

生物の集団的行動選択に基づく 不確実な情報を用いた自己組織型ネットワーク制御手法の一検討

志垣沙衣子[†] 久世 尚美^{††} 小南 大智^{†††} 加嶋 健司^{††††} 村田 正幸[†]

[†] 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

^{††} 大阪大学大学院基礎工学研究科 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

^{†††} 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

^{††††} 京都大学大学院情報学研究科 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 36-1

E-mail: [†]{s-sigaki,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}kuze@sys.es.osaka-u.ac.jp,

^{†††}d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp, ^{††††}kashima@amp.i.kyoto-u.ac.jp

あらまし 大規模化、複雑化の進むネットワークでは、各ノードが取得可能な情報は不確実（不完全、曖昧、動的）なものとなり、不確実な情報を用いながらも、ネットワーク全体として一貫した適切な動作を行うことが求められる。本研究では、管理型自己組織型のネットワーク制御を対象として、生物の群れにおける集団的行動選択の仕組みを応用した。本稿では、ノード故障などのネットワーク上の異常が発生し外部から適切でない制御が行われうる場合に、不確実な情報に基づきながらも、ネットワーク全体として外部から行われる制御を信頼してよいかどうかを適切に判断するネットワーク制御手法を提案した。また、シミュレーションによって提案手法の有用性を示した。

キーワード 集団的行動選択、ポテンシャルルーティング、情報の不確実性、生物の仕組みに着想を得たネットワーク制御

Network Control Mechanism Using Uncertain Information inspired by Collective Decision Making

Saeko SHIGAKI[†], Naomi KUZE^{††}, Daichi KOMINAMI^{†††},

Kenji KASHIMA^{††††}, and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{††} Graduate School of Economics, Osaka University

^{†††} Graduate School of Economics, Osaka University

^{††††} Graduate School of Informatics, Kyoto University

E-mail: [†]{s-sigaki,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}kuze@sys.es.osaka-u.ac.jp,

^{†††}d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp, ^{††††}kashima@amp.i.kyoto-u.ac.jp

Abstract Network is becoming larger and more complex, and the information that can be obtained by each node is uncertain (incomplete, ambiguous, dynamic). In this study, we applied the mechanism of collective decision making in a group of living organisms for the network control of a controlled self-organizing system. In this paper, we proposed a network control method to make appropriate decisions on whether the external controller can be trusted or not using uncertain information, in the case where network failure such as node failure occurs and inappropriate control can be performed from the external controller. Through simulation experiments, we show the property of our proposed mechanism.

Key words Collective Decision Making, Potential-based Routing, Information Uncertainty, Bio-inspired Network Control

1. はじめに

インターネットは今や重要な社会基盤となりつつある。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)を通信端末として利用する(Internet of Things; IoT)の概念の普及し、より高い拡張性、適応性、耐故障性を有した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局所的な相互作用の結果として創発するため、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。

しかしながら、自己組織型システムの実運用上の問題も残されている。自己組織型システムにおいては、エージェント同士の局所的な相互作用が高い拡張性、適応性、頑健性、柔軟性に寄与する一方、各エージェントの取得可能な情報は、性能上の制約等から、不確実(不完全、曖昧、かつ動的)なものとなり、システム全体の最適性が保証されず、十分な制御性能が得られない場合がある。そこで、本研究では、鳥などの生物の群れにおいて、各個体の知覚情報が不確実でありながら、個体同士の協調により群れ全体として適切な選択を行う集団的な行動選択の仕組み [1]~[3] に着目し、ネットワーク制御へと応用する。

本研究では、生物の群れにおける集団的な行動選択を数理モデル化した Effective Leadership Model [3] に着目して、自己組織型制御へと応用する。Effective Leadership Model においては、個体がリーダーとして他の個体を牽引する役割を持つ informed individual と、近隣の個体に追従する non-informed individual に大別される。Informed individual は、経験や知識、あるいは高い知覚能力から、多くの、あるいは適切な情報を持ち、自身の情報に基づいて行動選択を行う傾向がある。一方、non-informed individual は、知覚可能な範囲に存在する個体の行動に追従する形で追従して行動選択を行う傾向がある。結果として、個体間の局所的な相互作用により、直接的、あるいは間接的に non-individual が informed individual に追従し、群れ全体としての適切な行動選択が達成される。各個体が行動選択を行う際の自身の情報の重みは“assertiveness”、つまり自身の選択を重視する度合と解釈され [4]、informed individual は高い assertiveness を有する一方で、non-informed individual の assertiveness は低くなる。Effective Leadership Model の仕組みを自己組織化制御へと応用することにより、個々のエージェントの観測情報が不確実な環境下でも、局所的な協調を介して、適切な情報を持つノードに追従してシステム全体としての適切な選択が達成されると考えられる。

本研究では、外部コントローラを導入した自己組織化制御 [5] を対象として、Effective Leadership Model を応用した手法を提案する。文献 [5] では、ポテンシャルルーティングに外部コントローラを導入して、外部コントローラがネットワークの状態を観測、制御することにより、データパケットの経路を決定するポテンシャル場構築の環境適応速度の向上を実現している。しかしながら、障害や外部環境の影響により、外部コントローラが制御に十分なネットワーク情報を得られない場合、外部コントローラから誤った制御が入力され、適切なポテンシャル場の構築ができない。そこで、Effective Leadership Model を応用し、誤った制御が入力される兆候を観測するなど他のノードよりも多くの情報を持ちうるノードがリーダーノードとして、その情報を局所的な情報交換を介してネットワーク内で拡散、共有し、適切な制御入力を与えられるまで制御入力の重みを減少させるという選択を行う制御機構を提案する。提案手法の有

用性を示すために、シミュレーションを通して評価を行う。本研究では、ノードの故障を原因として外部コントローラの保有するネットワーク情報との齟齬によって生じる、制御入力の誤りへの対応に着目し、評価を行う。また、各ノードが得られる情報が不確実な場合の対応についても評価を行う。

2. 外部コントローラを導入したポテンシャルルーティング

ここでは、本研究で題材とする外部コントローラを導入したポテンシャルルーティング [5] について説明する。

2.1 ポテンシャル場の構築

ポテンシャルルーティングでは、各ノードは「ポテンシャル」と呼ばれるスカラー値を保持しており、一般的に、極小値のポテンシャルを持つシンクノードからのホップ数が短いノードに、より低いポテンシャルが設定されるようにポテンシャル場が構築される。そのため、自身より低いポテンシャルを保有する隣接ノードへデータパケットを送信するという単純なフォワーディング規則により、データパケットをシンクノードへと到達させることが可能である。各ノードのポテンシャルは、ノード同士の局所的な相互作用により更新されるため、ノード数に対して高い拡張性を有し、また環境変動に対して適応することができる。

文献 [5] では、ポテンシャルルーティングにおける局所的な情報交換のみに基づくポテンシャル場の更新により環境適応速度が低くなるという問題を解決するため、ネットワークの一部のノードのポテンシャルを観測、全体のポテンシャルの挙動を推定し、制御入力をフィードバックする外部コントローラを導入した手法を提案している。手法 [5] では、自己組織化の長所である拡張性を損なわないため、一部のノードにのみ制御入力が行われる。時刻 t での制御を直接受けるノード n のポテンシャル $\theta_n(t)$ は、式 (1) に基づいて計算される。

$$\begin{aligned} \theta_n(t) = & (\alpha + 1)\theta_n(t-1) - \alpha\theta_n(t-2) \\ & + \beta\sigma_n \left(\sum_{k \in N_b(n)} \{\theta_k(t-1) - \theta_n(t-1)\} + f_n(t-1) \right) \\ & + \eta_n(t) \end{aligned} \quad (1)$$

$N_b(n)$ はノード n の隣接ノード集合を表す。 α は、ポテンシャル更新時における現時点でのポテンシャルと一時点前のポテンシャルの重みを決定するパラメータである。 α が大きいほど一時点前のポテンシャルの重みが大きくなり、外乱の影響を受けにくくなる一方で収束速度が低下する。 β は隣接ノードのポテンシャルから受ける影響の大きさを決定するパラメータである。文献 [6] では、 σ_n は $1/|N_b(n)|$ と定義されているが、一定の条件下以外ではポテンシャルが発散してしまうため、提案手法では任意のノード n ($n \in 1, 2, \dots, N$) に対して定数 $\sigma_n = \sigma$ ($0 < \sigma < 1$) としている。 $f_n(t)$ は、時刻 t におけるノード n に対する外部からの流入フロー量を表す。センサノードにおいては、フロー量 $f_n(t)$ は正の値を取り、外部から流入するデータパケットの量を示す。一方で、シンクノードにおいては、フロー量 $f_n(t)$ は負の値をとり、その絶対値はシンクノードが受信するデータパケットの量を示す。シンクノードにおけるフロー量を適切に設定することで、大域的なフローの分散が達成される。具体的には、各シンクノードのフロー量 $f_n(t)$ を同一の値に設定することで、各シンクノードの受信するデータパケットの数が均等になるようなポテンシャル場を構築することが可能である。 $\eta_n(t)$ は外部コントローラから行われる制御入力項である。

制御を直接受けないノードのポテンシャルは $\eta_n(t) = 0$ として、式 (2) に基づいて更新されるため、周囲との相互作用のみによってポテンシャルが更新されるが、隣接ノードから間接的に制御の影響を受けている。

$$\begin{aligned} \theta_n(t) = & (\alpha + 1)\theta_n(t-1) - \alpha\theta_n(t-2) \\ & + \beta\sigma_n \left(\sum_{k \in N_b(n)} \{\theta_k(t-1) - \theta_n(t-1)\} + f_n(t-1) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 データパケットのフォワーディング

各ノード i は、自分と隣接しているノードのポテンシャルの情報に基づいてデータパケットの送信先を確率的に決定する。時刻 t においてノード i が隣接ノード n をデータパケットの送信先として選択する確率 $p_{i \rightarrow n}(t)$ を次式にもとづいて決定する。

$$p_{i \rightarrow n}(t) = \begin{cases} \frac{\theta_i(t) - \theta_n(t)}{\sum_{j \in N_{low}(i)} \{\theta_i(t) - \theta_j(t)\}}, & (n \in N_{low}(i)) \\ 0, & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) における $N_{low}(i)$ はノード i よりもポテンシャルの低いノード i の隣接ノードの集合を表しており、ノード i よりも小さいポテンシャルを有し、かつノード i とのポテンシャルの差が大きいノードほどデータパケットの転送先として選ばれやすくなっている。

3. 外部コントローラに対する信頼度判定手法

外部コントローラを導入したポテンシャルルーティングにおいて、ネットワーク環境の変動や故障などの障害が生じた場合に、コントローラが変動や障害に関する情報を得るまで正しい制御入力が行われないためにポテンシャル場が適切に構築されず、結果として、データパケットの送信遅延や棄却率が增大するなどの性能低下が起こる可能性がある。例えば、ノードの故障が発生した場合、外部コントローラが故障に関する情報を取得するまで、故障ノードが動作している前提で制御入力が行われる。このような適切でない制御入力に基づいてポテンシャル場の更新が行われると、適切なデータパケットのフォワーディングが行えない、負荷分散が達成されないなどの性能低下が起こる可能性がある。一方で、ポテンシャルルーティングにおいては、外部コントローラによる制御が行われない場合であっても、ノード同士の相互作用によってポテンシャル値の更新を繰り返すことで自己組織的にポテンシャル場が構築される。これを利用し、各ノードが自身の観測可能な情報から制御入力に対する信頼度の判定を行い、適切でない制御が行われていると判断した場合には、制御が適切に行われるようになるまでの間、適切でない制御入力によるネットワーク性能の低下を抑える。

しかし、ポテンシャルルーティングにおいて、各ノードが観測可能な情報は不確実であるため、各ノードによる制御入力に対する信頼度の判断が必ずしも適切に行えるとは限らない。本研究では、Effective Leadership Model を応用して、各ノードが得られる情報が不確実な状況でも、ノード同士の局所的な相互作用を通して外部コントローラに対する信頼度を判定する手法を提案する。

3.1 Effective Leadership Model

まず、文献 [3] で提案されている生物の群れにおける行動選択の仕組みを数理モデル化した Effective Leadership Model について説明する。Effective Leadership Model では、知覚可能な範囲の局所的な情報のみを用いて周囲の個体の行動に倣って

行動する個体 (non-informed individuals; フォロワー個体) と、他の個体よりも多くの情報を保有し、より適切な行動選択を行うことができる個体 (informed individuals; リーダー個体) の 2 種類の個体によって群れが構成されており、それらが互いに協調することで群れ全体として適切な、一貫した行動選択を達成している。

Effective Leadership Model では、群れの中のある個体 i の時刻 t での位置ベクトルを $\mathbf{c}_i(t)$ 、方向ベクトルを $\mathbf{v}_i(t)$ 、速さを s_i と定義している。他の個体が距離 α 以内にいる場合は、個体同士の衝突を避けるため式 (4) に従って距離 α 以内にいる個体から距離を取るよう進行方向を決定する。

$$\mathbf{d}_i(t + \Delta t) = - \sum_{j \in N_b(i, \alpha) \setminus \{i\}} \frac{\mathbf{c}_j(t) - \mathbf{c}_i(t)}{|\mathbf{c}_j(t) - \mathbf{c}_i(t)|} \quad (4)$$

半径 α 以内に他の個体が存在しない場合には、フォロワー個体は以下の式に基づいて望ましい方向ベクトル \mathbf{d}_i を決定する。

$$\mathbf{d}_i(t + \Delta t) = \sum_{j \in N_b(i, \rho) \setminus \{i\}} \frac{\mathbf{c}_j(t) - \mathbf{c}_i(t)}{|\mathbf{c}_j(t) - \mathbf{c}_i(t)|} + \sum_{j \in N_b(i, \rho)} \frac{\mathbf{v}_j(t)}{|\mathbf{v}_j(t)|} \quad (5)$$

式 (5) における ρ は個体の知覚可能な範囲を表しており、 $N_b(i, \rho)$ で個体 i から ρ の範囲にある個体の集合を表す。式 (5) の第 1 項で知覚可能な個体との位置ベクトルの偏差の平均の単位ベクトル、第 2 項で知覚可能な個体の速度ベクトルの平均の単位ベクトルを取り、両者の和を取ることで知覚可能な個体との位置、向きに追従していく。

一方、リーダー個体は目標とする進行方向 \mathbf{g}_i についての情報を有しており、各個体での目標の進行方向 \mathbf{g}_i を用いて、式 (6) に基づいて望ましい進行方向 \mathbf{d}'_i の決定を行う。

$$\mathbf{d}'_i(t + \Delta t) = \frac{\hat{\mathbf{d}}_i(t + \Delta t) + \omega_0 \mathbf{g}_i}{|\hat{\mathbf{d}}_i(t + \Delta t) + \omega_0 \mathbf{g}_i|} \quad (6)$$

$\hat{\mathbf{d}}_i(t)$ は $\mathbf{d}_i(t)$ の単位ベクトルであり $\hat{\mathbf{d}}_i(t + \Delta t) = \frac{\mathbf{d}_i(t + \Delta t)}{|\mathbf{d}_i(t + \Delta t)|}$ で定義される。 ω_0 はリーダー個体の行動選択における目標進行方向 \mathbf{g}_i の重みを決定するパラメータで、文献 [4] においてはその個体の “assertiveness” に相当すると解釈されている。 ω_0 の値が大きいほど目標進行方向 \mathbf{g}_i の影響が大きくなり、自身の保有する情報に基づいて選択を行う傾向が強くなる。

3.2 信頼度を用いたポテンシャル更新

本研究では、情報が不確実な状況でネットワーク上に故障などの異常が起こった場合に、Effective Leadership Model [3] を用いて外部コントローラから行われている制御入力に対する信頼度を判定するための指標を判断する手法を提案する。

提案手法において、外部コントローラから直接制御を受けないノードのポテンシャルは、手法 [5] と同様に、式 (2) によって周囲との局所的な相互作用に基づいて更新される。一方、外部コントローラから直接制御を受ける制御ノード n に対しては、式 (1) の外部コントローラからの制御入力項に重み $\gamma(t)$ を付加し、式 (7) に基づいたポテンシャル更新を行う。

$$\begin{aligned} \theta_n(t) = & (\alpha + 1)\theta_n(t-1) - \alpha\theta_n(t-2) \\ & + \beta\sigma_n \left(\sum_{k \in N_b(n)} \{\theta_k(t-1) - \theta_n(t-1)\} + f_n(t-1) \right) \\ & + \gamma(t)\eta_n(t) \end{aligned} \quad (7)$$

$\eta_n(t)$ は式 (1) と同様に、外部コントローラからの制御入力を

表している。 $\gamma(t)$ は $\forall t, 0 \leq \gamma(t) \leq 1$ なる値であり、各ノード n の持つ外部コントローラが正しい制御を行っているかどうかについての指標（外部コントローラに対する信頼度） $R_n(t)$ に基づいて定義されるものとしている。 $\gamma(t)$ によって $\eta_n(t)$ を重み付けすることで、制御ノードのポテンシャルが周囲のポテンシャルから受ける影響と外部コントローラから受け取った制御入力による影響の大きさを調整することができる。つまり、 $\gamma(t)$ の値が 1 に近いほど、制御ノードのポテンシャル更新において外部コントローラによる制御入力から受ける影響が強くなり、逆に $\gamma(t)$ の値が 0 に近いほど制御ノードのポテンシャル更新は式 (2) に近付き、周囲から受ける影響が大きくなる。

3.3 Effective Leadership Model を用いた制御入力に対する信頼度の考慮

各ノード n において、外部コントローラに対する信頼度は、以下の手順で決定する。

手順 1 ノード n 自身が持つ情報による信頼度の指標 $U_n(t)$ を決定（Effective Leadership Model の目標となる進行方向 \mathbf{g}_i に相当する値の決定）

手順 2 ノード n 自身がリーダーになるべきかを判断（Effective Leadership Model の ω_0 に相当する値の決定）

手順 3 $U_n(t), \omega$ を用い、Effective Leadership Model によって周囲の信頼度を考慮したノード n の外部コントローラに対する信頼度 $R_n(t)$ を決定

3.4 手順 1: 自身が持つ情報に基づく信頼度の指標 $U_n(t)$

ここでは、ノード n が自身の能力で得られる情報を用いて、信頼度の指標となる値 $U_n(t)$ を決定する手順について説明する。

ノード故障によるトポロジーの変化を原因として制御誤りが生じている場合、全てのノードで、周囲にノード故障が生じているかによって制御誤りが起こりうることを判断可能である。故障したノードはそれまで行っていた一切の通信を行わなくなるため、隣接ノードが故障した場合、通信の疎通確認に用いているパケットが一切送受信されなくなるなどの情報をもとに、自身の周囲に故障が生じているかどうかを判断可能であると考えられる。ここでは、一般のノード n で隣接ノードの故障を検知可能であるとして、故障が検知されている間は $U_n(t) = 0$ 、逆に故障が検知されていない間は $U_n(t) = 1$ と設定する。

3.5 手順 2: 自身がリーダーとなるべきかの判断 (ω の決定)

Effective Leadership Model におけるリーダーは、より多くの正しい情報を知っている個体であり、その情報をもとに群れ全体を牽引する。ここでは、故障などの異常が起こって制御誤りが起こっているかどうかについてより多くの情報を持つノードが、自らの判断に基づいてリーダーノードとなり、周囲の信頼度の変動を牽引するように振る舞う。

本手法では、隣接ノードに故障が検知された際に、故障を検知したノードがリーダーとして振る舞う ($\omega = 0.9$ と設定される)。それ以外のノードでは、デフォルト値として、 $\omega = 0.1$ が設定されている。

3.6 手順 3: Effective Leadership Model によって周囲の信頼度を考慮した信頼度の判断

式 (7) における制御入力項の重み $\gamma(t)$ は、制御が適切に行われるためには、全ての制御ノードで 0 あるいは 1 の同じ値を取っていないなければならない。現在の手法では制御ノードとシンクノードは一致しているため、制御ノード同士で直接的な情報交換が可能であると想定して、 $\gamma(t)$ を制御ノード間での多数決によって決定する。つまり、以下の式 (8) の $R_n(t)$ が小さい ($R_n(t) \leq 0.5$) 制御ノードが過半数である場合は全ての制御ノードで $\gamma(t) = 0$ と設定し、 $R_n(t)$ が大きい ($0.5 \leq R_n(t) \leq 1$) ノードが過半数である場合は全ての制御ノードで $\gamma(t) = 1$ と

設定する。

手順 1 の $U_n(t)$ 、手順 2 の ω を用い、Effective Leadership Model によって周囲の信頼度を考慮して、外部コントローラに対する信頼度を判断する。

$$R_n(t) = (1 - \omega) \left\{ \frac{1}{|N_b(n)|} \sum_{k \in N_b(n)} R_k(t) \right\} + \omega U_n(t) \quad (8)$$

式 (8) 右辺の第 1 項は Effective Leadership Model での周囲の個体の位置の平均を取る項 (式 (5) における $\mathbf{c}_i(t)$) に相当し、本手法では Effective Leadership Model における個体 i の位置 $\mathbf{c}_i(t)$ をノード n の信頼度の値 $R_n(t)$ と解釈し、隣接ノード k ($k \in N_b(n)$) の信頼度 $R_k(t)$ の平均として与えた。 $N_b(n)$ はノード n の隣接ノード集合を表す。 $\omega U_n(t)$ の項は、Effective Leadership Model において目標とする進行方向 \mathbf{g}_i を考慮する項に相当し、本手法では、ノード n の観測情報に基づいて計算される。

4. シミュレーション評価

提案手法に対し、シミュレーションによって評価を行っている。

4.1 シナリオ

1 万秒のシミュレーションの中で、以下のイベントが起こる。

(1) シミュレーション開始時、シンクノードを含めて 64 個のノードが 350 メートル四方のフィールド上にランダムに配置される。シンクノードはフィールド上に偏らないように配置される (図 1)。

(2) 時刻 50 秒で、ポテンシャルの更新が開始される。その後、50 秒ごとにポテンシャルが更新され続ける。

(3) 時刻 1000 秒で、センサーノードによるデータパケットの生成と送信、および外部コントローラによる制御が開始される。シンクノードに対して、50 秒ごとに制御入力が行われるようになる。

(4) 時刻 1000 秒で、全てのノードにおいて外部コントローラに対する信頼度の判断が開始される。その後、100 秒ごとに信頼度が更新され続ける。

(5) 時刻 5000 秒で、ノード故障が起こる。故障後のノードは、隣接ノード間の通信の疎通確認に用いる ID パケットおよびデータパケットの送受信を一切行わず、ポテンシャルや信頼度の更新も行わない。

図 1 はシミュレーション時に用いたトポロジーを表している。各ノードの通信範囲は 100 メートルとしており、64 個のノードがランダムに配置された後、距離 100 メートル以内にあるノードとリンクが形成される。図 1 で赤い丸で表現されているノードが 4 つのシンクノードであり、それ以外の小さな黒い点は 60 個のセンサーノードを表している。5000 秒の時点で故障するノードは、図 1 で青い四角形の点で表現されている 4 つのノードである。ノードの位置は静的であり、動作中に移動は起こらないため、故障以外の要因によってトポロジーは変化しない。

4.2 情報の不確実性

本手法の特長として、他より多くの情報を持つリーダーが他を牽引する Effective Leadership Model を応用することにより、情報の不確実性に対する強さを備えている点が挙げられる。本シミュレーションでは、文献 [3] で考慮されている 3 種類の情報の不確実性（動的、不完全、曖昧）を以下のように解釈する。

- 動的: 故障に関する観測情報（周囲の信頼度 $R_n(t)$ の値）が時間変動すること。

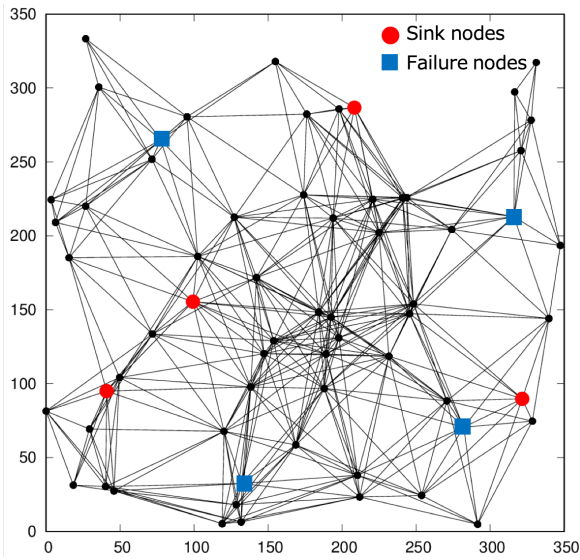


図1 ネットワークトポロジー

パラメータ	設定値
ノード数	64 個
シンクノード数	4 個
ポテンシャル更新頻度	50 秒
外部コントローラに対する信頼度 $R_n(t)$ の更新頻度	100 秒
リーダーとなった際のノードの ω	0.9
フォロワーとして振る舞うノードの ω	0.1

表1 各パラメータのシミュレーションにおける設定値

- 不完全: 故障に関する情報をごく周囲のノードからしか直接的には観測できないこと。
- 曖昧: 周囲から得た故障に関する観測情報が必ずしも正しくないこと。

情報の動的、不完全な不確実性は、通信範囲が限られた無線センサーネットワークの環境において変動する $R_n(t)$ の値を周囲と交換するという点で、すでに備えられているものと解釈できる。一方で、情報の曖昧性に関しては、ネットワーク上の一部のノードの故障検知に対して誤りが起こる状況を作り出すことによって調査する。具体的には、ノード故障は起こっていないが通信の疎通がたまたま確認できず、周囲に正常なノードしかないのに誤って故障を検知する振る舞いをするノードを、故障ノードとは別に設定する。これらの誤った判断を行うノードの隣接ノードは、相手ノードの周囲に故障があるのかどうかを知るべきがなく、他のノードから得た情報と誤った判断を行うノードから得た情報を同じように扱わなければならない。

4.3 評価結果

図1のトポロジーにおいて、故障検知に関して誤った判断を行うノードをそれぞれ以下の図2の緑のぼつ印(6個)、図3のオレンジ色のぼつ印(12個)の位置に設定した。これらのノードは、シミュレーションの開始時点から、実際にはノード故障は生じていない場合でも、隣接ノードの故障が起こっているため信頼度 $R_n(t)$ を低く設定すべきだとリーダーノードとなって主張し続ける。

故障検知に関して判断に誤りが起こらず、情報が不確実でない場合の外部コントローラに対する信頼度 $R_n(t)$ の時間変動は図4のようになる。5000秒で故障が起こった段階から $R_n(t)$ の値は減少し始め、6000秒になる前にはもう全てのノードで0.5を下回っている。制御入力項の重みを最終的に決定するシンクノードの信頼度 $R_n(t)$ の値(図4の赤線)も0.5を下回っ

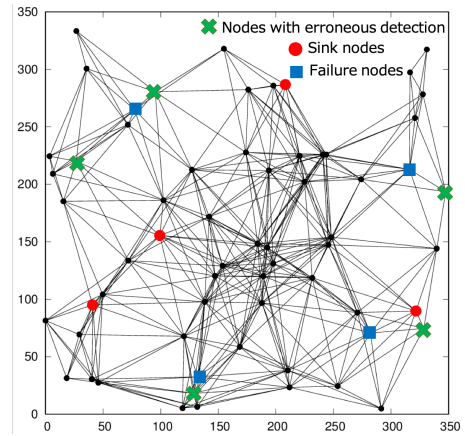


図2 誤った判断を行うノードが6個存在する場合

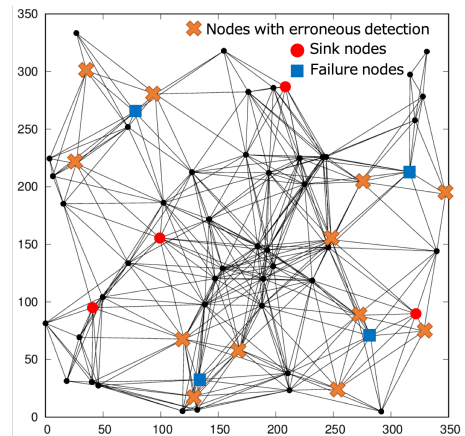


図3 誤った判断を行うノードが12個存在する場合

ているため、早い段階で故障によって起こる適切でない制御の影響を遮断するという判断ができることが分かる。

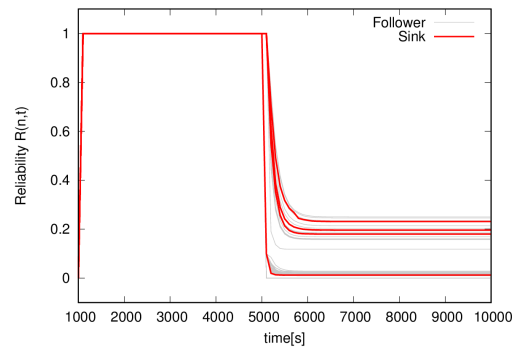


図4 信頼度 $R_n(t)$ の時間変動(情報が不確実でない場合)

図5は、図2で示される6個のノードが故障検知に関して誤った判断を行った場合、つまり実際にはノード故障が起きていない場合も信頼度 $R_n(t)$ を低下させるよう周囲を牽引するように振る舞うリーダーノードが6個存在し、信頼度 $R_n(t)$ の情報に曖昧な不確実性が含まれる場合の信頼度 $R_n(t)$ の時間変動を表している。故障検知に関して誤った判断を行うノードは、シミュレーションの開始時点から終了時点まで故障を検知し続け、誤った情報を主張するリーダーノードとして振る舞う。そのため、図4の場合とは違い、実際に故障が起こる5000秒よりも前の段階から信頼度が下がり始める。しかし、誤った情報を主張するリーダーノードの数が、実際に故障が発生した場合

に比べて少なく、信頼度 $R_n(t)$ を低下させる方向へ牽引する力が弱いため、シンクノードの信頼度 $R_n(t)$ は 5000 秒より前の段階で 0.5 を下回っていない。

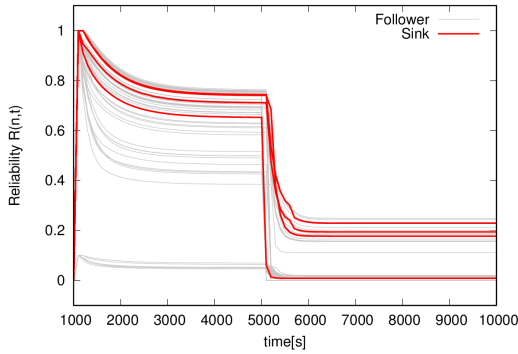


図 5 6 個のノードが誤った判断を行う場合の信頼度 $R_n(t)$ の変動

一方、図 6 は、図 3 で示される 12 個のノードが故障検知に関して誤った判断を行う場合の信頼度 $R_n(t)$ の時間変動であるが、図 5 の場合よりも実際に故障が起こる 5000 秒までの間の信頼度の低下が大きく、1 個のシンクノードでは 0.5 を下回っている。これは、センサーノード 60 個に対して、誤った情報を主張するリーダーノードの割合が 10% から 20% に増加し、信頼度を低下させる方向へ牽引する力が強まったためである。Effective Leadership Model を提案している文献 [3] でも 20% 程度の数のリーダー個体で十分群れを牽引することができるとしており、今回のシミュレーションで同様の結果を得たと言える。

加えて、本評価では、Effective Leadership Model の『正しい情報を持つリーダーが牽引することにより、一貫した適切な行動選択ができる』という特長を取り入れることができたのか評価するため、全てのノードで情報の重みに差がなく、リーダーノードが存在しない状態 ($\omega = 0.5$) についても調査した (図 7)。これまでのシミュレーションと同様に、5000 秒で実際に故障が発生するものの、誤った判断を行うノードはシミュレーションの開始時点から終了時点までずっと誤った情報を主張し続ける。しかし、自身の情報を強く主張するリーダーノードがおらず、全てのノードが等しい強さで情報を主張する状況では、故障検知に関して誤った判断を行うノードの影響が小さくなり、同時に実際に故障したことを検知した正しい情報を主張するノードの影響も小さくなっていることが分かる。また、実際に故障を検知したノードから遠い (ホップ数が多い) ノードの信頼度 $R_n(t)$ が下がりにくくなり、全体として一貫した行動選択ができなくなっている。

5. 結 論

本稿では、外部コントローラを導入したポテンシャルルーティングを対象として、生物の群れにおける集団的行動選択の仕組みを応用することにより、ネットワーク上のノード故障などの異常を原因として生じる制御誤りに対処する手法を提案、評価した。提案手法では、各ノードが自身の持ちうる情報を用いて外部コントローラに対する信頼度を判断し、さらに自身が他より正しい情報を持っている場合はリーダーとして振る舞うべきであると自律的に判断し、行動を変化させる。シミュレーション評価の結果から、ノード故障によって外部コントローラから適切でない制御入力が行われうる場合に、適切に信頼度を下げ、適切でない制御入力の影響を遮断することができることを示した。また、一部のノードがノード故障の検知に関して

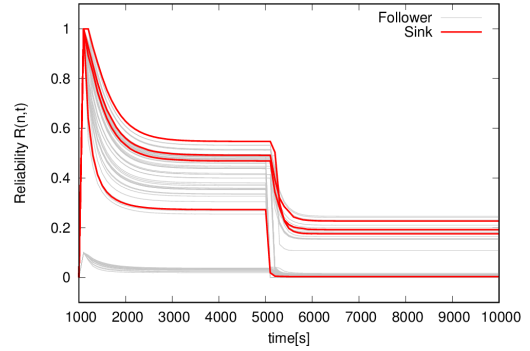


図 6 12 個のノードが誤った判断を行う場合の信頼度 $R_n(t)$ の変動

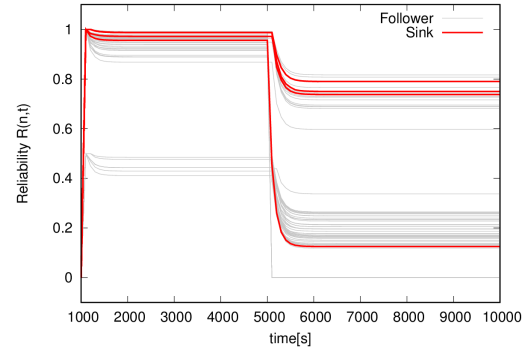


図 7 6 個のノードが誤った判断を行う場合の信頼度 $R_n(t)$ の変動 (リーダーなし)

誤った判断を行い、信頼度に関する情報が不確実となる状況でも、10% 程度のノードの誤りであれば許容可能であることを示した。加えて、自身の持つ情報を強く主張するリーダーノードが存在することによって、ネットワーク全体として一貫した判断が可能となることを確認した。

文 献

- [1] L. Conradt, "Models in animal collective decision-making: information uncertainty and conflicting preferences," *Interface Focus*, pp. 1–5, Dec. 2011.
- [2] L. Conradt, "Collective animal decisions: preference conflict and decision accuracy," *Interface focus*, vol. 3, pp. 1–12, Oct. 2013.
- [3] 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, Feb. 2005.
- [4] L. Conradt, J. Krause, I. D. Couzin, and T. J. Roper, "Leading according to need" in self-organizing groups," *The American Naturalist*, vol. 173, pp. 304–312, Mar. 2009.
- [5] N. Kuze, D. Kominami, K. Kashima, T. Hashimoto, and M. Murata, "Controlling large-scale self-organized networks with lightweight cost for fast adaptation to changing environments," *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS)*, vol. 11, p. 9, July 2016.
- [6] A. Sheikhattar and M. Kalantari, "Fast convergence scheme for potential-based routing in wireless sensor networks," in *Proceedings of 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, no. 3, pp. 1980–1985, IEEE, Apr. 2013.