

令和 4 年 6 月 30 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01460

研究課題名（和文）サイバーセキュアなネットワーク化分散型アルゴリズムの構築

研究課題名（英文）Development of Cyber-Secure Networked Distributed Algorithms

研究代表者

石井 秀明（Ishii, Hideaki）

東京工業大学・情報理工学院・教授

研究者番号：50376612

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では制御工学の観点から、物理システムへの影響を考慮したセキュリティ対策の高度化を目指した。悪意のある攻撃者によりデータ改ざんや異常な情報発信・通信妨害等が生じた場合にも所望のタスクを達成する、以下のレジリエントな分散型制御アルゴリズムを開発した。合意アルゴリズムにおいて、異常エージェントが含まれる場合に、その影響抑制のために外れ値除去に基づくレジリエントな手法を考案した。攻撃者と防御者がエージェント間の通信の妨害および復活を通じてネットワークの連結性を争うゲーム理論の問題を考えた。遠隔制御システムに対するジャミング攻撃を考え、安定性および通信量への影響を解析した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大規模なネットワーク化された制御システムが広く社会で活用されつつあるが、そのサイバーセキュリティ対策は重要課題である。本研究では、計測・制御信号が通信妨害やデータ改ざんの攻撃を受けた場合にもその影響がシステム内で広がらない、ロバストな分散制御や分散計算のためのアルゴリズムを多く構築した。ネットワーク構造を持つシステムとして、電力システムのセキュリティや感染症の数理モデル等の新たな課題へ発展した。

研究成果の概要（英文）：From the viewpoint of systems control theory, we aimed at enhancing security measures taking account of impacts on physical systems. We developed resilient distributed control algorithms under which desired tasks can be completed even when malicious attackers launch falsified data injections, irregular transmissions, and communication disruptions in three directions as follows: (i) For consensus algorithms, we proposed resilient methods based on removing outliers for reducing the influence of malicious agents in the network. (ii) We considered game-theoretic problems where an attacker and a defender compete for network connectivity by attacking and recovering the communication links among agents. (iii) In remote control systems, we analyzed the effects of jamming attacks on closed-loop stability and the necessary communication rates.

研究分野：制御工学

キーワード：制御システム サイバーセキュリティ 分散アルゴリズム マルチエージェント系 合意問題

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、IoT や Society 5.0 等の新しいキーワードの下、インターネットや無線通信で繋がった計測・制御機器を社会的に活用する技術が注目されている。しかし、オープンなネットワーク化は情報セキュリティのリスクを高めており、既にサイバー攻撃による物理システムの側での事故が多数発生している。こうした攻撃は観測・制御信号の通信妨害やデータ改ざんで実現でき、情報機器向けのセキュリティ対策では不十分である。制御系の安全性・信頼性のための情報セキュリティは最重要課題の 1 つであり、政府や企業の関心も非常に高い。本研究の核心となる問いは、いかに大規模システムにおいて攻撃が危険な異常情報をもたらした場合にも影響を受けにくい、レジリエントな分散制御系や分散アルゴリズムを構築するかである。この問いの先には、制御工学の立場から、モデルに基づくアプローチによる物理システムのセキュリティ対策をいかに新たな研究分野として確立するか、という大きな課題がある。

こうした背景から研究代表者は最近、マルチエージェント系の協調制御、その中でも最も基本的なタスクである合意問題を対象にセキュリティの研究を進めてきた。とくに重要な成果は、一部エージェントが異常に振舞う攻撃クラスに対する、レジリエントな合意アルゴリズムである。合意問題では、エージェント間で情報交換しながら各々が自身の状態値を更新し、全ての値が一致することを目指す。提案アルゴリズムでは、異常エージェントの影響を受けないよう、正常エージェントは (i) 自身の状態値から差が大きい値を外れ値として無視し、(ii) 残りのデータのみを更新に用いる。これはセキュリティの面からはシンプルで自然な手法であり、計算機科学の分野でビザンチン合意と呼ばれる、長年研究されてきた手法に則っている。興味深いことに、ネットワークの接続構造に関する必要十分条件をロバストグラフという概念を用いて得ている。

2. 研究の目的

本研究では、こうした結果を出発点として、幅広いエージェント系のタスクに対して、高いセキュリティレベルを保證する分散アルゴリズムの枠組みを構築することを目標とする。とくに制御の観点から、自律移動ビークル群や無線センサネットワークへの応用を視野に入れた展開を図る。主目的は 3 つある。第 1 にレジリエントな合意問題における計算や通信面での効率化である。外れ値を無視すると、計算に用いるデータ数が少なく有用な情報も除去される可能性があり、一般に効率が悪い。アルゴリズムの高速化と通信量の低減化を図ると同時に、過去の近傍エージェントの情報を元に異常エージェントを特定する手法を開発する。

第 2 に、外れ値に基づくレジリエントな手法の適用範囲を、合意アルゴリズムに基づく分散制御・推定の他のタスクへと拡大させる。まず複雑な動特性を持つエージェント系の協調制御問題を考えたい。例えば、状態として 2 変数に関わる合意問題については、センサネットワークの時刻同期や移動体への応用を行ったが、より高次のエージェント系にも挑戦する。他にも、分散最適化や分散型モデル予測制御の問題等、未開拓の問題が多くある。攻撃のクラスについても、通信妨害やビザンチン型の異常等を対象に含めて広げる。

第 3 に、確率的な手法によるセキュリティ対策の深化である。攻撃や異常エージェントの存在が危惧される場面では、相手に推測されないよう敢えてランダムに意思決定することが理に適う。例えば、計測や通信を通じたエージェント間の情報交換を、周期的ではなく確率的な時刻に行うことで通信妨害を避けたり、異常エージェントの振舞いを検知したりできる。確率的な通信は分散的な実装が容易で、エージェント系ではゴシップ通信と呼ばれて広く採用されているが、セキュリティ面での新たな利点を研究代表者らは見つけた。

また合意問題と理論的に関わりが深い問題である、検索エンジンで用いられる PageRank の分散計算を考える。PageRank は各ウェブページの重要度や人気度を示す指標であり、Google 社が検索結果に用いている。合意に関する最近の成果を元に、分散アルゴリズムの高速化を目指す。更にページ間の情報交換に際して行われる通信での信頼性の向上も検討する。

3. 研究の方法

物理システムの情報に基づくセキュリティ向上を目指し、以下の課題に取り組む。

1. マルチエージェント系のレジリエント合意：本研究の中心課題として外れ値を無視する合意手法を協調制御の他の課題に適用し、発展させる。具体的に以下の課題を考える。
 - (a) 計算と通信の効率化：最大値合意による高速化、事象駆動ベースの通信による通信量低減、異常エージェントの特定を通じたセキュア化、ロバストグラフの解析。
 - (b) 高度な協調制御問題への展開：センサネットワークの時刻同期の精度向上、分散型モデル予測制御による合意、一般次元のエージェント系の合意・同期、分散最適化・ゲーム。
 - (c) ジャミング攻撃による通信妨害の検討：ジャミングに必要なエネルギーに関する制約と合意達成の時刻の関係解明、被害を最大化する攻撃法の解析。
 - (d) 確率的な通信・意思決定の優位性に関する解析：FLP 不可能性との関係の検討。

2. PageRank の分散計算の高度化：PageRank 問題の再定式化により指数収束する、確率的な分

散アルゴリズムに関して予備的な結果を得ている．この手法の詳細な解析を行う．また，ドメイン毎にページを集約化することで更なる高速化を図る．

3. 情報改ざん下にあるネットワーク化制御系：通信を介して遠隔でフィードバック制御するシステムに対するサイバー攻撃を考え，安定性や制御性能，通信量への悪影響を解析する．攻撃としてセンサ情報の改ざんやジャミングを検討し，より耐性の強い制御手法を考案する．
4. ネットワークシステムに関連する応用分野への挑戦：複雑なネットワーク構造を有するシステムとして，電力システムの送電システム，脳神経ネットワークや地理情報を考慮した感染症数理モデル等が挙げられる．こうした新たな課題にも取り組む．
5. 統一的な枠組みの構築：上記の課題で得られる知見や手法を統合させることで，よりセキュリティレベルの高い制御系を実現するための枠組みと解析法を確立する．

4．研究成果

本研究で得られた成果のうち主たるものを以下にまとめる．

(1) 移動型攻撃エージェントに対するレジリエント合意

近年，情報科学分野で検討されている，移動型攻撃エージェントが含まれる場合のレジリエント合意問題を考える．攻撃者が被攻撃エージェントを変更すると，元のエージェントは異常状態から回復することとなるが，その際に自身の回復を認識できるかどうかで正常なエージェントが取るべき対応が変わる点が固定型の攻撃の場合の問題設定と異なる．正常エージェントの対応として3つのパターンがあることを示し，それぞれの場合に対してレジリエントなアルゴリズムおよびネットワーク構造が満たすべき条件を明らかにする．エージェントの状態が時間経過とともに正常および異常となり得る状況を考慮できることとなり，これは感染症の数理モデルとの親和性が高い問題設定である．この点に着目し，感染症の SIR モデルを導入した新たな問題へと発展させることができた．

関連する成果：

- Y. Wang, H. Ishii, F. Bonnet, and X. Defago, IEEE Transactions on Network Science and Engineering, to appear, 2022.
- Y. Wang, H. Ishii, F. Bonnet, and X. Defago, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 33(3): 586-603, 2022.

(2) マルチホップ通信に基づくビザンチン合意

本研究では，マルチエージェントシステム内において，ビザンチン型の異常エージェントが含まれる場合を考える．正常なエージェントは，MSR 型アルゴリズムを用いるが，とくにマルチホップ通信により情報交換を行うことで，通常の 1 ホップ通信の場合に比べてよりスパースなトポロジーを有するネットワーク上においてもレジリエントな合意を達成し得ることを示す．ネットワークに関する特徴づけをロバストグラフの概念をマルチホップ通信の場合に拡張することでタイトな条件を導出する．これは情報科学の分散アルゴリズムで知られる条件を一般化したものに相当することを示す．マルチホップ通信下では，異常エージェントは近傍から受信した情報をリレーする際に改ざんできるため，より攻撃の幅が広がることとなる．しかし，ホップ数を増やすことで，システムのレジリエンス性を向上できることを明らかにする．

関連する成果：

- L. Yuan and H. Ishii, Automatica, 131: 109775, 2021.
- L. Yuan and H. Ishii, Proc. American Control Conference, 2022.
- L. Yuan and H. Ishii, Proc. 60th IEEE Conference on Decision and Control, 2021.

(3) 無線センサネットワークに対するレジリエントなパルス型振動子による時刻同期

悪意のある攻撃ノードが含まれる無線センサネットワークにおいて，パルス型通信に基づく時刻同期問題を考える．攻撃ノードは正常なノードが時刻同期するのを妨害することを意図したパルスを送ることができ，最悪ケースの攻撃を想定し，正常ノード間で時刻同期することを保証するレジリエントな分散アルゴリズムを提案する．外れ値を無視する，レジリエント合意のための MSR アルゴリズムを応用することで，同期に最低限必要なトポロジーの性質を特徴づける．この問題の特徴は，パルス信号からは発信者が特定できない点であり，攻撃者はレジリエント合意問題よりも自由度を有することとなる．そこで複数のパルスを短時間に発信するような，検知が容易な攻撃をしないと仮定し，その下で同期が実現されることを示す．

関連する成果：

- Y. Iori and H. Ishii, Proc. IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (MICNON'21), 2021.
- Y. Iori and H. Ishii, Proc. American Control Conference, 2020.

(4) ジャミング攻撃下におけるネットワーク化制御システムの安定化

サイバーフィジカルシステムのセキュリティ対策の問題として、ジャミング攻撃を受けるネットワーク化制御システムの安定化問題を考える。とくに非線形な制御対象を線形化に基づく手法で制御し、制御信号は量子化の影響を受けるものとする。DoS 攻撃のモデルとして、決定論的なものを採用する。そこでは攻撃の頻度および継続時間に関する制約のみが課され、広いクラスとなっている。漸近安定化を実現するために、DoS 攻撃によるパケット損失がある場合にも飽和しないレジリエントな動的な量子化器を設計する。DoS 攻撃の頻度と継続時間に関して安定化を達成する十分条件を導出する。線形化のために局所的となる安定領域についても推定を行い、攻撃のパラメータとの関係を明らかにする。

関連する成果：

- R. Kato, A. Cetinkaya, and H. Ishii, IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2021.
- R. Kato, A. Cetinkaya, and H. Ishii, IEEE Transactions on Automatic Control, to appear, 2022.
- S. Feng, A. Cetinkaya, H. Ishii, P. Tesi, and C. De Persis, Automatica, 2022.
- M. Wakaiki, A. Cetinkaya, and H. Ishii, IEEE Transactions on Automatic Control, 2020.

(5) データ改ざん攻撃下における電力システムの状態推定機構のロバスト化

近年サイバー攻撃が増加している、電力システムの送電系統で用いられる静的な状態推定機構のロバスト化を目指す。システム内の計測値が攻撃や故障により外れ値となった場合を考え、その数を最大化するロバストな推定手法を提案する。まず大規模な電力システムをサブシステムに分割し、ロバスト性がとくに高い最小刈込推定と呼ばれる手法を各サブシステムに対して適用することで異常値を検知する。本手法の特徴は、システムを分割する際に状態推定のロバスト性を考慮する点である。これは平面グラフに対して面を検出するアルゴリズムを応用し、極力小さなサブシステムを見つけることで実現する。他のよりシンプルなグラフ理論的な分割法である、深さ優先探索や最小全域木に基づく手法との比較を数値シミュレーションにより行った。IEEE 14, 30, 57, 118, 145, 300 バスシステムを用い、提案法の優位性を確認した。

関連する成果：

- N. Ahmadi, Y. Chakhchoukh, and H. Ishii, IEEE Transactions on Power Systems, 2021.

(6) ウェブのクラスター化による PageRank 計算のための分散型ランダム化アルゴリズム

PageRank は Google の検索エンジンで用いられる、各ページの人気度や重要度を測る指標の 1 つである。本研究では PageRank 計算のための分散アルゴリズムを採用する。そこでは各ページがハイパーリンクを通じて情報交換を行い、自身の PageRank 値を計算する。従来研究ではページ間で通信する際の時刻を確率的に定めるゴシップ通信を用いていたが、本研究では決定論的なアプローチを用いることとする。このとき、ドメイン毎にページをグループ化する集約化による計算が可能であることを見る。大規模な数値例を通じて、従来手法と比較して大幅な高速化が図れることを示す。

関連する成果：

- A. Suzuki and H. Ishii, Proc. 58th IEEE Conference on Decision and Control, 2019.
- H. Ishii and A. Suzuki, in T. Basar (editor), Uncertainty in Complex Networked Systems: In Honor of Roberto Tempo, Birkhauser, 2018.

(7) 振動子ネットワークにおけるクラスター同期機構

不均一な蔵元振動子ネットワークにおいて、複数のグループが異なる周波数で同期するクラスター化の現象を考える。近年の脳神経ネットワーク研究の進展に動機付けられ、クラスター同期多様体の安定性を解析するための枠組みを提案する。振動子ネットワークの不変多様体の特徴付けるために almost equitable partition と呼ばれる条件を課すことで、クラスター間の速い振動がクラスター内の同期を促進させることを平均化の手法により証明する。得られた結果の有用性を実データに基づく脳神経のモデルを用いて数値シミュレー

ションを通して示す．

関連する成果：

・R. Kato and H. Ishii, Proc. European Control Conference, 2021.

(8) SIS 型感染症モデルにおけるエンデミック平衡点の抑制のためのフィードバック制御

人口集団の分布を表すネットワーク構造を有する SIS 型感染症モデルを考え、ソーシャルディスタンスによる感染レベル抑制の効果を検討する．本研究では新たなモデルとして、各人口集団における感染率がリアルタイムに十分に周知され、その大きさに応じて人口集団内の各個人は接触頻度を抑制するものを考える．これは感染症モデルに対して、社会的なフィードバック制御機構を陽にモデル化したものと見ることができる．ここでは、適切に制御することで、人口集団中の感染者数の割合が全時間を通じて $1/2$ を超えることがないことを示す．そのために、まず標準的な SIS モデルに対して人口集団間の接触頻度を表す、状態に依存するパラメータを導入することで、新たなモデルを得る．つぎに、このモデルから得られる特定の行列が 1 未満のスペクトル半径を持つならば、全ての人口集団が初期状態によらず、健康状態に収束することを示す．他方、行列のスペクトル半径が 1 よりも大きいならば、唯一のエンデミック平衡点が存在し、漸近的に安定であることが得られる．

関連する成果：

・Y. Wang, S. Gracy, H. Ishii, and K. H. Johansson, Proc. 11th IFAC Symposium on Biological and Medical Systems (BMS'21), 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 21件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 X. Wang, H. Ishii, L. Du, P. Cheng, J. Chen	4. 巻 -
2. 論文標題 Differential privacy-preserving distributed machine learning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 58th IEEE Conference on Decision and Control	6. 最初と最後の頁 7339-7344
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CDC40024.2019.9029938	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 該当する
1. 著者名 Atsushi Suzuki, Hideaki Ishii	4. 巻 -
2. 論文標題 PageRank computation via web aggregation in distributed randomized algorithms	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 58th IEEE Conference on Decision and Control	6. 最初と最後の頁 1856-1861
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CDC40024.2019.9029680	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 W. Ananduta, J. M. Maestre, C. Ocampo-Martinez, H. Ishii	4. 巻 -
2. 論文標題 A resilient approach for distributed MPC-based economic dispatch in interconnected microgrids	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. European Control Conference	6. 最初と最後の頁 891-896
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ECC.2019.8796208	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 該当する
1. 著者名 A. Cetinkaya, H. Ishii, T. Hayakawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Randomized transmissions for networked control under high-frequency jamming	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 8th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems (NecSys'19)	6. 最初と最後の頁 375-380
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2019.12.184	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. Linsemayer, M. A. Muller, H. Ishii, F. Allgower	4. 巻 -
2. 論文標題 Event-based containability for linear systems with arbitrarily small bit rates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 8th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems (NecSys'19)	6. 最初と最後の頁 31-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2019.12.138	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 該当する

1. 著者名 Liwei Yuan, Hideaki Ishii	4. 巻 -
2. 論文標題 Resilient consensus with distributed fault detection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 8th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems (NecSys'19)	6. 最初と最後の頁 285-290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2019.12.195	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 Y. Chakhchoukh, H. Ishii	4. 巻 -
2. 論文標題 Cyber security for power system state estimation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Smart Grid Control: Overview and Research Opportunities, J. Stoustrup, A. Annaswamy, A. Chakraborty, and Z. Qu (editors), Springer	6. 最初と最後の頁 241-256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-98310-3_15	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 該当する

1. 著者名 S. Fang, K. H. Johansson, M. Skoglund, H. Sandberg, H. Ishii	4. 巻 -
2. 論文標題 Two-way coding in control systems under injection attacks: From attack detection to attack correction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 10th ACM/IEEE Int. Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs)	6. 最初と最後の頁 141-150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3302509.3311047	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 該当する

1. 著者名 Y. Wang, H. Ishii	4. 巻 -
2. 論文標題 A distributed model predictive scheme for resilient consensus with input constraints	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)	6. 最初と最後の頁 349-354
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CCTA.2019.8920700	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. M. Dibaji, M. Safi, Hideaki Ishii	4. 巻 -
2. 論文標題 Resilient distributed averaging	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. American Control Conference	6. 最初と最後の頁 96-101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ACC.2019.8814959	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 該当する

1. 著者名 Yuan Wang, Hideaki Ishii	4. 巻 -
2. 論文標題 Resilient consensus through asynchronous event-based communication	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. American Control Conference	6. 最初と最後の頁 1842-1847
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ACC.2019.8815065	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. Feng, A. Cetinkaya, H. Ishii, P. Tesi, C. De Persis	4. 巻 -
2. 論文標題 Networked control under DoS attacks: Trade-off between resilience and data rate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. American Control Conference	6. 最初と最後の頁 378-383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ACC.2019.8814662	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 該当する

1. 著者名 Y. Nugraha, A. Cetinkaya, T. Hayakawa, H. Ishii, Q. Zhu	4. 巻 -
2. 論文標題 Subgame perfect equilibrium analysis for jamming attacks on resilient graphs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. American Control Conference	6. 最初と最後の頁 2040-2045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ACC.2019.8814607	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 該当する

1. 著者名 M. Onogawa, S. Yoshizawa, Y. Fujimoto, H. Ishii, I. Ono, T. Onoda, Y. Hayashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Enhancing security for voltage control of distribution systems under data falsification attacks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. American Control Conference	6. 最初と最後の頁 3249-3254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ACC.2019.8814907	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 R. Kato, A. Cetinkaya, H. Ishii	4. 巻 -
2. 論文標題 Stabilization of nonlinear networked control systems under denial-of-service attacks: A linearization approach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. American Control Conference	6. 最初と最後の頁 1444-1449
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ACC.2019.8815105	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 Yuan Wang, Hideaki Ishii	4. 巻 -
2. 論文標題 An event-triggered approach to quantized resilient consensus	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. European Control Conference	6. 最初と最後の頁 2719-2724
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/rnc.4834	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 W. Ananduta, J. M. Maestre, C. Ocampo-Martinez, H. Ishii	4. 巻 Vol. 41 No. 1
2. 論文標題 Resilient distributed model predictive control for energy management of interconnected microgrids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optimal Control, Applications and Methods, Special Issue on MPC for Energy Systems: Economic and Distributed Approaches	6. 最初と最後の頁 146-169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/oca.2534	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 該当する

1. 著者名 Yuan Wang, Hideaki Ishii	4. 巻 Vol. 7 No. 1
2. 論文標題 Resilient consensus through event-based communication	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Control of Network Systems	6. 最初と最後の頁 471- 482
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCNS.2019.2924235	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. Fang, M. Skoglund, K. H. Johansson, H. Ishii, Q. Zhu	4. 巻 -
2. 論文標題 Generic variance bounds on estimation and prediction errors in time series analysis: An entropy perspective	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Information Theory Workshop (ITW)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ITW44776.2019.8989240	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 H. Ishii, S. Yoshizawa, Y. Fujimoto, I. Ono, T. Onoda, Y. Hayashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Cyber security for voltage control of distribution systems under data falsification attacks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Design and Analysis of Distributed Energy Management Systems. Power Electronics and Power Systems. T. Suzuki, S. Inagaki, Y. Susuki, A. Tran (eds), Springer	6. 最初と最後の頁 145-165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-33672-1_8	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 Ishii Hideaki, Suzuki Atsushi	4. 巻 -
2. 論文標題 Distributed Randomized Algorithms for PageRank Computation: Recent Advances	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Uncertainty in Complex Networked Systems: In Honor of Roberto Tempo, T. Basar (editor), Birkhauser	6. 最初と最後の頁 419 ~ 447
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-04630-9_12	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 該当する

〔学会発表〕 計32件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 Ahmet Cetinkaya, Hideaki Ishii
2. 発表標題 Effects of Jamming Attacks on Networked Control Systems: A Stochastic Approach
3. 学会等名 Workshop on Learning, Games and Control for Security of Cyber-physical Systems, 58th IEEE Conference on Decision and Control (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊織佑悟, 石井秀明
2. 発表標題 ロバストネットワークにおけるパルス通信を用いたレジリエント同期
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤瑠偉, Ahmet Cetinkaya, 石井秀明
2. 発表標題 ジャミング攻撃に対する非線形システムの量子化制御
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中原華奈, 石井秀明
2. 発表標題 サイバー攻撃下におけるエージェント系の被覆問題
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関原武志, 石井秀明
2. 発表標題 配電系統の電圧制御システムにおける分散型異常検知
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeshi Sekihara, Hideaki Ishii
2. 発表標題 Distributed Anomaly Detection for Voltage Control in Distribution Systems
3. 学会等名 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yugo Iori, Hideaki Ishii
2. 発表標題 Resilient Synchronization with Pulse-Based Communications under Robust Networks
3. 学会等名 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuya Suzuki, Hideaki Ishii
2. 発表標題 Cooperative Charging Management of In-vehicle Batteries for V2H and Community
3. 学会等名 JST-NSF-RCN Workshop on Energy Management Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideaki Ishii
2. 発表標題 Fault Tolerant Clock Synchronization in Wireless Sensor Networks
3. 学会等名 3rd Japanese-French Laboratory for Informatics (JFLI) Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田凌馬, 上田紀行, 瀬戸好弘, 石井秀明
2. 発表標題 IEC 61850を適用した保護制御システムのサイバー攻撃検知システムの開発と検証
3. 学会等名 電気学会 保護リレーシステム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuan Wang, Hideaki Ishii
2. 発表標題 Resilient Consensus through Asynchronous Event-Based Communication
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems (ISCS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuai Feng, Ahmet Cetinkaya, Hideaki Ishii, Pietro Tesi, Claudio De Persis
2. 発表標題 Data Rates for Stabilizing Control under Denial-Of-Service Attacks
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems (ISCS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yurid Nugraha, Ahmet Cetinkaya, Tomohisa Hayakawa, Hideaki Ishii, Quanyan Zhu
2. 発表標題 Two-Player Subgame Perfect Equilibrium Analysis for Jamming Attacks on Dynamic Graphs
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems (ISCS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木惇之, 石井秀明
2. 発表標題 グラフ集約に基づくPageRank分散計算の高速化
3. 学会等名 第6回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田淳, Ahmet Cetinkaya, 石井秀明
2. 発表標題 マイクログリッドにおける発電量の分散最適化：イベント駆動型制御の導入と解析
3. 学会等名 第6回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rui Kato, Ahmet Cetinkaya, Hideaki Ishii
2. 発表標題 Linearization-Based Networked Control of Nonlinear Systems Under Denial-of-Service Attacks
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems (ISCS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideaki Ishii
2. 発表標題 Securing Power Grids Through Outlier Detections and Removals
3. 学会等名 JST-NSF-RCN Workshop on Distributed Energy Management and Data Sciences for Smart Grids (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Liwei Yuan, Hideaki Ishii
2. 発表標題 Resilient Consensus with Distributed Detection via Two-hop Communication
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shuai Feng, Hideaki Ishii
2. 発表標題 Dynamic Quantized Consensus of General Linear Multi-agent Systems under Denial-of-Service Attacks
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuan Wang, Hideaki Ishii, Francois Bonnet, Xavier Defago
2. 発表標題 Resilient Consensus against Mobile Malicious Agents
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yurid Nugraha, Ahmet Cetinkaya, Tomohisa Hayakawa, Hideaki Ishii, Quanyan Zhu
2. 発表標題 Two-Player Resilient Graph Games for State-Dependent Jamming Attacks Analysis on Multi-Agent Systems
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石井秀明
2. 発表標題 情報理論的アプローチによる制御システムの性能限界解析
3. 学会等名 IT/SIP/RCS 研究会, 電子情報通信学会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Rui Kato, Ahmet Cetinkaya, and Hideaki Ishii
2. 発表標題 Linearization-Based Networked Control of Nonlinear Systems Under Denial-of-Service Attacks
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems (ISCS), Kumamoto (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuan Wang, Hideaki Ishii
2. 発表標題 Resilient Consensus through Asynchronous Event-Based Communication
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems (ISCS), Kumamoto (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuai Feng, Ahmet Cetinkaya, Hideaki Ishii, Pietro Tesi, Claudio De Persis
2. 発表標題 Data Rates for Stabilizing Control under Denial-Of-Service Attacks
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems (ISCS), Kumamoto (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yurid Nugraha, Ahmet Cetinkaya, Tomohisa Hayakawa, Hideaki Ishii, Quanyan Zhu
2. 発表標題 Two-Player Subgame Perfect Equilibrium Analysis for Jamming Attacks on Dynamic Graphs
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems (ISCS), Kumamoto (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木惇之, 石井秀明
2. 発表標題 グラフ集約に基づくPageRank分散計算の高速化
3. 学会等名 第6回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム, 熊本
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田淳, Ahmet Cetinkaya, 石井秀明
2. 発表標題 マイクログリッドにおける発電量の分散最適化：イベント駆動型制御の導入と解析
3. 学会等名 第6回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム, 熊本
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideaki Ishii
2. 発表標題 Securing Power Grids Through Outlier Detections and Removals
3. 学会等名 JST-NSF-RCN Workshop on Distributed Energy Management and Data Sciences for Smart Grids, Bombay, India (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideaki Ishii
2. 発表標題 Distributed Randomized Algorithms for PageRank Computation: Recent Advances
3. 学会等名 18th International Conference on Control, Automation and Systems, PyeongChang, Korea (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石井秀明
2. 発表標題 マルチエージェント合意問題におけるセキュリティ対策
3. 学会等名 群体数理技術検討会, トヨタ自動車未来創生センター, 名古屋
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideaki Ishii
2. 発表標題 Securing Power Grids Through Outlier Detections and Removals
3. 学会等名 Workshop on Secure and Resilient Control Systems, 57th IEEE Conference on Decision and Control, Miami, FL, USA (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Hideaki Ishii and Quanyan Zhu (Editors)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 228
3. 書名 Security and Resilience of Control Systems: Theory and Applications	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京工業大学 石井秀明ホームページ http://www.sc.dis.titech.ac.jp/ishii/index_j.html Google Scholar: Hideaki Ishii https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=q2n6QFAAAAAAJ 東京工業大学 石井秀明ホームページ http://www.sc.dis.titech.ac.jp/ishii/index_j.html Google Scholar: Hideaki Ishii https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=q2n6QFAAAAAAJ</p>

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
---------	---------

米国	マサチューセッツ工科大学	ニューヨーク大学	アイダホ大学	
ドイツ	シュツットガルト大学			
オランダ	グローニンゲン大学	アイントホーフェン工科大学		
スウェーデン	KTH王立工科大学			
スペイン	セビーリャ大学	カタルーニャ工科大学		
英国	シェフィールド大学			
中国	浙江大學	清華大學		