

反応拡散モデルにもとづく 自律分散的なカメラセンサネットワーク制御機構の提案と評価

兵頭 克也[†] 若宮 直紀[†] 村田 正幸[†]

[†] 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

E-mail: †{k-hyodo,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 遠隔監視・観測を目的とするカメラセンサネットワークにおいては、通信容量の制限のため、対象物の位置に応じて符号化レートを調整することが求められる。本稿では、反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御方式を提案する。提案機構では、近隣ノードとのやりとりをとおして得られる局所的な情報にもとづいて反応拡散方程式を計算することによって、対象物の位置や移動速度に応じた符号化レートの分布パターンが形成される。シミュレーションにより、ノードの自律的な制御によって対象物を捉えているカメラと対象物の移動方向に位置するカメラの符号化レートが高く設定されるとともに、局所的な総データ量が通信容量を超えない符号化レート制御が実現されることを示している。

キーワード カメラセンサネットワーク, 反応拡散モデル, 生物システム, 自律分散制御

Proposal and Evaluation of a Reaction-Diffusion based Autonomous Control Mechanism of Camera Sensor Networks

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

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

E-mail: †{k-hyodo,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Although wireless camera sensor networks are useful and powerful means of monitoring and surveillance, the high volume of video data would cause serious network congestion and degradation of perceived video quality for the limited capacity of wireless communication. In this paper, we propose an autonomous control mechanism of video coding rate, where each node autonomously determines its coding rate based on information obtained through local communication. For this purpose, we applied a reaction-diffusion model, which explains the emergence of variety of animal coat patterns. A spot pattern of video coding rate, which is centered at the target position and spreads towards the moving direction, is generated through local interactions among neighboring nodes. Simulation results show the effectiveness of our proposal.

Key words Camera Sensor Network, Reaction-Diffusion Model, Biological System, Autonomous Control

1. はじめに

センシング機能と無線機能を持つ小型のセンサノードを配置し、ネットワークを構成することによって、配置環境の情報を収集することのできるセンサネットワーク技術は、工業、農業、流通、防犯、防災など幅広い分野への応用が期待されている。特に、カメラを備えたノードからなるカメラセンサネットワークは、監視、観測、ホームセキュリティなど安全・安心な社会

を支える技術の一つとして、近年、注目を集めている [1]。

センサネットワークにより、広い範囲で詳細な情報収集、観測を行うためには、多数のセンサノードを配置する必要がある。また、設置状態や環境の変化、ノードの移動や増減、停止などが生じた際も機能し続けることが求められる。そのため、センサネットワークの制御技術は、拡張性、適応性、耐故障性を有しなければならない。また、長時間動作のために低消費電力な制御が望まれることから、ネットワークやノードの状態管理、

制御のために制御メッセージを頻繁かつ大量にやりとりすることは避けなければならないが、したがって、それぞれのノードが周囲のノードとのやりとりを通して得た局所的な情報にもとづいて動作を決定する、自律分散型で自己組織的な制御が必要となる[2]。

さらに、カメラセンサネットワークにおいては、定常的に発生する動画像トラフィックを限られた通信容量で転送しなければならないという問題がある。無線ネットワークにおける動画像通信の品質制御については、帯域割当や再送制御、FEC (Forward Error Correction) による誤り訂正などさまざまな検討がなされているが、これらの技術は重度の輻輳状態にあるネットワークでは有効でない。本稿では、全てのカメラセンサノードが高品質、大容量の動画像データを生成、送出するとセンサネットワークが過度な輻輳におちいる環境において、ノードが通信容量と動画像データの重要度に応じて符号化レートを調整する自律分散制御を提案する。

例えば、平面上に構成されたカメラセンサネットワークにおいて、見守り対象の児童や不審者などの対象物を撮影範囲にとらえているカメラの符号化レートを高く、また、その周囲と移動方向のカメラの符号化レートを少し高くし、その他のカメラの符号化レートを低く設定した場合、カメラセンサネットワーク上に対象物の位置や速度に応じた符号化レートの分布パターンが現れる。本稿では、反応拡散モデルによるパターン形成機構を応用することにより、このような符号化レートの分布を自律的に形成する手法を提案する。反応拡散モデルは、アラン・チューリングによって提案された、動物の体表における模様形成過程を説明する数学モデルである[3]。反応拡散モデルでは、隣接する細胞間での形態因子のやりとりによって、因子濃度の分布が変化し、斑紋、網目、縞などさまざまなパターンが形成される。反応拡散モデルによる自律分散的なパターン形成をセンサネットワークにおける経路制御、クラスタリング、スケジューリングなどに適用する研究はすでにいくつか行われており[4]~[7]、我々はシミュレーションと実証実験によってそのような制御技術の実現可能性を検証している[6]。

本稿では、反応拡散モデルを利用することによって対象物の位置や速度に応じた符号化レート制御を行う。提案手法では、反応拡散モデルによって対象物を中心として移動方向に広がるスポット状の因子濃度分布のパターンを形成し、因子濃度に応じて符号化レートを決定する。また、複数の対象物が近接している場合にはパターンを小さくすることによって、符号化レートを低く抑え、局所的な通信容量超過による輻輳を回避する。

以降、2章において反応拡散モデルを利用したカメラセンサネットワーク制御手法について述べる。3章では提案手法のシミュレーション評価の結果を示し、提案手法の有効性について考察する。最後に、4章で本稿のまとめ、および今後の課題について述べる。

2. 反応拡散モデルにもとづくカメラセンサネットワーク制御機構

本稿では図1に示すような格子点に配置されたカメラセンサ

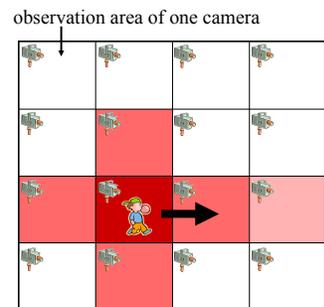


図1 カメラセンサネットワーク

ノードからなるカメラセンサネットワークを対象とする。それぞれのカメラの撮影範囲は矩形とし、撮影範囲内の対象物とその動きを検知できるものとする。また、それぞれのノードは上下左右方向の隣接ノードとのみ直接通信可能である。

2.1 基本動作

ノードは、一定間隔 T ごとの制御タイミングにおいて、隣接ノードから受信した情報に基づいて、反応拡散方程式を計算し、得られた因子濃度に応じて動画像の符号化レートを変更する。その後、活性因子濃度、抑制因子濃度、刺激情報を制御メッセージとして隣接ノードにブロードキャストする。なお、 t 番目の制御タイミングから $t+1$ 番目の制御タイミングまでを t 番目の制御インターバルと呼ぶ。全てのノードの制御インターバルは同じ長さであるが、制御タイミングは非同期である。すなわち、反応拡散方程式の計算、および制御メッセージの送信タイミングはノードごとに異なる。

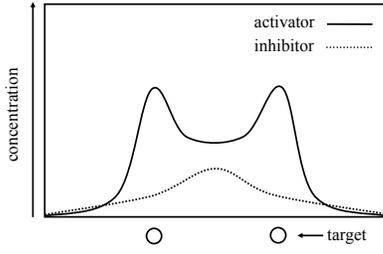
計算する反応拡散方程式は全てのノードで同じであり、提案手法では以下を用いる。

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = F(u, v) + D_u \nabla^2 u + E(t) \\ \frac{\partial v}{\partial t} = G(u, v) + D_v \nabla^2 v. \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 u は活性因子濃度、 v は抑制因子濃度である。 D_u, D_v は拡散係数である。また、 $E(t)$ は刺激量であり、 $E(t)$ が 0 より大きいノードを中心にスポットパターンが形成される。 F と G は因子間の反応を表す非線形関数であり、次式を用いる。

$$\begin{cases} F(u, v) = \max\{0, \min\{au - bv - c, M\}\} - du \\ G(u, v) = \max\{0, \min\{eu - hv - f, N\}\} - gv. \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 a, e は活性因子による活性化作用の強さ、 b, h は抑制因子による抑制作用の強さを表すパラメータである。また、 c, f は因子の単位時間あたり減少量を、 d, g は濃度に比例した因子の自己分解速度を表す。 M, N は反応速度の上限を表している。式(1)、(2)は、連続系の式であるが、センサネットワークではノードは離散的に配置され、かつ情報交換も定期的に行われるため、陽的差分法 (FDM: Finite Different Method) を用いて以下のように空間的、時間的に離散化する。



(a) 因子濃度分布

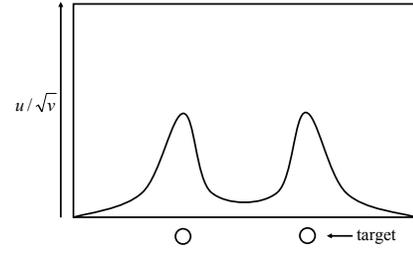
(b) u/\sqrt{v} の分布

図 2 複数の対象物が近接した場合の因子濃度の分布

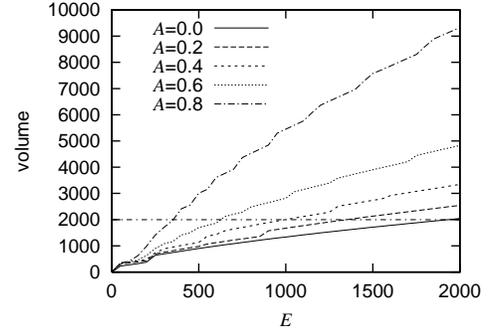
$$\left\{ \begin{array}{l} u_t = u_{t-1} + \Delta t \left\{ F(u_{t-1}, v_{t-1}) - du_{t-1} + E(t-1) \right. \\ \left. + D_u \frac{(u_{t-1}^u + u_{t-1}^d + u_{t-1}^l + u_{t-1}^r - 4u_{t-1})}{\Delta h^2} \right\} \\ v_t = v_{t-1} + \Delta t \left\{ G(u_{t-1}, v_{t-1}) - gv_{t-1} \right. \\ \left. + D_v \frac{(v_{t-1}^u + v_{t-1}^d + v_{t-1}^l + v_{t-1}^r - 4v_{t-1})}{\Delta h^2} \right\}, \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F(u_{t-1}, v_{t-1}) = \max\{0, \min\{au_{t-1} - bv_{t-1} - c, M\}\} \\ G(u_{t-1}, v_{t-1}) = \max\{0, \min\{eu_{t-1} - hv_{t-1} - f, N\}\}. \end{array} \right. \quad (4)$$

u_t, v_t はそれぞれ, t 番目の制御インターバルにおける活性因子濃度, 抑制因子濃度である. $u_{t-1}^u, u_{t-1}^d, u_{t-1}^l, u_{t-1}^r$ と $v_{t-1}^u, v_{t-1}^d, v_{t-1}^l, v_{t-1}^r$ は, それぞれ上下左右にある隣接ノードの $t-1$ 番目の制御インターバルでの活性因子濃度, 抑制因子濃度を表している. これらの情報は, $t-1$ 番目の制御インターバル中に隣接ノードから受信するメッセージに含まれる. パケットロスや遅延などによる受信漏れが生じた場合は, 以前の制御インターバルで受信した情報のうち最新のものを使用する. Δh と Δt は, それぞれ格子間距離, 時間の離散ステップである.

式 (3) 中の $E(t-1)$ は, $t-1$ 番目の制御インターバルで受信した隣接ノードの刺激情報, およびノード自身の刺激情報に基づいて設定される刺激量である. 刺激情報は, 刺激量 E , 減衰係数 A ($0 \leq A < 1$), 刺激の拡散方向 (上, 下, 左, 右), およびフラグ NIP (Notification of Inhibitor Peak, 0 または 1) からなる. 刺激量 E , 減衰係数 A , 拡散方向は, 撮影範囲内に対象物を検出したノードによってその速度に応じて設定され, ノード間中継によって伝播する. 刺激が対象物の移動方向へ拡散することによって, 対象物の移動方向に広がるパターンが形成される (図 1). 刺激の配置についての詳細は 2.2 章で述べる. また, NIP は, 複数の対象物が近接している場合に刺激量を調整するために用いる. NIP に関しては, 2.3 章で述べる.

反応拡散方程式を計算することによって算出した因子濃度 u_t, v_t を t 番目の制御インターバル中に使用する符号化レートに変換する. 二つの対象物がある場合の因子濃度分布を図 2(a) に示す. 図に示されるように, 活性因子濃度に合わせて符号化レートを設定すると, 近接した対象物間の領域において不必要に符

図 3 刺激量 E , 減衰係数 A , パターン体積の関係

号化レートが高くなってしまいうため, 提案機構では u/\sqrt{v} にもとづいて符号化レートを定める (図 2(b)). なお, $v < 0.001$ の場合には $u/\sqrt{v} = 0$ とする.

2.2 刺激配置

反応拡散モデルでは, 刺激を中心にスポットパターンが形成されるため, 対象物の移動速度にあわせて刺激を拡散することにより, 図 1 に示すような符号化レートの分布パターンを生成する.

ある制御インターバルにおいて, カメラの撮影範囲に対象物を検出したノードは, 対象物の移動速度にもとづいて, 刺激量 E , 減衰係数 A , 刺激の拡散方向を決定し, 刺激情報として次にブロードキャストする制御メッセージに含める. なお, 拡散方向は, 簡単化のために上下左右のみとする. 刺激情報を含む制御メッセージを受け取ったノードは, 自身が刺激の拡散方向に位置する場合には自ノードにおける刺激量 $E' = A \times E$ を求め, そうでなければ刺激情報を無視する. ノードは, 制御タイミングにおいて, 制御インターバルで受信した制御メッセージ中の全ての刺激量と自らが対象物を検出している場合にはその刺激量のうち, 最大のものを $E(t-1)$ とし, 反応拡散方程式を計算する. その後, それぞれの刺激情報内の刺激量 E をそれぞれ算出した E' に置き換え, 自身の活性因子濃度などの情報とあわせて制御メッセージとしてブロードキャストする.

刺激によって形成されるパターン, すなわち u/\sqrt{v} の分布に応じて符号化レートが設定されることから, 動画像トラヒックの総量が無線通信容量を超過しないよう, 対象物を検出したノードは刺激量 E と減衰係数 A を決定しなければならない.

表 1 パラメータ設定

parameter	value	parameter	value
a	0.08	h	0.06
b	0.2	D_u	0.004
c	0.2	D_v	0.1
d	0.03	M	0.2
e	0.1	N	0.5
f	0.05	Δt	2.0
g	0.14	Δh	1

表 2 移動の速さに対する刺激量と減衰係数の設定

V (km/h)	A	Upper limit of E	Lower limit of E
$V = 0$	0.0	1960	830
$0 < V \leq 2$	0.2	1370	700
$2 < V \leq 4$	0.4	1010	440
$4 < V \leq 6$	0.6	620	390
$6 < V$	0.8	360	260

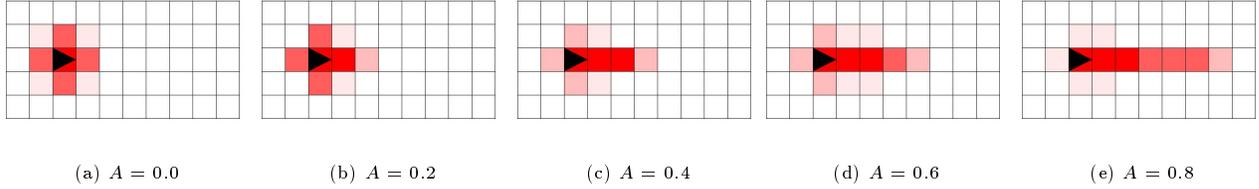


図 4 減衰係数 A を変化させた場合のパターン形状の変化

図 3 は、一つの対象物に対する刺激量 E 、減衰係数 A と形成されたパターンの体積の関係を示している。なお、パターン体積は以下の式で定義する。

$$v(E, A) = \sum_{(i,j) \in F} u(i, j) / \sqrt{v(i, j)}. \quad (5)$$

F はある領域内にあるノードの座標集合であり、 F を全ノードの座標集合とした場合の $v(E, A)$ をパターン体積と呼ぶ。また、ある限られた領域内のノードの座標集合として F を与えたものを局所パターン体積と呼ぶ。 $u(i, j)$ 、 $v(i, j)$ は、それぞれ座標 (i, j) にあるノードの活性因子濃度、抑制因子濃度であり、 $u(t) / \sqrt{v(t)}$ を符号化レートとした場合、パターン体積はある時間に全ノードから送出される総動画像トラヒックを表す。図 3 より、刺激量 E に比例してパターン体積が増加することが分かる。また、減衰係数 A を増加させると、刺激がより広く伝播することから、同じ刺激量 E に対するパターン体積が増加することがわかる。そこで、ノードはまず対象物の速さに応じた広がりを持つパターンが形成できるよう減衰係数 A を決定し、次にこの関係にもとづいてパターン体積が一定になるような刺激量 E を求める。例えば、ある領域内の無線通信容量が 2000 であり、対象物の速さから減衰係数 A が 0.4 と定められた場合、刺激量 E は 1010 となる。

2.3 刺激調整

2.2 節で述べた刺激の設定法により、単一の対象物については生成される動画像トラヒックを一定に抑えることができる。しかしながら、複数の対象物が存在する場合には、近接したパターンが結合することにより、動画像トラヒックが局所的な無線通信容量を超過する。そこで、スポットパターンの衝突を検知し、刺激を減少させることにより、パターンを小さくし、動画像トラヒックを抑える手法を提案する。

制御タイミングにおいて、ノードは自身と隣接ノードの抑制因子濃度を比較する。もし、自身の抑制因子濃度が最も高く、かつ自身の撮影範囲に対象物がない場合は、自ノードの位置で

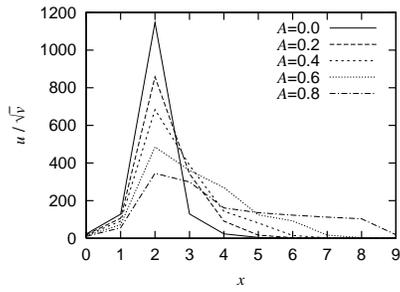
パターンが衝突していると判断し、制御メッセージの刺激情報の NIP を 1 に設定する。対象物を撮影範囲に検知し、刺激を設定しているノードに衝突が通知されるよう、NIP が設定された制御メッセージを受信したノードは、まず、そのメッセージを送信した隣接ノードと u / \sqrt{v} および刺激量 E の値を比較する。自身の u / \sqrt{v} または刺激量 E の方が高い場合、そのノードはより刺激の近くに位置すると考えられるため、次にブロードキャストする制御メッセージの刺激情報の NIP を 1 に設定する。また、隣接ノードが対象物を検出している場合も制御メッセージの NIP を 1 に設定する。そうでない場合、NIP を 0 に設定する。

対象物を検出しているノードは、NIP が 1 に設定された制御メッセージを受信すると、対象物に関する刺激量 E を $E \times \alpha$ ($0 < \alpha < 1$) として減少させる。減少した刺激量 E は制御メッセージの交換によって伝播し、より小さなスポットパターンが形成されることにより、動画像トラヒックを抑えることができる。なお、刺激が過剰に減少し、複数個の対象物を撮影している場合に、一つの対象物を撮影している場合よりも、局所的なパターン体積が低くなることを避けるため、パターン体積が無線通信容量の半分となる刺激量を下限値とする。

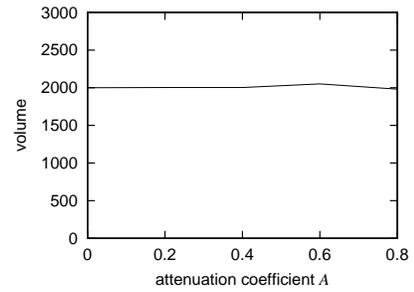
一方、十分に刺激が小さくなった場合、あるいは、対象物の移動などによってパターンの衝突が消失した場合などには、再度刺激量 E を増加させる必要がある。そこで、対象物を検知しているノードは、制御インターバル間に NIP が 1 に設定された制御メッセージを受信しなかった場合、次の制御タイミングにおいて $E = E + \Delta e$ として刺激量を増加させる。ただし、2.2 節で求められる刺激量を上限とする。

3. シミュレーション

反応拡散モデルにもとづくカメラセンサネットワーク制御機構の有効性について、シミュレーションによって評価し、考察を行う。1 km 四方の領域に 100 m 間隔で 100 個のノードを配

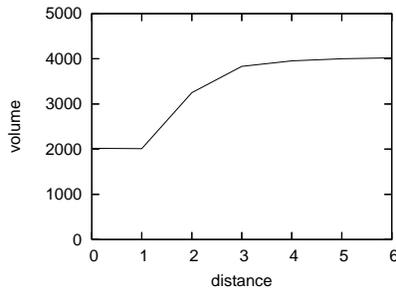


(a) u/\sqrt{v} の分布

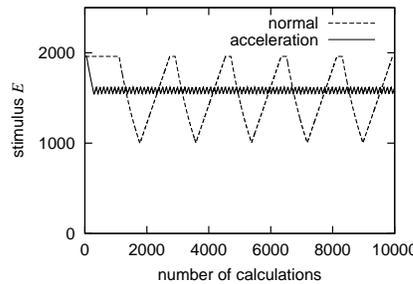


(b) パターン体積

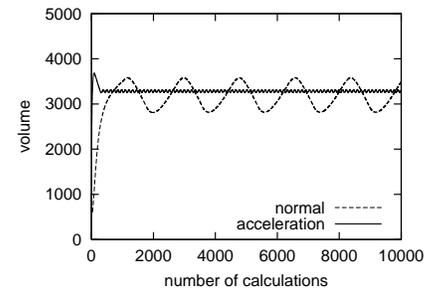
図5 速度と u/\sqrt{v} 分布およびパターン体積の関係



(a) 二つの対象物間距離とパターン体積



(b) 刺激量の変化



(c) パターン体積の変化

図6 二つの静止した対象物が存在する場合のシミュレーション

置する．反応拡散方程式のパラメータ設定を表1に示す．ここでは，離散ステップ Δt を大きくすることによってパターン形成の高速化を図っている [6]．また，対象物の移動にあわせた刺激量 E ，減衰係数 A の設定を表2にそれぞれ示す．ここでは， $u(t)/\sqrt{v(t)}$ を符号化レートとし，無線通信容量を2000としている．また，刺激調整のためのパラメータは $\alpha = 0.999$ ， $\Delta e = 1$ とする．シミュレーション開始時のノードの活性因子濃度，抑制因子濃度は0とする．

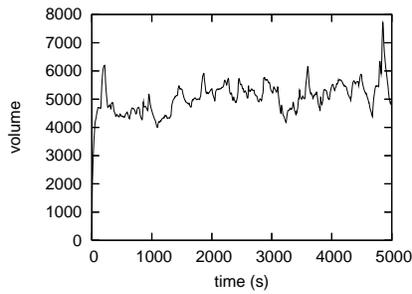
図4に，静止した対象物 ($A = 0.0$)，および右方向への速度1, 3, 5, 7 km/h ($A = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$) を持つ対象物に対して形成されるパターンを示す．黒い三角が対象物を，それぞれの四角がカメラセンサノードの撮影範囲を表し，色の濃さが符号化レートの高さを示している．また，図5(a)に u/\sqrt{v} の分布を，図5(b)にパターン体積を示す．これらの図より，移動速度が速くなるにつれて形成されるパターンが右方向に伸びていき，また，総動画像トラフィックが一定に保たれるように符号化レートが調整されていることがわかる．

次に，対象物が近接した際の刺激調整の効果を評価する．2つの静止した対象物間の距離を変化させた場合の，対象物間距離とパターン体積の関係を図6(a)に示す．なお，距離0は対象物が一つの場合の結果である．シミュレーションでは，対象物間距離が1または2の場合にパターンの衝突が発生し，NIPにより刺激が調整されている．図より，対象物が近接度合いによって総動画像トラフィックが抑えられることがわかり，局所的

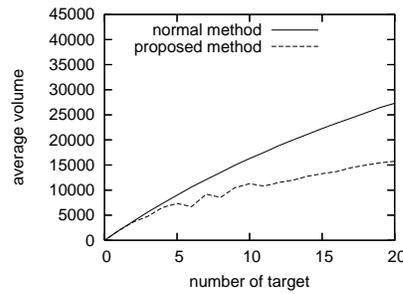
な無線通信容量の超過を防げることがわかる．また，対象物間距離が2の場合の刺激量とパターン体積の変化をそれぞれ図6(b)，図6(c)に示す．図に示されるとおり，重なりが発生，消失による振動が見られるものの，それほど大きくないことがわかる．なお，“normal”は離散ステップ Δt を0.1としてパターン形成の高速化を行わない場合の結果であり，変動が大きいためである．

最後に，図7に複数の対象物がランダムに移動する場合のシミュレーション結果を示す．シミュレーションでは，対象物に関して，撮影しているノードの座標，移動方向（上，下，左，右），速さ V (0~8 km/h) を管理しており，制御タイミングごとに，0.5%の確率で移動方向と，速さ V を変更する．制御インターバルは2秒とし， $180/V$ 回の制御タイミングごとに対象物は移動方向のノードへ移動する．ここで， $180/V$ は， V km/hで100 m進むのに要する時間である．また，パターン衝突を検出した場合に，高速にパターンを縮小するために $\alpha = 0.9$ とする．

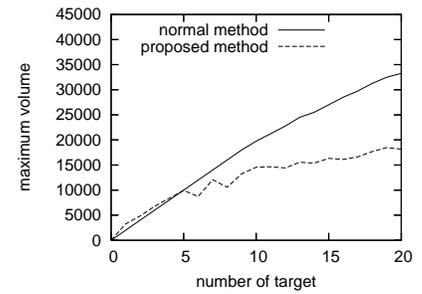
図7(a)に，3つの対象物がある場合のパターン体積の時間変化を示す．対象物間の距離や速度の変化に応じてパターン体積が変動している．また，一つの対象物でのパターン体積が2000になるように刺激量と減衰係数を設定しているのに対し，パターン体積が6000を超えている場合がある．これは，高速で移動する対象物の後方に符号化レートの高い領域が残るためであり，パターン形成のさらなる高速化が必要である．



(a) 3つの移動する対象物が存在する場合のパターン体積の変化



(b) 対象物数とパターン体積の平均



(c) 対象物数とパターン体積の最大値

図7 複数の対象物が存在する場合のシミュレーション結果

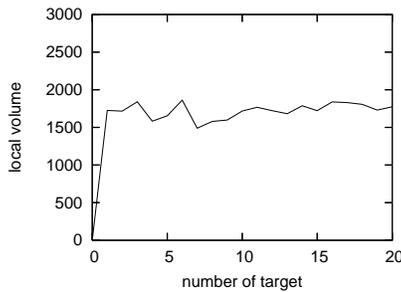


図8 局所的なパターン体積

ノード数を1から20まで変化させた場合の、パターン体積の平均値と最大値を単純な機構による符号化レート制御と比較した結果を図7(b)と図7(c)に示す。比較対象では、撮影範囲に対象物のあるノードは符号化レートを1000に、その隣接ノードでは250とし、それ以外のノードでの符号化レートを0とする。図より、対象物の有無に応じて固定的に符号化レートを設定する機構と比較して、提案機構の方が平均パターン体積、最大パターン体積ともに低いことがわかり、無線通信容量の超過を抑えられると考えられる。

さらに、ノード数を1から20まで変化させた場合の、局所パターン体積の最大値を図8に示す。ここでは、中心に位置するノードとその四方向に隣接するノードを対象領域 F とした。図より、移動する対象物の位置、数によらず、これらのノードにおける動画像トラフィックの総量は設定値である2000を下回っており、局所的な無線通信容量の超過を抑制できることがわかる。

なお、2500個のノードを使用した大規模カメラセンサネットワークにおいても同様に、効果的な制御ができることを確認した。

4. おわりに

本稿では、カメラセンサネットワークのための反応拡散モデルにもとづく符号化レート制御機構を提案した。提案手法では、ノードは定期的に隣接ノードと因子情報、刺激情報を交換し、反応拡散方程式を計算することによって、自律分散的に対象物の位置や速度に応じた符号化レートを決定することができる。

ただし、シミュレーションにより、高速に移動する対象物に

対するパターン形成が十分に追従できていないことがわかったため、パターン形成のさらなる高速化が必要がある。また、対象物の移動速度に応じた刺激量と減衰係数の設定手法(表2)や、因子濃度 u/\sqrt{v} と符号化レートのマッピング、および不規則なノード配置における符号化レート制御についても今後の研究課題としたい。

5. 謝辞

本研究の遂行において、中口悦史助教(大阪大学大学院情報科学研究科)には多大なるご協力を頂いた。また、本研究の一部は、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行っている。ここに記して謝意を表す。

文献

- [1] I. F. Akyildiz, T. Melodia and K. R. Chowdhury: "A Survey on Wireless Multimedia Sensor Networks", *Computer Networks*, **51**, 4, pp. 921-960 (2007).
- [2] H. Chan and A. Perrig: "ACE: An Emergent Algorithm for Highly Uniform Cluster Formation", *Proceedings of the First European Workshop on Sensor Networks (EWSN)*, pp. 154-171 (2004).
- [3] A. M. Turing: "The Chemical Basis of Morphogenesis", *Royal Society of London Philosophical Transactions Series B*, **237**, pp. 37-72 (1952).
- [4] Y. Chen and T. C. Henderson: "S-nets: Smart Sensor Networks", *Proceedings of International Symposium on Experimental Robotics*, pp. 85-94 (2000).
- [5] M. Durvy and P. Thiran: "Reaction-Diffusion Based Transmission Patterns for Ad Hoc Networks", *Proceedings of IEEE INFOCOM 2005*, Vol. 3, pp. 2195-2205 (2005).
- [6] K. Hyodo, N. Wakamiya, E. Nakaguchi, M. Murata, Y. Kubo and K. Yanagihara: "Experiments and Considerations on Reaction-Diffusion based Pattern Generation in a Wireless Sensor Network", *Proceedings of 1st IEEE International Workshop: From Theory to Practice in Wireless Sensor Networks (t2pWSN 2007)* (2007).
- [7] A. Yoshida, K. Aoki and S. Araki: "Cooperative Control Based on Reaction-Diffusion Equation for Surveillance System.", *Proceedings of Ninth International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, pp. 533-539 (2005).