

センサネットワークにおける 反応拡散方程式を利用した 自律分散制御に関する実験と考察

大阪大学 大学院情報科学研究科
兵頭 克也

2006/12/07

第五回センサネットワーク研究会

1

目次

- 1 研究背景
- 2 反応拡散方程式
- 3 センサネットワークにおけるパターン形成機構
- 4 シミュレーション
- 5 実機実験
- 6 まとめ

2006/12/07

第五回センサネットワーク研究会

2

1 研究背景

2006/12/07

第五回センサネットワーク研究会

3

研究背景

センサネットワークの特徴と求められる特性

- センサ端末は大量に配置
 - 集中制御が困難, センサ端末数に対する**拡張性**
 - ◆ **自律分散的な制御**
- センサ端末の追加, 除去, 移動などが発生
 - 環境変化に対する**適応性**
 - 障害, 故障に対する**頑健性**
- センサ端末は電池駆動
 - **省電力な制御**

2006/12/07

第五回センサネットワーク研究会

4

生物システムに着想を得た制御

多くの生物システムの有する特徴

- 自律分散性
 - 個体, 細胞などが自律分散的に動作
- 拡張性
 - 個体数の増加や行動, 生存範囲などの拡大に対して適応
- 適応性
 - 周囲の環境の変化に対応
- 頑健性
 - 個体の病や死, 外敵よりの攻撃に対しても対応

生物システムに着想を得た
センサネットワーク制御機構

2006/12/07

第五回センサネットワーク研究会

5

研究目的

研究目的

- 生物の体表における自律分散的なパターン形成モデルである**反応拡散方程式**に着目
- 反応拡散方程式の形成するパターンを利用し,
自律分散的な経路制御や**スケジューリング**

発表内容

- 現実に近い環境での実験
 - システムの**実現性**, **実用性**の評価

2006/12/07

第五回センサネットワーク研究会

6

2 反応拡散方程式

2006/12/07 第五回センサネットワーク研究会 7

反応拡散方程式とは？

- 1952年に *Alan Turing* が提唱
- 物質の反応現象と拡散現象を表した方程式
- 生物の体表におけるパターン形成を説明可能



シマウマ



タテジマ
キンチャクダイ



ヒョウ

2006/12/07 第五回センサネットワーク研究会 8

パターン形成

- 活性因子, 抑制因子が反応拡散方程式に基づいて反応・拡散する
- パターンを形成する条件
 - 因子間の反応に正のフィードバックと負のフィードバックが存在
 - 活性因子よりも抑制因子のほうが速く拡散

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F(u, v) + D_u \nabla^2 u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = G(u, v) + D_v \nabla^2 v$$

u : 活性因子濃度
 v : 抑制因子濃度
 $F(u, v), G(u, v)$: 反応を表す関数
 D_u, D_v : 拡散係数

反応項 拡散項

因子の反応

2006/12/07 第五回センサネットワーク研究会 9

パターン形成の仕組み

- ある場所の活性因子濃度が高くなった時
 - 活性因子が自身を活性化し, 活性因子濃度が上昇
 - 活性因子により, 抑制因子濃度も上昇
 - 抑制因子がまわりに早く拡散
 - 抑制因子がまわりの活性因子の増加を抑制
 - 部分的に活性因子濃度が高い分布

2006/12/07 第五回センサネットワーク研究会 10

3 センサネットワークにおけるパターン形成機構

2006/12/07 第五回センサネットワーク研究会 11

パターン形成の手順

- 隣接ノードと通信して因子濃度情報を交換
- 因子濃度を反応拡散方程式に基づき計算
- 活性因子濃度の値に応じて役割を決定

2006/12/07 第五回センサネットワーク研究会 12

反応拡散方程式の離散化

- 離散的なノード配置, 離散的な通信への適用
 - 差分解法を用いて離散化

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F(u, v) + D_u \nabla^2 u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = G(u) + D_v \nabla^2 v$$

ただし

$$F(u, v) = \max\{0, \min\{au - bv + c, M\}\} - du$$

$$G(u) = \max\{0, \min\{eu + f, N\}\} - gv$$

u : 活性化因子濃度
 v : 抑制因子濃度
 $F(u, v), G(u, v)$: 反応を表す関数
 D_u, D_v : 拡散係数
 Δt : 離散ステップ
 Δh : 格子間距離

離散化

$$u_{i,j,t+\Delta t} = u_{i,j,t} + \frac{\Delta t}{\Delta h^2} F(u_{i,j,t}, v_{i,j,t}) + D_u \frac{u_{i+1,j,t}^* + u_{i-1,j,t}^* + u_{i,j+1,t}^* + u_{i,j-1,t}^* - 4u_{i,j,t}}{\Delta h^2}$$

$$v_{i,j,t+\Delta t} = v_{i,j,t} + \frac{\Delta t}{\Delta h^2} G(u_{i,j,t}) + D_v \frac{v_{i+1,j,t}^* + v_{i-1,j,t}^* + v_{i,j+1,t}^* + v_{i,j-1,t}^* - 4v_{i,j,t}}{\Delta h^2}$$

ただし

$$F(u, v) = \max\{0, \min\{au - bv + c, M\}\} - du$$

$$G(u) = \max\{0, \min\{eu + f, N\}\} - gv$$

離散ステップ Δt により,
計算精度を調整できる

2006/12/07

第五回センサネットワーク研究会

13

通信回数削減手法

- センサネットワークでは, **省電力な制御**が必要
 - ノードが通信する回数や計算を行う回数を削減

手法 (a): 離散ステップ Δt を大きくする

- 1回の計算がより大きな影響を持つ
- より荒い計算

手法 (b): 反応拡散方程式を K 回連続して計算してから, 次の手順に進む

- 1回の通信あたり, K 回多く計算
- 隣接ノードについては古い情報を使用 → 誤差を含んだ計算
- 自ノードの因子濃度は計算ごとに更新

2006/12/07

第五回センサネットワーク研究会

14

4

シミュレーション

2006/12/07

第五回センサネットワーク研究会

15

シミュレーション

シミュレーション設定

- $5 \times 5 = 25$ ノード
- ノードは同期して動作
 - 同じタイミングで情報を交換
 - 同じタイミングで計算

評価項目

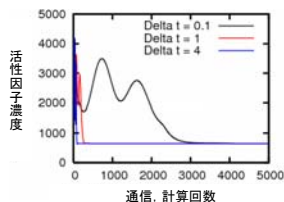
- 因子濃度が収束するまでの**通信回数, 計算回数**
 - 通信回数 ... 隣接ノードと情報を交換した回数
 - 計算回数 ... 反応拡散方程式を計算した回数
- 情報欠落発生時の**パターン形成成功率**
 - パターン形成成功率 ... 1000回の試行を行い, 情報欠落が発生しなかった場合のパターンと同じパターンが形成できた確率

2006/12/07

第五回センサネットワーク研究会

16

シミュレーション結果 通信回数削減手法 (a)



通信回数削減手法(a)

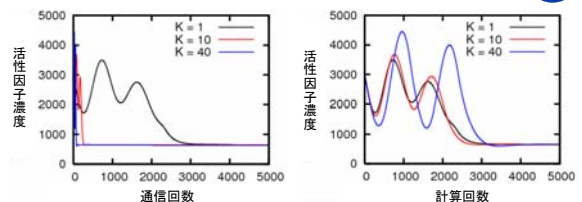
- 離散ステップ Δt を大きくすると
 - 収束までにかかる通信, 計算回数共に大きく減少

2006/12/07

第五回センサネットワーク研究会

17

シミュレーション結果 通信回数削減手法 (b)



通信回数削減手法(b)

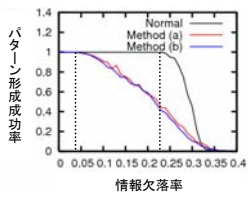
- 連続して計算する回数 K を大きくすると
 - 収束までにかかる通信回数は大きく減少
 - 収束までにかかる計算回数は増加

2006/12/07

第五回センサネットワーク研究会

18

シミュレーション結果 情報の欠落



情報の欠落とパターン形成成功率

通信回数削減手法(a): $\Delta t = 1$
通信回数削減手法(b): $K = 10$

パターン形成成功率...
情報欠落が発生しなかった場合のパターンと同じパターンが形成できた確率

情報欠落率...
計算に必要な情報のうち、取得できなかった情報の割合

- 通信回数削減手法を**用いない**場合
 - 23%程度の情報欠落までは、確実にパターン形成可能
- 通信回数削減手法を**用いた**場合
 - 4%程度の情報欠落までは、確実にパターン形成可能

実機実験の設定

- 5 × 5 = 25ノード (シミュレーションと同じ)
- 沖電気工業株式会社製ユビキタスデバイスを使用
- IEEE 802.15.4 non-beacon mode
- ブロードキャスト通信により情報を交換
- ノードは**非同期に動作**
 - 異なるタイミングで情報をブロードキャスト
 - 異なるタイミングで計算
- 制御間隔 T (ブロードキャストする間隔) = 1.4秒
 - T が短すぎると衝突が発生し、情報が欠落する確率が高くなる
- 通信回数削減手法 (a) を採用
 - 離散ステップ $\Delta t = 1$
 - ノード負荷を抑制

デモ映像

実機

シミュレーション

LED (赤) 点灯: 活性因子濃度が閾値より大きいノード
LED (赤) 消灯: 活性因子濃度が閾値より小さいノード
LED (緑): 情報を送信しているノード

最終パターン

白: 活性因子濃度が閾値より大きいノード
黒: 活性因子濃度が閾値より小さいノード

まとめ

- まとめ
 - 実環境において、**制御間隔 T** を適切に設定し、**通信回数削減手法** を適用すれば、望むパターンをより短時間で形成可能
 - 反応拡散方程式を利用したパターン形成機構は**実現可能**
 - 時間制約の厳しくないシステムでは**有効**
- 今後の課題
 - ノード数に対する拡張性の評価
 - グリッド以外のトポロジでのパターン形成
 - ノードの移動、削除に対しても望むパターンを形成できる機構の検討
 - パターン形成のさらなる高速化
 - 実用アプリケーションの検討



御清聴ありがとうございました