

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420436

研究課題名(和文)大規模結合非負システムの解析手法の確立と社会システム設計への応用

研究課題名(英文) Analysis of Large Scale Interconnected Positive Systems and Its Application to Social System Design

研究代表者

蛭原 義雄 (Ebihara, Yoshio)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80346080

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)：本研究では、複数の非負のサブシステムがネットワークを介して結合することで構成される大規模結合非負システムを対象とし、その解析手法・設計手法を確立させることを目的とした。主結果として、結合非負システムの安定性や定常特性が、非負のサブシステムの特徴量と考えられるL1誘導ノルムと、サブシステム間の結合を表す結合行列の特徴量と考えられるフロベニウス固有値によって表されることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study we dealt with analysis and synthesis of an interconnected positive system constructed from positive subsystems and a nonnegative interconnection matrix. As the main results, we showed that the stability and the steady-state property of the interconnected positive system can be fully characterized by the L1-induced norms of positive subsystems and the Frobenius eigenvalue of the nonnegative interconnection matrix.

研究分野：制御工学

キーワード：非負システム 大規模システム ネットワーク 通信遅延 フォーメーション制御 凸最適化

1. 研究開始当初の背景

電力系統、情報ネットワーク、交通システムといった社会の基盤をなすシステムが大規模・複雑化する中、システム理論の重要性が改めて認識されている。大規模システムの解析・設計においては、規模の大きさとそれともなって増加する不確実性から、システムを構成する多数のサブシステムの性質や相互のサブシステムの結合状態を一元的に正確に把握することは困難であり、旧来の(システムのダイナミクスを集約して数式モデルで表現するといった)システム理論を適用することはできない。そのため、個々のサブシステムが有する特徴的な性質と結合状態の特徴量という、大規模システムの部分的なしかし本質的な情報に基づいた解析・設計を可能にするための理論構築が必要である。一方、多くの物理システムが有する特徴的な性質の一つに、非負性がある。非負システムとは、非負の入力と非負の初期状態に対して、状態と出力が常に非負となる動的システムである。このような非負性は資源、エネルギー、製品、化学物質の濃度といった“負の値を取りえない物理量のやりとり”を表すダイナミクスにおいて普遍的に現れるものであり、制御理論分野においては2010年ぐらいから凸最適化手法と絡める形で非負システム理論に関する研究が盛んになされるようになっていた。このような背景のもと、本研究では多数の線形非負システムが非負の結合行列を介することで構成される大規模非負システムを主たる解析・設計の対象として研究に着手した。

2. 研究の目的

本研究では、複数の非負のサブシステムがネットワークを介して結合することで構成される大規模結合非負システムを対象とし、その解析手法・設計手法に関する理論を確立させるとともに、理論的成果の実システムへの応用、実社会への還元を達成することを目的とした。とくにサブシステムが非負システムでありかつサブシステム間の結合を表現する結合行列が非負行列である場合に着目し、非負システムの特徴量と考えられるL1誘導ノルムと非負行列の特徴量と考えられるフロベニウス固有値に基づいた大規模結合システムの解析・設計のための理論構築を目的とした。さらにサブシステム間の情報伝達には(たとえわずかであっても)必ず通信遅延(むだ時間)が存在することを踏まえ、むだ時間を有する(結合)非負システムの解析・設計手法を確立することも目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、取り組むべき研究課題を以下の3つに分類し、研究を行った。

(1) 大規模結合非負システムの安定性や定常特性の解析・設計手法に関する検討。

(2) 結合切り替え非負システム、むだ時間を有する非負システムの解析・設計手法に関する検討。

(3) 理論的成果の実問題解決への応用。

研究期間初年度の平成25年度はおもに[A]の課題に取り組み、この研究成果を礎として平成26年度、27年度は主に[B]の研究課題に取り組んだ。研究期間最終年度の平成28年度は[A]、[B]に関する研究成果をまとめつつ、[C]の課題に取り組んだ。なお、本研究で非負システムの解析・設計に関する理論的検討を行う上では、線形計画(Linear Programming, LP)や半正定値計画(Semidefinite Programming, SDP)といった凸最適化手法に関する理論を随所で活用した。これらを用いた理論展開を円滑に行うために、凸最適化に基づく制御理論研究において研究代表者とかねてより協力関係にあるDimitri Peaucelle, Denis Arzelier(ともにLAAS-CNRS, Toulouse, France)と積極的な意見交換を行った。

4. 研究成果

(1) 大規模結合非負システムの安定性や定常特性の解析・設計手法に関して得られた研究成果をまとめると、次のようになる。

・線形非負システムの特徴量と考えられるL1誘導ノルムを、線形計画(LP)を用いて計算できることを明らかにした。

・多数の線形非負システムが結合することで構成される結合非負システムの安定条件を明らかにした。まず、結合非負システムを構成する非負のサブシステムが多入出力システムである場合には、結合非負システムが安定になるための必要十分条件が、各サブシステムの重み付きL1誘導ノルムを1未満にするような重みの組が存在することであることを明らかにした。さらにすべてのサブシステムが1入出力である場合には、結合非負システムが安定になるための必要十分条件が、サブシステム間の結合を表現する結合行列をサブシステムの定常ゲインでスケールした非負行列のフロベニウス固有値が1未満であることを明らかにした。これらの結果は、結合非負システムの安定性が、各サブシステムの特徴量と考えられるL1誘導ノルムと結合行列の特徴量と考えられるフロベニウス固有値によって特徴づけられることを意味しており、本研究によって得られた理論的成果の核になる部分である。

・上記の解析結果をもとに、結合非負システムが安定限界になるための条件をやはり非負のサブシステムのL1誘導ノルムと結合行列のフロベニウス固有値に関する条件として導出した。さらにこの結果をもとに結合非負システムの定常応答が所望の形になるような結合行列の設計法を考案し、この結果を複数の移動体で構成される移動体群のフォーメーション制御に応用することでその有

効性を示した．実際に移動体のフォーメーション制御に関するシミュレーションを行い，所望のフォーメーションが形成されることを確認した．

・以上の研究成果を論文としてまとめ，次項に記した長編の雑誌論文において発表した．

(2) 結合切り替え非負システム，むだ時間を有する非負システムの解析・設計手法に関して得られた研究成果をまとめると，次のようになる．

・切り替え非負システムが安定になるための十分条件を線形計画問題(LP)の形で導出した．さらに切り替え非負システムの保存量に着目することで，切り替え非負システムが安定限界になるための条件を導出し，この結果を複数の移動体で構成される移動体群のフォーメーション制御に応用した．導出した条件に基づいて移動体間の情報交換を規定する結合行列を設計することで，所望の周期的に切り替わるフォーメーションを達成できることをシミュレーションにより示した．

・安定な遅れ型むだ時間非負システムに対して，その応答の収束の速さの指標となる支配極を計算する手法を示した．また，中立型むだ時間非負システムの安定条件を明らかにし，やはりこのシステムの収束・発散の速さの指標になる支配極を計算する手法を明らかにした．

・以上の研究成果を次項に記した雑誌論文，および国際会議論文，，，にまとめ発表した．

(3) 理論的成果の実問題解決への応用に関しては，以下の検討を行った．

・結合非負システムの定常特性設計に関して得られた理論的成果を自動車群の車頭時間制御に応用した．車両のダイナミクスを(マイナーフィードバックを施すことで)非負システムとしてモデル化できることを示し，車両間の情報交換を表す結合行列を結合非負システム理論に基づいて設計した．複数台の車両の走行を計算機上でシミュレーションにより確認したところ，自律的に走行する先頭車両に対して後続車両が等速度で追尾する結果となり，確かに所望の車頭時間制御が達成できていることが分かった．この結果は，計算機上でのシミュレーションに留まっただけのもの，結合非負システム理論の実問題解決への応用に関する可能性を示すものである．以上の研究成果を次項に記した国際会議論文，，にまとめ発表を行った．

5．主な発表論文等 (研究代表者には下線)

[雑誌論文](計8件)

松村大気，蛭原義雄，萩原朋道：LMIを用いた離散時間非負システムの安定性と

H 性能解析，システム制御情報学会論文誌，Vol. 26, No. 1, pp. 45-51, 2013, 査読有．

②松村大気，蛭原義雄，萩原朋道：重み付き11誘導ノルムを用いた離散時間結合非負システムの安定性解析，システム制御情報学会論文誌，Vol. 26, No. 10, pp. 355-364, 2013, 査読有．

Y. Ebihara, D. Peaucelle, and D. Arzelier: LMI Approach to Linear Positive System Analysis and Synthesis, Systems and Control Letters, Vol. 63, No. 1, pp. 50-56, 2014, 査読有．

Y. Ebihara, D. Peaucelle, D. Arzelier, and F. Gouaisbaut: Dominant Pole Analysis of Stable Time-Delay Positive Systems, IET Control Theory and Applications, Vol. 8, No. 17, pp. 1963-1971, 2014, 査読有．

西尾直也，蛭原義雄，萩原朋道：複数のむだ時間を有する線形非負システムの支配極解析，システム制御情報学会論文誌，Vol. 28, No. 4, pp. 147-154, 2015, 査読有．

蛭原義雄：結合非負システムの解析と設計，システム/制御/情報，Vol. 59, No. 1, pp. 21-26, 2015, 解説論文，査読有．

Y. Ebihara, D. Peaucelle, and D. Arzelier: Convergence Rate Analysis of Multi-Agent Positive Systems under Formation Control: An Efficient Algorithm by Exploiting Positivity, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 9, No. 5, pp. 216-224, 2016, 査読有．

Y. Ebihara, D. Peaucelle, and D. Arzelier: Analysis and Synthesis of Interconnected Positive Systems, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 62, No. 2, pp. 652-667, 2017, 査読有．

[学会発表](計28件)

Y. Ebihara, D. Peaucelle, and D. Arzelier: Stability and Persistence Analysis of Large Scale Interconnected Positive Systems, Proc. of the European Control Conference, Zurich, Switzerland, pp. 3366-3371, 2013, 査読有．

Y. Ebihara, D. Peaucelle, and D. Arzelier: Analysis and Synthesis of Interconnected Positive Systems with Switching, Proc. of the 52nd IEEE Conference on Decision and Control, Florence, Italy, pp. 6372-6378, 2013, 査読有．

松尾圭祐，蛭原義雄，萩原朋道：マルチ工

エージェント非負システムのフォーメーション制御と収束性能解析, 第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 5 pages, 2013.

荒木賢輔, 蛭原義雄, 萩原朋道: L1 誘導ノルムに基づく結合非負システムの分散型安定化制御, 第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 6 pages, 2013.

蛭原義雄: LMI による非負システムの解析と設計 (Analysis and Synthesis of Positive Systems Using LMI) 第 56 回自動制御連合講演会講演論文集, 1002-1006, 2013.

Y. Ebihara, D. Peaucelle, D. Arzelier, and F. Gouaisbaut: Dominant Pole of Positive Systems with Time-Delays, Proc. of the 13th European Control Conference, Strasbourg, France, pp. 79-84, 2014, 査読有.

Y. Ebihara, D. Peaucelle, and D. Arzelier: Efficient Convergence Rate Analysis of Multi-Agent Positive Systems Under Formation Control, Proc. of the 19th IFAC World Congress, Cape Town, South Africa, pp. 3790-3796, 2014, 査読有.

Y. Ebihara, D. Peaucelle, and D. Arzelier: Persistence Analysis of Interconnected Positive Systems under Communication Delays, Proc. of the 53rd IEEE Conference on Decision and Control, Los Angeles, California, USA, pp. 1954-1959, 2014, 査読有.

西尾直也, 蛭原義雄, 萩原朋道: むだ時間を有する線形非負システムの支配極解析, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 5 pages, 2014.

新谷翔吾, 蛭原義雄, 萩原朋道: マルチエージェント非負システムのフォーメーション制御下での支配極の効率的計算法, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 6 pages, 2014.

朝比奈和希, 蛭原義雄, 萩原朋道: 通信遅延のある結合非負システムの解析, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 6 pages, 2014.

Y. Ebihara: Convergence Rate Analysis of Delay Interconnected Positive Systems under Formation Control, Proc. of the 10th Asian Control Conference, Kota Kinabalu, Malaysia, 6 pages, 2015, 査読有.

Y. Ebihara, T. Matsumura, T. Hagiwara, D. Peaucelle, and D. Arzelier: Analysis and Synthesis of Interconnected Positive Systems with External Inputs, Proc. of The 8th IFAC Symposium on Robust Control Design, Bratislava, Slovakia, pp. 160-165, 2015, 査読有.

Y. Ebihara: Analysis and Synthesis of Delay Interconnected Positive Systems with External Inputs and Formation Control of Moving Objects, Proc. of the 54rd IEEE Conference on Decision and Control, Osaka, Japan, pp. 6367-6372, 2015, 査読有.

島本拓和, 蛭原義雄, 萩原朋道: 通信遅延を有する結合非負システムの解析と移動体のフォーメーション制御, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会講演論文集, pp. 56-61, 2015.

高橋誠也, 蛭原義雄, 萩原朋道: 通信遅延を有するマルチエージェント非負システムのフォーメーション制御と収束性能解析, 第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 6 pages, 2015.

蛭原義雄: 非負システムの解析・設計とその応用, 第 58 回自動制御連合講演会講演論文集, 1B1-1, 5 pages, 2015.

西尾直也, 蛭原義雄, 萩原朋道: 直達項を有する非負のサブシステムで構成される遅延結合システムの安定性解析, 第 58 回自動制御連合講演会講演論文集, 1B1-2, 6 pages, 2015.

Y. Ebihara, N. Nishio, and T. Hagiwara: Stability Analysis of Neutral Type Time-Delay Positive Systems, Proc. of the 5th International Symposium on Positive Systems, Rome, Italy, 2 pages, 2016, 査読有.

西尾直也, 蛭原義雄, 萩原朋道: 直達項を有する非負のサブシステムから構成される遅延結合システムの可容性と安定性, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会講演論文集, pp. 51-56, 2016.

②本田智也, 蛭原義雄, 萩原朋道: 結合非負システムの定常特性設計手法の DC グリッドのエネルギーマネジメントへの応用, 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 6 pages, 2016.

②Y. Ebihara: Stability Analysis of Neutral Type Time-Delay Positive Systems with

Commensurate Delays, Proc. of the 20th IFAC World Congress, Toulouse, France, 6 pages, to appear, 2017, 査読有.

②③S. Tanabe, H. Ichihara, Y. Ebihara, and D. Peaucelle: Persistence Analysis of Discrete-Time Interconnected Positive Systems and Its Application to Mobile Robot Formation, Proc. of the 20th IFAC World Congress, Toulouse, France, 6 pages, to appear, 2017, 査読有.

②④H. Ichihara, S. Kajihara, Y. Ebihara, and D. Peaucelle: Formation Control of Mobile Robots Based on Interconnected Positive Systems, Proc. of the 20th IFAC World Congress, Toulouse, France, 6 pages, to appear, 2017, 査読有.

②⑤ヤンウソン, 蛭原義雄, 萩原朋道: 中立型遅延非負システムの不安定極の解析, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会講演論文集, pp. 7-11, 2017.

②⑥ヤンウソン, 蛭原義雄, 萩原朋道: 中立型遅延非負システムの支配極解析, 第4回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム資料, 8 pages, 2017.

②⑦田邊翔也, 市原裕之, 蛭原義雄: 離散時間結合非負システムの定常特性解析と設計, 第4回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム資料, 1 pages, 2017.

②⑧芦谷勇亮, 蛭原義雄, 萩原朋道: 二次非負システムの安定解析と安定化状態フィードバック設計, 第61回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 5 pages, 2017, 掲載予定.

〔図書〕(計1件)

Y. Ebihara, N. Nishio, and T. Hagiwara: Stability Analysis of Neutral Type Time-Delay Positive Systems, Chapter 6 of Positive Systems, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer, 2017 (<http://www.springer.com/br/book/9783319542102>).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

蛭原 義雄 (EBIHARA, Yoshio)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 80346080