

(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2019-153239
(P2019-153239A)

(43) 公開日 令和1年9月12日(2019.9.12)

(51) Int. Cl. F I テーマコード(参考)
G05B 11/32 (2006.01) G05B 11/32 F 5H004

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願2018-40029 (P2018-40029)
(22) 出願日 平成30年3月6日(2018.3.6)

(71) 出願人 518126144
株式会社三井E&Sマシナリー
東京都中央区築地5丁目6番4号
(74) 代理人 110001368
清流国際特許業務法人
(71) 出願人 504159235
国立大学法人 熊本大学
熊本県熊本市中央区黒髪二丁目39番1号
(74) 代理人 110001368
清流国際特許業務法人
(74) 代理人 100129252
弁理士 昼間 孝良
(74) 代理人 100155033
弁理士 境澤 正夫

最終頁に続く

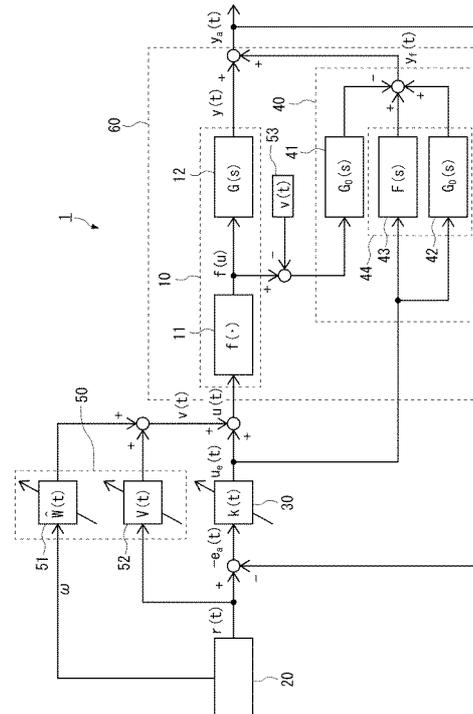
(54) 【発明の名称】 制御装置

(57) 【要約】

【課題】 入力制限などの非線形要素を有する制御対象に対して、ロバストな単純適応制御を行って出力を目標値へと速やかに追従させることができる制御装置を提供する。

【解決手段】 制御装置1は、フィードバック制御器30及び並列フィードフォワード補償器40を備え、信号の入力順にフィードバック制御器30、非線形要素11、及び、動特性要素12が直列に配置されると共に、並列フィードフォワード補償器40が制御対象10及び動特性要素12のそれぞれに対して並列に配置され、並列フィードフォワード補償器40が、拡大系要素60が概強正実条件を満たしたと見做せる補償をし、フィードバック制御器30が、拡大系要素60に対してフィードバック制御を行う構成にした。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

非線形要素と動特性要素とを有する制御対象を制御する制御装置において、

フィードバック制御器及び並列フィードフォワード補償器を備え、信号の入力順に前記フィードバック制御器、前記非線形要素、及び、前記動特性要素が直列に接続されると共に、前記並列フィードフォワード補償器が前記制御対象及びその制御対象が有する前記動特性要素のそれぞれに対して並列に接続され、

前記並列フィードフォワード補償器に、前記フィードバック制御器から出力される値及び前記非線形要素から出力される値の二つの値が入力されて、前記並列フィードフォワード補償器が、前記制御対象及び前記並列フィードフォワード補償器を併せた拡大系要素が概強正実条件を満たす補償をし、

前記フィードバック制御器が、前記拡大系要素に対してフィードバック制御を行う構成にしたことを特徴とする制御装置。

【請求項 2】

前記並列フィードフォワード補償器は、第一ノミナル部、第二ノミナル部、及び補償部を有し、

前記第一ノミナル部及び前記第二ノミナル部が、前記動特性要素のノミナルモデルに基づいて設計され、前記補償部が、この補償部及び前記第二ノミナル部を併せた併合要素が概強正実条件を満たすように設計され、

前記第一ノミナル部に前記非線形要素から出力される値が入力され、前記第二ノミナル部及び前記補償部に前記フィードバック制御器から出力される値が入力され、

前記第二ノミナル部から出力された値と前記補償部から出力された値とを加算した値から、前記第一ノミナル部から出力された値を減算した値を出力する請求項 1 に記載の制御装置。

【請求項 3】

前記フィードバック制御器に対して並列に接続されるフィードフォワード制御器を備え、

前記非線形要素に入力される値は、前記フィードバック制御器から出力された値と、前記フィードフォワード制御器から出力された値とを加算した値であり、

前記非線形要素から出力されて、前記並列フィードフォワード補償器に入力される値は、前記非線形要素と前記並列フィードフォワード補償器との間で、前記フィードフォワード制御器から出力された値を減算した値である請求項 1 又は 2 に記載の制御装置。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、制御装置に関し、具体的には、制御対象に対して単純適応制御を行って出力を目標値へと追従させる制御装置に関する。

【背景技術】**【0002】**

本願発明の発明者らのうちの一人は、むだ時間を有する制御対象に対して単純適応制御を行う制御装置を提案している（例えば、特許文献 1 参照）。この制御装置は、むだ時間を有する制御対象に対して、むだ時間を有する並列フィードフォワード補償器を導入して、その並列フィードフォワード補償器が制御対象と並列フィードフォワード補償器とを併せた伝達関数が概強正実条件を満たす補償をする装置である。

【先行技術文献】**【特許文献】****【0003】**

【特許文献 1】国際公開第 2013 / 187414 号

【発明の概要】**【発明が解決しようとする課題】**

10

20

30

40

50

【 0 0 0 4 】

ところで、コンテナクレーンにおいては、搬送作業で吊り荷のコンテナに対して鉛直軸回りの回転運動（スキュー運動）が発生することが知られている。このスキュー運動を制御するためのアクチュエータの制御は、吊り荷の状態による運動特性の変化やむだ時間による応答遅れに加えて、アクチュエータへの入力信号の振幅や変化率に対する入力制限が存在する。それ故、入力制限を考慮していない上記の特許文献 1 に記載の装置では、アクチュエータへの制御則に基づいた理想入力値と実際の入力値とが異なることになる。その結果、出力フィードバック制御が有効に機能しなくなり、制御性能の劣化や制御系の不安定化が生じていた。

【 0 0 0 5 】

本発明の目的は、入力制限などの非線形要素を有する制御対象に対して、ロバストな単純適応制御を行って出力を目標値へと速やかに追従させることができる制御装置を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 0 6 】

上記の目的を達成する本発明の制御装置は、非線形要素と動特性要素とを有する制御対象を制御する制御装置において、フィードバック制御器及び並列フィードフォワード補償器を備え、信号の入力順に前記フィードバック制御器、前記非線形要素、及び、前記動特性要素が直列に接続されると共に、前記並列フィードフォワード補償器が前記制御対象及びその制御対象が有する前記動特性要素のそれぞれに対して並列に接続され、前記並列フィードフォワード補償器に前記フィードバック制御器から出力される値及び前記非線形要素から出力される値の二つの値が入力されて、前記並列フィードフォワード補償器が、前記制御対象及び前記並列フィードフォワード補償器を併せた拡大系要素が概強正実条件を満たす補償をし、前記フィードバック制御器が、前記拡大系要素に対してフィードバック制御を行う構成にしたことを特徴とする。

【発明の効果】

【 0 0 0 7 】

本発明によれば、並列フィードフォワード補償器を、制御対象及びその制御対象が有する動特性要素のそれぞれに対して並列に接続することで、制御対象と並列フィードフォワード補償器とからなる拡大系要素が概強正実条件を満たす。それ故、拡大系要素に対する適応出力フィードバック制御系の漸近安定性を保証するには有利になり、ロバストな適応出力フィードバック制御により制御対象の出力を目標値へと速やかに追従させることができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 0 8 】

【図 1】制御装置の実施形態を例示するブロック図である。

【図 2】図 1 の並列フィードフォワード補償器を設計する基本概念を例示するブロック図である。

【図 3】コンテナクレーンにおける制御対象の非線形ダイナミクスを例示するブロック図である。

【図 4】制御装置及び並列フィードフォワード補償器を有さない従来技術の制御装置の数値シミュレーション結果である。

【図 5】制御装置及びフィードフォワード制御器を有さない制御装置の数値シミュレーション結果である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 0 9 】

以下、制御装置の実施形態について説明する。なお、本明細書の「^」はその前にある文字に対する上付き文字を表しているものとする。

【 0 0 1 0 】

図 1 に例示するように、制御装置 1 は、各種情報処理を行う CPU、その各種情報処理

10

20

30

40

50

を行うために用いられるプログラムや情報処理結果を読み書き可能な内部記憶装置、及び各種インターフェースなどから構成されるハードウェアである。制御装置 1 は、各機能要素として、制御対象 10、入力部 20、フィードバック制御器 30、並列フィードフォワード補償器 (PFC: Parallel Feedforward Compensator) 40、及び、フィードフォワード制御器 50 を備え、制御対象 10 及び並列フィードフォワード補償器 40 からなる拡大系要素 60 が形成される。各機能要素は、プログラムとして内部記憶装置に記憶されていて、適時、CPU により実行されている。なお、各機能要素としては、プログラムの他にそれぞれが独立して機能するプログラマブルコントローラ (PLC) で構成されてもよい。

【0011】

制御対象 (プラント) 10 は、入力値 $u(t)$ が入力されて、出力値 $y(t)$ が出力されるモデルであり、非線形要素 11 と動特性要素 12 とを有する。

【0012】

非線形要素 11 は、入力値 $u(t)$ が入力されて、操作値 $f(u)$ が出力されるモデルであり、線形ではシステムのダイナミクスが完全に捉えられないモデルである。非線形要素 11 としては、シグモイドやウェーブレットなどの動的な非線形推定器を用いるモデル、線形であるモデル内の例外となる勾配制限や飽和などの入力制限、及び不感帯などの静的なモデル、不明のパラメータを含む常微分方程式又は差分方程式を用いるモデルが例示される。また、非線形モデル 11 には、システム内に生じるむだ時間 (遅れ時間) も含むものとする。非線形要素 11 は、その非線形ダイナミクスが $f(\cdot)$ で表される。

【0013】

動特性要素 12 は、操作値 $f(u)$ が入力されて、出力値 $y(t)$ が出力されるモデルであり、制御対象 10 のうちの非線形要素 11 を除き、線形でシステムのダイナミクスが捉えられるモデルである。動特性要素 12 としては、一次遅れ系や二次遅れ系が例示される。動特性要素 12 は、その伝達関数が $G(s)$ で表される。

【0014】

入力部 20 は、目標値 $r(t)$ を出力する機能要素である。入力部 20 としては、操作レバー、マウスやキーボードなどのユーザーインターフェースが例示される。また、入力部 20 としては、センシング機器やタイマーを用いて、目標値 $r(t)$ を経時的に変化させるもの、装置の動作に基づいて目標値 $r(t)$ を自動的に入力するものも例示される。

【0015】

フィードバック制御器 30 は、信号の流れに関して入力部 20 と制御対象 10 との間に配置されて、制御対象 10 に対して直列に接続される。フィードバック制御器 30 は、制御対象 10 及び並列フィードフォワード補償器 40 を併せた拡大系要素 60 に対して適応出力フィードバック制御による単純適応制御 (SAC: Simple Adaptive Control) を行う制御器である。フィードバック制御器 30 は、目標値 $r(t)$ と拡大系要素 60 から出力される実出力値 $y_a(t)$ との偏差 $-e_a(t)$ ($= r(t) - y_a(t)$) が入力されて、その偏差 $-e_a(t)$ をゼロにする、あるいはゼロに近づける目標入力値 $u_a(t)$ が出力される。フィードバック制御器 30 の可変フィードバックゲインは、 $k(t)$ で表される。

【0016】

並列フィードフォワード補償器 40 は、制御対象 10 及び制御対象 10 のうちの動特性要素 12 のそれぞれに対して並列に接続される補償器である。並列フィードフォワード補償器 40 は、フィードバック制御器 30 から出力された制御入力値 $u_a(t)$ が入力されると共に、非線形要素 11 から出力された操作値 $f(u)$ が入力されて、拡大系要素 60 が概強正実 (ASPR: Almost Strictly Positive Real) 条件を満たす補償をする補償器である。

【0017】

ここで、概強正実条件とは、拡大系要素 60 の相対次数が「0」又は「1」であること、最高位係数が正であること、かつ、最小位相系であることの三つの条件である。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 8 】

並列フィードフォワード補償器 4 0 は、スミス法の考えを利用して設計された補償器である。また、並列フィードフォワード補償器 4 0 は、動特性要素 1 2 の伝達関数 $G(s)$ が未知であることから、スミス予測器における伝達関数の代わりに動特性要素 1 2 のノミナルモデル $G_0(s)$ を用いて構成される補償器である。

【 0 0 1 9 】

並列フィードフォワード補償器 4 0 は、第一ノミナル部 4 1、第二ノミナル部 4 2、及び、補償部 4 3 を有する。並列フィードフォワード補償器 4 0 は、第二ノミナル部 4 2 から出力された値及び補償部 4 3 から出力された値を加算した値から第一ノミナル部 4 1 から出力された値を減算した補償値 $y_f(t)$ が出力される。

10

【 0 0 2 0 】

第一ノミナル部 4 1 及び第二ノミナル部 4 2 は、スミス予測器に似た機能を担っており、適応出力フィードバックにより得られた閉ループが、非線形ダイナミクス $f(\cdot)$ のない拡大系要素 6 0 に対する線形閉ループ部と非線形ダイナミクス $f(\cdot)$ とが直列に接続された状態と見做せる機能を担う機能要素である。第一ノミナル部 4 1 及び第二ノミナル部 4 2 は、動特性要素 1 2 のノミナルモデルとして設計されて、そのノミナルモデルの伝達関数が、 $G_0(s)$ で表される。第一ノミナル部 4 1 は、非線形要素 1 1 から出力された操作値 $f(u)$ が入力され、第二ノミナル部 4 2 は、フィードバック制御器 3 0 から出力された制御入力値 $u_0(t)$ が入力される。

20

【 0 0 2 1 】

ここで、スミス法とは、フィードバック制御のループ内にむだ時間を含む制御対象のモデルを有し、むだ時間後の出力を予測して制御を行う方法である。つまり、スミス予測器は、制御対象が有するむだ時間をフィードバック制御の外側に出して、むだ時間を除いた一次遅れの制御対象をフィードバック制御することを可能にする補償器である。

【 0 0 2 2 】

補償部 4 3 は、拡大系要素 6 0 が概強正実条件を満たす補償をするものである。補償部 4 3 は、第二ノミナル部 4 2 及び補償部 4 3 を併せた併合要素 4 4 の伝達関数 $G^{\wedge}_0(s)$ が概強正実条件を満たすように設計され、その伝達関数が $F(s)$ で表される。補償部 4 3 は、フィードバック制御器 3 0 から出力された制御入力値 $u_0(t)$ が入力される。

制御対象 1 0 及び並列フィードフォワード補償器 4 0 を併せた拡大系要素 6 0 から出力される実出力値 $y_a(t)$ は、以下の数式 (1) で表される。

30

【 0 0 2 3 】

【 数 1 】

$$\begin{aligned}
 y_a(t) &= G(s)[f(u)] - G_0(s)[f(u)] \\
 &\quad + G_0(s)[u(t)] + F(s)[u(t)] \\
 &= (G(s) - G_0(s))[f(u)] \\
 &\quad + (G_0(s) + F(s))[u(t)] \\
 &\quad \cdot \cdot \cdot (1)
 \end{aligned}$$

【 0 0 2 4 】

上記の数式 (1) において、動特性要素 1 2 の伝達関数 $G(s)$ に対してノミナルモデルの伝達関数 $G_0(s)$ の近似誤差が小さいとすると、実出力値 $y_a(t)$ は、以下の数式

50

(2)と見做せる。近似誤差が小さいとは、想定される周波数帯域で $G(s) [f(u)]$ と $G_0(s) [f(u)]$ の出力値の誤差が小さいことであり、 $G(s) - G_0(s)$ の H_2 ノルムが十分に小さいことである。

【0025】

【数2】

$$y_a(t) = (G_0(s) + F(s))[u(t)] \quad \dots (2)$$

【0026】

10

つまり、実出力値 $y_a(t)$ は、併合要素44の伝達関数 $G_a(s)$ で表される。上述したとおり、補償部43は、併合要素44に概強正実条件を満たさせるように設計されていることから、併合要素44の伝達関数 $G_a(s)$ は概強正実条件を満たす。従って、拡大系要素60は、概強正実条件を満たすことになる。

【0027】

図2は、制御対象10の非線形要素11にむだ時間(伝達関数が e^{-Ts})が含まれたと仮定して、そのむだ時間をスミス法の考えに基づいて、フィードバック制御の閉ループの外に追い出したと見做せることを説明するものである。ここで、非線形要素11からむだ時間を除いた非線形ダイナミクスを $g(\cdot)$ とし、動特性要素12にむだ時間を追加した伝達関数を $G(s)e^{-Ts}$ とする。また、スミス予測器45の伝達関数を $P(s)$ とする

20

【0028】

ここで、操作値 $g(u)$ が制御入力値 $u_a(t)$ と等しい場合 ($u_a(t) = g(u)$) であれば、スミス予測器45の伝達関数 $P(s)$ は、以下の数式(3)のように設計される。なお、以下の数式では、 $G_a(s) = G(s) + F(s)$ であり、 $G_a(s)$ が概強正実条件を満たすものとする。

【0029】

【数3】

$$P(s) = G_a(s) - G_a(s)e^{-Ts} \quad \dots (3)$$

【0030】

スミス予測器15を上記の数式(3)のように設計すると、実出力値 $y_a(t)$ は以下の数式(4)で表される。

【0031】

【数4】

$$y_a(t) = \frac{CG_a(s)}{1 + CG_a(s)} e^{-Ts} [r(t)] \quad \dots (4)$$

【0032】

上記の数式(4)に示すように、操作値 $g(u)$ が制御入力値 $u_a(t)$ と等しい場合は、むだ時間をフィードバック制御の閉ループの外側に追い出したと見做せて、むだ時間を除いた一次遅れの動特性要素12をフィードバック制御することと等価になる。

【0033】

しかし、操作値 $g(u)$ が制御入力値 $u_a(t)$ と等しく無い場合であれば、非線形ダイナミクス $g(\cdot)$ を考慮して、スミス予測器45の出力 $f_p(t)$ は、以下の数式(5)となるように設計される。なお、伝達関数 $G(s)$ は未知であるため、伝達関数 $G_a(s)$

50

s)も未知である。そこで、動特性要素12のノミナルモデルの伝達関数を $G_o(s)$ とすると、伝達関数 $G_a(s)$ の代わりに、既知の伝達関数として併合要素44の伝達関数 $\widehat{G}_a(s) (= G_o(s) + F(s))$ を用いる。

【0034】

【数5】

$$f_p(t) = \widehat{G}_a(s)[u(t)] - \widehat{G}_a(s)e^{-Ts}[g(u)] \cdots (5)$$

【0035】

上記の数式(5)のようにスミス予測器45が設計されると、制御入力値 $u_e(t)$ は以下の数式(6)で表される。

【0036】

【数6】

$$\begin{aligned} u_e(t) &= C[r(t) - y_a(t)] - C[f_p(t)] \\ &= C[r(t) - y_a(t)] + C\widehat{G}_a(s)e^{-Ts}[g(u)] \\ u_e(t) &= \frac{C}{1 + C\widehat{G}_a(s)}[r(t)] \\ &\quad + \frac{C(\widehat{G}_a(s) - G_a(s))}{1 + C\widehat{G}_a(s)}e^{-Ts}[g(u)] \\ &\quad \cdots (6) \end{aligned}$$

【0037】

$G_o(s)$ の近似誤差が小さい場合、上記の数式(6)は以下の数式(7)のように表される。

【0038】

【数7】

$$u_e(t) = \frac{C}{1 + C\widehat{G}_a(s)}[r(t)] \cdots (7)$$

上記の数式(7)で示す制御入力値 $u_e(t)$ が印加されたとき、実出力値 $y_a(t)$ は、以下の数式(8)で表される。

【0039】

【数 8】

$$y_a(t) = \widehat{G}_a(s) e^{-Ts} \left[g \left(\frac{C}{1 + C\widehat{G}_a(s)} [r(t)] \right) \right] \dots (8)$$

【0040】

10

よって、 $u_a(t) = g(u)$ のとき、数式(4)と同様になり、むだ時間をフィードバック制御の閉ループの外側に追い出したと見做せて、むだ時間を除いた一次遅れの動特性要素12をフィードバック制御することと等価になる。

【0041】

上記の数式(5)を補償器としてもつブロック図2を書き換えると、図1に例示する拡大系要素60のブロック図と等価となる。なお、図1では、 $C = k(t)$ である。また、非線形ダイナミクス $f(\cdot)$ と、非線形ダイナミクス $g(\cdot)$ 及びむだ時間(e^{-Ts})とは等価であることから、むだ時間を非線形要素11に含ませている。一方で、むだ時間を動特性要素12に含ませる場合は、同様にむだ時間を第一ノミナル部41に含ませればよい。

20

【0042】

図1に例示するように、フィードフォワード制御器50は、並列フィードフォワード補償器40の内側に印加され、フィードバック制御器30に対して並列に接続されると共に並列フィードフォワード補償器40には印加されないように構成される制御器である。フィードフォワード制御器50は、理想入力部51、出力誤差入力部52、及び入力除去部53を有し、理想入力部51及び出力誤差入力部52が互いに並列に接続される。

【0043】

理想入力部51は、目標値 $r(t)$ の状態ベクトルが入力されて、理想入力値 $v^*(t)$ が出力される。理想入力値 $v^*(t)$ は、放射状基底関数ネットワーク(RBFN: Radial Basis Function Network)を用いて、目標値 $r(t)$ に対して制御対象10の出力値 $y(t)$ が完全追従を達成するように近似算出された数値である。

30

【0044】

未知の理想入力値を $v_{nn}(t)$ とし、放射状基底関数ネットワークを用いて近似すると、その未知の理想入力値 $v_{nn}(t)$ は以下の数式(9)~数式(12)で表される。ここで、 W は重みベクトルとし、 l はニューラルネットワークのノード数とし、 μ_i 及び σ_i は設計パラメータとする。

【0045】

なお、放射状基底関数ネットワークは、非線形関数を放射状基底関数で展開するニューラルネットワークであり、初期値依存が無く、数あるニューラルネットワークのうちで処理が高速なことで知られている。また、放射状基底関数は、円形の等高線を持つ関数であり、中心点から離間するにつれて値が単調に減少する関数であり、ガウス関数が例示される。

40

【0046】

【数 9】

$$v_{nn}(t) = W^T S(\omega) \quad \cdot \cdot \cdot (9)$$

$$W = [\omega_1, \dots, \omega_l]^T \in R^l \quad \cdot \cdot \cdot (10)$$

$$S(\omega) = [S_1(\omega), \dots, S_l(\omega)]^T \quad \cdot \cdot \cdot (11)$$

$$S_i(\omega) = \exp \left[\frac{-(\omega - \mu_i)^T (\omega - \mu_i)}{\eta_i^2} \right] \\ (i = 1, 2, \dots, l) \quad \cdot \cdot \cdot (12)$$

【0047】

上記の数式(9)～数式(12)が成立するとき、十分大きなノード数 l に対して、あるコンパクト集合 (R^q) で、以下の数式(13)を満足する理想重み W^* が存在する。

20

【0048】

【数10】

$$W^* \triangleq \arg \min_{W \in R^l} \left\{ \sup_{\omega \in \Omega_\omega} |v^* - W^T S(\omega)| \right\} \quad \cdot \cdot \cdot (13)$$

【0049】

従って、理想入力値 $v^*(t)$ は、以下の数式(14)で構成される。なお、理想重み W^* は未知であることから、理想重みの推定値 $\hat{W}(t)$ を用いることとする。

30

【0050】

【数11】

$$v^*(t) = \hat{W}(t)^T S(\omega) \quad \cdot \cdot \cdot (14)$$

【0051】

理想入力部 51 は、放射状基底関数ネットワーク以外のニューラルネットワーク（例えば、畳み込みニューラルネットワークや再帰型ニューラルネットワーク）や近似のシステムの逆数（逆関数）により構成してもよい。但し、理想入力部 51 は、近似のシステムの逆数よりもニューラルネットワークを用いることが好ましく、種々のニューラルネットワークのうちの放射状基底関数ネットワークを用いることがより好ましい。ニューラルネットワークを用いることで、近似のシステムの逆数を採用する場合に生じる新たなシステムを求める必要がなくなり、システムを求める労力を削減すると共に、精度を向上することができる。また、ニューラルネットワーク放射状基底関数ネットワークは、未知の重みベクトル \times 既知の基底関数という他のニューラルネットワークに比して簡素な構造である。それ故、理想入力部 51 が放射状基底関数ネットワークを用いることで、他のニューラルネットワークを用いた場合に生じる算出に要する時間を短縮し、多くの実験や試験による調整を省くことができる。

40

50

【 0 0 5 2 】

出力誤差入力部 5 2 は、目標値 $r(t)$ が入力されて、補正值 $V(t)$ が出力される。補正值 $V(t)$ は、目標値 $r(t)$ が入力された場合に、実際に生じる出力誤差 $e(t)$ に基づいて、以下の数式 (15) で表される。ここで、 $1/K_n$ を定常状態における目標値 $r(t)$ のノミナル値とする。

【 0 0 5 3 】

【 数 1 2 】

$$V(t) = \frac{1}{K_n} - \alpha \int \frac{e(t)}{1 + |e(t)|} dt \quad \dots (15)$$

【 0 0 5 4 】

出力誤差入力部 5 2 は、定常状態の目標値 $r(t)$ の誤差を正規化した誤差の積分項により補正する機能要素である。出力誤差入力部 5 2 を設けることで、目標値 $r(t)$ が大きく変動した場合に、非線形要素 1 1 により理想入力値 5 1 から出力される理想入力値 $v(t)$ のみでは追従が間に合わない事態を解消するには有利になる。

制御装置 1 の単純適応制御における特性方程式は、以下の数式 (16) で表される。

【 0 0 5 5 】

【 数 1 3 】

20

$$u(t) = u_e(t) + v(t)$$

$$y_a(t) = y(t) + y_f(t)$$

$$e_a(t) = y_a(t) - r(t) \quad \dots (16)$$

$$u_e(t) = -k(t)e_a(t)$$

$$v(t) = \hat{W}(t)^T S(\omega) + V(t)r(t)$$

【 0 0 5 6 】

また、上記の数式 (16) の $k(t)$ 及び $\hat{W}(t)$ は、以下の数式 (17)、(18) で表されるシグマ修正項を含む積分形パラメータ調整則 (適応調整則) により求める。

【 0 0 5 7 】

【 数 1 4 】

$$\dot{k}(t) = \gamma e_a^2(t) - \sigma k(t) \quad \dots (17)$$

$$\dot{\hat{W}}(t) = -\Gamma S(\omega)e_a(t) - \sigma_\omega \hat{W}(t) \quad \dots (18)$$

【 0 0 5 8 】

以上のように、制御装置 1 は、並列フィードフォワード補償器 4 0 を、制御対象 1 0 の非線形要素 1 1 と動特性要素 1 2 とのそれぞれに対して並列に接続することで、動特性要素 1 2 と並列フィードフォワード補償器 4 0 とからなる拡大系要素 6 0 が概強正実条件を満たす。それ故、拡大系要素 6 0 に対する数式 (16) ~ 数式 (18) で構成される適応

50

出力フィードバック制御系の漸近安定性を保証するには有利になり、ロバストな適応出力フィードバック制御により実出力値 $y_a(t)$ を目標値 $r(t)$ へと速やかに追従させることができる。

【0059】

また、制御装置 1 は、フィードフォワード制御器 50 を、並列フィードフォワード補償器 40 の内側に印加することで、制御対象 10 の不確かさや特性変化のばらつきが大きい場合でも、実出力値 $y_a(t)$ が目標値 $r(t)$ に完全追従するまでに要する時間を短縮することができる。

【0060】

具体的に、コンテナクレーンにおけるスキュー運動に関するアクチュエータの制御に、制御装置 1 による単純適応制御を行った場合の結果を示す。

10

【0061】

ここで、スキュー運動に関するアクチュエータを制御対象 10 とした動特性要素 12 の伝達関数 $G(s)$ は以下の数式 (19) で表される。なお、 K_1 をゲインとし、 ω をスキュー角周波数とし、 ζ を減衰率とする。検証では、 $K_1 = 0.0098$ 、 $\omega = 0.4$ 、 $\zeta = 0.01$ を与えることとし、この真の値は未知とする。ただし、下記に示すノミナル値は既知で与えられているものとする。また、動特性要素 12 のノミナルモデルの伝達関数 $G_0(s)$ は、以下の数式 (20) で表される。なお、ノミナル値として、 $K_n = 0.01$ 、 $\omega_n = 0.5$ 、 $\zeta_n = 1$ を与えることとする。

【0062】

20

【数 15】

$$G(s) = \frac{K_1 \omega^2}{s^2 + 2\zeta \omega s + \omega^2} \quad \dots (19)$$

【0063】

【数 16】

$$G_0(s) = \frac{K_n \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2} \quad \dots (20)$$

【0064】

スキュー運動に関するアクチュエータを制御対象 10 とした非線形要素 11 の非線形ダイナミクス $f(\cdot)$ は、図 3 で表される。なお、 τ をアクチュエータの時定数とし、 T をむだ時間とし、 K_J を静的ゲインとし、 K_{px} 、 K_{pv} をフィードバックゲインとする。 τ 、 T 、 K_J は既知であり、 K_{px} 、 K_{pv} は予め実験や試験により適切な値に調整されているものとする。検証では、 $\tau = 0.1$ 、 $T = 0.5$ 、 $K_J = 0.5$ 、 $K_{px} = 21.9296$ 、 $K_{pv} = 0.0981$ を与えることとする。また、飽和 (Saturation) の上下限値を ± 100 とし、変化率の制限の上下限値を ± 200 とする。

40

【0065】

補償部 43 の伝達関数 $F(s)$ は、以下の数式 (21) で表される。なお、制御対象 10 が定常状態の場合に、並列フィードフォワード補償器 40 の出力である補償値 $y_f(t)$ が「ゼロ」に収束するものとする。検証では、 $\tau_1 = 0.1$ 、 $\tau_2 = 0.002$ 、 $\tau_3 = 0.001$ 、 $a = 0.1$ 、 $b = 1$ とする。

【0066】

【数 17】

$$F(s) = \left(\frac{\beta_1}{(s + \alpha_1)^2} + \frac{\beta_2}{s + \alpha_1} \right) \frac{bs}{s + a}$$

$$\alpha_1 > 0, \beta_1, \beta_2 > 0 \quad \cdot \cdot \cdot (21)$$

【0067】

10

並列フィードフォワード補償器 40 は、上記の検証のように、 β_1 、 β_2 を小さくすることで、出力値 $y(t)$ と実出力値 $y_a(t)$ の誤差を小さくすることができる。但し、 β_1 、 β_2 を小さくしすぎると、ノイズの影響もありロバスト性が低減するおそれがある。そこで、並列フィードフォワード補償器 40 は、微分項を含むプロパーなフィルタ ($bs / (s + a)$) を付加することで、定常状態における並列フィードフォワード補償器 40 の影響を無くすることができる。

【0068】

上記の数式 (17)、(18) における設計パラメータとして、 $\beta_1 = 1.0 \times 10^5$ 、 $\beta_2 = 1.0 \times 10^{-3}$ 、 $\alpha_1 = 1.0 \times 10^2$ 、 $a = 1.0 \times 10^{-2}$ 、 $S(\cdot) = r(t)$ 、 $n = 2$ とする。

20

【0069】

図 4 は、目標値 $r(t)$ を一定とし、実出力値 $y_a(t)$ に対して初期値を与えた場合のシミュレーションを示しており、実線及び点線が実施形態の制御装置 1 による結果を示し、一点鎖線が並列フィードフォワード補償器 40 を有さない従来技術の制御装置による結果 ($Y(t)$ 、 $F(u)$) を示している。制御装置 1 の単純適応制御では、実出力値 $y_a(t)$ が目標値 $r(t)$ に対して追従し、経時的に収束する。一方、従来技術の制御装置では、出力値 $Y(t)$ が目標値 $r(t)$ に対して追従せず、収束しない。

【0070】

図 5 は、目標値 $r(t)$ に対して初期値を与えたシミュレーションを示しており、実線及び点線が実施形態の制御装置 1 による結果を示し、一点鎖線がフィードフォワード制御器 50 を有さない制御装置 1 による結果 ($y_b(t)$) を示している。なお、ここでは、制御対象 10 のゲイン K_1 が誤差 50% を含むように $K_1 = 0.0147$ を与えることとし、フィードフォワード制御器 50 を有さない制御装置 1 には、代わりに固定ゲイン $1/0.01$ のみを印加することとする。制御対象 10 のゲイン K_1 の値と、ノミナルモデル $G_0(s)$ のノミナル値 K_n の値が大きくずれた場合でも、制御装置 1 の単純適応制御では、実出力値 $y_a(t)$ が速やかに目標値 $r(t)$ に対して追従する。一方、フィードフォワード制御器 50 を有さない制御装置 1 では、追従に要する時間が長い。

30

【0071】

既述した実施形態では、制御対象 10 としてコンテナクレーンの吊り荷に生じるスキュー回転運動を制御するアクチュエータを例示したが、制御対象としては、本実施形態に限定されない。

40

【0072】

既述した実施形態では、フィードバック制御器 30 に対して並列に接続されるフィードフォワード制御器 50 を備えた例を説明したが、フィードフォワード制御器 50 を備えなくても、実出力値 $y_a(t)$ を目標値 $r(t)$ に追従に要する時間が短いことが見込めるようであれば、フィードフォワード制御器 50 を備えなくてもよい。

【符号の説明】

【0073】

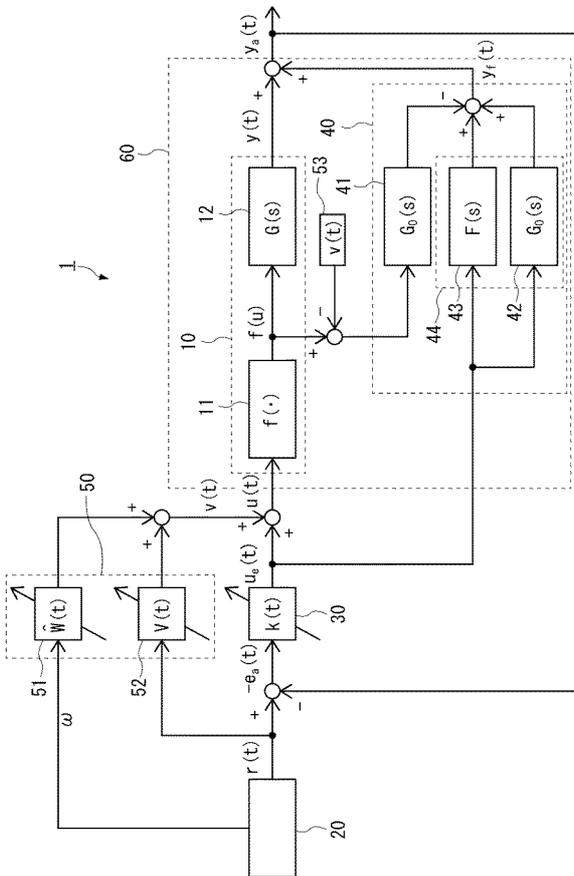
1 制御装置

10 制御対象

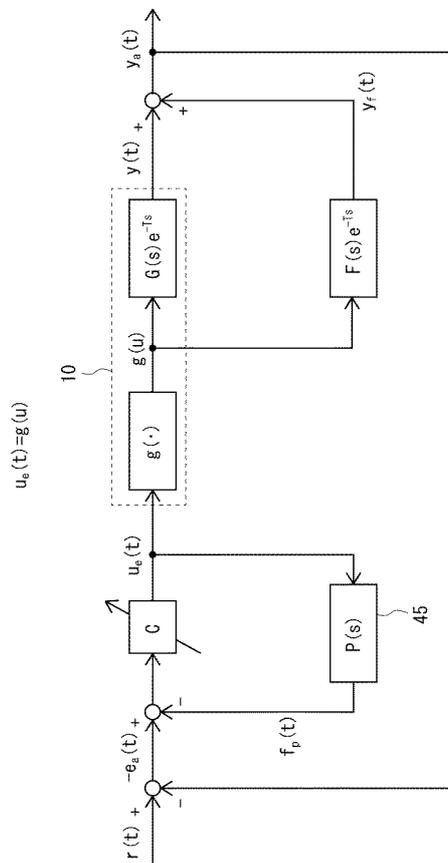
50

- 1 1 非線形要素
- 1 2 動特性要素
- 3 0 フィードバック制御器
- 4 0 並列フィードフォワード補償器
- 6 0 拡大系要素

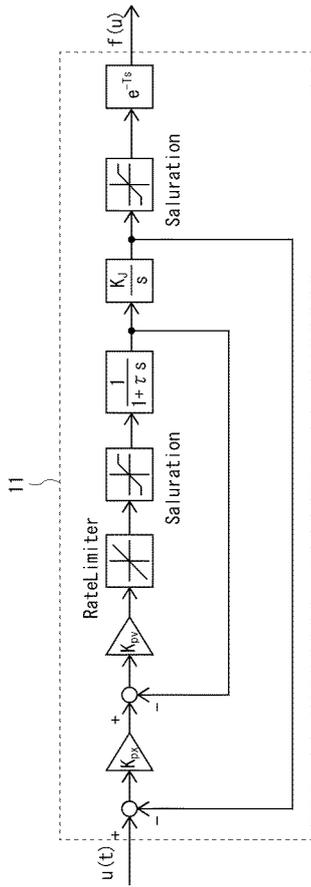
【図 1】



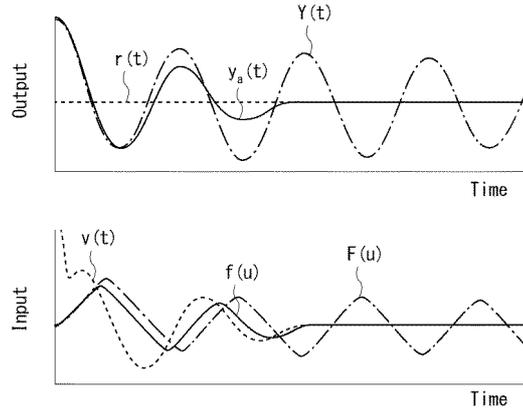
【図 2】



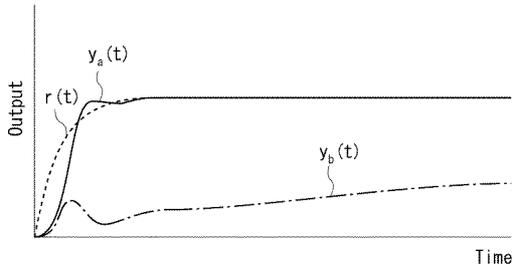
【 図 3 】



【 図 4 】



【 図 5 】



フロントページの続き

- (72)発明者 中田 成幸
岡山県玉野市玉3丁目1番1号 三井造船株式会社玉野事業所内
- (72)発明者 星島 一輝
岡山県玉野市玉3丁目1番1号 三井造船株式会社玉野事業所内
- (72)発明者 宮田 淳也
大分県大分市日吉原3番地 三井造船株式会社大分事業所内
- (72)発明者 水本 郁朗
熊本県熊本市中央区黒髪2丁目3番1号 国立大学法人熊本大学内
- (72)発明者 佐野 雅人
熊本県熊本市中央区黒髪2丁目3番1号 国立大学法人熊本大学内
- Fターム(参考) 5H004 GA02 GA05 GB15 KB01 KB32 KC33