

氏名（本籍）	ひら ま ゆう すけ 平 間 雄 輔（東京都）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第131号
学位授与の要件	学位規則 第4条 第1項
学位授与年月日	平成27年3月31日
学位論文題目	産業用補償器のための高次システム同定法とアドバンストPID制御に関する研究
論文審査委員	主査 廣 木 富士男 副査 鈴 木 健 司 森 下 明 平 涌 井 伸 二（東京農工大学） 濱 根 洋 人

## 論文要旨

第1章は、本研究の背景と目的、国内外の研究状況を述べる。汎用調節計は産業界で広く利用される産業用の補償器であり、温度、圧力、流量などの制御に利用される。本論文は、汎用調節計が扱う温度制御系に着目する。1922年にPID制御が提案され、1936年に空気圧を利用したPID調節計が登場した。以降、1980年代にはPID調節計はマイクロプロセッサによるデジタル調節計へ発展し、アドバンストPID制御や自動調整技術が開発された。一方、1980年から1990年代にかけ、PID制御と並行して、様々な制御手法の研究が進められ、産業界への応用も数多く報告されている。しかし、産業界では97%がPID制御を利用しているのが現状である。これは、PID制御が他のアドバンスト制御よりも産業界の要求に適合しているからと考えられる。一方、ハードウェアの発展も目覚ましく、2000年代に入り汎用調節計は制御周期が高速になり、従来よりも複雑な制御手法が実装できるようになった。くわえて、競争領域となる独創的なソリューションが研究された。とくに、温度制御系において過渡特性の最適化が注目された。温度制御系は化学反応や操業条件の変更を伴うものもあり、応答波形が高次となる。過渡特性を厳密に制御するには、制御対象の高次応答を同定する必要がある。また、過渡特性の制御要求は高まり、整定時間などの最適化も要求されるようになった。以上の要求を鑑み、本論文を2部構成とし、第1部は高次システムの同定法について述べ、第2部は整定時間を指定可能なアドバンストPID制御法について述べる。

第2章は、ノイズや外乱に乱された閉ループ応答から、制御対象を高次モデルで同定するためのラゲール関数による高次システム同定法について述べた。一般的なシス

テム同定法として、産業界では制御対象のプロセスゲイン、時定数、むだ時間の同定に開ループステップ応答法による最小二乗法や非線形最小二乗法、応答波形の幾何学的な特長を抽出する同定手法が用いられる。時定数の大きな温度制御系において、安全なステップ入力幅での開ループ試験は膨大な時間を要することや、産業装置ひとつひとつに開ループ試験を実施することは困難である。また、簡素なステップ応答実験は、ノイズや外乱の影響を受けやすく、モデルに必要な全ての情報を得ることが難しい。ノイズ波形を除去するためのフィルタリング処理は、制御対象の重要な周波数特性が失われる危険性もあり、非専門のエンドユーザには実施不可能である。くわえて、最小二乗法は非線形性が強いプラントを同定することが困難であり、非線形最小二乗法は繰り返し計算を必要とし、産業界から産業界へ流通する汎用調節計では扱いにくいという問題点も挙げられる。1960年にラゲール関数と級数が提案された。これまでに、ラゲール級数を利用したシステム同定が提案されている。しかしながら、高次応答を表現できるものの、タイムスケールリングファクタ $p$ の最適化に複雑な演算を利用しており、実際の産業装置への導入に耐えうるものではない。本論文はラゲール級数の特長を活かしつつ、産業装置への導入を考慮し、整定時間 $T_m$ をタイムスケールリングファクタ $p$ の最適化へ新たに導入することで、簡易な最適化手法を提案する。くわえて、最適化するタイムスケールリングファクタ $p$ の探索範囲と閉ループ応答の関係を明示し、温度制御系に適したモデルの次数を提案する。制御対象の低次モデルがノミナルモデルとして利用できる場合、タイムスケールリングファクタ $p$ の最適化に必要な整定時間 $T_m$ とPIパラメータの推奨値を明らかにした。タイムスケールリングファクタ $p$ を最適化する際、積分計算を伴う繰り返し計算を必要とする。そこ

で、ラゲール関数の行列表現を導入し、閉ループ応答データなどの定数部分とラゲール関数などの変数部分を分離して表現することで繰り返し計算を削減させ、閉ループ応答データを容易に取り入れることができ、かつモデルの算出に要する時間の短縮法を提案した。くわえて、閉ループ応答のダイポール特性に着目し、プラントモデルの抽出を極零消去を考慮することで低次数モデルに置換できることをあわせて提案した。

第3章は、様々なベンチマークモデルを用いて、提案する高次システム同定法の適用範囲を検証した。ベンチマークモデルの閉ループ応答に高周波ノイズと低周波外乱を重ねさせ、その閉ループ応答を基にシステム同定を行った。推定した制御対象のモデルは、時間領域および周波数領域における特性が真のモデルと一致した。ベンチマークモデルには熱系プロセスに代表される一次遅れ+むだ時間系も含まれており、広範囲の正規むだ時間に対して、提案法は高精度で同定が可能であることを明らかにした。ラゲール関数の行列表現による演算時間の検証において、ラゲール関数の行列表現を使用した場合は、演算時間が約77%改善される結果が得られ、ラゲール関数の行列表現の有効性を実証した。

第4章は、温度制御装置を用いて、提案する高次システム同定法の実験検証を行い、その有効性を示した。実験装置は常に外界とエネルギーの流入出が介在するため、応答波形は高次応答となる。産業界で一般に利用される一次遅れ+むだ時間系は単純な上に凸の応答波形となり、高次応答を表現できない。また、生産時に材料の投入など外乱が生じることは避けられず、外乱による変曲点もモデルに含む必要がある。提案法は、高次モデルを利用することで装置のみでなくの周囲の環境を含んだモデルを算出し、実際の稼働条件を考慮したモデルの作成を実現した。以上より提案法の有効性を明らかにした。

第5章は、整定時間を指定するアドバンストPID制御について述べた。熱系プロセスは時定数が大きく、むだ時間が存在する。このような制御対象を任意の整定時間で整定させるPID補償器を設計することは、熟練の技術者でも困難を極める。これまで、整定時間に着目した手法は、過渡応答の向上のために装置の起動を最短時間にするのを優先的に開発されてきた。しかし、任意の整定時間に着目した手法は少ない。そこで、本論文は任意の整定時間で装置を起動させる比例帯の調整法を提案し、その有効性を示した。比例帯は温度制御に特有の制御手法であり、汎用調節計に搭載されている。整定時間が指定できれば、産業界において材料の搬入、運搬、配置や作業員の配置や管理の最適化が行えるだけで

なく、均一温度制御への応用も期待できる。さらに、本論文はオーバーシュートの抑制法についても述べた。押出成形機などの熱系プロセスにおいて、オーバーシュートの発生は、装置内部で材料を過剰に加熱することとなり、熱安定が悪く劣化しやすい材料では材料の劣化、分解や炭化を生じさせる。したがって、温度制御系において、オーバーシュートの抑制は必須である。提案法は、一次遅れ+むだ時間系のステップ応答を基に任意の時刻でオーバーシュートすることなく目標値に整定する多段のステップ入力を導出し、比例帯の調整に応用できることを示した。また、操作量の制約を考慮し、指定が可能な整定時間の有効範囲を示した。比例帯およびPIDパラメータは、上述した多段のステップ入力とその応答波形から導出できることを明らかにし、調整法を示した。PIDパラメータが指定する整定時間と独立の関係であることを明らかにし、指定する整定時間を変更しても、PIDパラメータを再度調整する必要がないことも併せて述べた。PIDパラメータは比例帯の幾何学的な関係と整定時間のみに着目しているため、提案法における閉ループの安定性を検証した。安定性の検証は、熱系プロセスで一般的に用いられるCHR法の閉ループ特性と比較して、提案法がCHR法と同等の安定性を有していること示し、かつ指定する整定時間が安定性に影響を与えないことを明らかにした。

第6章は、温度制御装置による整定時間を任意に変更するシミュレーションおよび実験により、提案法の有効性を検証した。提案法により、昇温特性や目標値の異なる制御対象を任意の時刻で整定できることを明らかにした。また、オーバーシュートが発生しないことから、比例帯におけるPID制御に切換る点が最適化されていることを明らかにした。くわえて、整定時間を指定することで、過渡応答を均一化できる場合があることも併せて明らかにした。複数の整定時間を用いることで整定時間とPIDパラメータが独立であることを実証して、提案法が実用性を有していることを明らかにした。

第7章は、本論文の成果を各章ごとに整理して述べ、今後の展望を述べた。過渡応答を改善するには、むだ時間を正確に把握する必要がある。提案法は制御対象の過渡特性を高精度で同定できるため、むだ時間を正確に抽出する手法に応用できる可能性がある。くわえて、本手法は近年に開発が進められている様々なアプリケーションに応用できる。一方、本アドバンストPID制御は、生産ラインのマネージメントを支援するアプリケーションに応用できる。本論文の提案手法は様々な産業機器および装置に適用可能である。これらの応用に寄与できると考える。

## 論文審査要旨

本論文は熱系プロセスの温度制御に関する研究であり、2部構成となっている。即ち、第1部（第2章、第3章、第4章）はラゲール関数による高次システム同定法であり、第2部（第5章、第6章）は整定時間を指定するアドバンストPID制御に関する内容である。

本論文は7つの章より成り立っており、第1章は本研究の背景と必要性が述べられている。即ち、熱系プロセスは機械の熱容量が大きいと、時定数が大きく、むだ時間も存在する。また、定常状態のみならず過渡特性も厳密に制御する要求も高まっている。これまでの一般的なシステム同定法は「一次遅れ+むだ時間」系と仮定し、ステップ応答による最小二乗法や非線形最小二乗法を用いている。この手法の問題点は以下の通りである。時定数が大きいとシステム同定に膨大な時間を必要とする。また、高周波の雑音や低周波の外乱の影響を受けた場合、フィルタリング処理が一般的であるが、制御対象の重要な周波数特性が失われる可能性がある。さらに非線形性が強い場合が多く、「一次遅れ+むだ時間」の仮定そのものに無理がある場合がある。このような場合高次のシステム同定が必要となり、ラゲール関数を用いた手法なども提案されているが、開ループであるため最適化手法が複雑で実用的でない。そこでこれらの総合的対策として、PI補償器を含むフィードバックシステムの閉ループ応答を用いる高次システム同定法の必要性を提案している。

熱系プロセスは一般に複数のシステムから構成されており、それぞれ熱的特性が異なる。このような場合においても、各システムの整定時間を整えて均一温度制御が行われることが望ましい。そこで、PIDパラメータの変更無しに、整定時間を任意に設定することの必要性が提案されている。

第2章ではフィードバック制御系の閉ループ伝達関数の推定モデル（ラゲールモデル）をラゲール関数の正規直交性を利用してインパルス応答を近似し、これをラプラス変換することにより導出している。また、推定した伝達関数が安定であれば、周波数領域においても安定であることを示している。次にラゲール係数を決める際に、雑音や外乱を含む閉ループ応答より、これら特性を考慮したラゲールモデルを導出している。さらに、求めたラゲールモデルを検証するため、インパルス応答および周波数領域における評価関数を示し、最適なタイムスケールリングファクタを求めている。また、本提案法を適用する際の整定時間およびPIパラメータについても言及し

ている。ラゲール係数やタイムスケールリングファクタを求める際膨大な計算時間を必要とするが、新たに変数行列と定数行列を導入し、計算時間の短縮化を図っている。最後に、産業用補償器への適用を考慮し、ラゲールモデルよりプラントモデルを抽出し、接近している極と零点が存在する場合は極零相殺を行い、モデルの低周波領域の情報を欠落することなく低次化を行っている。

第3章は、様々なベンチマークモデルを用いて、提案する高次システム同定法の適用範囲を検証した。まず、ベンチマークモデルの閉ループ応答に高周波雑音と低周波外乱を重畳させ、その閉ループ応答を基にシステム同定を行った。モデルの次数は当初7次に固定し、提案の手法を用いて3次に低次数化した。推定モデルの定常ゲインの誤差は全て1%前後であり、時間領域および周波数領域における特性が真のモデルと極めて高い精度で一致した。次に、ラゲール関数の行列表現による演算時間の短縮の有効性を検証した結果、演算時間が約77%改善され、ラゲール関数の行列表現の有効性を実証した。

第4章は、温度制御装置を用いて、提案する高次システム同定法の実験検証を行った。実験装置は常に外界と熱の流入出が介在するため、応答波形は高次応答となる。提案法は高次モデルを利用することで装置のみでなくの周囲の環境を含んだモデルを算出し、実際の稼働条件を考慮したモデルの作成を実現した。以上より提案法の有効性を明らかにした。

第5章は、整定時間を指定するアドバンストPID制御について述べた。温度制御に特有の比例帯制御に着目し、整定時間の任意設定を行った。即ち、一時遅れ+むだ時間で近似できる熱系プロセスにおいて、過渡状態の操作量を決定するパラメータに整定時間を組み込み、操作量をPID制御による操作量に切り換える点と制御量を整定時間の関数とした。これによりPIDパラメータの変更なしに、整定時間を任意に設定することを可能とした。さらに、オーバーシュートの抑制法についても述べられており、熱系プロセスで一般的に用いられるCHR法の閉ループ特性を比較して、CHR法と同等の安定性を有していることも明らかにした。

第6章は、昇温特性や目標値の異なる複数の制御対象を任意の整定時間で起動するシミュレーションと実験を行った。その結果、第5章での提案の有効性が確認でき、実用性を有していることを明らかにした。

第7章は、本論文の成果を各章ごとに整理して述べ、今後の展望についても言及している。

以上のように、熱系プロセスのシステム同定には、時定数の大きさや雑音・外乱の影響等種々の問題を含んで

いるが、ラゲール関数の正規直交性を利用して、高次のシステム同定を行うことによりこれらの諸問題を解決している。また、本手法はPI補償器を含む閉ループ応答でシステム同定を行うので、従来のシステム同定のためのステップ応答試験が必要なくなる。さらに、PID制御において、整定時間をPIDパラメータの変更なく任意

に設定する提案手法により、均一温度制御が極めて簡単に行え、またピーク電力抑制等への応用の可能性を秘めている。

以上のことから、本論文は博士（工学）の学位請求論文として充分価値があるものと認められる。