

令和 2 年 5 月 31 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13778

研究課題名（和文）スマートコントラクト技術を応用した障害に対して頑健な合意制御の実現

研究課題名（英文）Robust consensus control against node failures inspired by smart contracting technologies

研究代表者

岡野 訓尚（Okano, Kunihisa）

岡山大学・自然科学研究科・助教

研究者番号：80778209

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、マルチエージェントシステムの協調制御とくに合意制御に情報通信分野の知見を取り入れ、エージェントの故障や通信障害などに対して頑健な制御則を実現することを目指した。合意制御を用いたネットワーク内のクロック同期に取り組み、通信遅延を考慮した分散同期手法を提案した。さらに、提案法と分散コンピューティングの分野で普及している同期アルゴリズムとの関連を議論した。また、エージェントが送受信する情報の量や種類に制限がある状況を想定し、センサの配置を最適化することによりシステムの状態推定を精度よく行う手法を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ドローンに代表される移動体の群れや、広範な環境を測定するセンサネットワークなど、複数のエージェントと通信ネットワークにより構成されるシステムが注目を集めている。システム制御の分野では簡易なルールによってシステム全体で共通の目的を達成する分散制御則について従来研究が行われてきた。本研究は、より現実的な状況を想定してエージェントの故障や通信障害に対応できる制御則を目指した。その過程で制御工学に限らず情報通信工学分野の成果を応用し、分野を横断する理論の構築に貢献した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have considered cooperative control of multi-agent systems including consensus control using results in information and communication technology for robustness against agent and communication failures. We have studied the clock synchronization problem over networks based on consensus control. A distributed synchronization method with a consideration of communication delay has been proposed and discussed in comparison to a well-known synchronization algorithm in the field of distributed computing. In addition, assuming the situation that the amount and type of information sent from the agents are limited, we have examined the optimal sensor placement to minimize the system's state estimation error.

研究分野：システム制御工学

キーワード：マルチエージェントシステム ネットワーク化制御システム

## 1. 研究開始当初の背景

近年、協調動作する無人移動体群や火山・橋梁など広範囲をモニタリングするセンサネットワークなど、自律動作する複数のエージェントからなるシステムが注目されている。これはマルチエージェントシステムと呼ばれ、各エージェントが自身の状態と近傍エージェントから通信によって得られた情報をもとに分散的に意思決定を行い、全体として共通の目的を達成する点が特徴である。システムの全エージェントを共通の状態に到達させる合意制御は、マルチエージェントシステムにおける基本的な問題として知られている。例えば、移動ロボット群の同一地点への集合やフォーメーション形成、センサノードの時刻同期、スマートグリッドにおける需給バランス制御などは合意問題に帰着する。システム制御の分野では、自身と近傍エージェントの状態の差の平均をもとにフィードバック制御を行うことで合意を達成する制御則（ここでは近傍平均型合意制御則とよぶ）を中心に、様々な問題設定における合意制御が研究されてきた。

マルチエージェントシステムは多数のエージェントがネットワークで接続されて構成されているため、故障による一部のエージェントの動作停止や、ノイズやサイバー攻撃による通信障害のリスクを考慮する必要がある。これについて、従来の近傍平均型合意制御則をもとに通信で得られた状態から外れ値を除外するなどの拡張を行い、障害に対してロバストな制御則が提案されている。その一方で、情報通信分野では分散的な計算資源の管理を想定して合意問題と同様の問題が研究されている。そこでは、ノードの故障や通信遅延・停止などの障害への対応は最も重要な関心のひとつであり、近傍平均型とは異なるアプローチによるアルゴリズムが多数提案されており、クラウドサービスの実現などに応用されている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、障害に対してロバストな合意制御則を提案することである。とくに、情報通信分野の成果を取り込み、従来のシステム制御分野のアプローチとは異なる手法で耐障害性を獲得することを目指す。想定する障害の種類は、エージェントの故障による動作停止（通信や自身の状態更新の停止）、通信の遅延、通信の途絶などとし、個別の問題ごとに現実的なシナリオを考慮して障害のモデルを考える。

## 3. 研究の方法

マルチエージェントシステムの合意制御およびその応用として時刻同期問題を扱う。さらに、ネットワークを介した動的システムの制御一般の問題として通信負荷の少ない状態推定法について考える。

具体的には、以下の3テーマに取り組む。

### (1) 通信遅延があるネットワークを介した合意と時刻同期への応用

通信に未知の遅延が存在する場合の合意について、時刻同期問題への応用を想定して取り組む。エージェント間で同一の時間軸を共有することが必要となる場面は多く、例えばセンサネットワークによる建物の振動計測では100 usの精度で同期が求められる。これについて、GPSや電波時計など外部システムの信号を参照する方法や、特定のエージェントをリーダーとして選出し、リーダーの時刻に他のエージェントが同期する手法があるが、本研究では合意制御に基づく分散型の同期アルゴリズムを提案する。従来研究ではエージェント間の通信に遅延がないと仮定しているが、本研究では通信遅延を考慮する。なお、未知の通信遅延がある場合、厳密な時刻同期が不可能なことは既に知られている。そこで、通信遅延の影響を低減し同期誤差を小さくする方法について考える。

### (2) エージェントの停止、停止からの復帰に対応する合意制御

エージェントが故障によって停止する場合を想定し、そのような障害が発生しても残りの正常なエージェントで合意が達成できるアルゴリズムを提案する。さらに、故障したエージェントが正常な状態に復帰する場合も考慮する。(1)やシステム制御の分野で多く用いられる、すべてのエージェントが同一の役割を担うアルゴリズムではなく、リーダーを1台選出して他のエージェントはそれに追従するリーダー・フォロワー型のアルゴリズムを考える。障害への対応は、分散ファイルシステムの管理に用いられているRaftアルゴリズムのアイデアを参考にする。

### (3) 通信量に制約がある場合のシステムの状態推定：最適センサ配置

システムの状態を精度よく推定するためには、観測可能なすべての出力を取得することが望ましい。しかし、センサの情報をネットワークを介して収集する場合は、出力の次元数が増えるとその分通信量が増加し、ネットワークに負荷がかかる。そこで、観測対象を状態推定により有用な箇所に限定することを考える。状態推定に寄与する出力の組（すなわちセンサ配置）

を求める組み合わせ最適化問題に対して、計算負荷の小さい近似解法を確立する。

#### 4. 研究成果

本研究の成果について、研究の方法で述べた課題ごとに説明する。

##### (1) 通信遅延があるネットワークを介した合意と時刻同期への応用

エージェントのソフトウェアクロックとしてドリフトとオフセットの2つのパラメータをもつ、ハードウェアクロックに関してアフィンな関数を仮定し、エージェント間のソフトウェアクロックの差が小さくなるようなパラメータ更新則を提案した。これは、ドリフトとオフセットに関する合意問題となる。ただし、通常の合意問題と異なりエージェントは自分の状態を正確に知ることはできない。

本研究では従来注目されてこなかった、通信遅延がある場合におけるオフセット項の補正に取り組んだ。通信遅延がある場合、たとえ遅延が時不変であっても、未知であればオフセット項を完全に合意させることは不可能である。しかし、エージェント間でタイムスタンプを交換し、そのラウンドトリップタイムから遅延を推定して補正すれば、遅延が極端に非対称な場合を除いてオフセットの誤差を低減できる。このアイデアのもと、具体的なオフセット補正則の提案とシミュレーションによる効果の検証を行った。

提案法は数理モデルに基づく検討から導出されたものだが、そのアイデアはコンピュータの時刻同期によく使われるNTP (Network Time Protocol) と共通している。図1 提案法による同期誤差の低減効果に示すシミュレーションでは、提案法により定常状態における同期誤差が従来法より低減できていることがわかる。

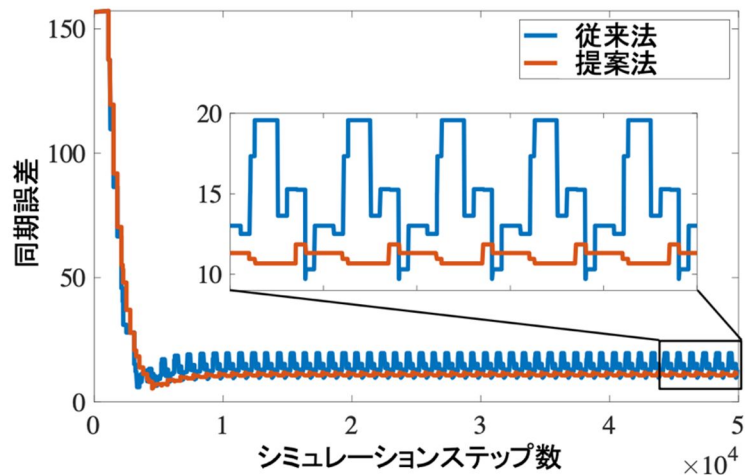


図1 提案法による同期誤差の低減効果

##### (2) エージェントの停止、停止からの復帰に対応する合意制御

リーダー・フォロワー型のアルゴリズムでは、リーダーが故障により停止した場合への対処が重要となる。本研究ではRaft アルゴリズムを参考に、故障発生時のリーダー再選出アルゴリズムを提案した。Raft はコンピュータネットワークを想定しているため任意のエージェント同士が通信可能と仮定しているが、移動ロボット群の制御ではエージェントの視界や通信能力の制限から、通信相手は自身の近傍に限られることが多い。そこで、メッセージの転送処理を新たに導入した。図2は、9台のエージェントが提案アルゴリズムにより合意する様子を示す。最初に初期位置7のエージェントがリーダーに選出され合意が開始するが、10ステップ前後でリーダーが故障し、周囲への通信も停止する。その後、初期位置4のエージェントをリーダーとして再選出し、再度合意を開始する。30ステップ過ぎに7のエージェントが正常状態に復帰する。復帰後に周囲のエージェントとの通信から新たなリーダーの存在を検知し、それに追従する動作が見て取れる。

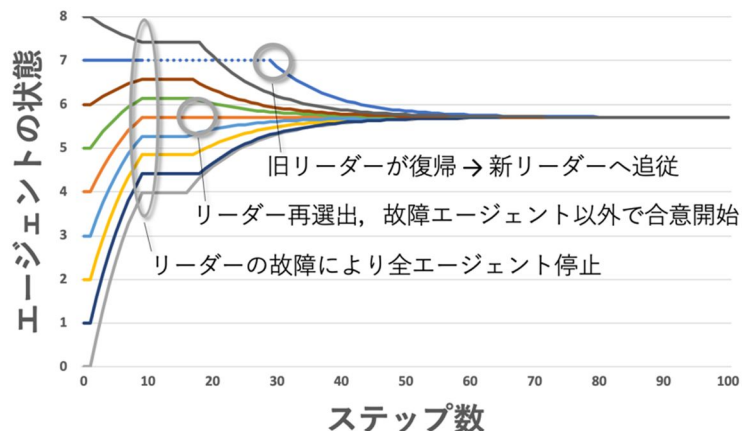


図2 故障エージェントが発生しても合意が成功する様子

##### (3) 通信量に制約がある場合のシステムの状態推定：最適センサ配置

状態推定誤差を最小化するセンサ配置を求める問題について、貪欲法による解法を提案した。貪欲法はこの種の組合せ最適化問題の近似解法として最もよく用いられるもので、その近似性能、つまり貪欲法による解と最適解との乖離がどの程度であるかについて理論的な保証を与えることが重要である。目的関数が劣モジュラの場合はよく知られた性能保証が存在するが、本研究で扱う問題は残念ながら劣モジュラとならない。そこで、劣モジュラ性の度合いを測る尺度を導入し、目的関数を評価した。さらにその結果を用いて近似性能の解析を行った。得られた性能保証は従来結果より保守性が小さく、特定のクラスのシステムについては貪欲法で最適解の90%近い性能を保証できることが示せた。これは貪欲法によって優れた解を得られるとの経験的事実と一致している。

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 岡野 訓尚	4. 巻 63
2. 論文標題 通信時刻情報を利用した有限データレート制御	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 システム / 制御 / 情報	6. 最初と最後の頁 461 ~ 466
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.11509/isciesci.63.11_461">https://doi.org/10.11509/isciesci.63.11_461</a>	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 名賀大輔, 岡野訓尚, 中村幸紀, 平田健太郎
2. 発表標題 分散型時刻同期アルゴリズムにおける遅延を考慮したオフセット調整則
3. 学会等名 第27回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kunihisa Okano
2. 発表標題 Fundamental limitations for stabilization of networked control systems
3. 学会等名 SICE Annual Conference, Workshop 1: New Trends in Networked Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Kohara, K. Okano, K. Hirata, and Y. Nakamura
2. 発表標題 An analysis of state estimation errors with respect to the dimension of observation
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小原晃, 岡野訓尚, 平田健太郎, 中村幸紀
2. 発表標題 線形最小二乗平均推定を用いたセンサ配置
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019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