

集団的な行動選択の仕組みに着想を得た 自己組織的なコントローラの信頼度判定手法の提案

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 〒560-0043 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 京都府京都市左京区吉田本町

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 ネットワークの大規模化、複雑化に伴い、拡張性や耐故障性、柔軟性、適応性などの特長を備えた自己組織的な制御が有用なアプローチとして期待されている。しかし、制御の局所性が利点である一方、各構成要素の情報が不確実（不完全、曖昧、動的）なものとなり、各構成要素は持ちうる不確実な情報を用いて自律動作を行うことが求められる。本研究では、能力の低い個体同士が不確実な情報に基づきながらも自律的に協調して行動することで全体として適切な行動を選択できる生物の群れの仕組みに着目し、外部から制御を受ける管理型自己組織型のネットワークを対象として、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、ノード故障などの異常によって外部から行われる制御が誤りうる場合に対して、各ノードが持ちうる情報が不確実な状況でも、ネットワーク全体として外部から行われる制御が正しいものであるかどうかを適切に判断し、対処を行う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

Self-Organizing Reliability Decision of Controller 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 Engineering Science, 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 Bio-inspired self-organization is considered to be one of promising design principles with scalability, adaptability, robustness and sustainability to realize a new generation network, which is estimated to be more and more large and complex. Therefore our team have worked on applying self-organization into network controlling. In this paper, we focus on a problem emerging with large and complex networks, information uncertainty of observable information of each components in networks. When observable information is uncertain, it is very difficult to guarantee global optimality and consistent appropriate operation. To tackle the problem, we applied collective decision making in swarms where individuals make appropriate and consistent decisions on a macroscopic level as a result of local interaction of individuals. In this paper, we take potential-based routing as an example of self-organizing control mechanisms and consider a mechanism inspired by collective decision making. Through simulation experiments, we show the property of our proposed mechanism.

Key words Collective Decision Making, Potential-Based Routing, Information Uncertainty

1. はじめに

インターネットは今や重要な社会基盤となっている。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）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システムが注目されている [1, 2]。自己組織化システムの機能は自律動作する個体の局所的な相互作用の結果として創発するため、高い拡張性を持ち、また環境の変動や障害に対応する高い適応性および耐故障性を持つ。

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、個体同士の局所的な相互作用が高い拡張性、適応性に寄与する一方、各個体の取得可能な情報は、性能上の制約などにより、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 [3-5] に着目し、ネットワーク制御へと応用する。

生物の群れにおいては、多くの場合、各個体の得られる情報は不正確であったり、行動選択のために十分な情報が得られないことが多い。本研究では、情報の不正確な状況における集団的な行動選択を数理モデル化した Effective Leadership Model [5] を自己組織型ネットワーク制御へと応用する。Effective Leadership Model においては、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 により群れが形成される。Informed individual は、他の個体と比較して、豊富な経験や知識、高い知覚能力を持ち、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 informed individual が non-informed individual を牽引し、群れ全体としての適切な行動選択が達成される。informed individual は “assertiveness” により自身の選択を重視する度合を決定し [6]、高い assertiveness を有する個体ほど自身の情報に基づいて行動選択を行う傾向が強い。Effective Leadership Model の仕組みを自己組織型ネットワーク制御へと応用することにより、ネットワーク上のノードの観測情報が不確実な状況でも、各ノードが局所的な情報交換を介してより適切な情報を持つノードに追従することにより、ネットワーク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型ネットワーク制御 [7] を対象として、Effective Leadership Model を応用した手法を提案する。文献 [7] では、自己組織的なルーティング手法であるポテンシャルルーティングを対象として外部コントローラを導入し、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、環境の変動や障害の影響により、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ず、データパケットの遅延や棄却など、ネッ

トワークとしての性能が低下するおそれがある。

そこで、Effective Leadership Model を応用し、各ノードが自身の持つ情報をもとに外部コントローラに対する信頼度を判断し、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、ポテンシャル更新時の制御入力（重み）を減少させるかどうかを判断する。提案手法では、各ノードにおいて、ネットワーク上の変動や障害に関わる現象を観測するなど、自身が他のノードよりも多くの情報を得られていると判断できる場合に、自律的にリーダーとなり、他の個体を牽引してネットワーク全体の信頼度を下げる。それにより、外部コントローラが変動や障害を検知できず誤った制御を行っている可能性がある間は、外部コントローラからの制御入力（重み）を下げ、誤った制御入力による性能低下を抑える。逆に、変動や障害が解決され適切な制御が行われるようになれば、外部コントローラに対する信頼度を回復させ、再度制御入力（重み）を上げる。

本研究では、ノードの故障と復帰が生じた際の、各ノードでの外部コントローラに対する信頼度に着目し、提案手法の有用性について評価を行った。結果として、提案手法を用いることで、ノード故障による制御誤りが生じているときに、外部コントローラに対する信頼度を低下させることができることを確認した。さらに、故障ノードが復帰し、再度適切な制御入力が行われ始めると、外部コントローラを再度信頼するという適切な判断をネットワーク全体として行えることが確認できた。

本稿の構成は以下のとおりである。第 2 章では、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 [7] について説明し、第 3 章では、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た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。第 4 章では、提案手法に対して行ったシミュレーション評価について説明する。最後に、第 5 章でまとめと今後の課題について述べる。

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、本稿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 [7] 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する。

文献 [7] 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 [7] 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 [8] 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、周囲との協調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うち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。誤った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くなってしまう。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、ノード同士の情報交換と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、誤った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、制御入力の誤りによるデータパケットの送信遅延、棄却率の増大を抑える。一方で、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とは限らない。本研究では、Effective Leadership Model を応用して、ノード同士の局所的な協調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 [5] 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; 非リーダー個体) 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リーダー個体 (informed individuals) 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 $\mathbf{v}_i(t)$ と定義し、速さは s_i と定義されている。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、非リーダ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、 $N_b(i, \rho)$ でノード i から ρ の範囲にあるノードの集合を表す。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、各ノード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^t の決定を行う。

$$\mathbf{d}_i^t(t + \Delta t) = \frac{\hat{\mathbf{d}}_i(t + \Delta t) + \omega_0 \mathbf{g}_i}{|\hat{\mathbf{d}}_i(t + \Delta t) + \omega_0 \mathbf{g}_i|} \quad (6)$$

$\hat{\mathbf{d}}_i(t)$ 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 [6] 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、情報が曖昧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 [5] 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 [7] と同様に、式 (2) によって周囲との局所的な協調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 $\gamma_n(t)$ を付加し、式 (7) に基づいた更新を行う。

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

$\eta_n(t)$ 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。 $\gamma_n(t)$ は $\forall n, t$ ($0 \leq \gamma_n(t) \leq 1$) なる値であり、各ノード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。 $\gamma_n(t)$ 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、 $\gamma_n(t)$ 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 $\gamma_n(t)$ 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。

(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} に相当する値の決定)

(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 に相当する値の決定)

(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。 $U_n(t)$ の計算方法は、直接外部コントローラから制御を受ける制御ノードとそれ以外のノードで異なる。

3.4.1 制御ノードの場合

式 (7) において、定常状態では $\theta_n(t) \simeq \theta_n(t-1)$ となることから、正しい制御が行われて目標ポテンシャルへ収束している場合は、 $\sum_{k \in N_b(n)} \{\theta_k(t-1) - \theta_n(t-1)\} + f_n(t-1) = 0$ となるはずである。つまり、この値が 0 から離れた値をとったまま近づかない場合は、正しい制御入力が行われていないと判断することができる。

これを用いて、新たに以下の $e_n(t), h_n(t)$ を定義し、 $h_n(t)$ に基づいて信頼度を考えることができる。 $e_n(t)$ はポテンシャル更新式 (7) から導かれる部分で、正しい制御を受けて適切なポテンシャル場に収束している場合は必ず $e_n(t)$ は 0 へ収束する。 $h_n(t)$ は $e_n(t)$ の移動平均である。移動平均を用いる理由は、ポテンシャル変動の過渡状態で $|e_n(t)|$ が瞬間的に大きな値を取る場合と、 $e_n(t)$ が 0 へ収束しない場合とを区別しやすくするためである。 $h_n(t)$ の値に対してある一定の閾値を定めると、閾値よりも $h_n(t)$ が大きい場合にはポテンシャルが正しく収束していない、つまり外部コントローラから正しい制御が行われていないと判断することができる。

$$e_n(t+1) = \sum_{k \in N_b(n)} \{\theta_k(t) - \theta_n(t)\} + f_n(t) \quad (8)$$

$$h_n(t+1) = 0.1 \times e_n(t) + 0.9 \times h_n(t) \quad (9)$$

制御ノードの $U_n(t)$ は、 $h_n(t)$ を用いて $0 \leq U_n(t) \leq 1$ となるように定める。ここではシグモイド関数 ($\varsigma_a(x)$) を用いて式 (10) のように定義する。

$$U_n(t) = 1 - \varsigma_a(|h_n(t)| - 1) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a(|h_n(t)| - 0.5))} \quad (10)$$

3.4.2 制御ノード以外のノードの場合

制御を直接受ける制御ノードでない場合、式 (8),(9) を用いて外部コントローラから正しい制御が行われているかどうかを判断することができない。これは、制御ノード以外のポテンシャル更新が式 (2) に基づいて行われることから明らかである。一方で、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、制御を受けないノードでも周囲で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 ID パケットが一切送受信されなくなる。しかし、ID パケットの送受信が行われた際に偶然パケットキューが空いていなかったなど、故障が生じていなくても ID パケットが送受信されない状況は生じうる。そこで、ID パケットが最後に届いてから長い時間が経つほど故障の可能性が高いことを利用して、ノード n の全ての隣接ノード k ($k \in N_b(n)$) に対して n, k 間で最後に ID パケットの送受信が起こってから経過時間の長さ t_k の最大値に基づいて信頼度の指標 $U_n(t)$ を定める。

$$\begin{aligned} U_n(t) &= 1 - \varsigma_a(\max_{k \in N_b(n)}(t_k) - T_f) \\ &= 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a(\max_{k \in N_b(n)}(t_k) - T_f))} \end{aligned} \quad (11)$$

式 (11) の T_f は、各ノードで隣接ノードが故障していると判断

する時間の長さであり、つまり T_f 秒の間 ID パケットが届かない場合に通信相手のノードが故障していると考える。

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。

式 (8),(9) の $e_n(t), h_n(t)$ を用いた外部コントローラに対する信頼度の判断においては、制御が正しく行われているか、あるいは誤っているかを $h_n(t)$ の収束値と 0 との距離によって判断することになるため、 $h_n(t)$ が収束するまで判断がつかない。一方で、ID パケットによる通信疎通の確認を応用した外部コントローラに対する信頼度の判断は数タイムステップで可能であるため、ノード故障によって制御誤りが起こっている場合には、 $e_n(t), h_n(t)$ を用いる制御ノードよりも制御ノード以外のノードの方が迅速な信頼度の判断が可能である。

本研究では、以下の条件が達成された際に、そのノードがリーダーとして振る舞う ($\omega = 1$ となる)。

- $e_n(t), h_n(t)$ の変化量が 0 に収束したとき: $h_n(t)$ が 0 から離れた値をとっている場合は制御誤りと判断でき、逆に 0 へ収束している場合は正しい制御が行われていると判断できる。
- ID パケットが一定時間送受信されなかったノードが周囲に存在するとき: そのノードとの通信が復旧するか、コントローラのパラメータが更新されるまで、制御誤りが起こる可能性があるかと判断できる。

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) における外部コントローラによる制御入力項に対する重み $\gamma_n(t)$ は、外部コントローラを信頼するかどうかの閾値を 0.5 とおいて以下の式 (12) で定める。

$$\gamma_n(t) = \begin{cases} 0 & (R_n(t) \leq 0.5) \\ 1 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (12)$$

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。

$$R_n(t) = \left\{ \frac{1}{|N_b(n)|} \sum_{k \in N_b(n)} R_k(t-1) + \frac{1}{|N_b(n)| + 1} \left\{ \sum_{k \in N_b(n)} (R_k(t-1) - R_k(t-2)) + (R_n(t-1) - R_n(t-2)) \right\} \right\} + \omega U_n(t-1) \quad (13)$$

式 (13) 右辺の第1項は Effective Leadership Model での周囲の個体の位置を用いて行動選択を行う項 (式 (5) における $c_i(t)$) に相当し、本手法では隣接ノード k ($k \in N_b(n)$) の信頼度 $R_k(t)$ を Effective Leadership Model における位置とみなし、その平均として与える。 $N_b(n)$ はノード n の隣接ノード集合を表す。式 (13) 右辺2行目および3行目は、Effective Leadership Model における周囲の個体の速度に基づいて行動選択を行う項 (式 (5) における $v_i(t)$) に相当し、隣接ノード

k およびノード n 自身の持つ信頼度の1時点前からの変化量 ($(R_n(t-1) - R_n(t-2))$) として与える。 $\omega U_n(t-1)$ の項は、Effective Leadership Model において、自身の preference に基づいて決定を行う項に相当し、本手法では、ノード n の観測情報に基づいて計算される。両者は Effective Leadership Model における assertiveness に相当するパラメータ ω を持つ。

4. シミュレーション評価

提案手法を実装し、シミュレーションによって評価を行った。3万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 100 メートル四方のフィールド上に配置される。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 1 千秒で、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。また、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。
- (4) 時刻 1 万秒で、5 個のノードが故障する。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。故障している間、外部コントローラは故障を認識しておらず、適切でない制御入力が行われ続ける。
- (5) 時刻 2 万秒で、管理者がノード故障に対応し、故障ノードと全く同じ位置に新たなノードが配置される。配置と同時に、パケットの生成と送受信、ポテンシャルや信頼度の更新が開始される。

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 50 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 50 メートル以内にあるノードとリンクが形成される。図 1 で四角形で表現されているのが 4 つのシンクノードであり、それ以外の小さな丸形は 60 個のセンサーノードを表している。ノードの位置は静的であり、動作中に移動は起こらない。

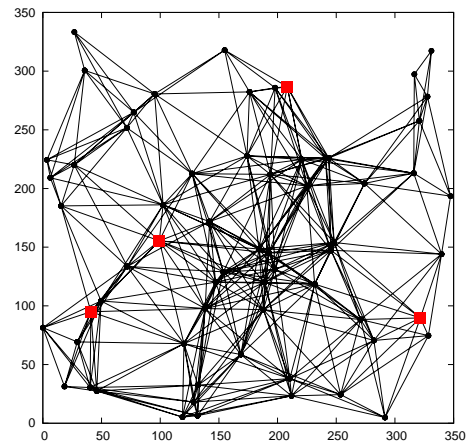


図 1 ネットワークトポロジー

4.1 外部コントローラに対する信頼度の変動

信頼度の時間変動を図 2 に示す。

また、式 (12) によって、外部コントローラに対する信頼度

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の更新頻度	100 秒
リーダーとなったノードの ω	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

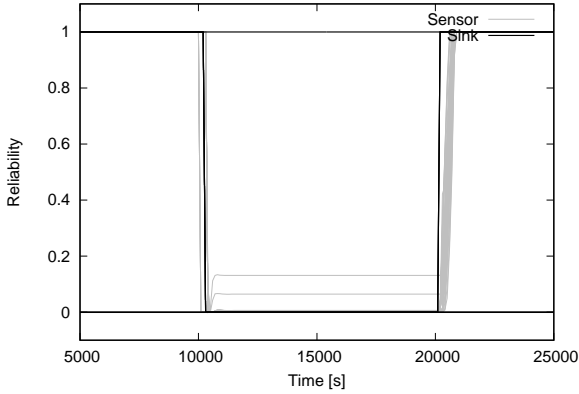


図 2 ノード n における信頼度の値 $R_n(t)$ の変動

$R_n(t)$ に基づいてポテンシャル更新式における制御入力項に対する重み $\gamma_n(t)$ を決定した結果は、図 3 のように時間変動する。

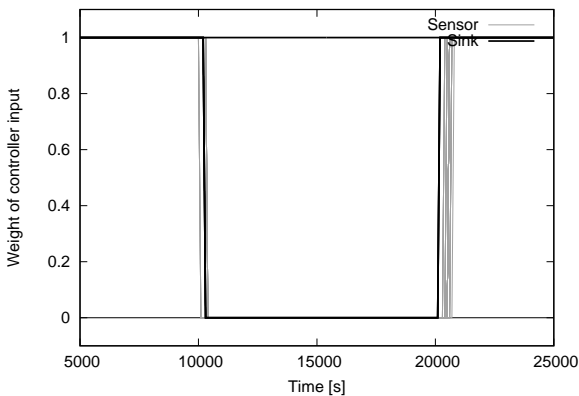


図 3 各ノードでのポテンシャル更新式の制御入力項に対する重み $\gamma_n(t)$ の時間変動

図 4 は、信頼度 $R_n(t)$ の値が閾値 0.5 を超え、外部コントローラを信頼すると判断したノードの割合を表している。図 4 から、ほぼ全てのノードで、故障が起こった後 500 秒程度の短時間で外部コントローラを信頼すべきでないと判断し、故障ノードが復帰した後も短時間で信頼すべきであると適切な判断を行うことができることが分かる。

5. まとめと今後の課題

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

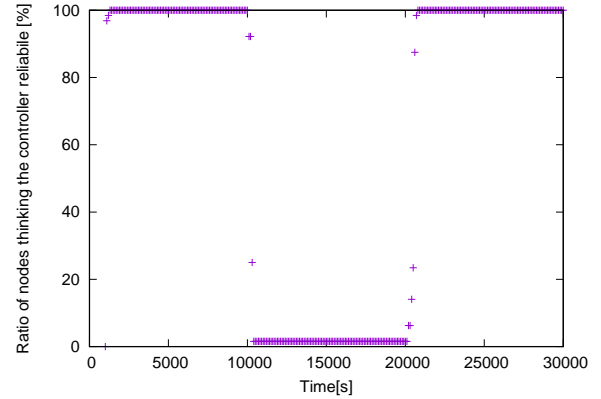


図 4 外部コントローラを信頼すると判断したノードの割合の時間変動

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、複数のノード故障が発生して外部コントローラからの制御入力に誤りうる状況において、提案手法を用いて各ノードで外部コントローラに対する信頼度を判断することにより、故障している間は外部コントローラから行われる制御を信頼すべきでないとネットワーク全体として一貫して適切な判断ができることが示された。

今後は、外部コントローラから誤った制御が行われうる状況を一般化し、ノード故障だけでなく、トラヒックの変動なども考慮できるようにしたいと考えている。

文 献

- [1] X.-S. Yang, Z. Cui, R. Xiao, A. H. Gandomi, and M. Karanoglu, *Swarm intelligence and bio-inspired computation: theory and applications*. Elsevier, Nederland, May 2013.
- [2] C.-M. Pintea, *Advances in bio-inspired computing for combinatorial optimization problems*. Springer, Berlin, Jan. 2014.
- [3] L. Conradt, “Models in animal collective decision-making: information uncertainty and conflicting preferences,” *Interface Focus*, pp. 1–5, Dec. 2011.
- [4] —, “Collective animal decisions: preference conflict and decision accuracy,” *Interface focus*, vol. 3, no. 6, pp. 1–12, Oct. 2013.
- [5] 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, no. 7025, pp. 513–516, Feb. 2005.
- [6] L. Conradt, J. Krause, I. D. Couzin, and T. J. Roper, “Leading according to need” in self-organizing groups,” *The American Naturalist*, vol. 173, no. 3, pp. 304–312, Mar. 2009.
- [7] 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, no. 2, p. 9, Jul. 2016.
- [8] 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. IEEE, Apr. 2013, pp. 1980–1985.