

氏名	稲葉 雅章		
学位	博士 (工学)		
学位授与年月日	平成10年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気・通信工学専攻		
学位論文題目	マルチプルコントローラによる適応制御に関する研究		
指導教官	東北大学教授 阿部 健一		
論文審査委員	主査 東北大学教授 阿部 健一	東北大学教授 豊田 淳一	
	東北大学教授 樋口 龍雄	東北大学教授 阿曾 弘具	
	東北大学助教授 吉原 郁夫		

## 論文内容要旨

### 第1章 序論

従来、非線形プラントに対してマルチプルコントローラ (Multiple Controller; MC) を用いる適応制御システム的设计法が研究されている。マルチプルコントローラは  $m$  個の候補コントローラ (Candidate Controller; CC) とスーパーバイザから構成される (図1)。スーパーバイザは、まず、パラメータ推定器や同定モデルなどの環境同定機構からの信号を観測する。次に、システム運転中の環境条件に対してどの候補コントローラが最も適切か実時間で判断し、選択する。

従来の設計法では、環境同定機構を用いるシステム構成を採る。従来法は、環境同定機構を適切に設計できる場合には有効である。しかし、プラントを表す適切な数学モデルが作れない場合や、パラメータ推定に時間がかかり過ぎる場合には、環境同定に大きな不確かさが含まれることになる。この結果、システムの制御性能が低下する。システムが不安定になることもある。

そこで本論文では、環境同定機構を用いないシステム的设计法を提案する。スーパーバイザは、プラントの状態あるいは出力を許容範囲内に収めることのできる適切な候補コントローラを直接的に選択する。同程度の性能を得るためには、環境同定機構を設計する必要がないため、設計の手間を削減できると思われる。また、モデル化に起因する問題やパラメータ推定に起因する問題も解決できるものと期待される。本研究の目的は、環境同定が困難な場合の非線形未知プラントに対する適応制御方式の開発である。このために、モデル化を不要にする方法として投機的制御 (Speculative Control) 方式を考案する。また、良好な過渡特性を獲得するスイッチング法の考案を行なう。本論文では、過渡特性として安定性と速応性のみを扱う。

投機的制御の基本的な考え方を示す。まず、システム運転中に変化する環境条件の領域を分割する。次に、分割された各環境条件の領域に対して候補コントローラを設計する。システムの運転段階では、スーパーバイザは各候補コントローラによる投機的制御を行ない、環境条件に対して適切な候補コントローラを選択する。投機的制御とは、システムが未知の環境条件の下で運転される場合に、環境条件に対する

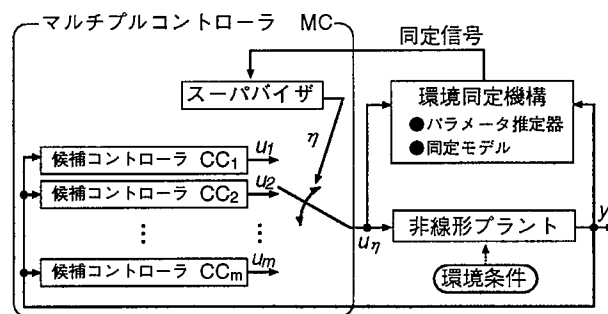


図1 MCを用いる従来のシステム構成

適切、不適切が不明のうちに、候補コントローラにより実プラントを試しに短時間運転し、不適切ならば次の候補コントローラへのスイッチングを行ない、適切ならばこの候補コントローラを採用するというものである。

本論文では、二つの設計問題を扱う。まずは、環境が未知かつ時不変の場合にレギュレーションを行なうことのできるマルチプルコントローラの設計問題である。他は、環境が未知かつ時変の場合にトラッキングを行なうことのできるマルチプルコントローラの設計問題である。これらの問題を段階的に取り上げ、各問題に対して投機的制御を行なうマルチプルコントローラの設計法を提案、拡張する。それぞれの手法を、非線形で未知な台車-振子システムの安定化制御問題と非線形で未知な自動車のアンチスキッド・ブレーキ・システム (Antiskid Braking System; ABS) 制御問題に適用し、環境同定なしに所望の安定性と速応性を達成できることを示す。

## 第2章 マルチプルコントローラによる適応制御

本章では、環境が未知かつ時不変の場合のレギュレーションと、環境が未知かつ時変の場合のトラッキングの二つの制御目的を明らかにし、それぞれの制御目的を達成するための投機的制御方式の提案、拡張を行ない、候補コントローラの具備機能について考案を行なっている。

レギュレーションを行なうための投機的制御方式を提案している。未知かつ時不変の環境条件  $c_i$  の下で、レギュレーションを行なうための投機的制御式を図2に示す。提案する投機的制御方式では、次の手順でスイッチングを行なう。スーパーバイザは、候補コントローラのスイッチングを常に予め決められた順番、 $CC_1$  から  $CC_m$  の順番に、一定時間  $T_r$  間隔で行なう。スーパーバイザは、投機的制御を行なうたびに環境条件  $c_i$  に対する候補コントローラ  $CC_k$  の適切、不適切の判定を行なう。不適切であると判定した場合には、次の候補コントローラへのスイッチングを行なう。適切と判定した場合には、候補コントローラ  $CC_k$  を採用し、スイッチングを停止する。適切な候補コントローラの選択に要する時間は、最短で  $T_r$ 、最長で候補コントローラの総数  $m$  と一定時間  $T_r$  の積となることから、この積の値が制御目的に与えられる時間  $T_s$  よりも小さくなるようにマルチプルコントローラを設計する。

投機的制御によりレギュレーションを行なうために、候補コントローラの具備機能として二つの概念を考案している。まずは、投機的制御を行なう間、常にシステムの安定性を維持するための「拘束」であり、他は、システムの速応性を維持するための「整定」である。拘束とは、ある候補コントローラをプラントに適用したとき、プラントの初期状態によらずに、制御を終了するまで状態変数を拘束境界値内に保つことである。これに対して整定とは、ある候補コントローラをプラントに適用したとき、プラントの初期状態によらずに、制御を終了するまで状態変数を拘束境界値内に保ち、かつ、一定時間  $T_r$  以内に状態変数を整定境界値内に収めることである。

レギュレーションを行なうための投機的制御方式を、トラッキングを行なえるように拡張している。スーパーバイザは、制御を開始した直後と環境条件が変化した直後にスイッチングを行なう。制御を開始した直後のスイッチング法はレギュレーションの場合と同様である。図3には、時刻  $t=nT$  で未知な環境条件が  $c_i$  から  $c_j$  に変化した直後のスイッチング法を示す。スーパーバイザは、環境条件が変化した時刻  $t=nT$  から時間  $T_r$  以内に環境条件の変化を検出する。変化を検出したときには、採用されている候補コントローラ  $CC_k$  から  $CC_m$  の順番で、 $CC_m$  の後は  $CC_1$  に戻り  $CC_1$  から  $CC_{k-1}$  の順番で、一定時間  $T_r$  間隔にスイッチングを行なう。スーパーバイザは、投機的制御を行なうたびに変化した先の環境条件  $c_j$  に対する候補コントローラ  $CC_k$  の適切、不適切の判定を行なう。不適切であると判定した場合には次の候補コントローラへのスイッチングを行なう。適切と判定した場合にはこの候補コントローラ  $CC_k$  を採用し、スイッチングを停止する。環境条件が変化した時刻から適切な候補コントローラを

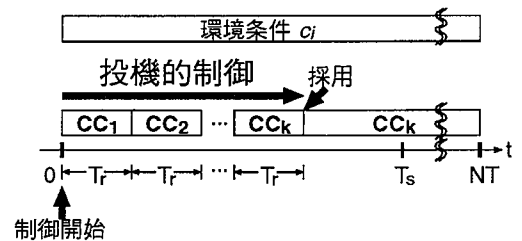


図2 投機的制御によるレギュレーション

選択するまでに要する時間は最長で  $(m+1) \times T_r$  となることから、この値が制御目的に与えられる時間  $T_s$  よりも小さくなるようにマルチプルコントローラを設計する。

拘束と整定の機能のみをもつ候補コントローラによりトラッキングを行なう場合には、次の問題が生じる。候補コントローラ  $CC_k$  による制御中に、時刻  $t=nT$  で環境条件が  $c_i$  から  $c_i'$  に変化したときに、時刻  $t=nT$  以後において、変化する前の環境条件  $c_i$  に対して設定されている目標値  $y_{d_i}$  の近傍にプラント出力  $y(t)$  を追従させ続けてしまう場合があり得る。プラント出力  $y(t)$  が不適切な目標値に追従している場合には、スーパーバイザはプラント

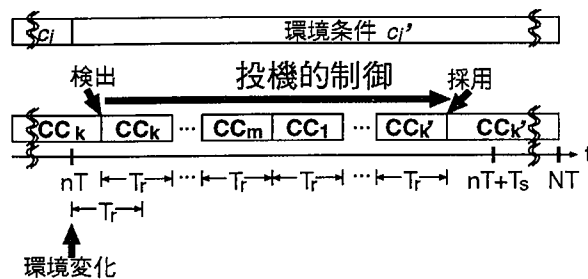


図3 投機的制御によるトラッキング

出力  $y(t)$  の観測から環境条件の変化を検出することができない。不適切な候補コントローラ  $CC_k$  による制御が続くため、システムは所望の安定性と速応性を維持することができないことになる。そこで、投機的制御によりトラッキングを行なうために、システムの速応性を維持するための候補コントローラの機能として、整定に加え新たに「非整定」の概念を考案している。非整定とは、ある候補コントローラをプラントに適用したとき、プラントの初期状態によらずに、制御が終了するまでプラント出力を拘束境界値内に保つことができ、かつ、一定時間  $T_r$  が経過した後はプラント出力が常に一定値  $\epsilon$  以上の偏差を不適切な目標値に対して残留してしまうことである。

### 第3章 環境が未知かつ時不変の場合のレギュレーション

本章では、環境が未知かつ時不変の場合のレギュレーション問題に対し、マルチプルコントローラの設計法の提案及び評価を行なっている。

マルチプルコントローラを構成する各候補コントローラに対し、拘束と整定により、環境条件の集合を拘束集合と整定集合に分割している。拘束集合と整定集合は、候補コントローラを適用したシステムが一定の安定性と速応性を維持できることをそれぞれ保証する。拘束集合と整定集合が一定の相互関係を満たすように各候補コントローラを設計することで、マルチプルコントローラは未知かつ時不変の環境条件の下でレギュレーションを行なうことが可能となる。

プラントの出力信号のみを用いてマルチプルコントローラを具体的に設計するために、安定性と速応性の指標として拘束指標と整定指標を導入している。候補コントローラには多層ニューラルネットワークを用いる。拘束指標と整定指標を用いる強化学習により候補コントローラの設計を行なう。提案している設計法では、各環境条件に対して候補コントローラの「候補」を多数生成し、この中から適切な「候補」の組合せを候補コントローラの組合せとして選択する。

提案手法を非線形で未知な台車-振子システムの安定化制御問題に適用し、シミュレーションにより有効性を示している。振子長の変化を環境条件の変化と捉える。振子長が未知な振子を台車に取り付けたシステムに対して提案手法を適用することで、パラメータ推定なしに所望のシステムの安定性と速応性を達成した。

### 第4章 環境が未知かつ時変の場合のトラッキング

本章では、環境が未知かつ時変の場合のトラッキング問題に対し、マルチプルコントローラの設計法の拡張及び評価を行なっている。

マルチプルコントローラを構成する各候補コントローラに対し、拘束と整定に加え新たに非整定により、環境条件の集合を拘束集合、整定集合、非整定集合に分割している。候補コントローラを適用したときのシステムの速応性として、プラント出力を素早く適切な目標値の近傍に収めることのできる性質に加え、プラント出力を素早く不適切な目標値から離してしまう性質をも保証する点が、レギュレーション問題に対して提案した手法から大きく拡張された点である。強化学習に用いる速応性の指標として、

整定指標に加え新たに非整定指標を導入し、第3章で提案したマルチプルコントローラ的设计法を拡張している。

拡張した手法を非線形で未知な自動車のABS制御問題に適用し、シミュレーションにより有効性を示している。制動中に異なる種類の路面に遭遇する自動車に対し、提案手法を適用することで、路面条件の同定なしに車体の方向安定性と操舵性(安定性)の維持、及び理論値とほぼ等しい制動距離(速応性)を達成した。

## 第5章 実システムへの適用についての考察

実システムにおいては、事前に環境条件の変化に対するプラントの特性変動の特徴についての大まかな知見が得られることが多い。例えば、第3章で提案手法の評価に用いた台車-振りシステムでは、半振子長の変動に対するシステムの特性変動の特徴を大まかに知ることが可能である。動特性が大きく変動してしまう環境条件の領域のみを他の領域より細かく分割して適正化を図ったうえで候補コントローラを決定することで、設計の効率化を図ることが可能となる。知見を利用する一般的なマルチプルコントローラ的设计手順を示した。

提案手法を実システムへ適用する際の一般的考察を行なっている。マルチプルコントローラ的设计に必要な時間パラメータの決定法、及びノイズがプラント出力に加わることに起因するスーパバイザの誤判定の防止法について検討を行なった。

## 第6章 結論

本研究では、環境が未知かつ時不変の場合のレギュレーション問題と環境が未知かつ時変の場合のトラッキング問題に対し、投機的制御方式と、投機的制御を行なうマルチプルコントローラ的设计法を提案し、実システムに適用する際の問題点について考察を行なった。非線形で未知なプラントに対して具体的に提案手法を適用し、環境同定なしに所望のシステムの過渡特性(安定性と速応性)を達成できることを示した。提案手法は、環境同定が困難な場合の非線形未知プラントに対する適応制御方式として有効である。

## 審査結果の要旨

その動特性が大きく変動する系に対し、候補コントローラを複数個用意しておき、各時刻の動作条件に応じてそのうちの最も適合するものにスイッチする制御方式をマルチプルコントローラ (MC) という。MCによる制御は、非線形系の有効な適応制御法として発展する可能性があり、注目されている。著者は、MCの適用範囲の拡大を目的として、環境同定機構を要しない、安定性と速応性とを指標とするMCの設計法を提案し、その有効性をシミュレーションにより検証した。本論文はそれらの成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、マルチプルコントローラに関し、従来の諸手法を概説して、それらの特徴と問題点について述べている。この考察に基づいて、新たに「投機的制御」と呼ぶ概念を導入して、投機的制御を行うためにMCが具備すべき機能を示している。

第3章では、レギュレーション問題に適用できるMC法を提案している。まず、「拘束」と「整定」という概念を導入している。この概念のもとに、環境条件の集合を分割し、分割された各領域に対応する候補コントローラが満たすべき諸条件を明かにしている。各候補コントローラには3層ニューラルネットワークを用い、所望の安定性と速応性とを備えたMCを導びくための強化学習による設計法を与えている。台車-振りシステムの安定化制御問題にこの設計法を適用し、得られたMCの有効性をシミュレーションにより検証している。本MC法は実システムへの適用が期待でき、優れた提案である。

第4章では、トラッキング問題に適用できるMC法を提案している。まず、トラッキング問題に対処するために、拘束と整定の概念に加え新たに「非整定」という概念を導入している。これら3つの概念のもとに、各候補コントローラが具備すべき機能を明かにしている。ついで、第3章の方法を拡張することにより、適切なMCを導くための系統的設計法を与えている。本手法を、自動車のアンチスキッド・ブレーキ・システムの安定化制御問題に適用し、路面条件の変化に応じてMCが有効に動作することをシミュレーションにより検証している。

第5章では、提案法を利用する際の効率化とその他の問題点の解決法とを考察している。まず、プラント特性についての知見を利用した候補コントローラ作成の効率化を示し、つぎに、候補コントローラ設計に必要な時間パラメータの決定法を考察し、さらにノイズによる悪影響の防止法についても述べている。これらは実システムに適用する上での有用な知見である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、投機的制御という斬新な方式によるマルチプルコントローラを提案してその系統的設計法を与え、本方式により優れた制御性が達成できることを明かにしたもので、制御工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。