



むだ時間をもつ制御系の解析と設計に関する研究

西平, 直史

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2002-03-31

(Date of Publication)

2014-04-22

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲2604

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1002604>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【324】

氏名・(本籍) 西平 直史 (兵庫県)

博士の専攻分野の名称 博士 (工学)

学位記番号 博い第261号

学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当

学位授与の日付 平成14年3月31日

【学位論文題目】

むだ時間をもつ制御系の解析と設計に関する研究

審査委員

主査 教授 太田 有三

教授 多田 幸生

教授 北村 新三

教授 安田 一則

実在するシステムの解析や設計を行うに際して、モデルを有限次元線形時不変 (FLTI) システムとして取り扱うことにより、様々な解析問題や設計問題が扱われてきた。しかし、実在するシステムの中には、伝送路を持ったプラント、空気圧や油圧のアクチュエータを含むプラント、またネットワークを介した制御系などのようにむだ時間が存在するものがある。このようなむだ時間を含むシステムは、モデルが無次元になることが知られており、前述のような FLTI システムに対する解析問題や設計問題に帰着するためには、Pade 近似のような方法を用いてむだ時間を有限次元のシステムで近似することが必要になる。しかし、このように近似したシステムがある性質をもつことを示したとしても、実際のシステムが同じ性質を示すとは限らないため、むだ時間を近似せずに解析問題や設計問題を取り扱うことは重要である。本論文では、このような観点からむだ時間システムを有限次元システムを用いて近似するのではなく、無限次元のシステムを対象とするが、微差分方程式もしくは遅れ型 (retarded) モデルを取り扱うこととした。

システムがむだ時間要素を含む場合、これが原因となり安定性が破壊されることがある。そのため、むだ時間システムの安定性を考えることは非常に重要であり、これまで様々な研究がなされてきた。むだ時間が変動せず、かつシステムの係数行列が時不変で、これらの値が正確にわかっている場合には、むだ時間システムの安定条件が必要十分条件で得られており、これらを用いることで安定判別を行うことができる。しかし、これらの条件は超越方程式を解いたり、無限次元の行列方程式を解く必要があるため、実際に安定判別を行うためには計算が困難であり用いやすい条件ではない。そこで、条件に保守性を加えることで、安定条件を計算しやすい有限次元の条件式を導くことがなされてきた。

それらの条件は、むだ時間に依存しない条件とむだ時間に依存した条件に大別することができる。当初は、むだ時間に依存しない条件が盛んに研究され、様々な条件が導出されてきた。この条件は、条件式が簡単で用いやすいこと、また、むだ時間がわからなくても用いることができる便利な条件であるが、むだ時間の情報を用いていないため、保守的な (十分性の強い) 条件であるという問題点があった。とくに、むだ時間が小さいときにはこの傾向が強い。そこで、むだ時間の情報を条件に含めることで、条件の保守性を軽減することをねらった条件が、近年盛んに研究されている。そのうちの代表的なものに L_i の条件があるが、条件を導くためにシステムについて等価な式変形を行っている。しかし、この変形は Kharitonov らが指摘しているとおり、安定性においては等価な式変形となっておらず、それが原因となる保守性が生じている。そのため、この保守性を軽減する研究が盛んになされている。

むだ時間システムの安定性、ロバスト安定性およびロバスト安定化問題についての研究は、このように着々と成果をあげつつあるが、実際の制御問題への適用を考えるとまだ十分なものではないというのが現状である。その理由は、必要十分条件は無次元の問題であり計算が困難であること、計算のしやすい十分条件は保守性が強く改善の余地があること、また比較的保守性の少ない条件はシステムの係数行列が変動する場合のロバスト性やむだ時間が変動する場合の条件に拡張できないことがある。本論文では、このような観点から、有限次元の条件でかつむだ時間が変動する場合も扱えるような、むだ時間をもつ制御系の安定性、ロバスト安定性およびロバスト安定化問題を考察した。

第 2 章では、三種類の安定条件を導出したが、いずれも有限次元の計算しやすい条件として得ることを目的とした。また、むだ時間が変動しても適用できることを目的として、時間領域から条件を導出した。最初の方法では、むだ時間システムの状態遷移行列を、FLTI システムのそれで近似することを考えた。そして、この FLTI システムを適切に選ぶことで保守性を緩和したものとなっていることを示した。二番目の方法では、むだ時間に依存しない条件と L_i のむだ時間に依存した条件をそれぞれ完全に含んだ条件を導出した。この場合、あるパラメータ行列を導入するが、条件は線形行列不等式 (Linear Matrix Inequality, LMI) の形で求められており、一番目の方法のように試行錯誤的に探す必要はない。三番目には、二番目の方法で用いたパラメータ行列を増やすことでさらに保守性を軽減した条件を導出した。この条件も LMI 型になっており、計算機を用いて安定性を効率よくチェックできるものとなっている。さらに、スカラ系を用いてこれらの条件の差異を明確にした。

第 3 章では、ロバスト安定性を考察した。とくに二番目の安定条件に基づいたロバスト安定条件はむだ時間が変動する場合を考えているが、同様の手法で他の安定条件もむだ時間が変動する場合に拡張できる。さらに、むだ時間の変動の上界と下界がわかる場合を考え、その変動幅を考慮したロバスト安定条件を導出した。ここで導出したロバスト安定条件はいずれも LMI 型となっている。

第 4 章では、ロバスト安定化問題を考察した。まず、二番目の安定条件に基づいたロバスト安定化問題を導出したが、この問題が、双線形行列不等式 (Bilinear Matrix Inequality, BMI) の形で求められる事を示した。しかし、BMI は非凸最適化問題であり、そのままでは効率よく解くことができない。そこで、本論文では問題の構造をうまく活用し、ホモトピー法により BMI を解く方法を提案した。この方法により、可解な BMI がすべて解けるわけではないが、従来の方法では解けなかったものでも解ける場合があることを数値例で示

(氏名：西平 直史 NO. 3)

し、有効性を確認した。また、三番目の安定条件に基づいたロバスト安定化条件では、コントローラのクラスとして、その時刻での状態の値のみをフィードバックするのではなく、導入した補助システムの状態をもフィードバックするもの考えた。そして、このときのロバスト安定化条件が LMI の形で得られることを示した。

最後の第 5 章は結論であり、本研究で得られた成果とその意義について述べた。

氏名	西平 直史		
論文 題目	むだ時間をもつ制御系の解析と設計に関する研究		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	太田 有三
	副 査	教 授	多田 幸生
	副 査	教 授	北村 新三
	副 査	教 授	安田 一則
要 旨			
<p>実在するシステムの中には、伝送路を持ったプラント、空気圧や油圧のアクチュエータを含むプラント、またネットワークを介した制御系などのようにむだ時間が存在するものが少なくない。むだ時間を無視して解析・設計したシステムにおいて、対象としている実際のシステムがむだ時間要素を含む場合、むだ時間が存在するために安定性が破壊されることがある。このように、むだ時間を含むシステムの解析・設計は、実用上重要であり、これまで様々な研究がなされてきた。</p> <p>本研究では、微差分方程式もしくは遅れ型 (retarded) モデルを対象としているが、これらは、無限次元システムとなり、これらをそのまま扱おうと、安定条件が無限次元の問題を含む条件となる。また、これに従い、制御器も無限次元システムとなり、実用上問題があり、安定条件に多少の保守性を加えても、実際に計算可能な有限次元の条件式を導く、またそれを用いて制御器を有限次元として実現する問題について研究が行われている。従来の結果は、むだ時間に依存しない条件とむだ時間に依存した条件に大別することができる。当初は、むだ時間に依存しない条件が盛んに研究され、様々な条件が導出されてきた。この条件は、条件式が簡単で用いやすいこと、また、むだ時間がわからなくても用いることができる便利な条件であるが、むだ時間の情報を用いていないため、保守的な(十分性の強い)条件であるという問題点があった。とくに、むだ時間が小さいときにはこの傾向が強い。そこで、むだ時間の情報を条件に含めることで、条件の保守性を軽減することをねらった条件が近年盛んに研究されているが、安定性においては等価な式変形となっておらず、それが原因となる保守性が生じている。そのため、この保守性を軽減する研究が盛んになされている。このようにむだ時間の安定性、ロバスト安定性およびロバスト安定化問題についての研究は着々と成果をあげつつあるが、実際の制御問題への適用を考えるとまだ十分なものではないというのが現状である。その理由は、必要十分条件は無限次元の問題であり計算が困難であること、計算のしやすい十分条件は保守性が強く改善の余地があること、また比較的保守性の少ない条件はシステムの係数行列が変動する場合のロバスト性やむだ時間が変動する場合の条件に拡張できないことがある。</p> <p>本論文では、このような観点から、有限次元の条件でかつむだ時間が変動する場合も扱えるような、むだ時間をもつ制御系の安定性、ロバスト安定性およびロバスト安定化問題を考察する。本論文は、5章から構成されている。</p>			

氏名	西平 直史
<p>第1章は緒論であり、研究の背景と目的について述べている。また、本文の構成について概説している。</p> <p>第2章は、むだ時間システムに対する三種類の安定条件を導出している。一番目の安定条件は、むだ時間システムの状態遷移行列を、有限次元線形時不変 (FLTI) システムのそれで近似するという方法によって導出している。二番目の安定条件は、あるパラメータ行列を導入し、それを変数の一部として含む線形行列不等式 (Linear Matrix Inequality, LMI) で表現される。LMI は凸計画問題であり、効率よい解法が知られている。三番目の安定条件は、二番目の方法で用いたパラメータ行列を動的なシステムに拡張し、変数行列を増やすことでさらに保守性を軽減したものであり、LMI で表現される。</p> <p>第3章では、むだ時間の変動を考慮したロバスト安定性について考察し、二番目と三番目の安定条件に基づいた二種類のロバスト安定条件を導出している。前者は従来結果を理論的には含むという意味で、従来結果の一般化となっている。</p> <p>第4章では、ロバスト安定化問題について考察し、二番目と三番目の安定条件に基づいた二種類のロバスト安定化条件を導出している。前者については、双線形行列不等式 (Bilinear Matrix Inequality, BMI) となる。BMI は非凸最適化問題であり、一般的には効率よく解くことが難しいが、ここでは問題の構造をうまく活用したホトビー法により BMI を解く方法を提案している。また、後者については、コントローラのクラスとして、その時刻での状態の値のみをフィードバックするのではなく、導入した補助システムの状態をもフィードバックするものを考え、このときのロバスト安定化条件が LMI の形で得られることを示している。</p> <p>第5章は結論であり、本研究で得られた成果とその意義について述べている。</p> <p>以上のように、本研究で得られた成果は、従来の研究結果を大幅に改良したもの、または、新しいアプローチによる有益な結果となっており、むだ時間を含むシステムの実際的な解析・設計に寄与するところが大きい。</p> <p>よって学位申請者 西平 直史は、博士 (工学) の学位を得る資格があると認める。</p>	