

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Resilient Consensus of Multi-agent Systems via Multi-hop Communication
著者(和文)	YuanLiwei
Author(English)	Liwei Yuan
出典(和文)	学位:博士(学術), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12264号, 授与年月日:2022年9月22日, 学位の種別:課程博士, 審査員:石井 秀明,三宅 美博,DEFAGO XAVIER,小野 功,小野 峻佑
Citation(English)	Degree:Doctor (Academic), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12264号, Conferred date:2022/9/22, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名		YUAN Liwei	
		氏名	職名		氏名	職名
論文審査 審査員	主査	石井 秀明	教授	審査員	小野 峻佑	准教授
	審査員	三宅 美博	教授			
		DEFAGO XAVIER	教授			
		小野 功	准教授			

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Resilient Consensus of Multi-agent Systems via Multi-hop Communication」と題し、英文による全 8 章から構成されている。本論文はセンサネットワーク上でエージェントが無線通信を通じて相互作用しながら、状態値の一致を目指す合意問題を主に扱っている。耐故障性やサイバーセキュリティの観点から、一部のエージェントが異常な振舞いをする場合にも、その影響を抑制しながら合意を達成する、レジリエントな分散アルゴリズムを提案している。

第 1 章「Introduction」では、ネットワーク化された大規模システムにおける分散型アルゴリズム、その基礎となる合意アルゴリズムの役割が説明されている。サイバー攻撃の危険性の高まりと共に、分散アルゴリズムに対するセキュリティ対策の重要性が高まっているが、情報科学分野ではビザンチン合意問題が長年研究されており、その背景が述べられている。近年、制御工学分野でも研究が行われ、エージェントが持つ状態が連続値を取る場合について、ネットワーク構造が満たすべき必要最低限の要件が導出されたことが説明されている。本研究の目的は、エージェント間の情報交換にマルチホップ通信を利用し、レジリエント性を向上させることとした上で、その貢献の概要を述べている。

第 2 章「Preliminaries and Related Works」では、まずレジリエントな合意問題で必要となるグラフ理論の概念や記号が導入され、基本的な問題設定が行われている。つぎにネットワーク内における正常なエージェントと異常なエージェントを定義し、利用可能な計算や通信のリソースが説明されている。さらに攻撃下におけるレジリエント合意の要件を述べた上で、正常なエージェントが用いる更新則として、従来研究されてきた 1 ホップ通信の場合に対する MSR (Mean Subsequence Reduced) アルゴリズムを紹介している。最後にマルチホップ通信およびその特性について述べ、本研究で扱う問題の特徴を説明している。

第 3 章「Resilient Consensus under Malicious Attacks with Multi-hop Communication」では、マルチホップ通信を用いる場合の MSR アルゴリズムを構築し、その解析を行っている。とくに本章では攻撃エージェントとして通信がブロードキャスト型に限定される場合が扱われている。マルチホップ通信下では、異常エージェントは転送データも操作できるため攻撃の幅が広がるが、送信データの増加により疎なネットワークであってもレジリエント合意が達成可能だと示されている。主結果ではレ

レジリエント合意を達成するための必要十分条件をネットワークグラフの性質で与え、新たにマルチホップ通信に対するロバストグラフの概念を定義している。本章では同期型および非同期型の通信を用いた二つのアルゴリズムが提案されている。

第4章「Asynchronous Approximate Byzantine Consensus via Multi-hop Communication」では、前章の結果をより悪意性の高い攻撃に対して拡張している。とくに個々の近傍エージェントに異なる情報を送信できる、ビザンチン型の攻撃エージェントを扱っている。新たに強ロバストグラフの概念を導入し、レジリエント合意のためのネットワーク構造に対する必要十分条件が得られている。ここでも同期型・非同期型アルゴリズムが提案され、それぞれの有効性が数値例を通じて検証されている。

第5章「Resilient Quantized Consensus with Multi-hop Communication」では、各エージェントが持つ状態が離散値を取る場合を扱っている。前章までは状態は実数値であったが、ここでは整数値とし、分散アルゴリズムが利用する通信量やメモリ量の低減化が図られている。整数値を用いた更新則では量子化が用いられており、合意値への収束を証明する際には、マルコフ連鎖の理論に基づいて、ランダム化手法が必要となる点が特徴的であると説明している。

第6章「Event-triggered Approximate Byzantine Consensus with Multi-hop Communication」では、エージェント間の通信頻度を低減化するためにイベントトリガー型通信を活用したレジリエント合意アルゴリズムが提案されている。同通信方式の下では、各エージェントは前回送信時より自身の状態値が十分に变化した時点で送信を行うとしている。通信量が抑制できる一方で、近似的な合意しか達成されず、トレードオフが存在することが議論されている。

第7章「Secure Consensus with Distributed Detection via Two-hop Communication」は、前章までとは異なるアプローチを扱い、攻撃ノードの検知や同定を行うアルゴリズムを提案している。2ホップ通信を採用することで、従来研究の手法よりも疎なネットワーク上であってもレジリエントに合意可能であることが示されている。更新則やネットワークに対する条件について、MSRアルゴリズムを用いた場合との違いが詳細に議論されている。

第8章「Conclusion」では、各章の内容をまとめた後、今後進める研究の方向性として、(1)多次元の状態を持つ場合への拡張、(2)移動型異常エージェントの検討、(3)平均合意アルゴリズムの構築などを挙げ、期待される成果などが述べられている。

以上を要するに、本論文は異常に振舞うエージェントが含まれる分散的なシステムにおいて、正常なエージェント間で合意を達成する問題に取り組んでいる。とくにマルチホップ通信を採用した場合について、理論的にレジリエント合意を保証するアルゴリズムを構築している。これは、分散アルゴリズムに対する制御理論的なアプローチとして、新規性および学際性が高く、学術上貢献するところが極めて大きい。したがって、本論文は博士（学術）の学位論文として十分な価値が有るものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。