

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月30日現在

機関番号：12608  
 研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23760385  
 研究課題名（和文） 情報論的制約下におけるマルチエージェント合意問題に対する  
 確率アルゴリズムの構築  
 研究課題名（英文） Probabilistic Algorithms for Multi-Agent Consensus Problems  
 under Information Constraints  
 研究代表者  
 石井 秀明（Ishii, Hideaki）  
 東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授  
 研究者番号：50376612

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では、ネットワーク化制御の分野で盛んに研究されているマルチエージェント系の協調制御における合意問題に焦点をあてた。エージェント間の情報交換に関する制約がとくに厳しい場合を扱い、極力少ない通信で合意を達成する分散型アルゴリズムの構築を目的とした。平均合意アルゴリズムに関して、エージェント間の接続構造が有向であり、さらに時間的に変化するシステムを考えた。さらに、非線形な振動子ネットワークとして知られる蔵本モデルへの拡張を行った。通信制約下の制御系に関しても、不確かなプラントモデルに対する通信限界の導出を行った。

## 研究成果の概要（英文）：

In this research, we have studied cooperative control of multi-agent systems, which have recently gained much attention in the networked control area, and have focused on the consensus problem. We have dealt with cases where the constraints on the information exchange among agents are severe and have developed distributed algorithms to achieve consensus with as little communication as possible. Specifically, average consensus algorithms have been considered under directed connectivity structures with time-varying dynamics. Moreover, generalization to the so-called Kuramoto models of nonlinear oscillators has been obtained. For related studies on control systems under communication constraints, we have also derived limitations in data rates for stabilization of uncertain linear systems.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御理論

## 1. 研究開始当初の背景

近年の情報・組込み技術の向上により、多数の自律移動型ロボットのフォーメーション制御やネットワーク化した小型センサによる分散型計測等の応用が注目され、盛んに研究されている。こうした背景から、マルチエージェント系に対する協調制御、中でも基本

的な課題の1つである合意問題は多くの研究者の関心を集めている。

合意問題の目的は、各エージェントが自身の状態量を近傍のエージェントに通信しながら更新し、最終的にそれが同一の値に到達することである。状態量はロボットの位置やセンサの計測値等に相当する。また合意問題の特別なケースで、合意値が全エージェン

トの初期値の平均値となることが課せられる問題は、平均合意と呼ばれる。

最近、研究代表者らは、エージェント間の情報交換を可能な限り低減化する方向での研究を行ってきた。これは、通信に要するエネルギー消費抑制を図り、またネットワークの構造が疎な場合にも合意達成を目指すものである。通信制約が厳しい場合として、状態が離散値(量子化値)を取り、さらにエージェント間の通信が双方向でないシステムに対する平均合意のための分散型確率アルゴリズムを提案した。本手法の特徴として、従来法と比較して、エージェント間の接続構造に関する条件を大幅に緩和した点が挙げられる。そのためには、サープラスと呼ばれる補助変数を全エージェントに付与することが鍵となった。また、エージェント間の情報交換に確率的な意思決定に基づく非同期な通信を取り入れた。このことで、リーダーや送信スケジュール等を必要としない分散型アルゴリズムが実現された。

## 2. 研究の目的

本研究の中心的な課題は、上記の結果で得た基本的なアルゴリズムを出発点に、合意問題のための分散型確率アルゴリズムの発展およびロバスト化である。提案アルゴリズムは、従来扱われていない新たなクラスに属すが、その有効性を解析し、より一般的な枠組みを構築することを目指す。

また、本研究に関連深い研究代表者の研究として、検索エンジン Google で用いられる PageRank 計算に対する分散型確率アルゴリズムがある。ここでは合意問題と PageRank 計算が理論的に密接であることを示し、両者において確率行列が重要な役割を果たすことを利用した。本研究においても、この関係を最大限に活用し、両者を発展させることで新しい枠組みを構築する。

## 3. 研究の方法

本研究の目標は、情報論的な制約が厳しい状況下での合意問題に対する効率的な分散型アルゴリズムの確立である。その解決に向けて、以下の 5 課題に段階的に取り組んだ。

- (1) 平均合意アルゴリズムの発展：有向グラフ上でのサープラスに基づく平均合意を、各エージェントが実数値の状態を取る場合へ発展させる。ネットワーク構造が動的に変動(確率的・確定的)する場合も考える。
- (2) 合意アルゴリズムの応用：相互作用する非線形振動子のモデルとして知られる蔵本モデルに対する平均同期のための分散

制御や、センサネットワークにおけるノード間の時刻同期等の問題に合意アルゴリズムを適用する。

- (3) ロバストな合意手法へ：エージェントと通信のモデルにおける不確かさの影響に対するロバスト性を高める。
- (4) PageRank 計算に対する分散型確率アルゴリズム：上記の課題を通じて得た結果や知見を、合意問題と関連の深い PageRank の分散型計算に対して適用する。両者を含む一般的な分散型アルゴリズムの枠組みと解析法を確立する。
- (5) 通信制約下における安定化：ネットワーク化制御の基礎的な課題として、データレートを陽にモデル化し、安定化に必要な最低限な通信量を求める。とくに不確かなプラントに対する問題を考える。

これらの課題に対し、主に理論的な研究を進めたが、その有効性の検証は数値実験を通じて行った。

## 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) 平均合意アルゴリズムの発展

本研究では、エージェント系が有向グラフで表される場合に最低限のネットワーク構造下で平均合意を達成するサープラスに基づくアルゴリズムを発展させた。とくに、各エージェントが持つ状態量が実数値を取る場合を考えた。これまで研究代表者らが扱ってきた離散値の場合と異なり、更新則は線形な形で導出され、その収束性を示すことができた。とくにエージェント系のトポロジーとして強連結性が最低限必要な条件であることを示した。

さらに、トポロジーが時間的に切り替わる場合も検討した。これは各エージェントが自身で通信する時刻を決定する非同期な通信を実現する上で重要となる。切り替えが確率的な場合と確定的な場合を扱った。確率的な切り替えは、ゴシップ型と呼ばれる通信のモデルとして有効である。また確定的な場合は、有効グラフ下では解析が困難なケースにあたるが、一定時間で必ずグラフの和集合が強連結となることが平均合意を達成するために必要十分であることを示した。

### (2) 合意アルゴリズムの応用

相互作用する振動子の同期モデルとして物理学系で知られる蔵本モデルは、合意問題の自

然な非線形版と見ることができる。本研究では、接続構造が有向グラフとして表される場合を扱い、平均の意味で同期する分散制御手法を導出した。とくに同期した際の振動子の周波数が、各々が持つ固有角周波数の平均値となるようにした。各振動子は局所的な制御器を持ち、接続構造上で隣接する制御器とのみ情報交換を行う。上記のサープラスに基づく手法を応用したアルゴリズムを構築した。

また、合意アルゴリズムを用いた分散型時刻同期の手法を提案した。多くの無線センサネットワークではノード間で高精度な時刻同期が要求される。これはデータ間の整合性を保持したり、事前に通信時刻を定めたりする際に重要となる。合意アルゴリズムをベースとすることで耐故障性の高い同期が実現できる。さらに本研究では、事象駆動型の通信プロトコルを導入することで、通信頻度を抑える2つの分散型アルゴリズムを構築した。その収束性を解析し、事前に定めた精度で時刻同期できることを示した。

### (3) ロバストな合意手法へ

エージェント系が線形なダイナミクスを持つが、それらが不均一かつ不確かな場合を考え、リーダー追従のための協調適応制御手法を提案した。各々のエージェントが持つ分散型制御器は、まずエージェントのダイナミクスが均一となるように適応的に制御を行う。そして、リーダー追従のために状態フィードバック制御を行うが、これはダイナミクスが均一であることを前提としたものを用いる。本手法は、エージェントの軌道が有界でない場合にも適用できる特徴をもち、ビークルのフォーメーション制御等に有用となる。

### (4) PageRank 計算に対する分散型確率アルゴリズム

研究代表者らが提案してきた PageRank 計算に対する分散型確率アルゴリズムにおいて、エージェント間の時刻同期を要しない手法を考案した。各エージェントが用いる分散型更新則においては、状態の時間平均を計算するが、従来法ではその際に用いる時計が同期している必要があった。本研究では、各エージェントは自身が持つ局所的な時刻を用いて平均を取れば十分であることを解析的に示した。

### (5) 通信制約下における安定化

ネットワーク化制御における基礎的な課題である、通信制約を陽に考慮した安定化問題を考えた。制約として通信レートとデータ損失を扱い、プラントについてはパラメトリックな不確かさを持つ線形システムとした。本研究では、閉ループ系の安定化を実現するために、通信すべき情報量に関する限界を導出した。そのための十分条件と必要条件をそれぞれ求め、通信に関する限界を通信レート、データ損失確率、およびプラントのパラメータ変動に対する上界で特徴づけた。従来研究における不確かさがない場合を拡張する形の結果が得られ、とくに限界を表す式にノミナルプラントの不安定極の積が現れることを示した。さらに、導出の過程において、通信レート低減化のために有効な、非一様な量子化器のクラスを求めた。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① K. Okano and H. Ishii, Networked control of uncertain systems over data rate limited and lossy channels, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, E96-A: 853-860, 2013. (査読有)
- ② K. Cai and H. Ishii, Average consensus on general strongly connected digraphs, Automatica, 48: 2750-2761, 2012. (査読有)
- ③ 岡嶋崇, 津村幸治, 早川朋久, 石井秀明, 不均一なマルチエージェント系におけるリーダー追従のための協調適応制御 — 離散時間系の場合 —, 計測自動制御学会論文集, 48: 536-544, 2012. (査読有)
- ④ 石井秀明, 講座: マルチエージェントシステムの制御 — I 総論, システム/制御/情報, 57:221-228, 2013.
- ⑤ 石井秀明, マルチエージェント・ネットワークと制御の新動向, システム/制御/情報, 56: 492-497, 2012.
- ⑥ H. Ishii and K. Tsumura, Networked control systems and communication constraints, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics,

Communications and Computer Sciences, E95-A: 680-690, 2012. (査読有)

[学会発表] (計 21 件)

- ① 新城功久, 石井秀明, マルチエージェント系による通信制約下での領域被覆手法, 第 13 回制御部門大会, 2013 年 3 月 6 日～8 日, 福岡市.
- ② 門脇有希, 石井秀明, 無線センサネットワークの分散型時刻同期, 第 13 回制御部門大会, 2013 年 3 月 6 日～8 日, 福岡市.
- ③ Xile Kang and Hideaki Ishii, Coarsest quantization of networked control systems with plant uncertainty, 第 13 回制御部門大会, 2013 年 3 月 6 日～8 日, 福岡市.
- ④ Xile Kang and Hideaki Ishii, Coarsest quantization of networked control systems with plant uncertainty, 2012 年度第 3 回高信頼制御通信研究会, 2013 年 1 月 11 日, 横浜国立大学.
- ⑤ K. Okano and H. Ishii, Data rate limitations for stabilization of uncertain systems, 51st IEEE Conference on Decision and Control, 2012 年 12 月 10 日～13 日, Maui HI, USA.
- ⑥ 岡野訓尚, 石井秀明, マルコフ通信路を介した不確かなシステムの安定化に対するデータレート限界, 第 55 回自動制御連合講演会, 2012 年 11 月 17 日, 京都大学.
- ⑦ 門脇有希, 石井秀明, 無線センサネットワークにおける分散型時刻同期, 2012 年度第 2 回高信頼制御通信研究会, 2012 年 10 月 18 日, 福岡大学.
- ⑧ 岡嶋崇, 津村幸治, 早川朋久, 石井秀明, 協調適応制御によるダイナミクスへのコンセンサス, 第 41 回制御理論シンポジウム, 2012 年 9 月 20 日, 葉山町.
- ⑨ M. Okaniwa and H. Ishii, An averaging method for synchronization in Kuramoto models, 3rd IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems (NecSys'12), 2012 年 9 月 14 日～15 日, Santa Barbara CA, USA.
- ⑩ K. Cai and H. Ishii, Average consensus on arbitrary strongly connected digraphs with dynamic topologies, American Control Conference, 2012 年 6 月 27 日～29 日, Montreal, Canada.
- ⑪ H. Ishii, Gossip-based average consensus over general digraphs, Workshop on Cyber-Physical Systems, 2012 年 06 月 12 日, Hong Kong University of Science and Technology, China.
- ⑫ 石井秀明, 不確かなシステムの安定化における通信料・損失に関する制約, 2011 年度第 3 回電子情報通信学会高信頼制御通信時限研究専門委員会研究会, 2012 年 1 月 27 日, 奈良市.
- ⑬ Kunihisao Okano and Hideaki Ishii, Data Rate Limitations for Stabilization of Uncertain Systems over Lossy Channels, Symposium on Developments in Control Theory towards Glocal Control, 2012 年 1 月 6 日, 東京大学.
- ⑭ T. Okajima, K. Tsumura, T. Hayakawa, and H. Ishii, Decentralized Adaptive Leader Tracking of Heterogeneous Multi-Agent Systems: Discrete-Time Case, Symposium on Developments in Control Theory towards Glocal Control, 2012 年 1 月 6 日, 東京大学.
- ⑮ 石井秀明, IFAC 2011 における制御の新動向「マルチエージェント・ネットワークと制御」, 第 54 回自動制御連合講演, 2011 年 11 月 19 日, 豊橋技術科学大学.
- ⑯ 石井秀明, ネットワーク化制御系における通信制約, 2011 年電子情報通信学会ソサエティ大会, 2011 年 9 月 16 日, 北海道大学.
- ⑰ 岡野訓尚, 石井秀明, ロスのある通信路を介した不確かなシステムの安定化に対するデータレート制約, 第 40 回制御理論シンポジウム, 2011 年 9 月 27 日, 大阪市.
- ⑱ H. Ishii, Quantized average consensus on gossip digraphs, Workshop on Uncertain Dynamical Systems, 2011 年 8 月 25 日, Udine, Italy.
- ⑲ H. Ishii, Fundamental limitations in networked control systems and

quantization, HYCON2 PhD School on Control of Networked and Large-Scale Systems, 2011年6月22日, University of Trento, Trento, Italy.

- ⑳ H. Ishii, Networked control under channel capacity constraints, Seminar at the College of Electrical Engineering, 2011年4月21日, Zhejiang University, China.
- ㉑ H. Ishii, Distributed randomized algorithms for PageRank computation, Seminar at the Department of Control Science and Engineering, 2011年4月20日, Zhejiang University, China.

[その他]

・ホームページ

<http://www.sc.dis.titech.ac.jp/ishii/>

・受賞

石井秀明, 2013年度制御部門研究賞(木村賞), 計測自動制御学会

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井 秀明 (Ishii Hideaki)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授

研究者番号: 50376612