

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14702

研究課題名（和文）有界伝送ノイズに対するフィードバック制御系の耐性強化

研究課題名（英文）Design of control systems tolerant to bounded transmission noise

研究代表者

新銀 秀徳 (Shingin, Hidenori)

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

研究者番号：60535243

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、制御系に加わる伝送ノイズに対して耐性をもつ制御則を構築した。有界な入力外乱に対してロバストな状態フィードバック制御器を、リッカチ方程式の解を用いてパラメータ化した。この結果から、制御対象の状態の外乱に対するロバスト性を分析することができる。また、モデルの不確かさに対処するため反復学習制御の考え方を取り入れ、性能限界の解析、オブザーバを利用した未知外乱に対する適応手法の開発をおこなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有界な外乱に対して耐性をもつ制御則のクラスを、理論的に簡易な形式で表現し示した。これにより、制御系設計において複雑な数値計算を頼らず、有効な制御器の全体像を把握することができる。また、反復学習制御則の本質的な構造上、弱点となりがちな外乱に対する耐性に焦点をあて、適用可能なシステムの範囲を広げるため耐性強化の方策を示した。

研究成果の概要（英文）：This research provides control strategies robust to exogenous inputs disturbing signal transmission in feedback control systems. All state feedback controllers robust to bounded input disturbances are parametrized by state weight matrix of cheap control and represented by the positive definite solution of the corresponding Riccati equation. This parametrization enables component-wise analysis of robustness of the state to the disturbances. Moreover, iterative learning control technique is employed in our research to cope with uncertainties in plant models. A trade-off relation between transient and steady-state performances is represented by the product of the direct terms of the plant and learning law. An observer-based strategy is provided to improve learning performance in the presence of unknown disturbances.

研究分野：制御工学

キーワード：安定化制御 ロバスト制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

制御系において、制御対象の出力を観測して制御対象に入力を印加する過程には、信号による情報の伝送が不可欠である。この中で、信号に対する擾乱は情報の質を劣化させ、制御性能を低下させる大きな要因となる。古典制御の範疇でも、こうした現象は積分器の導入によるノイズの影響の抑制、ノイズに対する感度抑制限界の解析(ボードの積分公式)という形で扱われてきた。しかしながら、この問題は近年ではより一般化された枠組みで扱うべき重要なテーマとなっている。その理由は、情報通信技術の発達に伴いフィードバック制御系の信号伝送形態が複雑化(遠隔、無線、分散、ネットワークなど)し、不確かな環境下での実時間通信への対応が必要となったことにある。この問題を扱うことにより、通信の基礎理論である情報理論と制御理論の融合や、制御工学の一分野をなす性能限界解析の枠組みの拡張など、新たな理論的發展も期待されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、フィードバック制御系に加わる持続外乱に強い制御則を構築し、耐性限界を明らかにすることである。持続外乱は振幅が有界な信号として扱うと現実的でわかりやすい。しかしながら、そうした信号の全体は理論的には扱いにくく、従来の方法では制御系設計は複雑な数値計算に頼らざるを得ない。例えば、 l_1 制御における制御器の設計は無次元の線形計画問題に帰着し、制御器の次数は高くなる。一方、状態を拘束する不変集合を求めると増幅率を最小にする静的な非線形制御器が得られるが、不変集合は無数の境界をもつ多面体であるため制御器は静的でも複雑になる。このため、制御則が複雑になるばかりでなく、対象システムの性質と制御則や制御性能との間の本質的な関係を捉えることができない。このため、持続外乱を扱いやすくするには、確率過程によりモデル化してパワーや分散により特徴付けたり、内部モデル原理を適用して外乱の生成モデルを想定する必要がある。そこで、対象システムのモデルから容易に構築できる制御則を導出するとともに、システム固有の外乱耐性を解析する。また、モデルパラメータや外乱特性の未知性に対処するため、多くの先見情報を必要としない制御則の構築を試みる。

3. 研究の方法

持続外乱を想定した制御系設計の単純化を目的に、外乱に耐性をもつ安定化制御器のパラメータ化をおこなった。制御対象の安定化は最も基本的な制御仕様であり、これを達成する制御器のパラメータ化は制御系の設計に重要になる実際、広く知られた Youla のパラメータ化はロバスト制御のための基礎的な道具になっている。二次の不変集合にもとづく安定性を導入し、外乱の最大振幅を先見情報として利用する場合としない場合のそれぞれについて、状態を集合の中に留めるとともに時間とともに集合に収束させることを考えた。また、制御対象のパラメータの未知性に対処するため、反復学習制御をもちいてノイズに耐性のある制御則を構築した。そのために、遅延フィードバック制御の手法を導入して入力信号の逐次修正を試みた。

4. 研究成果

(1) 外乱耐性を有する制御器のパラメータ化

一入力の離散時間線形システムに対して、これを有界な入力外乱の下で安定化する制御器のパラメータ化を行った。外乱信号に想定される振幅について、最大値が既知の場合と未知の場合の両方について考えた。最大振幅を既知とすれば制御性能の向上に寄与する先見情報としての利用が期待され、未知とすればその事前見積もりは不要で変化にも適応できる。

安定化における制御仕様は、以下の通りである。外乱が持続的であるとき、制御対象の状態は、常に擾乱の影響を受け続ける。このため、状態を平衡点である原点まわりの任意の近傍に留めたり、時間とともに原点に収束させたりすることはできない。そのため、想定されるすべての外乱に対して、制御対象の状態の大きさを、時間とともに一定のレベルにまで抑制することにする。このとき、状態の大きさは二次形式により評価する。また、対象とする制御器については、線形なものには限定せず、静的な状態フィードバックとして表されるものの全体とする。

本研究の結果、このクラスの制御器の全体を行列パラメータにより記述することができた。このパラメータは、cheap control における状態の重みに相当する正定行列で、制御器は対応するリッカチ方程式の解を用いて表される。ここで、cheap control とは、入力と状態の大きさの重み付きの和を最小にする方法として知られる LQ 最適制御において、入力大きさを評価に含めない特別な場合の制御のことである。このパラメータ化により明らかになった制御器の全体は、LQ 最適制御則を与えるフィードバックゲインと入力値に対するある許容幅により表わされる。従来研究においても、cheap control の制御則は、外乱に対してエネルギーの増幅率を抑制する H 制御や、最大振幅の増幅率を抑制する l_1 制御の特別な場合において最適性が示されている。本研究の結果により、振幅の先見情報を利用する場合にも cheap control が重要

になることがわかった。また、パラメータ化された制御器の制御性能を明らかにした。ここでは、状態が上記の領域に近づく速さを二次形式の値の相対減少量の最悪値により評価した。

さらに、この制御器のパラメータ化に関する結果を、外乱の最大振幅が既知の場合から未知の場合へと拡張した。安定化の仕様を任意の最大振幅に対して満たすべき条件として与え、最大振幅に依存しない制御器を構築するとともに、最大振幅の先見情報としての役割について調べた。安定化の仕様としては、第一に最小限の仕様である不変性とリアプノフ安定性について考えた。これらの性質は、状態が外乱の最大振幅に応じた大きさの原点まわりの領域内に抑制され、その外側からはその領域内に漸近していくことを意味する。これらを満たす静的な制御器の全体を、リッカチ方程式の解を用いてパラメータ化した。制御器のパラメータは、最大振幅が既知の場合と同じく cheap control の状態重みに相当する正定行列である。これらの仕様に加えて、外乱のない場合の漸近安定性および指数安定性に相当する性質についても考えた。その結果、不変性とリアプノフ安定性を満たす制御器は、同時に漸近安定性についても満たすことが分かった。また、パラメータが特別な場合を除けば、指数安定性についても満たすことが明らかになった。このパラメータ化を用いることで、制御対象の状態について、制御下において入力外乱に対するロバスト性が高くなる成分や低くなる成分を抽出することができる。

(2) 未知係数システムのロバスト性解析

制御対象のパラメータが未知の場合にも対処するため、反復学習制御の枠組みを導入して性能解析および学習則の構築を行った。

分散が既知の出力雑音の下で達成可能な軌道追従性能を調べた。学習過程における追従誤差の大きさに関して、過渡性能は反復過程における誤差の減衰率により評価し、定常性能は反復で残る誤差の量により評価した。学習則が満たすべき条件は、誤差の期待値が反復とともに零に収束することとしている。このとき、達成可能な性能の限界として、過渡性能と定常性能の間にあるトレードオフの関係を示した。過渡性能は誤差の収束の速さ、定常性能は最終的に残る誤差の大きさを表わす。この限界は、両者の性能値に1を加えた量の積が常に2であるという形で表現される。このトレードオフの中で達成される性能レベルは、制御対象と学習則の直達項の積に依存する。数値シミュレーションにおいても、追従誤差の大きさは学習則の直達項が小さい方が小さく、大きい方が早く減衰する様子が確認された。

また、観測ノイズに対して耐性のある学習則の構築を行った。観測ノイズに対する耐性を高めるためには、入力信号の更新過程において観測信号から得られる情報を逐次的に入力更新に反映させるフィードバックの役割が重要になる。そこで、一周期前との挙動の差に応じて制御量を補正する遅延フィードバック制御則を取り込んで制御性能の改善を行った。遅延フィードバックはカオス制御の手法の一つであり、周期軌道の安定化に用いられる。フィードバックゲインは、システムのパラメータの推定結果に基づき、追従誤差が小さくなるように設定する。構築した学習則に対しては、数値シミュレーションを通して性能の検証を行った。その結果、学習過程で徐々に明らかになるパラメータの情報を反映することにより、先見情報の乏しいノイズの影響下でも学習過程における良好な過渡特性を実現できることが分かった。特に、学習過程で見られる一時的な追従誤差の増大を抑制する効果が得られた。また、外乱推定オブザーバによりステップ外乱の大きさを推定して学習性能の改善に反映する方法を提案した。この手法を傾斜角が未知の斜面上での倒立振り子台車の制御に応用し、数値シミュレーションを通して有効性を確かめた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 新銀秀徳	4. 巻 53
2. 論文標題 有界振幅の入力外乱に対してロバストな制御器のパラメータ化	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 523-525
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.53.523	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hidenori Shingin
2. 発表標題 A performance analysis for iterative learning control in the presence of observation noise
3. 学会等名 7th IFAC Symposium on Systems Structure and Control（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新銀 秀徳、小河原 加久治
2. 発表標題 入力外乱の抑制のための制御器設計
3. 学会等名 計測自動制御学会 第7回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Shingin
2. 発表標題 A parametrization of controllers quadratically stabilizing single-input discrete-time systems under bounded disturbances
3. 学会等名 9th IFAC Symposium on Robust Control Design（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新銀秀徳、小河原加久治
2. 発表標題 観測ノイズをともなう反復学習制御系の性能解析
3. 学会等名 計測自動制御学会 第6回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Shingin, Y. Ohta
2. 発表標題 SNR analysis for linear quadratic control over Gaussian channels with feedback
3. 学会等名 IFAC 2017 World Congress (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新銀秀徳、小河原加久治
2. 発表標題 入力外乱に対してロバストなあるクラスの安定化制御器について
3. 学会等名 計測自動制御学会 第5回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林大介、松田大輔、新銀秀徳、小河原加久治、今岡啓治
2. 発表標題 外乱推定オブザーバを用いた反復学習制御則の構築
3. 学会等名 第29回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新銀秀徳、小河原加久治
2. 発表標題 入力外乱を受けるシステムに対する状態フィードバック制御則のロバスト性解析
3. 学会等名 計測自動制御学会 第8回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------