

# 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

久世 尚美<sup>†</sup> 小南 大智<sup>††</sup> 加嶋 健司<sup>†††</sup> 橋本 智昭<sup>††††</sup> 村田 正幸<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

<sup>††</sup> 大阪大学 大学院経済学研究科 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-7

<sup>†††</sup> 京都大学 大学院情報学研究科 〒 606-8501 京都府京都市左京区吉田本町

<sup>††††</sup> 大阪工業大学 工学部 〒 535-8585 大阪府大阪市旭区大宮 5-16-1

E-mail: <sup>†</sup>{n-kuze,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp,

<sup>†††</sup>kashima@amp.i.kyoto-u.ac.jp, <sup>††††</sup>tomoaki.hashimoto@oit.ac.jp

あらまし ネットワークの大規模化、多様化に伴い、自己組織化の仕組みに基づく自律分散制御が着目されている。自己組織型制御においては、個々の構成要素の局所的な相互作用に基づく機能の創発が高い拡張性、適応性、頑健性に寄与する一方で、個々の構成要素の観測情報の不確かさ（曖昧さ、不完全さ、動的さ）が、環境変動への適応速度や制御性能の低下を招く要因となっている。そこで、個々のエージェントが不確かな情報に基づきながらも、エージェント間の協調に基づいて環境に応じた適切な行動選択を行う集団的な行動選択の仕組みに着目して、ネットワーク制御へと応用する。本研究では、無線ネットワークにおけるチャンネル選択手法に着目して手段的な行動選択の仕組みを応用し、シミュレーションを通して自己組織化本来の環境適応性を有しつつ、不確実な情報に基づいた環境下で適切なチャンネル選択が実現できることを示した。

キーワード 自己組織化, 集団的な行動選択, 情報の不確かさ, チャンネル選択

## Channel Selection Mechanism with Uncertain Information Inspired by Collective Decision Making

Naomi KUZE<sup>†</sup>, Daichi KOMINAMI<sup>††</sup>, Kenji KASHIMA<sup>†††</sup>, Tomoaki HASHIMOTO<sup>††††</sup>, and

Masayuki MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Economics, Osaka University 1-7 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

<sup>†††</sup> Graduate School of Informatics, Kyoto University Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

<sup>††††</sup> Faculty of Engineering, Osaka Institute of Technology, Japan

5-16-1 Omiya, Asahi-ku, Osaka 535-8585, Japan

E-mail: <sup>†</sup>{n-kuze,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp,

<sup>†††</sup>kashima@amp.i.kyoto-u.ac.jp, <sup>††††</sup>tomoaki.hashimoto@oit.ac.jp

**Abstract** Because of rapid growth in the scale and complexity of information networks, self-organizing systems are increasingly used to realize novel network control systems that are highly scalable, adaptable, and robust. However, the uncertainty (incompleteness, vagueness, and dynamicity) of information in self-organizing systems makes it difficult for them to work appropriately in accordance with the network state. In this study, we apply the collective decision-making of animal groups to self-organizing control mechanisms to allow them to adapt to information uncertainty. Specifically, by introducing the concept of flexible leader, agents change their role (leader or follower) according to the confidence of their own information, which increases decision accuracy. We propose a channel-selection mechanism based on collective decision-making in accordance with information confidence. Through simulation experiments, we show the advantages and properties of our proposal.

**Key words** Self-organization, collective decision-making, information uncertainty, channel selection

## 1. はじめに

ネットワークの大規模化、多様化に伴い、生物や物理現象などの、自然界で見られる自己組織化の原理に基づいた自律分散型のネットワーク制御が着目されている。自己組織型制御においては、個々の構成要素が局所情報と単純なルールに基づいて動作を行い、構成要素同士の局所的な相互作用によって全体の機能が創発される [1]~[3]。個々の構成要素が局所情報のみに基づいて動作の決定を行うため、ネットワーク増大に伴う制御コストの急激な増大が抑えられて高い拡張性を実現している。また、構成要素が故障や変動に対して即応的に対応することが可能となるため、高い頑健性、適応性、柔軟性を有している。そのため、ネットワークのさらなる大規模、多様化に向けた、次世代ネットワークアーキテクチャの実現に大きく寄与することが期待されている。しかしながら、自己組織型制御の工学応用上の問題も残されている。従来の自己組織型制御に関する研究においては、高い拡張性、頑健性、適応性を有した制御の実現に向けて検討が行われてきたが、性能との両立については十分な検討が行われていない。局所情報に基づくボトムアップ的な機能の創発が自己組織型制御の長所に大きく寄与する一方で、個々の構成要素の観測可能な情報が不確実（不完全、曖昧、動的）なものとなるため、システム全体としての最適性が保証されない、という問題がある。

本報告では、制御に利用する観測情報の不確実さに由来する問題を解決するため、ヒトや鳥、魚などのグループにおける集団的な行動選択の仕組みに着目する [4]~[7]。集団的な行動選択においては、グループの構成員が、それぞれの知覚可能な不確実な情報に基づきながらも、構成員同士の協調によってグループ全体として適切な行動の選択が可能となる。本報告では、ヒトのグループでの集団選択における、flexible leader の概念 [8] に着目し、ネットワーク制御への応用を行う。文献 [8] では、ヒトのグループを対象とした実験により、グループの構成員は、グループ内の他の構成員の選択に関する情報を取得し、信頼度の高い情報を持つ構成員の選択に追随する傾向があり、また、それによって、グループ全体における選択の精度が向上することを示している。このとき、各構成員の得られる情報は、時間的、空間的に一定ではないため、グループを牽引する役割を持つ構成員（リーダー）は状況に応じて柔軟（flexible）に変化する。この flexible leader の概念をネットワーク制御へと応用することにより、自己組織型制御の持つ高い拡張性、頑健性、適応性を維持しつつ、環境に応じた適切な制御を行い、高い性能を実現することができると考えられる。本報告では、集団における情報の信頼度に基づいた行動選択を実現するために、信頼度に基づいて自身、および他者の情報を統合し、行動の選択を手法 [9] を適用する。文献 [9] で提案されている手法においては、グループの各構成員が、自身の観測情報に基づく individual information と他者との情報交換により獲得した social information がガウス分布に従うと仮定し、分布の分散を individual/social information の不確実さ（信頼度の低さ）とみなして両者を統合し、統合の結果得られた integrated

information に基づいて行動の選択を行う。

本報告では、無線センサネットワークにおけるチャンネル選択問題を題材として、flexible leader の概念を応用した、不確実な情報に基づいたチャンネル選択方式を提案する。IoT 技術の発展、浸透に伴い、通信機器の数や形態が増加し、ネットワークを介したサービスが身近なものとなる一方、複数の多様なネットワークが重複してチャンネル資源を互いに共有する形となり、効率的な通信を行うために、チャンネル資源を適切に割り当てる必要がある。しかし、通信品質は各ノードの置かれた場所や時間帯によって変化していくため、それらを一元的に収集、管理し、制御を行うことは通信・計算コストの面から困難である。そのため、flexible leader の概念を導入したチャンネル選択方式を提案し、個々のノードの観測情報が不確実な環境下でも、ノード同士の協調により、自己組織化本来の高い拡張性、頑健性、適応性を維持しつつ、適切なチャンネル選択を行い、高い通信品質が達成されることを目指す。提案手法においては、各ノードが一部のチャンネルの状態を観測してチャンネル品質の推定を行い、ノード同士の局所的な情報交換を通して間接的に共有し、情報の信頼度に基づいて情報の統合を行うことにより、適切なチャンネルの選択を実現する。本報告では、提案手法の有効性を明らかにするために、シミュレーションを通して評価を行う。本評価では、flexible leader の概念を導入した提案手法における、環境適応性、および情報が不確実な環境下での挙動について評価を行うため、チャンネルの通信品質が変動する環境、およびノード間で情報の信頼度に差異が生じる環境下でのチャンネル選択精度、および選択チャンネルに基づいてデータパケット送信処理を行った際の性能について評価を行う。

本報告の構成は以下の通りである。まず、2. において、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、説明を行う。そして、3. において、提案手法の有効性を示すためにシミュレーション評価を行い、考察を述べる。最後に、4. において、本報告の総括、今後の研究課題について述べる。

## 2. 提案手法

本報告では、flexible leader の概念を応用した、不確実な情報に基づいたチャンネル選択方式の提案を行う。提案手法においては、各ノードが局所的な情報交換を行いながら、情報の信頼度に基づいて、自身と他ノードの情報の統合を行い、適切なチャンネルの選択を行う。

### 2.1 観測情報に基づくチャンネル状態の推定

まず、各ノードは一定間隔ごとに観測チャンネルの状態を観測し、観測情報に基づいてチャンネルの品質の推定を行う。自身の観測情報に基づいて推定されたチャンネル情報を individual information とする。

ノード  $i$  ( $i \in \mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ ) は、時間  $\Delta t_{obs}$  ごとに、ノード  $i$  の観測チャンネル集合  $\mathbf{c}_i(t)$  ( $\mathbf{c}_i(t) \in \mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$ ) に含まれるチャンネル  $j$  の状態（アイドル/ビジー）の観測を行う。ここで、時刻  $t$  におけるノード  $i$  の観測チャンネル集合  $\mathbf{c}_i(t)$  は、ノードごとに予め与えられた観測チャンネル  $\mathbf{c}_i'$  とその時点にノード  $i$

が選択しているチャンネル  $c_i^{use}(t)$  を指す ( $\mathbf{c}_i(t) = c_i^{use}(t) \cup c_i'$ )。ノード  $i$  は、観測情報に基づいて、時間  $\Delta t_{est}$  ( $> \Delta t_{obs}$ ) ごとに、チャンネル  $j$  ( $\in c_i(t)$ ) の品質の推定を行う。本手法では、ノード  $i$  のチャンネル  $j$  に対する観測値  $v_{(i,j)}$  が得られたときのチャンネル品質の評価  $D$  (individual information) が平均  $\nu_{(i,j)}$ 、分散  $\tau_{(i,j)}^2$  のガウス分布に従うと仮定する。つまり、条件付き確率  $p(v_{(i,j)}|D)$  が次式を満たす。

$$p(v_{(i,j)}|D) \sim N(\nu_{(i,j)}, \tau_{(i,j)}^2) \quad (1)$$

ここで、分散  $\tau_{(i,j)}^2$  は、individual information の情報の不確かさを示す変数であり、 $\tau_{(i,j)}^2$  の値が小さいほど individual information の信頼度が高いことを示す。Individual information の平均  $\nu_{(i,j)}$ 、分散  $\tau_{(i,j)}^2$  は時間  $\Delta t_{est}$  ごとに、観測値  $v_{(i,j)}$  を用いて、以下の式に基づいて更新される。

$$\nu_{(i,j)} \leftarrow (1 - \alpha)\nu_{(i,j)} + \alpha v_{(i,j)} \quad (2)$$

$$\tau_{(i,j)}^2 \leftarrow (1 - \alpha)\tau_{(i,j)}^2 + \alpha(1 - \alpha)(\nu_{(i,j)} - v_{(i,j)})^2 \quad (3)$$

本稿では、観測値  $v_{(i,j)}$  は、チャンネル品質の推定間隔  $\Delta t_{est}$  内のチャンネル  $j$  の状態の観測において、アイドル状態と観測された割合を与えている。つまり、individual information の平均  $\nu_{(i,j)}$  が大きいほど、ノード  $i$  はチャンネル  $j$  の品質が高く、分散  $\tau_{(i,j)}^2$  が小さいほど、 $\nu_{(i,j)}$  が真の値に近いと推定していることを示している。

## 2.2 局所的な情報交換に基づくチャンネル情報の取得

各ノードは、観測情報から得られた individual information を局所的な情報交換を通して、他ノードと交換する。

各ノードは、推定の結果得られた individual information ( $v_{(i,j)}, \tau_{(i,j)}^2$ ) を時間  $\Delta t_{int}$  ( $= \Delta t_{est}$ ) ごとに、隣接ノードに送信する。隣接ノード ( $\mathcal{N}_b(i)$ ) からの情報  $\mathbf{s}_{(i,j)} = \{(v_{(k,l)}, \tau_{(k,l)}^2) | k \in \mathcal{N}_b(i), l \in \{1, \dots, M\}\}$  が与えられたときのチャンネル品質の評価  $D$  (social information) が平均  $\mu_{(i,j)}$ 、分散  $\sigma_{(i,j)}^2$  のガウス分布に従うと仮定する。つまり、条件付き確率  $p(\mathbf{s}_{(i,j)}|D)$  が次式を満たす。

$$p(\mathbf{s}_{(i,j)}|D) \sim N(\mu_{(i,j)}, \sigma_{(i,j)}^2) \quad (4)$$

Social information の平均  $\mu_{(i,j)}$  は、次式で更新される。

$$\mu_{(i,j)} \leftarrow \frac{\sum_{\mathcal{N}_{conf}(i)} \nu_{(i,j)}}{|\mathcal{N}_{conf}(i)|} \quad (5)$$

ここで、 $\mathcal{N}_{conf}(i)$  はノード  $i$  の隣接ノードのうち、チャンネル  $j$  に対する individual information の分散 (不確かさ)  $\tau_{(i,j)}^2$  が閾値  $T_{\tau^2}$  よりも小さいノードの集合を示す。つまり、social information の平均  $\mu_{(i,j)}$  は、隣接ノードのうち情報の信頼度が一定以上のノードにおける individual information の平均  $\mu$  に基づいて与えられる。また、social information の分散  $\sigma_{(i,j)}^2$  は、文献 [9] に従い定数  $\sigma_0^2$  で与える。

## 2.3 取得情報の統合とチャンネル選択

各ノードは、観測情報に基づく individual information と、隣接ノードから取得した social information を、情報の信頼度

に基づいて (分散  $\tau_{(i,j)}^2$ 、 $\sigma_{(i,j)}^2$  に基づいて) 統合し、通信品質の高いと推測されるチャンネルを選択する。

ノード  $i$  は時間  $\Delta t_{dec}$  ( $\geq \Delta t_{est}$ ) ごとに、式 (1)、(4) で与えられた individual/social information の統合を行い、統合の結果得られた integrated information に基づき、チャンネルの選択を行う。チャンネル品質の評価  $D$  が与えられたときの individual/social information (integrated information) は平均  $\phi_{(i,j)}$ 、分散  $\rho_{(i,j)}^2$  のガウス分布に従うと仮定する。つまり、条件付き確率  $p(D|v_{(i,j)}, \mathbf{s}_{(i,j)})$  が次式を満たす。

$$p(D|v_{(i,j)}, \mathbf{s}_{(i,j)}) \sim N(\phi_{(i,j)}, \rho_{(i,j)}^2) \quad (6)$$

ここで、integrated information の平均  $\phi_{(i,j)}$ 、分散  $\rho_{(i,j)}^2$  は以下の式で与えられる。

$$\phi_{(i,j)} \leftarrow \frac{\tau_{(i,j)}^2 \mu_{(i,j)} + \sigma_{(i,j)}^2 \nu_{(i,j)}}{\tau_{(i,j)}^2 + \sigma_{(i,j)}^2}, \quad (7)$$

$$\rho_{(i,j)}^2 \leftarrow \frac{\tau_{(i,j)}^2 \sigma_{(i,j)}^2}{\tau_{(i,j)}^2 + \sigma_{(i,j)}^2}. \quad (8)$$

つまり、integrated information の平均  $\phi_{(i,j)}$  を計算する際、ノード  $i$  自身の individual information の信頼度が高い ( $\tau_{(i,j)}^2$  が小さい) 場合には、social information の平均  $\mu_{(i,j)}$  に対する individual information の平均  $\nu_{(i,j)}$  の比重が相対的に大きくなり、自身の観測情報に基づいてチャンネル選択が行われる傾向が強くなる。一方、ノード  $i$  自身の individual information の信頼度が低い ( $\tau_{(i,j)}^2$  が大きい) 場合には、individual information の比重が相対的に小さくなり、隣接ノードの選択に追従する傾向が強くなる。ノード  $i$  は、全てのチャンネルのうち、integrated information の平均  $\phi$  が最も大きいチャンネルを選択し、選択したチャンネルを用いてデータパケットの送信処理を行う。

## 3. シミュレーション評価

Flexible leader の概念を応用したチャンネル選択手法に関して、信頼度を考慮した行動選択の有効性、特性を明らかにするために、シミュレーション評価を行っている。まず、提案手法の環境適応性を評価するために、3.2.1 において、チャンネルの通信品質に変動が生じた際の挙動について評価を行う。そして、情報が不確実な環境下における提案手法の性能について評価を行うために、3.2.2 において、ノード間で情報の信頼度に差異がある環境下での評価を行う。

比較対象として、信頼度を考慮しない手法を用いている。比較手法においては、提案手法と同様、自身の観測情報に基づく individual information、隣接ノードから受け取った情報に基づく social information を、individual/social information それぞれの分散に基づいて統合し、チャンネルの選択を行うが、individual/social information の分散を共に定数  $\tau_0^2$ 、 $\sigma_0^2$  で与え、観測情報の信頼度にかかわらず individual/social information の重み付けを常に一定とする。また、social information は、その分散の値にかかわらず、隣接ノードから受け取った全ての individual information の平均として与える。なお、本評価では、各ノードが常に通信品質の最も良い最適なチャンネルを選択

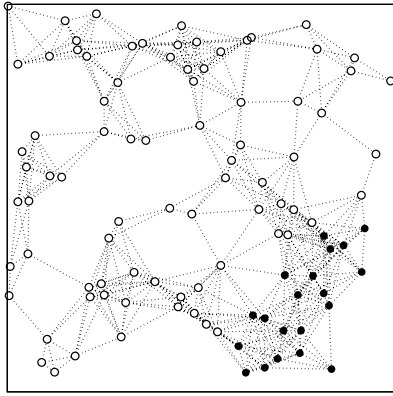


図1 対象ネットワーク

表1 シミュレーション設定

パラメータ	値
パケット生成率	0.01 packet/sec
衝突検知時のバックオフ時間	$10^{-4} \times \text{rand}(2^p)$
$p$	3~5
最大バックオフ回数	5

する手法についても評価を行っている。

### 3.1 評価環境

この評価では、図1に示す100個のノードからなるネットワークを対象とし、シミュレーションのある時点において、外部のネットワーク上で通信状況に変化が生じ、対象ネットワーク上のチャンネルの品質が変化した場合を想定する。対象ネットワークは、4個のシンクノード、および96個のセンサノードからなる。対象となるネットワークはいずれも、与えられた領域内に一様ランダムにセンサノードを配置、シンクノードは与えられた座標に配置し、通信範囲100m以内のノード間にリンクが存在するものとしている。ここでは、チャンネル1~5の5個のチャンネルを利用可能とし、提案手法では、各ノードは自身の観測情報に基づく individual information、および周囲のノードから受け取った social information に基づいて、5個のチャンネルから一個のノードを選択する。各ノードが常に観測を行うチャンネルは5個の利用可能なチャンネルからランダムに一つ選択され、シミュレーション期間全体を通してそのチャンネルの観測を行う。また、各ノードは、各時点において自身の使用しているチャンネルの観測も行う。つまり、各ノードはランダムに選択された観測チャンネルと使用チャンネルとの最大2個のチャンネルを観測可能である。

$\Delta t_{obs}$  は 1.0 sec、 $\Delta t_{est}$ 、 $\Delta t_{dec}$  はともに 10 sec とし、他のパラメータは表1にまとめている。この評価では、簡単のため、各ノードの individual information を他のノードに伝達する際の遅延はないものと仮定している。以下の評価結果では、それぞれの方式に関して10回ずつ試行を行った平均を示す。

### 3.2 評価結果

#### 3.2.1 環境変動時のチャンネル選択

提案手法の環境適応性について評価を行うため、外部環境の変化（領域の重複する外部ネットワークにおける通信状況の変

化）により、チャンネルの通信品質に変化が生じた際のチャンネルの選択状況、および、選択チャンネルに基づいてデータパケット送信処理を行った場合の性能に着目して評価を行っている。

本評価では、外部ネットワークにおける通信状況のチャンネルの品質への影響を、チャンネル観測時にビジー状態と観測される確率として擬似的に与えている。シミュレーション開始直後は、全てのノードに対してチャンネルの状態が同一となるように設定して各ノードのチャンネル選択を安定状態へと収束させる。その後、シミュレーション開始から5,000sec経過時点で、領域の右下に位置する20個のノード（図1において黒丸で表されるノード群）のチャンネルの状態を変化させて、ネットワーク内でチャンネルの状態が異なる状況に変化した際のチャンネルの選択状況について評価を行う。残りのノード（図1において白丸で表されるノード群）のチャンネル状態はシミュレーション開始直後から変更しないものとする。シミュレーション開始直後から5,000sec経過後までは、チャンネル1~5の状態観測時にそれぞれ0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5の確率でビジー状態だと観測されるよう設定を行う。そして、シミュレーション開始から5,000sec経過後は、図1において黒丸で表されるノードにおいて、チャンネル1の状態観測時にビジー状態だと観測される確率を0.4に増加させる。つまり、図1において白丸で表されるノードにおいては、ビジー状態だと観測される確率が最も低いチャンネル1が、黒丸で表されるノードにおいてはチャンネル2が、それぞれ5個のチャンネルの中で最も通信品質が良い状態となる。本評価では、ビジー状態だと観測される確率が最も低いチャンネルを、そのノードにおける最適なチャンネルだとみなし、最適なチャンネルを選択しているノードの割合をチャンネル選択精度を評価する指標として用いている。

図2、3に、チャンネル品質変動から3,000sec間における、チャンネルの通信品質に変化が生じたノード（図1において黒丸で表されるノード）での、チャンネル選択精度、選択チャンネルに基づいてデータパケットの送受信を行った際のデータパケットの衝突回数について評価を行った結果をそれぞれ示す。本評価では、提案手法において、individual information の分散の閾値  $T_{\tau_2}$  を 5.0、social information の分散  $\sigma_0^2$  を 0.5 で与えている。また、情報の信頼度を考慮せずチャンネルの選択を行う方式においては、individual/social information の分散  $\tau_0^2$ 、 $\sigma_0^2$  を共に 0.5 で与えている。図3では、100secごとに、直近の100secにデータパケットの衝突が起こった回数をカウントしたものをプロットしている。

図2より、提案手法と、信頼度を考慮しない手法とを比較した場合、信頼度を考慮しない手法を用いた方がチャンネルの選択精度が高い状態に収束している。これは、提案手法においては、情報の信頼度に基づいて individual/social information が統合されるため、互いにチャンネル品質が異なるノードが隣接する境界付近で、自身とチャンネルの状態が異なるノードの情報であっても信頼度が高い場合には追従するケースがあり、結果として誤ったチャンネルが選択される。

一方、図3より、データパケット送信時の衝突発生回数を比較した場合、提案手法と信頼度を考慮しない手法とで、ほとん

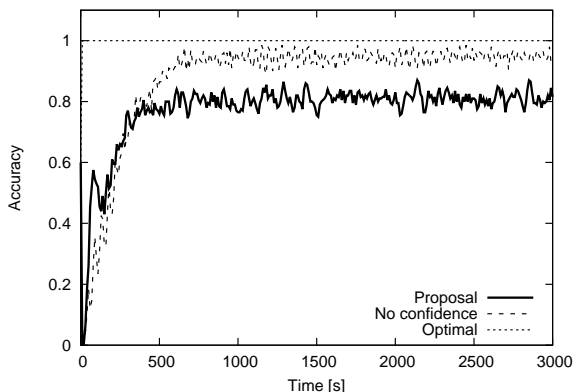


図2 チャンネルの選択精度

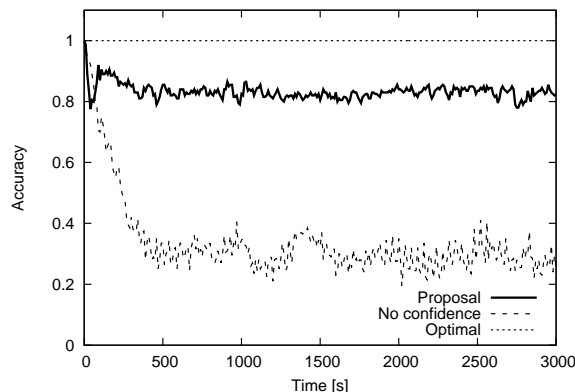


図4 チャンネルの選択精度

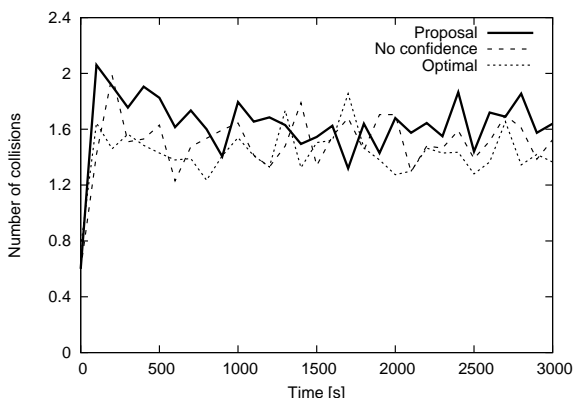


図3 データパケットの衝突回数

ど差異がないことが示されている。これは、提案手法と信頼を考慮しない手法とを比較した際に、チャンネルの選択精度の差が比較的小さく、データパケットの送信処理にほとんど影響を与えていないことを示している。

以上より、提案手法において、互いにチャンネル品質の異なるノード同士が隣接する境界付近で誤ったチャンネルが選択される場合があるものの性能への影響が軽微で、多くのノードは環境変動に応じて適切なチャンネルの選択が達成できており、自己組織制御本来の高い環境適応性を有することが示せた。

### 3.2.2 不確かな情報に基づくチャンネル選択

次に、flexible leader の概念を導入することにより、情報が不確かな環境下で適切な選択が行えるかについて評価を行う。ここでは、ノード間で情報の信頼度に差異がある、つまり、観測情報が不確かなノードが存在する環境下におけるチャンネルの選択状況、および、選択チャンネルに基づいてデータパケット送信処理を行った場合の性能に着目して評価を行っている。

本評価においても、外部ネットワークにおける通信状況のチャンネルの品質への影響を、チャンネル観測時にビジー状態と観測される確率として擬似的に与えている。シミュレーション開始直後は、全てのノードに対してチャンネルの状態が同一となるように設定して各ノードのチャンネル選択を安定状態へと収束させる。その後、シミュレーション開始から 5,000sec 経過時点で、領域の右下に位置する 20 個のノード (図 1 において黒丸で表されるノード群) におけるチャンネルの観測精度を変化させて、

観測情報が不確かなノードが存在する状況下でのチャンネルの選択状態について評価を行う。残りのノード (図 1 において白丸で表されるノード群) のチャンネル状態はシミュレーション開始直後から変更しないものとする。シミュレーション開始直後から 5,000sec 経過後までは、チャンネル 1~5 の状態観測時にそれぞれ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 の確率でビジー状態だと観測されるよう設定を行う。そして、シミュレーション開始から 5,000sec 経過後は、図 1 において黒丸で表されるノードにおいて、チャンネル観測精度を低下させ、ノード間で情報の信頼度に差異がある状況におけるチャンネルの選択状態について評価を行う。具体的には、領域の右下に位置する 20 個のノードにおいて、チャンネル状態の推定、チャンネル選択に用いる観測情報  $v_{(i,j)}$  (チャンネル観測時にアイドル状態と観測された割合) がランダムで与えられるものとする。

図 4, 5 に、チャンネル観測精度変化から 3,000sec 間における、チャンネルの観測精度に変化が生じたノード (図 1 において黒丸で表されるノード) での、チャンネル選択精度、選択チャンネルに基づいてデータパケットの送受信を行った際のデータパケットの衝突回数について評価を行った結果をそれぞれ示す。本評価では、提案手法において、individual information の分散の閾値  $T_{r2}$  を 5.0、social information の分散  $\sigma_0^2$  を 0.5 で与えている。また、情報の信頼度を考慮せずチャンネルの選択を行う方式においては、individual/social information の分散  $\tau_0^2$ 、 $\sigma_0^2$  を共に 0.5 で与えている。図 5 では、100sec ごとに、直近の 100sec にデータパケットの衝突が起こった回数をカウントしたものをプロットしている。

図 4 より、情報の信頼度を考慮しない手法においては、チャンネルの選択精度が低い (0.3 程度) 状態に収束している。情報の信頼度を考慮しない手法においては、各ノードのチャンネル観測精度にかかわらず、individual/social information の統合とチャンネルの選択が行われるため、チャンネル選択時に、誤った情報と正しい情報とを区別しないままいずれも参照し、誤った情報に基づいた適切でないチャンネルの選択が行われるケースが発生する。一方で、情報の信頼度を考慮した提案手法においては、信頼度を考慮しない手法と比較して、チャンネルの選択精度が高い状態 (0.8 強) に収束している。提案手法を用いた場合、チャンネルの

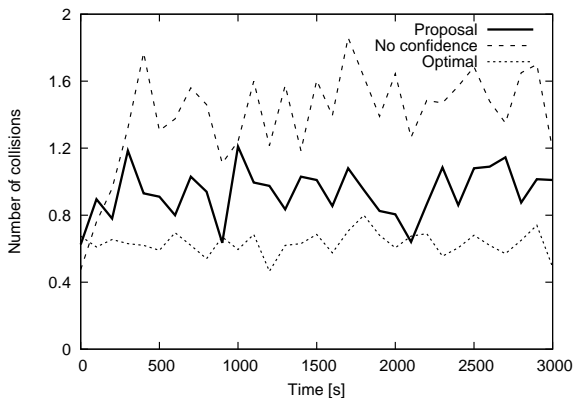


図5 データパケットの衝突回数

観測精度の低いノードにおいては、観測値  $v$  が適切な値をとらず、ランダムに与えられるため、individual information の分散  $\tau^2$  が大きくなる。そのため、individual/social information の統合時に、チャンネルの観測精度の低いノードにおける情報は、無視されるか、あるいは観測精度の高いノードの情報と比較して重みが相対的に低くなる。その結果、情報の不確実な、信頼のできないノードが存在する環境下においても、信頼度の高いノードの情報、選択に追従する傾向が強くなり、高い精度でのチャンネルの選択が達成される。

図5より、データパケット送信時の衝突回数に着目すると、情報の信頼度を考慮しない手法と比較して、提案手法においては衝突回数が少なくなることが示されている。このとき、チャンネル観測精度変動後から3,000sec間の、ネットワーク全体におけるデータパケットの到達率は、提案手法を用いた場合に0.97、情報の信頼度を考慮しない手法を用いた場合に0.89、最適なチャンネルを選択する手法を用いた場合には0.98となっている。提案手法を用いた場合に、最も通信品質の高いチャンネルが常に選択される場合とほぼ同程度のデータパケット到達率を達成している一方で、情報の信頼度を考慮しない手法を用いた際には、データパケット到達率が減少している。これは、提案手法においては、各ノードが信頼度の高い情報、選択に追従し、多くのノードにおいて通信品質の高いチャンネルの選択が達成されている一方で、信頼度を考慮しない手法を用いた場合には、誤った情報に基づいて通信品質の高いチャンネルが選択されてデータパケット送信時の衝突回数が多くなってデータパケットの棄却が発生し、結果としてデータパケットの到達率が減少している。

以上より、flexible leader の概念を導入し、情報の信頼度に基づいた行動選択を行うことで、観測情報が不確実な環境下においても、信頼度の高いノードの情報、選択に追従し、全体として高い精度でのチャンネルの選択が実現できることを示した。

#### 4. おわりに

大規模、多様なネットワークにおいては、各ノードが自律的に情報の観測、他ノードとの協調、行動の判断を行う自己組織的な制御機構が必要となる。しかしながら、外部環境や機器の制約に起因する、観測情報は不確実（不完全、曖昧、動的）さに

より、各ノードが必ずしも状況に応じた適切な選択が可能ではない、という問題が残されている。そのため、各構成員が不確実な情報に基づきながらも、一定の戦略に基づいて他者と協調することにより、適切な行動選択を実現している集団的な行動選択の仕組みに着目してネットワーク制御への応用を行う。本報告では、特に、各構成員の持つ情報の信頼度に基づいて、構成員同士が協調を行う flexible leader の概念に着目する。無線センサネットワークにおけるチャンネル選択問題を題材として、flexible leader の概念を導入した手法を提案し、シミュレーション評価を通して、自己組織化本来の環境適応性を有しつつ、観測情報が不確実な環境下において適切なチャンネル選択が達成されることを示した。

今後の課題として、提案手法の適用範囲を明確にしていくことを目指す。本報告では提案手法のパラメータを実験的に与えているが、パラメータが環境適応性や観測情報が不確実な環境下でのチャンネル選択精度にどう影響を与えるかについて評価、議論を行う。また、ノード間で信頼度に差異のある環境下で、信頼度の低いノードの位置や数が、チャンネル選択精度に与える影響についても評価、議論を行っていく。また、実環境に即した環境で評価を行い、実現性も考慮して議論を行っていく。

#### 謝 辞

本研究はJSPS若手研究(スタートアップ)16H06915の助成を受けたものである。また、本研究の一部はJSPS基盤研究(B)26289130の助成を受けている。

#### 文 献

- [1] F. Dressler, *Self-organization in sensor and actor networks*. USA: Wiley, Jan. 2008.
- [2] C. Müller-Schloer, H. Schmeck, and T. Ungerer, *Organic computing-a paradigm shift for complex systems*. Berlin: Birkhaeuser, May 2011.
- [3] M. Prokopenko, *Guided Self-organization: Inception*. Berlin: Springer, Jan. 2014.
- [4] H. Zhang, M. Chen, G. Stan, T. Zhou, and J. Maciejowski, "Collective behavior coordination with predictive mechanisms," *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 8, pp. 67–85, Aug. 2008.
- [5] L. Conradt, "Models in animal collective decision-making: information uncertainty and conflicting preferences," *Interface Focus*, pp. 1–5, Dec. 2011.
- [6] L. Conradt, "Collective animal decisions: preference conflict and decision accuracy," *Interface focus*, vol. 3, pp. 1–12, Oct. 2013.
- [7] M. Wolf, R. H. J. M. Kurvers, A. J. W. Ward, S. Krause, and J. Krause, "Accurate decisions in an uncertain world: collective cognition increases true positives while decreasing false positives," *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, vol. 280, pp. 1–9, Apr. 2013.
- [8] 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, Dec. 2015.
- [9] 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, pp. 1–28, June 2017.