

Conquering Information Uncertainty by Biological Collective Decision Making for Self-Organized Networks

生物の群れの集団的行動選択の仕組みに基づく
情報の不確実性を考慮した
ネットワーク制御手法の提案と評価

志垣 沙衣子

学籍番号：33E15009
村田研究室

背景

- ネットワークの大規模化・複雑化
 - ネットワーク全体の情報を収集して制御することが困難
 - 制御に必要な情報をすべて正確に得られるとは限らない

情報の不確実性

- 局所的 (不完全)
- 誤りを含む可能性 (あいまい)
- ネットワークの状態の動的な変化

- 各構成機器が自律的に行動を決定する必要
- 生物の集団的行動選択 (collective decision making)
 - 不確実な情報にもつきながらも、互いに協調しながら全体として適切に行動を選択できる

2017/2/13 2

生物の群れ

- Effective Leadership モデル^[1]
 - 生物の群れの集団的行動選択を表現した数理モデル
 - 非リーダー個体
 - 知覚可能な範囲の個体の様子を見て周囲の行動に追随
 - リーダー個体
 - 他の個体より多くの情報を持ち、群れを適切な方向へ牽引

Effective Leadership モデルの長所

- 各個体のもつ情報が不確実でも、**全体として適切な行動** (目的地への到達など) が達成できる
- 群れの個体数が多いほど少ない割合のリーダーで誘導可能^[1]で**拡張性**に優れる

リーダーの動きが群れ全体に伝搬 → リーダーが群れを牽引

[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. 3

研究目的

- 大目標：生物の集団的行動選択の仕組みを応用した、情報の不確実性に適応できるネットワーク制御手法の確立
 - 生物の群れの集団的行動選択のメリットをネットワーク制御に取り入れる
- 本研究の目的：
 - Effective Leadership モデルを応用したネットワーク制御手法の提案
 - シミュレーション評価によってネットワーク制御へ応用する際の知見を得る

2017/2/13 4

ネットワークへの応用

Effective Leadership モデル	ポテンシャルレーティング
リーダー個体	制御入力を受けるノード (リーダーノード)
非リーダー	直接制御しないノード
群れの目的地	制御目標

[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. 5

Effective Leadership モデル^[1]

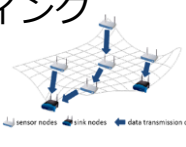
- 生物の群れの集団的行動選択の数理モデル
- 非リーダー個体：周囲を観測して追随
 - $$d_i(t + \Delta t) = \sum_{j \in N_b(i, \rho)} \frac{c_j(t) - c_i(t)}{|c_j(t) - c_i(t)|} + \sum_{j \in N_b(i, \rho)} \frac{v_j(t)}{|v_j(t)|}$$

位置を合わせる 向きを合わせる
- リーダー個体：目標の情報を持ち、群れを牽引
 - $$d_i(t + \Delta t) = \frac{d_i(t + \Delta t) + \omega_0 g_i}{|d_i(t + \Delta t) + \omega_0 g_i|}$$

目標に対する assertiveness^[17] 目標をどれだけ重視するか 目標の進行方向

[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. 6

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
 - 局所的な相互作用によってシンクノードに近いほど低くなるようにポテンシャル場を構築
 - 自身よりポテンシャルの低いノードにデータパケットを転送
- 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]
 - ネットワークの状態を観測して一部のノード（制御ノード）に制御フィードバックを与える外部コントローラを導入することで、**環境適応速度の向上**を達成
 - 制御ノードが制御目標を達成するようにネットワーク全体を誘導

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

2017/2/13 7

提案手法

[17] 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.

$\theta_n(t)$: ノードnの時刻tでのポテンシャル
 $f_n(t)$: 外部からの流入出力フロー量
 $\alpha, \beta, \sigma_n, \omega$: 重みを表す定数
 $N_b(n)$: ノードnの隣接ノード集合

- 非リーダーノード
 - 周囲のノードのポテンシャルに基づいて自身のポテンシャルを更新
 - $\theta_n(t) = (\alpha + 1)\theta_n(t-1) - \alpha\theta_n(t-2) + \beta\sigma_n(\sum_{k \in N_b(n)} \{\theta_k(t-1) - \theta_n(t-1)\} + f_n(t))$
- リーダーノード
 - 自分と周囲のノードの協調によって更新
 - 外部コントローラからの制御入力にもとづいて非リーダーを誘導
 - $\theta_n(t) = (1 - \omega)\{(\alpha + 1)\theta_n(t-1) - \alpha\theta_n(t-2) + \beta\sigma_n(\sum_{k \in N_b(n)} \{\theta_k(t-1) - \theta_n(t-1)\} + f_n(t))\} + \omega g_n(t)$

assertiveness^[17] 制御を重視する(ω 大) 周囲との協調を重視する(ω 小)

制御フィードバックにもとづくポテンシャルの更新

2017/2/13 8

シミュレーション評価

- 数値シミュレーション
 - リーダーノードの数と配置が制御目標の達成にどれだけ寄与しているかを調査
 - MATLABの *dhinflmi* 関数で H_∞ コントローラを設計
 - Y_{opt} で制御性能を評価
- ネットワークシミュレーション
 - 数値シミュレーションでのリーダーノードの配置に関する知見を利用
 - 無線センサネットワークに近づけた環境でも Effective Leadershipモデルの長所を確認できた

2017/2/13 9

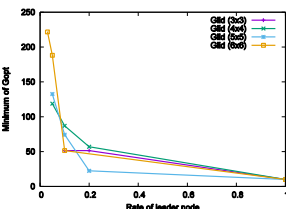
数値シミュレーション

- 評価指標 Y_{opt}
 - H_∞ 制御の伝達関数 G の閉ループノルム $\|G\|_\infty$ の最大値
 - 小さいほど制御性能が高い
 - リーダーノードの数や配置が制御目標の達成に貢献するほど小さくなる
- とりうるリーダーノードの配置すべてに対して、コントローラを生成して性能を比較
 - 正方形の格子トポロジー: 3×3, 4×4, 5×5, 6×6

2017/2/13 10

数値シミュレーションの結果

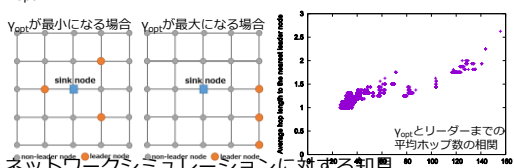
- Y_{opt} が最小になる場合をプロット
- 総ノード数が多いほどリーダーノードの減少量に対して Y_{opt} の増加量が少ない
- 総ノード数が多いほど少ない割合のリーダーで制御目標を達成できる



2017/2/13 11

リーダーの配置

- リーダーまでの平均ホップ数が少ないほど Y_{opt} が小さくなる（制御性能が向上する）



- ネットワークシミュレーションに対する知見
 - 平均ホップ数は計算量が多い
 - K-Means法でクラスタリングし、その中心をリーダーにすることでフィールドに均一に配置

2017/2/13 12

ネットワークシミュレーション

リーダーノードが1個の場合の例

- 無線センサネットワークを想定
- トラフィック変動からの再収束時間を記録
- 設定
 - 64ノード, 144ノード, 256ノード
 - 正方形の格子状トポロジー
 - 格子点にノードを配置
 - 上下左右のノードとリンクを形成
- リーダーノードの割合
 - それぞれ約1%から約11%まで

2017/2/13

ネットワークシミュレーションの結果

制御がある場合の再収束時間 [秒]
制御を行わない場合の再収束時間 [秒]

- 評価指標
 - 制御のない場合からの収束時間の短縮度合いを評価
 - 値が小さいほど収束時間がより短くなっているのが良い
- 結果
 - 同じ割合のリーダーを用いる場合、総ノード数が多いほど制御のない場合からの改善度合いが大きい
 - 数値シミュレーションと同様の結果
 - 拡張性が期待できる

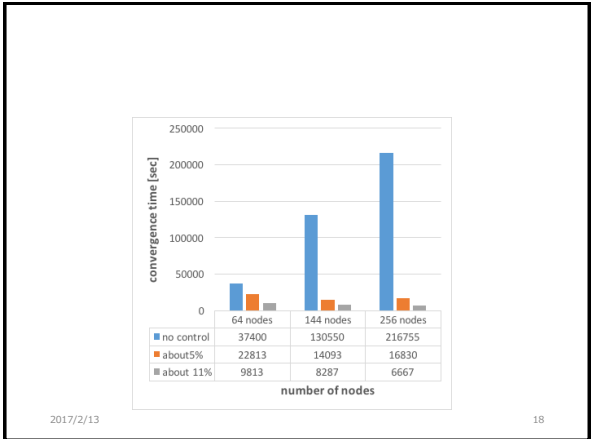
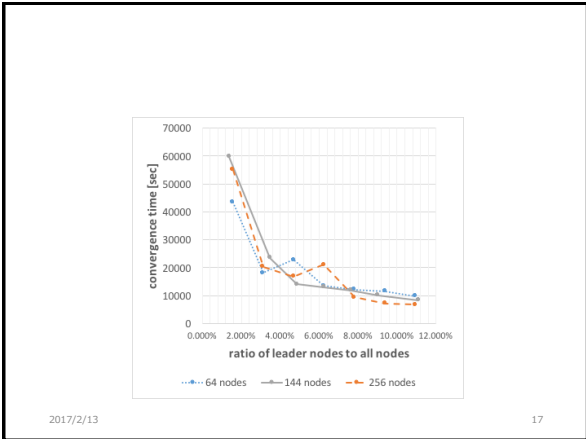
2017/2/13

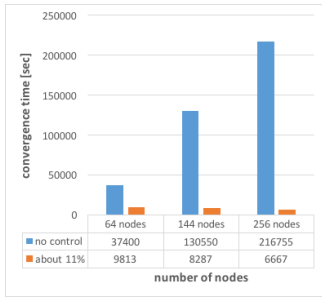
結論

- ネットワークに生物の集団的行動選択を応用した手法を提案
- 今回得られた知見
 - 制御の効率がよいリーダーノードの設置方法
 - 総ノード数が増加するほど少ない割合のリーダーノードで収束速度を向上させられる
- 今後の課題
 - 今回の知見を活かして、不確実な情報にも基づく制御機構を確立する
 - 情報の不確実性が生じる環境でのシミュレーションによる有用性の調査

2017/2/13

2017/2/13





2017/2/13

19