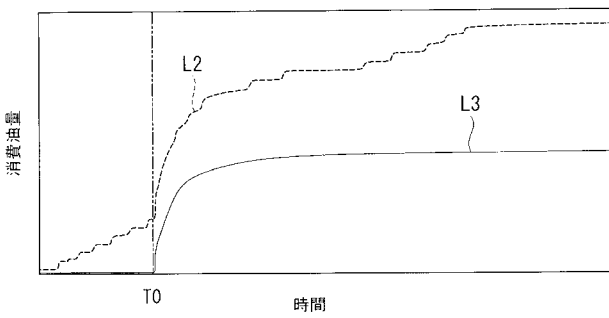
【 図 8 】



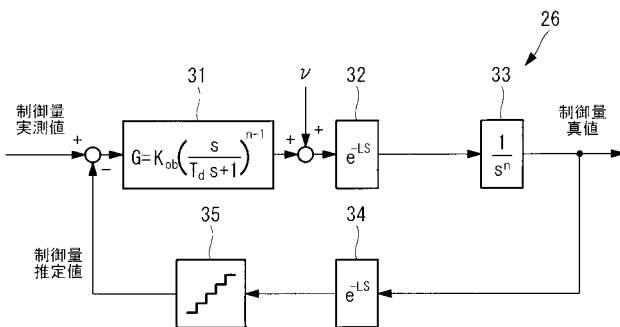
【 図 10 】



【 図 11 】



【 図 12 】



フロントページの続き

(72)発明者 望月 慶佑

東京都港区港南二丁目16番5号 三菱重工業株式会社内

Fターム(参考) 5H004 GA04 GA36 GB14 HA07 HB07 JB19 LA05 MA12