

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06915

研究課題名(和文) 認知機能を有する自己組織化ネットワークアーキテクチャの確立

研究課題名(英文) Cognitive and self-organizing network architecture

研究代表者

久世 尚美 (Kuze, Naomi)

大阪大学・情報科学研究科・特任助教(常勤)

研究者番号：20778071

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：大規模、複雑なネットワークに向けて注目される自己組織化制御は高い拡張性、適応性、柔軟性を有する一方、制御のために得られる情報が不確実となり、性能の低下を招きうる。そこで、不確実な知覚情報に基づきながらも互いの協調を通して適切な行動選択を行う生物のグループにおいて見られる集団的行動選択の概念をネットワーク制御へと応用した。無線センサネットワークにおけるチャンネル選択を題材として、集団的行動選択の概念を導入し、シミュレーションを通して、情報が不確実な環境下であっても、ノード同士の協調により、適切なチャンネルの選択が実現できることを示した。

研究成果の概要(英文)：Self-organization is focused on for controlling large-scale and complex networks. However, in self-organizing control mechanisms, the observable information for each component is uncertain, thereby degrading system performance. We introduce the concept of collective decision making in animal groups, in which individuals with uncertain information can select accurate decisions through interactions among them. We propose a channel selection mechanism based on the concept of collective decision making and show that the proposed mechanism allows nodes to select accurate channels through simulation experiments.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：ネットワーク 自己組織化 集団的行動選択

1. 研究開始当初の背景

ARPANET に端を発するインターネットはデバイス技術、通信技術の発展により急速に浸透し、重要な社会基盤となっている。しかしながら、その基本アーキテクチャは当初から変わらず、新しいサービスやアプリケーションが登場するたびにそれらの要求に対する新しい機能を追加するといった拡張を繰り返している。そのため、システムとしての一貫性が失われつつあり、管理が複雑になり、その結果、脆弱なものとなっている。特に近年は、身近に存在する様々な「モノ」(スマートフォン、自動車、家電など)が通信端末として利用されるとともに、その傾向は年々強まっている。そのため、多数かつ多様な「モノ」により構成されるネットワーク (Internet of Things; IoT) 技術の発展が不可欠で、より高い拡張性、適応性、耐故障性を有した新しいネットワークの仕組みが求められており、生物などに見られる自己組織化の原理に基づくマルチエージェントシステムが注目されている。自己組織化システムの機能は自律動作するエージェントの相互作用の結果として創発するため、このような仕組みをネットワークにおいて実現することにより、あらかじめ規定された動作環境の下で定められた要求を達成するように最適設計するのではなく、想定外の状況でも動作し続け、ネットワーク資源の変動やエンド端末の移動などのさまざまな環境変化にも巧みに適応する柔軟性を持つことが可能となる。一方で、自己組織化システムの実用化に関しては十分な検討が行われていない。申請者は、これまでの研究において、自己組織化システムにおける全体の最適性が保障されない、環境変化への適応、所望の機能の創発に時間を要する、といった工学応用上の問題に対して、機能創発を管理する機構の導入によって、環境変化があった場合にも、対象システムの収束性が高速化できることを明らかにした。今後の研究においては、生物システムの環境適応性に着目して、大規模かつ多様なシステムへの適用に向けたマルチエージェント自己組織化ネットワークアーキテクチャの検討を行い、IoT を対象とした評価を行った上で、実環境での実現性についても議論を行い、ネットワークアーキテクチャとして全体の設計指針を与える自己組織化制御を完成させる。

2. 研究の目的

大規模かつ多様なネットワーク、とりわけあらゆる「モノ」が通信機器としてのポテンシャルを持ち、それらが流動的に変化し続ける IoT を対象としたとき、システム管理者が互いに性能や状態の異なる全ての機器を管理し続けることは実質不可能であり、また各機器が取得可能な情報は、不確実 (不完全、曖昧、かつ動的) なものとなる。このような環境下では、不完全で、曖昧で、動的な情報

に基づいて機器自身が判断し、行動の選択を行うこと、つまり認知機能を有する自己組織化ネットワークアーキテクチャの確立が必要である。申請者は、自然界において、生物が、不確実な知覚情報に基づきながら、環境に応じた行動の選択をごく自然に行っていることに着目し、これらの仕組みをネットワーク制御へと応用することにより、情報の不確実な環境での制御の実現について取り組んだ。

3. 研究の方法

(1) Effective Leadership Model の導入

自己組織化制御における、各ノードの観測可能な情報が不確実な環境下でのネットワーク全体としての適切な制御の実現のため、生物の群れにおける集団的な行動選択の仕組みを応用する。生物の群れにおいては、各個体の知覚可能な情報は、その個体の知覚・身体能力の制約や周囲の環境の影響により不確実なものとなる。しかし、群れの中で、個体同士の協調を通して群れ全体として適切な行動の選択を実現している。本研究では、特に、鳥などの生物の群れにおける集団的な行動選択の仕組みをモデル化した Effective Leadership Model [Couzin05] に着目し、ネットワーク制御へと応用する。

Effective Leadership Model においては、個体が informed individual と non-informed individual の二種類に大別される。Informed individual は、他の個体よりも豊富な知識、経験などの情報を有し、それらの情報に基づいて行動の選択を行う傾向がある。一方で、non-informed individual は周囲の個体に追従して行動の選択を行う傾向を持つ。結果として、informed individual が群れのリーダーとしての役割を持ち、他の個体をけん引し、群れ全体を適切な行動選択へと導く。

本研究課題では、無線センサネットワークを対象とした経路制御手法であるポテンシャルルーティングを対象として、Effective Leadership Model を応用した。ポテンシャルルーティングは自己組織化の経路制御手法であり、各ノードがデータパケットの経路を決定するためのスカラー値“ポテンシャル”を保有する。シンクノードに近いノードほど小さなポテンシャル値が割り当てられるようにポテンシャル場を設定することにより、各ノードが“隣接ノードの内、自身より低いポテンシャル値を有するノードにデータパケットを転送する”といった単純なフォワーディングルールによってデータパケットをシンクノードへと収集することができる。ポテンシャル値の更新、およびポテンシャル値に基づいたデータパケットの転送が局所的に行われるため、計算、通信コストが抑えられ、ネットワークサイズに対する高い拡張性を有する。一方で、適切なデータパケットのフォワーディング規則はネットワークの状態によって異なる。具体的には、ポテンシ

ルが過渡状態にあるときには、ポテンシャルに基づいたフォワーディングは適切でない、データパケットを素早く収集することが求められるときにはシンクノードまでの遅延が小さくなるようフォワーディングを行うことが適切である、などの例が挙げられる。

そこで、データパケットのフォワーディング規則の選択を題材として、Effective Leadership Model の仕組みを応用した手法を提案した。ネットワーク内の各ノードを Effective Leadership Model における individual (個体) とみなす。提案手法では、ノードを、自身の保有する情報に基づいて行動選択を行う傾向が強い leader node と他ノードに追従して行動選択を行う傾向の強い follower node に大別する。結果として、leader node は自身の観測可能な情報に基づいて、フォワーディング規則の候補集合から適切なものを選択し、データパケットのフォワーディングに用いる。Follower node は、局所的な情報交換に基づいて自身の近隣ノードのフォワーディング規則選択結果に関する情報を収集し、近隣ノードに追従してフォワーディング規則の選択を行う。結果として、leader node が他ノードをけん引するリーダーとしての役割を果たし、ネットワーク全体として適切なフォワーディング規則の選択が達成される。特筆すべき点として、各ノードは、どのノードが leader node であるかについての情報は持たず、局所的な相互作用のみに基づいてネットワーク全体としての適切な行動選択が達成される。

[Couzin05] I. D. Couzin, J. Krause, N. R. Franks, and S. A. Levin, "Effective leadership and decision-making in animal groups on the move," *Nature*, vol. 433, pp. 513-516, Nov. 2005.

(2) 情報の信頼度を考慮した集団的行動選択の仕組みの導入

(1) において、Effective Leadership Model をネットワーク制御へと応用し、多くの情報を有する leader node が、その他の follower node をけん引することでネットワーク全体として適切な制御が実現可能であることを示した。しかしながら、(1) で提案した手法は、どのノードが leader node となるかは所与であり、かつ常に固定であると仮定していた。実際のネットワークは、常に状態が変化し続けており、また外部環境の影響を受けるため適切な制御を行うために必要な情報を有する、つまりリーダーとして適切なノードは時間的・空間的に変動する。

そこで、ヒトのグループにおける集団的行動選択において見られる flexible leadership の概念 [Kurvers15] をネットワークに応用した。ヒトのグループにおいては、意思決定者は、自身の選択に対する信頼度に基づいて、自身の役割を柔軟 (flexible) に

変化させる。具体的には、自身の選択に対する信頼度が高い際には自身の情報に基づいて選択を行う傾向が強く、一方で自身の選択に対する信頼度が低い場合には他者の選択に追従する傾向が強くなる。その結果として、自身の選択に対する信頼度が高い意思決定者が他の意思決定者をけん引し、グループ全体として適切な行動選択が達成される。この概念をネットワーク制御へと応用することにより、信頼度に基づいた協調制御を実現する。

信頼度に基づいた協調を実現するために既存研究 [Park17] において提案されている信頼度に基づいた individual、social information の統合手法を導入する。individual information は自身の観測情報に基づく選択を、social information は他の意思決定者から受け取った情報に基づく選択を示す。文献 [Park17] の手法においては、individual、social information がそれぞれ正規分布に従うと仮定しており、正規分布の平均がそれぞれの情報に基づいた判断結果あるいは指標、分散がその不確かさ (信頼度の低さ) を示す。そして、各ノードは、individual、social information をそれぞれの不確かさに基づいて統合した結果を最終的な選択とする。自身の選択に対する信頼度が低い、つまり、あるノードにおいて individual information の分散が大きい場合には、統合の結果として social information に従う傾向が強くなる。一方で、自身の選択に対する信頼度が大きい、つまり individual information の分散が小さい場合には、統合の結果として individual information に従う傾向が強くなる。

本研究課題では、無線センサネットワークにおけるチャネル選択を題材として、信頼度に基づいた集団的行動選択の仕組みを応用した手法を提案した。無線センサネットワークにおいて通信を行う際、同一のチャネルを利用した通信同士が衝突すると、データパケットの伝搬が適切に行われず、パケットの棄却や遅延の増大を引き起こし通信品質の低下を招く。そのため、使用可能なチャネルの通信状態に応じて適切にチャネルの選択を行うことが必要となる。しかし、無線センサネットワークにおいては、各ノードの性能には制約が課せられるため、使用可能なすべてのチャネルの状態を常に正確に把握し続けることは困難である。提案手法においては、各ノードが一定間隔で一部のチャネルの状態を観測し、観測状態に基づいてそのチャネルの通信品質の推定、およびその推定結果に対する不確かさ (individual information) を計算する。そして、各ノードは隣接ノードの individual information を収集し、隣接ノードの情報に基づいてチャネルの通信品質の推定とその推定結果に対する不確かさ (social information) の計算を行う。最後に、各ノードは individual information と

social information を、それらの不確実さに応じて統合し、得られた結果から最も通信品質が高いと推定されるチャンネルを選択する。つまり、各ノードにおいて、情報の不確実さ（信頼度の低さ）に応じて、自身あるいは他者の情報のチャンネル選択への寄与度が柔軟に変化し、結果として、不確実性の低い、つまり信頼度の高い情報に基づいてネットワーク全体が通信品質の高いチャンネルの選択を達成する。

- [Kurvers15] R. H. J. M. Kurvers, M. Wolf, M. Naguib, and J. Krause, "Self-organized flexible leadership promotes collective intelligence in human groups," Royal Society Open Science, vol. 2, no. 12, Dec. 2015.
- [Park17] S. A. Park, S. Goïame, D. A. O' Connor, and J.-C. Dreher, "Integration of individual and social information for decision-making in groups of different sizes," PLoS Biology, vol. 15, no. 6, pp. 1-28, Jun. 2017.

4. 研究成果

(1) Effective Leadership Model のネットワーク制御への応用

データパケットのフォワーディング規則の選択機構を題材として Effective Leadership Model を応用した手法を提案し、ネットワークシミュレーションを通して評価を行った。

評価実験では、コントローラから制御を受け、ネットワークの状態の変化を検知しやすいシンクノード leader node、それ以外のノードを follower node に設定する。また、ここでは、手法の有効性を示すことを目的としているため、簡単のために、各ノードは、ポテンシャルに基づくフォワーディング規則とシンクノードまでの経路長が最短となるようなフォワーディング規則のいずれかを選択するものとする。Leader node は、自身のポテンシャルの情報を観測し、ポテンシャルの変動が大きい場合にはポテンシャル場が過渡状態にあると判断して経路長ベースのフォワーディング規則を、反対にポテンシャルの変動が小さい場合にはポテンシャル場が安定状態にあると判断してポテンシャルベースのフォワーディング規則の選択を行う。評価実験では、ネットワーク内でトラヒックの変動が生じ、それに伴いポテンシャルの更新が行われる状況下において、フォワーディング規則の選択状況がどのように変化するかについて評価を行った。

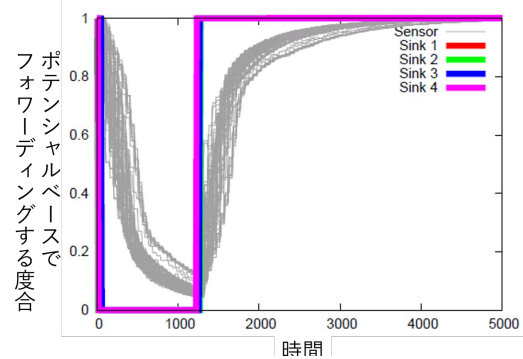


図 1 ポテンシャルベースでフォワーディングを選択する割合

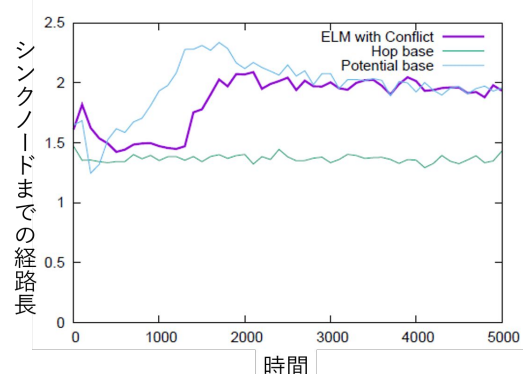


図 2 シンクノードまでの経路長

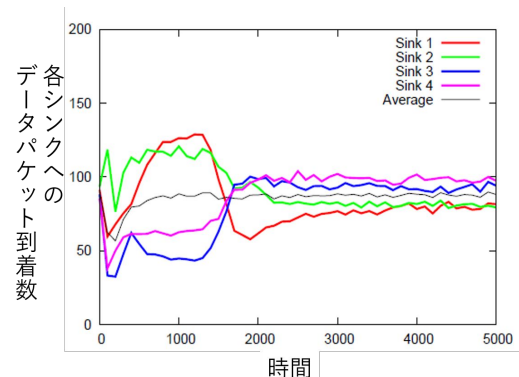


図 3 各シンクノードへのデータパケットの到着数

図 1~3 に評価結果を示す。図 1 は、トラヒック変化後、各ノードにおける、ポテンシャルベースのフォワーディングを選択する割合の時間変化を示している。トラヒック変動後のポテンシャル変化を観測した leader node (本評価では、leader node=シンクノードとする) が経路長ベースのフォワーディングの方が適切であると判断し、ポテンシャルベースのフォワーディングを選択する割合が減少しており、leader node 以外のセンサノードもそれに追従する。一方で、トラヒック変化後しばらく時間が経過してポテンシャルが安定状態となると、leader node はポテンシャルベースのフォワーディングの方が適切であると判断して、他ノードもそれに追従している。

図 2、3 は、トラヒック変動後のデータパ

ケットがシンクノードに到達するまでの経路長、各シンクノードへのデータパケットの到着数をそれぞれ示している。図1で示される、ネットワークの状態に応じたフォワーディング規則の選択に伴い、ポテンシャルが過渡状態のときには経路長ベースのフォワーディング規則が用いられることにより、データパケットがシンクノードに到達するまでの経路長が短縮されるとともに、過渡状態の誤ったポテンシャル値に基づいてデータパケットを送信することによるデータパケットの経路長の増大を防いでいる。一方、ポテンシャルが安定状態のときにはポテンシャルベースのフォワーディング規則を利用することで、経路長は増加するものの、各シンクノードが受け取るデータパケットの数が均一となり、ネットワーク全体での負荷分散を達成している。以上より、Effective Leadership Model を用いることにより、ネットワークの状態の変化に応じて適切なフォワーディング規則の選択が実現できることを示した。

Effective Leadership Model のネットワーク制御への応用に関しては、学会発表()を行うとともに、学術論文誌()への投稿を行い、採録された。

(2)情報の信頼度を考慮した集団的行動選択の仕組みのネットワーク制御への応用

無線センサネットワークを対象としたチャネル選択機構を対象として、信頼度を考慮した集団的な行動選択の仕組みを応用し、ネットワークシミュレーションを通して評価を行った。

評価実験では、104個のノードからなるネットワークを対象としている。各ノードがチャネル1~5の5チャネルから一つのチャネルを選択してデータパケットの送信に用いる。シミュレーション開始後、ある時点においてネットワークの下半分に位置するノードの内、一部のノードにおいて情報の信頼度が低下した。評価では、信頼度が低下した際の、ネットワークの下半分に位置するノードにおけるチャネルの選択状況の変化について評価を行った。

図4、5は、信頼度が低下したノードの数に対する、通信品質が最も良いチャネルの割合、データパケットの到達率をそれぞれ示す。比較手法として、情報の信頼度を考慮せずにチャネルの選択を行う手法を用いた。図より、提案手法を用いた場合には、信頼度の低いノードの数の増加に対して、最適なチャネルを選択するノードの割合の減少が比較的緩やかで、信頼度の低いノードが40個まで増加したときにも約8割のノードが最適なチャネルの選択が達成できている。その結果、通信品質の高いチャネルでデータパケットが行われ、高いデータパケット到達率が実現できている。一方で、情報の信頼度を考慮しない

比較手法を用いた場合には、信頼度の低いノードの数の増加に対して最適なチャネルを選択するノードの数も減少し、結果としてデータパケットの送信に通信品質の低いチャネルが用いられ、伝送路の輻輳によりデータパケットが棄却され、到達率の減少につながっている。以上より、情報の信頼度を考慮してチャネルの選択を行うことで、各ノードの観測情報が不確実なものとなる環境下でも、ノード間の協調を通して適切なチャネルの選択が達成できることを示した。

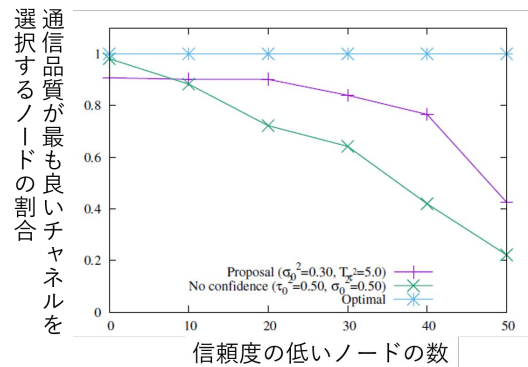


図4 通信品質が最も良いチャネルを選択するノードの割合

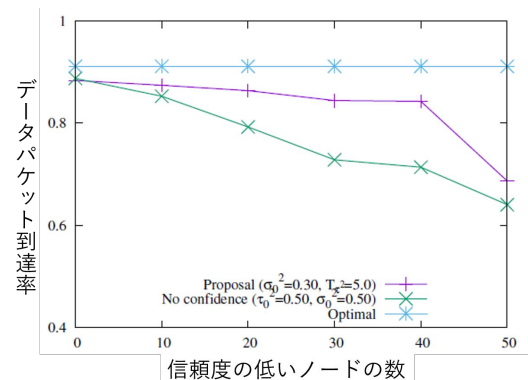


図5 データパケット到達率

図4、5は、信頼度が低下したノードの数に対する、通信品質が最も良いチャネルの割合、データパケットの到達率をそれぞれ示す。比較手法として、情報の信頼度を考慮せずにチャネルの選択を行う手法(図4、5におけるNo confidence)を用いた。図より、提案手法を用いた場合には、信頼度の低いノードの数の増加に対して、最適なチャネルを選択するノードの割合の減少が比較的緩やかで、信頼度の低いノードが40個まで増加したときにも約8割のノードが最適なチャネルの選択が達成できている。その結果、通信品質の高いチャネルでデータパケットが行われ、高いデータパケット到達率が実現できている。一方で、情報の信頼度を考慮しない比較手法を用いた場合には、信頼度の低いノードの数の増加に対して最適なチャネルを選択するノードの数も減少し、結果としてデータパケットの送信に通信品質の低いチャネルが用いられ、伝送路の輻輳によりデータパケット

が棄却され、到達率の減少につながっている。以上より、情報の信頼度を考慮してチャンネルの選択を行うことで、各ノードの観測情報が不確実なものとなる環境下でも、ノード間の協調を通して適切なチャンネルの選択が達成され、システムのパフォーマンスが向上すること示した。

情報の信頼度を考慮した集団的行動選択の仕組みのネットワーク制御への応用に関しては、学会発表()を行うとともに、国際会議 GLOBECOM2018 および学術論文誌 ACM Transaction on Autonomous and Adaptive Systems へと投稿中である。

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2件)

Naomi Kuze, Daichi Kominami, Kenji Kashima, Tomoaki Hashimoto, Masayuki Murata, "Self-organizing control mechanism based on collective decision-making for information uncertainty," ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, 査読有, vol. 13, 2018, 7:1--7:21.
DOI: 10.1145/3183340

Naomi Kuze, Daichi Kominami, Kenji Kashima, Tomoaki Hashimoto, Masayuki Murata, "Hierarchical optimal control method for controlling large-scale self-organizing networks," ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, 査読有, vol. 12, 2018, 22:1-22:23.
DOI: 10.1145/3124644

[学会発表](計4件)

○久世尚美, 小南大智, 加嶋健司, 橋本智昭, 村田正幸, "集団的な行動選択の仕組みに着想を得た不確実な情報に基づくチャンネル選択手法の提案と評価," 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, 2018, 宮崎.

○志垣沙衣子, 久世尚美, 小南大智, 加嶋健司, 村田正幸, "生物の集団的行動選択に着想を得た不確実な情報に基づく制御手法についての一検討," 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, 2018, 宮崎.

○志垣沙衣子, 久世尚美, 小南大智, 加嶋健司, 村田正幸, "生物の集団的行動選択の仕組みに着想を得たマルチエージェント自己組織化制御手法の検討," 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, 2017, 沖縄.

○Saeko Shigaki, Naomi Kuze, Daichi

Kominami, Kenji Kashima, Masayuki Murata, "Self-organizing wireless sensor networks based on biological collective decision making for treating information uncertainty," The Tenth IEEE International Workshop on Selected Topics in Wireless and Mobile Computing (STWiMob 2017), 2017, Rome.

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.anarg.jp/index.php>

6. 研究組織

(1)研究代表者

久世 尚美 (KUZE, Naomi)

大阪大学・大学院情報科学研究科・特任助教

研究者番号: 20778071

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

村田 正幸 (MURATA, Masayuki)

大阪大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 80200301

小南 大智 (KOMINAMI, Daichi)

大阪大学・大学院経済学研究科・助教
研究者番号: 00709678

加嶋 健司 (KASHIMA, Kenji)

京都大学・大学院情報学研究科・准教授
研究者番号: 60401551

橋本 智昭 (HASHIMOTO, Tomoaki)

大阪工業大学・工学部・講師
研究者番号: 90515115

(4)研究協力者

なし