安定性と速応性に関するロバスト性能指標 に基づくマルチプルコントロールシステム

学生員 稲葉雅章 (東北大学) 非会員 郭 海蛟 (東北大学)
正 員 阿部健一 (東北大学) 正 員 中尾和夫 (大阪工業大学)

Modelless Multiple Control Systems Switched by Robust Performance Criteria
Concerned with Stability and Responsiveness

Masaaki Inaba, Student Member, Hai-Jiao Guo, Non-member, Kenichi Abe, Member
(Tohoku University) and Kazuo Nakao, Member (Osaka Institute of Technology)

The aim of this paper is to propose adaptive control systems and a methodology for the design of them. We use multiple controllers to control a nonlinear plant whose parameters widely change without making use of any plant models. The basic ideas of adaptation by the proposed multiple controllers are both to settle the plant output to the desired reference signal while gradually narrowing down uncertainties of plant parameter values by switching and to keep the plant output stable for a series of switching. Multiple controllers consist of several basic controllers and a switching rule. We introduce two robust performance criteria into each basic controller, by which we try to guarantee stability and responsiveness of the system affected by parameter fluctuations. Switching rule utilizes only tracking error signal between the plant output and the desired reference signal, and simply switches a basic controller in a predefined sequence at a constant switching time intervals. The procedure for constructing multiple controllers is divided into two processes, the generating process and the selecting process. In the former process, a number of candidates for the basic controllers are produced. In the latter process, several basic controllers are selected from the candidates, so that basic controllers will satisfy robust performance requirements for multiple controllers. To illustrate the effectiveness of our approach, we apply the proposed system to the cart-pole balancing problem.

キーワード：マルチプルコントローラ、非線形プラント、パラメータ変動、ロバスト性能、安定性、速応性

1. まえがき

大きく変動するパラメータをもつ非線形プラントに対する適応制御の研究は、近年最も注目されている研究分野の一つである⁽¹⁾。とくに、この数年においてはマルチプルコントローラを用いた適応制御システムが盛んに研究されている⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。これらのシステム構成方法は、スイッチングルールが利用する情報により、大きく2種類に分類することができる。第1のシステム構成方法では、パラメータ推定器により推定されたパラメータ値を基にスイッチングが行なわれる。菅野はファジィ適応制御システムを提案している⁽²⁾。予め、モデルプラントとよばれる、代表的なプラントパラメータ値をもつ複数のプラントに対して、ファジィ制御則を作成しておく。実際の制御では推定されたパラメータ値を基に、作成しておいた制御則から適当なコントローラを推論する。佐武らはファジィ適応制御の考え方を雨水ボ

ンプの協調制御に適用している⁽³⁾。これに対し第2のシステム構成方法では、プラント出力と複数の同定モデル間の同定誤差を基にスイッチングが行なわれる。Narendraらは同定誤差を基にコントローラのスイッチングと同定モデルの修正を行なう適応制御システムを提案している⁽⁴⁾。またNarendraらはこれを非線形システムに拡張し、8個の同定モデルを用いて2自由度のスカラ形ダイレクト・ドライブ・アームの制御を行ない良好な実験結果を得ている⁽⁵⁾。これらのシステムは多くの成果をあげているが、プラントの動特性が未知で正確なプラントモデルが得られない場合には、システムの制御性能は低下し、不安定になることさえあり得る。

本論文の目的は、プラントモデルを必要としないマルチプルコントローラ、およびその設計方法の提案である。提案するマルチプルコントローラによる適応制御の基本的な考え方は次の2点である。1) スwitchングによりパラメータ

値の不確定さを徐々に減少させ、プラント出力を目標入力に整定させる。2) 一連のスイッチングの間はプラント出力を安定に保つ。マルチプルコントローラは複数のベーシックコントローラとスイッチングルールから構成される。各ベーシックコントローラには、安定性と速応性に関する2つのロバスト性能指標を導入する。ベーシックコントローラは予め決められた順番に、一定時間間隔でスイッチングされる。スイッチングはプラント出力が目標入力に整定するまで続けられる。スイッチングルールが利用する情報は、目標入力とプラント出力の偏差のみである。

マルチプルコントローラの設計プロセスは、生成プロセスと選択プロセスに分けられる。生成プロセスではベーシックコントローラの候補を多数生成する。各候補はある代表的なパラメータ値をもつプラントに対して、規定の制御性能を満足するコントローラである。選択プロセスでは複数の候補をベーシックコントローラとして選択する。代表的なパラメータ値をもつ異なる複数個のプラントに各候補を適用する。得られる各プラントに対する制御性能指標を基に、パラメータ変動に対するロバスト性能を評価する。各候補の相互の関係を、システムのロバスト性能指標を基に行列表現する。この行列表現を用いて選択アルゴリズムにより、可能な候補の組合せの中から一つの組合せをベーシックコントローラとして選択する。

以下、第2章では問題設定について述べる。第3章ではベーシックコントローラに安定性と速応性に関するロバスト性能指標を導入する。第4章では適応制御システムの構成について述べる。第5章ではマルチプルコントローラの設計方法について述べる。第6章では提案するマルチプルコントローラを台車-振子系の安定化制御問題に適用する。第7章では提案するシステムについて考察を行なう。第8章はむすびである。

2. 問題設定

環境の変化や経年変化などによって、動特性が大きく変わるプラントを想定しているが、ここでは、プラントは次の仮定 A1)~A4) を満足するものとする。

- A1) プラントは可制御であり、動特性は非線系かつ未知である。
- A2) プラントの動特性の変動は1つのプラントパラメータ変動にのみ起因し、プラントパラメータ変動区間 F は既知である。
- A3) コントローラ設計時、設計者は N_P 個の代表的なプラントを得ることができる。これらの代表的なプラントは、それぞれプラントパラメータ変動区間 $F = [p(1), p(N_P)]$ 内の代表的なプラントパラメータ値 $p(i)$, ($i=1, 2, \dots, N_P$) をもつ。
- A4) 実際の制御の間、プラントパラメータ値が変動区間内のどの値をとっているかは知ることができない。

これらの仮定を満足するプラントに対して、プラントモデルを用いずに、目標入力とプラント出力の偏差のみに基づき

図1 拘束時間と整定時間

Fig.1. Holding Time and Settling Time.

スイッチングを行なうマルチプルコントローラを設計する。

3. ベーシックコントローラ

マルチプルコントローラを設計するために、2つのロバスト性能指標をベーシックコントローラに導入する。各ロバスト性能はベーシックコントローラを異なる N_P 個の代表的なプラントに適用したときの、 N_P 個の制御性能指標を用いて評価される。

(3-1) 制御性能の評価 フィードバックシステムの設計においては、システムが安定であることと、任意の目標入力に対してプラントの出力を速やかに一致させることが重要である。システムの制御性能として安定性と速応性を考える。ベーシックコントローラを適用したとき、システムの安定性と速応性を評価するため、拘束指標と整定指標を導入する。

拘束指標では拘束時間を用いる。拘束時間とは、予め設定された拘束境界値内にプラント出力が拘束される時間である(図1)。拘束指標 f_H を次のように定義する。

$$f_H = \min_j^{N_I} t_H^j \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 t_H^j は第 j 番目の初期状態に対する拘束時間であり、 N_I は初期状態の総数である。拘束指標 f_H は異なる N_I 個の初期状態に対する拘束時間の最小値である。拘束指標 f_H の値が規定時間 T 以上の場合、このベーシックコントローラを拘束コントローラという。

図2 拘束区間と整定区間
Fig.2. Holding Interval and Settling Interval.

また、整定指標では整定時間を用いる。整定時間とは、予め設定された整定境界値内にプラント出力が整定するまでの時間である(図1)。整定指標 f_S を次のように定義する。

$$f_S = \max_j t_S^j \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 t_S^j は第 j 番目の初期状態に対する整定時間である。整定指標 f_S は異なる N_I 個の初期状態に対する整定時間の最大値である。整定指標 f_S の値が規定時間 T 以下の場合、このベーシックコントローラを整定コントローラという。

制御性能の評価では、任意の可能な初期状態に対するシステムの制御性能を保証するため、より大きな値を初期状態の総数 N_I に設定する。

(3.2) ロバスト性能の評価 フィードバックシステムの設計においては、プラントの不確かさや動特性の変化にもかかわらず所望の制御性能を確保できる、いわゆる頑強なシステムを設計することが重要である。パラメータ変動に対するシステムの安定性と速応性に関するロバスト性能を評価するため、ベーシックコントローラに拘束区間と整定区間の2つのロバスト性能指標を導入する。コントローラを N_P 個の異なる代表的なプラントに適用する。得られる N_P 個の拘束指標 f_H と整定指標 f_S を基に、拘束区間と整定区間を次のように定義する。

パラメータ変動区間 F の中で、拘束指標 f_H の値が規定時間 T 以上の部分区間を拘束区間 I_H という(図2)。また、拘

図3 ベーシックコントローラ
Fig.3. Basic Controller.

図4 適応制御システムの構成
Fig.4. Structure of Adaptive Control System.

束区間の中で、整定指標 f_S の値が規定時間 T 以下の部分区間を整定区間 I_S という(図2)。

ロバスト性能の評価により、ベーシックコントローラは拘束区間 I_H と整定区間 I_S の2つのロバスト性能指標をもつ(図3)。このベーシックコントローラを、未知パラメータをもつプラントに適用したとき、目標入力とプラント出力の偏差を観測することで、未知なパラメータ値の存在範囲について、次の情報を得ることができる。規定時間 T 以内に、プラント出力が整定境界値内に整定した場合、整定区間 I_S 内にパラメータ値は存在する。また、規定時間 T の間、プラント出力は拘束境界値内に拘束されるものの整定しない場合は、拘束区間 I_H から整定区間 I_S を除いた残りの部分区間内にパラメータ値は存在する。さらに、規定時間 T の間、プラント出力が拘束境界値内に拘束されない場合は、パラメータ変動区間 F から拘束区間 I_H を除いた残りの部分区間にパラメータ値は存在する。

ロバスト性能の評価では、パラメータ変動区間内の任意のパラメータ値に対するシステムのロバスト性能を保証するため、より大きな値を代表的なプラントパラメータの総数 N_P に設定する。

4. 適応制御システムの構成

(4.1) マルチプルコントローラ マルチプルコントローラによる適応制御の基本的な考え方は次の2点である。スイッチングによりパラメータ値の不確かさを徐々に減少させ、プラント出力を整定境界値内に整定させる。一連のスイッチングの間はプラント出力を拘束境界値内に拘束する。

適応制御システムの構成を図4に示す。マルチプルコントローラはスイッチングルールと q 個のベーシックコントローラ

図5 ベーシックコントローラ間の相互関係
Fig.5. Interrelations of Basic Controllers.

ラから構成される。スイッチングルールが利用する情報は、目標入力 r とプラント出力 y の偏差 e のみである。スイッチングルールはベーシックコントローラを常に予め決められた順番に、つまり BC_1 から BC_q に向かって、一定の時間間隔でスイッチングする。スイッチング間隔は規定時間 T である。プラント出力が目標入力に整定した場合にはスイッチングを停止する。未知パラメータをもつプラントの出力を整定するまでに要する時間は、最短で T 秒以内、最長で $(q \times T)$ 秒である。整定時間が最短となるのは、最初にスイッチングされるベーシックコントローラ BC_1 によりプラント出力が整定する場合である。整定時間が最長となるのは、最後にスイッチングされるベーシックコントローラ BC_q によりプラント出力が整定する場合である。

(4.2) ベーシックコントローラの条件 マルチプルコントローラが3個のベーシックコントローラをもつ場合を例に、ベーシックコントローラ間の相互関係を図5に示す。マルチプルコントローラを構成するために、各ベーシックコントローラは次に示す整定区間と拘束区間に関する条件を満足しなければならない。

整定区間に関する条件: 各ベーシックコントローラがもつ整定区間の和集合がパラメータ変動区間 F を覆う。この条件により、規定時間 T 以内にプラント出力を目標入力に整定できるベーシックコントローラが少なくとも一つ存在することを保証する。

拘束区間に関する条件: ベーシックコントローラ BC_1 の拘束区間がパラメータ変動区間 F を覆う。ベーシックコントローラ BC_2 の拘束区間が、パラメータ変動区間 F から BC_1 の整定区間を除いた残りの部分区間を覆う。さらに、ベーシックコントローラ BC_3 の拘束区間が、パラメータ変動区間 F から BC_1 と BC_2 の整定区間を除いた残りの部分区間を覆う。この条件により、各ベーシックコントローラが、少な

くとも規定時間 T の間プラント出力を拘束境界値内に拘束することを保証する。

一般に、マルチプルコントローラが q 個のベーシックコントローラをもつ場合、整定区間と拘束区間に関する条件はそれぞれ (3) 式、(4)–(7) 式で与えられる。

$$I_S^1 \cup I_S^2 \cup \dots \cup I_S^q = F \quad (3)$$

$$I_H^1 = F \quad (4)$$

$$I_H^2 \supseteq (I_S^1)^c \quad (5)$$

$$I_H^3 \supseteq (I_S^1 \cup I_S^2)^c \quad (6)$$

$\vdots$

$$I_H^q \supseteq (I_S^1 \cup I_S^2 \cup \dots \cup I_S^{q-1})^c \quad (7)$$

ただし、

I_S^k : 第 k 番目のベーシックコントローラの整定区間

I_H^k : 第 k 番目のベーシックコントローラの拘束区間

$(A)^c$: パラメータ変動区間 F から部分区間 A を除いた残りの部分区間

である。

5. マルチプルコントローラ的设计

マルチプルコントローラ的设计方法について述べる。设计プロセスは生成プロセスと選択プロセスに分けられる。生成プロセスでは、各代表的なプラントについて、 N_C 個の整定コントローラをベーシックコントローラの候補として生成する。生成する $(N_P \times N_C)$ 個の候補は、それぞれ少なくとも生成時に適用したプラントの出力を、規定時間 T 以内に整定することができるコントローラである。一方、選択プロセスでは、各候補を残りの $(N_P - 1)$ 個の代表的なプラントに適用し、ロバスト性能を評価する。各候補の相互の関係を、システムのロバスト性能を基に行列表現する。この行列表現を用いて選択アルゴリズムにより、可能な候補の組合せの中から一つの組合せをベーシックコントローラとして選択する。

(5.1) 生成プロセス 各代表的なプラントについてそれぞれ規定時間を T とする N_C 個の整定コントローラを生成する。整定コントローラを生成するために、遺伝的アルゴリズム (GA)⁽⁶⁾ を用いる。コントローラには階層型ニューラルネットワークを用いる。

GA は非線形最適化問題の近似解を得るための確率的な探索手法の一つである。最大の特徴は最適化の対象となる適応度関数に、連続性や微分可能性といった制約がほとんどないということである。この特徴はプラントの動特性が未知である場合のコントローラ生成に有効である。階層型ニューラルネットワークは複雑な非線形関係を表現することができる⁽⁷⁾。階層型ニューラルネットワークをコントローラとして用いたシステムは、高いロバスト性を示す⁽⁸⁾。この特徴はマルチプルコントローラを構成する場合のベーシックコントローラの特長として望ましい。

生成プロセスは、さらに拘束ステージと整定ステージに分けられる。拘束ステージでは、規定時間にスイッチング間隔 T より比較的大きな値 (例えば $10T$) を設定し、拘束指標 f_H を適応度関数として用いる。また、整定ステージでは、規定時間にスイッチング間隔 T と等しい値を設定し、整定指標 f_S を適応度関数として用いる。これらの適応度関数を最大にする解は、厳しさの異なる制約により規定される制御性能を満足する。このように探索過程を制御することで、規定時間を T とする整定コントローラを多数生成するために必要な計算量を削減できると期待される(8)・(12)。

拘束ステージでは、拘束指標 f_H により、コントローラはプラント出力を拘束境界値内に拘束する時間が長い程、良い評価が与えられる。世代交代にともない、多数の拘束コントローラと少数の整定コントローラが集団の中に現れる。整定コントローラの数 N_C が集団の大きさの一定の割合 (例えば 1 割) に達したとき、ステージを終了し整定ステージに移る。

整定ステージでは、整定指標 f_S により、コントローラはプラント出力を整定境界値内に整定するまでの時間が短い程、良い評価が与えられる。世代交代にともない、整定コントローラが集団の中に現れる。整定コントローラが現れる毎に世代交代を停止し、この整定コントローラを取り出す。取り出された整定コントローラの数 N_C が達したとき、ステージを終了する。

以上のプロセスを N_P 個の代表的なプラントに対して行なう。最終的に得られた $(N_P \times N_C)$ 個の規定時間を T とする整定コントローラは、ベーシックコントローラの候補となる。

(5.2) 選択プロセス 選択プロセスでは、まず、各候補を残りの $(N_P - 1)$ 個の代表的なプラントに適用し、ロバスト性能を評価する。評価の結果、各候補は拘束区間と整定区間の 2 つのロバスト性能指標をもつ。次に、ベーシックコントローラの組合せを候補の中から選択する。選ばれるベーシックコントローラの組合せは、ベーシックコントローラの条件 (3) 式、(4)~(7) 式を満足し、かつコントローラ数 q が可能な候補の組合せの中で最も小さい組合せである。

ここで、拘束区間および整定区間について、各候補間の包含関係を把握し易くするために、拘束行列表現と整定行列表現を導入する。図 6 に拘束行列表現を示す。拘束行列表現では、各候補の拘束区間は区間の下端値を横軸上に、上端値を縦軸上にとることにより、2 次元平面上の一つのセル (下端値、上端値) として表現される。例として、4 つの拘束区間を拘束行列の周りに示す。拘束区間の幅は、左上のセルからの距離に比例して狭くなる。また、これと同様な関係は整定行列表現における整定区間についても成り立つ。

ベーシックコントローラは拘束行列表現と整定行列表現を用いて、以下の選択アルゴリズムにより再帰的に選択される。

ステップ 1: 選択される候補の組合せを一組だけ記憶するメモリを用意し、リセットする。パラメータ変動区間 F の下端値 $p(1)$ 、上端値 $p(N_P)$ をそれぞれ変数 l 、 u に代入

図 6 拘束行列表現

Fig.6. Holding Matrix Form.

する。ステップ 2 へ進む。

ステップ 2: 全ての候補を拘束行列で表現する。下端値が l 以下で、かつ上端値が u 以上のセルに存在する候補を一つメモリに記憶し、ステップ 3 へ進む。

ステップ 3: これまでメモリに記憶されてきた候補を整定行列で表現する。これらの候補の整定区間によって覆われない部分区間に対応するセル (l', u') , (l'', u'') , ... について、各セルの下端値を l に、上端値を u にそれぞれ置き換え、ステップ 2 へ進む。もし、メモリに記憶されてきた候補の整定区間によって、パラメータ変動区間 F が全て覆われる場合は、メモリに記憶されてきた候補の組合せを、ベーシックコントローラになり得る一つの組合せとしてメモリから取り出し、ステップ 4 へ進む。

ステップ 4: 以上のステップを全ての候補の組合せについて行なう。取り出された、ベーシックコントローラになり得る組合せは、全てベーシックコントローラの条件 (3) 式、(4)~(7) 式を満足する。これらの組合せの中から、最もコントローラ数 q の小さい組合せをベーシックコントローラとする。

(5.3) 設計上のトレードオフ 第 4 章で述べたように、マルチプルコントローラがプラント出力を整定するまでに要する時間は、最長の場合 $(q \times T)$ である。この時間を短縮するためには、ベーシックコントローラの数 q とスイッチング間隔 T を小さくすればよい。

しかし、 q と T の間にはトレードオフの関係がある。スイッチング間隔 T の最小値はアプリケーションに依存する。最小値に近い値をスイッチング間隔 T に設定した場合、各ベーシックコントローラの整定区間の幅が狭くなる。すると、必然的にベーシックコントローラの数 q が増加する。極端な場合にはベーシックコントローラの数 q は代表的なパラメータ値の総数 N_P に等しくなる。逆に、ベーシックコントローラの数 q を小さくしようとすると、スイッチング間隔 T を比較

図7 台車-振り子系
Fig.7. Cart-Pole System.

的大きい値に設定する必要がある。本論文では、スイッチング間隔 T の値はシミュレーション結果を基に試行錯誤で決定している。決められたスイッチング間隔 T の下で、選択アルゴリズムを用いてベーシックコントローラの数 q が最小となるようにベーシックコントローラを選択している。

6. 台車-振り子系の安定化制御

本章では、マルチプルコントローラを台車-振り子系の安定化制御問題に適用する。この問題は様々な制御理論の有効性を検証するための実験的な好例としてよく知られている(8)-(16)。

(6-1) マルチプルコントローラの適用 本論文で対象とする台車-振り子系を図7に示す。このプラントは次の運動方程式を用いて、4次のルンゲ・クッタ法によりシミュレーションされる。時間のきざみ幅は0.01である。

$$\begin{bmatrix} 4/3mL^2 & mL \cos \theta \\ mL \cos \theta & m + M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_1 & 0 \\ 0 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{x} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} mLg \sin \theta \\ mL\dot{\theta}^2 \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f \end{bmatrix} \dots\dots (8)$$

ただし、 L ：振り子の支点から重心までの距離(半振り子長)、 m ：振り子の質量($=2L$)、 M ：台車の質量、 D_1 ：台車-振り子間の粘性摩擦係数、 D_2 ：振り子の回転軸周りの粘性摩擦係数、 θ ：振り子の角度、 x ：台車の変位、 f ：台車に加える力、 g ：重力加速度である。

プラントへの入力 f であり、プラントからの出力は $\theta, \dot{\theta}, x, \dot{x}$ である。これらのプラント出力は入力層(4要素)-中間層(10要素)-出力層(1要素)の3層階層型ニューラルネットワークへの入力となる。3層階層型ニューラルネットワークの出力は-50[N]から+50[N]の間に連続的に増幅され、台車に加える力 f となる。有限長のビット列によって符号化されたニューラルネットワークの重みは、GAにより進化させられる。GAにおける集団数は50、交叉率は0.6、突然変異率は0.02である。また、台車に取り付けられる振り子は、図7に示すように半振り子長 L が0.1から1.0[m]まで0.1きざみの値をとる10本の振り子の中から任意に選ばれる。プラントの動特性および振り子長は未知であるとする。ここでは、台車がレール中央(原点)に静止している状態からの動きを扱う。制御の目的は、振り子の角度と台車の変位をそれぞれの

表1 マルチプルコントローラの設計に関するパラメータ
Table 1. Parameters Concerned with Procedure for Constructing Multiple Controllers.

意味	記号	値
初期状態の総数	N_I	49
代表的なパラメータの総数	N_P	10
各代表的なプラントに対して生成する候補の総数	N_C	50
スイッチング間隔	T	10

図8 パラメータ変動に対する制御性能の変化
Fig.8. Change of Control Performance for Parameter Fluctuations.

拘束境界値内に拘束し、振り子を倒立点近傍に静止させることである。振り子の角度の拘束境界値は $\pm 15[\text{deg}]$ 、台車の変位の拘束境界値は $\pm 1[\text{m}]$ 、振り子を倒立点近傍に静止させるとは、 $|\theta| \leq 1.0 \times 10^{-6}[\text{deg}]$ 、 $|\dot{\theta}| \leq 1.0 \times 10^{-6}[\text{deg/s}]$ を満足させることである。ただし、プラントの初期状態は、 $\theta = \{0, \pm 1, \pm 2, \pm 3\}[\text{deg}]$ 、 $\dot{\theta} = \{0, \pm 3, \pm 6, \pm 9\}[\text{deg/s}]$ 、 $x = 0[\text{m}]$ 、 $\dot{x} = 0[\text{m/s}]$ とする。マルチプルコントローラの設計に関するパラメータ値を表1に示す。

(6-2) シミュレーション結果 生成プロセスによって得られた候補を用いて、振り子長の変化に対するシステムの制御性能の変化の様子を図8に示す。この候補は半振り子長 L が1.0の振り子を、プラントに取り付けて生成された50個の候補のうちの一つである。拘束区間と整定区間はそれぞれ[0.2, 1.0], [1.0, 1.0]である。図中の各グラフは、候補を代表的な半振り子長(0.1, 0.2, ..., 1.0)をもつプラントに適用したときの、振り子の角度 θ の応答を示している。プラントの初期状態は、 $\theta = 3[\text{deg}]$ 、 $\dot{\theta} = 9[\text{deg/s}]$ 、 $x = 0[\text{m}]$ 、 $\dot{x} = 0[\text{m/s}]$ である。振り子の角度 θ が倒立点に整定した場合は、整定時間を各グラフの中央に示している。半振り子長 L が1.0の場合、

図9 全候補と選択されたベーシックコントローラの分布
Fig.9. Distribution of All Candidates and Selected Basic Controllers.

整定時間は9.55であり、規定時間10よりも小さい。しかし、半振子長 L が短くなるにつれて徐々に整定時間が大きくなる。半振子長 L が0.4の場合、100秒以内では振子の角度 θ は整定しない。半振子長 L が最短の0.1の場合には、もはやこの候補は振子の角度 θ を拘束境界値内に拘束することができない。

図9は全ての候補と、選択アルゴリズムによって選択された5個のベーシックコントローラの分布を示す。候補が存在するセルは灰色に塗り潰してある。台車-振子系の安定化制御問題では注目すべき候補の分布傾向がある。長い振子をプラントに取り付けて生成された候補を適用したシステムほど、より高いロバスト性能を示す。特に、拘束区間は下端側に広がる傾向がある。ここでは、図10に示す拘束区間と整定区間をもつ5個のベーシックコントローラの組合せが候補の中から選択された。

選択されたマルチプルコントローラを適用し、各振子長に対する制御性能を評価する。図11に示す各グラフは、それぞれ半振子長 L が1.0, 0.7, 0.4, 0.1の場合の振子の角度 θ の応答を示している。プラントの初期状態は、 $\theta=3$, $\dot{\theta}=9$, $x=0$, $\dot{x}=0$ である。最初の3つの振子については、小さい振動がスイッチングの瞬間に起きている。最後の、振子が最も短い場合では、大きい振動が断続的に起きている。しかし、振子の角度 θ は一連のスイッチングの間 $-15[\text{deg}]$ と $15[\text{deg}]$ の間に拘束されている。なお、この他の6種類の半振子長 L に対するシミュレーション実験においても、マルチプルコントローラはシステム出力を整定することができることを確認している。

7. 考察

提案した適応制御システムを種々のアプリケーションに適用するためには、次の点を検討する必要がある。1) システムの安定性はどの程度保証できるのか。さらに、システムの制御性能を保証するため、実プラントに対し初期状態やパラメータ値を繰り返し変える設計方法は実用的であるのか。2) もし拘束区間がパラメータ変動区間を覆う候補がない場合はどう対処するのか。3) 複数のパラメータが変動するプラントに対する、マルチプルコントローラの設計方法はどのようなものか。4) どの程度までの非線形性に対して、マ

図10 ベーシックコントローラの拘束区間と整定区間
Fig.10. Holding and Settling Intervals of Basic Controllers.

ルチプルコントローラが対応できるのか。5) 一連のスイッチングを行なっている間にパラメータ変動が起きた場合、スイッチングルールはどう対処するのか。

1) は非常に重要な問題である。本論文では、初期状態の総数 N_I と代表的なパラメータの総数 N_P に十分大きな値を設定することで安定性を保証している。提案する設計方法を実際に適用するためには、実プラントによる実験の回数、または手間などを実用的なレベルにおさえる必要がある。種々のアプリケーションにおける設計の効率化は、次の3点について行なうことができる。第1点目は、制御性能評価における初期状態の選択方法である。事前に、各状態量がとり得る値の範囲の情報が得られる場合には、初期状態をその範囲内に限定して選択することが考えられる。第2点目は、ロバスト性能評価における代表的なプラントの選択方法である。事前に、パラメータ変動に対する感度特性情報が得られ、システムが高感度となるパラメータの変動区間がわかる場合には、その区間内のみ他の区間内より多くの代表的なプラントを選択することが考えられる。第3点目は、モデルによるシミュレーション実験と実プラントによる実験の併用である。提案手法の特徴の1つは、プラントモデルを用いなくてもマルチプルコントローラの設計が可能であることを示すものである。現実の多くのアプリケーションでは、ある程度実プラントの動特性を反映したモデルが得られる。まず、モデルによるシミュレーション実験を行な

図 11 各振子に対する制御性能

Fig.11. Control Performance for a variety of Poles.

いプラントの状態量の変化する範囲やパラメータ変動に対する感度特性の情報を得た上で、さらに実プラントによる実験を行なうことで設計の効率化がはかれるものと考えられる。

2) を解決する一つの方法としては、スイッチング間隔 T を比較的大きく設定し、ベーシックコントローラの候補を生成する方法が考えられる。この場合、マルチプルコントローラがプラント出力を安定するために要する安定時間が大きくなる可能性がある。また、もう一つの方法としては、コントローラとして用いるニューラルネットワークの汎化能力⁽¹⁷⁾を向上させる方法が考えられる。汎化能力を向上させる方策としては Weight Decay 法⁽¹⁸⁾、構造化学習法⁽¹⁹⁾、Weight Elimination 法⁽²⁰⁾ などがある。

本論文ではプラントの動特性の変動が一つのパラメータ変動にのみ起因する場合を考えた。3) に対し、提案したシステムは、多次元のパラメータ変動を扱えるよう容易に拡張できると考える。

4), 5) は今後の課題である。

実用的なアプリケーションとしては ABS (Anti-Lock Braking System)⁽²¹⁾⁻⁽²⁴⁾ を考えている。一般に、走行している車両にブレーキをかけるとき、制動摩擦係数が大きいほど制動力が大きく、短い距離で停止することができる。制動摩擦係数を最大にするためには、スリップ率を最適値に保つ必要がある。この制動摩擦係数-スリップ率特性は、路面

の状態やタイヤの構造、表面状態等によって大きく異なる特性を示すことがよく知られている。しかし、走行中制動摩擦係数-スリップ率特性を知ることは現在の技術では難しい⁽²²⁾。今後、この問題に本論文で提案したマルチプルコントローラを適用し、実用化上の課題についても検討していきたい。

8. むすび

本論文では、プラントモデルを必要としないマルチプルコントローラ、およびその設計方法を提案した。まず、ベーシックコントローラに安定性と速応性に関するロバスト性能指標を導入した。次に、マルチプルコントローラの構成と設計方法について述べた。提案するマルチプルコントローラを台車-振り系の安定化制御問題に適用し、有効性を検証した。さらに、提案した適応制御システムについて考察を行なった。

本研究は、本学における JR 東日本寄附講座において実施したものであり、東日本旅客鉄道株式会社を始めとする関係各位に御礼を申し上げます。

(平成 8 年 12 月 24 日受付, 平成 9 年 6 月 9 日再受付)

文 献

- (1) Herbert E. Rauch : "Autonomous Control Reconfiguration", *IEEE Control Systems Magazine*, 37~48 (1995-12)
- (2) 菅野道夫 : 「ファジィ制御」, 日刊工業新聞社, 113~122 (1991)
- (3) 佐武昇, 伊藤修, 小林和彦, 柳下修 : 「適応形ファジィコントローラによる雨水ポンプの協調制御」, 電学論 C, **109**, 361~366 (平 1-5)
- (4) Kumpati S. Narendra and Jeyendran Balakrishnan : "Adaptive Control Using Switching and Tuning", *Proceedings of the Eighth Yale Workshop on Adaptive And Learning Systems*, 13~15 (1994-6)
- (5) Kumpati S. Narendra, Jeyendran Balakrishnan and M. Kemal Cliz : "Adaptation and Learning Using Multiple Models, Switching, and Tuning", *IEEE Control Systems Magazine*, 37~51 (1995-6)
- (6) J. H. Holland : *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The Univ. Michigan Press; 1975, MIT Press (1992)
- (7) Derrick H. Nguyen and Bernard Widrow : "Neural Networks for Self-Learning Control Systems", *IEEE Control Systems Magazine*, 18~23 (1990-4)
- (8) Alexis P. Wieland : "Evolving Controls for Unstable Systems", *Proc. 1990 Connectionist Models Summer School*, Morgan Kaufmann, San Francisco, Calif., 91~102 (1991)
- (9) N. Saravanan and David B. Fogel : "Evolving Neural Control Systems", *IEEE Expert*, 23~27 (1995-6)

- (10) Abdollah Homaifar and Ed McCormick : "Simultaneous Design of Membership Functions and Rule Sets for Fuzzy Controllers Using Genetic Algorithms", *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, **3**, 2, 129~139 (1995-5)
- (11) 山本哲彦, 花田真一, 中園邦彦, 金城寛, 玉城史郎: 「非厳密評価規準 GA によって進化させられた倒立振子のニューロ制御」, 日本機械学会論文集 (C 編), **61**, 591 154~159 (1995-11)
- (12) 川路茂保, 小笠原健一: 「遺伝的アルゴリズムによる非線系制御 —適応度関数の切り替えによる探索空間の構造化—」, 電学論 D, **116**, 435~440 (平 8-4)
- (13) Shlomo Geva and Joaquin Sitte : "A Cartpole Experiment Benchmark for Trainable Controllers", *IEEE Control Systems Magazine*, 40~51 (1993-10)
- (14) C.L.Karr : "Design of an Adaptive Fuzzy Logic Controller Using a Genetic Algorithm", *Proc. of the 4th Int. Conf. on Machine Learning*, 450~457 (1991)
- (15) 川谷亮治, 山口尊志: 「並列型 2 重倒立振子系の解析とその安定化」, 計測自動制御学会論文集, **29**, 5, 572 ~580 (1993)
- (16) 松本治・梶田秀司・谷和夫: 「移動ロボットの内界センサのみによる姿勢検出とその制御」, 日本ロボット学会誌, **8**, 5, 37~46, (1990)
- (17) 喜多一: 「ニューラルネットワークの汎化能力」, システム/制御/情報, **36**, 10, 625~633, (1992)
- (18) G.E. Hinton : "Connectionist Learning Procedure", *Machine Learning*, ed. J. Carbonell, The MIT Press (1990)
- (19) M. Ishikawa and K. Yoshio : "Automatic Task Decomposition in Modular Networks by Structural Learning with Forgetting", *Proc. IJCNN-93-Nagoya*, **II**, 1345 ~1348 (1993)
- (20) A.S. Weigend, D.E. Rumelhart and B.A. Huberman : "Generalization by Weight-Elimination with Application to Forecasting", *Advances in Neural Information Processing Systems*, **3**, 875~882 (1991)
- (21) Georg F. Mauer : "A Fuzzy Logic Controller for an ABS System", *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, **3**, 4, 381 ~388 (1995-11)
- (22) 日本エービーエス株式会社: 「自動車用 ABS の研究」, 山海堂 (1993-6)
- (23) Jeffery R. Layne, Kevin M. Passino and Stephen Yurkovich : "Fuzzy Learning Control for Antiskid Braking Systems", *IEEE Trans. Control Systems Technology*, **1**, 2, 122~129 (1993-6)
- (24) Sergey Drakunov, Ümit Özgüner, Peter Dix and Behrouz Ashrafi : "ABS Control Using Optimum Search via Sliding Modes", *IEEE Trans. Control Systems Technology*, **3**, 1, 79~85 (1995-3)

稲葉雅章

(学生員) 1970 年 12 月 14 日生。93 年東北大学工学部情報工学科卒業。95 年同大学院工学研究科博士課程前期修了。現在, 同後期課程在学中。適応制御, ニューラルネットワークの研究に従事。計測自動制御学会, 日本ロボット学会会員。

郭 海蛟

(非会員) 1959 年 6 月 11 日生。88 年東北大学大学院工学研究科博士課程前期修了。90 年同大学電気工学科助手。96 年同助教授。工学博士。デジタル制御, ロバスト制御などの研究に従事。計測自動制御学会会員。

阿部健一

(正員) 1941 年 6 月 23 日生。64 年東北大学工学部電気工学科卒業。69 年同大学院博士課程修了。同年 東北大学工学部助手, 74 年同助教授。84 年豊橋技術科学大学教授, 93 年東北大学工学部電気工学科教授, 現在に至る。工学博士。デジタル制御, 適応・学習制御などの研究に従事。計測自動制御学会, 情報処理学会会員。

中尾和夫

(正員) 1942 年 9 月 8 日生。65 年京都工芸繊維大学工芸学部生産機械工学科卒業。70 年大阪大学大学院工学研究科博士課程修了。同年 (株) 日立製作所入社。同社システム開発研究所主管研究員, 及び東北大学工学部客員教授を経て, 現在大阪工業大学情報科学部教授。システムの計画技術, 高信頼化技術, システムアーキテクチャの研究に従事。工学博士。