

論文内容の要旨

博士論文題目

Synthesis of Time-varying Positive Linear Systems via Geometric Programming

(時変非負線形システムの幾何計画による設計)

氏名

ZHAO CHENGYAN

(論文内容の要旨)

近年、制御工学において非負線形システムが活発に研究されている。通常の線形システムと比べ、係数や信号がすべて非負であるという大きな特徴を有する。このクラスのシステムは化学プラントや生態学など極めて多くの実用において現れる。これは物質の成分や生物の個体数といった物理量は負の値を取らないためである。しかしながら非負線形システムでは従来から培われてきた線形制御理論の知見をそのまま用いることができないため、非負行列や幾何計画法などの新しい数理的アプローチが必要となる。

さらに、動的システムにおいて動作環境の突然の変化や、センサやアクチュエータの故障は、係数が時変、あるいは確率的に切り替わる現象と見なすことができる。このような現象は電力や化学プロセス、通信、社会ネットワークなどの実用的なシステムにおいて広く見られるため、そのような複雑なシステムを扱う方法論が必要となる。そこで非負線形システムに加え、切替線形システムが時変動的システムのモデリングにおいて注目されている。

本博士論文では時変非負線形システムの新しい枠組みを構築する。具体的には3つの課題に取り組んでいる。

1. 確率的切替システムの安定度最適化
2. 一般的な時変有限時間制御
3. 設計工学における最適資源配置問題への応用

主要な貢献は次の通りである。

1については、準マルコフ非負線形ジャンプシステムの安定度最適化問題を研究している。まず、切替非負線形システムのモデリングにおいて確率的切替則

を準マルコフ過程に一般化する。従来研究ではマルコフ過程が用いられていたが、実問題での切替現象をモデリングする上で限界があるため準マルコフ過程に拡張する。スペクトル半径にもとづく安定性解析を用いることで、幾何計画法による安定度最適化問題を解く枠組みを提案する。非負行列の行列指数関数をもつ対数凸性に着目し、パラメータの最適化問題を凸計画問題に帰着している。

2については、一般的な離散時間非負線形システムに対して、その時変パラメータを動的に調整することで有限時間制御を達成するための手法を提案している。対応する既存研究ではシステム行列の対角成分の調整のみが検討されており、この制約は非負システムの様々な応用を考慮したときに過大である。そこで本博士論文では、システム行列の対角成分のみならず非対角成分の調整を可能とする手法を、幾何計画法に基づき提案している。

3については、2の有限時間制御における結果を、設計工学分野における製品開発プロセスに対する最適資源配置問題に適用している。具体的には、ランダム行列、スモールワールド・ネットワーク、スケールフリーネットワーク、ブロック対角行列という典型的な4つの構造をもつ開発プロセスにおける最適資源配置の傾向を網羅的に調査・検討し、いずれにおいてもネットワークの中心性尺度が効率的な資源配置のための有効な指標となりうることを示している。

(1、200字程度)

(論文審査結果の要旨)

本論文では非負線形システムと呼ばれるクラスの動的システムの安定化問題が取り扱われている。従来の制御工学において典型的であるフィードバック制御問題ではなく、非負システムの文脈において自然であるパラメータ調整問題が扱われている。非負システムの内でも特に、切替システムと呼ばれる実用上も重要な場合を扱っている。特に以下の二つの問題設定が扱われている。一つは切替信号が準マルコフ過程に従う場合の連続時間における漸近安定化問題、もう一つは切替信号が確定的な場合の離散時間における有限時間整定問題である。以上の相補的な関係にある二つの問題の双方に対して凸計画に基づくパラメータ調整法を与えており、これらは非負システムの設計理論への重要な貢献とみなすことができる。

特に切替信号が準マルコフ的である前者の場合については、Metzler 行列の指数関数の対数凸性が間接的に見いだされており、この貢献は今後の非負システム理論の展開において重要や役割を果たすことが強く期待されると共に、行列論の立場からも興味深い。非負システム設計における線形計画に依存した従来のパラダイムの変革に繋がりうる貢献であり、制御工学における学位論文として十分な価値があるものと考えられる。

また、離散時間系について得られた結果に基づき、設計工学における製品開発過程の学術研究における代表的な問題である資源配置問題が扱われている。従来は発見的な解法が主流であった本問題に対して、本博士論文で確立された凸最適化に基づく非負システムのパラメータ調整手法を適用することで、大規模な開発過程における系統的な資源配置を可能としている。特に、設計工学において認識されていたネットワーク中心性規範に基づく資源配分の妥当性を網羅的なシミュレーションにより確認しており、設計工学に対する貢献も大きい。

本論文はダイナミクスの切替を伴う非負システムに対する凸最適化に基づいた設計手法の提案、およびその設計工学における問題への適用を行っていることに鑑み、新規性および有効性の観点から一定の学術的意義があるものと評価できる。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。