

# Bio-inspired Self-organizing Control Mechanisms for Cooperative Wireless Ad-hoc and Sensor Networks

大阪大学 大学院情報科学研究科 情報ネットワーク学専攻  
先進ネットワークアーキテクチャ講座  
山本 宏

## 研究背景

- ▶ ネットワークの規模、複雑性が拡大
  - ▶ 機器の多様性, 無線など通信環境の不安定さ
    - 大域情報を用いた集中制御は困難
- ▶ 起こりうる状況と対応する動作の組み合わせは膨大
  - 事前に定めたルールに従う決定論的制御は困難

### 自己組織型制御に期待

生物システムの振る舞いの自己組織性を制御に応用

- ▶ アプリケーション要求の多様化
  - ▶ 生成されるトラヒック, 必要なデバイス, QoS

異なるネットワークの連携, 制御を階層化した連携

自己組織型制御の協調が必要不可欠


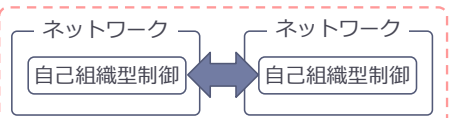
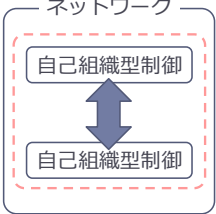
▶ 2

博士學位論文 公職会

2012/12/13

## 研究の目的

### 無線ネットワークを対象とした自己組織型協調制御手法の提案と評価

1. 他の制御と協調する自己組織型制御  
\* パナソニックと共同研究で実施  
当方の映像品質割当制御と先方のバッファ制御の協調で対象の映像を高品質に得られる町中の見守りシステムを構成
 
2. 自己組織的に動作するネットワークの協調制御
 
3. 階層化された自己組織型制御の協調制御
 

## 博士論文の構成

- ▶ Chapter 1 Introduction
- ▶ Chapter 2 A Reaction-Diffusion based Coding Rate Control Mechanism for Camera Sensor Networks  
[他制御との協調]
- ▶ Chapter 3 An Inter-networking Mechanism with Stepwise Synchronization for Wireless Sensor Networks  
[ネットワーク間の協調]
- ▶ Chapter 4 Interaction between Layered Self-organization based Control  
[階層間の協調]
- ▶ Chapter 5 Conclusion

▶ 4

博士學位論文 公職会

2012/12/13

# A Reaction-Diffusion based Coding Rate Control Mechanism for Camera Sensor Networks

## Chapter 2

## カメラセンサネットワーク

- ▶ カメラと無線通信機能を持つノードで遠隔地を観測
  - ▶ ノードが撮影した映像はマルチホップで基地局に転送

### 問題

- ▶ 無線ネットワークの通信容量の制約
  - ▶ 大量の映像トラヒックによりネットワークが輻輳
  - ▶ 既存の QoS 制御に加えトラヒック自体を減らす制御が必要

### 映像の重要度にあわせた適応的な品質制御



一般に, 利用者は観測対象の映像に興味がある一方, 対象から遠い位置の映像への興味は低い

▶ 6

博士學位論文 公職会

2012/12/13

## 反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御

### ● 反応拡散モデル

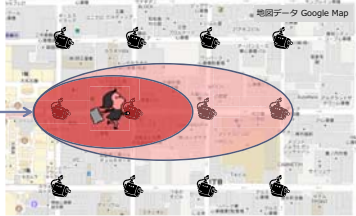
- 動物の模様形成を隣接細胞間の因子の相互作用で説明
- 性質の異なる2種類の因子の細胞内での反応、拡散により因子濃度分布（パターン）を形成

### ▶ 概要

- 交差点にカメラを設置、町中の見守りに利用
- 因子濃度分布と映像品質割当の分布の類似に着目

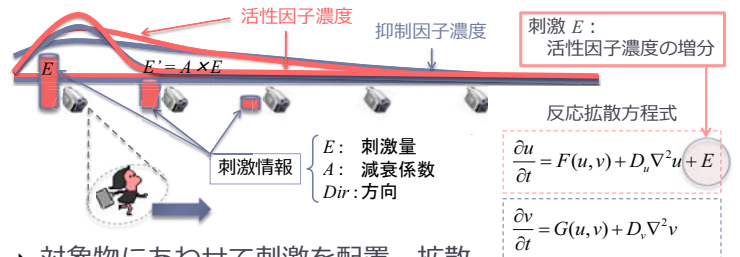


- 隣接ノード間の情報交換、反応拡散方程式の計算を繰り返し、パターン形成



- 因子濃度と符号化レートに対応付けて、品質制御

## 制御の動作



- ▶ 対象物にあわせて刺激を配置，拡散
- ▶ 見守り対象を中心とし，進行方向に広がるパターンを形成
- ▶ 対象物をとらえている場合，
  - ▶ 対象物の速度に応じて刺激量，減衰係数を設定
- ▶ 対象物の移動方向に位置する場合，
  - ▶ 隣接ノードからの刺激情報にしたがい刺激を設定

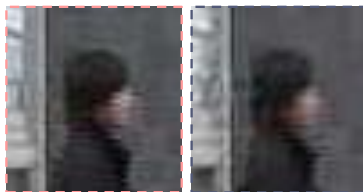
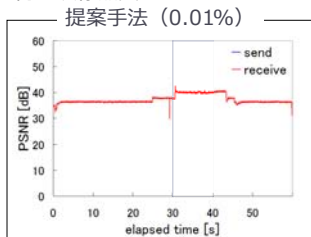
## 評価実験

### ▶ 市販のカメラ，PCを用いたノードに実装

- ▶ IEEE 802.11g，アドホックモードで接続
- ▶ 適応制御を行わない場合と比較評価
  - ▶ 常時低画質（0.75 Mbps），常時高画質（2 Mbps）  
（パケット棄却率 36.70% で再生不能）



### □ 再生映像品質



パケット棄却率の増加を抑え，再生映像品質を向上

## 本章のまとめ

- ▶ カメラセンサネットワークのための映像の重要度に応じた適応的な符号化レート制御手法を設計，実装評価
- ▶ 反応拡散モデルを用いて自律的な映像品質割当を実現
  - ▶ 対象物を中心とし，移動方向に広がる高品質な領域を設定
  - ▶ 対象物の移動速度にあわせた高品質な領域の広さの調整
  - ▶ 対象物が近接するときの局所的なトラヒックの総量の調整
- ▶ シミュレーション評価により，
  - ▶ 対象物の移動速度や数によらず，生成されるトラヒックの局所的な総量を保てることを確認
- ▶ 実機実験により，
  - ▶ 無線ネットワークの輻輳を抑え，対象物の映像の再生品質を向上できることを確認

## An Inter-networking Mechanism with Stepwise Synchronization for Wireless Sensor Networks

### Chapter 3

## センサネットワークの協調

### ▶ 問題

- ▶ ネットワーク間でスリープ制御の間隔が相違
  - ▶ ノードの協調動作のため，パルス結合振動子モデルによる同期制御によりネットワーク内で完全同期を行うことを想定
  - ▶ 境界ノードは相手ネットワークの起動待ちが必要となり，ネットワーク間の通信のために電力を多く消費

### ▶ 要求

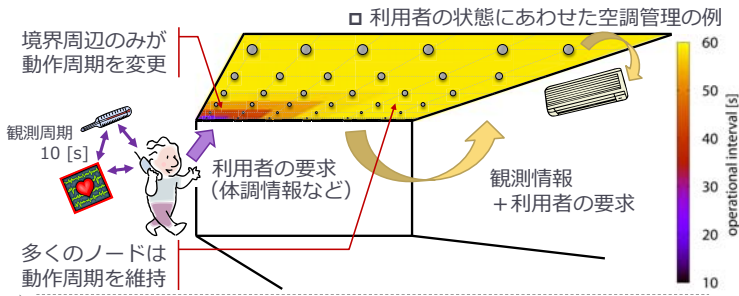
- ▶ 高負荷となる境界ノードにおける消費電力の軽減
  - ▶ ノードの電力枯渇によりシステム全体の性能が低下
- ▶ 本来の動作への影響の軽減
  - ▶ アプリケーションごとに適切な動作周期で動作

段階的同期によるネットワーク協調

一部のノードのみが動作周期を変更し，ネットワーク間の動作周期の差を埋める

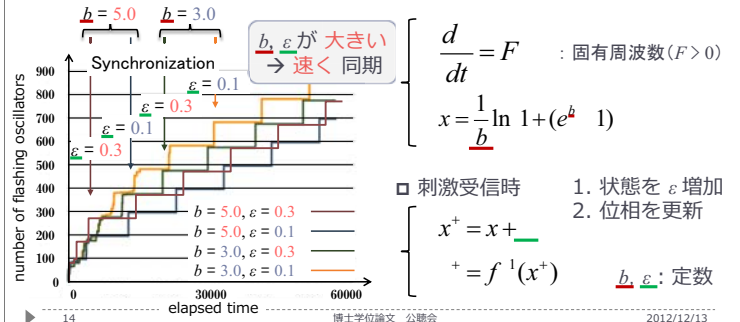
## 段階的同期によるネットワーク協調

- 境界からの距離に応じて段階的に動作周期を調整
  - 隣接ノード間の動作周期の差を縮小
    - 境界ノードの送信待ち時間, 消費電力を削減
  - 動作周期の変更を必要とされるノード数の削減
    - 本来の動作周期への影響を減少



## パルス結合振動子モデルによる同期制御

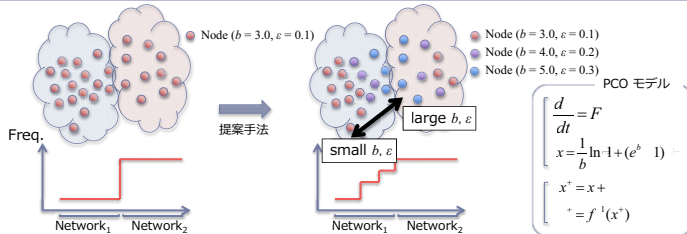
- ノードは位相 ( $\phi$ ) と状態 ( $x$ ) を管理 ( $0 \leq \phi, x \leq 1$ )
- 位相, 状態が 1 に達すると, ノードは“発火”
  - 位相, 状態を 0 にし, 刺激メッセージをブロードキャスト
- 刺激メッセージを受け取ると位相, 状態の値を変化



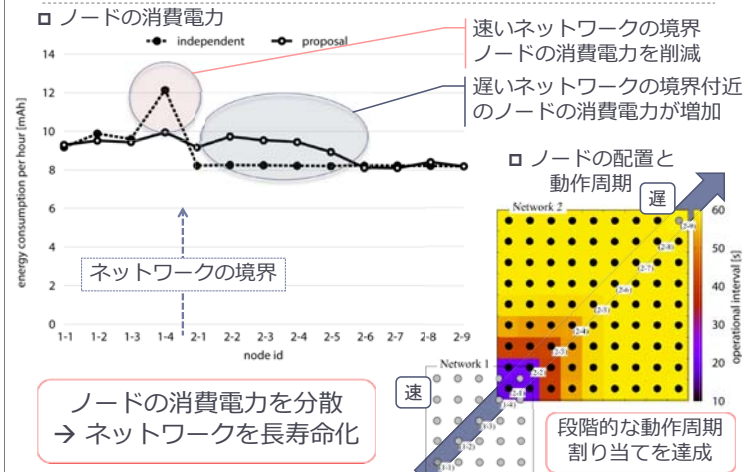
## パルス結合振動子モデルによる段階的同期

- パラメータの違いによる相互作用の強さの違いに着目
  - $b$ : 同期速度,  $\epsilon$ : 刺激受信時の発火しやすさ
- 境界からの距離にあわせて  $b, \epsilon$  を設定
  - 境界に近いノード: 大きな値により相互作用を強く
  - 境界から遠いノード: 小さな値により相互作用を弱く

相互作用の強さを調整することで, 段階的同期を実現



## シミュレーション評価



## 本章のまとめ

- 動作周期の異なるセンサネットワーク間で境界ノードの負荷を和らげる動作周期調整手法を提案, 評価
  - 一部のノードのみが動作周期を段階的に調整することで隣接ノードの動作周期の差を埋め, 通信待ち時間を抑制
    - パルス結合振動子モデルのパラメータを調整することで実現
    - 自律的に境界からの距離にあわせてパラメータを設定
- シミュレーション評価により,
  - 高負荷となりやすい境界ノードの消費電力を抑え, 負荷を分散できることを確認
  - ネットワーク間の動作周期の差によらず, 段階的同期が達成できることを確認
  - 制御情報の棄却に対してロバストであることを確認

## Interaction between Layered Self-organization based Control

## Chapter 4

## 自己組織型制御の階層化

### 背景

- ネットワークに対する要求の複雑化
  - 単一制御で満足できない → 自己組織型制御の組み合わせ
    - 例) 上位層において下位層とは異なる目的関数で経路制御
  - 自己組織型制御の階層化による効果や影響は未検討

### 目的

- 自己組織型制御を階層的に組み合わせたときの適切な相互作用のさせ方について検討

#### オーバーレイネットワーク遅延ベースの経路制御

経路の良さを共有，制御に利用 = 相互作用

#### アドホックネットワーク経路長ベースの経路制御

## アトラクタ選択モデルによる経路制御 [31]

### アトラクタ選択モデル

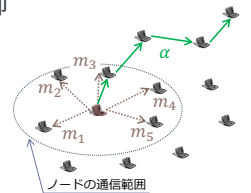
- 生物の環境変動に対する適応的な状態の選択を説明
- 状態が適切な場合，
  - $\alpha$  が大きく，関数  $f$  にしがたい状態を選択し，安定解へ収束
- 状態が適切でない場合，
  - $\alpha$  が小さく，ノイズ項の影響を強く受け，解を探索

$$\frac{d\bar{m}_i}{dt} = f(\bar{m}_i) \cdot \alpha + \eta$$

ポテンシャル関数  
アクティビティ ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )  
状態の良さを表す値  
ノイズ

### MANET 向けリアクティブ型経路制御

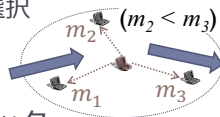
- アトラクタ選択モデルを中継ノードにおける転送先ノードの選択に利用
- ノードは宛先ごとに経路情報を保持
  - 現在の経路の良さを表す値:  $\alpha$
  - 転送先として良さを表すベクトル:  $\bar{m}$



## アトラクタ選択モデルによる経路制御の動作

### データメッセージの中継

- ノードは受信側  $d$  に対する  $\bar{m}_d$  から，転送元を除く状態値が最大のノードを転送先として選択



### データメッセージ転送後のフィードバック

- 受信側  $d$  は，フィードバックメッセージを送信
  - メッセージの辿った経路をさかのぼって，送信側まで転送
- 中継ノードは，経路情報を更新

$$\alpha_d = \frac{\min_{-T < t' \leq t} w(t')}{w(t)}$$

直近  $T$  秒間の最小ホップ数

$$\frac{d\bar{m}_{d,i}}{dt} = \frac{\alpha_d (\beta \alpha_d^\gamma + 1 / \sqrt{2})}{1 + m_{d,\max}^2 - m_{d,i}^2} - \alpha_d m_{d,i} + (1 - \alpha_d) \eta$$

ホップ数      制御関数      ノイズ項       $\beta, \gamma$ : 定数

## アトラクタ選択モデルによる制御の階層化

- 両階層でアトラクタ選択モデルによる経路制御を適用
  - アドホック (AN), オーバーレイネットワーク (ON)
  - 異なる目的関数  $\alpha_{AN}$ : ホップ数,  $\alpha_{ON}$ : 通信遅延

### 階層間でアクティビティを共有，状態値の計算に利用

- 階層間でのアクティビティ共有方法

- 上位層が下位層の  $\alpha$  を利用 (top-down)

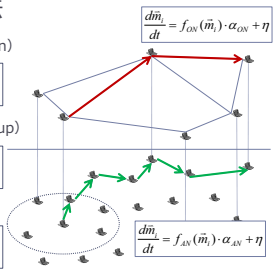
$$\text{ON: } \frac{d\bar{m}_i}{dt} = f_{ON}(\bar{m}_i) \cdot \alpha_{ON} + \eta \quad \text{AN: } \frac{d\bar{m}_i}{dt} = f_{AN}(\bar{m}_i) \cdot \alpha_{AN} + \eta$$

- 下位層が上位層の  $\alpha$  を利用 (bottom-up)

$$\text{ON: } \frac{d\bar{m}_i}{dt} = f_{ON}(\bar{m}_i) \cdot \alpha_{ON} + \eta \quad \text{AN: } \frac{d\bar{m}_i}{dt} = f_{AN}(\bar{m}_i) \cdot \alpha_{AN} + \eta$$

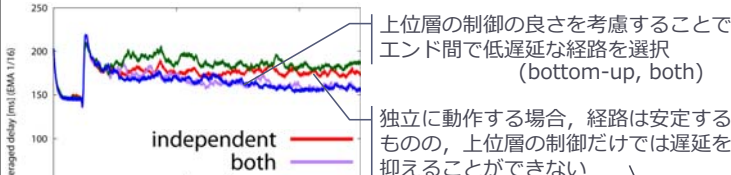
- 相互に  $\alpha$  を利用 (both)

$$\text{ON: } \frac{d\bar{m}_i}{dt} = f_{ON}(\bar{m}_i) \cdot \alpha_{ON} + \eta \quad \text{AN: } \frac{d\bar{m}_i}{dt} = f_{AN}(\bar{m}_i) \cdot \alpha_{AN} + \eta$$



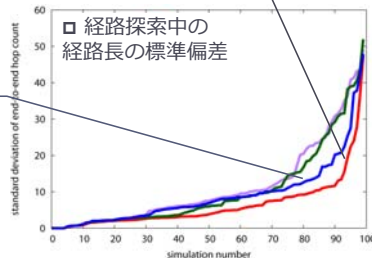
## シミュレーション評価

### 平均エンド間通信遅延



bottom-up の場合，経路の振動が比較的小さく抑えられる

下位層が上位層の制御の良さを考慮することにより全体として良い性能を達成



## 本章のまとめ

- 自己組織型制御を階層的に組み合わせたときの，相互作用の違いと効果や影響の関係を検討
- アドホックネットワークとオーバーレイネットワークで，アトラクタ選択モデルにもとづく経路制御を適用し，階層間でアクティビティを共有して制御に利用
- シミュレーション評価により，
  - 下位層が上位層の制御の良さを考慮することで，全体として良い性能が得られることを確認
  - 独立に動作することで経路は安定するものの，全体としての性能は低いことを確認

## まとめ

- ▶ 無線ネットワークのための自己組織型協調制御を提案
  - ▶ 他の制御と協調する自己組織型ネットワーク制御
    - ▶ カメラネットワークのための重要度に応じた映像品質制御
    - ▶ 輻輳を回避し、対象の映像を高品質に得られることを確認
  - ▶ 自己組織的に動作するネットワーク間の協調制御
    - ▶ 動作周期の異なるセンサネットワーク間の動作周期調整
    - ▶ 負荷を分散し、ネットワークの長寿命化に対する効果を確認
  - ▶ 階層化された自己組織型制御間の協調制御
    - ▶ アドホックネットワークとオーバーレイネットワークで自己組織型経路制御が動作するとき、制御パラメータの共有の仕方と得られる性能や性質の関係を評価
    - ▶ 下位層が上位層の制御の良さを考慮した制御を行うことで、全体として良い性能が得られることを確認