

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03280

研究課題名(和文)絶対安定化ネットワーク構造の設計：IoT時代の新技術

研究課題名(英文)Network Design for Structural Stability: A Key Technology for IoT systems

研究代表者

東 俊一 (Azuma, SHUN-ICHI)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：40420400

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,800,000円

研究成果の概要(和文)：複数の動的システムの相互作用によって、大域的な機能を発現するシステムを「ネットワーク化制御システム」という。一般に、ネットワーク化制御システムは、構成要素の特性に相当する「要素ダイナミクス」と、つながりに対応する「ネットワーク構造」の組だと考えられる。このとき、システムの規模が大きくなるに従って、個々の構成要素の情報を得るのが困難になることが知られている。それゆえ、「構成要素が未知だったとしても、システム全体の安定動作を保証するネットワーク構造(つながり)は何か？」が重要な問いとなる。本課題では、絶対安定化ネットワーク構造の設計理論を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

制御工学において1990年代に確立されたロバスト制御は、限られた量の変動に対しては有効な設計方法を与えた。しかしながら、サイバー攻撃のように、構成要素のダイナミクスを完全に書き換えるような変動に対しては無効であった。一方、絶対安定化ネットワーク構造が明らかになると、これまでの「ロバスト性」という言葉のもつイメージをはるかに超える、絶対的な保証に守られたシステムの設計理論が明らかになる。本課題では、そのような設計理論の基礎を与えた。

研究成果の概要(英文)：In general, a network system is described by the combination of (i) network structure and (ii) component dynamics. For the analysis and design of a networked system, it is usually assumed that the information on both the network structure and the component dynamics is available. It is however often violated in real situations, especially with heterogeneous components. Therefore, it is desirable to establish a framework of the structural analysis and design, i.e., analysis and design in the case where the network structure is known but the component dynamics is (almost) unknown. This study has established a series of results on the structural issues.

研究分野：制御工学

キーワード：ネットワーク制御

1. 研究開始当初の背景

制御工学の分野では、センサネットワーク、スマートグリッド、ビークルの自動運転などへの関心の高まりを背景に、今世紀に入って、ネットワーク化制御システムが主要な研究対象に成長してきている。

一般に、ネットワーク化制御システムは、図1に示すように、構成要素の特性に相当する「要素ダイナミクス」と、つながりに対応する「ネットワーク構造」の組だと考えられる。このとき、標準的な問題として知られているのが、前者が与えられたときに、後者を設計する「ネットワーク構造の設計問題」である。たとえば、「よく知られた差分型の合意制御則のもとで、どのようなネットワーク構造ならば目的が達成されるか？」という問いは、その一例である。しかし、これまでの研究では、合意制御則の場合のように、要素ダイナミクスが“既知”となることが前提であった。

一方で、現実の大規模なネットワーク化制御システムに注目すると、設計段階では、要素ダイナミクスの情報を“未知”と仮定せざるを得ない状況がほとんどである。たとえば、スマートグリッドや交通ネットワークなどのインフラネットワークを考えてみよう。この場合、構成要素は、発電機や自動車に相当するが、それらは、通常、複数のメーカーが独自に設計しており、またその数も莫大なため、システム全体の設計者が個々のダイナミクスを知ることは不可能である。また、交通システムにおけるドライバーのように、構成要素に人間が含まれることもあるが、人間の振舞いのモデルを得ることも容易ではない。さらに、サイバーテロリストのような悪意を持つ構成要素の出現も考えられるが、その振舞いを設計段階で知ることは難しい。

このような状況においては、要素ダイナミクスが未知であったとしても(つまり、何であったとしても)、ネットワーク構造を適切に設計することで所望の動作が安定的になされることを100%保証することが重要である。すなわち、絶対安定化ネットワーク構造の設計はネットワーク時代に取り組むべき研究課題である。

2. 研究の目的

上述の背景のもと、本課題では、ネットワーク化制御システムに対し、絶対安定化ネットワーク構造の設計理論を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

研究の目的を達成するために、以下の3つの項目を設定した。

- (課題1) 解析：絶対安定化ネットワーク構造の特徴付け
- (課題2) 設計：絶対安定化ネットワーク構造の構成モデル
- (課題3) 応用：移動ロボットネットワークへの応用

課題1では、絶対安定化ネットワーク構造をグラフ理論の概念を用いて特徴付ける。課題2では、構成要素を追加/削除しながら、絶対安定化ネットワーク構造を生成するアルゴリズムを開発する。課題3では、応用の観点から、移動ロボットネットワークに特化して、絶対安定化ネットワーク構造を明らかにし、実機実験によって検証する。

4. 研究成果

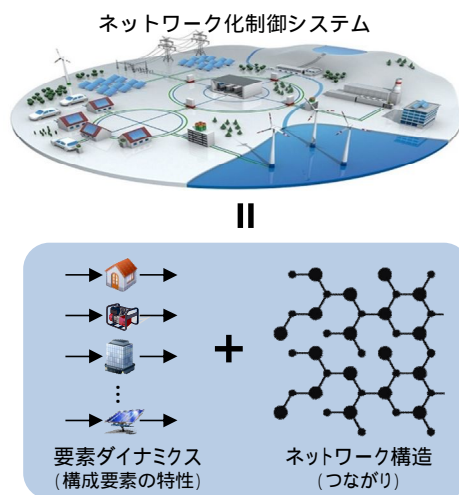


図1 ネットワーク化制御システムの構成

本研究で得た成果を以下にまとめる．

(1) 構造的安定性のネットワーク構造の特徴付け

ブーリアンネットワークと呼ばれるモデルを対象に，構造的安定となるネットワーク構造を特徴づけた．特に，花形グラフと鎖グラフと呼ばれるクラスの中に構造的安定となる構造が存在することを発見し，構造的安定性の必要十分条件を与えた．また，メラノーマ（皮膚がん）に関係していると言われている遺伝子 WNT5A を発現する遺伝子ネットワークの構造的安定性解析を行い，それが構造的安定でないことを示し，また，構造的安定にするための方法について考察した．

(2) 構造的振動性のネットワーク構造の特徴付け

(1)と同様に，ブーリアンネットワークと呼ばれるモデルを対象に，構造的振動的（平衡点が存在しない）となるネットワーク構造を特徴づけた．特に，カクタスネットワークと呼ばれる，花形グラフや鎖グラフを一般化したクラスの中に構造的振動的となる構造が存在することを発見し，構造的振動性の必要十分条件を与えた．特に，各単純閉路の中に奇数個の抑制辺が存在すること明らかにした．

(3) システム内の初期状態の総和を構造的に保存するネットワーク構造の特徴付け

(1)と同様に，ブーリアンネットワークと呼ばれるモデルを対象に，システム内の初期状態の総和を構造的に保存するネットワーク構造を検討し，その性質を満たすのは環状グラフに限られることを明らかにした．

(4) カクタス可拡大性

上述の成果より，絶対安定化を実現できるネットワーク構造のクラスとして，カクタスネットワークが重要であることがわかってきたが，その一方で，カクタスネットワークではないが，それに等価変換できるネットワークの存在も知られていた．そこで，カクタスネットワークに等価変換できるネットワークの条件を明らかにした．特に，ネットワークの中に双方向閉路と呼ばれる構造が存在することが重要であること明らかにした．

また，この結果と(2)の結果を用いて，概日リズムに関する遺伝子ネットワーク構造の構造的振動性解析を行い，それが構造的振動的の意味でロバストであることを解明した．

この結果は，構造的性質を有するネットワーク構造の構成モデルの役割も演じる．

(5) 残された課題

上述の成果を，ネットワークシステムの多数決プロトコルへの展開を試みたが，そのための基礎的成果を得るに留まってしまった．また，移動ロボットネットワークへの展開することも試みたが，移動によるネットワーク構造の変化への対応が難しく，未解決なままとなっている．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 S. Azuma, T. Kure, and T. Sugie	4. 巻 -
2. 論文標題 Structural Bistability Analysis of Flower-shaped and Chain-shaped Boolean Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

1. 著者名 S. Azuma, T. Kure, T. Yoshida, and T. Sugie	4. 巻 -
2. 論文標題 Cactus-expandable Graphs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Control of Network Systems	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCNS.2018.2875355	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 S. Azuma, T. Yoshida, and T. Sugie	4. 巻 -
2. 論文標題 Structural Oscillatory Analysis of Boolean Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Control of Network Systems	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCNS.2018.2838521	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Azuma Shun-ichi, Yoshida Takahiro, Sugie Toshiharu	4. 巻 0
2. 論文標題 Structural Oscillatory Analysis of Boolean Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Control of Network Systems	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCNS.2018.2838521	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 東俊一
2. 発表標題 ネットワークシステムの構造的安定性
3. 学会等名 次世代システム制御理論への挑戦（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 I. Maruta, T. Yoshikawa, S. Azuma, and T. Sugie
2. 発表標題 Traffic Control at Intersection with Linear Traffic Lights
3. 学会等名 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 永井利季, 東俊一, 有泉亮, 浅井徹
2. 発表標題 有向グラフのカクタス可拡大のための必要条件：閉路次数による特徴付け
3. 学会等名 第5回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2018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
研究分担者	安東 弘泰 (Ando Hiroyasu) (20553770)	筑波大学・システム情報系・准教授 (12102)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	丸田 一郎 (Maruta Ichiro) (20625511)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	

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