

## モデル予測制御を用いたポテンシャルルーティングの ロバスト性に関する検討

○久世尚美、小南大智(大阪大学)、  
加嶋健司(京都大学)、  
橋本智昭、村田正幸(大阪大学)

## 研究背景

- ネットワークの大規模化、複雑化
  - 大域情報の収集、管理に要する制御オーバーヘッドが急激に増加
  - 従来の集中管理制御、あるいは大域情報を利用した分散制御の限界
  - さらなるネットワークの発展に耐えるネットワークシステムの必要性**
- 自己組織型システムに着目
  - 個々の構成要素が局所情報のみに基づいて行動を決定
  - 構成要素同士の直接的・間接的相互作用により機能が創発
  - 高い拡張性、適応性、頑健性
  - ネットワークへの応用について研究
    - 例: アリの採餌行動 → 経路制御
    - 蛍の発光同期 → センサーなどの同期制御



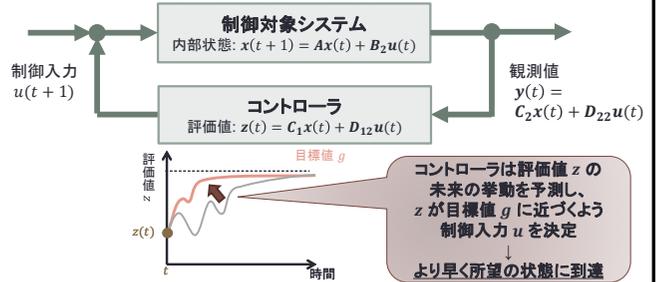
## 研究目的

- 自己組織型システムの工学応用上の問題点
  - 全体の最適性が保障されない
  - 所望の機能の創発に時間を要する傾向がある
  - 環境変化への適応に時間を要する
- 管理型自己組織化制御
  - 全体に対してゆるやかな制御を加えることによって機能の創発を管理
  - モデル予測制御の導入**
    - システムの振る舞いを観測し、変化に対するシステムの振る舞いを予測し、制御を行うことによって、収束性を向上

自己組織型制御に対して予測制御機構を導入して収束速度を向上させ、実現性を考慮した上でそのロバスト性についても検討を行う

## モデル予測制御 [1]

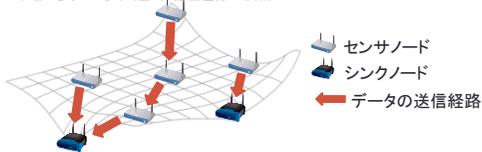
- システムの挙動を示すモデルを用いてシステムの未来の状態を予測し、与えられた要求を満たすように制御を行う
  - システムの制約条件の考慮が容易であるため工学的な応用がしやすい



[1] J.H. Lee, "Model predictive control: Review of the three decades of development," International Journal of Control, Automation and Systems, vol.9, no.3, pp.415-424, June 2011.

## ポテンシャルルーティング [2]

- 無線センサネットワークを対象とした自己組織型経路制御手法
  - 各ノードはポテンシャル(スカラー値)を保持
    - シンクノードのポテンシャルを最小
    - 局所情報に基づき、シンクノードに近いノードほどポテンシャルが低くなるようポテンシャルを設定
  - 自身よりポテンシャルが小さい隣接ノードにデータを送信することにより、シンクノードまでデータを届けることが可能

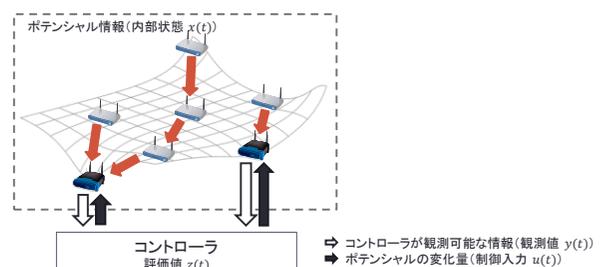


局所情報のみに基づいてポテンシャルを決定するため、ポテンシャルの収束が遅い

[2] D. Kominami, M. Sugano, M. Murata, and T. Hatauchi, "Controlled and self-organized routing for large-scale wireless sensor networks," ACM Transactions on Sensor Networks, vol.10, no.1, pp.13:1-13:27, Nov. 2013.

## MPC を用いたポテンシャルルーティング

- コントローラがシステムの状態の観測、予測を行い、ポテンシャルの収束を促進するよう制御を行う
  - 未来の状態を予測するためポテンシャルの挙動を定式化
  - 制御目標を達成するように制御入力決定するコントローラを設計



### 7 ポテンシャルの挙動

- ノード  $n$  におけるポテンシャルの更新
  - 自身とその隣接ノードのポテンシャルにより決定
  - 予測項  $\eta_n(t)$  はコントローラから受け取る制御入力  $u(t)$  により決定

$$\phi_n(t+1) = (\alpha + 1)\phi_n(t) - \alpha\phi_n(t-1) + \beta\sigma \sum_{k \in N_b(n)} \{\phi_k(t) - \phi_n(t)\} + f_n(t) + \eta_n(t)$$

$\phi_n(t)$ : 時刻  $t$  におけるノード  $n$  のポテンシャル  
 $N_b(n)$ : ノード  $n$  の隣接ノード集合  
 $\alpha$ : 一時点前のポテンシャルとそれ以前のポテンシャルの重みを決定  
 $\beta$ : 隣接ノードのポテンシャルの重み  
 $f_n(t)$ : 時刻  $t$  でのノード  $n$  における外部からの流入出フロー量

- ネットワーク全体のポテンシャルの挙動

$$x(t+1) = Ax(t) + B_2u(t)$$

$x(t)$ : 時刻  $t$  におけるネットワーク全体のポテンシャル情報 (=  $[\phi_1(t) \dots \phi_N(t)]^T$ )  
 $\bar{\phi}_n(t)$ : 時刻  $t$  におけるポテンシャルとポテンシャルの目標値  $\bar{\phi}_n(\infty)$  との差分

### 8 コントローラの設計

- システム全体の挙動

$$x(t+1) = Ax(t) + B_1d(t) + B_2u(t)$$

$$z(t) = C_1x(t) + D_{11}d(t) + D_{12}u(t)$$

$$y(t) = C_2x(t) + D_{21}d(t) + D_{22}u(t)$$

$x(t)$ : ポテンシャル情報  
 $u(t)$ : 制御入力  
 $d(t)$ : 外乱入力  
 $z(t)$ : 評価値  
 $y(t)$ : 観測値

- 以下を満たすように制御入力  $u(t)$  を決定するコントローラを設計
  - 各ノードにおけるポテンシャルの目標値との差分、および制御入力  $u(t)$  が最小となるように  $u(t)$  を決定

$$z(t) = [\bar{\phi}_1(t) \dots \bar{\phi}_N(t) \quad ru(t)]^T$$

$$\text{minimize: } \sum_{t=0}^{\infty} z^T(t)z(t)$$

$r$ : 制御の大きさを決定するパラメータ  
 $\bar{\phi}_n(t)$ : 時刻  $t$  におけるポテンシャルとポテンシャルの目標値  $\bar{\phi}_n(\infty)$  との差分

### 9 シミュレーション評価

- ネットワーク
  - ノード数: 12 (シンクノード数: 2)
  - コントローラが制御可能なノード: シンク 1, 2
- 評価シナリオ
  - 時刻 10,000s において、各センサノードにおけるデータパケットの発生率に変化
  - 各シンクノードが受け取るデータパケットの数が均等になるようにポテンシャル場を再構築
    - ポテンシャル、データパケットの流れの収束について評価
- パラメータ設定
  - 各ノードにおけるポテンシャルの更新間隔: 50s
  - コントローラによる予測制御間隔: 50s
  - 制御入力の大きさを決定するパラメータ  $r = 0.1, 10$
  - $\alpha = 0.4, \beta = 0.2, \sigma = 0.1$

### 10 ポテンシャルの収束

- 予測制御によりポテンシャルの収束速度が向上
  - $r$  が小さいほど一度に加えられる制御入力が大きくなり、収束までの時間が短縮される
- 通信遅延により発生する誤差に対してもロバストに制御可能
  - コントローラがポテンシャル情報を収集するために通信遅延が発生することにより、コントローラ設計時のモデルとの誤差が生じる状況下でも、収束速度の向上を達成

ポテンシャルの収束を促進するようにコントローラがシンクのポテンシャルを制御

### 11 データパケットの流れの収束

- トラフィックの変化後、データパケットの到着数が均等になるまでの速度が向上
  - $r$  が小さい場合、データパケット発生率変化直後にデータパケットの到着数が一時的に減少
    - 一度に加えられる制御入力大きい場合、シンク以外のノードが一時的に極小値を取り、データパケットがシンクに到着できなくなる

データパケット到着数減少

### 12 まとめと今後の課題

- まとめ
  - ポテンシャルルーティングへのモデル予測制御の導入
  - ポテンシャル、データパケットの流れの収束速度の向上を確認
  - 通信遅延により生じる誤差に対してもロバストに制御
- 今後の課題
  - 収束速度の向上について解析的に評価
  - ノード数が多い場合の評価
  - モデル予測制御の分散化
    - 各ノードでの計算量は増加するが、制御に必要なポテンシャル情報を集めるための情報交換頻度が軽減できるのではないかと期待