

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420416

研究課題名(和文) 制御システムのリスクベースデザイン

研究課題名(英文) Risk Based Design of Control Systems

研究代表者

藤崎 泰正 (FUJISAKI, Yasumasa)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：30238555

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：制御システムのリスクベースデザインに関して、基礎と応用の両面より研究を行った。逐次的ランダム化アルゴリズムについては、ロバスト凸最適化、ロバストBMI最適化、確率近似最適化などを対象に、リスク解析を行い、厳密な停止則を与えた。また、可変サンプリング周期をもつ制御システム設計に、ランダム化アルゴリズムが有用であることを明らかにした。さらに、ネットワーク上でのモデルベース制御を取り上げ、ネットワークを介したフィードバック制御系の確率的安定性解析手法を検討した。

研究成果の概要(英文)：Risk based design of several control systems was investigated from both theoretical and application viewpoints. In particular, rigorous stopping rules with risk assessment were established for several sequential randomized algorithms such as robust convex optimization, robust BMI optimization, stochastic approximation and optimization. Furthermore, it was shown that randomized algorithms are in fact useful for output-feedback design of control systems with variable sampling rate. Mean square stability was also studied for model based networked control systems with multiplicative noise.

研究分野：工学

キーワード：制御工学 システム工学 数理工学 アルゴリズム モデル化

1. 研究開始当初の背景

対象システムの不確かさをいかに取り扱うか。どうすれば不確かさの影響を小さくできるか。制御理論の中心課題の一つは、動的システムを対象とした不確かさの科学の構築にある。

例えば、1960年代に研究されたLQG制御では、信号に含まれるノイズを不確かさとして取り上げ、制御性能への影響を最小化するものであった。そこではガウス性白色雑音を対象に、平均や分散を用いて不確かさをスカラー化する統計的最適化を用いている。

一方、1980年代より盛んに研究されているロバスト制御では、信号側のみならずシステム側の不確かさを取り上げ、その制御性能へ与える影響の最小化を目指している。ここでは、モデルの変動や有界なノイズを対象に、モデルやノイズを記述するパラメータの集合として確定的に不確かさを表現している。

これらに対して、2000年以降、様々な観点から研究が行われ、現在いろいろな成果が結実しつつある確率的ロバスト性解析・設計では、それまでのロバスト制御においては確定的に取り扱われていたモデルパラメータやノイズなどの不確かさの集合の上に、確率測度を導入している。これにより、不確かさの表現力が増すのみならず、導入した確率測度に従って不確かさをランダムサンプルするランダム化アルゴリズムや確率的解析を用いることができ、従来手法とは質的に異なった特徴をもつ手法を確立することができる。実際、研究代表者らは、このような研究を進める中で、以下を明らかにして来た。

(1) 確率的な意味での厳密解の提供

取り扱うべきパラメータ数に対してNP困難である(確定的な意味で厳密な解を実用的な時間内に求めることが期待できない)不確かさ・複雑さをもつ制御問題であっても、ランダム化アルゴリズムにより(後述の確率的な意味で)厳密に解くことができる。

(2) 確率測度の自在な設定

不確かさなどのパラメータ集合に導入する確率測度は、正規分布である必要はなく、任意のものでよい。

(3) 精密なモデルを用いた制御系設計

確定的なアルゴリズムにより制御系設計を行う場合、凸化や低次元化により制御対象のモデルを単純化する必要がある。一方、ランダム化アルゴリズムを用いる場合、不確かさ・複雑さをもつ制御問題であっても、単純化することなく、本来のパラメータ構造のまま取り扱うことができる。

(4) 計算量の削減

適切に定式化することにより、ランダム化アルゴリズムで必要となるランダムサ

ンプル数、計算量は、ともに問題サイズの多項式となる。つまり、効率的な解法である。

(5) リスクデザインが可能

ランダム化アルゴリズムにより求められる解は、事前に指定された確率で設計条件を満たすものであり、予め指定されたリスク以内で、アルゴリズムはそのような解を出力する。このとき、解の精度を与えるパラメータと解のリスクを与えるパラメータは、設計者自らが指定できる。つまり、解の精度とリスクを定量的に(確率的に厳密に)デザイン可能である。

本研究課題「制御システムのリスクベースデザイン」は、これまで研究代表者らにより得られたこのような研究を発展させ、モデルパラメータやノイズなどの不確かさの集合の上に確率測度を導入し、定量化されたリスクのもとで、確率的に厳密な解を、ランダム化アルゴリズムを用いて探索するリスクベースデザインを体系化することを目指し、構想されたものである。

2. 研究の目的

本研究課題では、ランダム化アルゴリズムと確率的手法に関して研究代表者らがこれまでに行ってきた種々の研究成果をさらに発展させ、リスクベースデザインという切り口で体系化することにより、システムやデータが内包する不確かさに伴うリスクを定量的にデザイン可能なシステム制御理論を構築することを目指した。特に、解きたい問題の解や評価を(確定的ではなく)確率的に再定義することにより、様々な制御問題に対して柔軟かつ実用的なデザイン手法を確立できないかを詳細に検討した。

3. 研究の方法

本研究課題の最終的な目標は、ランダム化アルゴリズムと確率的手法に関するこれまでの研究成果をさらに発展させ、基礎と応用の両面より研究を進めることにより、制御システムのリスクベースデザインの整理・体系化を進めることにある。そこで、リスクベースデザインの基礎と応用のそれぞれについて、以下に示すような具体的な課題を設定し、理論研究を行なった。

(1) リスクベースデザインの基礎

ランダム化アルゴリズムそれ自身の理論的拡充を通して、リスクベースデザインの体系化を目指した。設定した研究課題としては、種々の逐次的ランダム化アルゴリズムのリスク解析やロバスト最適化のためのランダム化アルゴリズムの構築、性能評価などである。具体的に考察の対象としたランダム化アルゴリズムには、確率近似、

(確率近似を援用した)確率最適化、(確率的解析中心や最大体積楕円体に基づく)ロバスト凸最適化、分枝限定法を援用したロバストBMI最適化などがある。

(2) リスクベースデザインの応用

制御システム設計への確率的手法の適用方法の検討を通して、リスクベースデザインの体系化を目指した。設定した研究課題としては、可変サンプリング周期をもつ制御系の設計、センサネットワークにおける分散状態監視アルゴリズムの性能解析、データベース制御に関するアルゴリズム構築やモデルの信頼性解析、ネットワーク上でのモデルベース制御系の確率的安定性解析と安定化制御則設計などである。

4. 研究成果

本研究課題により得られた成果は、年度毎に以下のようにまとめることができる。

(1) 計画1年目(平成26年度)

まず、リスクベースデザインの基礎として、ランダムイズドアルゴリズムそれ自身の理論的拡充を目指し、逐次的ランダムイズドアルゴリズムのリスク解析について、研究成果をまとめた。ここでは、確率的解析中心に基づく切除平面法を取り上げ、指定された求解リスクと確率的解精度を達成する反復回数を明確化するとともに、多重切除アルゴリズムの有効性を示した(雑誌論文)。一方、リスクベースデザインの応用としては、制御システム設計への確率的手法の新たな適用先として、可変サンプリング周期をもつ制御系の設計を取り上げ、研究を進めた。そこでは、サンプリング周期が時々刻々変化するような状況のもとで、H₁ノルムやH₂ノルムに従って指定された制御性能を達成し続けるような制御系の設計に、ランダムイズドアルゴリズムが有用であることを明らかにした(学会発表)。

(2) 計画2年目(平成27年度)

リスクベースデザインの基礎については、ランダムイズドアルゴリズムそれ自身のさらなる理論的拡充を目指し、逐次的ランダムイズドアルゴリズムのリスク解析について研究成果をまとめた。ここでは、確率近似法を取り上げ、指定された求解リスクと確率的解精度を達成する反復回数を明確化するとともに(雑誌論文)、最大体積楕円体を利用する逐次的ランダムイズドアルゴリズムがロバスト凸最適化に有用であることを示した(雑誌論文)。一方、リスクベースデザインの応用としては、制御システム設計への確率的手法の新たな適用先として、センサネットワークを取り上げた。そこでは、分散状態監視アルゴリズムの確率的性能解析を行い、ネットワークに由来する構造的制約の

もとでコミュニケーションゲインの設計法を検討した(学会発表)。また、可変サンプリング周期をもつ制御系についても、ランダムイズドアルゴリズムを用いる設計法の研究を進めた(雑誌論文)。

(3) 計画3年目(平成28年度)

最終年度では、これまでの研究成果をまとめることに注力するとともに、今後の展開につながる新たなアイデアの発掘を行った。まず、リスクベースデザインの基礎に関して、ロバスト最適化のためのランダムイズドアルゴリズムについての研究成果をまとめた。ここではロバストBMI最適化を対象に、求解リスクが明確なアルゴリズムを構築した(雑誌論文、学会発表)。また、逐次的ランダムイズドアルゴリズムのリスク解析として、確率最適化を取り上げ、指定された求解リスクと確率的解精度を達成する反復回数を導出し、研究を完成させた(雑誌論文)。一方、リスクベースデザインの応用としては、データベース制御に関する研究を進めた。ここでは、デュアルレートシステムに対するデータ駆動型追従制御アルゴリズムを構築するとともに(学会発表)、データに基づいて導出されたモデルの信頼性解析について、基礎的考察を行った(学会発表)。また、制御システム設計への確率的手法の新たな適用先として、ネットワーク上でのモデルベース制御を取り上げ、ネットワークを介したフィードバック制御系の確率的安定性解析を行い、安定化制御則の設計法を検討した(雑誌論文、学会発表)。さらに、可変サンプリング周期をもつ制御系について、これまで実施してきたランダムイズドアルゴリズムを用いる設計法の研究を完成させた(雑誌論文)。

以上のように、雑誌論文8件、学会発表8件を通して、本研究課題を実施して得られた成果の公表を行なった。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計8件)

Takayuki Wada, Yasumasa Fujisaki, Stopping Rules for Optimization Algorithms Based on Stochastic Approximation, Journal of Optimization Theory and Applications, 査読有, Vol.169, 2016, pp.568-586 DOI: 10.1007/s10957-015-0808-7

Hojin Lee, Yasumasa Fujisaki, Output-Feedback Control for Sampled-Data Systems with Variable Sampling Rate, International Journal of Control, 査読有, 掲載決定済, 2017, pp.1-10

DOI: 10.1080/00207179.2017.1299942

Takayuki Wada, Yasumasa Fujisaki,
A Randomized Algorithm for Robust BMI
Optimization,
Proceedings of the 48th ISCIE
International Symposium on Stochastic
Systems Theory and Its Applications,
査読有, 掲載決定済, 2017, pp.111-116

Wataru Toriumi, Yasumasa Fujisaki,
Mean Square Stability of Model Based
Networked Control Systems with
Multiplicative Noise,
Proceedings of the 48th ISCIE
International Symposium on Stochastic
Systems Theory and Its Applications,
査読有, 掲載決定済, 2017, pp.137-140

Takayuki Wada, Yasumasa Fujisaki,
A Stopping Rule for Stochastic
Approximation,
Automatica,
査読有, Vol.60, 2015, pp.1-6
DOI: 10.1016/j.automatica.2015.06.029

Takayuki Wada, Yasumasa Fujisaki,
Sequential Randomized Algorithms for
Robust Convex Optimization,
IEEE Transactions on Automatic Control,
査読有, Vol.60, 2015, pp.3356-3361
DOI: 10.1109/TAC.2015.2423871

Hojin Lee, Yasumasa Fujisaki,
H-2 Control for Sampled-Data Systems with
Variable Sampling Rate,
Proceedings of the ISCIE International
Symposium on Stochastic Systems Theory and
Its Applications,
査読有, J-STAGE, 2015, pp.91-96
DOI: 10.5687/sss.2015.91

Takayuki Wada, Yasumasa Fujisaki,
Probabilistic Analytic Center Cutting
Plane Method with Multiple Cuts,
Proceedings of the 2014 European Control
Conference,
査読有, IEEE Xplore, 2014, pp.2198-2203
DOI: 10.1109/ECC.2014.6862603

〔学会発表〕(計8件)

Takayuki Wada, Yasumasa Fujisaki,
A Randomized Algorithm for Robust BMI
Optimization,
The 48th ISCIE International Symposium on
Stochastic Systems Theory and Its
Applications,
2016.11.4-5, 福岡工業大学(福岡市)

Wataru Toriumi, Yasumasa Fujisaki,
Mean Square Stability of Model Based
Networked Control Systems with
Multiplicative Noise,
The 48th ISCIE International Symposium on
Stochastic Systems Theory and Its
Applications,
2016.11.4-5, 福岡工業大学(福岡市)

可知怜也, 藤崎泰正,
デュアルレートシステムのデータ駆動型追
従制御,
第59回自動制御連合講演会,
2016.11.10-12, 北九州国際会議場(北九州
市)

鳥海渉, 藤崎泰正,
ネットワーク上でのモデルベース制御系の
乗法的雑音のもとでの安定性と安定化,
計測自動制御学会第4回制御部門マルチシ
ンポジウム,
2017.3.6-9, 岡山大学(岡山市)

和田孝之, 北條智大, 藤崎泰正,
自己回帰モデル同定における連結性を考慮
した非漸近的な信頼領域,
第61回システム制御情報学会研究発表講演
会,
2017.5.23-25, 京都テルサ(京都市)

能登健太郎, 藤崎泰正,
分散状態監視アルゴリズムにおけるコミュ
ニケーションゲインの設計,
第59回システム制御情報学会研究発表講演
会,
2015.5.20-22, 中央電気倶楽部(大阪市)

Hojin Lee, Yasumasa Fujisaki,
H-infinity Control for Sampled-Data
Systems with Variable Sampling Rate
SICE Annual Conference 2014,
2014.9.9-12, 北海道大学(札幌市)

Hojin Lee, Yasumasa Fujisaki,
H-2 Control for Sampled-Data Systems with
Variable Sampling Rate,
The 46th ISCIE International Symposium on
Stochastic Systems Theory and Its
Applications,
2014.11.1-2, 京都工芸繊維大学(京都市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤崎 泰正 (FUJISAKI, Yasumasa)
大阪大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 30238555