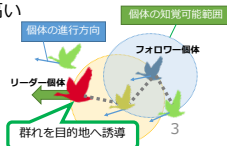


生物の集団的行動選択に着想を得た 不確実な情報に基づく制御手法についての一検討

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、[‡]京都大学

生物の群れの集団的行動選択

- 生物の群れ
 - 各個体の得られる情報が不確実でも全体として適切な行動
 - 局所的な相互作用を通して周囲の個体と判断を共有
 - 不確実な情報に強い
- Effective Leadership モデル (ELM)^[1]
 - 生物の群れの行動選択を表現した数理モデル
 - 少数のリーダー個体が群れ全体を牽引
 - リーダー個体：目的地について他の個体より多くの知識や経験
 - 個体同士の局所的な相互作用によってリーダーの動きが群れ全体に伝播
 - 大規模複雑なネットワークと親和性が高い
 - 拡張性に長所
 - 群れが大きいくほど少ない割合のリーダーで目標へ誘導可能



[1] 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.

研究背景

- ネットワークの大規模化・複雑化
 - 各ノードの取得できる情報が不確実
 - 大域情報に依拠したネットワーク制御が困難
 - 各ノードが不確実な情報に基づいて自律的に動作することが必要
 - ノードの持つ情報の不確実性
 - 動的：情報が時間によって変化すること
 - 不完全：限られた範囲の情報しか得られないこと
 - あいまい：得られた情報と実際の状況に齟齬があること
- ネットワークの状況に応じた適切な制御が難しい

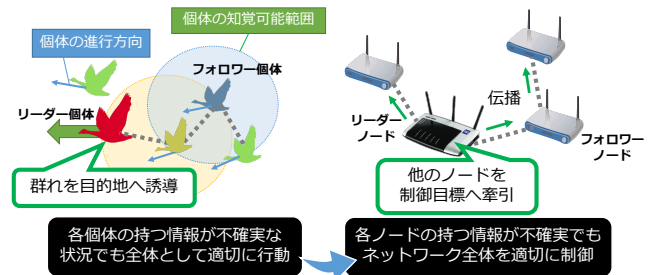
研究目標 不確実性は大規模複雑なネットワークと不可分な問題
 → 生物の仕組みで情報の不確実性に適応する

2018/03/02

2

アプローチ

- 生物の群れにおける集団的行動選択の仕組みを応用し、情報の不確実性に適応



2018/03/02

4

自己組織化制御手法

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^[2]

- ポテンシャルルーティング
 - 自己組織的なルーティング手法
 - ポテンシャル（スカラー値）の勾配に従ってデータパケットを転送
 - シンクノードにデータを集める
 - ポテンシャル場によって経路制御
 - 隣接ノード間のフロー量がポテンシャルの差によって規定される
- 外部コントローラ
 - ネットワークの状態を観測し一部の制御ノードに対して制御入力
 - 収束速度向上、大域的最適性を実現
 - 真の状態が観測できない状況では制御が適切でなくなる可能性
 - 正しい経路選択ができず性能低下

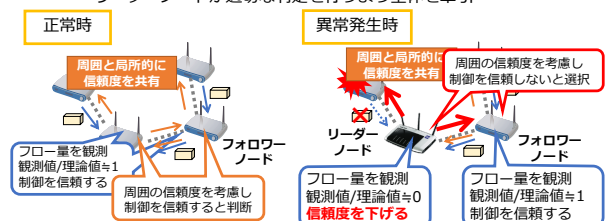


[2] N. Kuze, D. Kominami, K. Kashima, T. Hashimoto, and M. Murata, "Controlling large-scale self-organized networks with lightweight cost for fast adaptation to changing environments," ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS), vol. 11, no. 2, p. 9, 2016.

5

提案手法の概要

- ELMを応用した制御に対する信頼度の判定手法
 - フロー量とポテンシャルの関係を利用して信頼度を定量化
 - 制御誤りの原因となりうるネットワーク上の異常
 - フロー量の理論値と観測値が大きく異なる
 - 局所的な情報交換を通して信頼度を判定
 - リーダーノードが適切な判定を行うよう全体を牽引



2018/03/02

6

Effective Leadership モデル(ELM)

生物の群れにおける集団的行動選択の数理モデル

- ・ リーダー個体が自分の知識をもとに目的地へ向かう
- ・ フォロワー個体は周囲との局所的な相互作用を通してリーダー個体に間接的に追従

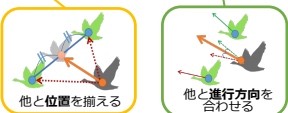


・ **フォロワー個体**：周囲を観測して追従（周囲との相互作用）

$$d_i(t + \Delta t) = \sum_{j \in N_b(i, \rho) \setminus \{i\}} \frac{c_j(t) - c_i(t)}{|c_j(t) - c_i(t)|} + \sum_{j \in N_b(i, \rho)} \frac{v_j(t)}{|v_j(t)|}$$

$$\hat{d}_i(t + \Delta t) = \frac{d_i(t + \Delta t)}{|d_i(t + \Delta t)|}$$

$\hat{d}_i(t), d_{i(t)}$: 個体*i*の進行方向 (ベクトル)
 $c_i(t), v_i(t)$: 個体の位置、速度 (ベクトル)
 $N_b(i, \rho)$: 個体*i*から距離*ρ*以内の個体の集合



・ **リーダー個体**：目標の情報を持ち、群れを牽引

$$d_i(t + \Delta t) = \frac{\hat{d}_i(t + \Delta t) + \omega_0 g_i}{|\hat{d}_i(t + \Delta t) + \omega_0 g_i|} \rightarrow \omega_0 g_i$$

自分の持つ目標に対する重み (assertiveness)

目標の進行方向 (知識や経験)

2018/03/02

7

信頼度の指標 (Reliability_metrrix)

・ 制御入力に対する信頼度の指標となる値

・ ノード *i* の周囲のフロー (パケット数)

$$u_{j \rightarrow i}(t) = \frac{f_{j \rightarrow i}(t)}{f_{j \rightarrow i}(t)} \text{ or } \frac{f_{i \rightarrow j}(t)}{f_{i \rightarrow j}(t)}$$

$$U_i = \min(\delta u_{j \rightarrow i}(t) + (1 - \delta) u_{j \rightarrow i}(t - 1))$$

・ ノード *i* が持つ信頼度の指標 (Reliability_metrrix)

$$Reliability_metrix(i) = (1 - \omega) \left\{ \frac{1}{|N_b(i)|} \sum_{j \in N_b(i)} Reliability_metrix(j) \right\} + \omega U_i$$

周囲との相互作用 (周囲の平均)

自分の持つ情報

$f_{i \rightarrow j}(t)$: *i* → *j* 間で観測されたフロー
 $\hat{f}_{i \rightarrow j}(t)$: *i* → *j* 間に推定されるフロー (定数)
 (ノード*j*で生成されるパケット数の期待値)
 δ : 1時点前の情報に対する重み (定数)

周囲との相互作用に比べて自分の持つ情報をどの程度重視・主張するか (assertiveness)

2018/03/02

8

シミュレーション評価

・ 評価の目的

- ・ 各ノードが得られる情報があいまいな状況で、**制御入力に対する Reliability_metrrix を適切に判定できることを示す**
- ・ **あいまい**：得られた情報と実際の状況に齟齬があること
 - ・ 観測されたフローと理論値の (異常によらない) 齟齬
 - ・ 異常によるものか偶然起こった一時的なものか不明

・ 評価シナリオ

- ・ 無線センサーネットワークでハブノードに故障が発生
- ・ Reliability_metrrix が正常時の状態で安定している3万秒で故障
- ・ 故障発生後、故障ノードの隣接ノードが全てリーダーに
- ・ 5万秒までの Reliability_metrrix の変動とそれに基づく制御に対する信頼度の判定状況の変動について評価

2018/03/02

9

シミュレーションの設定

・ トポロジ (総ノード数64)

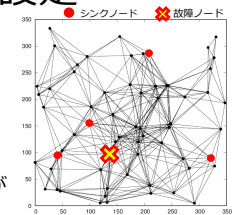
- ・ シンクノード4個
- ・ 制御ノード=シンクノード
- ・ 故障ノード=ハブノード

・ 提案手法のパラメータ設定

- ・ 故障後、故障ノードの隣接ノードがリーダーとして振る舞う
 - ・ $\omega = 0.9$ (周囲との協調: 自分の情報=1:9)
- ・ リーダー以外のノードは周囲に追従する
 - ・ $\omega = 0.1$ (周囲との協調: 自分の情報=9:1)

・ 比較手法

- ・ ノード間のassertivenessが等しい
- ・ 故障発生後もリーダーが不在
 - ・ $\omega = 0.1$ (周囲との協調: 自分の情報=9:1)

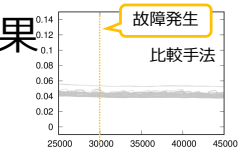


2018/03/02

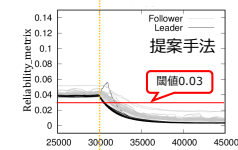
10

シミュレーション結果

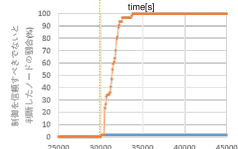
・ 比較手法では故障の前後で Reliability_metrrix が変化せず、信頼度の判定が達成できていない



・ 提案手法では故障後 Reliability_metrrix が減少し、信頼度の判定が達成できている



- ・ 故障を検知した隣接ノードがリーダーノードとして牽引できている
- ・ 故障後5千秒で全てのノードが正しく信頼度の判定を行えた



→ 比較手法 → 提案手法

2018/03/02

まとめ

・ Effective Leadership モデル (ELM) を応用した制御に対する信頼度の判定手法を提案

- ・ 隣接ノード間のポテンシャル差とフロー量の関係を利用して、信頼度の指標となる Reliability_metrrix を定量化
- ・ ELM を応用し、周囲との局所的な相互作用を介したリーダーの誘導によって Reliability_metrrix を判定する手法を提案

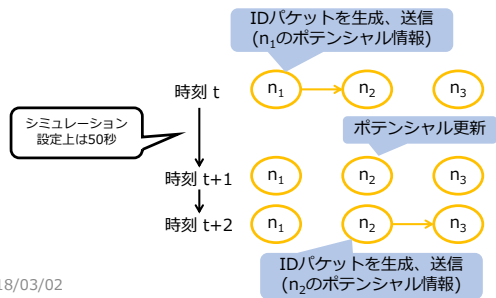
・ シミュレーション評価によって、各ノードが得られる情報があいまいな状況で、異常発生時に Reliability_metrrix を低下させ、信頼度の判定を正しく行えることを示せた

2018/03/02

12

動的

- 制御に必要な情報が時間とともに変化する状態
 - 評価ではポテンシャルの変動と想定
 - 制御に必要なポテンシャルの情報に伝送遅延

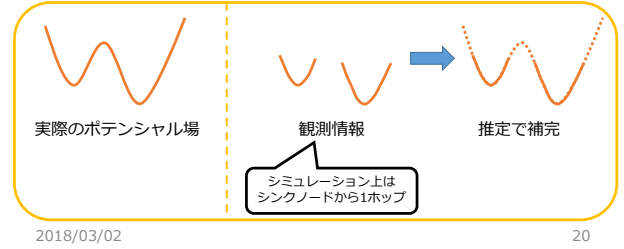


2018/03/02

19

不完全

- 限られた範囲の情報しか得られない状態
 - 各ノードの判断はポテンシャルルーティングで解決
 - データパケットのフォワーディングなど
 - 制御に必要なポテンシャルの情報が一部しか得られないので、ネットワーク全体を推定する必要

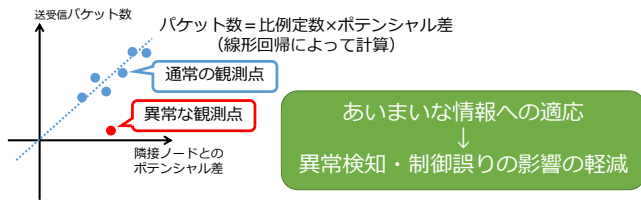


2018/03/02

20

あいまい

- 情報に齟齬が含まれる状態
 - ノードで観測されたフローの情報 (送受信パケット数) と、ポテンシャル差から推測される送受信パケット数の齟齬



2018/03/02

21

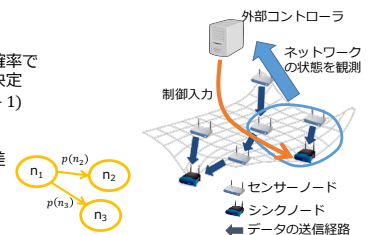
パケットの転送

- ポテンシャルの低いノードに比例配分
 - 電子回路のオームの法則を応用
 - ポテンシャル：電位
 - データフロー：電流

ノード n_1 と n_2 、 n_1 と n_3 のポテンシャル差に比例した確率でデータパケットの転送先を決定

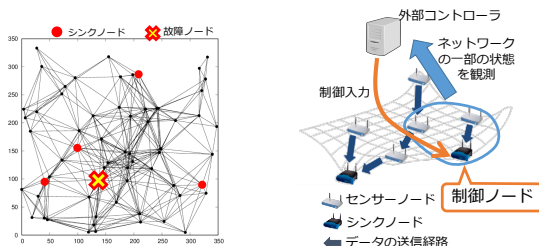
$$p(n_2) \propto \theta_1(t-1) - \theta_2(t-1)$$

オームの法則から、フロー量 \propto ポテンシャル差が成り立つ



2018/03/02

22



パケットが急に届かなくなった
→ノード n_2 に故障の可能性
→今は制御入力を信頼すべきでない
と主張 (信頼度を下げる)
(ELMIにおけるリーダーの役割)

2018/03/02

23