

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

兵頭 克也[†] 若宮 直紀[†] 村田 正幸[†] 久保 祐樹^{††} 柳原健太郎^{††}

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科

〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

^{††} 沖電気工業株式会社 研究開発本部 ユビキタスシステムラボラトリ

〒 541-0053 大阪市中央区本町 2-5-7

E-mail: [†]{k-hyodo,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}{kubo635,yanagihara726}@oki.com

あらまし 多数の無線センサ端末からなるセンサネットワークにおいては、集中制御は現実的でなく、センサ端末の自律的動作によってネットワーク全体を制御するのが望ましい。さらに、制御機構はセンサ端末の分布、密度の違いや通信環境の変化に対する適応性、および障害や故障に対する頑健性を有していることが求められる。そこで、本稿では、拡張性、適応性、頑健性を有する生物システムの振る舞いに着想を得たセンサネットワーク制御技術として、反応拡散方程式を用いた自律分散制御機構について、その実現可能性や実用性を検証している。シミュレーション評価、および実機を使用した実験より、4%程度の情報欠落が発生する無線通信環境においても所望のパターンが形成でき、また、通信回数を1/10に削減できることを示した。

キーワード センサネットワーク、反応拡散方程式、生物システム、実験評価

Experiments and Considerations on a Reaction-Diffusion based Autonomous Control Mechanism for Wireless Sensor Networks

Katsuya HYODO[†], Naoki WAKAMIYA[†], Masayuki MURATA[†],

Yuki KUBO^{††}, and Kentaro YANAGIHARA^{††}

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

^{††} Oki Electric Industry Co.,Ltd Ubiquitous System Laboratory Corporate Research & Development Center

2-5-7 Honmachi, Chuo-ku, Osaka-shi, Osaka 541-0053, Japan

E-mail: [†]{k-hyodo,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}{kubo635,yanagihara726}@oki.com

Abstract Taking into account requirements of sensor networks, we need distributed and autonomous mechanisms which are robust to failures of sensor nodes and adaptive to different distribution of sensor nodes and changes in wireless communication environment. Our research group focuses on behavior of biological systems, which inherently are scalable, adaptive, and robust to dynamic changes in environment. In this paper, we verified the practicality of control mechanisms which adopt a reaction diffusion equation, which explains emergence of patterns on the surface of the body of fishes and mammals. From simulation experiments and practical experiments on a prototype system, it was shown that a target pattern can be formed in a wireless sensor network in several minutes, even when packets are lost for collisions in wireless communication.

Key words Sensor Networks, Reaction Diffusion, Biological System, Practical Experiment

1. はじめに

ネットワーク技術とセンシング技術により、環境や物体の状

態を遠隔地から観測、あるいは詳細に測定することのできるセンサネットワーク技術は、環境、防犯、医療、交通など様々な分野への応用が可能であり、多くの研究者、技術者の注目を集

めている。広範囲かつ詳細に領域や物体を観測するためには多数のセンサ端末を配置する必要がある、また、それらセンサ端末は通信効率などとは無関係に測定、観測の要求に応じた位置に配置され、さらに追加、除去、移動などが発生しうる。また、周辺環境の変化によって無線通信の品質は時々刻々と変動する。これらのことを考慮すると、センサネットワークを集中制御することは現実的ではなく、センサ端末の自律分散的動作によりネットワーク全体が効率的、効果的に制御されることが望まれる。さらに、それらの制御機構は、観測領域の広さや観測対象の数に対する拡張性、センサ端末の分布、配置密度や通信環境の変化に対する適応性、および障害や故障に対する頑健性を有していることが求められる。

そこで、我々は、生物システムの多くが生来的に自律分散型であり、拡張性、適応性、頑健性を有していることに着目し、生物システムの動作原理に着想を得たセンサネットワーク制御技術の研究開発を推進している（[1]など）。本稿では、特に反応拡散方程式を利用した自律分散型センサネットワーク制御技術について、その実現可能性を検証した。1952年に数学者 A. M. Turing によって提唱された反応拡散方程式[2]は、生物の体表において細胞間の相互作用によって規則的なパターンが自発的に形成される仕組みを説明することのできる数学モデルである。集中制御なく、それぞれの細胞が隣接する細胞と影響を与え合い、色を決定することにより、全体としてその種や個体に応じた斑紋や縞模様を形成することができる。

センサネットワークにおいても反応拡散方程式にもとづいた制御により、自律分散的で、拡張性、適応性、頑健性の高いネットワークを実現できるものと考えられる。例えば、Smart Sensor Networks[3]では、領域に配置された多数のセンサ端末が反応拡散方程式を用いて縞模様を形成し、この模様にもとづいて、往路と復路でロボットが衝突しないように経路制御を行う手法が提案されている。また、RDMAC[4]では、ヒョウなどの体表にみられる斑紋と無線ネットワークにおける Spatial TDMA のスケジュールパターンの類似性から、反応拡散方程式にもとづいて自律的に送信タイミングを決定する MAC プロトコルを提案している。さらに、カメラセンサネットワークに対して、監視領域を撮影する複数のカメラ間で、反応拡散方程式によってパン、チルト、ズームを制御し、動体の追跡やそれに伴って生じる死角領域を減少させる制御手法が提案されている[5]。

本稿では、このような、反応拡散方程式によって形成されたパターンにもとづくセンサネットワーク制御や応用アプリケーションの実現可能性や実用性について、シミュレーション評価および実機を用いた実験の結果にもとづき考察を行う。特に、センサネットワークでは省電力な制御が求められることから、パターン形成に必要な通信、計算の回数を削減する手法を提案し、その有効性を評価した。また、電波の衝突、干渉によってパケット損失の発生する無線通信環境を考慮し、情報の欠落がパターン形成に与える影響についても評価した。

以降、2章において、反応拡散方程式によるパターン形成の原理を説明し、3章で反応拡散方程式を利用したセンサネット

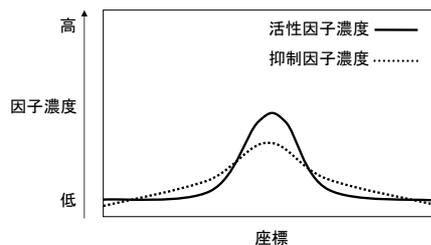


図1 パターン形成の様子

ワーク上でのパターン形成機構について述べる。4章ではパターン形成機構のシミュレーション、および実システムへの実装方法について述べ、実験結果を示し、提案手法の実現性、実用性について考察する。最後に、5章で本稿のまとめ、および今後の課題について述べる。

2. 反応拡散方程式

反応拡散方程式は、一般的に以下のような偏微分方程式で表される[6]。

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t} = f(\mathbf{X}) + \nabla \cdot (D \nabla \mathbf{X}) \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{X} は変数ベクトル、 t は時間、 $f(\cdot)$ は反応を表す関数、 D は拡散係数行列である。右辺第1項は変数ベクトル自身による変化量を与える反応項であり、右辺第2項は拡散項である。拡散係数は、拡散量と \mathbf{X} の勾配との間の比例定数である。

空間のそれぞれの点の状態は、活性因子濃度と抑制因子濃度で表される。パターンを形成するためには、反応拡散方程式は以下の条件を満たす必要がある[7]。

(1) 活性因子が自身の濃度を増加させる正のフィードバックと、抑制因子による負のフィードバックを含む。

(2) 抑制因子が活性因子よりも速く拡散する。

空間の濃度分布の微小な乱れによってある場所に活性因子のピークができた時、その付近では抑制因子も大量に生成される。抑制因子は周囲に速く拡散するため、図1のように活性因子のピークから離れた所では抑制因子の濃度が高くなり、活性因子の増加を抑える。一方、活性因子のピーク付近では十分な抑制因子が蓄積されないため、活性因子濃度のピークが保たれる。このようにして活性因子の濃度が不均一になることから、濃度分布の周期的なパターンが現れることになる。なお、図1では一次元空間における因子濃度の分布を示している。

タテジマキンチャクダイの模様形成の実験では、これらの条件を満たす反応拡散方程式として以下を用いている[8]。

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = F(u, v) - du + D_u \nabla^2 u \\ \frac{\partial v}{\partial t} = G(u) - gv + D_v \nabla^2 v \end{cases} \quad (2)$$

ただし、反応を表す関数は以下で与えられる。

$$\begin{cases} F(u, v) = \max\{0, \min\{au - bv + c, M\}\} \\ G(u) = \max\{0, \min\{eu + f, N\}\} \end{cases} \quad (3)$$

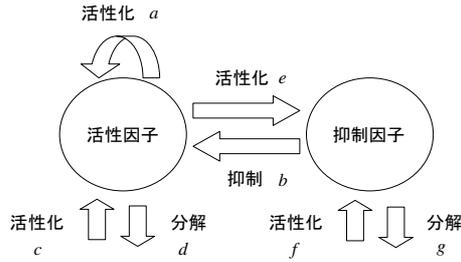


図2 活性因子と抑制因子の反応

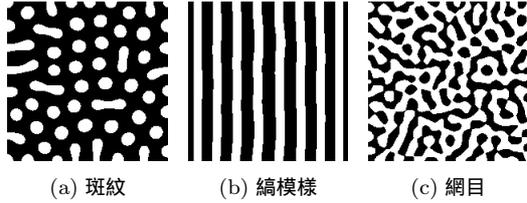


図3 形成されるパターンの例

本式による活性因子と抑制因子のダイナミクスを図2に示す。式(2)の第1式は活性因子濃度に、第2式は抑制因子濃度に関する反応拡散方程式である。 u, v はそれぞれ活性因子と抑制因子の濃度、 D_u, D_v はそれぞれ活性因子と抑制因子の拡散係数を表す。式(3)中の係数 a は活性因子が自身を活性化する強さ、係数 b は活性因子が抑制因子に抑制される強さ、係数 e は抑制因子が活性因子に活性化される強さを表している。また、係数 c, f は、それぞれの因子の単位時間あたり増加量を示し、係数 d, g は濃度に比例したそれぞれの因子の自己分解速度を表している。なお、式(3)は因子の過剰生成による状態発散を防ぐためのものであり、 M, N は上限を表す定数である。各係数を先に述べた条件(1)(2)のもとで変化させることにより、斑紋、縞模様、網目などの様々な模様を形成することができる(図3)。ただし、斑点の位置などは、因子の初期濃度分布に依存する。

3. 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パターン形成機構

本章では、格子状に配置されたセンサ端末(以下、ノードと呼ぶ)からなるセンサネットワークにおいて、反応拡散方程式によってパターンを形成するシステムについて述べる。なお、本稿での評価においては、ノードの移動、追加、削除などは発生しないものとする。

それぞれのノードは、活性因子濃度 u 、および抑制因子濃度 v の値を保持している。それぞれのノードは一定の制御間隔 T ごとに、その間に得られた隣接ノードの因子濃度にもとづいて反応拡散方程式を計算し、自身の活性因子濃度、抑制因子濃度を更新した後、それら濃度情報をブロードキャストする。ただし、制御間隔 T 中に因子濃度情報を受信できなかった隣接ノードの因子濃度は、そのノードから最後に受信した因子濃度とする。なお、シミュレーションではノードは同期して動作しており、同じタイミングで反応拡散方程式の計算および情報の交換を行うが、実システムでは非同期に動作する。

ノード配置は離散的であり、また、情報交換も離散的であるため、式(2)を差分法を用いて次式のように離散化する。制御タイミング $t+1$ における因子濃度は次式で求められる。

$$\begin{cases} u_{t+1} = u_t + \Delta t \left\{ F(u_t, v_t) - du_t \right. \\ \left. + D_u \frac{(u_t^n + u_t^e + u_t^s + u_t^w - 4u_t)}{\Delta h^2} \right\} \\ v_{t+1} = v_t + \Delta t \left\{ G(u_t) - gv_t \right. \\ \left. + D_v \frac{(v_t^n + v_t^e + v_t^s + v_t^w - 4v_t)}{\Delta h^2} \right\} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $u_t^n, u_t^e, u_t^s, u_t^w$ 、および $v_t^n, v_t^e, v_t^s, v_t^w$ は、それぞれノードの四方に隣接する隣接ノードの活性因子濃度および抑制因子濃度の値を表している。また、 Δh はノード配置における格子間距離を、 Δt は時間の離散ステップを表している。

4. 評価と考察

センサネットワークにおける式(4)によるパターン形成について、シミュレーションおよび実機を用いたシステムによって評価し、考察を行う。

4.1 シミュレーション

格子状に配置したノードにおいて、反応拡散方程式を利用したパターン形成機構を動作させるシミュレーションを行う。ノードの数は $5 \times 5 = 25$ とする。また、活性因子濃度、抑制因子濃度の交換には、欠落、誤り、遅延がないものとする。

実システムにおいてセンサ端末を高速動作させるためには、反応拡散方程式を整数演算で計算する必要があるため、シミュレーションにおいても整数で演算を行えるように式(3)および式(4)の両辺に 10^7 を掛ける。

$$\begin{cases} 10^4 \times U_{T+1} = 10^4 \times U_T + \Delta T \left\{ F'(U_T, V_T) - d'U_T \right. \\ \left. + D'_u \frac{(U_T^n + U_T^e + U_T^s + U_T^w - 4U_T)}{\Delta h^2} \right\} \\ 10^4 \times V_{T+1} = 10^4 \times V_T + \Delta T \left\{ G'(U_T) - g'V_T \right. \\ \left. + D'_v \frac{(V_T^n + V_T^e + V_T^s + V_T^w - 4V_T)}{\Delta h^2} \right\} \end{cases} \quad (5)$$

ただし、

$$\begin{cases} F'(U_T, V_T) = \max\{0, \min\{a'U_T - b'V_T + c', M'\}\} \\ G'(U_T) = \max\{0, \min\{e'U_T + f', N'\}\} \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $U_T = u_t \times 10^3, V_T = v_t \times 10^3, \Delta T = \Delta t \times 10$ である。また、係数 a', \dots, g' および拡散係数 D'_u, D'_v は式(3)および式(4)中の対応する係数に 10^3 を掛けたもの、定数 $M',$ および N' はそれぞれ M, N に 10^6 を掛けたものである。

各係数は、近藤らの反応拡散シミュレータ[9]を参考に設定するが、本評価では 5×5 ノードと狭い領域でのパターン形成を行うため、空間構造の持つ波長を短くする必要がある。パターンの

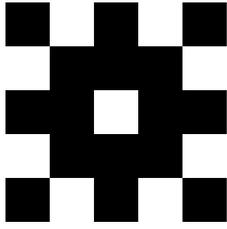
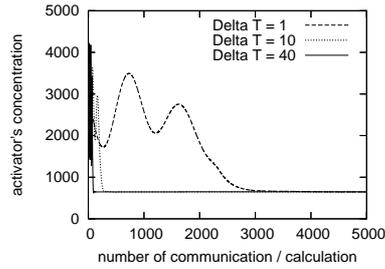
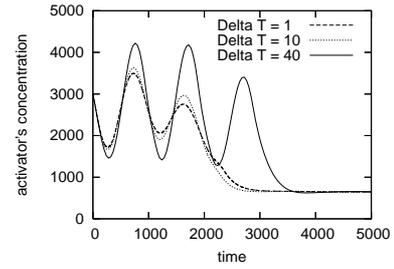


図 4 シミュレーションにより形成されるパターン

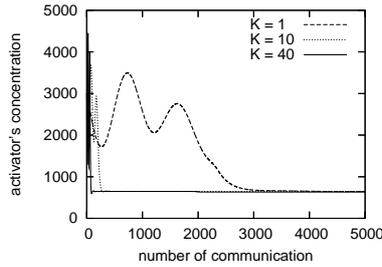


(a) 通信・計算回数と活性因子濃度

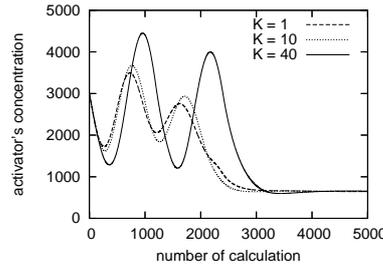


(b) 時間経過と活性因子濃度

図 5 通信回数削減手法 (a) のシミュレーション結果



(a) 通信回数と活性因子濃度



(b) 計算回数と活性因子濃度

図 6 通信回数削減手法 (b) のシミュレーション結果

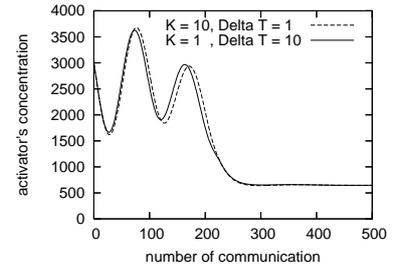


図 7 通信回数削減手法 (a)(b) の比較

持つ空間構造の波長は $(D_u D_v)^{1/4}$ に比例するため [7], 本評価では D'_u, D'_v を小さく設定する. すなわち, $a' = 80, b' = 80, c' = 20, d' = 30, e' = 100, f' = -150, g' = 60, D'_u = 2, D'_v = 50, \Delta h = 1, \Delta T = 1, M' = 200000, N' = 500000$ とする. また, 中央に配置したノードの活性因子濃度の初期値を 5000 とし, 中央のノードの抑制因子濃度およびその他のノードの活性因子濃度, 抑制因子濃度の初期値を 3000 とする.

これらの設定のもとでシミュレーションを行い, 安定状態に現れたパターンを図 4 に示す. 図中, それぞれの正方形はノードを表しており, 活性因子濃度が 3000 より大きいノードを白, 3000 以下のノードを黒で示している. なお, 安定状態とは, ネットワーク上に現れたパターンが変化しなくなった状態を指す. 安定状態到達後も, 隣接ノード間の相互作用によって因子濃度はしばらく変化するが, 閾値によって色分けされたパターンは変化しない. 反応拡散方程式によって, 中央のノードの周りでは抑制因子が強く作用するため活性因子濃度が低くなり, さらにその外側では活性因子濃度が高くなることから, このようなパターンとなる. なお, 本パラメータ設定から形成されるパターンは本来同心円であるが, ノード数が少なく, 波長が短いため図 4 のようになる.

生物システムと同様に, 自律制御によるパターン形成には時間を要し, 図 4 のパターンに安定するためにはノードあたり約 1700 回の計算を必要とする. センサノードは多くの場合電池で駆動するため, センサネットワークには電力効率の高い制御機構が求められる. 特に通信による電力消費が大きいことから, 反応拡散方程式を用いた制御機構においても, より少ない通信回数でパターンを形成できるのが望ましい. 通信回数の削減には, 手法 (a): 式 (5) の離散ステップ ΔT を大きくし, 計算の刻み幅を大きくする, および手法 (b): 制御タイミングご

とに式 (5) を K 回連続して計算する, の 2 つの手法が考えられる.

まず, 手法 (a) において, 離散ステップ ΔT を 1, 10, 40 と変化させた場合の, 左上に位置するノードの活性因子濃度の変化の様子を図 5 に示す. いずれの場合においても安定状態に現れるパターンは同じであった. なお, 本手法では制御タイミングごとの通信あたりに 1 回の計算を行うため, 計算回数と通信回数は一致する. 図 5 (a) より, ΔT を大きくすることにより, 活性因子濃度が安定するまでに必要となる通信・計算の回数が減少することがわかる. 反応拡散における経過時間を $\Delta T \times$ 通信・計算回数 とすると, 時間に対する活性因子濃度の変化は図 5 (b) のようになり, ΔT を大きくすると活性因子濃度の変動が大きくなることがわかる. なお, ΔT を 40 より大きく設定した場合には, 因子濃度が発散し, パターンが安定しなかった.

次に, 離散ステップ ΔT を 1 としたままで手法 (b) により制御タイミングあたりの計算回数 K を 1 回, 10 回, 40 回と変化させたシミュレーション結果を図 6 に示す. いずれの場合でも安定状態に現れるパターンは同じであった. 手法 (b) では, 計算回数は, 通信回数と制御タイミングあたりの計算回数の積となる. 図 6 (a) より, K に比例して収束に必要な通信回数は少なくなることがわかる. また, 図 6 (b) より, K を大きくすると活性因子濃度の変動が大きくなることがわかる. ただし, K を 130 より大きく設定した場合には, 因子濃度が発散し, パターンが安定しなかった. また, K が 40 から 130 までは, パターン形成に必要な通信回数が変化しない. したがって, 濃度変動の増大や計算による電力消費を考慮すると, 本シミュレーションの条件においては, 制御タイミングあたりの計算回数は 40 程度がよいと考えられる.

図 7 に, 手法間の振る舞いの違いを比較するため, 手法 (a)

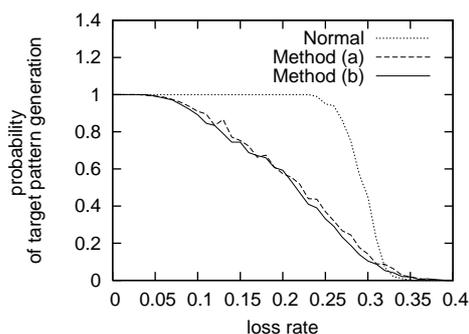


図 8 情報の欠落がパターン形成に与える影響

において $K = 1$, $\Delta T = 10$ とした場合と、手法 (b) において $K = 10$, $\Delta T = 1$ とした場合について、通信回数に対する活性因子濃度の変化の様子を示す。隣接ノードから濃度情報を受信した後、手法 (a) では離散ステップ ΔT を 10 倍にした計算を行うのに対し、手法 (b) では時間の刻みは 1 のままで 10 回の計算を行っている。形成されるパターンも同じであり、図より、手法間で濃度変化に大きな差はないことから、いずれの手法もパターン形成の高速化に効果的であると言える。ただし、手法 (a) では ΔT が 40 より大きくなると状態が発散するのに対し、手法 (b) では K が 130 程度まではパターンが形成できる。これは、手法 (a) では離散度合いが大きいのに対し、手法 (b) では、 K 回の計算において、隣接ノードの因子濃度情報は同じ値を使い続けるが、自身の因子濃度は順次更新され、フィードバックがなされているためであると考えられる。これらのことから、手法 (b) の方が安定した高速化手法であると考えられる。

次に、シミュレーションにより、輻輳や処理遅延によるバッファ溢れなどによって発生した情報の欠落が目標パターン形成に与える影響について評価を行う。情報の欠落とは、制御タイミングにおいて、計算に必要な 4 つの隣接ノードの活性因子濃度、抑制因子濃度のいずれかを、直前の制御タイミング以降、受信していないことを指す。また、計算に必要な情報の数 8 に対して、欠落している情報の割合を情報欠落率と呼ぶ。なお、活性因子濃度、抑制因子濃度は一つのバケットでまとめて送受信されることを仮定しているため、対となる活性因子濃度と抑制因子濃度がまとめて欠落する。

図 8 に、ランダムに情報の欠落が発生する場合のパターン形成率を示す。なお、縦軸のパターン形成率は、それぞれの手法、情報欠落率について行った 1000 回のシミュレーションのうち、図 4 のパターンに安定したものの割合である。図 8 より、情報欠落率が高くなるにつれて、パターン形成率が低下することがわかる。また、高速化を行わない場合は約 23% の情報欠落まで目標パターンが形成でき、その後急激にパターン形成率が低下するのに対し、高速化を行った場合には手法によらず、情報欠落率 4% あたりからゆるやかにパターン形成率が下がっている。これは、高速化によって計算精度が落ち、1 つの情報の欠落が計算全体に与える影響が大きくなるためである。

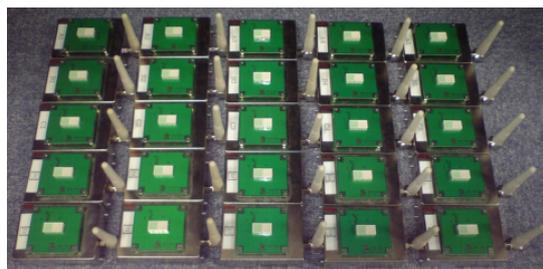


図 9 格子状に配置されたノード

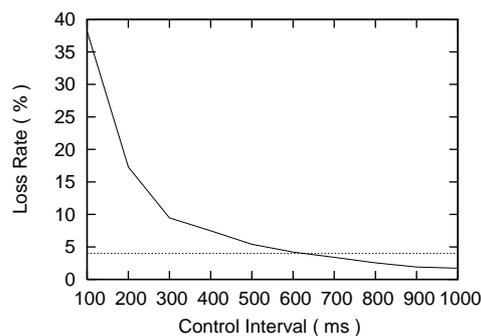


図 10 制御間隔と情報欠落率

4.2 実装

実環境での動作を検証するため、反応拡散方程式によるセンサネットワークのパターン形成機構を実システムに実装した。センサ端末には沖電気工業株式会社製のユビキタスデバイスを用いた [10]。パターンを目視できるように LED を追加したノードを、 5×5 の格子状に配置した (図 9)。シミュレーションと同じ式、パラメータ設定の反応拡散方程式を用い、また、通信回数削減手法として離散ステップ ΔT を 10 とした手法 (a) を使用した。これにより、通信量だけでなく計算量も削減することができ、ノードの負荷を抑えることができる。また、整数演算は符号付 32 ビット整数で行った。MAC プロトコルとしては IEEE802.15.4 を用いた。全てのノードは互いの無線通信範囲内に存在するため、情報の授受が隣接ノードに制限されるように、MAC アドレスを用いた受信情報のフィルタリングを行った。なお、システムの動作の様子を確認するため、それぞれのノードは、活性因子濃度、抑制因子濃度とあわせて、その時点までの計算回数と、最新の因子濃度計算において不足した情報の数をブロードキャストする。パターン形成に関与しない情報収集用ノードを別途配置し、ブロードキャストされたパケットを受信することで、動作検証を行った。なお、パケットサイズは 35 バイトである。

実機では、シミュレーションと異なり、情報をブロードキャストする間隔 (制御間隔) を設定する必要がある。ノードは非同期動作しているが、制御間隔を短くすると電波の衝突、輻輳により、情報欠落率が高くなると考えられる。また、適切な制御間隔は、ノードの特性、実装プログラム、ノード配置など様々な要因により変化する。本実験の条件における、制御間隔と情報欠落率の関係を図 10 に示す。図より、制御間隔が短くなるにつれて、情報欠落率がおおよそ指数的に増加することがわ

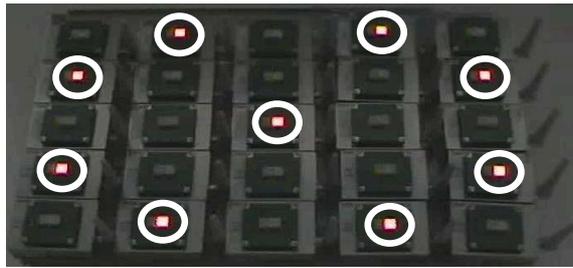


図 11 実機でのパターン形成

かる．図 8 より，通信回数削減手法を使用した場合，約 4% の情報欠落までであれば，安定して目標パターンを形成できるため，制御間隔は 700ms 以上に設定すれば良いことが分かる．しかしながら，実機における情報欠落率は環境により大きく変化する可能性があるため，本実験では倍の 1400ms に設定した．実験によりパターンが形成された様子を図 11 に示す．シミュレーションと同様に活性因子濃度が 3000 より大きいノードの LED を点灯しており（図中，丸で囲まれたノード），図 4 と同じパターンが形成されていることがわかる．なお，パターンの安定まで約 4 分を要した．すなわち，ノードあたり通信・計算回数は約 170 回であり，図 5 (a) とおおよそ一致している．また，本実験では約 3 % の情報欠落が発生していた．

次に，同じ位置にある，あるノードにおける活性因子濃度の変化の様子を，シミュレーションと実機で比較したものを図 12 に示す．シミュレーションでは情報欠落率を 0% としているのに対し，実システムでは約 3 % の情報欠落が発生したため，若干のずれが認められるが，おおよそ合致しており，適切に動作していると言える．

以上より，無線通信環境においても適切に制御間隔を設定し，通信回数削減手法を適用すれば，通信回数を 1/10 程度に抑え，パターンを数分で形成できることがわかる．したがって，ノードの移動，追加，削除の発生しない環境においては，時間制約のそれほど厳しくないアプリケーションに対して，反応拡散方程式を利用した自律分散型制御は有効であると言える．

5. おわりに

本稿では，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パターン形成機構の実現性，実用性をシミュレーションおよび実システムを用いた実験により評価，検証した．その結果，制御間隔および制御パラメータを適切に設定し，通信回数削減手法を用いることにより，本実験程度の狭い領域においては，数分で望むパターンを形成でき，実用的であることを示した．

なお，本実験では，ノードが格子状に配置され，追加，移動，削除のないネットワークを対象としていたが，今後は，ランダムなノード配置やノードの追加，移動，削除の発生に対しても望むパターンを形成できる機構について検討する．また，経路制御やスケジューリングなどパターンを利用したセンサネットワーク制御について検討する．

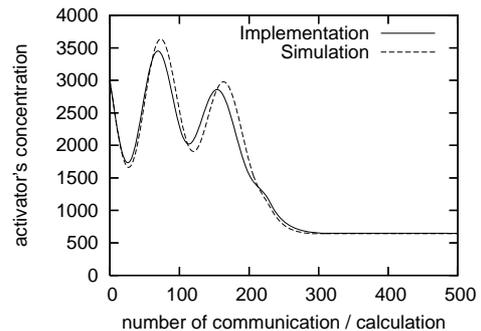


図 12 実機とシミュレーションの比較

6. 謝 辞

本研究の一部は，文部科学省 21 世紀 COE プログラム（研究拠点形成費補助金）および文部科学省科学技術振興調整費「先端融合領域イノベーション創出拠点の形成：ゆらぎプロジェクト」の研究助成によっている．また，本実験の一部は沖電気工業株式会社インターンシッププログラムにおいて行った．ここに記して謝意を表す．

文 献

- [1] N. Wakamiya and M. Murata: "Synchronization-Based Data Gathering Scheme for Sensor Networks", IEICE Transaction on Communications Special Section on Ubiquitous Networks, **E88-B**, pp. 873-881 (2005).
- [2] A. M. Turing: "The Chemical Basis of Morphogenesis", Royal Society of London Philosophical Transactions Series B, **237**, pp. 37-72 (1952).
- [3] Y. Chen and T. C. Henderson: "S-nets: Smart Sensor Networks", ISER (Eds. by D. Rus and S. Singh), Vol. 271 of Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer, pp. 81-90 (2000).
- [4] M. Durvy and P. Thiran: "Reaction-Diffusion Based Transmission Patterns for Ad Hoc Networks", INFOCOM 2005, **3**, pp. 2195-2205 (2005).
- [5] 青木勝司, 吉田篤, 荒木昭一: "アクティブカメラ群による対象追尾ならびに全観測領域の協調監視", FIT2005 第 4 回情報科学技術フォーラム, pp. 169-172 (2005).
- [6] J. D. Murray: "Mathematical Biology. I: An introduction", Springer, 3rd edition (2002).
- [7] 三池秀敏, 森義仁, 山口智彦: "反応・拡散系のダイナミクス", 非平衡系の科学 III, 講談社サイエンティフィック (1997).
- [8] S. Kondo and R. Asai: "A Reaction-Diffusion Wave on the Kin of the Marine Angelfish Pomacanthus", Nature, **376**, pp. 765-768 (1995).
- [9] 名古屋大学・近藤滋研究室ホームページ: "反応拡散波とは", <http://www.bio.nagoya-u.ac.jp/~z3/research/rdsoft.htm>.
- [10] 福永茂, 田川忠道, 福井潔, 谷本晃一, 菅野秀明: "ユビキタスセンサネットワークの開発", 沖テクニカルレビュー, **71**, 4, pp. 24-29 (2004).