

様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18760318

研究課題名(和文)変数誤差モデルに対する実現理論の構築に関する基礎的研究

研究課題名(英文)Basic researches on realization theory for errors-in-variables models

研究代表者

田中 秀幸 (Tanaka Hideyuki)

京都大学・情報学研究科・助教

研究者番号：90303883

研究成果の概要：

モデルの集合を与えるような多入力多出力システムの同定のための基礎として、新たな実現理論を提案した。また、これまでにある実現理論(確率実現等)を進め、フィードバックもとでのシステム同定(閉ループ同定)や非線形システムの同定のためのアルゴリズムを導出した。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2006年度 | 1,000,000 | 0 | 1,000,000 |
| 2007年度 | 800,000 | 0 | 800,000 |
| 2008年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,600,000 | 240,000 | 2,840,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学(細目番号 5107)

キーワード：システム同定，有界誤差モデリング，確率実現，不定実現，部分空間同定法，リッカチ方程式，ハマーsteinモデル，閉ループ同定

1. 研究開始当初の背景

制御工学では、モデルに基づく制御系設計が発展しており、モデリングは重要である。

ロバスト制御の成功に刺激され、モデルの集合を求めるいわゆる「モデル集合同定」やロバスト同定が1990年代より注目を集めている。一方、計算機パワーを背景としてシステムの入出力データから多入力多出力の状態空間モデルを求める「部分空間同定

法」も1990年代飛躍的に発展した。しかし、モデル集合同定と部分空間同定法の相性は極めて悪く、モデル集合を与えるような部分空間同定法は開発されているとはいえない状況にある。

部分空間同定法は、1960年代から始まる実現理論を基礎としている。また、確率実現における状態推定はカルマンフィルタが理論の背後にあり、確率部分空間同定法の基礎となっていることもよく知られている。

2. 研究の目的

- (1) 本研究の目的は、部分空間同定法の基礎理論である実現理論を進め、モデル集合を与えるような新たな実現理論を構築することである。
- (2) これまでの実現理論(確率実現等)についても研究を行い、閉ループ同定や、非線形システムの同定に対して、新たなアルゴリズムを開発する。

3. 研究の方法

- (1) システムの入力と出力の両方に雑音加わるモデルは「変数誤差モデル」とよばれる。変数誤差モデルのシステム同定では、モデルが一意に決まらないことが示されている。そこで、変数誤差モデルの同定を軸に、モデルの集合を求める同定法について考察する。

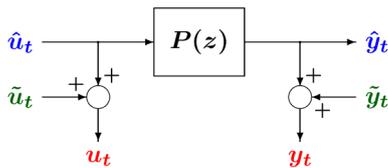


図 1: 変数誤差モデル (雑音が入出力に加わって、入出力が観測される。システムの入出力が青字、雑音が緑字、観測入出力は赤字)。

- (2) 研究代表者がこれまで研究を行ってきた確率実現や部分空間同定法の研究に基づいて、確率システムの推定法やスペクトル密度関数を用いて、モデル集合の同定のための実現理論を導出する。具体的には、確率実現の背後にあるカルマンフィルタを H 無限大フィルタへと拡張して、新たな実現を求める。また、対応するモデル集合を求める問題を示す。

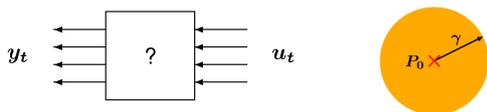


図 2: 多入力多出力システムの同定(左)と誤差ノルムが未満のモデル集合を求める概念図(右)

- (3) 研究代表者が行ってきた確率実現の研究を閉ループ同定や非線形システムの同定へと拡張させる。

4. 研究成果

本研究課題に関係する研究成果は、以下の 4 つに分類できる。

- (1) 不定実現理論の提案
- (2) 確率実現理論に関する研究。
- (3) 実現理論に基づく閉ループ同定
- (4) 実現理論に基づくハースタインモデル(非線形システム)の同定

- (1) 不定実現理論の提案

モデル集合を与えるようなシステム同定の基礎として、不定実現理論を提案した。

周波数領域における変数誤差モデルの問題を考えるとところからスタートした。与えられた入出力結合スペクトルに対して、周波数上での誤差ノルムがある一定値未満となるモデルを求める問題を考えた。これは SYSID 2006 に提案した変数誤差モデルの同定問題の一般化であり、周波数重みがついたものになっている。この結果を CDC 2006 において発表した。

[SYSID 2006 での研究発表]H. Tanaka and Katayama: Identification of dynamic errors-in-variables models from discrete time frequency domain power spectra, Preprints of the 14th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2006), pp. 202-207 (2006)

しかしながら、CDC 2006 で発表した問題は、SYSID 2006 で提案した問題に比べて複雑であり、残念ながら新たな実現理論のための拡張がうまくいかなかった。このため SYSID 2006 で発表した結果を時間領域へと拡張し、CDC 2007 に投稿した。その際に、査読者によって、データが変数誤差モデルを生成されることが適切ではないことが指摘されたため、変数誤差モデルのためのシステム同定という枠組を廃止し、より実現理論らしい枠組とした。すなわち、入出力結合スペクトル密度関数を与えられているもとで、線形動的モデルの集合を与える問題を提案した。ただし、数値シミュレーションでは変数誤差モデルを用いている。

提案した問題に対し、確率実現を拡張し、条件をみたすような集合を与える方法を H 無限大フィルタに基づいて示した。さらに、 H 無限大フィルタによるリッカチ方程式に基づいて、確率実現と同様なリッカチ方程式が得られることを示した。この場合のリッカチ方程式の解は正定とはならず、不定となる。この結果に基づいて、新たな実現を不定実現とよび、アルゴリズムを導出した。なお、確率実現のスペクトル密度関数は複素単位円周上で正定(正実)になるのに対して、不定実現では対応するものがポポフ関数となり、不定となる。

実用上はまだ多くの課題があるが、「モデル集合を導出するような実現は存在するのか?」という問いに対して、不定実現という一つの回答を得たと考えている(CDC 2007 で採択され、発表)。

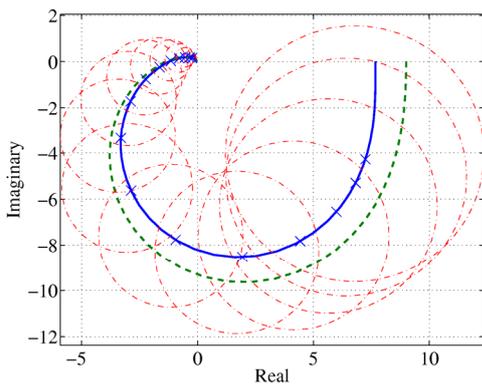


図 3: 数値シミュレーション結果。制御対象の入出力に雑音を加えてデータとした。緑の点線が制御対象、青が中心解による推定値のナイキスト線図を示す。モデルの集合が赤の丸の範囲内にある(保守性が大きく、モデルの集合が大きくなるのは今後の課題)。

確率実現では、リッカチ差分方程式の解が定常な安定化解に収束している。これは確率部分空間同定法において、イノベーション表現の状態推定値が得られることの基礎となっている。このことが、部分空間同定法における状態推定の鍵となっているといっても過言ではない。

不定実現のアルゴリズムをシステム同定へと拡張するために、不定実現のリッカチ差分方程式が安定化解を与えるかどうかを調べ、

実際に与えることを具体的に示した。しかしながら、モデルの集合がより小さくなるようにすると、リッカチ差分方程式の解の収束が遅いことがシミュレーションよりわかった。収束性の改善については今後の課題である。この結果を SYSID 2009 に投稿したところ採択され、発表予定である。なお、SYSID2009 では Co-Chair に招待されている。

(2) 確率実現に関する研究

有限個の時系列データに確率実現をそのまま当てはめた場合に、必ずしもスペクトル密度関数が複素単位円周上で正定値(正実)にならないことから、確率システムのイノベーション表現を求める際にアルゴリズムが停止するという問題があった。

上記の問題に対して、確率実現について研究をおこなった。なお、不定実現の提案は、確率実現の正実性の知識に基づいて行われている。

本研究では、データを3種類に分けて厳密に議論をするところから始めた。具体的には、データを(i)無限個の時系列が与えられる場合(正確な共分散行列が無限個与えられる)、(ii)有限個の正確な共分散行列が与えられる場合、(iii)有限個の時系列が与えられる場合(不正確な共分散行列が有限個与えられる、すなわち、これまでの確率実現アルゴリズムをそのまま当てはめると、スペクトル密度関数が正実とはならない)の3つに分けた。

まず、(i)の場合にヒルベルト空間を構成し、与えられた無限個の共分散行列に一致するような確率システムの状態空間表現を与えた。提案したアルゴリズムでは、(iii)の有限個の時系列にも対応できるような方法となっている。この結果を Automatica に投稿したところ、2006年に採択された。

次に、(ii)の有限個の正確な共分散行列が与えられる場合に、Automatica (2006)で提案したアルゴリズムについてさらに考察した。その際に、我々が提案したアルゴリズムと、Lindquist & Picci の提案したアルゴリズム、Maciejowski のアルゴリズムが(ii)の場合では同じ結果を与えることを示した。また、Maciejowski が安定最小位相な確率システムを与えることを予想していたが、ある条件のもとでこの予想が正しいこ

とを証明した．この結果を Automatica に投稿したところ 2007 年に，採択された．

これらの成果により，確率システムの同定アルゴリズムの導出について，実現理論に基づく方法を共著者(Katayama)とともに示すことができたと考えられる．具体的には，まずデータが無限個与えられる理想的な状況で正確な議論を行い，有限個のデータに適用することを考慮して実現アルゴリズムを導出する．つぎに，データが有限個与えられる現実的な状況へと当てはめてシステム同定アルゴリズムを導出する．なお，このような方法論を「実現理論に基づくシステム同定」として，2007 年 12 月に RACOT 研究会にて講演を行った(招待講演)．

(3) 実現理論に基づく閉ループ同定

実現理論に基づいて，2 つの場合の閉ループ同定について考察した．外部励起信号が観測される場合と観測されない場合である．

外部励起信号が観測される場合に，Picci & Katayama による直交分解に基づいて確定系と確率系に分けて直接法により閉ループ同定を行う方法を Katayama と提案した．この結果を Automatica で発表したところ，2007 年に採択された．

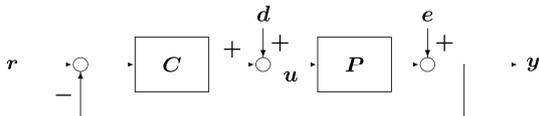


図 4: 閉ループ同定の様子．外部励起信号 r と d が観測できる． u と y は観測できるが， e は雑音のため観測できない．

外部励起信号が観測されない場合に，確率実現に基づいてスペクトル密度関数を推定し，閉ループ同定を行う方法について考察した．従来から，この問題は結合入出力のスペクトル密度関数とスペクトル分解によって扱われていた．この問題に対して，スペクトル因子を用いる場合とその逆を用いる場合について論じた．スペクトル因子を用いた場合の閉ループ同定では，推定した制御対象の次数が補償器の次数分高くなっているのに対し，逆を用いる場合には制御対象の次数と同じとなっていることを示した．この結果を ECC2009 に投稿したところ，採択された．

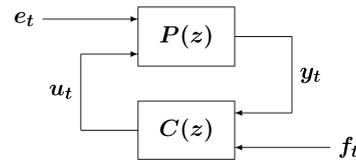


図 5: 閉ループ同定の様子．外部励起信号の e と f は観測できない． u と y のみ観測できる． $P(z)$ は遅れをもち，直達項をもたないと仮定する．

閉ループ部分空間同定法について，2008 年，6 月と 9 月に招待講演において説明をおこなった．ECC2009 では，発表したセッションにおいて，Co-Chair をつとめた．

(4) ハーマースタインモデルの同定

実現理論に基づいてハーマースタインモデルとよばれる非線形システムの同定について，研究を行った．ハーマースタインモデルは，非線形静的システムに動的線形システムを結合したシステムであり，ブロック指向なシステムといわれる．ブロック指向なシステムは比較的シンプルな非線形システムでありながら，化学プラント，生物システム，次世代エンジン等多くの応用例があり，その範囲は意外に広い．

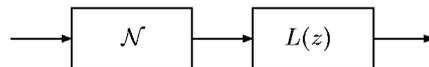


図 6: ハーマースタインモデル． N が静的非線形． $L(z)$ が動的線形システム．

入力が観測できない場合と，観測できる場合について考察を行った．まず，入力が観測できない場合について，確率実現に基づいてシステムを推定する方法を考察した．つぎに，入力が観測できる場合について，三角多項式で動的システムに加わる入力を推定し，PE 性条件とともに考察した．これらの結果を，システム制御情報学会論文誌に投稿したところ，2007 年，2009 年に掲載された．

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)(査読のある学術論文誌)

[1] 田中，葉末：三角多項式を用いた

Hammerstein モデルの同定, システム制御情報学会論文誌, vol. 22, no. 1, pp. 13-20 (2009) (査読有)

[2] 田中, 葉末: 静的非線形奇関数をもつ Hammerstein モデルの同定, システム制御情報学会論文誌, vol. 20, no. 11, pp. 430-438 (2007) (査読有)

[3] T. Katayama and H. Tanaka: An approach to closed-loop subspace identification by orthogonal decomposition, Automatica, vol. 43, no. 9, pp. 1623-1630 (2007) (査読有)

[4] H. Tanaka and T. Katayama: Minimum phase properties of finite-interval stochastic realization, Automatica vol. 43, no. 9, pp. 1495-1507 (2007) (査読有)

[5] H. Tanaka and T. Katayama: A stochastic realization algorithm via block LQ decomposition in Hilbert space, Automatica, vol. 42, no. 5, pp. 741-746 (2007) (査読有)

[学会発表] (計 8 件) (査読のある国際会議と招待講演)

[1] H. Tanaka:
An "Indefinite realization" algorithm via Riccati difference equation, Preprints of the 15th IFAC Symposium on System Identification, Saint-Malo, France (SYSID 2009) (accepted) (査読のある国際会議)

[2] H. Tanaka: On the Riccati difference equation for stochastic realization, Proc. of the 40th ISICIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, Kyoto, Japan (SSS08) (Nov. 14, 2008) (査読のある国際会議)

[3] 田中: 部分空間同定法を用いた閉ループ同定, 日本鉄鋼協会若手フォーラム主催宿泊セミナー, 2008 年 9 月 4 日(木) (場所: 熱海「湯治館そよ風」) (招待講演: 査読無)

[4] 田中: 部分空間法に基づく閉ループ同定, 「使える! 部分空間同定法 --- 基礎から応用まで ---」システム制御情報学会 チュートリアル講座 2008, 2008 年 6 月 16 日(月) (場所: 学校法人 常翔学園 大阪センター) (招待講演: 査読無)

[5] 田中: 実現理論に基づくシステム同定について, RACOT 研究会 SICE 九州支部 制御理論と応用に関する研究会 共催, 2007 年 12 月 27 日(木) (場所: 九州工業大学天神サテライトキャンパス kyutech プラザ) (招待講演: 査読無)

[6] H. Tanaka and T. Katayama:
A realization algorithm for finding a set of linear dynamical models, Procs. of the 46th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, LA USA (CDC2007) pp. 2725-2730 (Dec. 13, 2007) (査読のある国際会議)

[7] H. Tanaka and T. Katayama:
Closed loop realization algorithms via a joint-input-output approach, Procs. of European Control Conference 2007, Kos, Greece (ECC2007) pp. 4633-4638 (Jul. 5, 2007) (査読のある国際会議)

[8] H. Tanaka and T. Katayama:
Identification of errors-in-variables models based on frequency domain power spectra, Procs. of the 45th IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, CA, USA (CDC2006) pp. 181-186 (Dec. 13, 2006) (査読のある国際会議)

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

田中 秀幸 (Tanaka Hideyuki)
京都大学・情報学研究科・助教
研究者番号: 90303883