

### 管理型自己組織化制御に基づくネットワークを目指したモデル予測制御を用いたポテンシャルルーティングの提案

大阪大学 小南大智

### 自己組織化制御

- システム構成要素同士の局所的な情報交換・局所的な行動決定に基づく制御
  - 局所的動作からシステム全体に望ましい機能が発現
    - 高い規模拡張性・適応性・ロバスト性を実現可能
    - 環境変動後の動作の収束が遅い
    - 大域的な最適性を実現することが困難
    - 個々の構成要素の制御動作の管理が困難

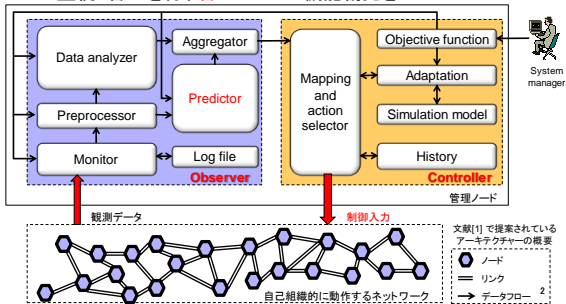


Observer/controller architecture を導入した管理型自己組織化制御による解決の可能性<sup>[1]</sup>

[1] C. Müller-Schloer, H. Schmeck, and T. Ungerer "Organic Computing—A Paradigm Shift for Complex Systems," Birkhäuser, 2011.

### 管理型自己組織化制御に基づくネットワーク

- Observer/controller 導入による自己組織化の監視・管理<sup>[1]</sup>
  - 監視・管理を行う管理ノードが機能創発をコントロール



文献[1]で提案されているアーキテクチャの概要  
 ● ノード  
 ○ リンク  
 → データフロー

### 研究の目的と方法

- 収束速度の観点から管理型自己組織化制御に基づくネットワークが適用可能な領域を明らかにする
- ネットワークが最も高速に収束するような制御入力を、管理ノードが制御可能なノードに与える場合の収束速度を調査
  - 自己組織型の経路制御手法であるポテンシャルルーティングを例に、管理ノードによる最適フィードバックを導出
    - センサーネットワーク環境を想定
    - ただし、制御情報に遅延や誤りの無い理想的な状況を仮定
  - モデル予測制御<sup>[2]</sup>の考え方を導入し、最適な入力を決定
  - システムをモデル化することで、ある入力に対する将来の状態を予測し、予測される将来の状態の最適化を繰り返す

[2] Eduardo F. Carracho and Carlos Bordons Alba, Model predictive control, 2013.

### ポテンシャル論を応用した自己組織型経路制御手法

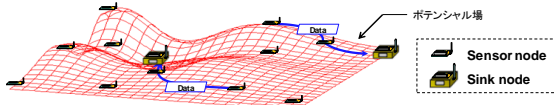
- 近接作用に基づくポテンシャル場の構築
  - 局所情報の交換により自己組織的にポテンシャル場を構築<sup>[3]</sup>

$$u_i^{t+1} = (\alpha + 1)u_i^t - \alpha u_i^{t-1} + \beta \sigma_i \left( \sum_{j \in \text{nb}(i)} \{u_j^t - u_i^t\} - f_i \right)$$

u : ポテンシャル  
 t : 時間  
 $\alpha, \beta, \sigma$  : 定数  
 i : ノード番号  
 nb : 隣接ノード集合  
 f : フロー生成レート

- グラディエントを利用した経路決定

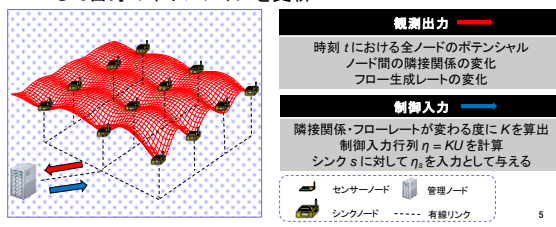
- ポテンシャルが低くなる方向に、傾きの大きさに比例した割合のフローを送信することで、各シンクノードへのデータ到着レートを決定可能



[3] A. Shekhter and M. Kalenfi, "Fast Convergence Scheme for Potential-Based Routing in Wireless Sensor Networks," in Proc. of IEEE WQNC2013, pp.1980-1985, April 2013.

### 提案手法の動作の概要

- 管理ノードが将来的に最適な制御入力をネットワークに与え続けることで収束速度を向上
  - ここではシンクノードのポテンシャル更新則に制御入力を追加
  - その他のセンサーノードは自身・隣接ノードの情報のみを利用して自身のポテンシャルを更新



Advanced Network Architecture Research Group

### 最適なフィードバックの導出 管理ノードによるネットワークダイナミクスの導出

- ノードのダイナミクスからネットワークのダイナミクスを導出
 
$$u_i^{t+1} = (\alpha + 1)u_i^t - \alpha u_i^{t-1} + \beta \alpha_i \left( \sum_{j \in N(i)} \{u_j^t - u_i^t\} - f_i \right)$$

$$\mathbf{U}^{t+1} = \mathbf{A}\mathbf{U}^t + \mathbf{B}\mathbf{F}^t$$
  - 管理ノードは全ノードの隣接ノード情報、ポテンシャル、フロー生成レートを利用
- 目標ポテンシャルの決定
  - ネットワークダイナミクスから、無限時間経過後のポテンシャルを導出して目標ポテンシャルとする
 
$$\mathbf{U}^\infty = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}\mathbf{F}^\infty$$
  - ポテンシャルの収束まではトポロジーやフロー生成レートに変動がなく一定であることを仮定

$u$	: ポテンシャル
$t$	: 時間
$\alpha, \beta, \rho$	: 定数
$i$	: ノード番号
$nb$	: 隣接ノード集合
$f$	: フロー生成レート
$\mathbf{U}$	: 全ノードの $u$
$\mathbf{F}$	: 全ノードの $f$
$\mathbf{A}$	: 自身と隣接ノードとのインタラクション行列
$\mathbf{B}$	: 定数行列

6

Advanced Network Architecture Research Group

### 最適なフィードバックの導出 管理ノードによる最適フィードバックゲインの導出

- 最適入力を「 $\mathbf{U}^t = \mathbf{U}^* - \mathbf{U}^\infty$  を 0 に最も近くする入力」と定義
  - 制御入力  $\eta^t$  を追加した  $\mathbf{U}^t$  の更新を対象とする
 
$$\mathbf{U}^{t+1} = \mathbf{A}\mathbf{U}^t + \eta^t$$
- 最適フィードバックの導出
  - 以下の最適化問題の解となる  $\eta^t$  を導出
 
$$\text{minimize: } \sum_{t=0}^{\infty} (\|\mathbf{U}^t\|^2 + r\|\eta^t\|^2)$$

$r$ : 重み付け定数
  - $\eta^t = \mathbf{K}\mathbf{U}^t$  の形式でことが一般に知られており、現時点のポテンシャル行列  $\mathbf{U}^t$  が与えられた時のフィードバックゲイン  $\mathbf{K}$  は、ノードの隣接関係およびフロー生成レートが一定の場合には不変
  - $\mathbf{K}$  をあらかじめ計算しておくことで、任意の時点の制御入力を  $\mathbf{U}^t$  から算出可能

7

Advanced Network Architecture Research Group

### シミュレーションによる評価

- ネットワークモデル
  - センサーノード数: 150 個 (●)
  - シンクノード数: 4 台 (■)
  - 管理ノードはシンクノードと有線接続
- トラフィックモデル
  - $t < 5,000$  s の時
 
$$\mathbf{F}^t = [1, 1, \dots, 1, -\frac{150}{4}, -\frac{150}{4}, -\frac{150}{4}, -\frac{150}{4}]^T$$

全センサーは等しいデータ発生レート 全シンクノードが等しいデータ到着レート
  - $t \geq 5,000$  s の時
 
$$\mathbf{F}^t = [1, 1, 1, \dots, 1, -15, -15, -60, -60]^T$$

2台ずつのデータ到着レートを 1:4 に変化
- 制御周期設定
  - 各ノードのポテンシャルの更新周期 50 s
  - 管理ノードによる制御入力周期 50 s

8

Advanced Network Architecture Research Group

### 最適フィードバックによるポテンシャルの収束速度向上

- 制御入力によってポテンシャルの収束速度が向上
- 今回の評価ネットワークにおいて外部からのフィードバックによる最も速い収束結果が得られている ( $r=1$  の場合)
  - 管理ノードが利用する情報は、誤差や遅延を想定していないため

9

Advanced Network Architecture Research Group

### ポテンシャルの収束がフローに与える効果

- ポテンシャルの収束速度向上によりフローの収束速度も向上
  - 収束速度についてはポテンシャルとほぼ同様
    - 制御なしの場合 300 step、制御ありの場合 60step
  - 制御ありの場合、ポテンシャルの急激な変化が生じ、データ受信個数が低下

10

Advanced Network Architecture Research Group

### まとめと今後の課題

- まとめ
  - 線形の自己組織型システムに対して外部から最適な制御入力を与えることでシステムの収束速度を向上
  - 無線センサーネットワークにおけるポテンシャルルーティングを対象として有効性を示した
  - コスト無く瞬時に全ての情報を管理ノードが利用可能という仮定において、経路制御の収束とトラフィックの収束を調査し、いずれも提案手法による収束速度の向上を確認した
- 現状と今後の課題
  - 管理情報の収集に遅延・ロス等がある際の動作検証
  - 観測範囲をシンクノードから数ホップ内に限定した際の動作検証
  - 制御のスケール (計算量・収束時間) の調査
  - 非線形モデルの適用
  - 予測制御の分散化、階層化

11